ISSN 1311-0829

ГОДИШНИК НА ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-СОФИЯ

Том 62, книга 3, 2012

PROCEEDINGS OF TECHNICAL UNIVERSITY OF SOFIA

Volume 62, Issue 3, 2012

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 62 кн. 3

МАТЕМАТИКА, АВТОМАТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНИКА, ТРАНСПОРТ, ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

1. **Богдан Гилев** 9
Моделиране на ветрогенератор и прогнозиращо управление с невронна мрежа

2. **Петя Милушева, Георги Милушев** 19
Статистически контрол при интегрирано осигуряване на качеството в шивашката промишленост

3. **Пламен Цветков, Георги Милушев, Николай Гуров**. 29
Метрологично осигуряване на контрола на качеството на електрическата енергия

4. **Красимира Проданова** 39
Симулация на индивидуалната поддържаща лекарствена доза на базата на компартиментен модел на организма

5. **Красимира Проданова** 49
Оптимизация на поддържащата терапия на базата на компартиментен подход за моделиране на организма

6. **Райна Ценева, Петър Динев**. 59
Специфично прорязване на скрепителните отвори в болтови шинни съединения

7. **Райна Ценева, Янко Славчев, Микел Октавио**. 67
Моделиране на електрическо поле в болтови шинни съединения с прорязани отвори

8. **Емил Николов**. 75
Управление с алгебрично Lie-диференциране и анихилатори - I част

9. **Емил Николов**. 85
Управление с алгебрично Lie-диференциране и анихилатори - II част

10. **Тодор Йонков** 95
Каскадни структури за управление в системите за сградна автоматизация

11. **Тодор Йонков** 105
Енергоикономично управление на вентилационна сградна система

12. **Евтим Йончев**. 115
Метод за оценяване на магнитното състояние на асинхронни електродвигатели

13. **Иван Кралов, Красимир Неделчев, Игнат Игнатов**. 123
Експериментално изследване на шума, генериран при движение на колоос по релсов път

14. **Кирил Стойков** 133
Електромагнитно оразмеряване на токоограничаващи реактори със стоманен магнитопровод и въздушни междини за работа с трансформатори за напрежение 400kV

15. **Кирил Стойков** 141
Токоограничаващи реактори за електропещни трансформатори

16. **Симона Филипова-Петракиева**. 149
Оптимизация на метода на Хакими за определяне абсолютен център на неориентиран граф

17. **Калин Филипов**. 159
Загуба на ядрени знания - очаквани затруднения и възможни подходи за тяхното преодоляване

18. **Силвия Бойчева**. 167
Термични характеристики на летяща пепел от изгарянето на лигнитни въглища в топлоелектрическа централа

19. **Димитър Попов**, **Милко Йовчев**, **Петьо Гаджанов** 175
Аминни технологии за улавяне на CO_2 във въглеродочистващите инсталации на термичните електроцентрали - технология на фирма „Cansolv Technologies Inc.“ (CTI) - Канада

20. **Костадин Миланов**, **Минчо Минчев и Михаела Славкова**. 183
Изследване на DC/DC преобразовател с мостов инвертор със средна точка с помощта на Pspice

21. **Боян Димитров**. 189
Изследване ефективността на режимите при извличане на сметищен газ от депо „СУХОДОЛ”

22. **Ивайло Ганев** 193
Верификация на моделите, използвани за прогнозиране на средния годишен добив на сметищен газ от депо „СУХОДОЛ”

23. **Емил Рац**, **Цветелина Петрова**. 199
Изследване на хибриден двигател на Stirling

24. **Санислав Енев** 209
Моделно предсказващо управление на лабораторен топлинен обект

CONTENTS Volume 62 Issue 3

MATHEMATICS, AUTOMATICS, ELECTROTECHNICS, TRANSPORTATION, ELECTRO-ENERGETICS

1. Bogdan Gilev. 9
Model of a Wind Turbine and Neural Predictive Control

2. Petja Miluscheva, George Milushev 19
Statistical Control at the Integrated Quality Assurance of the Sewing Industry

3. Plamen Tzvetkov, George Milushev, Nikolay Gourov 29
Metrology Assurance of the Electrical Power Quality Control

4. Krassimira Prodanova 39
Simulation of the Individual Maintenance Drug Dose Basis on Compartment Model of the Body

5. Krassimira Prodanova 49
Optimization of the Maintenance Therapy Basis on Compartment Approach of Modelling the Body

6. Raina Tzeneva, Peter Dineff 59
Specific Slotting of Fastening Holes in Bolted Busbar Assemblies

7. Raina Tzeneva, Yanko Slavchev, Mikel Octavio. 67
Modeling of Electric Field in Bolted Busbar Assemblies with Slotted Holes

8. Emil Nikolov. 75
Control with Algebraic Lie-Differentiation and Annihilators - part I

9. Emil Nikolov. 85
Control with Algebraic Lie-Differentiation and Annihilators - part II

10. Todor Ionkov. 95
Cascading Management Structures in Building Automation Systems

11. Todor Ionkov 105
Energy-Saving Control of Ventilation Building System

12. Evtim Yonchev. 115
Estimating Magnetic State Method of Induction Motor

13. Ivan Kralov, Krasimir Nedelchev, Ignat Ignatov. 123
Experimental Study of the Noise Generated by Wheel-Rail Interaction

14. Kiril Stoykov 133
Electromagnetic Design of the Current-Limiting Reactors with Steel Ferromagnetic Core and Nonmagnetic Interspaces Working with 400 kV Transformers

15. Kiril Stoykov 141
Current - Limiting Reactors for Furnace Transformers

16. Simona Filipova-Petrakieva 149
Optimization of the Hakimi Method for Determining the Absolute Center of the Undirected Graph

17. Kalin Filipov. 159
Nuclear Knowledge Loss - Anticipated Difficulties and Possible Approaches to Overcome Them

18. Sylvia Boycheva. 167
Thermal Characteristics of Fly Ash from the Incineration of Lignite Coals in a Thermal Power Plant

19. Dimitar Popov, Milko Iovchev, Petyo Gadjanov. 175
Amines Based Technologies for CO_2 Capture from Thermal Power Plants Flue Gases - Technology of „Cansolv Technology Inc.“ - Canada

20. Kostadin Milanov, Mintcho Minchev and Michaela Slavkova 183
Investigation of DC/DC Full Bridge Converter with Center-Tapped Transformer via Pspice

21. Boian Dimitrov. 189
Research on the Effectiveness of the Regime of Extracting Landfill Gas Landfill "SUHODOL"

22. Ivaylo Ganev 193
Validation of a Model Predicting the Mean, Annual Landfill Gas Generation in Lanfill "SUHODOL"

23. Emil Ratz, Tzvetelina Petrova 199
Investigation of a Hibrid Stirling Engine

24. Stanislav Enev. 209
Model Predictive Control of a Laboratory Heat-Exchange Process Experiment

Author's Index Volume 62 Issue 3

№	author	author	page
1	Bogdan	Gilev	9
2	Boian	Dimitrov	189
3	Dimitar	Popov	175
4	Emil	Nikolov	75, 85
5	Emil	Ratz	199
6	Evtim	Yonchev	115
7	George	Milushev	19, 29
8	Ignat	Ignatov	123
9	Ivan	Kralov	123
10	Ivaylo	Ganev	193
11	Kalin	Filipov	159
12	Kiril	Stoykov	133, 141
13	Kostadin	Milanov	183
14	Krasimir	Nedelchev	123
15	Krassimira	Prodanova	39, 49
16	Michaela	Slavkova	183
17	Mikel	Octavio	67
18	Milko	Iovchev	175
19	Mintcho	Minchev	183
20	Nikolay	Gourov	29
21	Peter	Dineff	59
22	Petja	Miluscheva	19
23	Petyo	Gadjanov	175
24	Plamen	Tzvetkov	29
25	Raina	Tzeneva	59, 67
26	Simona	F.-Petrakieva	149
27	Stanislav	Enev	209
28	Sylvia	Boycheva	167
29	Todor	Ionkov	95, 105
30	Tzvetelina	Petrova	199
31	Yanko	Slavchev	67

Volume 62 Issue 3

pages	articles	authors
218	24	31

Годишник на Технически Университет - София, т. 62, кн.3, 2012
Proceedings of the Technical University - Sofia, v. 62, book 3, 2012

МОДЕЛИРАНЕ НА ВЕТРОГЕНЕРАТОР И ПРОГНОЗИРАЩО УПРАВЛЕНИЕ С НЕВРОННА МРЕЖА

Богдан Гилев

Резюме: *Развитието на алтернативните източници на енергия, в частност на ветрогенераторите поставя нови задачи пред управлението им. В работата се предлага ефективна съвременна методология за моделно базирано управление на системата турбина-генератор. Използвана е невронна мрежа, на базата на която е синтезирано прогнозиращото управление. За обучението на невронната мрежа се използва математичен модел, състоящ се от нелинейна система алгебрични и диференциални уравнения. Анализирани са явленията, определящи поведението на системата при различни скорости на вятъра. Направено е сравнение на поведението на системата при използване на класически методи за управление и предлагания от авторите метод.*

Ключови думи: *ветрогенератор, математично моделиране, моделно прогнозиращо управление, невронна мрежа.*

MODEL OF A WIND TURBINE AND NEURAL PREDICTIVE CONTROL

Bogdan Gilev

Abstract: *The development of alternative energy source sets new tasks for wind turbine controlling. In this work is used an effective modern technique of model based control of turbine-generator system. Predictive controller based on a neural network is designed. To train the neural network a mathematical model is developed. This model consists of the non-linear algebraic and differential equations. The behavior of the system under different operating modes is analyzed. The behavior of the system using classical control methods and proposed method is compared.*

Keywords: *wind turbine, mathematical model, model predictive control, neural network*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Основно един ветрогенератор (ВГ) се състои от вятърна турбина, предавка и електрогенератор.

Електрогенераторът се свързва към електрическата мрежа или директно, или посредством система за честотно преобразуване. При директно свързване към

© 2012 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

мрежата скоростта е фиксирана от честотата на мрежата, докато при работа с честотен преобразовател скоростта на ротора е променлива.

В зависимост от скоростта на вятъра могат да се обособят три зони на работа на ВГ. В зона едно средната скорост на вятъра V е в границите $V < V_{\min}$ или $V > V_{\max}$. В този случай турбината е изключена. В зона две средната скорост на вятъра V е в границите $V_{\min} < V < V_{nom}$. В тази зона се поддържа максимално възможен коефициент на полезно действие $C_p(\lambda,ß)$. Този коефициент е функция на ъгъла на завъртане на лопатките $ß$ и коефициента на специфичната скорост λ. При фиксиран ъгъл на завъртане на лопатките $ß$ коефициента C_p има максимум за една единствена стойност на λ. Понеже $\lambda = \omega_r R / V$, където ω_r е скорост на ротора, R е радиус на турбината и V е скорост на вятъра, то за да се подържа $\lambda_{\max}$ при промяна на скоростта на вятъра V е необходимо да се променя скоростта на турбината ω_r. Това налага използване на ВГ с променлива скорост. Средната скорост на вятъра V в третата зона се дава от ограничението $V_{nom} < V < V_{\max}$. Това е зоната на максимален товар. Номиналната скорост на вятъра V_{nom} е минималната скорост, при която се получава номинална мощност. Затова при скорости на вятъра над номиналната, изходната мощност трябва да се намали за да се избегне претоварване на генератора. В зона три мощността се поддържа на номинална стойност посредством промяна на ъгъла на завъртане на лопатките $ß$.

Класически системи за управление с PID контролери са били приложени за няколко големи ВГ от 70-те и 80-те години. Повечето ВГ от това време са с постоянна скорост и са имали твърди трансмисии и ротори с голяма инерция. Установено е, че турбуленцията на вятъра лесно възбужда първата собствена честота на първата собствена форма на усукване на трансмисията. Системите за управление от това време са се стремили да регулират мощността и същевременно да демпфират първата собствена честота, чрез промяна на ъгъла на атака на лопатките [1]. За целта са се използвали бързодействащи системи за управление на ъгъла на атака, работещи в честотен интервал [0.2, 2] rad/s [2]. Тези системи водят до задоволителното намаляване на натоварването от нискочестотни ветрови смущения. Оказало се обаче, че за намаляване на трептенето на конструкцията, породено от високочестотните ветрови смушения е нужна друга управляваща система. Повечето съвременни ВГ са с променлива скорост понеже те имат две основни предимства. Те генерират максимално възможна изходна мощност и ползват по-бавна система за управление на ъгъла на завъртане на лопатките [3].

В [4] е предложена система за управление на завъртането на лопатките на вятърна турбина KaMeWa с използване на линеен квадратичен регулатор (LQR). Проектираният контролер се използва за постигане на максимална мощност, като едновременно с това се внася и необходимото демпфиране върху важни собствени честоти на трептене. Освен това за да се намали натоварването на лопатките от тангенциалната сила на вятъра се прилага и индивидуално управление на всяка лопатка.

Друга техника за управление е техниката на адаптивното управление. Тази техника използва променливи коефициенти на усилване, които се „адаптират” към

променящите се условия. В [5] се изследва адаптивна схема с регулируем по време наблюдател на състоянията. Отчетени са задоволителни симулационни резултати за схеми базирани на комбинирано измерване на изходната мощност и на скоростта на вала.

2. МОДЕЛ НА ТУРБИНАТА

Моделът на турбината включва моделиране на скоростта на вятъра и на въртящия момент на турбината.

2.1. МОДЕЛИРАНЕ СКОРОСТТА НА ВЯТЪРА

Нормално разпределен случаен сигнал (бял шум) към които се прибавя постоянна съставка (явяваща се средната скорост на вятъра) се пропуска през филтри на Кайман и изглаждащи хармонични филтри. В резултат се получава времеви ред симулиращ скоростта на вятъра [6].

2.2. МОДЕЛ НА ТУРБИНАТА

Въртящият момент на турбината може да бъде апроксимиран с нелинейна зависимост. След привеждане в относителни единици тази зависимост добива вида [7]

$$T_m = -\frac{(V/V_{nom})^3 (C_p(\lambda,\beta)/C_{p,nom})0.9}{\omega_r}, \text{ където } \lambda = \frac{(\omega_r/\omega_{r,nom})(V_{nom}/V)}{\lambda_{nom}} \quad (1),$$

където:

$\lambda = \omega_r R/V$ - коефициент на специфичната скорост;

$$C_p(\lambda,\beta) = 0.5176(\frac{116}{\lambda_1} - 0.4\beta - 5)e^{-\frac{0.0068}{\lambda_1}} + 0.0068\lambda, \text{ за } \frac{1}{\lambda_1} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1};$$

V - скорост на вятъра;

ω_r - ъглова скорост на турбината;

R – радиус на турбината;

C_p - коефициент на полезно действие;

β - ъгъл на наклона на лопатката на турбината;

T_m - въртящ момент на турбината;

$A = \pi R^2$;

ρ - плътност на въздуха.

Напречната сила на вятъра приложена във върха на мачтата се определя по формулата

$$F = \rho\pi R^2 C_t(\lambda,\beta)V^2/2 \quad (2),$$

където C_t е коефициент, който се задава таблично. Останалите означения са същите като в уравнение (1).

3. МОДЕЛ НА ЕЛЕКТРО ГЕНЕРАТОРА

Съвместно се моделират механичната част на електро генератора и трансмисията. За целта въртящият момент на вала на турбината се привежда към момента

на вала на ел. генератора и се получава едномасов модел. Отделно се моделира електрическата част на генератора.

3.1 ЕДНОМАСОВ МОДЕЛ

Този модел се опива със следната система диференциални уравнения [7]

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{1}{2H}(-T_m + T_e - F\omega_r) \\ \frac{d\theta}{dt} &= k\omega_r \end{aligned} \qquad (3),$$

където:

k е мащабиращ коефициент (въвежда се понеже освен θ останалите величини в системата (3) са в относителни единици);

H - инерционна константа;

F - коефициент на триене;

T_e - електрически съпротивителен момент на генератора;

T_m - механичен въртящ момент на турбината.

3.2. МОДЕЛ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКАТА ЧАСТ НА ГЕНЕРАТОРА

Моделира се асинхронен генератор с навит ротор (асинхронен генератор с захранване на ротора и на статора) [7].

Входните напрежения се привеждат към безразмерни величини

$$\begin{aligned} u_{ab} &= U_{ab}/U_1 \\ u_{bc} &= U_{bc}/U_1 \end{aligned}, \text{ където } U_1 = 470 = \frac{575\sqrt{2}}{\sqrt{3}}.$$

След това тези напрежения се привеждат към qd -оси

$$\begin{aligned} u_{qr} &= \frac{1}{3}(2u_{ab} + u_{bc}) & u_{qs} &= \frac{1}{3}(2u_{ab}\cos\theta + (\cos\theta + \sqrt{3}\sin\theta)u_{bc}) \\ u_{dr} &= -\frac{\sqrt{3}}{3}u_{bc} & u_{ds} &= \frac{1}{3}(2u_{ab}\sin\theta + (\sin\theta - \sqrt{3}\cos\theta)u_{bc}) \end{aligned},$$

където θ се определя от (3).

Пресмятат се потоците в ротора

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi_{qr}}{dt} &= k\left(u_{qr} - \Phi_{dr}(\omega - \omega_r) + \frac{R_r}{L_r}\Phi_{qm} - \frac{R_r}{L_r}\Phi_{qr}\right) & i_{qr} &= -\frac{1}{L_r}\Phi_{qm} + \frac{1}{L_r}\Phi_{qr} \\ \frac{d\Phi_{dr}}{dt} &= k\left(u_{dr} + \Phi_{qr}(\omega - \omega_r) + \frac{R_r}{L_r}\Phi_{dm} - \frac{R_r}{L_r}\Phi_{dr}\right) & i_{dr} &= -\frac{1}{L_r}\Phi_{dm} + \frac{1}{L_r}\Phi_{dr} \end{aligned},$$

където $R_r = 0.005\ pu$, $L_r = 0.156\ pu$, $\omega - \omega_r = 0$ - понеже на ротора се подава захранване и k мащабиращ коефициент /същия както в (3)/.

Взаимните потоци са

$$\Phi_{qm} = \frac{L_q}{L_r}\Phi_{qr} + \frac{L_q}{L_s}\Phi_{qs} \qquad \Phi_{dm} = \frac{L_d}{L_r}\Phi_{dr} + \frac{L_d}{L_s}\Phi_{ds},$$

където $L_s = 0.171\ pu$ и $L_q = L_d = 0.0793\ pu$.

Потоците в статора са

$$\frac{d\Phi_{qs}}{dt} = k\left(u_{qs} - \Phi_{ds}\omega_r + \frac{R_s}{L_s}\Phi_{qm} - \frac{R_s}{L_s}\Phi_{qs}\right) \qquad i_{qs} = -\frac{1}{L_s}\Phi_{qm} + \frac{1}{L_s}\Phi_{qs}$$

$$\frac{d\Phi_{ds}}{dt} = k\left(u_{ds} + \Phi_{qr}\omega_r + \frac{R_s}{L_s}\Phi_{dm} - \frac{R_s}{L_s}\Phi_{ds}\right) \qquad i_{ds} = -\frac{1}{L_s}\Phi_{dm} + \frac{1}{L_s}\Phi_{ds},$$

където $R_s = 0.00706\ pu$

Получените токове се привеждат обратно към abc- оси

$$i_{ra} = i_{qr} \qquad i_{sa} = i_{qs}\cos\theta + i_{ds}\sin\theta$$

$$i_{rb} = -\frac{1}{2}(i_{qr} + \sqrt{3}i_{dr}) \qquad i_{sb} = \frac{1}{2}\left(i_{qs}(-\cos\theta + \sqrt{3}\sin\theta) + i_{ds}(-\sqrt{3}\cos\theta - \sin\theta)\right).$$

$$i_{rc} = -i_{ra} - i_{rb} \qquad i_{sc} = -i_{sa} - i_{sb}$$

Тези токове са в безразмерни единици.

С пресметнатите електрически величини се намира електрическия въртящ момент на асинхронния генератор

$$T_e = \Phi_{qs}i_{ds} - \Phi_{ds}i_{qs}.$$

Този въртящ момент участва като външно въздействие в (3).

4. МОДЕЛ НА ТРЕПТЕНИЯТА НА МАЧТАТА

Диференциалното уравнение, описващо трептенето на мачтата е [8]

$$m\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + 2n\,m\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial^2}{\partial x^2}\left(EJ\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}\right) = \delta(x-l)F(t), \text{за } x \in [0,l] \text{ и } t \geq 0 \quad (4),$$

където:

$\delta(x-l)F(t)$ е външна сила на единица дължина, N/m (δ - делта функция);

l - височина на мачтата;

t - време, s;

$m = \rho S$ - маса на единица дължина, kg/m, т.е. ρ-масова плътност и S-лице на напречното сечение;

J - инерционен момент на напречното сечение, m^4;

n - коефициент на демпфиране, $(sm)^{-1}$;

E – модул на еластичност, Pa.

Задачата се решава при нулеви начални условия и следните гранични условия:

- условия за закрепен неподвижно край:

$$y(0,t) = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial y}{\partial x}(0,t) = 0;$$

- условия за закрепен ляв край и за свободен десен край със съсредоточена маса- M

$$EJ\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}\bigg|_{(x=l,t)} = 0 \text{ и } \left(\frac{\partial}{\partial x}(EJ\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}) - 2n\,M\frac{\partial y}{\partial t} - M\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}\right)\bigg|_{(x=l,t)} = 0.$$

Решението на (4) се търси във вида

$$y(x,t) = \sum_{i=1}^{\infty} T_i(t)X_i(x) \quad (5).$$

По метода на модалния анализ се получава

$$\ddot{T}_i(t) + 2n\dot{T}_i(t) + \omega_i^2 T_i(t) = \frac{F(t)X_i(l)}{m\int_0^l X_i^2(x)dx + M\ X_i^2(l)}, \text{ за } i = 1,2,... \quad (6),$$

където собствените форми на трептене са

$$X_i(x) = ch(\alpha_i x) - \cos(\alpha_i x) + \frac{ch(\alpha_i l) + \cos(\alpha_i l)}{sh(\alpha_i l) + \sin(\alpha_i l)}\left(-sh(\alpha_i x) + \sin(\alpha_i x)\right), \text{ за } i = 1,2,...$$

а α_i са корените на

$$1 + \cos(\alpha l)ch(\alpha l) + \frac{M}{m}\alpha\left(\cos(\alpha l)sh(\alpha l) - \sin(\alpha l)ch(\alpha l)\right) = 0$$

а собствените честоти са $\omega_i = \alpha_i^2\sqrt{EJ/m}$.

Най-често движението на мачтата се апроксимира с първия член на (5) и така се получава движението на мачтата по първа собствена форма.

5. ПРОГНОЗИРАЩО УПРАВЛЕНИЕ С НЕВРОННА МРЕЖА

В MATLAB се създава невронен модел на нелинейната отворена система (фиг.2, от която е отстранен блок NN Predictive Controller), т.е. идентифицира се обекта на управление с невронна мрежа. Полученият невронен модел се използва за реализиране на прогнозиращо управление на обекта. За целта контролерът оптимизира целева функция за хоризонта на прогнозиране и генерира управляващия сигнал за хоризонта на управление.

Използва се двуслойна невронна мрежа с нелинеен първи слой и линеен втори слой. Структурата на мрежата е показана на фиг.1. Обучението на невронната мрежа се извършва с пакетно обработване на данните (batch training). На входа на мрежата се подават реализации на траекторията на системата и на управляващия сигнал. Те могат да се подават както в момента k, така и с различни закъснения (TDL).

Прогнозиращото управление минимизира целевата функция

$$J(u) = \sum_{i=1}^{N}[y_r(t+i) - y_m(t+i)]^2 + \rho\sum_{i=1}^{N_u}[u(t+i-1) - u(t+i-2)]^2,$$

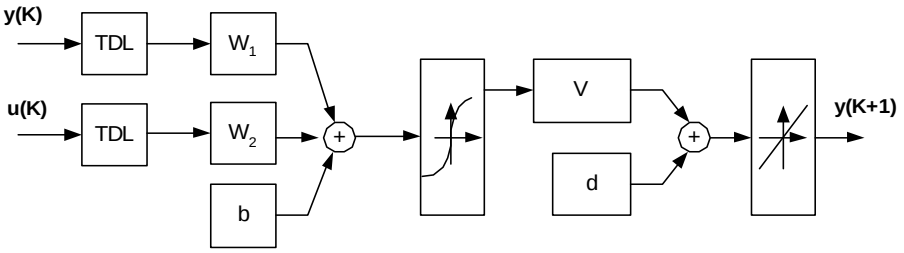
където y_r е зададената траектория, y_m е траекторията определена от невронния предиктор, N, N_u задават времевите интервали за прогнозираната траектория и на управляващия сигнал, а ρ е тегловен коефициент. Оптимизирането на функционала спрямо управлението (в интервала на прогнозиране) се извършва с числена процедура.

6. ПЪЛЕН МОДЕЛ НА СИСТЕМАТА В Simulink-MATLAB

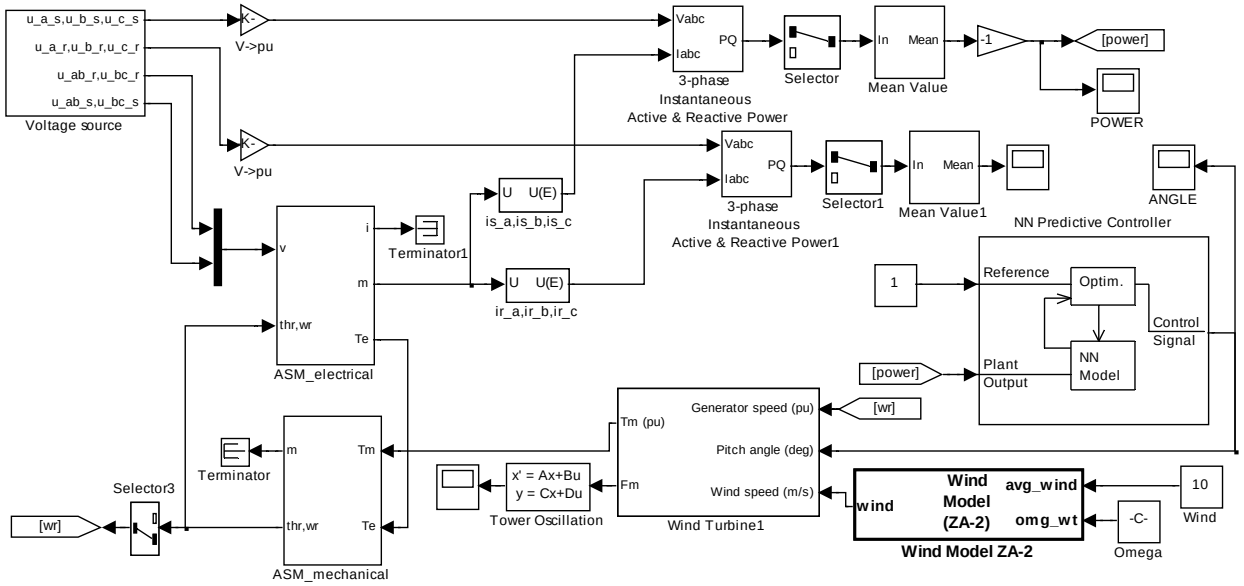
За да се поучи модела на цялата система в среда на Simulink-MATLAB се обединяват моделите на турбината, предавката, мачтата, генератора и контролера, фиг.2.

Моделът на скоростта на вятъра от точка втора е поставен в блока “Wind Model ZA-2”. На входа на този блок се подава средната скорост на вятъра, а на изхода

се получава една случайна реализация на тази скорост. Моделът на турбината е поставен в блока “Wind Turbine”. Този блок е разширен от авторите с модел на силата на вятъра приложена във върха на мачтата. Моделът на електрическата част на генератора се намира в блока “ASM_electrical”. Едномасовият модел се намират в блока “ASM_mechanical”. След стандартно полагане (6) се свежда до система ОДУ от първи ред. Получената система се поставя в блока “Tower Oscillation”. Този блок е изцяло авторски и с него се симулират трептенията на върха на мачтата. Понеже измерваната изходна мощност на генератора осцилира се налага поставяне на блока “Mean value”. Този блок осреднява постъпващия сигнал в рамките на един период.



Фиг.1. Структура на невронната мрежа



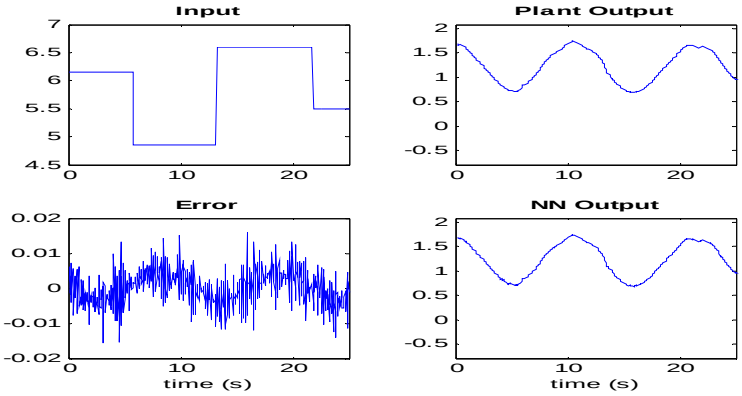
Фиг.2. Модел на затворената системата в среда на Simulink-MATLAB

7. ЧИСЛЕНИ РЕЗУЛТАТИ

В модела на турбината са използвани следните данни $\lambda_{nom} = 8{,}1$, $V_{nom} = 9\ m/s$, $C_{p,nom} = 0{,}48$ и $\omega_{r,nom} = 1\ pu$. В едномасовия модел данните са $k = 377$, $H = 5{,}04\ s$ и $F = 0{,}01\ pu$, а в модела на мачтата използваните данни са $\omega_0 = 7{,}74\ s^{-1}$, $n = 0{,}008.\omega_0$, $m = 400\ kg$, $M = 20000\ kg$, $l = 72\ m$ и $EJ = 10^{10}\ Nm^2$. Моделираният асинхронен генератор е с номинална мощност $S = 2.1{,}5\ MVA$, междуфазно напрежение $U = 575\ V$ и честота $f = 60\ Hz$.

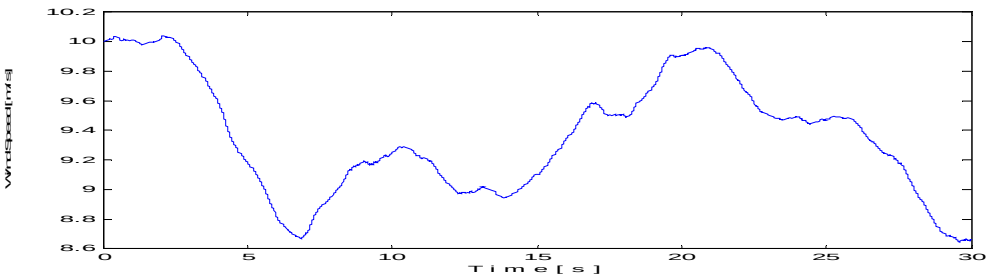
Процесът на идентификация на обекта е изяснен със съответните екрани от Neural Network Toolbox, които са показани на фиг.3. Мрежата се обучава за показния вход (ъгъл на завъртане на лопатките) и еталонен изход (изход на актив-

на мощност). Вижда се, че изхода на обекта (plant output) и на невронния модел (NN output) са много близки.

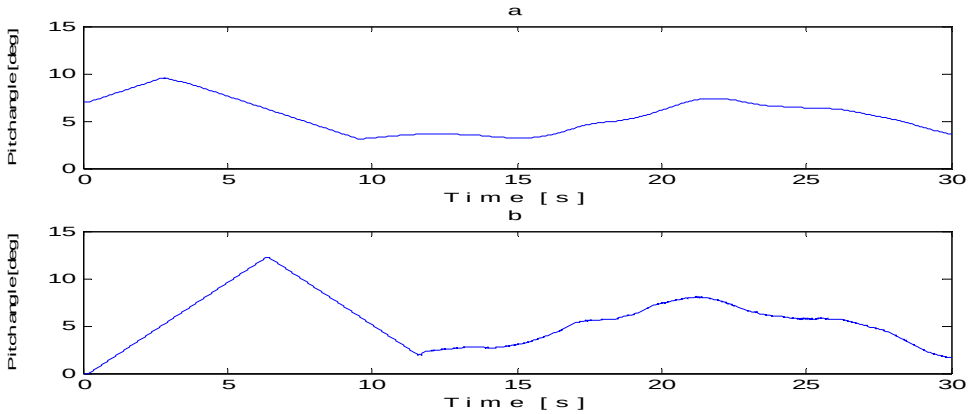


Фиг.3. Обучаващи и резултантни сигнали на невронната мрежа

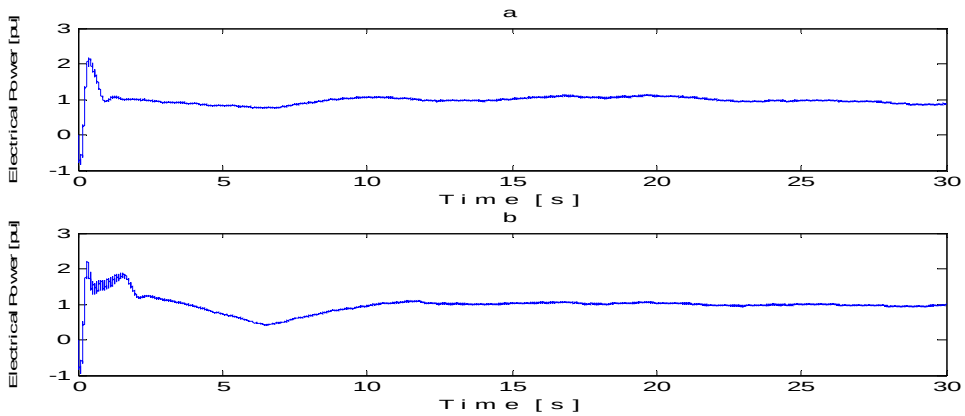
Прогнозиращото управление на вятърната турбина се реализира от блока NN Predictive Controller, в който е въведена невронната мрежа получена при идентификацията на обекта. С модела на затворената система са симулирани резултатите показани на фиг.4-фиг.7. От показните резултати се вижда, че при зададената скорост на вятъра при интервал от 30 секунди се наблюдава значително по-добро установяване на изходите при невронно базираното управление, спрямо използването на PID регулатор. При еднакви начални условия, различни от новата установена стойност, използването на невронния регулатор осигурява почти два пъти по-кратък преходен процес и по-малко динамично отклонение от PID регулатора, фиг.6. Като съществено предимство на невронния регулатор трябва да бъде отбелязано, че при него амплитудите на колебанията на върха на мачтата са почти два пъти по-малки, фиг.7.



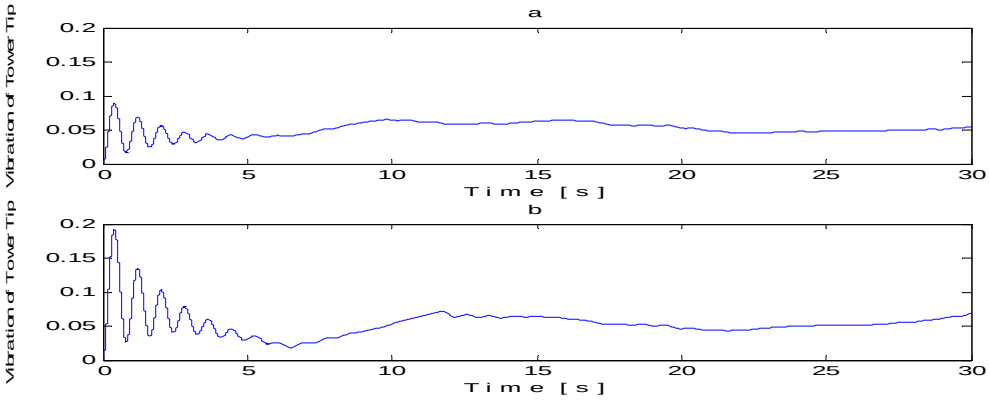
Фиг.4. Скорост на вятъра



Фиг.5. Ъгъл на завъртане на лопатките:
a-с прогнозиращо невронно управление, b-с PID управление



Фиг.6. Активна мощност на изхода на генератора:
a-с прогнозиращо невронно управление, b-с PID управление



Фиг.7. Преместване на върха на мачтата:
с прогнозиращо невронно управление, b-с PID управление

Таблица 1

	Време за установяване	Средно квадратична грешка	Максимално отклонение на върха на мачтата
PID-controller	10 s	0.1402	0,2 m
NN+MPController	5 s	0.0966	0,1 m

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представената работа е реализирано управление при скорости на вятъра в зоната на максимален товар. Получените резултати дават основание да се смята, че с използване на невронно моделно прогнозиращо управление е възможно по-ефективно управление и в други ветрови зони. Това ще изисква използването на невронни модели с различни параметри и структури както и разработване на методика на превключване между регулаторите работещи в различните ветрови зони, без това да поражда нежелани преходни процеси.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Kos, J.M., “On Line Control of a Large Horizontal Axis Energy Conversion System and its Performance in a Turbulent Wind Environment,” *Proceedings of the 13th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, U.S.A., pp. 2064-2073, 1978

[2] Johnson, C.J., and Smith, R.T., Dynamics of Wind Generators on Electric Utility Networks. *I.E.E.E. Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 12, pp. 483-492, 1976

[3] Bossanyi, E.A., “Developments in Closed-loop Controller Design for Wind Turbines**,”** *Proceedings of the 2000, ASME Wind Energy Symposium*, Reno, Nevada, pp. 64-74, 2000

[4] Liebst, B.S., “A Pitch Control System for the KaMeWa Wind Turbine,” *Journal of Dynamic Systems and Control*, 107, 47, 1985

[5] Bossanyi, E.A, “Adaptive Pitch Control for a 250 kW Wind Turbine,” *Proceedings of the 9th BWEA Wind Energy Conference*, Edinburgh, Scotland, pp. 85-92, 1987

[6] Florin Iov, Anca Daniela Hansen, Poul Sorensen, Frede Blaabjerg, *Wind Turbine Blockset in Matlab/Simulink*, Aalborg University, 2004

[7] SimPowerSystems for Use with Simulink, User’s Guide, Hydro-Québec Transenergie Technologies, The MathWorks, 2008

[8] S. P. Timoshenko, D. H. Young and W. Weaver, *Vibration Problems in Engineering*, 5th Edition, John Wiley and Sons, New York, 1990

Автор: Богдан Гилев, гл. ас. д-р, катедра „Стохастика и оптимиране”, ФПМИ, ТУ - София, E-mail address: *b_gilev@tu-sofia.bg*

Постъпила на 19.02.2012 **Рецензент** доц. д-р В. Пашева

Годишник на Технически Университет - София, т. 62, кн.3, 2012
Proceedings of the Technical University - Sofia, v. 62, book 3, 2012

СТАТИСТИЧЕСКИ КОНТРОЛ ПРИ ИНТЕГРИРАНО ОСИГУРЯВАНЕ НА КАЧЕСТВОТО В ШИВАШКАТА ПРОМИШЛЕНОСТ

Петя Милушева, Георги Милушев

Резюме: *В работата е разгледан статистическия контрол като основен компонент при интегрираното осигуряване на качеството в шивашката промишленост. Предложени са планове за случаен контрол при различна приемлива граница на качеството. Тълкувана е важността на уговореното ниво на приемливата граница на качеството в договорните отношения*
Ключови думи: *качество, статистически контрол, управление на качеството*

STATISTICAL CONTROL AT THE INTEGRATED QUALITY ASSURANCE OF THE SEWING INDUSTRY

Petja Miluscheva, George Milushev

Abstract: *In the work the statistical control is considered as a main component of the integrated quality assurance of the sewing industry. Some casual control plans with different acceptance quality levels are proposed. The importance of the pre-defined acceptance quality levels in the contract relations is treated.*

Keywords: *quality, statistical control, quality management*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Съвременните методи за осигуряване на качеството [1] допълват класическите, защото увеличаването на производителността, респ. конкурентоспособността изисква ефективно управление, а не само технологичен контрол, в т.ч. и на качеството. Бурното развитие на машините за облекло и новите постижения в областта на материалите и технологиите изпреварват развитието на методите за контрол [2]. По тази причина, модерни предприятия, разполагащи със собствени контролни органи (отдели, департаменти), работят по относително неефективни методи за контрол.

Класическата контролна технология [3-6] е ориентирана преди всичко към вземане на решения относно приемане, връщане или изменение на части, детайли и производствени заготовки. Понастоящем, много по-важна е ефективната об-

© 2012 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

ратна връзка на управленско ниво, анализ и изследване на откритите грешки и съответно управляване на качеството на продукцията [7].
Съвременният качествен контрол не се прилага чак при крайния продукт [1,7], а започва с осигуряване на качеството още от подготвителните операции: кроялната и шивалнята. Той се основава на статистически методи и почива на обективното и прегледно обхващане на качествените признаци на даден продукт посредством дефинирани случайни проби и на базата на познати закономерности позволява да се направят радикални заключения относно качественото състояние на съвкупността и основанията за възникване на отклонения.
Методите, които следва да се прилагат изискват ефективна, систематична дейност на контролните звена и организация на качеството, която е от полза за цялото предприятие, като извежда контрола от неговата изолирана същност.

2. ФУНКЦИИ ПО ОСИГУРЯВАНЕ НА КАЧЕСТВОТО

При интегрираното осигуряване на качеството може да се говори за следните три функции:

2.1. УСТАНОВЯВАНЕ НА КАЧЕСТВОТО

Тази функция обхваща разработването на предписания и указания за проектиране и производство на продукти, както и за установяване на система за контрол. В повечето предприятия за облекло тя се провежда от **ръководителите** на предприятието и **контрольорите** по качеството въз основа на собствения им усет и опит. В случая не се очаква наличието на писмено формулирани признаци (характеристики).
Установяването на качеството би трябвало да се състои от следните четири точки: **1) Минимални предписания по изработката**, които заедно с **2) Описанието на модела** и **3) Спецификацията** установяват задължителната изработка. **4) Подробните указания по качеството** по операции и отдели се извеждат от 1) до 3).

2.2. СЪЗДАВАНЕ НА КАЧЕСТВО

Тази функция обхваща всички действия, необходими за осъществяване на такова производство, че продуктите да се изработват в съответствие с установените качествени признаци. Това представлява задача, която се изпълнява само от производството, респ. от междинните майстори. Под това се разбира главно надлежното инструктиране на шивачките. В случая, голяма роля играе обучението в методи на шиене.
Отговорен за създаването на качество в предприятието е единствено **ръководителят на предприятието**, а не контрольорите. Те могат единствено да подкрепят в случай на нужда ръководителя на производството [2].
Ако отговорността за създаването на качество се прехвърли на контрола, това води до обстоятелството, че контролът вместо да изпълнява своята собствена задача осъществява изменения, така че детайлите да отговарят на изискванията за качество. При определени обстоятелства може да се стигне до там, че конт-

рольорите да поемат функцията на груповия ръководител за обучение на работната сила.

2.3. ОЦЕНКА НА КАЧЕСТВОТО

Тази функция обхваща оценката на частите на облеклото - от проектирането до крайния продукт, с оглед да се установи доколко то съответствува на зададените предписания. При междинния майстор това означава сравняване на минималните предписания по изработката, описанието на модела и мострената част със съответния продукт. Тази задача се упражнява на първо място от **качествения контрол [1,3,4,5]**.

Установените недостатъци се рекламират незабавно, причината за недостатъците се проучва основно и се въздейства за отстраняването на тези недостатъци.

3. ОСИГУРЯВАНЕ НА КАЧЕСТВОТО НА НИВО ОРГАНИЗАЦИЯ

Отговорността за производството се носи от производственото ръководство в съответствие с различните нива неговата вертикална организация [7], а именно:

- групов ръководител - в процес на обучение;
- групов ръководител;
- главен групов ръководител;
- ръководител на производството;
- технически директор на предприятието.

В случая, понятието “производство” съдържа в себе си най-малкото двете подпонятия “количество” и “качество”. Спазването на определено количествено производство без осигуряване на необходимото качество и обратно, спазването на качествените норми без осигуряване на изискваното производствено количество означава - и в двата случая - неизпълнение на производствените норми.

Едва когато качество и количество си съответстват, производственото ръководство си е изпълнило задачата и се е издигнало до равнището на собствената си производствена отговорност. Тъй като качеството е съставна част на производството и е свързано неразривно с него, производственото ръководство носи изключителна отговорност както за количеството на продукцията, така и за нейното качество.

Всяко разпределяне на отговорността по количество и качество върху различни носители на отговорност в една и съща производствена единица, поради наличието на конфликти на интересите води до загуби. Печели “по-силният” - печели или “ръководителят на количеството” или “ръководителят на качеството”, и то във всеки случай за сметка на предприятието. Ето защо, отговорността за качеството в производството трябва да се остави на ръководителите на екипи, респ. на линии, а от допълнителните контрольори да се очаква само някаква подпомагаща функция.

4. СТАТИСТИЧЕСКИ КОНТРОЛ НА СОБСТВЕНАТА И ЧУЖДА ПРОДУКЦИЯ

4.1. ОБЩИ ПОЛОЖЕНИЯ

Характерно за шивашкото производство [2] е, че всичко се контролира чрез визуален контрол, при което част от произведените части се проверяват само субективно, т.е. тези части могат да бъдат повторно (контролно) измерени за съответствие на предвидени толеранси. Работните методи и указанията за работа на контрольорите трябва да са установят на етапа на установяване на качеството, като в указанията за работа трябва да се посочи детайлно какво трябва да се контролира и в каква последователност.
Контрольорите провеждат визуален контрол, при което в съмнителни случаи се прави повторно (контролно) измерване и на базата на предписанията за изработка или на признаците за качество се взема решение.

4.2. СТАТИСТИЧЕСКИ КОНТРОЛ

При функциониращ "интегриран контрол върху качеството" в производството, задачата на крайния контрол в перспективен план представлява само още един контрол със случайни проби, включително и при доставени от чужди производители части, които там вече са били обект на изходящ контрол .
При ограничена предварителна информация крайният контрол няма налична статистика за да работи изцяло по статистически критерии. В този случай, чрез случайни проби се проверяват само някои важни, установявани наново всяка седмица белези [2], напр. обща дължина, дължина на ръкавите и т.н.
При случайните проби се постъпва по следния начин:

1. Плановете за случаен контрол са създадени на базата на научен анализ и производствен опит и следва да бъдат утвърдени от съответната браншова камара или национален орган по качеството;
2. Те са замислени за атрибутивна проверка (добро/лошо);
3. ПГК = "Приемлива граница на качеството", изградена на базата на 90 % вероятност за приемане, респ. 10 % връщане;
4. Трябва да се проверяват по-често пратки, които имат планове за случайни проби, така че да може да се опознае по-добре качеството на производството на съответните доставчици. Ако в продължителен период от време няма възражения, може ПГК да се повиши с една степен;
5. Има 4 възможности за проверка:

a) Планове за прости случайни проби, предназначени за нормална оценка (90 % вероятност за приемане);
b) Планове за прости случайни проби, предназначени за усилена оценка (7 % по-усилена);
c) Планове за двойни случайни проби, предназначени за нормална оценка (90 %);

d) Планове за двойни случайни проби, предназначени за усилена оценка (7 % по-усилена);

6. При простите случайни проби има нужда от повече време. При двойните случайни проби работата върви по-бързо, тъй като има повече добри или лоши части, които вече с първата по-кратка случайна проба могат да бъдат установени;
7. Евентуално, с резултатите се съставят контролни карти по фирми.

4.3. ПРАВИЛА ЗА ВЗЕМАНЕ НА СЛУЧАЙНИ ПРОБИ (ПРОВЕРКА "ДОБРО - ЛОШО")

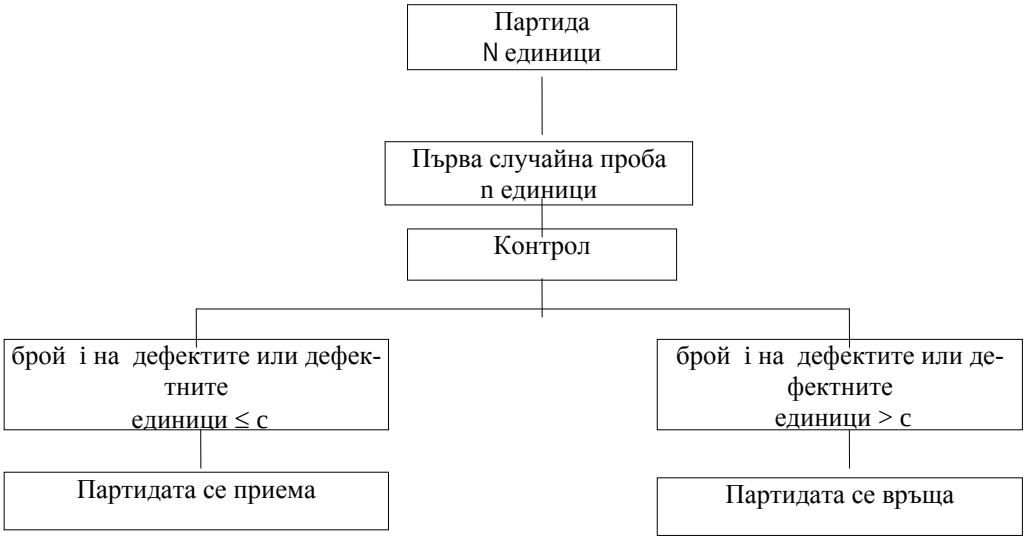
A. Случайната проба трябва така да се взема, че да се елиминира предпочитание на някоя.

B. Партидата се разделя на целесъобразно подбрани по практически съображения подгрупи. От всяка група се вземат такъв брой единици, който е приблизително пропорционален на големината на подгрупата. Общият брой на всички взети по този начин единици трябва да е равен на обема (обхвата) на случайните проби "n".

C. Начин на действие при плановете за прости случайни проби.

Когато в случайната проба от n единици намереният брой дефекти или дефектни единици i е равен или по-малък от критерия за приемане c, то съответната партида от n единици се счита за добра, т.е. тя бива приета.

Ако намереният брой дефекти i е по-голям от c, то партидата се връща и трябва да се подложи на 100 %-ов контрол.

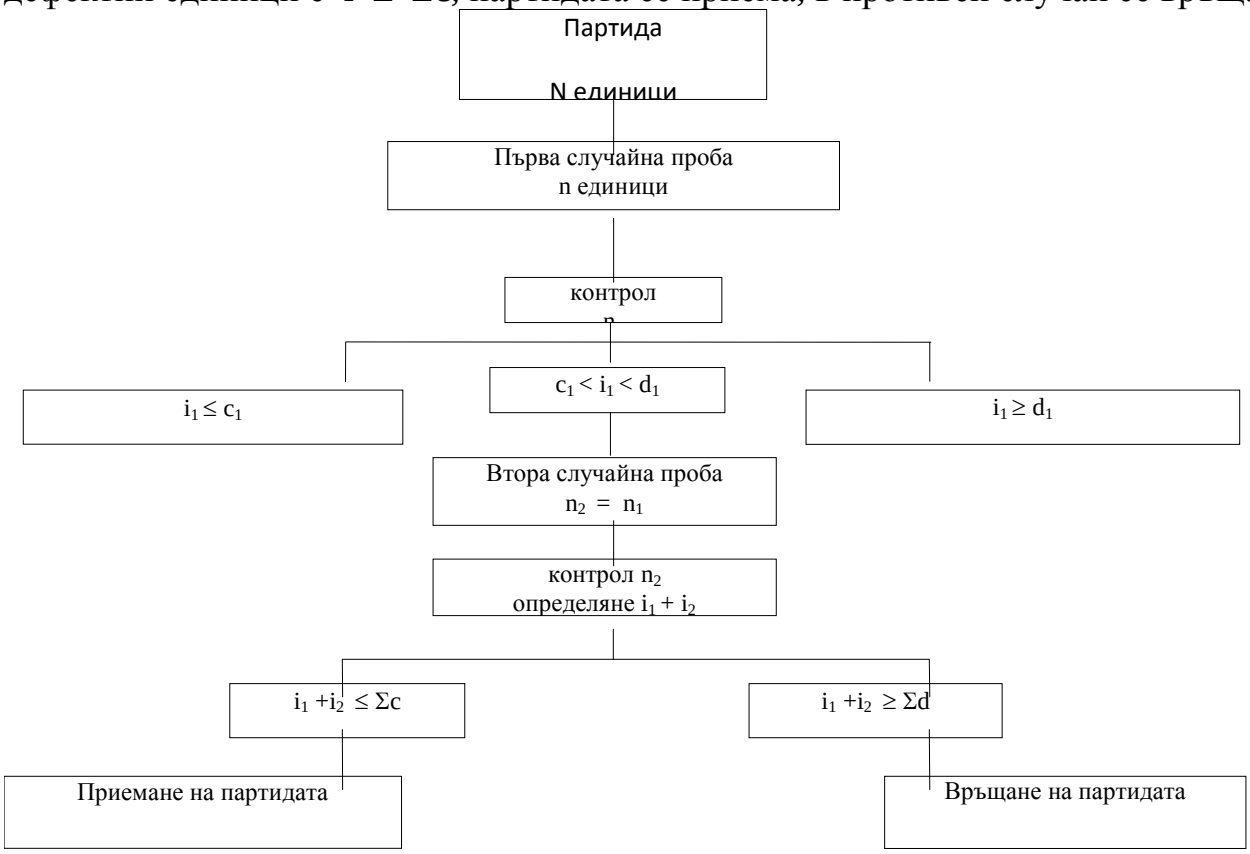


Фиг.1. Схема за хода на проверката (контрола)

Характерно за плана за прости случайни проби е, че партидата се приема или връща чрез еднократна проверка (контрол), респ. решение.

D. Начин на действие при плановете за двойни случайни проби

Първоначално се вземат и проверяват n_1 единици. Ако намереният при това брой дефекти или дефектни единици е $i \leq c_1$, то партидата се приема.
Ако намереният брой дефекти или дефектни единици е $i \geq d_1$, то партидата се връща.
Ако намереният брой дефекти е между c_1 и d_1, то се взема и проверява втора случайна проба в същия обем като първата ($n_2 = n_1$).
Ако сборът от намерените при първата и втората случайна проба дефекти или дефектни единици е $i \leq \Sigma c$, партидата се приема, в противен случай се връща.



Фиг.2. Схема за протичането на контрола

Възможен резултат от контрола и вземане на решение:

a)	$i_1 \leq c_1$	приема се
b)	$c_1 < i_1 < d_1$	контролът продължава
c)	$i_1 \geq d_1$	връща се
d)	$i_1 + i_2 \leq \Sigma c$	приема се
e)	$i_1 + i_2 \geq \Sigma d$	връща се

Характерно за двойният план за случайни проби е възможността за втора случайна проба, ако първата е протекла (в известни граници) отрицателно.
В заключение трябва още веднъж да се каже, че при входящия контрол на стоките (изходните материали) и при крайния контрол трябва да се осигури пълен контрол с помощта на случайни проби.
Главните признаци се контролират 100 процентово, а другите - според плановете за случайни проби. В този случай за партида следва да се счита дневната

продукция или постъпилите стоки (материали). Ако чрез случайната проба се установят повече дефекти от позволеното, то всички части трябва да бъдат допълнително проверени за този дефектен признак за качество.

4.4. ПЛАНОВЕ ЗА ЕДИНИЧНИ И ДВОЙНИ ПРОБИ

По-долу са дадени различни планове за единични проби, които се прилагат в промишлеността за облекло. Съответното предприятие трябва да вземе за себе си решение относно прилагането на планове за прости или на двойни случайни проби, както и да установи съответните ПГК-стойности, а евентуално, след проведена проверка и получени от нея резултати, да промени ПГК-стойностите.

План за прости случайни проби - нормална оценка ПГК 1,0

Размер на доставката (големина на партидата)	Брой на подлежащите на проверка(контрол) части	Максимално възможен допустим брой дефекти
2 - 8	всички	0
9 - 15	всички, респ. 13	0
16 - 25	13	0
26 - 50	13	0
51 - 90	13	0
91 - 150	13	0
151 - 280	50	1
281 - 500	50	1
501 - 1200	50	1
1201 - 3200	80	2
3201 - 10000	125	3

ПГК означава, че приемането на партидата от производството се осъществява с 90 % вероятност, когато максималният дял на дефектите не надхвърля 1 %.

План за прости случайни проби - нормална оценка ПГК 2,5

Размер на доставката (големина на партидата)	Брой на подлежащите на проверка(контрол) части	Максимално възможен допустим брой дефекти
2 - 8	всички, респ. 5	0
9 - 15	5	0
16 - 25	5	0
26 - 50	5	0
51 - 90	20	1
91 - 150	20	1
151 - 280	20	1
281 - 500	32	2
501 - 1200	50	3
1201 - 3200	80	5
3201 - 10000	125	7

ПГК означава, че приемането на партидата от производството се осъществява с 90 % вероятност, когато максималният дял на дефектите не надхвърля 2,5 %.

План за прости случайни проби - нормална оценка ПГК 4,0

Размер на доставката (големина на партидата)	Брой на подлежащите на проверка(контрол) части	Максимално възможен допустим брой дефекти
2 - 8	всички, респ. 3	0
9 - 15	3	0
16 - 25	3	0
26 - 50	13	1
51 - 90	13	1
91 - 150	13	1
151 - 280	20	2
281 - 500	32	3
501 - 1200	50	5
1201 - 3200	80	7
3201 - 10000	125	10

ПГК означава, че приемането на партидата от производството се осъществява с 90 % вероятност, когато максималният дял на дефектите не надхвърля 4,0 %.

План за прости случайни проби - нормална оценка ПГК 6,5

Размер на доставката (големина на партидата)	Брой на подлежащите на проверка(контрол) части	Максимално възможен допустим брой дефекти
2 - 8	2	0
9 - 15	2	0
16 - 25	8	1
26 - 50	8	1
51 - 90	8	1
91 - 150	13	2
151 - 280	20	3
281 - 500	32	5
501 - 1200	50	7
1201 - 3200	80	10
3201 - 10000	125	14

ПГК означава, че приемането на партидата от производството се осъществява с 90 % вероятност, когато максималният дял на дефектите не надхвърля 6,5 %.

План за прости случайни проби - нормална оценка ПГК 10

Размер на доставката (големина на партидата)	Брой на подлежащите на проверка(контрол) части	Максимално възможен допустим брой дефекти
2 - 8	всички, респ. 8	1
9 - 15	5	1
16 - 25	5	1
26 - 50	5	1
51 - 90	8	2
91 - 150	13	3
151 - 280	20	5
281 - 500	32	7
501 - 1200	50	10
1201 - 3200	80	14
3201 - 10000	80	14

ПГК означава, че приемането на партидата от производството се осъществява с 90 %-ова вероятност, когато максималният дял на дефектите не надхвърля 10 %.

План за двойни случайни проби - нормална оценка, ПГК 1

Големина на партидата	Брой един. - първа проба	Прием при...бр. дефекти	Връщане при...бр. дефекти	Нов контрол при.....	Брой един. - втора проба	Прием при...бр. дефекти I + II	Връщане при...бр. дефекти I + II
2 - 8	всички	0	≥ 1	-	-	-	-
9 - 15	вс./13	0	≥ 1	-	-	-	-
16 - 25	13	0	≥ 1	-	-	-	-
26 - 50	13	0	≥ 1	-	-	-	-
51 - 90	13	0	≥ 1	-	-	-	-
91 - 150	13	0	≥ 1	-	-	-	-
151 - 280	32	0	≥ 2	1	32	1	≥ 2
281 - 500	32	0	≥ 2	1	32	1	≥ 2
501 - 200	32	0	≥ 2	1	32	1	≥ 2
1201 - 3200	50	0	≥ 3	1+2	50	3	≥ 4

План за двойни случайни проби - усилена оценка, ПГК 1

Големина на партидата	Брой един. - първа проба	Прием при...бр. дефекти	Връщане при...бр. дефекти	Нов контрол при.....	Брой един. - втора проба	Прием при...бр. дефекти I + II	Връщане при...бр. дефекти I + II
2 - 8	всички	0	-	-	-	-	-
9 - 15	всички	0	-	-	-	-	-
16 - 25	вс./20	0	-	-	-	-	-
26 - 50	20	0	-	-	-	-	-
51 - 90	20	0	-	-	-	-	-
91 - 150	20	0	-	-	-	-	-
151 - 280	50	0	≥ 2	1	50	1	≥ 2
281 - 500	50	0	≥ 2	1	50	1	≥ 2
501 - 200	50	0	≥ 2	1	50	1	≥ 2
1201 - 3200	80	0	≥ 3	1+2	80	3	≥ 4

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отговорността на производителя/доставчика за качеството на доставяните от него изделия се разпростира и върху материалите и частите, които той от своя страна е получил от поддоставчици. В съответствие с желанието за ефективност бездефектни доставки, като начин за проверка се прилага предимно методът със случайни проби.

Основа на тази проверка са установените от органа по качеството разпоредби и правила и съответните предписания за контрол, обобщени в планове за случайни проби. Равнището на контрола, тоест строгостта на проверката, се характеризира с един показател – ПГК стойност (приемлива граница на качеството). Тази ПГК-стойност се уговаря между доставчика и купувача и се отбелязва в договора за доставка, респ. за покупка, като е задължителна (обвързваща) и за двете страни. Уговорената ПГК-стойност не е разрешен дял на дефектите, а дава на производителя (доставчика) указание за качеството на неговото производство. Когато не е уговорено друго, в сила е: ПГК = 1. Това не оз-

начава, че доставчикът има право преднамерено да доставя дефектни единици от своя продукт.
В съответствие с препоръките за прилагане на плановете за случайни проби, когато не е уговорено друго, проверката се извършва съгласно плана за вземане на прости случайни проби при нормална оценка - равнище на контрол II. Връщането на една доставка въз основа на неизпълнение на условията за приемане съгл. предписанието за единични проби първоначално означава, че доставката се спира.
Окончателното решение относно третирането на рекламираната продукция трябва да се уговори според случая, като се вземат предвид последиците от дефектите и други критерии. Когато не е уговорено друго, една повторна проверка (повторно представяне) на върнати доставки се допуска само в случай, че всички бройки са прегледани още веднъж, дефектните единици са отстранени или дефектите са поправени. Ако в предприятието на получателя рекламираната продукция бъде сортирана и дефектните части бъдат евентуално поправени, то по правило възникналите от това разходи са за сметка на доставчика. Това финансово задължение на доставчика се осъществява след съгласуване с доставчика преди изпълнение на работите.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Дюкенджиев Г., Р. Йорданов. ***Контрол и управление на качеството***. Софтрейд, София, 2012.
[2] Вайс В., ***Осигуряване на качеството в промишлеността за облекло***, доклад за нуждите на GTZ бюро, 2008
[3] Besterfield, D., ***Quality Control***, Prentice Hall, 1986.
[4] Crosby, P.***, Quality js Free***, McGraw-Hill Book Company, 1984.
[5] Doming, W.***, Quality, Productivity, and Competitive Position***, MIT, 1982.
[6] Juran, J., ***Quality Control Handbook***, MeGraw-Hill Book Company, 1974.
[7] Hoyle. D., ***ISO - 9000 Quality Systems Handbook***, Butterworth-Heinemann Ltd., 1994.

Автори: Петя Милушева, маг. инж., маг. ик., ръководител на Специализиран клъстер и институт за облекло и текстил „Дунав”, E-mail address: *milusheva@online.bg*; Георги Милушев, доц., д-р, маг. инж., Технически Университет – София, Факултет Автоматика, кат. „Електроизмервателна техника”, E-mail address: *gm@tu-sofia.bg*

Постъпила на 28.04.2012 **Рецензент** проф. д-р П. Цветков

Годишник на Технически Университет - София, т. 62, кн.3, 2012
Proceedings of the Technical University - Sofia, v. 62, book 3, 2012

МЕТРОЛОГИЧНО ОСИГУРЯВАНЕ НА КОНТРОЛА НА КАЧЕСТВОТО НА ЕЛЕКТРИЧЕСКАТА ЕНЕРГИЯ

Пламен Цветков, Георги Милушев, Николай Гуров

Резюме: *В работата е направен обзорен анализ на спецификите на електрическата енергия като стока и нейните качествени характеристики, различните аспекти, органи и нормативна база за контрола на качеството на електрическата енергия. С оглед на целите и задачите на метрологичното осигуряване на контрола на качеството са систематизирани действащите в настоящия момент държавни норми и стандарти в Република България, които регламентират качеството на електрическата енергия. Обособени са елементите на метрологичното осигуряване и е предложен процесен подход за постигане на достоверни резултати и правилни заключения при контрола.*
Ключови думи: *метрологично осигуряване, енергия, качество, контрол, оценка на съответствието*

METROLOGY ASSURANCE OF THE ELECTRICAL POWER QUALITY CONTROL

Plamen Tzvetkov, George Milushev, Nikolay Gourov

Abstract: *In the article an overview analysis of the specifics of the electrical energy as a good, the respective quality characteristics, different aspects, bodies and normative base of the electrical power quality control is made. On the aims and tasks of the metrology assurance of the quality control, the present Bulgarian state norms and standards, related with the electrical power quality, are systematic. The elements of the metrology assurance are separated and a process approach to reach reliable results and correct conclusions from the inspection was proposed.*

Keywords: *metrology assurance, energy, quality, control, inspection, conformity assessment*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Електрическата енергия е универсална по отношение на възможности за получаването й от различни енергоносители и оптимална по отношение на преноса и трансформирането й от и в други форми на енергия – топлинна, механична, светлинна, електромагнитна и др.

В съвременното развито общество електроенергията играе в икономически аспект ключова, значима и стратегическа роля, което се потвърждава от ежеднев-

© 2012 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

ното генериране на значими парични потоци, свързани с електроенергийни разплащания.

За съвременния потребител електроенергията се явява стока от първа необходимост, която като всяка една стока следва да се характеризира с определено качество, освен количество. Нещо повече влошените качествени показатели на електроенергията може да причинят поява на смущения или предизвикат повреди в електрическите уреди и съоръжения, които да имат тежки икономически последици или дори да станат опасни за хората и обслужващия персонал. Такива примери вече имаме и у нас.

Качество на електрическата енергия е комплексно понятие, което се дефинира с допустимия обхват на изменение на определени характеристики, наричани параметри на качеството на електрическата енергия, при които консуматорите са в състояние да изпълняват своите функции.

Качеството на електрическата енергия е от съществена важност за икономиката, който ангажира ежедневно вниманието на специалистите от производство, преноса, дистрибуцията и снабдяването на крайните потребители с електроенергия. В значителна степен то зависи от характеристиките на електрическите величини и параметри, като честота, големина и форма на монофазното напрежение и симетрия на трифазното напрежение. Тези характеристики търпят промяна по време на нормалната работа на захранващата система, дължащи се на промяна в товара, смущения породени от дадено съоръжение и възникване на аварии, причинени главно от външни фактори.

Изискванията към качеството на електрическата енергия е свързано и с развитието на техниката и технологиите в модерните икономики, където се създават и използват уреди и съоръжения, чувствителни към отклоненията от описаните характеристики на електрическата енергия.

Стандартът БДС EN 50160, който пряко регламентира показателите за качество на електрическата енергия посочва, че “*Електрическата енергия във вида, доставяна към консуматорите има няколко характеристики, които са променливи и влияят на полезността й за консуматорите. Контролът на характеристиките на електрическа енергия следва да се реализира от гледна точка на променливото напрежение на захранващите изводи към консуматора (потребителя). С оглед на използването на енергията е оптимално мрежово напрежение с постоянна честота, съвършена синусоидална вълна и постоянна амплитуда.*

Електрическата енергия достига до консуматора през система, състояща се от генериращи, преносни и разпределителни съоръжения. Във всеки компонент на системата може да настъпи авария поради електростатични и механични напрежения или предизвикани от химически въздействия в следствие на различни причини, включително екстремни метеорологични условия, нормални процеси на износване и остаряване с времето, намесата на хора, птици, животни и т.н. Подобни повреди могат да повлияят и дори да прекъснат захранването на един или няколко консуматора.

За да поддържа постоянна честота е нужно във всеки момент сумата на капацитетите на всички работещи генератори да съвпада с общото потребление. Тъй като и капацитета на генераторите и потреблението търпят промени в различна степен особено при повреди в генериращата, преносната или разпределителната система, винаги съществува риск от несъвпадение, като резултатът е увеличаване или намаляване на честотата. Този риск в определена степен се ограничава от взаимносвързаността на системата, чиито генериращ капацитет е много голям спрямо вероятните промени.” [1].

Възможни са и други проблеми, свързани например с разнообразието в структурите на разпределителните системи в различните райони, дължащо се на разликите в концентрациите на товара, гъстотата на населението, местните топографски особености и т.н. За групирани консуматори например, характеристиките на напрежението търпят значително по-малки промени.

Специфична особеност на някои характеристики на електрическата енергия е, че в редица случаи консуматорът (потребителят) е в състояние да влияе на качеството й в по-голяма степен от производителя или доставчика. В тези случаи потребителят е важен партньор, заедно с доставчика в усилията да се поддържат качествените параметри.

2. АСПЕКТИ, ОРГАНИ И НОРМАТИВНА БАЗА ЗА КОНТРОЛА НА КАЧЕСТВОТО НА ЕЛЕКТРИЧЕСКАТА ЕНЕРГИЯ

Регулатор на пазара на електрическа енергия в България е Държавната комисия по енергийно и водно регулиране (ДКЕВР). Регулаторът определя показателите и нормите, правилата за остойностяване на електрическата енергия и хомологизирането им с Европейските нормативни документи. Това пряко се отнася до степента на точност при измерване на конкретните показатели на енергията.

В най-общ план измерването на електрическата енергия е база за разплащането между производители, оператори, разпределители и потребители. То има количествен и качествен аспект:

Количественият аспект е силно застъпен в регулаторната база за търговски разплащания. В метрологичен аспект той е включен в законовата област във всички Европейски страни и е отразен в Измервателна Инструментална Директива (MID 2004/22/EC на Европейския парламент и на Съвета). Функциите по проследимостта на единиците към еталона и надзора над средствата за измерване (електромери за активна и реактивна енергия) са приоритет на Български Институт по Метрология (БИМ), Държавната агенция по метрологичен и технически надзор (ДАМТН), които са държавни органи и оправомощените от ДАМТН лица.

Качественият аспект се регулира от Европейския стандарт EN 50160, хармонизиран като БДС EN 50160 “Характеристики на напрежението на електрическата енергия, доставяна от обществените разпределителни електрически системи”, който е основа и стана задължителен у нас с приетата "Методика за отчитане изпълнението на целевите показатели за качество на електрическата енергия и качество на обслужването от разпределителните предприятия и обществените

доставчици" на ДКЕВР от 2010 г. [9]. В определени частни случай качественият аспект може да се регламентира и на база договорите между заинтересованите страни.

В метрологичен аспект тази нова област е в обхвата на доброволната акредитация и субекти на контрола на качеството на параметрите на електрическата енергия би следвало да са акредитирани от Българската Служба по Акредитация (БСА) органи за контрол на съответствието. Естествено тази дейност може да се извършва и от неакредитирани лица за вътрешни нужди. Акредитацията е необходима за:

- да се потвърди компетентността на извършването на контрола от официалния за България орган, имащ това право;
- да се декларират субектите, имащи експертни права на трета независима страна при съответен арбитраж;
- извършване на контрол на качествата на електрическата енергия, респективно издаваните сертификати да добият правна стойност;
- доказване на метрологична проследимост и съответно да се дефинира степента на неопределеност на резултатите в процеса на контрол;
- обхващане на органите за контрол в схема за кръгови или лъчеви сравнения.

В повечето случаи, освен контрола на характеристиките на напрежението се налага и контрол на аналогичните характеристики на тока, мощностите, посоката на източника на смущения, форма и анализ на преходните процеси и т.н.

Още със създаването на Европейската икономическа общност се приемат и първите директиви относно качеството на електрическата енергия, които към момента наброяват около 280. Те решават задачи свързани с техническата хармонизация, законовата хармонизация, осигуряване на оценъчни процедури за съответствие, както и възможност за взаимно и общо признаване за съответствие. В [11] детайлно и в дълбочина са разгледани действащите международни стандарти и нормативни документи относно качеството на електрическата енергия.

Към настоящия момент действащите държавни стандарти в Република България, които регламентират директно или косвено качеството на електрическата енергия в предвид целите и задачите на метрологичното осигуряване на контрола на качеството на електрическата енергия са както следва:

- Европейският стандарт EN 50160:2007 има статут на български стандарт от 30.11.2007 г. под наименованието БДС EN 50160:2007 Характеристики на напрежението на електрическата енергия доставяна от обществените разпределителни електрически системи. Заменя БДС EN 50160:2006 и е в сила от 01.06.2010. От 16.09.2010 г. без да отменя предишния се публикува БДС EN 50160:2010 Характеристики на напрежението на електрическата енергия, доставяна от обществените разпределителни електрически мрежи.
- Европейският стандарт EN 61000-4-1:2007 има статут на български стандарт от 28.09.2007 г. под наименованието БДС EN 61000-4-1:2007

Електромагнитна съвместимост (ЕМС). Част 4-1: Методи за изпитване и измерване (IEC 61000-4-1:2006).

- Европейският стандарт EN 61000-4-7:2002 има статут на български стандарт от 22.01.2004 г. под наименованието БДС EN 61000-4-7:2003 Електромагнитна съвместимост (ЕМС). Част 4: Методи за изпитване и измерване. Раздел 7: Общо ръководство за измерване и средства за измерване на хармоници и междинни хармоници в захранващи системи и съоръженията, свързани към тях (IEC 61000-4-7:2002).
- Европейският стандарт EN 61000-4-7:2002/A1:2009 има статут на български стандарт от 21.08.2009 г. под наименованието БДС EN 61000-4-7:2002/A1:2009 Електромагнитна съвместимост (ЕМС). Част 4-7: Методи за изпитване и измерване. Общо ръководство за измерване и средства за измерване на хармоници и междинни хармоници в захранващи системи и съоръженията, свързани към тях (IEC 61000-4-7:2002/A1:2008).
- Европейският стандарт EN 61000-4-15:1997 има статут на български стандарт от 30.03.2004 г. под наименованието БДС EN 61000-4-15:2004 Електромагнитна съвместимост (ЕМС). Част 4: Методи за изпитване и измерване. Раздел 15: Фликерметър. Функционални и проектни изисквания (IEC 61000-4-15:1997). От 19.07.2011 г без да отменя предишния се публикува БДС EN 61000-4-15:2011 Електромагнитна съвместимост (ЕМС). Част 4-15: Методи за изпитване и измерване. Фликерметър. Функционални и проектни изисквания (IEC 61000-4-15:2010).
- Европейският стандарт EN 61000-4-15:1997/A1:2003 има статут на български стандарт от 10.08.2006 г. под наименованието БДС EN 61000-4-15/A1;2006 Електромагнитна съвместимост (ЕМС). Част 4-15: Методи за изпитване и измерване. Фликерметър. Функционални и проектни изисквания (IEC 61000-4-15:1997/A1:2003) и се прилага само заедно БДС EN 61000-4-15:2004
- Европейският стандарт EN 61000-4-30:2003 има статут на българският стандарт от 10.09.2006 г. под наименованието БДС EN 61000-4-30:2006 Електромагнитна съвместимост (ЕМС). Част 4-30: Методи за изпитване и измерване. Методи за управляване качеството на електрическата енергия (IEC 61000-4-30:2003). От 27.02.2009 г без да отменя предишния се публикува EN 61000-4-30:2009 Електромагнитна съвместимост (ЕМС). Част 4-30: Методи за изпитване и измерване. Методи за управляване качеството на електрическата енергия (IEC 61000-4-30:2008).
- Европейският стандарт БДС EN 61000-4-29:2003 има статут на българският стандарт от 22.01.2004 г. под наименованието БДС EN/IEC 61000-4-29 Електромагнитна съвместимост (ЕМС). Част 4-29: Методи за изпитване и измерване. Изпитване на устойчивост на краткотрайни спадания на напрежението, краткотрайни прекъсвания на напрежени-

ето и изменения на напрежението на входни захранващи изводи за постоянно напрежение (IEC 61000-4-29:2000).

От цитирания списък на стандартите [1-8] и направените проучвания може да се направи извода, че стандартът, който към момента пряко регламентира качеството на електрическото напрежение е стандартът БДС EN 50160. Практически това е стандартът, който най-тясно разглежда и регламентира характеристиките на захранващото напрежението, които влияят на качеството на електрическата енергия. Този стандарт определя, където е възможно, измененията на характеристиките и които нормално могат да бъдат очаквани. В други случаи стандартът дава възможно най-добрия показател в количествен израз на това, което трябва да се очаква.

Стандартът БДС EN 61000-4-30 визира техническите средства за измерване и дефинира три класа на изпълнение: клас А, клас В и клас S [8], които имат отношение към договорни приложения, контрол на съответствието със стандартите, арбитраж и т.н. Този стандарт дефинира още: измерване на напрежението във нула-фаза или фаза-фаза; точност на измерване на напрежение; агрегация на измервателните интервали; маркиране на пропадания, надвишавания и прекъсвания; точност без аксесоари; влияещите фактори; измерване на честота чрез агрегации; формула за изчисляване на ефективна стойност на напрежението; дефинира фликера.

Стандартите БДС EN 61000-4-15 и БДС EN 61000-4-7 дефинират съответно методите и средствата за откриване на фликер и методите и средствата за измерване на хармоници и междинни хармоници в захранващите системи [4,6].

3. ЕЛЕМЕНТИ НА МЕТРОЛОГИЧНОТО ОСИГУРЯВАНЕ НА КОНТРОЛА НА КАЧЕСТВОТО НА ЕЛЕКТРИЧЕСКАТА ЕНЕРГИЯ

Метрологично осигуряване е съвкупността от нормативни документи, технически средства за измерване и действия, използвани за установяване на доверие в резултатите от измерванията. Основните направления за метрологичното осигуряване на контрола на качеството на електрическата енергия са:

- създаване на процедури и методики;
- калибриране и метрологично проследяване на измервателната апаратура;
- обучение и квалификация на персонала.

Бъдещето на контрола на съответствието в областта на качеството на електрическата енергия е в създаването на ясно дефинирани и метрологично потвърдени процедури за оценка и контрол на показателите, характеризиращи качеството на електрическата енергия.

Тези процедури, трябва да бъдат основа за създаване на конкретни методики, за нуждите на контрола на показателите на електрическата енергия от страна на независими субекти. Те трябва да бъдат адаптивни, с оглед на възможностите им за [10]:

- адаптиране към използването на широк набор от средства за измерване в обхвата, без да създава зависимост от конкретни производители;
- регламентирано използване в широк аспект на приложения, неограничени от рамките стандарта;
- дефиниране на типови приложения с ясни характеристики, независими от условията на обекта за контрол.

Процедурите трябва да се основават на периодичен контрол на характеристиките на мрежовото напрежение и други параметри характеризиращи качеството на процеса на съгласуване на консуматорите с електрическата система. На база на резултатите от контрола и съществуващите нормативни документи у нас и в Европейския съюз да се правят констатации за наличие на възможни дефекти и за допустими/недопустими отклонения на зададените параметри. Тези констатации да са основа за извършване на разнообразни анализи относно оптималните режими при работа на потребителите.

Необходимостта от метрологично потвърждаване се налага от факта, че съществуващите регулационни документи дават възможност за широка неопределеност по отношение на представителността на резултатите. На базата на множество изследвания и статистико-вероятностни методи могат да се дефинират допустимата периодичност и продължителност на контролните измервания; начините на присъединяване, точността на нужната апаратура, бързодействието й, капацитета за регистрация и анализ, честотата на сканиране в зависимост от обхванатия интервал и т.н. За да има необходимата стойност процедурите могат да бъдат представително потвърдени от съответните авторитети в областта на метрологията БИМ, ДАМТН, БИС, БСА, СМБ (Съюз на метролозите в България) и метрологичните звена или квалифицирани представители на производители, оператори, разпределители и потребители на електрическа енергия [10].

Не е за пренебрегване и съпътстващия ефект за осигуряване на защита на интересите на потребителите в случай на доставяне на некачествена електрическа енергия. Пряко за тази цел се изисква координиране със заинтересованите институции и организации на потребители и производители на стоки, продукти и услуги, браншови организации и др.

Средствата за измерване, с които се реализира контрол на качеството на електрическата енергия, наричани мрежови анализатори или енергоанализатори са по същество многоканални информационно-измервателни системи (ИИС), включващи токови сензори и съответните канали, напреженови канали и устройство за събиране и съхранение на резултатите от измерванията, последващата им обработка и визуализация на информацията за тествания обект.

Съгласно стандарта БДС EN 61000-4-30 има три класа уреди, използвани според целите на контрола:

- Клас A – използва се, където е необходимо прецизно измерване, например при договорни или арбитражни измервания.
- Клас S – използва се за статистически приложение, като наблюдение на качествените параметри. Може да има лимитиран набор от измер-

вани параметри. Измервателните канали са като при клас А, но изискванията по обработката на резултатите от измерванията са по-ниски.

- Клас В – използва се за да разреши допускането на ползване на вече произведени и прилагани в практиката измервателни уреди и системи.

Всеки енергоанализатор, използван за нуждите на контрола на качеството на електрическата енергия от съответен акредитиран орган или звено за оценка на съответствието трябва да бъде проследимо калибриран. Изхождайки от горната постановка, че енергоанализаторите са информационно-измервателни системи може да се възприема идеята, че за калибрирането им би могло да се използва калибратори за калибриране по ток, по напрежение, по честота, по мощност и по фазов ъгъл, т.е. необходим е многофункционален калибратор. Съществуват и модерни, но скъпи системи за калибриране с еталонни източници и превключватели, като например FLUKE 6100, с помощта на които може да се осъществява и проверка на класа на апаратурата в съответствие със стандартите от серията БДС EN 61000-4-XX [4-8], както и калибриране по фликер. Такава система към днешна дата е налична единствено в Главна Дирекция "Националния център по метрология" (ГД НЦМ) към Българския Институт по Метрология.

На база на проведени експериментални изследвания може да се предложи калибрирането на енергоанализаторите да се извършва чрез многофункционален калибратор METRIX CX1651 [13-15]. Калибраторът разполага с вграден измерител на различни величини за контрол и изпитване на контролери, трансмитери и регулатори, но е монофазен и съответно проверката и калибрирането на трифазните енергоанализатори ще трябва да се извършва фаза по фаза. За трифазни измервания е добавен комплект за калибриране CA POWER CALIBRATION KIT [12], който изисква включване на прецизен (високо точен) мултимер и специализиран софтуер с компютър. По своята същност измерването и изчисляването на относителна грешка на всеки измервателен канал, без уточняване на въздействието на допълнителните фактори, не би могло да се нарече калибриране. То може да се дефинира като текущ метрологичен контрол, но при всички случаи автоматизираното изчисляване на относителната грешка по три параметъра и осем измервателни канала едновременно е ценно и спестява много време.

Разглежданият комплект за калибриране на практика може да се използва за калибриране на работни средства за контрол на качеството на електрическата енергия с обезпечена вертикална проследимост от страна на три направления: сектор "Електро-енергийни измервания", сектор "Електро-магнитни измервания" и лабораторията по "Време и честота" на ГД НЦМ към БИМ. Предпоставка за осъществяване на този процес е и еталонния източник FLUKE 6100.

Контролът на показателите за качеството на електрическата енергия се провежда от лаборатории, наричани още органи за контрол със специализирана апаратура – енергоанализатори. За установяване на доверие в резултатите от изпитванията на отделните органи, които извършват изпитвания, измервания и контрол с посочената специализирана апаратура от съществено значение има провеждането на изпитването за пригодност.

Изпитването за пригодност представлява оценяване на резултатите от измерванията (оценките на параметрите на качеството на електрическата енергия) на всеки участник спрямо предварително установени критерии чрез извършване на междулабораторни сравнения.

Общите изисквания (с технически характер и за системата за управление на доставчика на схема за изпитване на пригодност) за изпитванията за пригодност са дадени в международния стандарт EN ISO/IEC 17043 “Conformity assessment – General requirements for proficiency testing". В стандарта са представени числени критерии за оценяване на резултатите от изпитвания за пригодност.

В случай, когато изпитванията за пригодност служат и за целите на акредитацията на органи за оценяване на съответствието (например акредитирани органи за контрол, лаборатории), необходимо е да се вземе под внимание процедурата на ИА БСА – BAS QR 18 “Процедура за провеждане на междулабораторни сравнения и изпитвания за пригодност".

Дори оскъдното количество апаратура за контрол качеството на електрическата енергия, в национален план, значително надвишава броя на компетентния персонал, който може да я ползва пълноценно. Капацитетът в това отношение на национално ниво е скромен и преимуществено от ТУ-София, ДКЕВР, НЕК и ЕВН. Необходима е системна и целенасочена дейност за подготовка на метрологично компетентен персонал с методична подготовка за оценка на съответствието в областта контрола качеството на електрическата енергия.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изграждането на потенциал в национален мащаб в областта на контрола на качествените характеристики на електрическата енергия и съответното метрологично обезпечаване на процеса на контрол на тези характеристики, изисква системно развитие на основните елементи: нормативна база – процедури, методики и хармонизирани стандарти; метрологично осигурена измервателна апаратура; обучен и квалифициран персонал.

Тези аспекти на развитие са предмет на специализирана инженерна подготовка, като база и потенциал към момента има изградени и обезпечени в катедра „Електроизмервателна техника” на факултет Автоматика, ТУ-София.

ЛИТЕРАТУРА

[1] БДС EN 50160:2006 Характеристики на напрежението на електрическата енергия, доставяна от обществените разпределителни електрически системи.

[2] БДС EN 50160:2010 Характеристики на напрежението на електрическата енергия, доставяна от обществените разпределителни електрически мрежи.

[3] БДС EN 61000-4-1 Електромагнитна съвместимост (ЕМС). Част 4-1: Методи за изпитване и измерване.

[4] БДС EN 61000-4-7 Електромагнитна съвместимост (ЕМС). Част 4: Методи за изпитване и измерване. Раздел 7: Общо ръководство за измерване и средства за

измерване на хармоници и междинни хармоници в захранващи системи и съоръженията, свързани към тях.
[5] БДС EN 61000-4-7/A1 Електромагнитна съвместимост (ЕМС). Част 4-7: Методи за изпитване и измерване. Общо ръководство за измерване и средства за измерване на хармоници и междинни хармоници в захранващи системи и съоръженията, свързани към тях
[6] БДС EN 61000-4-15 Електромагнитна съвместимост (ЕМС). Част 4: Методи за изпитване и измерване. Раздел 15: Фликерметър. Функционални и проектни изисквания.
[7] БДС EN 61000-4-15/A1 Електромагнитна съвместимост (ЕМС). Част 4-15: Методи за изпитване и измерване. Фликерметър. Функционални и проектни изисквания.
[8] БДС EN 61000-4-30 Електромагнитна съвместимост (ЕМС). Част 4-30: Методи за изпитване и измерване. Методи за управляване качеството на електрическата енергия.
[9] "Методика за отчитане изпълнението на целевите показатели за качество на електрическата енергия и качество на обслужването от разпределителните предприятия и обществените доставчици" на ДКЕВР от 2010 г.
[10] Цветков П., ***Метрологично осигуряване на контрола на качеството на електрическата енергия***, Херон прес, С., 2011, с.128.
[11] Цанев Ц., С. Цветкова. ***Качество на електрическата енергия***, Издателство "Авангард Прима", С., 2011, с.188.
[12] Фирмена техническа документация на комплект за калибриране на енергоанализатори Power Calibration Kit CHAUVIN ARNOUX
[13] Фирмена техническа документация на многофункционален калибратор CX1651 METRIX
[14] Милушев Г., В. Василев, П. Цветков, Н. Гуров, ***Приложение на симулатори за онагледяване на несъответствия при захранване с промишлена честота***, Сборник доклади на XIX национален научен симпозиум с международно участие “Метрология и метрологично осигуряване 2009", 10-14 септември 2009 г., Созопол.
[15] Василев В., Г. Милушев, П. Цветков, Н. Гуров, ***Контрол на качеството на електрическата енергия***. Апаратура и калибриране. Енергиен форум, 23-26 юни 2010 г., Варна.

Автори: Пламен Цветков, проф. д-р – катедра Електроизмервателна техника, Технически университет – София, E-mail address: *tzvetkov@tu-sofia.bg*; Георги Милушев, доц. д-р – катедра Електроизмервателна техника, Технически университет – София, E-mail address: *gm@tu-sofia.bg* ; Николай Гуров, гл. ас. – катедра Електроизмервателна техника, Технически университет – София, E-mail address: *nrg@tu-sofia.bg*

Постъпила на 28.04.2012 **Рецензент** проф. дтн Е. Николов

Годишник на Технически Университет - София, т. 62, кн.3, 2012
Proceedings of the Technical University - Sofia, v. 62, book 3, 2012

СИМУЛАЦИЯ НА ИНДИВИДУАЛНАТА ПОДДЪРЖАЩА ЛЕКАРСТВЕНА ДОЗА НА БАЗАТА НА КОМПАРТИМЕНТЕН МОДЕЛ НА ОРГАНИЗМА

Красимира Проданова

Резюме: *Индивидуализиране на фармакотерапията се състои в намиране на подходяща стратегия за внасяне на лекарството в организма като се използват специфичните за пациента фармакокинетични скоростни константи на разпределение и елиминация. В настоящата работа е използван компартиментен подход за моделиране на организма и на тая база е разгледано индивидуализирането на фармакотерапията. Най-напред е моделирана натоварващата доза, а след това поддържащата доза при условието: плазмената концентрация в централния компартимент да е равна на константа, стойността на която е предписана от терапевта. Предложеният модел е стохастичен, тъй като скоростните константи за разпределение и елиминация на лекарството са оценени с нелинейна регресия от индивидуални данни за пациента. Данните са получени след терапия с Теофилин проведена във Военно-медицинска Академия.*
Ключови думи: *фармакокинетика, компартиментни модели*

SIMULATION OF THE INDIVIDUAL MAINTENANCE DRUG DOSE BASIS ON COMPARTMENT MODEL OF THE BODY

Krassimira Prodanova

Abstract: *Individualization of pharmacotherapy means to find suitable strategy for entering the medicine in the body using patient's pharmacokinetic rate constants for distribution and elimination. In the present paper compartment approach for modeling the body is used as a basis for individualization of pharmacotherapy. At first the loading dose and then the maintenance dose is modeled under the restriction: plasma concentration in the central compartment is equal to the prescribed of the therapeutist constant value. The proposed model is a stochastic one, because rate constants for distribution and elimination of the drug are estimated using nonlinear regression from individual data of the patient. The data are collected in the Clinic of Bulgarian Army after therapy by Theophillin.*
Key words: *pharmacokinetics, compartment models*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Фармакокинетиката е наука, която изучава поведението на лекарството в живите организми. Основните разглеждания са за процесите на резорбция, разпре-

© 2012 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved
ISSN 1311-0829

деление и елиминация на лекарството описани като функции на времето. Най-често разглежданите модели на организма са компартиментните модели [1,2,3]. Тяхното въвеждане датира от 70-те години на 20-ти век. Основното при тези модели е разделянето на организма на краен брой компоненти (компартименти) по определен начин и представяне на процесите като масообмен между така обособените структурни единици. Кинетиката на разпределение на лекарството се разглежда като дифузионен процес, при който масата на веществото се пренася от местата с по-висока концентрация към тези с по-ниска. Скоростта на процеса се определя от физикохимичните свойства на мембраните, през които се осъществява дифузията. Дефинирането на математически модел на компартимент се основава на следните предположения [1,2,3]:

- Частиците вещество в компартимента са равномерно и хомогенно разпределени и се считат неразличими помежду си;
- Вероятността за преход на всяка частица от един компартимент в друг е една и съща;
- Различните компартименти се различават кинетично, т.е. зависимостите „концентрация-време" за различните компартименти са различни в началния момент.

Разделянето на организма на компартименти е независимо от анатомо-физиологичната му структура. Поради това, че транспортът на лекарството се осъществява чрез кръвообращението, за централен (първи) компартимент се приема кръвта и добре оросените органи, за втори (периферен) се приемат мускулите и не добре оросените тъкани и т.н. Начините за прилагане на лекарството могат да се обобщят в следните три вида [1,2,3]:

- Мигновена интравенозна инжекция (i.v.) - приема се, че цялото количество лекарство мигновенно навлиза в централния компартимент;
- Интравенозна инфузия с постоянна скорост (inf.) – в централния компартимент постъпва постоянно количество вещество за единица време;
- Въвеждане от депо - орално, мускулно, подкожно, ректално, сублингвално и др. При този вид приложение фазата на проникване на лекарството в централния компартимент се нарича фаза на резорбция.

Поради принципната разлика на първите два начина на въвеждане и третия, фармакокинетичните модели се делят на две групи – с резорбция и без резорбция. В тази работа ще се разглеждат модели без резорбция.

Най-голямо приложение намират линейните фармакокинетични модели, при които основното допускане е, че фармакокинетичните процеси са линейни и стационарни. При предположение за линейност т.е., че скоростта на пренасяне от един компартимент в друг е пропорционална на количеството му, *n*-компартиментен модел се описва от система линейни диференциални уравнения [1,2]:

$$\frac{d\vec{M}(t)}{dt} = K\vec{M}(t) + \vec{D}(t), \quad t \geq 0,$$

където $\vec{M}(t) = \left(M_1(t), M_2(t), ..., M_n(t)\right)$ е вектор, чиито компоненти са количествата на лекарството във всеки от *n*-те компартимента, *K* е матрица, чиито елементи са константите k_{ij} представляващи скоростните константи на дифузията от ком-

партимент i към компартимент j, and $\vec{D}(t) = (D(t), 0, ..., 0)$ е векторът, чиито компоненти представляват количествата лекарство внесено във всеки от компартиментите за единица време. Тогава плазмената концентрация се представя във вида

$$x_1(t) = \frac{M_1(t)}{V_1},$$

където V_1 е обемът на разпределение на първи (централен) компартимент.

Нека изрично да отбележим, че само плазмени концентрации от първи компартимент могат да бъдат експериментално измервани.

Познаването на фармакокинетичния профил на лекарството на пациента позволява да се избере схема на дозиране, която ще осигури искания фармакотерапевтичен ефект и ще се избегнат нежеланите токсични ефекти.

2. ПОСТАНОВКА НА ЗАДАЧАТА

Един добре известен факт от практиката на лекарите е, че след приложението на дадена доза при някои лекарства, измерените плазмени концентрации у различните пациенти силно се различават, т.е. индивидуалните фармакокинетични параметри при тези лекарства са твърде различни. Този факт налага за пациенти в критично състояние да се индивидуализира терапията [4,5,8].

Както се отбелязва в редица работи [5,6,7,8,9], фармакокинетичните параметри на теофилиновите препарати (methylxanthines: aminophylline, Theo-Dur, Uniphyl, Theo-24, dyphylline, Nevphyllin, Theochron) варират в широки граници при пациенти от една и съща популация и не могат да се прогнозират чрез възрастта, теглото, пола или други демографски характеристики. Дозирането на теофилин трябва да се базира на индивидуалните плазмени концентрации, с цел постигане на максимален ефект с минимални странични реакции. Изключително внимание представляват популациите на бебета под 3 месеца, възрастни над 60 години, съпътстващи заболявания на бъбреци, черен дроб, сърце и др.

В тази работа се разглежда индивидуализиране на въвеждането чрез инфузия на лекарството Теофилин, което води до следната математическа задача:

Да се намери управление (вход) $I(t)$ като функция на индивидуалните фармакокинетични параметри на пациента, така че изходната плазмена концентрация да има константна стойност C_0 в интервал от време $t \in [0, t_m]$, предписани от терапевта.

Така поставената задача се разделя на три подзадачи:

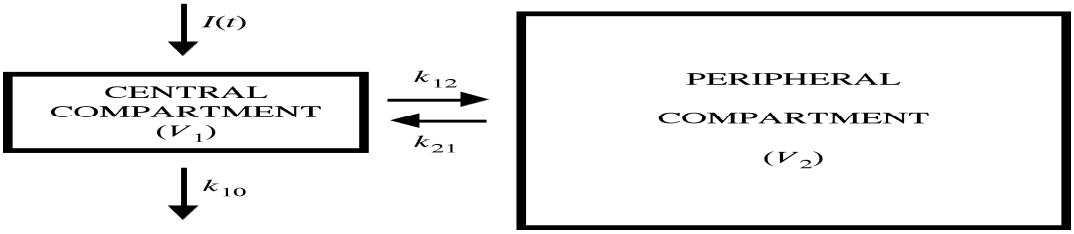
2.1. Идентификация на индивидуалните фармакокинетични параметри на пациента;

2.2. Определяне на момента t_0, в който концентрацията в първи компартимент достига стойността C_0 при натоварваща доза $I(t) = D_0$

2.3. Определяне на поддържаща доза $D(t)$ при ограничението: изходната плазмена концентрация да има константна стойност C_0 в интервал от време $t \in [t_0, t_m]$

Разглежданията са направени за един от най-често използваните компартиментни модели – двукомпартиментния [3]. Схема на такъв модел е представена на

фиг.1. Константата k_{10} се нарича скоростна константа на екскреция, константите k_{12}, k_{21} се наричат скоростни константи на разпределение, а V_1, V_2 са привидните обеми на разпределение на лекарството в първи (централен) и втори (периферен) компартимент.



Фиг.1. Схема на двукомпартиментен фармакокинетичен модел на организма адаптирана по [3].

2.1. ИДЕНТИФИКАЦИЯ НА ИНДИВИДУАЛНИТЕ ФАРМАКОКИНЕТИЧНИ ПАРАМЕТРИ НА ПАЦИЕНТА

В организма се внася интравенозно еднократно доза лекарство. След това се измерват плазмените концентрациите на лекарството в определени моменти от времето. С помощта на нелинейна регресия се оценяват търсените параметри.
Поведението на двукомпартиментния модел се описва от системата диференциални уравнения

$$\begin{aligned} \frac{dM_1}{dt} &= -\left(k_{10}+k_{12}\right)M_1 + k_{21}M_2 + D(t), \\ \frac{dM_2}{dt} &= \qquad k_{12}M_1 - k_{21}M_2, \end{aligned} \qquad (1)$$

където M_1, M_2 са количествата от лекарството съответно в първия и втория компартимент, k_{ij} са параметрите на двукомпатиментния модел, които подлежат на оценка, а $D(t)$ е управление, което характеризира внасянето на лекарството. В нашия случай – интравенозно внасяне – се приема, че лекарството е вече внесено, т.е. цялата доза е в първия компартимент и $D(t) \equiv 0$. Тогава интегрираме горната система при $D(t) \equiv 0$ и следните начални условия

$$t = 0, M_1(0) = D_{i.v.}, M_2(0) = 0, \qquad (2)$$

при което $D_{i.v.}$ е количеството от внесеното лекарство в първия компартимент в началния момент. Тук трябва да обърнем внимание на следното: M_1, M_2 са количества от лекарството, но впоследствие ще бъдат измервани концентрации на лекарството в първия компартимент. Затова ще да преминем от количества към концентрации. Ако V_1 е обемът на първия компартимент, то $x_1 = \frac{M_1}{V_1}$ ще бъде концентрацията на лекарството в него. Тъй като концентрации във втория компартимент не могат да се измерват, то неговият обем остава неизвестен и неопределяем. Тогава вместо системата (1) ще имаме системата

$$\begin{aligned}\frac{dx_1V_1}{dt} &= -\left(k_{10}+k_{12}\right)x_1V_1 + k_{21}M_2 + D(t),\\ \frac{dM_2}{dt} &= \qquad k_{12}x_1V_1 - k_{21}M_2,\end{aligned} \tag{3}$$

или

$$\begin{aligned}\frac{dx_1}{dt} &= -\left(k_{10}+k_{12}\right)x_1 + \frac{k_{21}}{V_1}M_2 + \frac{1}{V_1}D(t),\\ \frac{dM_2}{dt} &= \qquad k_{12}x_1V_1 - k_{21}M_2,\end{aligned} \tag{4}$$

Тогава началните условия (2) ще се запишат като

$$t=0,\ x_1(0)=\frac{D_{i.v.}}{V_1},\ M_2(0)=0, \tag{5}$$

където $D_{i.v.}$ е инжектираната доза. Решението на системата (4) (при $D(t)\equiv 0$) се определя от

$$\begin{aligned}x_1(t) &= C_1e^{\alpha t} + C_2e^{\beta t},\\ M_2(t) &= C_1\frac{k_{12}V_1}{\alpha+k_{21}}e^{\alpha t} + C_2\frac{k_{12}V_1}{\beta+k_{21}}e^{\beta t},\end{aligned} \tag{6}$$

където C_1, C_2 са интеграционни константи, които се намират от началните условия (2), а α,β са корените на характеристичното уравнение на хомогенната част на системата (4): $r^2+(k_{10}+k_{12}+k_{21})r+k_{10}k_{21}=0,$ и те са

$$\alpha = r_1 = \frac{1}{2}\left[-\left(k_{10}+k_{12}+k_{21}\right)+\sqrt{(k_{10}+k_{12}+k_{21})^2-4k_{10}k_{21}}\right],$$

$$\beta = r_2 = \frac{1}{2}\left[-\left(k_{10}+k_{12}+k_{21}\right)-\sqrt{(k_{10}+k_{12}+k_{21})^2-4k_{10}k_{21}}\right]$$

След определянето на интеграционните константи имаме

$$\begin{aligned}x_1(t) &= \frac{D_{i.v.}}{V_1(\alpha-\beta)}\left(\left(\alpha+k_{21}\right)e^{\alpha t}-\left(\beta+k_{21}\right)e^{\beta t}\right),\\ M_2(t) &= \frac{D_{i.v.}\,k_{12}}{(\alpha-\beta)}\left(e^{\alpha t}-e^{\beta t}\right).\end{aligned} \tag{7}$$

В първото от горните уравнения имаме четири неизвестни параметра - α,β,k_{21},V_1. Ще намерим статистически оценки за тези параметри въз основа на 8 наблюдения в точки $(t_i, x_1(t_i)),\quad i=1,2,...,8$. Измерените плазмените концентрации след еднократно интравенозно въвеждане на доза от 500mg на Theophylline при болен на 64 години, 76 кг., постъпил с астматичен пристъп, са поместени в Таблица 1.

С нелинейна регресия проведена с пакета MATLAB 7.1 от наблюденията се получават оценките на параметрите: $\alpha=-0{,}1626,\ \beta=-6{,}0383$, k_{21}=3,1326, $\mathrm{V}_1=20{,}7322$.

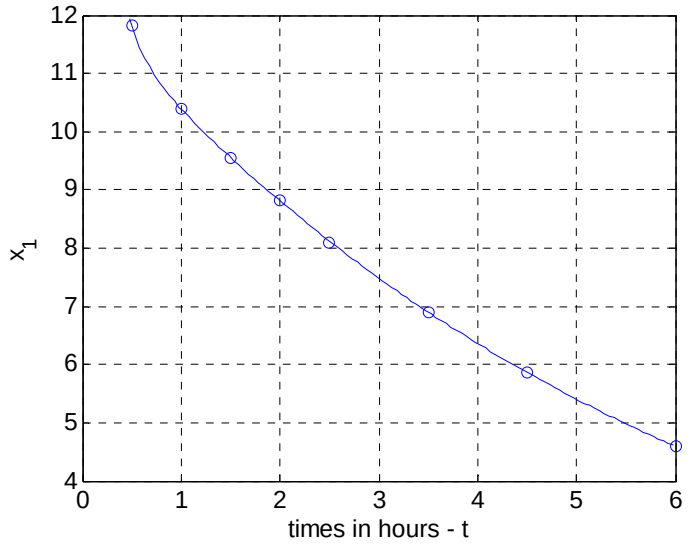
Апроксимативните границите на 95% доверителен интервал за α,β,k_{21},V_1 са съответно:

[-0,1640 ; -0,1612], [-9,2642 ; -2,8124], [2,4394; 3,8258], [4,6389; 36,8254].

Таблица 1.
Измерени плазмени концентрации след еднократно интравенозно въвеждане на доза Theophylline.

№	t_i (в часове)	$x_1(t_i)$ ($\mu g / ml$)
1	0.5	11.82
2	1	10.4
3	1.5	9.55
4	2	8.81
5	2.5	8.1
6	3.5	6.9
7	4.5	5.87
8	6	4.6

На фиг.2 е показана апроксимиращата крива и точките $t_i, x_1(t_i)$.



Фиг.2 Апроксимираща крива $x_1 = x_1(t)$

Като се използват зависимостите $\alpha\beta = k_{10}k_{21}$ и $\alpha + \beta = -(k_{10} + k_{12} + k_{21})$ се намират и параметрите $k_{10} = 0,3134,\quad k_{12} = 2,7549.$

2.2. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА МОМЕНТА t_0, В КОЙТО КОНЦЕНТРАЦИЯТА В ПЪРВИ КОМПАРТИМЕНТ ДОСТИГА СТОЙНОСТТА C_0 ПРИ НАТОВАРВАЩА ДОЗА $D(t) = D_0$

Минималната лекуваща концентрация за Теофилин е $5\,\mu g / ml$, а след интравенозното приложение оценената от т.2.1. за 24-тия час концентрация е $0{,}2462\,\mu g / ml \approx 0$, т.е. считаме, че започваме управлението от 0-лев час. Налага се да бъде внесена натоварваща доза за стабилизиране на болния, приложена чрез бавна инфузия (накапване с една и съща скорост) т.е. действаме с управление $D(t) = D_0 = const$ и то ще протича в интервала $[0, t_0]$. Целта е намирането на момента t_0, когато концентрацията в първия компартимент за първи път ще достигне $C_0\ \mu g / ml$. Това е разликата от други автори предложили схеми за индуви-

дуализация, при която t_0 предварително се задава [1,3,4]. В последния етап пък ще търсим такова управление $D(t)$, което да запази тази стойност на концентрацията в $[t_0, t_m]$.

За постигане на целта на първия етап от задачата трябва да решим системата

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= -\left(k_{10}+k_{12}\right)x_1 + \frac{k_{21}}{V_1}M_2 + \frac{1}{V_1}D_0, \\ \frac{dM_2}{dt} &= \qquad k_{12}x_1V_1 - k_{21}M_2, \quad t=0, x_1(0)=0, M_2(0)=0. \end{aligned} \tag{8}$$

Решението на системата (5) при посочените начални условия е

$$\begin{aligned} x_1(t) &= \frac{D_0\beta\left(\alpha+k_{21}\right)}{k_{10}k_{21}V_1\left(\alpha-\beta\right)}e^{\alpha t} - \frac{D_0\alpha\left(\beta+k_{21}\right)}{k_{10}k_{21}V_1\left(\alpha-\beta\right)}e^{\beta t} + \frac{D_0}{k_{10}V_1}, \\ M_2(t) &= \frac{D_0\beta\left(\alpha+k_{21}\right)}{k_{10}k_{21}\left(\alpha-\beta\right)}\frac{k_{12}}{\alpha+k_{21}}e^{\alpha t} - \frac{D_0\alpha\left(\beta+k_{21}\right)}{k_{10}k_{21}\left(\alpha-\beta\right)}\frac{k_{12}}{\beta+k_{21}}e^{\beta t} + \frac{k_{12}k_{21}}{k_{10}}D_0. \end{aligned} \tag{9}$$

От решението (9) могат да се направят някои заключения. Поради особеностите на задачата, трябва корените на характеристичното уравнение да са отрицателни. Но тогава x_1, M_2 ще клонят асимпотично както следва:

$$\lim_{t\to\infty} x_1 = \frac{D_0}{k_{10}V_1}, \lim_{t\to\infty} M_2 = \frac{D_0k_{12}}{k_{10}k_{21}}.$$

Тъй като количеството лекарство в първия компартимент се очаква да е по-голямо от това във втория, можем да заключим, че всички константи k_{10}, k_{12}, k_{21} са положителни и $k_{12} < k_{21}$. Противното означава натрупване на лекарство във втория компартимент (нещо, което не е невъзможно, но при теофилинова терапия е нежелателно [1]). От граничните преходи по-горе следва, че предписваната желана концентрация C_0 задължително трябва да бъде съобразена с индивидуалните фармакокинетични параметри: скоростна константа на елиминация на лекарството от организма k_{10} и обем на разпределение на централния компартимент V_1 на пациента, а именно C_0 да е по-малка от $\frac{D_0}{k_{10}V_1}$.

Сега, от уравнението

$$x_1(t_0) = C_0 = e^{\alpha t_0}\frac{D_0\left(\alpha+k_{21}\right)\beta}{k_{10}k_{21}V_1(\alpha-\beta)} - e^{\beta t_0}\frac{D_0\left(\beta+k_{21}\right)\alpha}{k_{10}k_{21}V_1(\alpha-\beta)} + \frac{D_0}{k_{10}V_1} \tag{10}$$

можем да определим момента t_0.

2.3. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПОДДЪРЖАЩА ДОЗА $D(t)$ ПРИ ОГРАНИЧЕНИЕТО: ИЗХОДНАТА ПЛАЗМЕНА КОНЦЕНТРАЦИЯ ДА ИМА КОНСТАНТНА СТОЙНОСТ C_0 В ИНТЕРВАЛ ОТ ВРЕМЕ $t \in [t_0, t_m]$.

Да разгледаме и втория етап от задачата. Управлението ($D(t)$) сега е неизвестно, но тъй като x_1 трябва да бъде постоянно ($x_1 = C_0 = x_1(t_0) \Rightarrow \frac{dx_1}{dt} = 0$), то системата (8) добива вида

$$0 = -\left(k_{10} + k_{12}\right)C_0 + \frac{k_{21}}{V_1}M_2 + \frac{1}{V_1}D(t),$$
$$\frac{dM_2}{dt} = \qquad k_{12}C_0V_1 - k_{21}M_2, \quad M_2(t_0) = M_{20}, \tag{11}$$

където M_{20} ще се определи от (9). Системата (11) е от първи ред и има решение

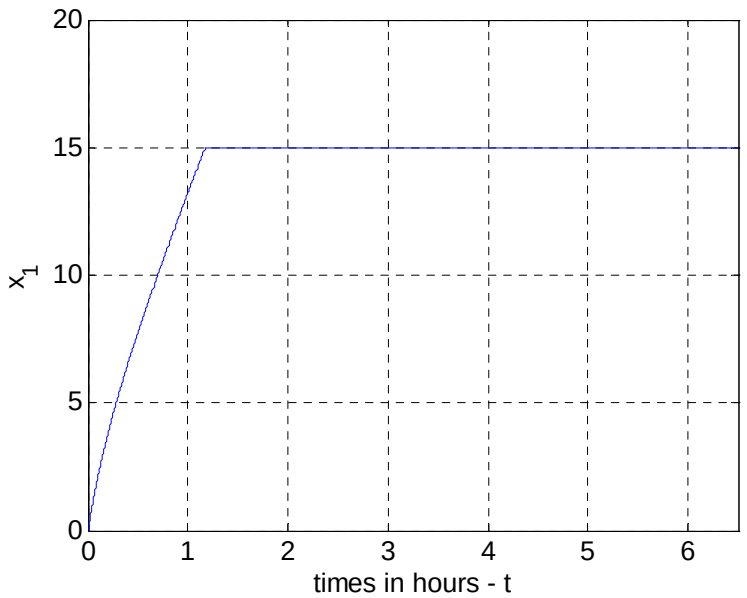
$$M_2(t) = C_3 e^{-k_{21}t} + \frac{k_{12}C_0V_1}{k_{21}}, \quad t \in [t_0, t_m],$$

където C_3 е интеграционна константа, която ще определим от началното условие. Имаме $M_2(t) = \left(M_{20} - \frac{k_{12}C_0V_1}{k_{21}}\right)e^{-k_{21}(t-t_0)} + \frac{k_{12}C_0V_1}{k_{21}}, \quad t \in [t_0, t_m],$ след което намираме и $D(t)$:

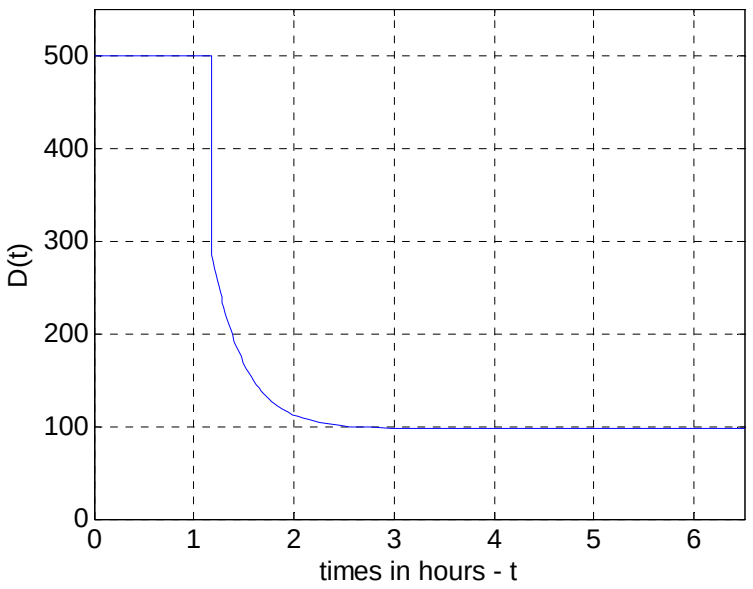
$$D(t) = V_1k_{10}C_0 + \left(C_0V_1k_{12} - M_{20}k_{21}\right)e^{-k_{21}(t-t_0)}. \tag{12}$$

Ясно е, че в момента t_0 управлението $D(t)$ ще има прекъсване със скок. Ще приемем, че в момента t_0, то ще има стойността D_0 и тогава за $t_0 + \varepsilon$, то ще бъде $D(t_0 + \varepsilon) = \left(k_{10} + k_{12}\right)C_0V_1 - k_{21}M_{20}$.

За данните, с които разполагаме и вече оценените стойности на параметрите, моментът t_0 се оказва равен на $t_0 = 1{,}1738$ часа, а стойността $D(t_0 + \varepsilon) = 290{,}97$ mg. Продължителността на инфузията след достигане на исканата C_0 се назначава за време преценено от терапевта, съобразно със състоянието на болния. На фиг.3 е показана симулираната при това управление концентрация x_1 в първи компартимент при $t_m = 6{,}5$ часа. Вижда се как в в интервала $[t_0, t_m]$ се установява постоянна концентрация $C_0 = 15\mu g/ml$. На фиг.4 е дадено управлението, което реализира изследвания процес. Вижда се как след постоянното управление $D(t) = D_0$ следва скок и следващото управление по закона (9) дава търсеното решение.



Фиг.3. Концентрация в първия компартимент $x_1 = x_1(t)$



Фиг.4. Управлението $D(t)$ при ограничението: изходната плазмена концентрация да има стойност $C_0 = 15\mu g/ml$ в интервал от време $t \in [t_0, t_m]$.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Направената оценка на фармакокинетичния профил на лекарството на пациента ни позволи да построим индивидуално управление на дозиране, което осигурява постоянна плазмена концентрация допринасяща за максимален фармакотирапевтичен ефект и избягване на нежелани токсични ефекти. Оценката на индивидуалните фармакокинетични параметри на пациента е направена на базата на двукомпартиментен линеен фармакокинетичен модел на разпределение [1,2,3]. Такъв модел на разпределение след внасяне чрез инфузия на теофилинови препарати в организма е установен и от други автори [1,3,4], но при тези разглеждания се предписва времето t_0 за достигане на постоянната концентрация и се използват само индивидуалната скоростната константа на екскреция k_{10} и обема V_1. Предложеното от нас управление отчита всички скоростни константи k_{ij}, обема V_1 , а времето t_0 се оценява и зависимост от тези индивидуални параметри на пациента.

Намереното управление обаче е трудно осъществимо на практика, затова открит остава проблема за намиране на управление, което е „близко” в определен смисъл до намереното, но е лесно реализируемо. Такова би било например управление, което в определени равни интервали от време има постоянни стойности.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Wagner J.G. (1979), Fundamentals of Clinical Pharmacokinetics, Drug Intelligence Publisher, Hamilton.

[2]. Anderson D.N. (1983), Compartimental modeling and tracer kinetics, Lecture Notes in Biomathematics, vol.50, Springer-Verlag, Heidelberg.

[3]. Burton M. E., Leslie M.,Shentag J. (2006), Applied pharmacokinetics and pharmacodynamics: Principies of therapeutic drug monitoring, Lippincott Williams&Wilkins.
[4]. Gaudreault P, Harwood-Nuss (2005), Methylxanthines, Toxicology. In: Clinical Practice of Emergency Medicine, 4-th ed., pp.1649-1652.

[5]. Георгиева Р. (2011), Фармакокинетични особености и фармакотерапия в неонаталния период, МЕДИНФО, vol.8.

[6]. Blackburn S. (2007), Pharmacology and pharmacokinetics during the perinatal period, In: Maternal, Fetal, Neonatal Physiology, 3-th ed., Saundes, Elsevier, pp.193-226.

[7]. Kallstrom T.J. (2004), Evidence-based asthma management. Respir Care., vol. 49(7), pp.783-92.

[8]. Bronstein AC, Spyker DA, Cantilena LR Jr, Green JL, Rumack BH, Heard SE. 2009 Annual Report of the American Association of Poison Control Centers' National Poison Data System (NPDS): 27th Annual Report. Clin Toxicol (Phila)., vol.48(10), pp.979-11178, 2010.

[9]. Charytan D, Jansen K, Severe metabolic complications from theophylline intoxication, Nephrology (Carlton), vol.8(5), pp.239-42, 2003.

[10] MATLAB, Computer program manual, 2001.

Автор: Красимира Проданова, доц. д-р - Факултет по приложна математика и информатика, Технически университет - София, катедра „Стохастика и оптимиране”, E-mail address: *kprod@tu-sofia.bg*

Постъпила на 24.05.2012 **Рецензент** доц. д-р Лиляна Топчийска

Годишник на Технически Университет - София, т. 62, кн.3, 2012
Proceedings of the Technical University - Sofia, v. 62, book 3, 2012

ОПТИМИЗАЦИЯ НА ПОДДЪРЖАЩАТА ТЕРАПИЯ НА БАЗАТА НА КОМПАРТИМЕНТЕН ПОДХОД ЗА МОДЕЛИРАНЕ НА ОРГАНИЗМА

Красимира Проданова

Резюме: *В настоящата работа е представена еднокритериална и многокритериална оптимизация на скоростта на инфузия и на интервалите на внасяне на лекарството при ограничението: плазмената концентрация в централния компартимент да е равна на константа, стойността на която е предписана от терапевта. Предложеният модел е стохастичен и съобразен с индивидуалните фармакокинетични параметри на пациента.*
Ключови думи: *фармакотерапия, многокритериална оптимизация*

OPTIMIZATION OF THE MAINTENANCE THERAPY BASIS ON COMPARTMENT APPROACH OF MODELLING THE BODY

Krassimira Prodanova

Abstract: *In the present paper the one- and multi-criterial optimization of input infusion rate and the intervals of entering the drug is presented under the restriction: plasma concentration in the central compartment is equal to the prescribed of the therapeutist constant value. The proposed model is a stochastic one and is based on individual pharmacokinetics parameters of the patient.*
Keywords: *pharmacotherapy, multicriterial optimization*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

В [1] бе разгледан въпросът за индивидуализацията на терапия на пациент с Теофилин и бе намерено управление, което поддържа достигнатата предписана стойност на концентрация на лекарството в плазмата. Намереното управление обаче е трудно да се реализира на практика. В тази работа се търси управление, което е „близко” в определен смисъл към управлението в [1], но е лесно реализируемо.

2. ПОСТАНОВКА НА ЗАДАЧАТА

Търсим такова управление $D(t)$, което в определени интервали има постоянни стойности.

За целта, да разделим интервала $[t_0, t_m]$ на N равни части. И във всеки такъв подинтервал да заменим $D(t)$ с нейната средна интегрална стойност за този подинтервал - D_{Ni}. Така имаме

© 2012 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved
ISSN 1311-0829

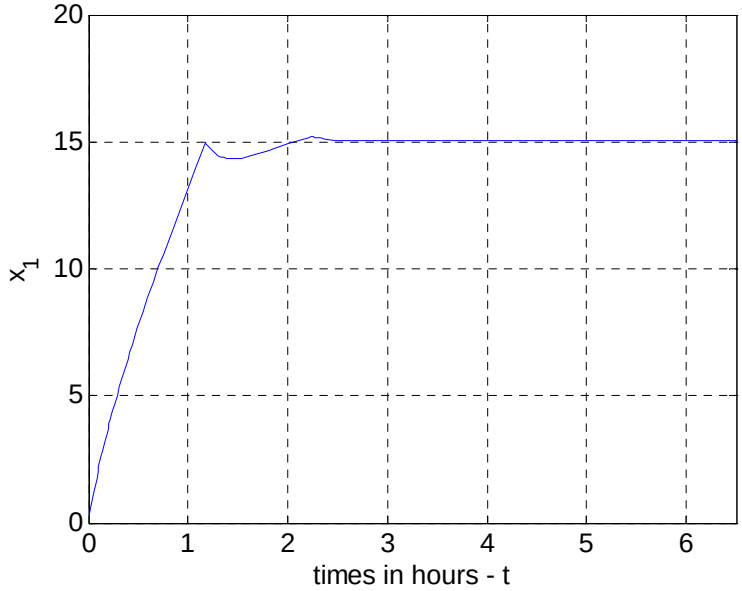
$$D_{Ni} = \frac{1}{t_{i+1} - t_i} \int_{t_i}^{t_{i+1}} D(t)dt, \quad i = 1, 2, ..., N, \quad t_1 = t_0, t_{N+1} = t_m,$$

където $D(t)$ е определеното с израза (9) от първата част. Следва

$$D_{Ni} = \frac{1}{t_{i+1} - t_i} \int_{t_i}^{t_{i+1}} \left(V_1 k_{10} C_0 + \left(C_0 V_1 k_{12} - M_{20} k_{21} \right) e^{-k_{21}(t - t_1)} \right) dt =$$

$$= V_1 k_{10} C_0 + \frac{1}{t_{i+1} - t_i} \left(M_{20} - \frac{k_{12} C_0 V_1}{k_{21}} \right) \left(e^{-k_{21}(t_{i+1} - t_1)} - e^{-k_{21}(t_i - t_1)} \right).$$

Основание да изберем такова управление е фактът, че при него количеството на внесеното в организма лекарство е същото както при управлението (9) от [1].



Фиг.1. Концентрацията в първи компартимент за $N = 5$.

На фиг.1 е показано как се изменя концентрацията в първия компартимент при такова управление за $N = 5$, а на фиг.2 – самото стъпаловидно управление, което аналитично се описва като

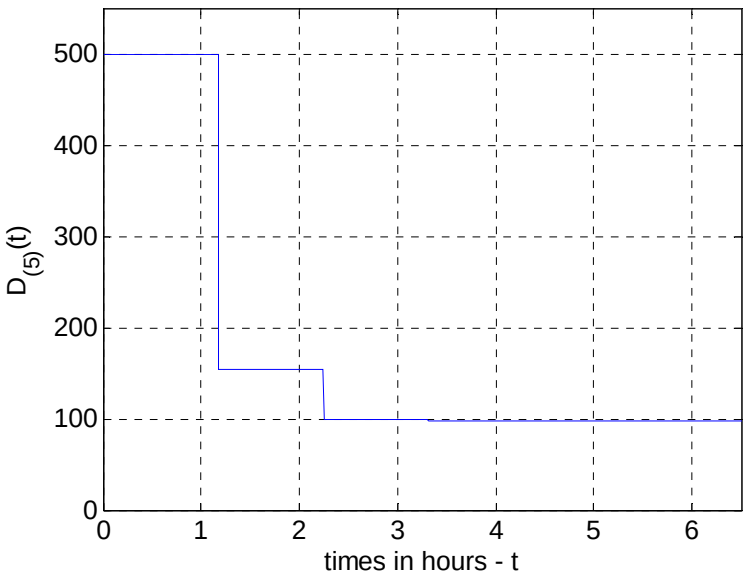
$$D_{(5)}(t) = \{ D_{(5i)}, \quad t_i \le t < t_{i+1}, i = 1, 2, ..., 5,$$

при което

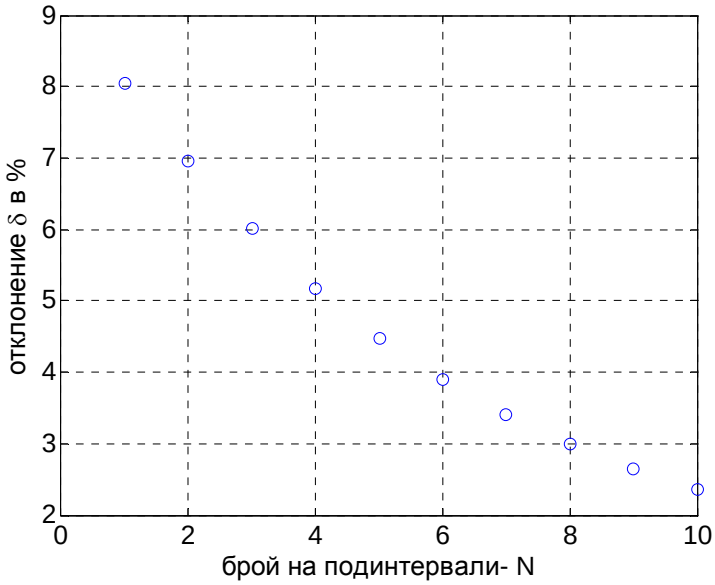
$$D_{(51)} = 153.38, D_{(52)} = 99.45, D_{(53)} = 97.53, D_{(54)} = 97.464, D_{(55)} = 97.462,$$

$$t_0 = t_1 = 1.1738, t_2 = 2.2390, t_3 = 3.3043, t_4 = 4.3695, t_5 = 5.4348, \quad t_6 = t_m = 6.5 \text{ [h]}.$$

Вижда се, че в последните три подинтервала заместващите управления са практически неразличими. От анализа на фиг.1 може да се направи заключението, че при това стъпаловидно управление в първия подинтервал (след $t_0 = t_1$) има най-голямо отклонение от предписаната концентрация C_0. Очевидно, при увеличаване на N, това отклонение ще намалява. Това дава възможност да се определи такова N, при което отклонението ще бъде ограничено от някаква зададена стойност δ. Не е трудно да се намери минимума на функцията $x_1(t)$ в интервала $[t_1, t_2]$ - $x_{1\min}$ (при изменящо се N) и да се определи това най-голямо отклонение.



Фиг.2. Стъпаловидно управление за $N = 5$ равни интервала.



Фиг.3. Отклонение от предписаната концентрация в първия подинтервал

На фиг.3 е показано как това отклонение (в проценти - $\delta = \frac{C_0 - x_{1\min}}{C_0} \times 100$) се изменя в зависимост от броя на подинтервалите N. Характерът на това изменение дава едно добро указание за избора на N. Анализът на фиг.1 подсказва, че вместо равни подинтервали ще бъде по-добре да използваме неравни подинтервали. Възможен е, например, един такъв подход. Нека разделим интервала $[t_0, t_m]$ на 10 подинтервала, всеки с дължина $\Delta_{10} = \frac{t_m - t_0}{10}$, и впоследствие да формираме подинтервалите по следния начин:

$$\bar{\Delta}_1 = \Delta_{10}, \bar{\Delta}_2 = 2 \times \Delta_{10}, \bar{\Delta}_3 = 3 \times \Delta_{10}, \bar{\Delta}_4 = 4 \times \Delta_{10}.$$

Тогава ще получим 4 подинтервала, за първия от които според фиг.3 ще имаме отклонение под 2.5%.

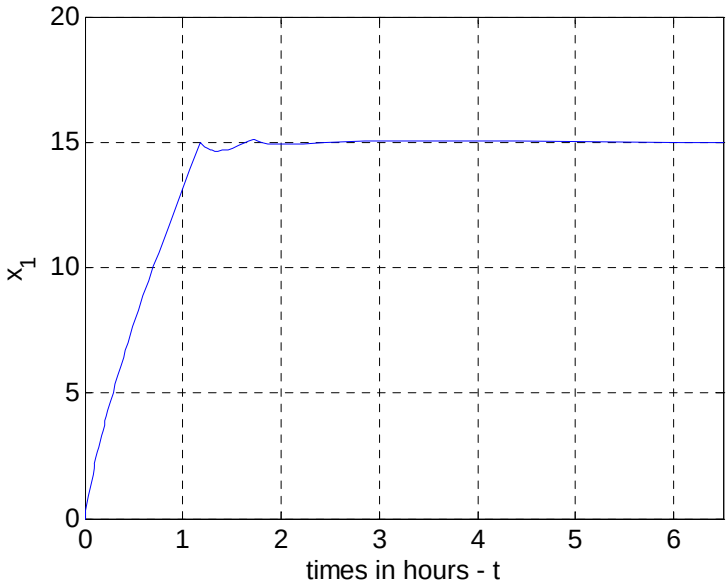
Но, да поставим задачата по-общо. Нека имаме произволно разделяне на неравни подинтервали. За да можем да отчитаме предимството на едно разделяне пред друго, ще въведем критерии за това.

Тъй като целта е да се приближаваме максимално към предписаната стойност C_0, ще потърсим максималните отклонения от тази стойност във всеки подинтервал $X_{i\max} = \max\left|x_1(t) - C_0\right|, \quad t \in [t_i, t_{i+1}]$ и ще въведем критерия

$$F_1 = \frac{1}{N}\left(\sum_{i=1}^{N} X_{i\max}^2\right)^{\frac{1}{2}}. \qquad (1)$$

Този критерий отчита само максималните отклонения, поради което ще въведем и втори критерий, който да отчита интегрално отклоненията от C_0:

$$F_2 = \sum_{i=1}^{N} \int_{t_i}^{t_{i+1}} \left|x_1(t) - C_0\right| dt. \qquad (2)$$



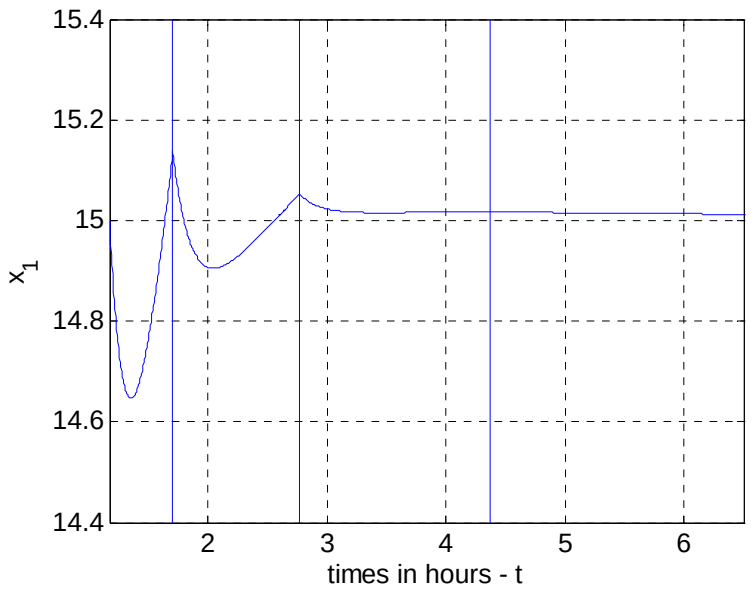
Фиг.4. Концентрацията на първия компартимент при разделяне на четири неравни интервала

На фиг.4 е показана графиката на концентрацията на първия компартимент при случая на разделяне на четири неравни интервала, при избраното съотношение на подинтервалите от по-горе.

На фиг.5 е показано изменението на $x_1(t)$ в една тясна лента около C_0 в интервала $[t_0, t_m]$. Означени са и подинтервалите. Управлението, което реализира това изменение на концентрацията аналитично то се описва по следния начин

$$D_{(4)}(t) = \{D_{(4i)}, \quad t_i \le t < t_{i+1}, i = 1, 2, ..., 4,$$

$$D_{(41)} = 191.57, D_{(42)} = 108.01, D_{(43)} = 97.72, D_{(44)} = 97.46,$$
$$t_0 = t_1 = 1.1738, t_2 = 1.7064, t_3 = 2.7717, t_4 = 4.3695, t_5 = t_m = 6.5 \text{ [h]}.$$



Фиг.5. Изменение на $x_1(t)$ в тясна лента около C_0 в интервала $[t_0, t_m]$ при $N = 4$ неравни интервала.

Стойностите на въведените два критерия в този случай са

$$F_1 = 0.0956, \quad F_2 = 0.2320.$$

За сравнение при разгледания по-горе случай на 5 еднакви интервала тези критерии са

$$F_1 = 0.4244, \quad F_2 = 0.6801.$$

И тези числа, а и самите графики убедително потвърждават предимствата на второто разделяне на подинтервали.

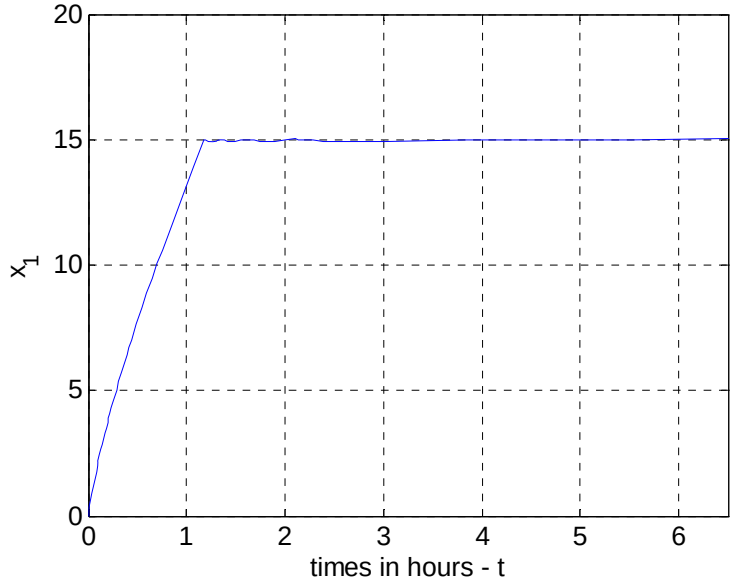
Очевидно при подходящо избрани неравни подинтервали се получават по-добри резултати.

Естествено е да се постави следния въпрос – кои са подинтервалите, които реализират оптимални показатели.

Ще решим две оптимизационни задачи – за всеки от критериите за потърсим такова разделяне, което води до минимални стойности на критериите. Ще решим тази задача при фиксирано $N = 4$. Ще използваме метода на покоординатното спускане, като за начално приближение ще приемем втория от вече разгледаните случаи.

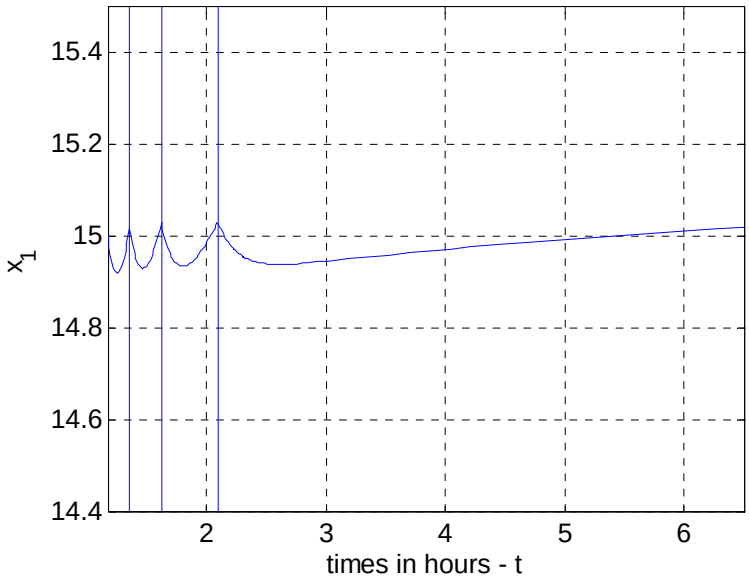
За първия критерий получаваме минимална стойност

$$F_1 = 0.03416.$$



Фиг.7. Графиката на $x_1(t)$ в интервала $[0, t_m]$ за $N = 4$ при първи критерий.

На фиг.7 е показана графиката на $x_1(t)$ в интервала $[0, t_m]$. На фиг.8 е показано изменението на $x_1(t)$ в една тясна ивица около C_0, както и самите оптимални подинтервали.



Фиг.8. Изменение на $x_1(t)$ в тясна ивица около C_0 и оптималните подинтервали за $N = 4$ при първи критерий.

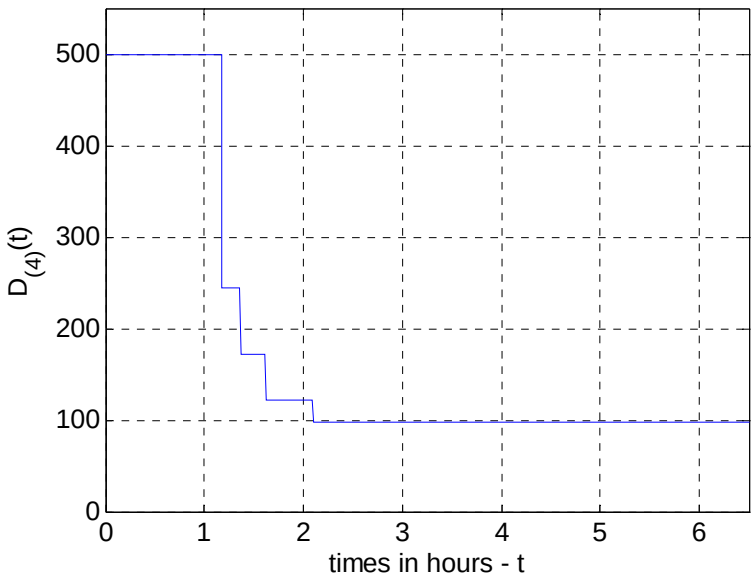
.

На фиг.9 е показано съответното оптимално управление при $N = 4$.

$$D_{(4)}(t) = \{D_{(4i)}, \quad t_i \le t < t_{i+1}, i = 1, 2, ..., 4,$$

$$D_{(41)} = 244.92, D_{(42)} = 171.78, D_{(43)} = 122.30, D_{(44)} = 98.24,$$

$$t_0 = t_1 = 1.1738, t_2 = 1.3559, t_3 = 1.6209, t_4 = 2.0950, t_5 = t_m = 6.5 \text{ [h]}.$$



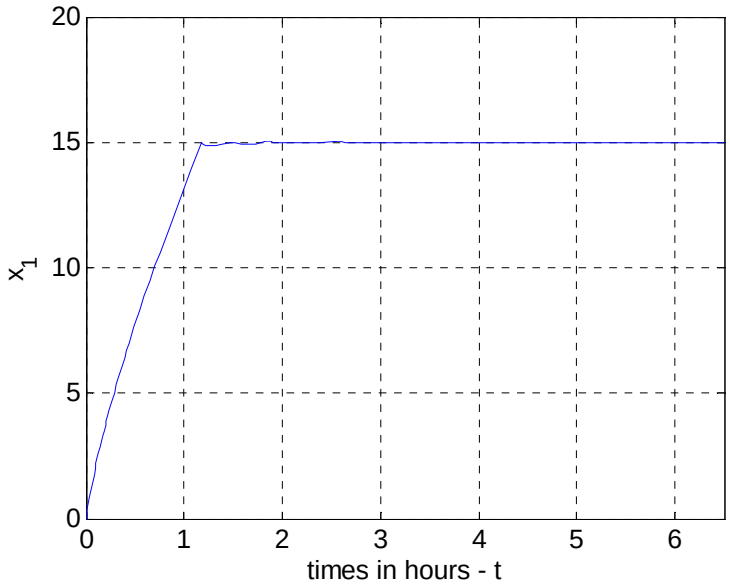
Фиг.9. Оптимално управление в тясна ивица около C_0 и оптималните подинтервали за $N = 4$ при първи критерий.

За втория критерий получаваме минимална стойност $F_2 =$ 0.0806. Съответното оптимално управление е

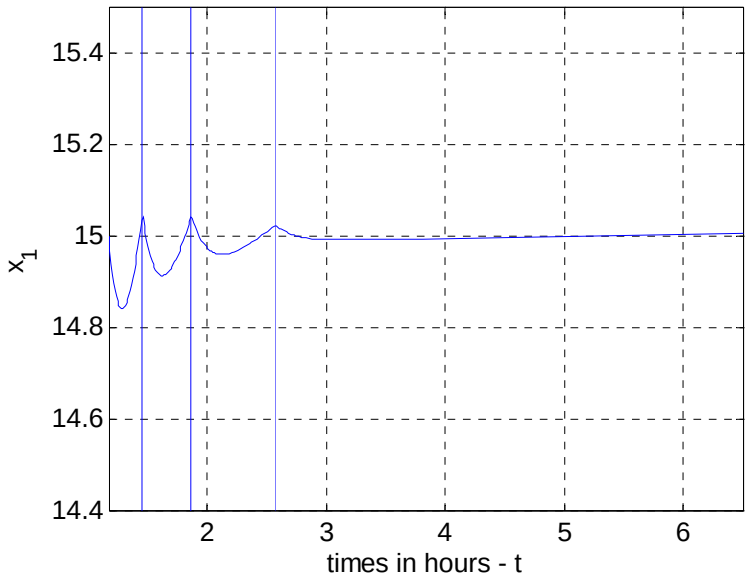
$$D_{(4)}(t) = \{D_{(4i)}, \quad t_i \le t < t_{i+1}, i = 1, 2, ..., 4,$$

$$D_{(41)} = 225.58, D_{(42)} = 142.16, D_{(43)} = 106.33, D_{(44)} = 97.66,$$
$$t_0 = t_1 = 1.1738, t_2 = 1.4580, t_3 = 1.8685, t_4 = 2.5719, t_5 = t_m = 6.5 \text{ [h]}.$$

Съответната графика на концентрацията е показана на фиг.11.



Фиг.10. Графиката на $x_1(t)$ в интервала $[0, t_m]$ за $N = 4$ при втори критерий.



Фиг.11. Изменение на $x_1(t)$ в тясна ивица около C_0 и оптималните подинтервали за $N = 4$ при втори критерий.

Получените резултати показват, че двата критерия, макар и да има очевидна корелация между тях, отчитат различни свойства на поставената оптимизационна задача и имат самостоятелно значение.

Можем да вземем под внимание и двата и тогава ще имаме задача от многокритериална оптимизация (в случая само двукритериална).

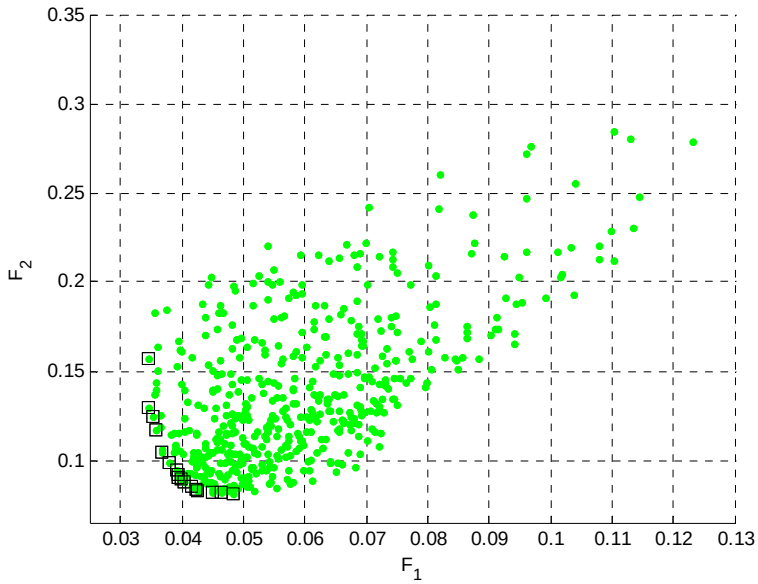
Ще решим тази задача с метода на Собол и Статников [4]. Този метод използва равномерно разпределени тестови точки в пространството на параметрите и определя компромисните точки на Парето в пространството на критериите. Всяка една от точките на Парето е решение на поставената задача.

Избираме следните граници на изменение на трите параметра $T(2), T(3), T(4)$ ($T(1) = t_0, T(5) = t_m$ са фиксирани) – това са времената, които определят разделянето на интервала $[t_0, t_m]$ на подинтервали.

При техния избор сме се ръководили от вече известните оптимални разделяния за двата критерия – те трябва да са включени в избраните граници, а и трябва да се избегне неприятното сечение на подинтервали (при всички случаи трябва да бъде изпълнено $T(2) < T(3) < T(4)$).

$$\bar{T}_2 - 0.2 < T(2) < \bar{T}_2 + 0.2,$$
$$\bar{T}_3 - 0.1 < T(3) < \bar{T}_3 + 0.25,$$
$$\bar{T}_4 - 0.2 < T(4) < \bar{T}_4 + 0.5,$$

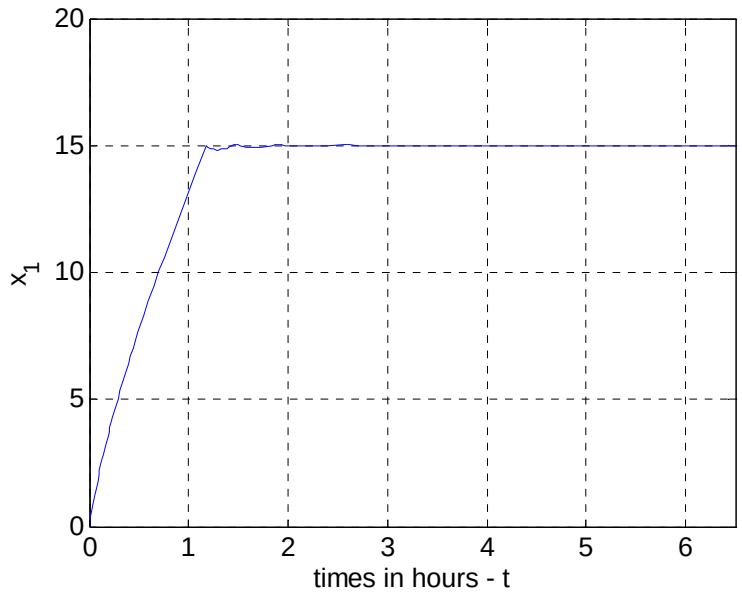
където $\bar{T}_2 = 1.4, \bar{T}_3 = 1.7, \bar{T}_4 = 2.2.$. За броят на тестовите точки N_s се избира число, което е степен на 2. Ще вземем N_s =512.



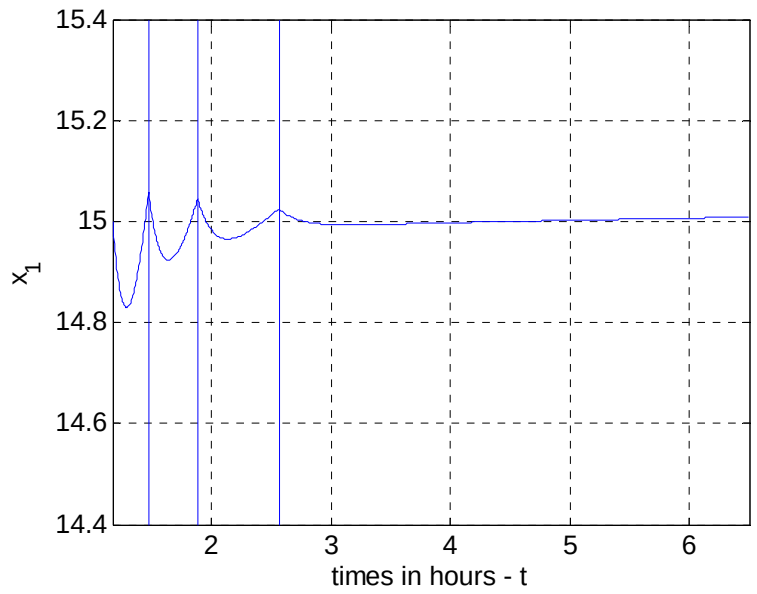
Фиг.13. Тестови точки и компромисни точки на Парето
(последните са заградени в квадрати)

На фиг.13 са показани тестовите точки и компромисните точки на Парето (последните са заградени в квадрати). Тези точки в случая се оказват 17 на брой. Координатите (стойностите на двата критерия) за една от тези точки са $F_1 = 0.0483, F_2 = 0.0812$, а съответните точки на разделянето на интервала $[t_0, t_m]$ на подинтервали са $T(2) = 1.4750, T(3) = 1.8844, T(4) = 2.5688$.

На фиг.14 и фиг.15 са показани съответно графиката на $x_1(t)$ в интервала $[0, t_m]$ и изменението на тази функция в тясната лента около C_0 в интервала $[t_0, t_m]$, както и съответните подинтервали за първата от показаните точки на Парето.



Фиг.14. Графиката на $x_1(t)$ в интервала $[0, t_m]$ за показаната точка на Парето.



Фиг.15. Изменение на $x_1(t)$ в тясна ивица около C_0 и оптималните подинтервали за показаната точка на Парето.

В фиг.15 могат да се забележат някои малки разлики в сравнение с оптималните решения при еднокритериалната оптимизация.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведените изследвания показват как с помощта на оптимизационни подходи могат да се получат успешни резултати при индивидуализираната терапия. Теоретично намереното оптимално решение от [1] се заменя от подходящо определено стъпаловидно управление. Основните резултати са намирането на оптимално разделяне на даден интервал на подинтервали. Въведени са критерии за оценяване на различното разделяне. Решават се едно- и дву-критериални оптимизационни задачи. Приведените конкретни числени реализации убедително демонстрират „приближаването”на предложеното заместващо решение към теоретичното.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Проданова К., Симулация на индивидуалната поддържаща лекарствена терапия на базата на компартиментен модел на организма, Годишник на Техническия университет, София, 2012.

[2] Wagner, J. G., Fundamentals of Clinical Pharmacokinetics, Drug Intelligence Publisher, Hamilton, 1979.

[3]. Henderson A, Wright DM, Pond SM. Management of theophylline overdose patients in the intensive care unit. Anaesth Intensive Care., 20(1), pp. 56-62, 1992.

[4]. Statnikov R. B., J. B. Matusov, Multicriteria Analysis in Engineering, Dordrecht: Kluwer, 2002.

Автор: Красимира Проданова, доц. д-р - Факултет по приложна математика и информатика, Технически университет - София, катедра „Стохастика и оптимиране”, E-mail address: *kprod@tu-sofia.bg*

Постъпила на 24.05.2012 **Рецензент** доц. д-р Лиляна Топчийска

Годишник на Технически Университет - София, т. 62, кн.3, 2012
Proceedings of the Technical University - Sofia, v. 62, book 3, 2012

СПЕЦИФИЧНО ПРОРЯЗВАНЕ НА СКРЕПИТЕЛНИТЕ ОТВОРИ В БОЛТОВИ ШИННИ СЪЕДИНЕНИЯ

Райна Ценева, Петър Динев

Резюме: *Статията разглежда въвеждането на специфично прорязване в скрепителните отвори на болтови шинни съединения, което води до значително увеличаване на действителната контактна повърхност и до намаляване на контактното съпротивление. Предлаганият дизайн съдържа 4 прореза с кръгови отвори в краищата. Прорезите са дълги 3mm и лежат на взаимно перпендикулярни оси, завъртени на 45° по отношение на оста на шините. Тази специфична форма на отвора е сравнена с класическия вариант на болтово шинно съединение посредством редица компютърни модели. Установено е, че предложеният нов дизайн води до значително увеличаване на контактното налягане и проникване в контактната зона на шините.*

Ключови думи: *скрепителни елементи, болтови шинни съединения, специфичен скрепителен отвор, контактно съпротивление, контактно налягане, контактно проникване*

SPECIFIC SLOTTING OF FASTENING HOLES IN BOLTED BUSBAR ASSEMBLIES

Raina Tzeneva, Peter Dineff

Abstract: *The paper discusses how introducing particularly slotted bolt holes in bolted busbar assemblies could increase significantly the true contact area and reduce the contact resistance. The profile presented has 4 slots with circular holes at the ends. The slots are 3mm long and lie on mutually perpendicular axes, rotated at an angle of 45 degrees in relation to the busbar axes. This hole shape is compared with the classical one of bolted busbar assemblies by the help of several computer models. It has been established that the new shape case leads to a considerable increase in the contact pressure and penetration in the contact area between the busbars.*

Keywords: *fastening elements, bolted busbar assemblies, specific hole shape, contact resistance, contact pressure, contact penetration*

1. INTRODUCTION

The boost to transmission and distribution lines loading is due primarily to the amplified consumption of electrical energy worldwide. This explains the elevated reliability and service requirements of high power connections in the power-utility industry. The fundamentals to reliable bare overhead high-power line connections design are given

© 2012 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

in [1] and include: maximization of true area of electrical contact, optimization of frictional forces, minimization of creep and stress relaxation, minimization of fretting and galvanic corrosion, minimization of differential thermal expansion along and normal to interfaces. Summarizing the major criteria, it is worthwhile to note that all of them can be met simultaneously if an outline could achieve a sufficiently large contact load and metal-to-metal contact area (increased number and area of α-spots) as well as sufficient elastic energy storage in the connection so as to maintain acceptable load intensity throughout the connection service life.

The objective of this study is to analyze the influence that four bolt hole slots with circular ends exert on the busbars contact penetration and pressure, when the slots are arranged in pairs on mutually perpendicular axes, rotated at an angle of 45 degrees in relation to the busbar axes.

2. THEORETICAL BACKGROUND

All joint surfaces are rough and their surface topography shows summits and valleys. Thus under the joint force F two joint surfaces get into mechanical contact only at their surface summits. Electrical current lines are highly constricted at the contact spots when passing through, as presented schematically in Fig. 1a. This constriction amplifies the electric flow resistance and hence the power loss. Obviously, the more the contact spots, the smaller the power loss at the interface of the conductors. Power connections with superior performance are designed to maximize both the number and the life of the contact spots

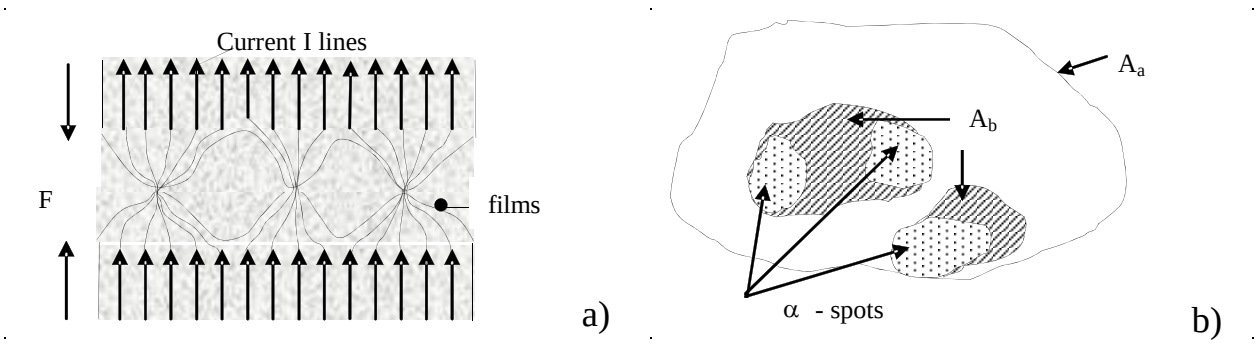


Fig.1. a) Contact interface and the constricted current lines; b) Apparent contact area Aa, bearing area Ab with quasimetallic contact zones and α-spots

Hence the load bearing area A_b in an electric joint measures only a fraction of the overlapping, the so called apparent area A_a. Metal surfaces, e.g. those of copper conductors, are often covered with oxide or other insulating layers. As a result the load bearing area Ab may enclose regions that do not contribute to the current flow. So a fraction of Ab may have metallic or quasimetallic contact and the real electric contact area Ac, i.e. the conducting area, could be smaller than the load bearing area A_b (Fig. 1b) [2].

A conducting area is referred to as quasimetallic when it is covered with a thin (< 20 Å) film that can be tunneled through by electrons. This quasimetallic electric contact results in a relatively small film resistance R_f.

The summits of the two electric joint surfaces, being in metallic or quasi-metallic contact, form the so called α-spots where the current lines bundle together causing the constriction resistance R_c. The number n, the shape and the area of the α-spots are generally stochastic and depend on the material parameters of the conductor, the topography of the joint surfaces and the joint force. For simplicity it is often assumed that the α-spots are circular. Looking at one such spot, its constriction resistance R_c depends on its radius a and the resistivity ρ of the conductor material. Under the assumption that the bulk material above and under the α-spot is infinite in volume, the value of the constriction resistance can be calculated by means of the Holm´s ellipsoid model

$$R_c = \frac{\rho}{2a} \quad (1)$$

If a single α-spot is completely covered with a thin film, of resistivity ρ_f and thickness s, its film resistance R_f is given by

$$R_f = \frac{\rho_f s}{\pi a^2} = \frac{\sigma_f}{\pi a^2} \quad (2)$$

where σ_f is the tunnel resistivity i.e. the resistance of the film across one cm².

The total resistance R_1 of an α-spot, referred to as contact resistance, results in the sum of the constriction resistance R_c and the film resistance R_f

$$R_1 = R_c + R_f \quad (3)$$

3. MODELING THE BOLTED BUSBAR CONNECTION

If the deeper contact penetration increases α-spots both in numbers and dimensions, which in turn expands the true contact area and decreases contact resistance, then a new hole-shape could be introduced for this connection. A typical bolted busbar connection is shown in Fig.2.

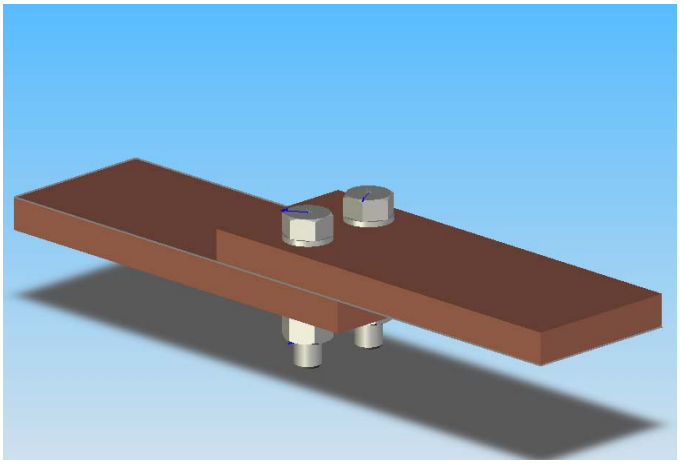


Fig.2. A bolted busbar connection

The profile scheme of small circular holes at the slot ends arises from [3]. This new case is modeled and compared with the classical one in [4].

For that purpose there have been investigated 11 different models. The first one is a classical one of two copper busbars with 2 bolts (case 1). The next cases introduce the new concept where all bolt holes have four slots, of length 3mm arranged in such a way that the pairs of slots lie on mutually perpendicular axes that are rotated at an angle of 45 degrees in relation to the busbar axes. The slots end with small circular holes. This new shape form is presented in Fig.3.

Fig.3. New hole shape for bolts in bolted busbar connections

Table I describes the 11 investigated cases of different slot width and radius of the small circular holes.

Table I
Investigated cases

Case No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Slot width, mm	0	0.3	0.3	0.3	0.3	0.5	0.5	0.5	0.7	0.7	1.0
Radius of the small hole, mm	0	0.3	0.5	0.7	1.0	0.5	0.7	1.0	0.7	1.0	1.0

This is suggested to decrease radial loadings on bolts that emerge after the connection is assembled, increase the contact penetration in the busbars near the bolts area and maximize the true area of metal to metal contact at the electrical interface.

Copper busbars (Young's modulus $E = 1.1.10^{11}$Pa, Poisson's ratio $\mu = 0.34$, width 60mm, height 10mm, length 160mm, busbars' overlap 60mm) are investigated. The connection has 2 holes of ∅10.5mm.

Fasteners: bolts – Hex Bolt Grade B_ISO 4015 – M10 x 40 x 40 – N, steel $E = 2.10^{11}$Pa, $\mu = 0.3$; nuts – Hex Nut Style1 Grade AB_ISO 4032 – M10 – W – N, steel $E = 2.10^{11}$Pa, $\mu = 0.3$; washers – Plain Washer Small Grade A_ISO 7092 – 10, steel $E = 2.10^{11}$Pa, $\mu = 0.3$. Tension in each bolt F = 15000N.

Models for the contact pressure and penetration in the electrical interface between busbars are obtained using the software package ANSYS Workbench 9.

The aspect of model meshing is distinguished as a key phase for proper analysis of the problem. This is because on the one hand it is an established certainty that the reason for the good quality of physical space triangulation is closely related to the consistent mapping between parametric and physical space. On the other hand a properly meshed model will present a fairly close-to-reality detailed picture of stress distributions which is a hard task for analytical solution and is usually an averaged value. It is evident from Fig.4 and Fig.5, for the uneven allocation of pressure and penetration, that the slotted cases bring even more complexities.

The meshed model incorporates the following elements: 10-Node Quadratic Tetrahedron, 20-Node Quadratic Hexahedron and 20-Node Quadratic Wedge. Contacts are meshed with Quadratic Quadrilateral (or Triangular) Contact and Target elements.

The 10-Node Quadratic Tetrahedron element is the basic mesh constituent. It is defined by 10 nodes with corresponding x, y and z translations and is recognized as well suited to mesh irregular geometries especially the ones produced by CAD systems like Solid Works, the CAD-system employed here.

The 20-Node Quadratic Hexahedron and Wedge type elements are used for meshing the washers. Like the previously described element, this one possesses the same features but offers 20 nodes that allow any spatial orientation. It is assumed that using it to mesh the washers guarantees full transfer of washer deformations and loading to the busbars, the primary researched target.

In order to represent contacting and sliding between the 3-D surfaces, the Quadratic Quadrilateral (or Triangular) contact element is applied. With an 8-node surface-to-surface contact capability and taking the same parameters as the solid element to which it is connected, this contact element is given the presumed behavior and friction of the contact region.

Busbars are selected to be in a bonded type contact so as not to overload the hardware with calculations and at the same time ensure a theoretically full area contact with no initial penetrations.

In such a way the study could search for the percent enlargement of the busbar contact area with higher penetration and compare this value for the new slotted cases with the one for the classical not slotted case.

The Quadratic Quadrilateral (or Triangular) target segment element associates with the corresponding contact element and is used due to the 3-D behavior it offers.

Fig.4 shows contact pressure for case 2. It is obvious that the pressure in the area surrounding the slots is increased significantly.

Contact penetration for case 10 is presented in Fig.5. The 4 particularly slotted bolt holes provide the extended high penetration zone that covers the area around the hole between the slots.

The eleven cases have been evaluated by comparing the max values of pressure and penetration for each one of them as well as the percent participation of the 8 zones according to the legends. With that end in view, all zones are set to have equal upper and lower limits.

The zones of the highest pressure or penetration are set to equal lower limits while the max values define their upper limits. This comparison procedure is performed by the help of the Adobe Photoshop software, where each colored zone is identified with a certain number of pixels. The results obtained are summarized in Table II and Table III.

Table II
Contact pressure results

Case No	p_{max}, MPa	3.02 - 8.14, %	8.14 - 13.26, %	13.26 - 18.38, %	18.38 - 23.5, %	23.5 - 28.62, %	28.62 - 33.74, %	33.74 - 38.86, %	>38.86, %
1.	43.99	21.82	15.39	13.46	11.18	12.24	12.66	11.08	2.17
2.	55.01	21.89	15.59	13.39	10.02	8.96	8.62	7.98	13.55
3.	74.3	19.89	13.94	11.88	10.12	8.36	6.58	5.54	23.69
4.	74.06	20.92	14.52	11.37	8.9	8.24	6.28	6.03	23.74
5.	71.22	19.24	12.85	11.44	10.27	8.13	6.66	6.27	25.14
6.	85.71	21.56	14.83	12.98	9.17	7.98	7.94	6.5	19.04
7.	87.04	19.25	12.22	10.68	9.84	8.64	7.11	6.47	25.79
8.	74.38	18.321	12.81	10.1	9.64	8.6	7.06	6.6	26.87
9.	93.13	19.83	13.89	11.28	11.07	9.11	7.07	7.16	20.59
10.	91.02	18.19	12.52	11.43	10.22	8.31	6.33	5.89	27.11
11.	92.76	19.58	12.47	10.63	10.74	8.25	6.96	6.18	25.19

Table III
Contact penetration results

Case No	μ_{max}, µm	0.0084 - 0.0168, %	0.0168 - 0.0252, %	0.0252 - 0.0337, %	0.0337 - 0.0421,%	0.0421 - 0.0505, %	0.0505 - 0.0589, %	0.0589 - 0.0673, %	>0.0673, %
1.	0.076	20.21	15.23	13.38	11.79	12.85	13.27	11.18	2.09
2.	0.115	17.33	12.94	12.49	9.28	7.88	7.39	7.25	25.44
3.	0.278	12.13	7.6	7.46	5.68	4.39	4.93	4.85	52.96
4.	0.234	14.12	8.61	8.06	6.75	6.06	5.36	4.46	46.58
5.	0.201	13.58	8.88	7.83	6.51	6.15	6.63	5.28	45.14
6.	0.327	12.57	8.27	7.59	5.86	5.37	6.26	4.82	49.26
7.	0.283	12.42	8.34	7.29	5.37	4.96	5.55	4.48	51.59
8.	0.207	13.59	8.4	8.06	5.91	5.33	6.13	5.35	47.23
9.	0.296	22.56	7.2	6.99	5.8	4.99	5.31	4.63	42.52
10.	0.266	12.68	8.17	7.44	6	6.08	6.06	5.64	47.93
11.	0.296	13.11	8.01	7.27	5.65	5.15	5.74	4.88	50.19

4. RESULTS AND DISCUSSION

When bolt holes of bolted busbar connections have slots ending with circular openings, then a zone of considerably high contact penetration and pressure concentration around the slots is observed. It is confirmed by the models, presented in Fig.4 and Fig.5.

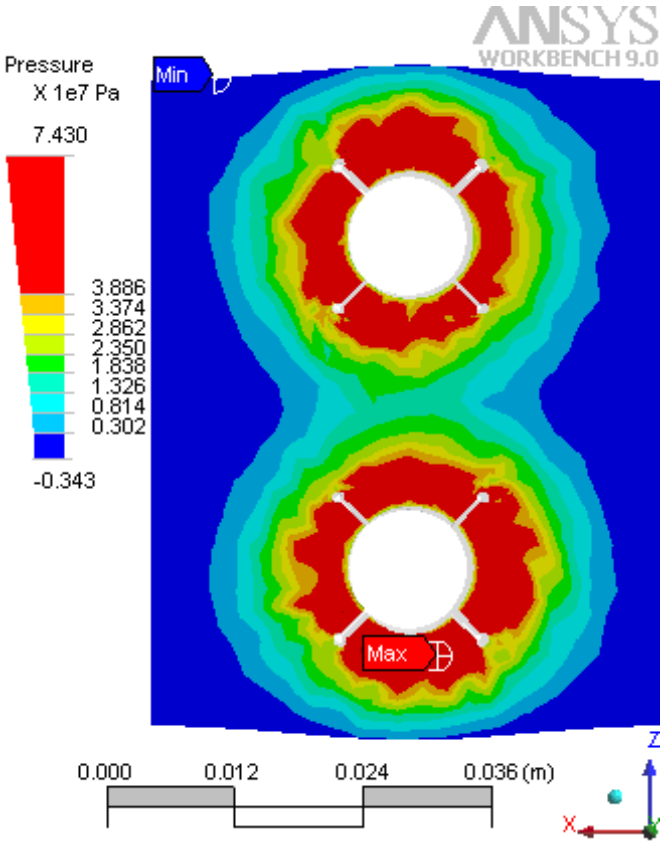


Fig.4. Contact pressure for case 2 (new hole shape with 4 slots of length 3mm and width 0.3mm and small circular holes at the end of the slots of radius 0.5mm)

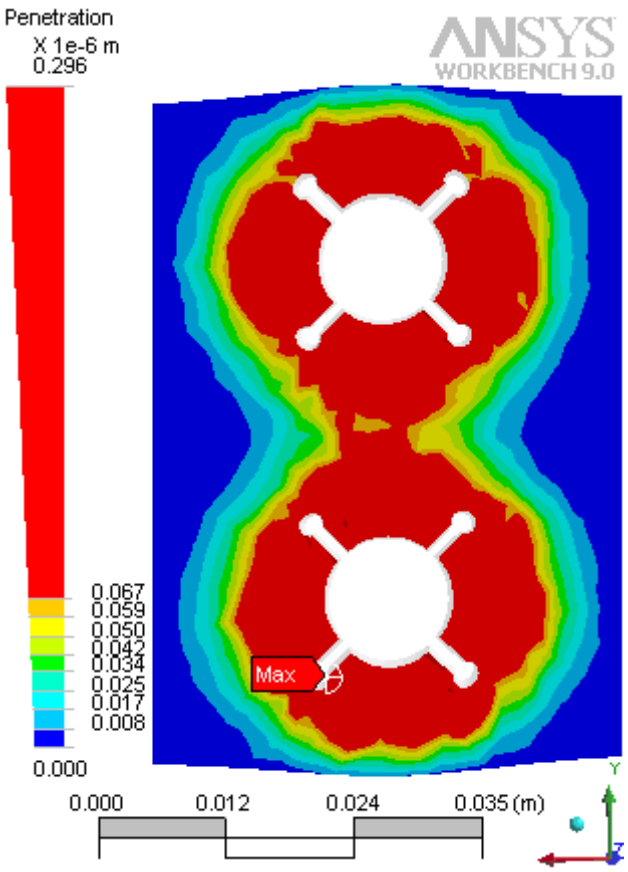


Fig.5. Contact penetration for case 10 (new hole shape with 4 slots of length 3mm and width 1.0 mm and small circular holes at the end of the slots of radius 1.0 mm)

Based on the contact pressure data for the eleven cases, summarized in Table II, it is obvious that, the introduced cases from 2 to 11, where four slots of 3mm length and width of 0.3; 0.5; 0.7 and 1mm, ending with small circular holes of radius 0.3, 0.5, 0.7 and 1.0 mm and lying in pairs on mutually perpendicular axes, are characterized with increased max contact pressure, that is between 12.05 and 111.7% higher than the max pressure for the classic case. The zone of contact pressure > 38.86MPa occupies between 13.55 and 27.11% of the entire contact surface, while for the classic case it occupies 2.17%.

Similar results, summarized in Table III, are obtained for the contact penetration.

The max contact penetrations, for cases 2 to 11 with the above described geometry, are between 0.115 and 0.327μm. It is between 51.3 and 330.3% higher than that for the classic case. The zone with contact penetration > 0.0673μm, occupies respectively between 25.44 and 51.59% of the entire contact surface, which is between 12 and 24.7 times higher than the relevant zone for the classic case.

5. CONCLUSION

When bolt holes of bolted busbar connections have 4 slots, lying in pairs on mutually perpendicular axes and ending with small circular holes, then the values of contact pressure and penetration are noticeably high in the area of busbars contact.

The deeper contact penetration increases the number of α-spots and their dimensions as well as the true contact area and this in turn reduces the contact resistance.

REFERENCES

[1] R.S. Timsit, The Technology of High-Power Connections: A Review, 20th International Conference on Electrical Contacts, Zurich, Switzerland, p. 526, 2002

[2] R. Holm, Electric Contacts. Theory and application. Berlin, Germany, Springer-Verlag, 1976

[3] A. Beredihin, M. Homiakov, Electrical contact connections. Energia, Moscow (in Russian), 1980

[4] R. Tzeneva, P. Dineff and Y. Slavtchev, Bolted Busbar Connections, XIV-th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies SIELA Proceedings of Papers Volume I, pp. 207 – 211, Plovdiv, Bulgaria, 2005.

Authors: Dr. Raina Tzeneva, Assoc. Prof at the Technical University - Sofia, Faculty of Electrical Engineering, Department of Electrical Apparatus; E-mail address: *tzeneva@tu-sofia.bg;* Dr. Peter Dineff, Professor at the Technical University - Sofia, Faculty of Electrical Engineering, Department of Electrical Apparatus; E-mail address: *dineff_pd@abv.bg*

Постъпила на 24.06.2012 **Рецензент** доц. д-р Кръстьо Хинов

Годишник на Технически Университет - София, т. 62, кн.3, 2012
Proceedings of the Technical University - Sofia, v. 62, book 3, 2012

МОДЕЛИРАНЕ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКО ПОЛЕ В БОЛТОВИ ШИННИ СЪЕДИНЕНИЯ С ПРОРЯЗАНИ ОТВОРИ

Райна Ценева, Янко Славчев, Микел Октавио

Резюме: *В настоящото изследване се моделира разпределението на електрическото поле при въвеждането на прорези в скрепителните отвори на болтови шинни съединения с цел значително повишаване на действителната контактна повърхност и намаляване на контактното съпротивление. Новият дизайн, състоящ се от 4 прореза с дължина 3mm, лежащи на взаимно перпендикулярни оси, завъртени на ъгъл от 45° по отношение на осите на шините, е сравнен с класическия дизайн на болтови шинни съединения посредством редица компютърни модели. Установено е, че при въвеждането на прорези се променя разпределението на електрическото поле в контактното съединение. В допълнение е изследвано и разпределението на Джауловата топлина.*

Ключови думи: *болтови шинни съединения, дизайн с прорязани отвори, контактно съпротивление, моделиране на електрическо поле, разпределение на Джаулова топлина*

MODELING OF ELECTRIC FIELD IN BOLTED BUSBAR ASSEMBLIES WITH SLOTTED HOLES

Raina Tzeneva, Yanko Slavchev, Mikel Octavio

Abstract: *The paper discusses how the bolt holes, of bolted busbar connections, influence the change of electric field distribution, when the holes are slotted in an effort to increase significantly the true contact area and reduce the contact resistance. The new hole profile, featuring 4 slots of length 3mm on mutually perpendicular axes, rotated at an angle of 45 degrees in relation to the busbars axes, is compared with the classical one of bolted busbar connections by the help of several computer models. It has been estimated that the new case changes the electric field distribution in the connection. Additionally, the Joule heat distribution in the buses and in the rest of the connection parts is investigated.*

Keywords: *bolted busbar assemblies, slotted hole shape design, contact resistance, electric field modeling, Joule heat distribution*

© 2012 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

1. INTRODUCTION

During the past years, reliability operation requirements of high power connections have grown significantly due to the rapidly increased consumption of electric energy worldwide. The design fundamentals for reliable high-power connections used in bare overhead lines are given in [1] and they include: maximization of true area of electrical contact, optimization of frictional forces, minimization of creep and stress relaxation, minimization of fretting and galvanic corrosion, minimization of differential thermal expansion along interfaces and normal to interfaces. A new bolt-hole shape for bolted busbar connections is proposed [3]. It features 4 slots on mutually perpendicular axes, rotated at an angle of 45 degrees in relation to the busbar axes. There were built 11 models to study the contact pressures and penetrations within the busbars contact zone. It is observed that there is a considerable raise in the values of the two studied parameters, in comparison to the classic bolted busbars case, which leads in turn to an enlarged true contact area and reduced contact resistance. In short, the reliability of the connection will be improved.

The objective of the present work is to study the effect that the slotted bolt holes in bolted busbar connections exert on the electric field distribution and Joule heat distribution within these connections.

2. THEORETICAL BACKGROUND

Current conduction analysis is used to analyze a variety of conductive systems. Generally, the quantities of interest in a current conduction analysis are voltages, current densities, electric power losses (Joule heat).
The problems of current distribution are described by the Poisson's equation for scalar electric potential U;

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{1}{\rho_x}\frac{\partial U}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{1}{\rho_y}\frac{\partial U}{\partial y}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{1}{\rho_z}\frac{\partial U}{\partial z}\right]=0 \quad (1)$$

where the components of the electric resistivity tensor ρ_x, ρ_y and ρ_z are constant.
The electric current density j can be obtained from the equation

$$j=-\rho^{-1}E=\rho^{-1}gradU \quad (2)$$

where ρ^{-1} is the inverse tensor of the electric resistivity.

Power losses (Joule heat produced) in a volume are

$$Q=EjdV \quad (3)$$

3. MODELING THE BOLTED BUSBAR CONNECTION

If a deeper contact penetration increases α-spots both in numbers and dimensions, enlarges the true contact area and decreases the contact resistance, then a new hole-shape might be introduced. A typical bolted busbar connection is shown in Fig.1.

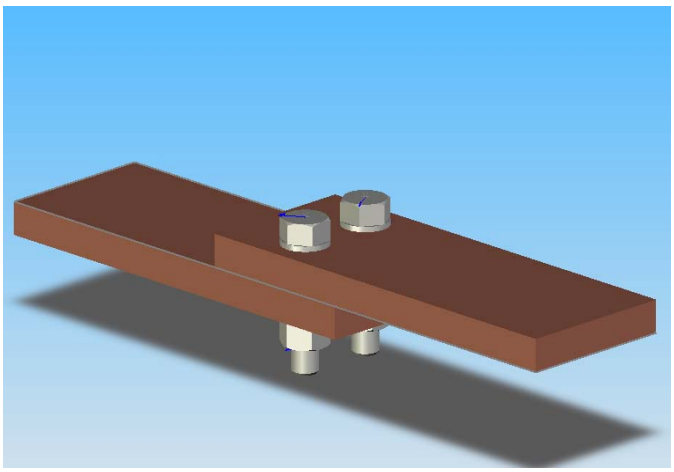


Fig.1. A bolted busbar connection

The slotted bolt hole shape arises from [2] where longitudinal slot of width 3-4mm and length 50mm between the holes of the buses is proposed in order to increase the true connection area. This case is modeled and compared with the classic case in [3].

For that purpose there have been investigated 11 different models.

case 1 – the classical case – copper busbars with 2 bolt holes;

case 2 – the slots are parallel to the busbar axis;

case 3 – the slots are perpendicular to the busbar axis;

case 4 – mixed case – one of the busbars in the connection is of case 2 and the other one is of case 3;

For cases 2 to 4 all bolt holes have two slots of length 3mm and width 1mm.

For cases 5 to 8 the busbar holes have 4 slots of length 3 mm and varying width, arranged in such a way that the pairs of slots are on mutually perpendicular axes, rotated at an angle of 45 degrees in relation to the busbar axes.

case 5 – width 0.3mm;

case 6 – width 0.5mm;

case 7 – width 0.7mm;

case 8 – width 1mm;

case 9 – the 4 slots are not rotated;

case 10 – mixed case – the first busbar corresponds to case 8 and the second to case 9;

case 11 – a busbar hole with 8 slots of length 3mm and width 1mm;

Fig.2 shows the hole-shape of the two-slot cases.

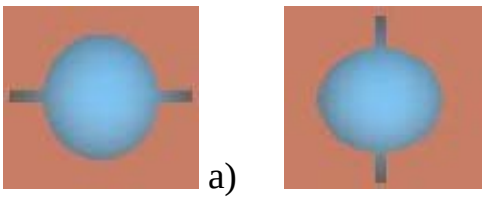


Fig.2. Hole-shape with 2 slots

Fig.3. presents the new hole-shape with 4 and 8 slots.

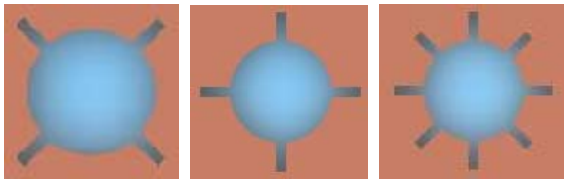


Fig.3. Hole-shape with 4 and 8 slots

The investigated assembly consists of:

Copper busbars (Young's modulus E = $1.1.10^{11}$Pa, Poisson's ratio μ = 0.34, width 60mm, height 10mm, length 160mm, busbars' overlap 60mm) with 2 holes of ∅10.5mm;

Fasteners: bolts – Hex Bolt GradeB_ISO 4015 – M10 x 40 x 40 – N, steel E = 2.10^{11}Pa, μ = 0.3; nuts – Hex Nut Style1 GradeAB_ISO 4032 – M10 – W – N, steel E = 2.10^{11}Pa, μ = 0.3; washers – Plain Washer Small Grade A_ISO 7092 – 10, steel E = 2.10^{11}Pa, μ = 0.3. Tension in each bolt F = 15000N.

Several computer models smooth the research progress of the current density and Joule heat distribution changes that take place within the components of the bolted busbar connection, due to the introduced slotted bolt holes. The FEA package ANSYS 10 is employed in the analysis of the electric field and the Joule heat distributions. The model is meshed with the SOLID 98 element - Tetrahedral Coupled-Field Solid. It is defined by ten nodes with up to six degrees of freedom at each node.

The current density distribution in the bolted busbar assembly with 4 slots of length 3 mm and width 0.5 mm (case 3) is shown in Fig.4.

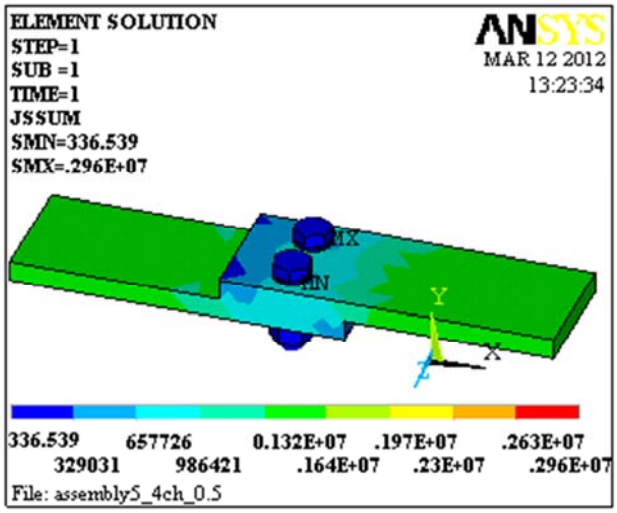


Fig.4. Current density distribution in the bolted assembly for case 3

Fig.5 represents the Joule heat distribution in the assembly for the same case.

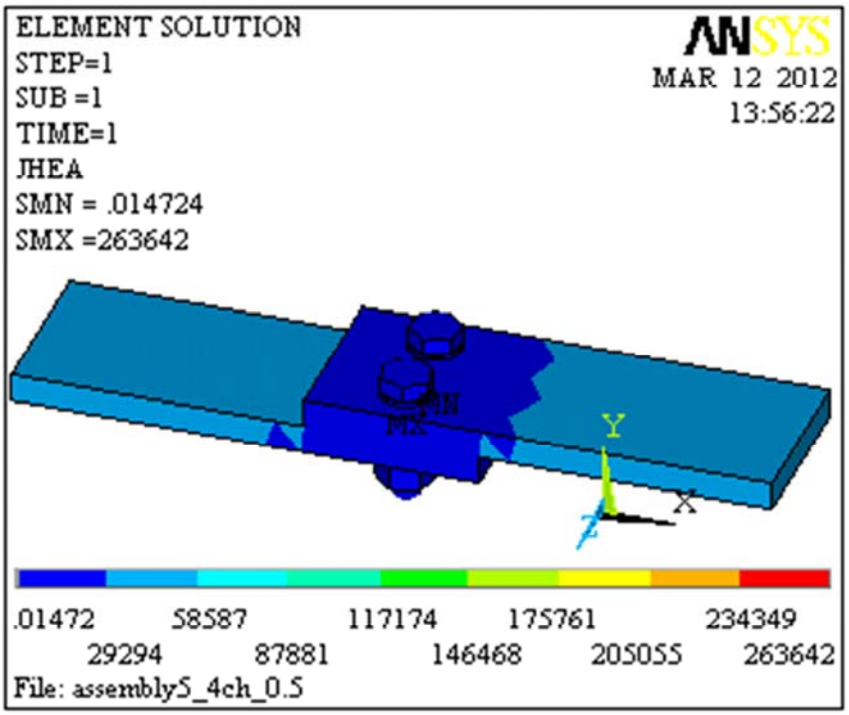


Fig.5. Joule heat distribution in the bolted busbar assembly for case 3

The maximum current density value for each of the investigated cases is shown in Fig.6.

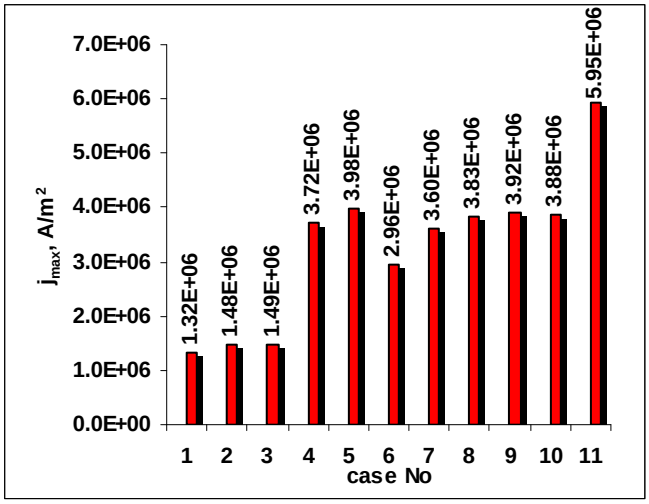


Fig.6. Maximum value of the bolted busbar assembly current density

Additionally, the impact of the hole slots on the current density within the fasteners (bolts, nuts and washers) and the busbars is considered. Fig.7 reviews the model current density distribution in the bolt, nut and washer for case 5 while Fig.8, Fig.9 and Fig.10 summarize graphically the corresponding fastener results for each of the eleven studied cases.

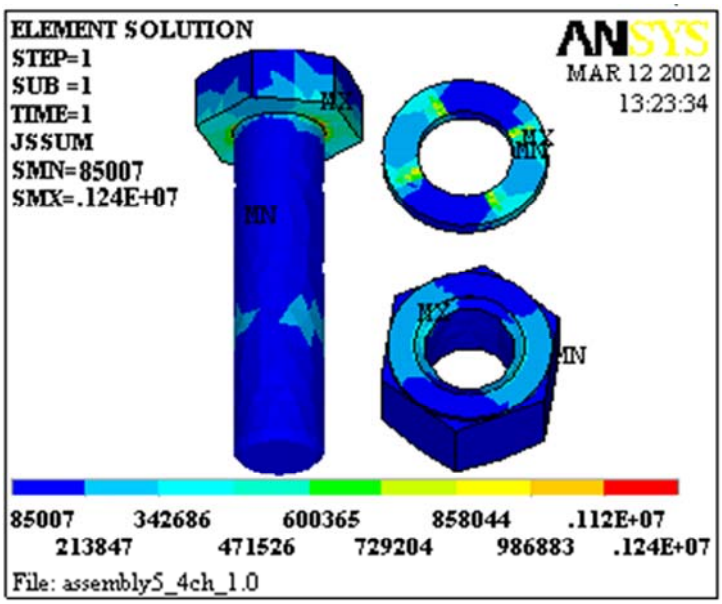


Fig.7. Bolt, nut and washer current density distribution for case 5

4. DISCUSSION AND CONCLUSIONS

It is observed that the introduction of slotted bolt holes raises significantly the contact pressure and penetration within the busbars contact area [3]. This will help to decrease the contact resistance and will provide an opportunity for more reliable assembly operation.

The analyses of the fasteners current density distribution for the entire range of the studied cases confirm that:

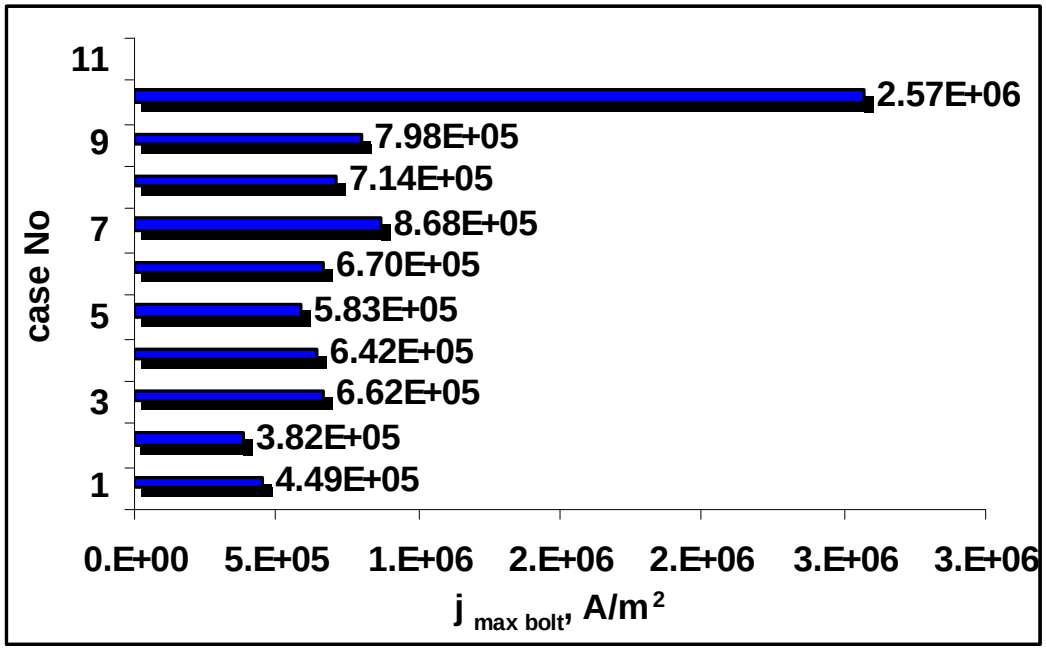


Fig.8. Maximum value of the bolt current density

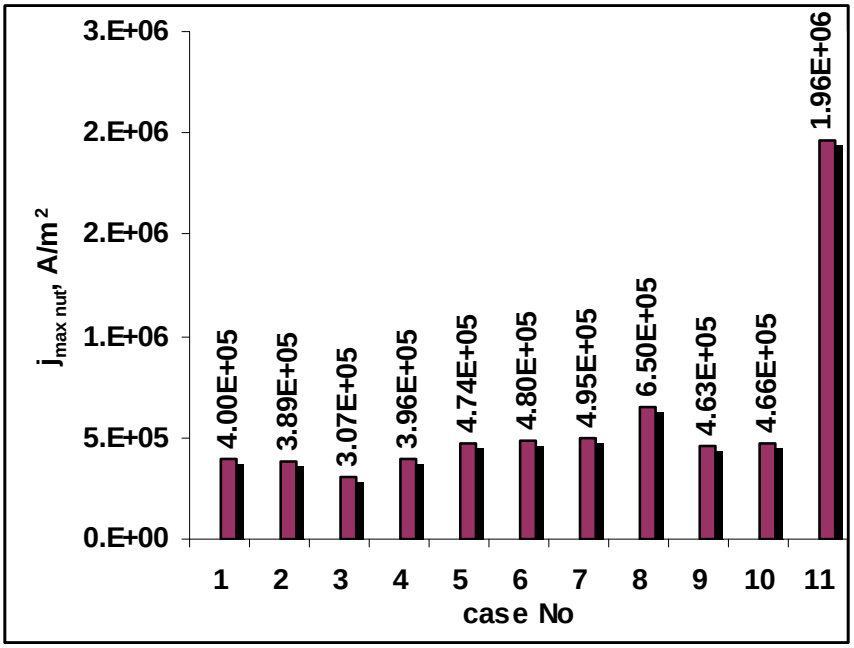


Fig.9. Maximum value of the nut current density

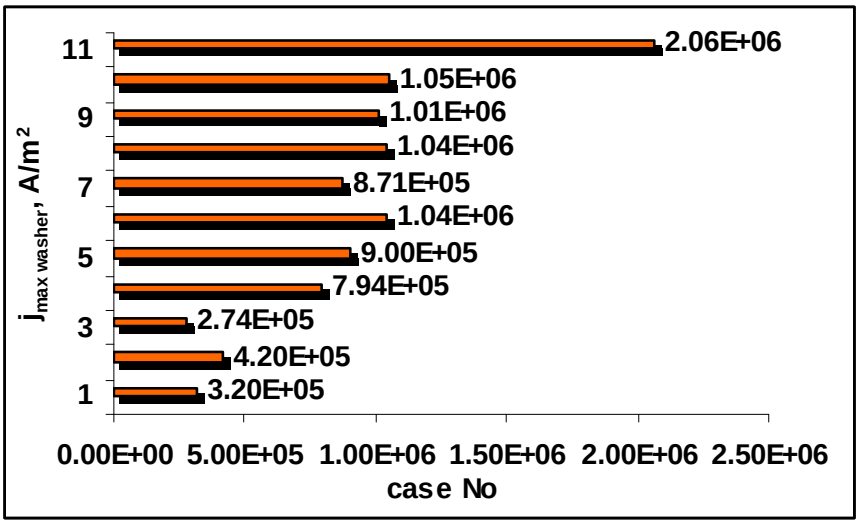


Fig.10. Maximum value of the washer current density

- the max assembly current density remains unaffected regardless of the two introduced slots orientation – either parallel or perpendicular to the busbars axes (Fig.6); the same holds for the bolts (Fig.7), nuts (Fig.8) and washers (Fig.9);
- the max assembly current density value is between 2.5 and 3 times higher forthe 4-slot cases than for the classic case, regardless of the slots width and position; in most cases the max value is concentrated within very small zones at the slot ends and edges; the max value within the bolts is situated near the edge of the bolts head-to-neck transition and is about 1.5 to 1.8 times higher compared to the classical case; the nuts max current density value in most cases is approximately the same or a little (1.6 times) higher compared to the classical case; the washers max current density value is 2.5 to 3 times higher than for the classical case and is located in the zones contacting the slots near the bolt holes;

- the max current density values increase significantly within all of the assembly parts when introducing 8 slots of width 1mm and length of 3mm; it is 4.5, 5.7, 4.9 and 6.4 times higher respectively for the assembly, the bolts, the nuts and the washers.

When the bolt-holes of bolted busbar connections are slotted, the max current density value in the assembly and the fasteners increases significantly. Considering the busbars, it is concentrated in very small zones, around the slot ends and edges. As for the bolts, it is around the edge under the head of the bolts while for the washers – it is in the slots-washer contact zone.

The 8-slot case adds rapidly to the max current density value in both the assembly and the fasteners. That is why this case is not recommended for use despite the fine contact pressure and penetration values.

REFERENCES

[1] R.S. Timsit, The Technology of High-Power Connections: A Review, 20th International Conference on Electrical Contacts, Zurich, Switzerland, 2002, p. 526.

[2] A. Beredihin, M. Homiakov. Electrical contact connections. Energia, Moscow. 1980. (in Russian).

[3] R. Tzeneva, P. Dineff and Y. Slavtchev, Bolted Busbar Connections, XIV-th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies SIELA 2005, 2 – 4 June 2005, Proceedings of Papers Volume I, pp.207 – 211, Plovdiv, Bulgaria.

Authors: Dr. Raina Tzeneva, Assoc. Prof at the Technical University - Sofia, Faculty of Electrical Engineering, Department of Electrical Apparatus; E-mail address: *tzeneva@tu-sofia.bg;* Yanko Slavchev, Assist. Prof. at the Technical University - Sofia, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Logistics, Materials Handling and Building Machines; E-mail address: *ya_slavchev@tu-sofia.bg;* Mikel Octavio, Graduating Student at the Technical University - Sofia, English Language Faculty of Engineering

Постъпила на 24.06.2012 **Рецензент** проф. д-р Петър Динев

Годишник на Технически Университет - София, т. 62, кн.3, 2012
Proceedings of the Technical University - Sofia, v. 62, book 3, 2012

УПРАВЛЕНИЕ С АЛГЕБРИЧНО *Lie*-ДИФЕРЕНЦИРАНЕ И АНИХИЛАТОРИ - I част

Емил Николов

Резюме *- В работата се предлага алгебрична структура за оценка на параметър при числено диференциране. Целта е да се систематизира, опише и да се развие нов алгебричен подход за решаването на задачи при управлението на индустриални обекти*

Ключови думи *- числено алгебрично* ***Lie****-диференциране, операторни трансформации, оператори за фрактално диференциране, анихилатори, управление без модел, алгебрични методи за управление.*

CONTROL WITH ALGEBRAIC *Lie*-DIFFERENTIATION AND ANNIHILATORS - part I

Emil Nikolov

Abstract *- In this paper is proposed an algebraic structure for a parameter estimation in the numerical differentiation. The purpose is to systematize, describe and develop a new algebraic approach for solving tasks in the control of industrial plants*

Keywords *- Numerical Algebraic* ***Lie****-differentiation, Operational Calculus, Fractional Differential Operators, Annihilators, Model-Free Control, Algebraic Methods in Control*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

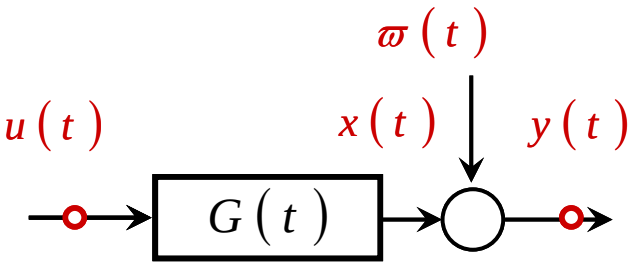
Освен възприетите като класически стратегии при синтеза на системи за управление, свързани с необходимостта от предварително или оперативно актуализиращо се познание на характеристиките на обекта за управление, съществува и друга стратегия, основаваща се на т.н. управление без използването на модел на обекта. Целта на настоящата разработка е да представи основните теоретични аргументи, подход и структура на тази стратегия, да даде оценка на нейната ефективност и приложимост чрез анализ на качеството и да развие нейната идея с помощта на използването на оператори за фрактално диференциране. Разработката е представена в две неразделно свързани части. Първата обхваща числено алгебрично диференциране, полиномиална обработка на сигнали, анихилатори от пълен и от дробен ред, управление с алгебрични ***Lie***-диференциатори. Втората част разглежда структури на фрактални системи за управление от този клас, резултати от техния робастен анализ, заключение и библиография.

© 2012 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

2. ЧИСЛЕНО АЛГЕБРИЧНО ДИФЕРЕНЦИРАНЕ

Численото алгебрично диференциране [1-4] е предназначено за оценка на производната $x^{(n)}(t),(t\geq 0)$ на времеви сигнал $x(t)$ (зашумен с $\varpi(t)$), определен от изходната величина на динамична система с диференциално уравнение $G(t)$ и входна величина $u(t)$ (фиг.1).



Фиг.1

3. ПОЛИНОМИАЛЕН СИГНАЛ

Поставя се задачата за оценката на производната $x^{(n)}(t)$ от n-ти ред на гладък сигнал $x(t)$, определен в реален интервала $I\subset\Re_+$.

Тази постановка отчита, че сигналът $x(t)$ не е непосредствено достъпен за измерване. Той е реален зашумен с $\varpi(t)$ сигнал и реално съществува измервателен достъп до $y(t)=x(t)+\varpi(t)$. Известно е, че диференцирането на подобен реален зашумен сигнал е свързано с усилването на шума $\varpi(t)$.

Нека за момент се игнорира шумът $\varpi(t),(\varpi(t)\equiv 0)$ и се предположи, че в момента $t=0$ гладкият сигнал $x(t)$ се апроксимира адекватно с помощта на сходящ степенен ред на ***Taylor*** от вида (1).

Редът (1) еквивалентно може да се замени с разширен N-членен $(N\geq n)$ сходящ степенен ред $x_N(t)\hat{\equiv}x(t)$ на ***Taylor***, описан с (2). Зависимостта (2) е аналитичното описание на една възможна полиномиална апроксимация на $x(t)$ с помощта на N-членен сходящ степенен ред на ***Taylor*** $x_N(t)$ (3), който удовлетворява диференциалното уравнение (4). Това е основата, използвана в предложения от френския математик ***Michel Fliess*** метод за оценка на входно-изходно поведение на реална система с измерими входни и изходни величини.

Laplace-трансформацията на (2) е определена през 1984 г. от японския математик ***Kōsaku Yosida*** (***1909-1990***) [5] и е показана с (5), а трансформацията (6) на уравнението (4) с отчитане на (5) е определена с помощта на оценката $\hat{X}_N^{(N+1)}(p)$ на производната $X_N^{(N+1)}(p)$.

В (6) $X_N(p)$ (с оценка $\hat{X}_N(p)$) е образът на $x_N(t)$, а аналогично образът на сигнала $u(t)$ е означен с $\hat{U}(p)$ на фиг.2.

$$x(t)=\sum_{i\geq 0}x^{(i)}(0)\frac{t^i}{i!},\ (\varpi(t)\equiv 0) \tag{1}$$

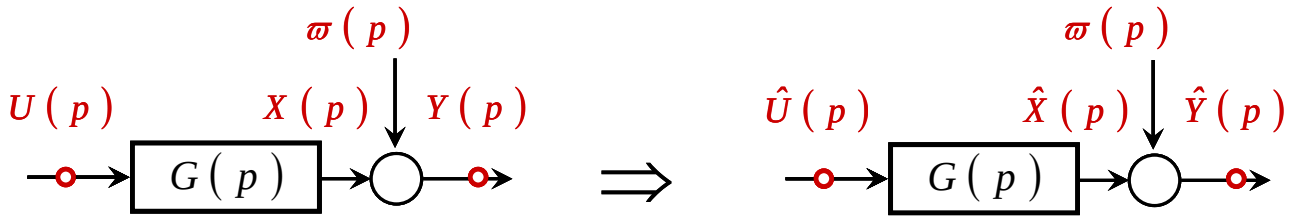
$$x_N(t)=\sum_{\nu=0}^{N}x^{(\nu)}(0)\frac{t^\nu}{\nu!}\ \hat{\equiv}\ x(t),$$
$$(N\geq n,\ x_N(t)\in\aleph[t],t\geq 0,I\subset\Re_+,\varpi(t)\equiv 0) \tag{2}$$

$$x_N(t)=x^{(0)}(0)+x^{(1)}(0)\frac{t^1}{1!}+x^{(2)}(0)\frac{t^2}{2!}+..+x^{(n)}(0)\frac{t^n}{n!}+..+x^{(N)}(0)\frac{t^N}{N!}\hat{=}x(t),$$
$$(N\geq n,\ x_N(t)\in\aleph[t],t\geq 0,\boldsymbol{I}\subset\Re_+,\varpi(t)\equiv 0) \tag{3}$$

$$\frac{d^{N+1}}{dt^{N+1}}(x(t))\hat{=}\frac{d^{N+1}}{dt^{N+1}}(x_N(t))=\frac{d^{N+1}}{dt^{N+1}}\left(\sum_{\nu=0}^{N}x^{(\nu)}(0)\frac{t^\nu}{\nu!}\right)\equiv 0$$
$$\frac{d^{N+1}}{dt^{N+1}}\left(x^{(0)}(0)+x^{(1)}(0)\frac{t^1}{1!}+x^{(2)}(0)\frac{t^2}{2!}+..+x^{(n)}(0)\frac{t^n}{n!}+..+x^{(N)}(0)\frac{t^N}{N!}\right)=0, \tag{4}$$
$$(N\geq n,\ x_N(t)\in\aleph[t],t\geq 0,\boldsymbol{I}\subset\Re_+,\varpi(t)\equiv 0)$$

$$X_N(p)=\sum_{\nu=0}^{N}\frac{X_0^{(\nu)}(p)}{p^{\nu+1}},$$
$$X_N(p)=\frac{X_0^{(0)}(p)}{p^1}+\frac{X_0^{(1)}(p)}{p^2}+\frac{X_0^{(2)}(p)}{p^3}+..+\frac{X_0^{(n)}(p)}{p^{n+1}}+..+\frac{X_0^{(N)}(p)}{p^{N+1}}, \tag{5}$$
$$(p=\sigma+j\omega,N\geq n,\boldsymbol{I}\subset\Re_+,\varpi(p)\equiv 0)$$

$$\hat{X}_N^{(N+1)}(p)\hat{=}p^{N+1}\hat{X}_N(p)$$
$$p^{N+1}\hat{X}_N(p)\equiv p^N\hat{X}_0^{(0)}(p)+p^{N-1}\hat{X}_0^{(1)}(p)+..+p^{N-n}\hat{X}_0^{(n)}(p)+..+\hat{X}_0^{(N)}(p), \tag{6}$$
$$(p=\sigma+j\omega,N\geq n,\ x_N(t)\in\aleph[t],t\geq 0,\boldsymbol{I}\subset\Re_+,\varpi(t)\equiv 0)$$



Фиг.2.a Фиг.2.b

Основната стъпка в оценката на производната от n-ти ред $x^{(n)}(t),(t\geq 0)$ на гладък сигнал $x(t)$ е оценката на n-тата производна $x^{(n)}(0)$ при $t=0$ като резултат от измерването на $y(t)$. Нека съществува алгоритъм за решението на подобна задача. Тогава за всяко $\tau\geq 0$ е очевидно, че прилагането на този алгоритъм за ново наблюдение на сигнала $y(t)$ изразен в този случай като $y_\tau(t)$ (7) с помощта на специалната ***Heaviside***-функция $\mathcal{H}(t)$ ще изисква необходимостта от оценката на $x^{(n)}(\tau)$, което е и необходимостта от оценката на $x^{(n)}(0)$ в (6). Това е така, защото свойствата [6] на ***Heaviside***-функцията (8), трансформирани еквивалентно за конкретния случай (9), определят записа на зависимостта (7) като (10).

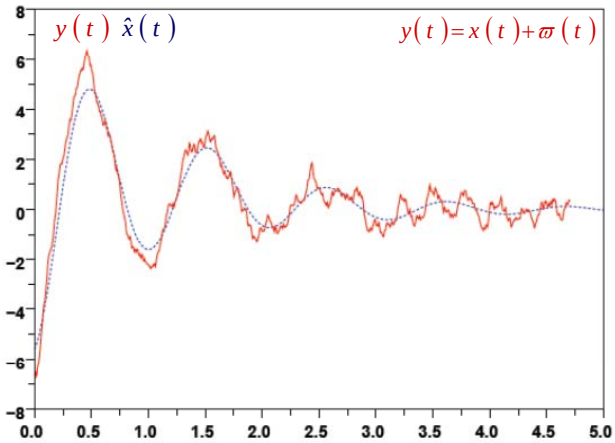
Няколко типични примера за ефективността на оценката $\hat{x}(t)$ на $x(t)$ по описания аналитично ***Fliess***-метод на индустриално зашумени с $\varpi(t)$ е технически измерими сигнали $y(t)=x(t)+\varpi(t)$, са показани на фиг.3.

$$y_\tau(t)=\mathcal{H}(t)y(t+\tau) \tag{7}$$

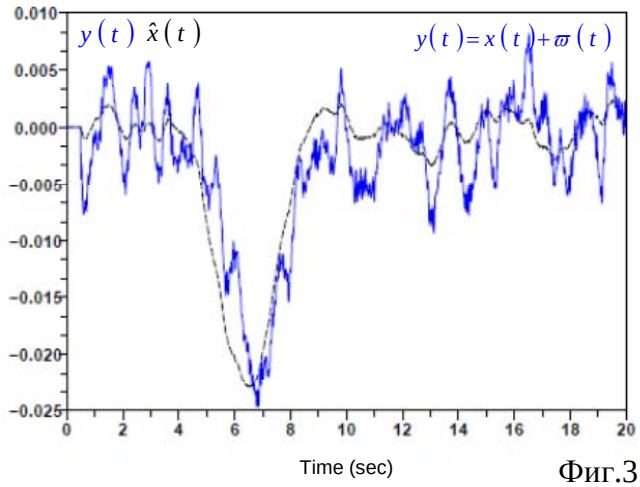
$$\mathcal{H}(t)*f(t)=\int_{-\infty}^{t}f'(t)dt \tag{8}$$

$$\mathcal{H}(t)*y(t+\tau)=\int_{-\infty}^{t} y'(\tau)\,d\tau \tag{9}$$

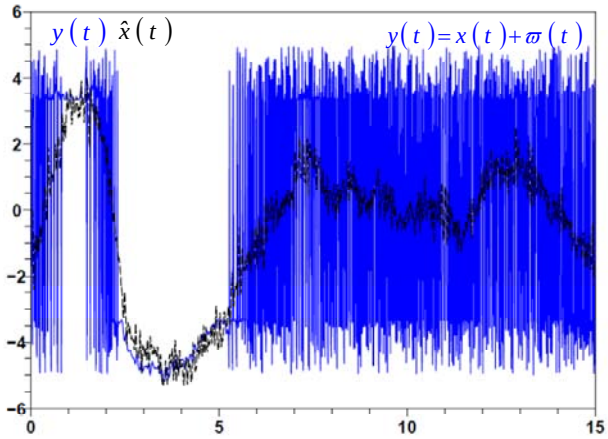
$$y_{\tau}(t)=\int_{-\infty}^{t} y'(\tau)\,d\tau\,,$$
$$\left(y(t)=x(t)+\varpi(t),\ \varpi(t)=0\right) \tag{10}$$



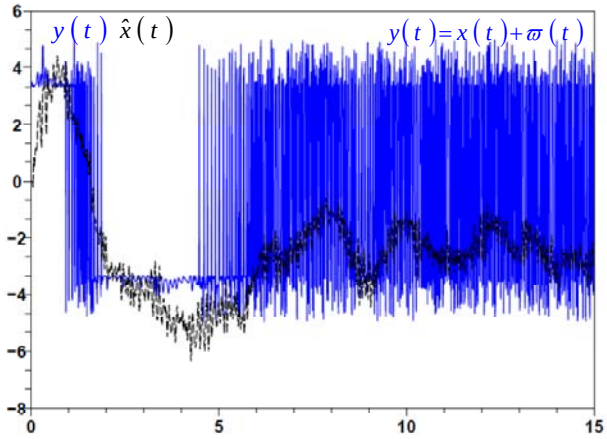
Фиг.3.a



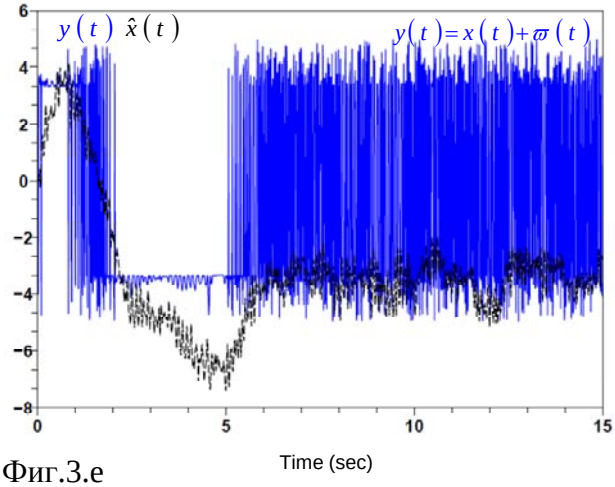
Фиг.3.b



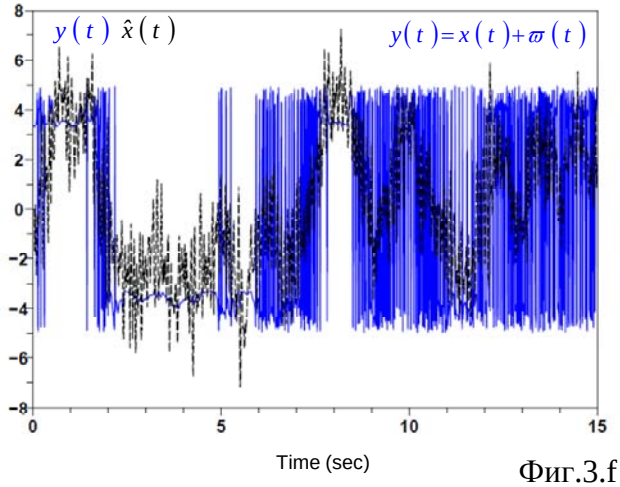
Фиг.3.c



Фиг.3.d



Фиг.3.e



Фиг.3.f

4. АНИХИЛАТОРИ

В (6) могат да бъдат оценени едновременно всички елементи $X_0^{(i)}(p),(i=0,1,..,N)$. Но не всички елементи $X_0^{(i)}(p),(i\neq n)$ са необходими за оценката на производната $X_0^{(n)}(p)$, защото едновременната оценка на всичките елементи $X_0^{(i)}(p),(i=0,1,..,N)$ ще доведе до по-чувствителен резултат за $X_0^{(n)}(p)$ към шума ϖ. Този недостатък е преодолян от предложения в работата подход за оценка, който разглежда като нежелателни всичките съставящи $p^{N-i}X_0^{(i)}(p),(i\neq n)$в (6), които следва да се анулират. За целта се поставя задачата да бъде намерен линеен диференциален оператор $\mathcal{A}_p$ от вида (11), удовлетворяващ, след съответната трансформация, зависимостта (12) за множеството рационални функции ρ, определени в рационалното множество $C(p)$.

Такъв линеен диференциален оператор $\mathcal{A}_p$ (11), наречен ***анихилатор*** [1-4] за оценката $X_0^{(n)}(p)$, очевидно съществува и не е уникален. За всеки ***анихилатор*** $\mathcal{A}_p$ съответства уникално множество $\rho(p)\in C$, което удовлетворява изискването (12). Ето защо $\mathcal{A}_p$ и $\rho(p)$ са свързани.

Изложеното до тук изисква еквивалентната замяна на модела на $x_N(t)$ с фактически зашумения и достъпен за измерване сигнал $y(t)=x(t)+\varpi(t)$. В този случай, с отчитането на (11), уравнението (12) се трансформира до (13). Зависимостта (13) отразява операционния оценител на $X_0^{(n)}(p)$. Следва да се изрази оценката $\hat{X}_N^{(n)}(p)$ непосредствено в областта на времето, като се отчита че ρ и ρ_ℓ са рационални предавателни функции. Нека съответстващите на $\rho(p)$ и $\rho_\ell(p)$ са импулсни преходни функции $f(t)$ и $h_\ell(t)$. Тогава, като се отчете че при ***Laplace***-трансформацията операторът d/dp съответства на умножение с $(-t)$, то съответстващия оригинал на уравнение (7) в областта на времето се изразява с (14).

$$\mathcal{A}_p=\sum_{\ell=0}^{N}\rho_\ell(p)\frac{d^\ell}{dp^\ell},\ (p=\sigma+j\omega;\ \rho(p)\in C) \tag{11}$$

$$\mathcal{A}_p\ \hat{X}_N(p)=\rho_\ell(p)X_0^{(n)}(p),\ (\rho(p)\in C, N=n) \tag{12}$$

$$\rho(p)X_0^{(n)}(p)=\sum_\ell \rho_\ell(p)\frac{d^\ell}{dp^\ell}\hat{Y}(p) \tag{13}$$

$$f(t)\hat{x}_N^{(n)}(0)=\sum_{finite}\int_0^t h_\ell(t-\alpha)(-1)^\alpha\alpha^\alpha y(\alpha)d\alpha \tag{14}$$

Зависимостта (14) следва да се разгледа за конкретна стойност на времето t, например за $t=T$. От този момент нататък за всяка оценка, за която $T>0$ и $f(T)\neq 0$, се получава числена оценка $\hat{x}_N^{(n)}(0)$. Изследвайки я, с отчитането на (1) и (2), следват съответствията (15), (16) и още, че уравнението (14) еквивалентно може да се представи с помощта на (17).

Зависимостта (17) показва, че оценката $x^{(n)}(0)$ е свързана с два типа грешки:

- грешка от апроксимацията на сигнала с разширен степенен ред на ***Taylor***, изразена с помощта на $e_{R_N}(0)$;
- грешка от насложения шум $e_\varpi(0)$ върху полезния сигнал.

Целта е да се проектират адекватен ***анихилатор*** $\mathcal{A}_p$ и свързаната с него рационална функция ρ, чието предназначени е да минимизират грешката в оценката. Оценката $\hat{x}_N^{(n)}(0)$ варира съобразно стойността промените на T. За конкретна стойност на N, с намаляване на времето за оценка T, съществува тенденция за намаляване на $\left|e_{R_N}(0)\right|$. В същото време обаче по-голямата стойност на T ефективно филтрира шума и очевидно изборът на стойността на T е компромисен.

В работата се предлага за този случай използването на ***анихилатор*** $\mathcal{A}_p^{Lie}$ (18) в класа на ***Lie-алгебричните диференциатори*** $\mathcal{D}_p^{Lie}$ от пълен ред α с помощта на който (12) се трансформира до (19), а като се отчете и зависимостта (16), то оценката на производната $\hat{Y}_0^{(n)}(p)$ на зашумения с ϖ сигнал y, следва да се извършва по (20). Обратната ***Laplace***-трансформация от комплексното пространство в пространството на времето показва съответствията (21)

$$R_N(t) = x(t) - x_N(t) \tag{15}$$

$$y(t) = x_N(t) + R_N(t) + \varpi(t) \tag{16}$$

$$\begin{gathered}\hat{x}_N^{(n)}(0) = \int_0^T h(\alpha;T)\left(x_N(\alpha) + R_N(\alpha) + \varpi(\alpha)\right)d\alpha \\ \hat{x}_N^{(n)}(0) = x^{(n)}(0) + e_{R_N}(0) + e_{\varpi}(0)\end{gathered} \tag{17}$$

$$\mathcal{D}_p^{Lie} \equiv \mathcal{A}_p^{Lie} \equiv \sum_{\ell=0}^{N} \rho_\ell(p)\frac{d^\ell}{dp^\ell} \equiv \frac{d^\alpha}{dp^\alpha}p^{N+1}, \left(p = \sigma + j\omega;\ \rho(p) \in \mathcal{C}(p);\ \alpha = 0,1,2,\ldots,N\right) \tag{18}$$

$$\begin{gathered}\mathcal{D}_p^{Lie}\hat{X}_N(p) = \frac{d^\alpha}{dp^\alpha}p^{N+1}\hat{X}_N(p) = \frac{d^\alpha}{dp^\alpha}p^{N+1}\sum_{\nu=0}^{N}\frac{X_0^{(\nu)}(p)}{p^{\nu+1}},\ \left(\alpha = 0,1,2,\ldots,N\right) \\ \mathcal{D}_p^{Lie}\hat{X}_N(p) = \frac{d^\alpha}{dp^\alpha}\sum_{\nu=0}^{N}X_0^{(\nu)}(p)p^{N-\nu} \hat{\equiv} \frac{d^\alpha}{dp^\alpha}X_0^{(n)}(p),\ \left(N - \nu = n\right)\end{gathered} \tag{19}$$

$$\begin{gathered}\mathcal{D}_p^{Lie}\hat{Y}_N(p) = \frac{d^\alpha}{dp^\alpha}p^{N+1}\hat{Y}_N(p) = \frac{d^\alpha}{dp^\alpha}\sum_{\nu=0}^{N}Y_0^{(\nu)}(p)p^{N-\nu} \hat{\equiv} \frac{d^\alpha}{dp^\alpha}Y_0^{(n)}(p), \\ \left(\alpha = 0,1,2,..,n,..,N;\ N - \nu = n;\ \nu = 0,1,2,\ldots,N\right)\end{gathered} \tag{20}$$

$$\left(d/dp\right) \xleftrightarrow{\alpha=1} \left(-t\right);\ \left(d^\alpha/dp^\alpha\right) \xleftrightarrow{0 \le \alpha \le N} \left(-t\right)^\alpha \tag{21}$$

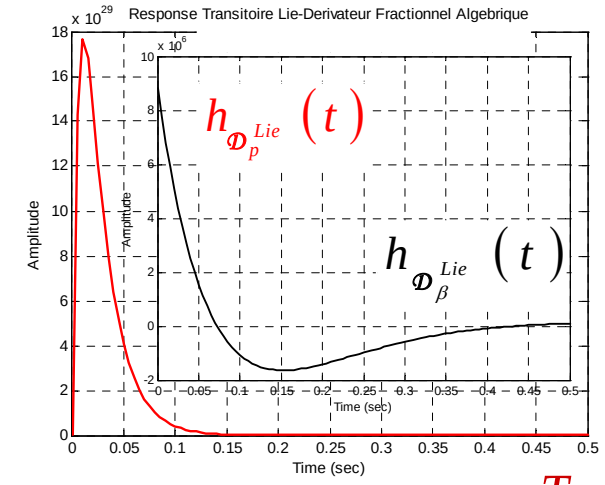
$$\begin{gathered}\mathcal{D}_\beta^{Lie}\hat{Y}_N(p) = p^{N+1}\hat{Y}_N(p) = \frac{d^\beta}{dp^\beta}\sum_{\nu=0}^{N}Y_0^{(\nu)}(p)p^{N-\nu} \\ \mathcal{D}_\beta^{Lie}\hat{Y}_N(p) \hat{\equiv} \prod_{k=1}^{N}\left(1 + \left(\omega'_k\right)^{-1}p\right)\left(1 + \left(\omega_k\right)^{-1}p\right)^{-1}Y_0^{(n)}(p), \\ \left(n - 1 < \beta < n;\ \beta \in \Re;\ \left(\omega'_k\right)^{-1} > \left(\omega_k\right)^{-1};N - \nu = n;\ \nu = 0,1,2,\ldots,N\right)\end{gathered} \tag{22}$$

$$\begin{gathered}U_a\frac{d^a y}{dt^a} + \ldots + U_2\frac{d^2 y}{dt^2} + U_1\frac{dy}{dt} + U_0 y = V_b\frac{d^b u}{dt^b} + \ldots + V_2\frac{d^2 u}{dt^2} + V_1\frac{du}{dt} + V_0 u \\ U_0 y + U_1\frac{dy}{dt} + U_2\frac{d^2 y}{dt^2} + \ldots + U_a\frac{d^a y}{dt^a} - V_0 u - V_1\frac{du}{dt} - V_2\frac{d^2 u}{dt^2} - \ldots - V_b\frac{d^b u}{dt^b} = 0\end{gathered} \tag{23}$$

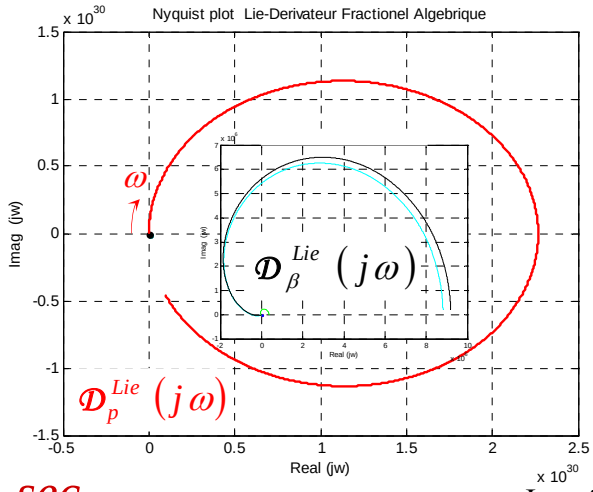
$$E\left(t, y^{(0)}, y^{(1)}, y^{(2)}, \ldots, y^{(a)}, u^{(0)}, u^{(1)}, u^{(2)}, \ldots, u^{(b)}\right) = 0 \tag{24}$$

5. ФРАКТАЛНИ АНИХИЛАТОРИ

Зависимостта (20), определяща оценката на производната $\hat{Y}_0^{(n)}(p)$, ефективно може да използва и диференциране от непълен, дробен, ред β. В този случай ***фракталният Lie-алгебричен анихилатор*** $\mathcal{D}_\beta^{Lie}$ [6] ще има вида (22), в който е показана и рационална апроксимация на оператора за диференциране от непълен ред β. На фиг.4 паралелно са илюстрирани за сравнение преходните функции $h_{D_i}(t)$, ***Bode-***, ***Nyquist-*** и ***Nichols-***честотните характеристики $D_i^{Lie}(j\omega)$ на ***Lie-алгебричен анихилатор*** $\mathcal{D}_p^{Lie}$ (18)÷(20) и на ***фрактален Lie-алгебричен анихилатор*** $\mathcal{D}_\beta^{Lie}$ (22).

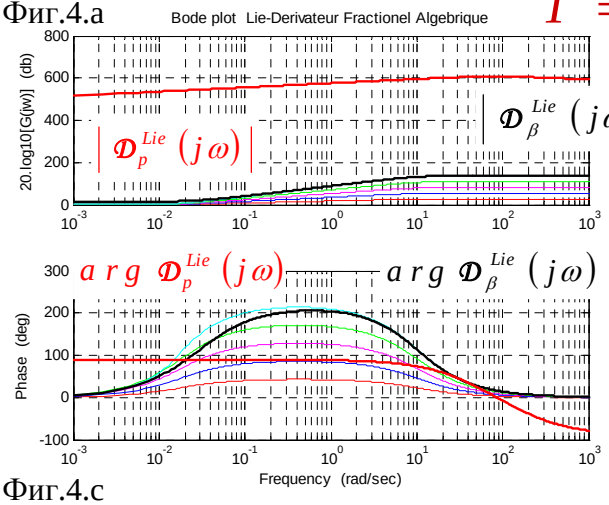


Фиг.4.a

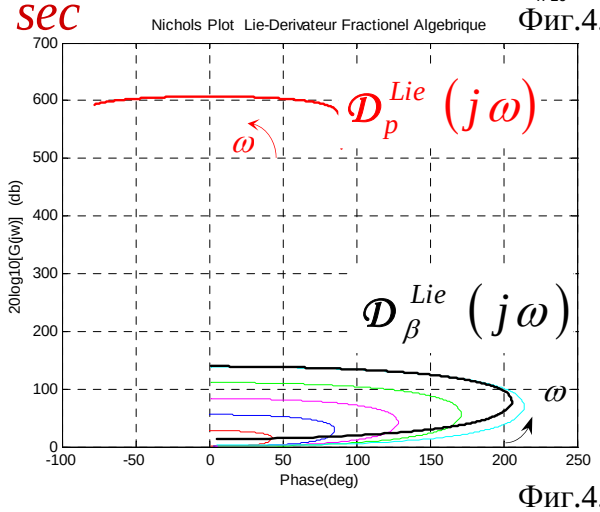


Фиг.4.b

$T = 1\ sec$



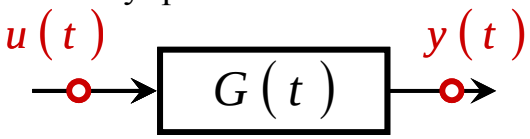
Фиг.4.c



Фиг.4.d

6. УПРАВЛЕНИЕ С АЛГЕБРИЧНИ *Lie*-ДИФЕРЕНЦИАТОРИ

Традиционният подход за управление на обекти, представени с динамичната система на фиг.5, предполага наличието на известен аналитичен модел, представен с обобщеното описание от вида (23), или използването на съответстващи методи за структурната и/или параметричната им идентификация за проектиране на съответната система за управление.



Фиг.5

Подходът, предложен от ***Michel Fliess*** [1-4], се основава на това, че моделът (23) е неизвестен, динамичната система-обект за управление (фиг.5) е непозната.

Целта на ***Fliess***-подхода не е идентификация на системата. Отчита се обаче, че има достъп за измерване на величините y и u. Този подход предполага единствено обобщен хипотетичен запис (24) на непознатия аналитичен модел на динамичната система, разглеждайки го като линейно или нелинейно крайно мерно диференциално уравнение, описващо поведението „вход-изход“ на динамичната система.

Същественото е, че уравнение (24) е структурно и параметрически неизвестно, не се познава системата (фиг.5), не се знае нейния аналитичен модел, но се знае че във всеки един момент в реално време поведението вход-изход на системата е известно (y и u са достъпни и измерими). Това уравнение е показано само за визуализация на идеята на ***Fliess***-подхода за управление без идентификация и модел на обекта, чрез с оценка само на производната $y^{(n)}$ от n-ти ред на изходната променлива y с помощта на ***Lie- алгебрично*** диференциране.

Нека за много кратък интервал от време еквивалентно да се заменя този непознат модел (24) с реално известната оценка на входно-изходно поведение (25) на системата. От (25) следват и зависимостите (26), (27)

$$y^{(n)} = F + \alpha u \tag{25}$$

$$u = -(F/\alpha) + (y^{(n)}/\alpha) \tag{26}$$

$$F = y^{(n)} - \alpha u \tag{27}$$

където:

- α не е физическа величина, променлива или константа, а е проектирана и избрана така, че да има съвпадение в размерността на величините F и αu;
- функцията F е определена с помощта на α, на известната (измерената) стойност на u и на оценка на производната $y^{(n)}$ от n-ти ред на изходната променлива y на динамичната система с помощта на ***Lie- алгебрично*** диференциране;
- стойността на функцията F се отчита във всеки момент на времето за много кратък интервал, както се отчитат и стойностите на u и на $y^{(n)}$.

За случаите, когато технически системата е с r- броя изходи и m- броя входове, то аналогично на (25), (27) са валидни зависимостите (28), (29), (30).

Fliess-подходът предполага, че: ● функцията E (24), линейна или нелинейна, е гладка функция на аргументите си; ● за някакво цяло положително число $n, (0 < n < a)$, е в сила зависимостта (31); ● производната $y^{(n)}$ е се оценява в индустриални условия с използване на съответния ***анихилатор*** от пълен Φ_p^{Lie} или дробен ред Φ_β^{Lie}. Тогава хипотетичната функцията E (24) може да се представи като (32), от което следва, че n-тата производна $y^{(n)}$ (или нейната оценка) на променливата y може да се представи с (33). След полагането (34), основаващо се на (33) и на (25), се достига до уравнението (35), което е напълно еквивалентно на (24). Идеята за отчитане за много кратък интервал от времето на оценката на входно-изходното поведение (25) на системата по представяния подход в:

- дискретна форма е показана с (36) и с (36) за система е с r- броя изходи и m- броя входове;

- непрекъсната форма е показана с (38) и с (39) за система е с r - броя изходи и m - броя входове;
- комплексна форма показана с (40) и с (41) за система е с r - броя изходи и m - броя входове.

Fliess-подходът е алгебричен подход за управление без идентификация и използване на модел на обекта в системата. Той се основава на оценка на производната $y^{(n)}$ от n-ти ред на регулируемата променлива y с помощта на ***Lie-алгебрично*** диференциране, и се изразява с (26). При наличието на регулатор R в системата (фиг.4) и с отчитане на (36)÷(40), зависимостта (26) се изразява в дискретна, непрекъсната и комплексна форма съответно с (42), (43), (44).

Примерен вид на алгебричното ***Fliess***-управление (фиг.6) u, използващо ***PID***-регулатор, е показано с (45). Параметрите за настройка на алгебричния оценител са закъснението τ при изчисляване на оценката на управлението и стойността на параметъра α. Те са избрани съобразно параметрите на номиналния модел на обекта $\tau << \tau^{*}$; $\alpha = k_{\hat{G}^{*}}^{-1}$:

$$\begin{aligned} y_1^{(n_1)} &= F_1 + \alpha_{1,1} u_1 + \alpha_{1,2} u_2 + \ldots + \alpha_{1,m} u_m \quad , (r \neq m, r > m) \\ &\cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ y_r^{(n_r)} &= F_m + \alpha_{m,1} u_1 + \alpha_{m,2} u_2 + \ldots + \alpha_{r,m} u_m \quad , (r \neq m, r > m) \end{aligned} \tag{28}$$

$$n_j \geq 1 \; ; \; j = 1, \ldots, r; \; \alpha_{j,i} \in \Re \; ; \; j = 1, \ldots, m \tag{29}$$

$$\begin{aligned} F_1 &= y_1^{(n_1)} - \left(\alpha_{1,1} u_1 + \alpha_{1,2} u_2 + \ldots + \alpha_{1,m} u_m\right), (r \neq m, r > m) \\ &\cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ F_r &= y_r^{(n_r)} - \left(\alpha_{m,1} u_1 + \alpha_{m,2} u_2 + \ldots + \alpha_{r,m} u_m\right), (r \neq m, r > m) \end{aligned} \tag{30}$$

$$\partial E / \partial y^{(n)} \neq 0, (0 < n < a) \tag{31}$$

$$E\left(t, y^{(0)}, y^{(1)}, y^{(2)}, .., y^{(n-1)}, y^{(n)}, y^{(n+1)}, .., y^{(a)}, u^{(0)}, u^{(1)}, \ddot{u}^{(2)}, .., u^{(b)}\right) = 0 \tag{32}$$

$$y^{(n)} = \Re\left(t, y^{(0)}, y^{(1)}, y^{(2)}, .., y^{(n-1)}, y^{(n+1)}, .., y^{(a)}, u^{(0)}, u^{(1)}, u^{(2)}, .., u^{(b)}\right) \tag{33}$$

$$\Re = F + \alpha u \;\Rightarrow\; y^{(n)} = F + \alpha u \tag{34}$$

$$E\left(t, y^{(0)}, y^{(1)}, y^{(2)}, ..., y^{(a)}, u^{(0)}, u^{(1)}, u^{(2)}, ..., u^{(b)}\right) = 0 \tag{35}$$

$$F(k) = \left[y^{(n)}(k)\right]_{\varepsilon} - \alpha u(k-1) \tag{36}$$

$$F_j(k) = \left[y_j^{(n_j)}(k)\right]_{\varepsilon} - \sum_{i=1}^{m} \alpha_{j,i} u_i(k-1), (k = \kappa T_0) \tag{37}$$

$$F(t) = \left[y^{(n)}(t)\right]_{\varepsilon} - \alpha u(t-\tau) \tag{38}$$

$$F_j(t) = \left[y_j^{(n_j)}(t)\right]_{\varepsilon} - \sum_{i=1}^{m} \alpha_{j,i} u_i(t-\tau) \tag{39}$$

$$F(p) = \left[\Phi^{(n)} y(p)\right]_{\varepsilon} - \alpha e^{-p\tau} u(p) \tag{40}$$

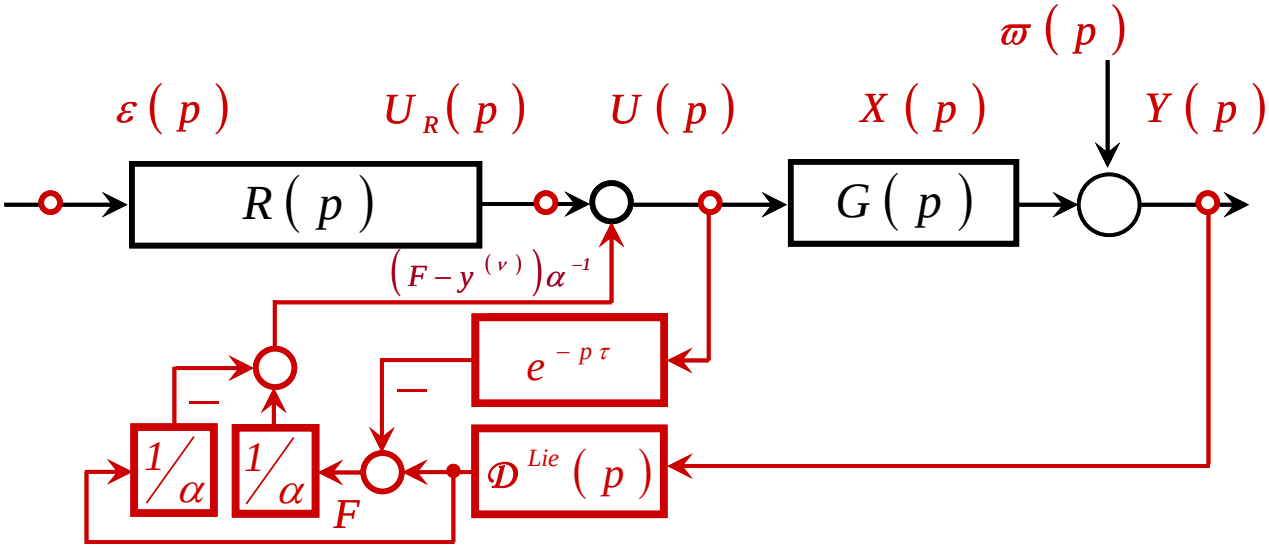
$$F_j(p) = \left[\Phi^{(n_j)} y_j(p)\right]_{\varepsilon} - \alpha_{j,m} e^{-p\tau} u_m(p) \tag{41}$$

$$u(k) = -(F(k)/\alpha) + (y^{(n)}(k)/\alpha) + u_R(k) \tag{42}$$

$$u(t) = -(F(t)/\alpha) + (y^{(n)}(t)/\alpha) + u_R(t) \tag{43}$$

$$U(p) = -(F(p)/\alpha) + (y^{(n)}(p)/\alpha) + U_R(p) \tag{44}$$

$$U(p) = -(F(p)/\alpha) + (y^{(n)}(p)/\alpha) + (k_P + k_I p^{-1} + k_D p)\varepsilon(p) \tag{45}$$



Фиг.6

Това е първата част на разработката. Тя обхваща числено алгебрично диференциране, полиномиална обработка на сигнали, анихилатори от пълен и от дробен ред, управление с алгебрични ***Lie***-диференциатори. Втората част разглежда структури на фрактални системи за управление от този клас, резултати от техния робастен анализ, заключение и библиография.

Автор: Емил Николов, проф. дтн, д-р, катедра „Автоматизация на Непрекъснатите Производства”, Факултет Автоматика, Технически Университет - София, E-mail address: *nicoloff@tu-sofia.bg*

Постъпила на 28.04.2012 **Рецензент** чл. кор. проф. дтн П. Петков

Годишник на Технически Университет - София, т. 62, кн.3, 2012
Proceedings of the Technical University - Sofia, v. 62, book 3, 2012

УПРАВЛЕНИЕ С АЛГЕБРИЧНО *Lie*-ДИФЕРЕНЦИРАНЕ И АНИХИЛАТОРИ - II част

Емил Николов

Резюме *- В работата се предлага алгебрична структура за оценка на параметър при числено диференциране. Целта е да се систематизира, опише и да се развие нов алгебричен подход за решаването на задачи при управлението на индустриални обекти*

Ключови думи *- числено алгебрично* ***Lie****-диференциране, операторни трансформации, оператори за фрактално диференциране, анихилатори, управление без модел, алгебрични методи за управление.*

CONTROL WITH ALGEBRAIC *Lie*-DIFFERENTIATION AND ANNIHILATORS - part II

Emil Nikolov

Abstract *- In this paper is proposed an algebraic structure for a parameter estimation in the numerical differentiation. The purpose is to systematize, describe and develop a new algebraic approach for solving tasks in the control of industrial plants*

Keywords *- Numerical Algebraic* ***Lie****-differentiation, Operational Calculus, Fractional Differential Operators, Annihilators, Model-Free Control, Algebraic Methods in Control*

Настоящата разработката е представена в две неразделно свързани части. Първата обхваща числено алгебрично диференциране, полиномиална обработка на сигнали, анихилатори от пълен и от дробен ред, управление с алгебрични ***Lie***-диференциатори. В тази втора част са разгледани структури на фрактални системи за управление от този клас, резултати от техния робастен анализ, заключение и библиография.

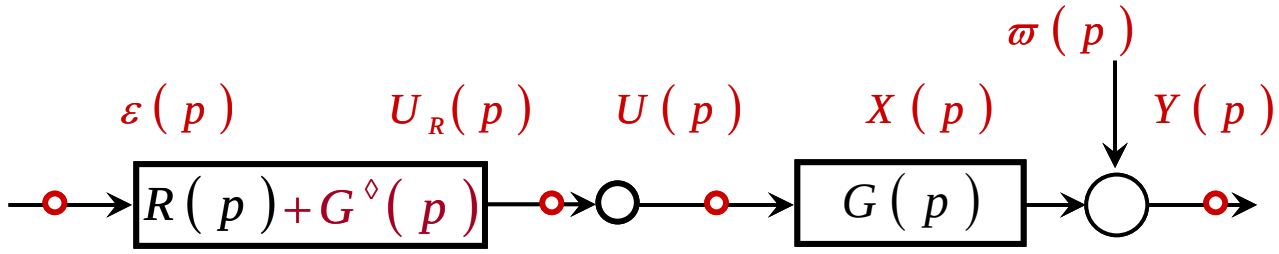
7. ФРАКТАЛНИ СИСТЕМИ ЗА УПРАВЛЕНИЕ С АЛГЕБРИЧНИ *Lie*-ДИФЕРЕНЦИАТОРИ

С цел да бъде потърсен и анализиран физическият еквивалент на (26), се разглежда описание (46), (47) съответстващо на структурата от фиг.6. От него следва зависимостта (48) която определя връзката на управлението u и регулируемата величина y с динамична система $\hat{G}$. Алгебричното уравнение за фиг.6. е изразено чрез (49), (50). От него следва зависимостта (51), която определя връз-

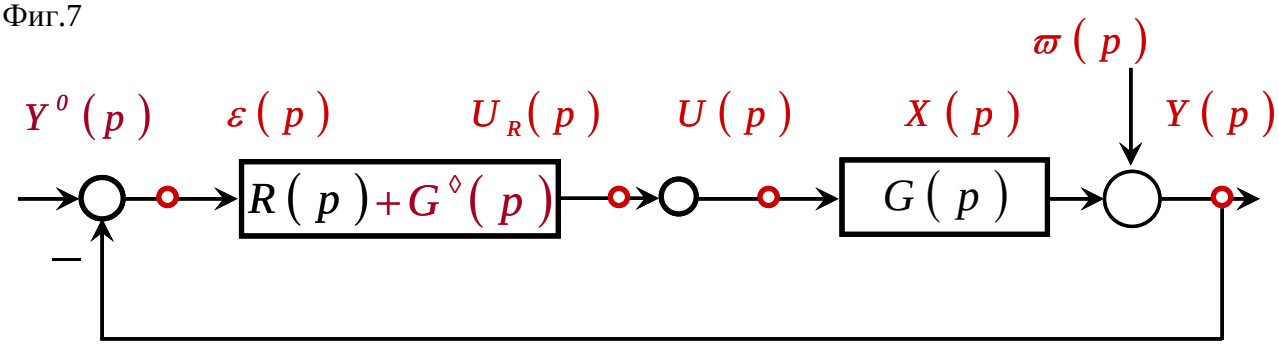
© 2012 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

ката на управлението u и регулируемата величина y с помощта на инверсния модел $\hat{G}^{\diamond}$ на динамичната система. Аналогията между зависимостите (48) и (51) определя физическият еквивалент на (26) като (52). С помощта на еквивалента (52) от физическата аналогия, резултатът от преобразуването на структурата (фиг.6) на отворената система за управление е показан на фиг.7. За затворената система (фиг.8), където с y^0 е означено заданието, са в сила зависимостите (53)÷(58). Те са доказателство, че системите за управление с алгебрични ***Lie***-диференциатори реализират свойствата и характеристиките на системите с инверсен модел на обекта. Като потвърждение, на фиг.7 и на фиг.8, са показани резултатите от симулацията на моделите на отворената W и на затворената Φ система (фиг.5, фиг.6) с алгебричен ***Lie***-диференциатор. Визуализиран чрез $((F-y^{(v)})\ \alpha^{-1})$-съставящата е и физическият еквивалент на (26) като (52).



Фиг.7



Фиг.8

$$U_n y^{(n)}+\ldots+U_1 y^{(1)}+U_0 y = V_0 u+V_1 u^{(1)}+\ldots+V_m u^{(m)}$$
$$(U_n/V_0)\,y^{(n)} = F\left(y,y^{(1)},\ldots,u^{(1)},\ldots\right)+u \tag{46}$$

$$u = -F\left(y,y^{(1)},\ldots,u^{(1)},\ldots\right)+(U_n/V_0)\,y^{(n)}$$
$$u = \left(-F\left(y,y^{(1)},\ldots,u^{(1)},\ldots,y^{-1}\right)+(U_n/yV_0)\,y^{(n)}\right)y \tag{47}$$

$$u(t) = \hat{\mathcal{G}}(t)\,y(t) \tag{48}$$

$$\left(U_n p^n+\ldots+U_2 p^2+U_1 p+U_0\right)y(p) = \left(V_m p^m+\ldots+V_2 p^2+V_1 p+V_0\right)u(p) \tag{49}$$

$$G(p)=y(p)/u(p)=\left(V_m p^m+\ldots+V_1 p+V_0\right)\left(U_n p^n+\ldots+U_1 p+U_0\right)^{-1}$$
$$u(p)=G^{-1}(p)\,y(p) \tag{50}$$

$$u(p)=\hat{G}^{\diamond}(p)\,y(p),\ \left(\hat{G}^{\diamond}\equiv G^{-1}\right) \tag{51}$$

$$\left((F-y^{(v)})\ \alpha^{-1}\right) \hat{\Leftrightarrow} \hat{G}^{\diamond} \tag{52}$$

$$y(p) = y_1(p)+y_2(p) \tag{53}$$

$$y_1(p) = \frac{G^{\diamond}(p)G(p)}{1+R(p)G(p)}\, y^0(p) \tag{54}$$

$$y_2(p) = \frac{R(p)G(p)}{1+R(p)G(p)}\, y^0(p) \tag{55}$$

$$y(p) = \frac{G^{\diamond}(p)G(p)}{1+R(p)G(p)}\, y^0(p) + \frac{R(p)G(p)}{1+R(p)G(p)}\, y^0(p) \tag{56}$$

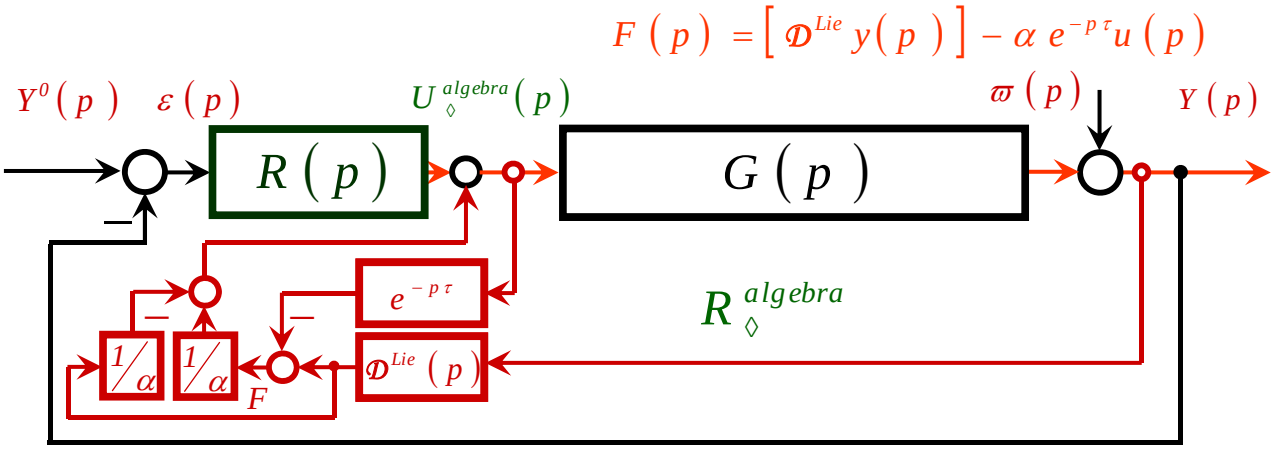
$$y(p) = \frac{1+R(p)G(p)}{1+R(p)G(p)}\, y^0(p) \equiv y^0(p), \left(\hat{G}^{\diamond} \equiv G^{-1}\right) \tag{57}$$

$$y(p) = 1(p)\, y^0(p) \tag{58}$$

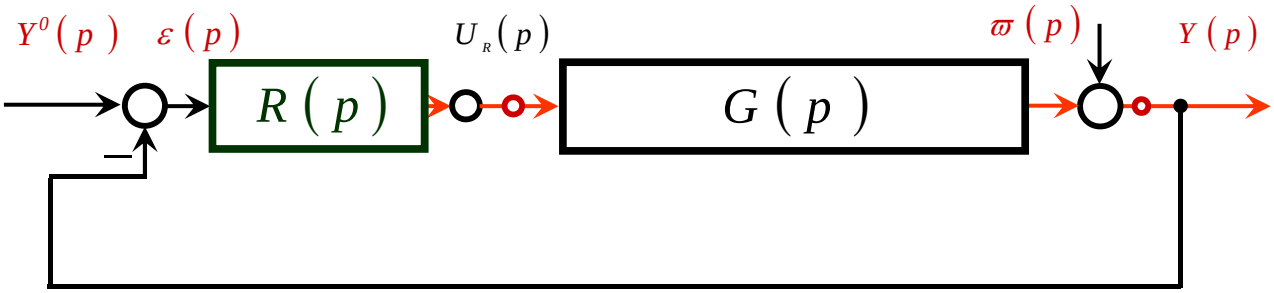
8. КАЧЕСТВО НА ФРАКТАЛНИ СИСТЕМИ ЗА УПРАВЛЕНИЕ С АЛГЕБРИЧНИ *Lie*-ДИФЕРЕНЦИАТОРИ

На фиг.9 е показана структурата на система за управление с алгебричен ***Lie***-диференциатор от пълен (или от дробен) ред D^{Lie}, реализираща алгебричното ***Fliess***-управление. Новото в нея, в сравнение с една класическа конвенционална система с обратна връзка (фиг.10), е наличието на контур за алгебрично ***Lie***-диференциране. Неговите параметри не са функция на парареметрите на обекта, а структурата му е универсална и за устойчиви (статични) и за неустойчиви (астатични) обекти. Моделирани при едни и същи други условия и паралелно симулирани са две системи. Първата е разглежданата система с фрактален алгебричен ***Lie***-диференциатор и ***PID***-регулатор (фиг.9), а втората -конвенционална система с ***PID***-регулатор (фиг.10). Резултатите от симулацията на двата модела са показани както следва на: ● фиг.11 с преходните функции $h_W(t)$ и честотните характеристики $W(j\omega)$ на представителната променлива $(F-y^{(v)})\alpha^{-1}$ в структурата на отворените системи; ● фиг.12 с преходните функции $h_\Phi(t)$ и честотните характеристики $\Phi(j\omega)$ на представителната променлива $(F-y^{(v)})\alpha^{-1}$ в структурата на затворените системи; ● фиг.13 с преходните функции $h_Л(t)$ и $h_R(t)$ на двете затворени и честотните характеристики $W_Л(j\omega)$ и $W_R(j\omega)$на двете отворени сравнявани системи по регулируемите променливи.

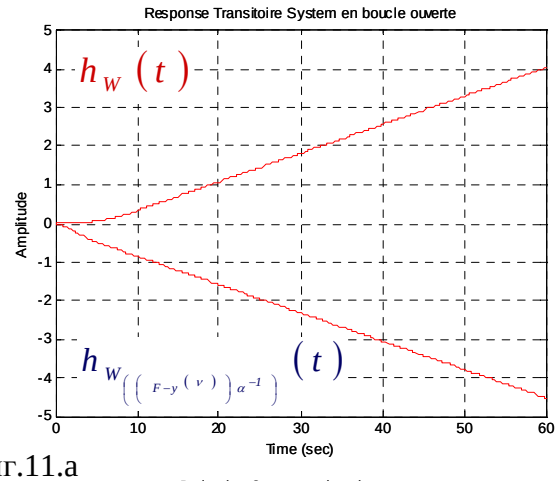
Резултатите от симулацията (фиг.11,фиг.12) показват особеностите на инверсната динамика на представителната променлива $(F-y^{(v)})\alpha^{-1}$, с която фракталната система (фиг.9) съществено се отличава от конвенционалната система с ***PID***-регулатор (фиг.10). Благодарение на контура за алгебрично ***Lie***-диференциране, разглежданата в настоящата разработка система (фиг.9) придобива нови свойства в сравнение с класическата система с обратна връзка (фиг.10). Резултатите от сравнителния анализ потвърждават предимствата на системата с алгебричен ***Lie***-диференциатор (фиг.9) пред конвенционалната (фиг.10). Те се изразяват едновременно в многократно по-големи бързодействие $t^{Л}_{reg} << t^{R}_{reg}$ и запаси на устойчивостта $GM_Л >> GM_R$, $PM_Л >> PM_R$ на системите с алгебричен ***Lie***-диференциатор.



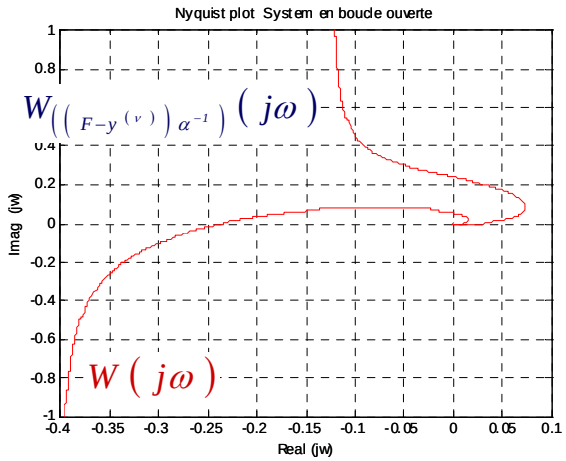
Фиг.9



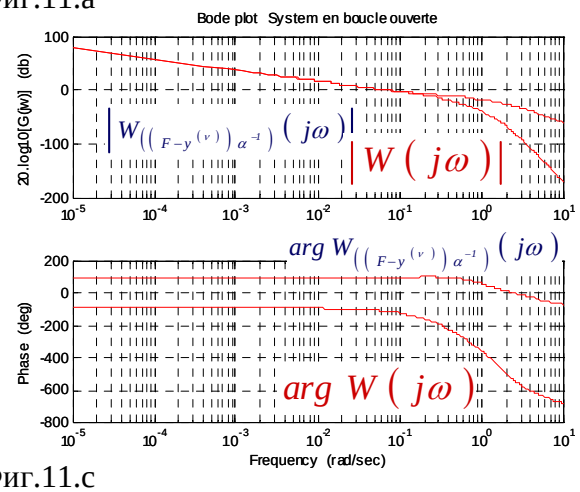
Фиг.10



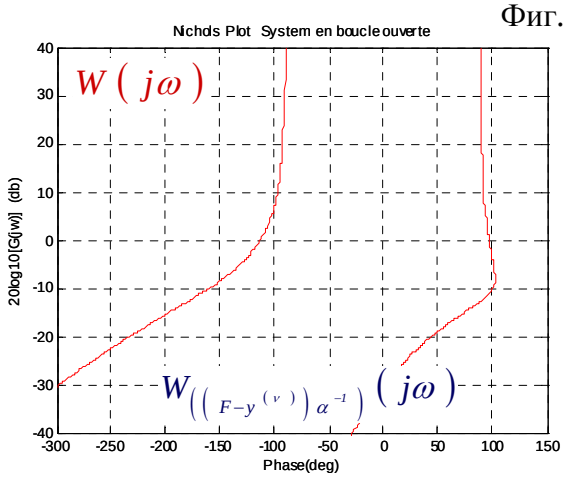
Фиг.11.a



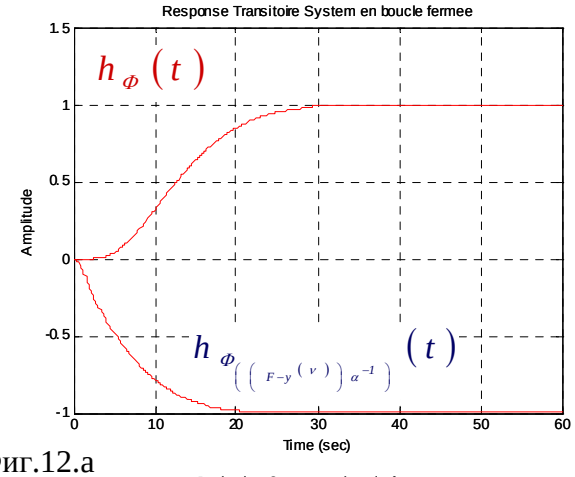
Фиг.11.b



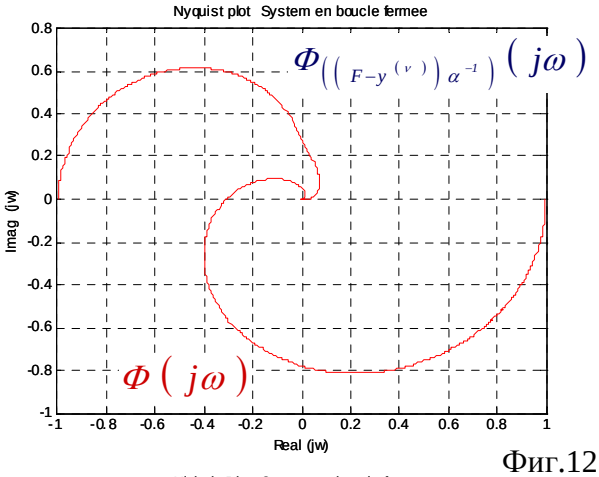
Фиг.11.c



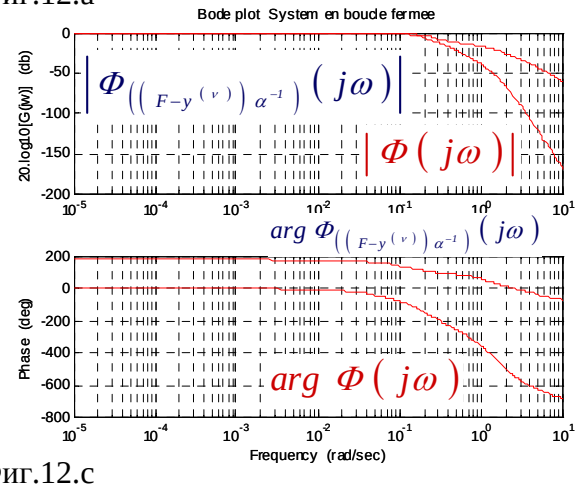
Фиг.11.d



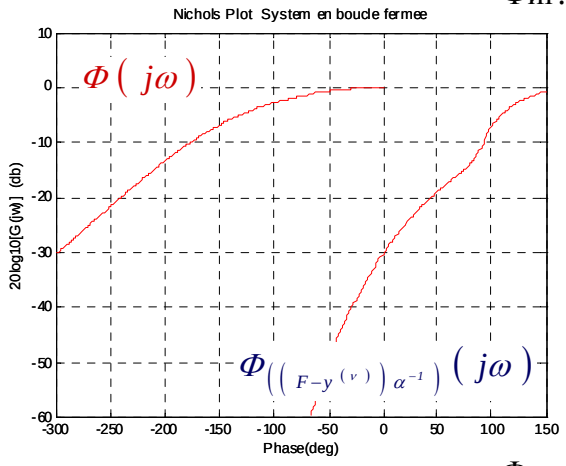
Фиг.12.a



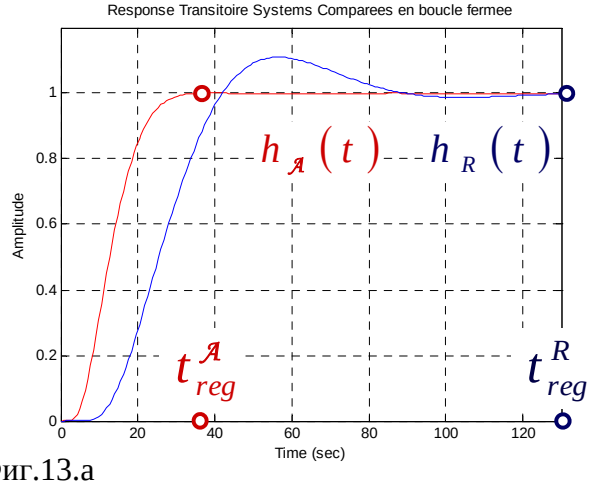
Фиг.12.b



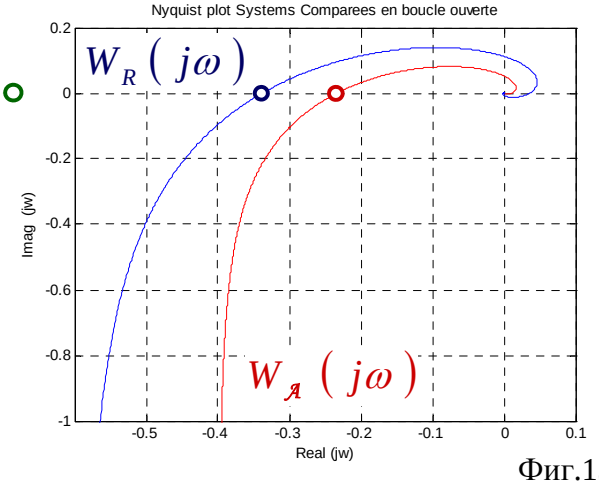
Фиг.12.c



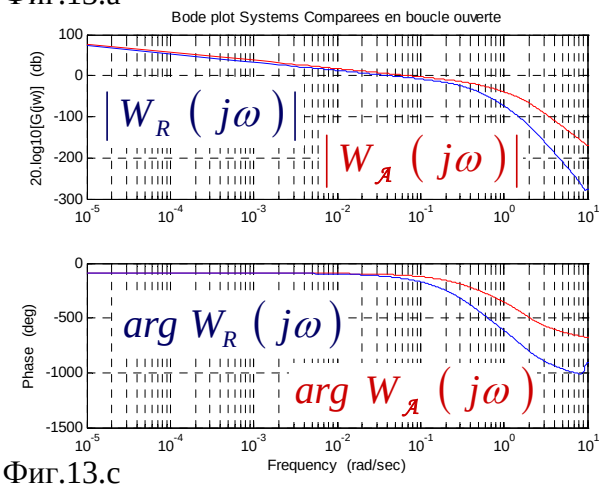
Фиг.12.d



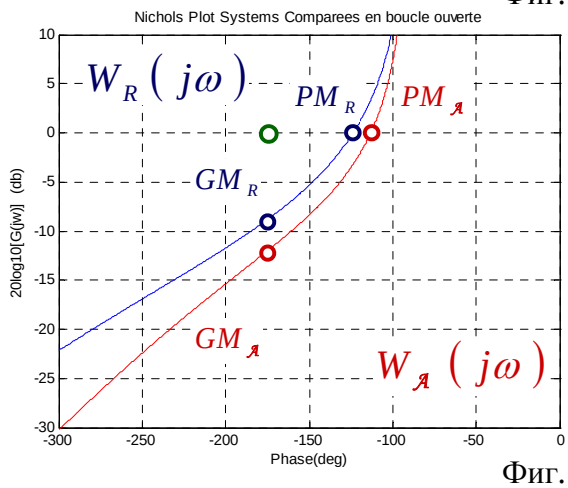
Фиг.13.a



Фиг.13.b



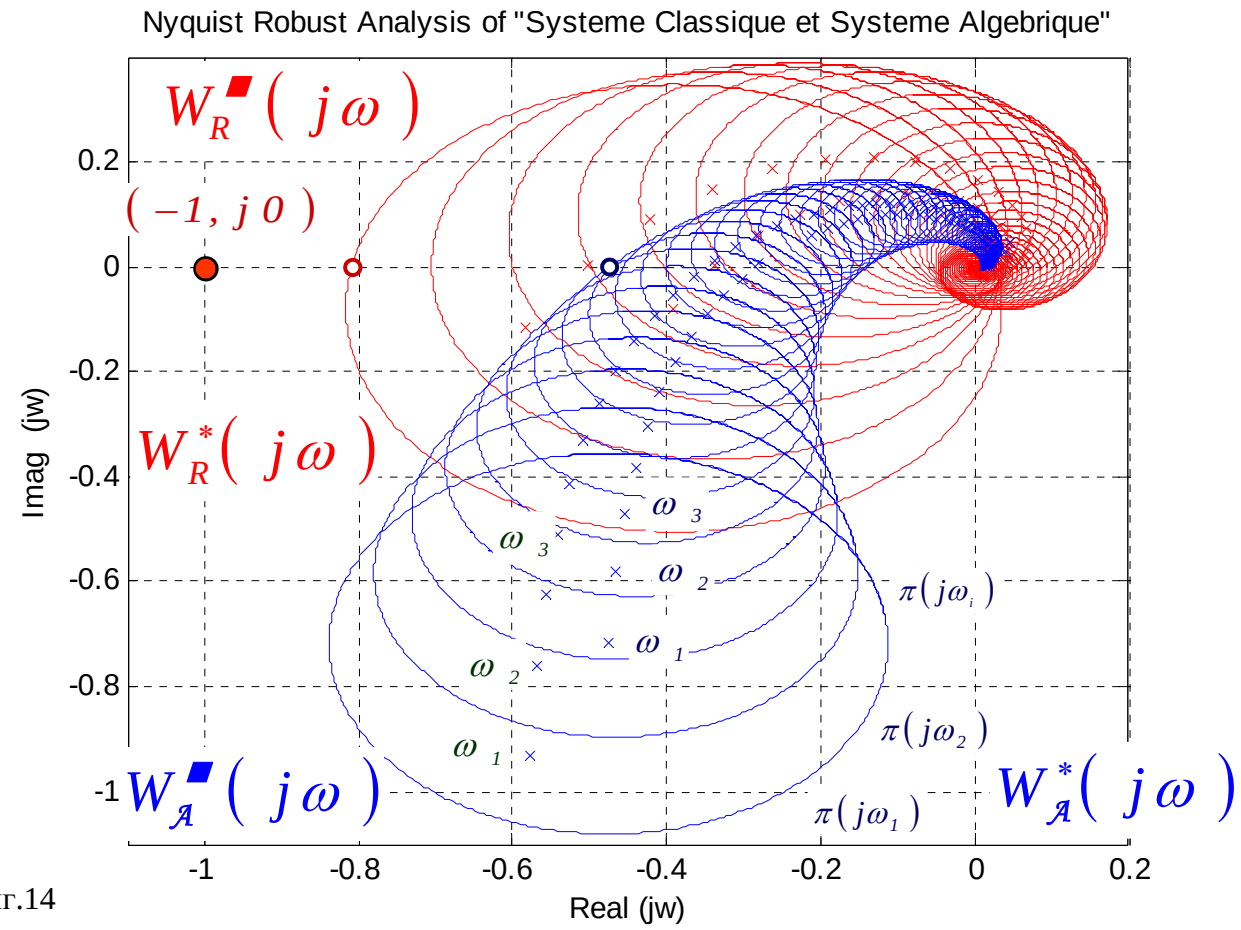
Фиг.13.c



Фиг.13.d

9. РОБАСТЕН АНАЛИЗ НА ФРАКТАЛНИ СИСТЕМИ ЗА УПРАВЛЕНИЕ С АЛГЕБРИЧНИ *Lie*-ДИФЕРЕНЦИАТОРИ

И за двете системи (фиг.9,фиг.10) са отчетени моделите $w_{Я}^{*}(j\omega_i), w_{R}^{*}(j\omega_i)$ на номиналните и на смутените на най-горна граница $w_{Я}^{■}(j\omega_i), w_{R}^{■}(j\omega_i)$ отворени системи, както и на априорна неопределеност, моделирана с площта на кръг $\pi(j\omega_i)$ (59) с радиус $r^0(\omega_i)$ (60) на окръжност $\pi^0(j\omega_i)$ (61), за да е възможно провеждането на робастен анализ по характеристиките на отворените системи. Резултатите от него доказват (фиг.14), че алгебричната система (фиг.9) удовлетворява изискванията и за робастна устойчивост (62), и изискванията за робастно качество (63). Очевидно, запасите на робастно качество и на робастна устойчивост на системата с алгебричен ***Lie***-диференциатор са несравнимо по-високи от съответните запаси на конвенционалната система (фиг.10)



Фиг.14

$$\pi(j\omega) \in \mathcal{W}(j\omega), (\omega \in [0;\infty)) \tag{59}$$

$$r^0(\omega_i) = |l_a(\omega_i) R(\omega_i)| = |l_m(\omega_i) R(\omega_i) G^*(\omega_i)| \tag{60}$$

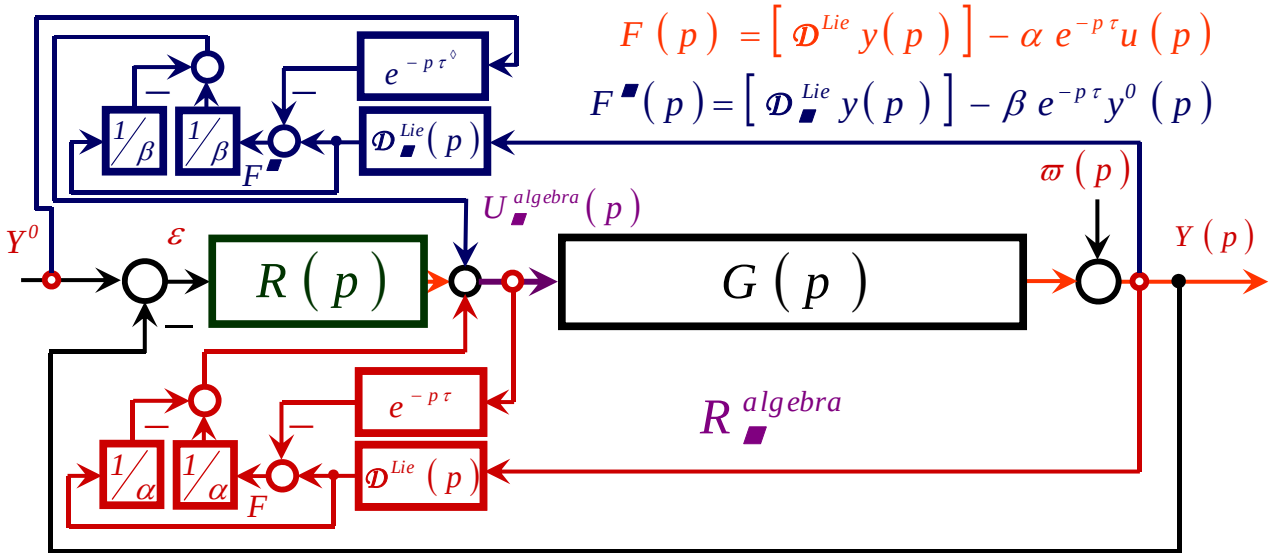
$$\pi^0(j\omega_i) = \begin{cases} Re^0(\omega_i) = Re^*(\omega_i) + r(\omega_i)\cos\Omega, (\Omega \in [0,\infty)) \\ Im^0(\omega_i) = Im^*(\omega_i) + r(\omega_i)\sin\Omega, (\Omega \in [0,\infty)) \end{cases} \tag{61}$$

$$\begin{gathered} |1 + G^*(\omega)R(\omega)| > r^0(\omega), \forall\omega \\ |1 + G^*(\omega)R(\omega)| > |G^*(\omega)R(\omega)| \, \bar{\ell}_m(\omega), \forall\omega \end{gathered} \tag{62}$$

$$\left|1+G(\omega)R(\omega)\right| \geq \left|1+G^*(\omega)R(\omega)\right| - r^0(\omega),\ \forall G\in\Pi;\forall\omega \tag{63}$$

10. СИСТЕМИ ЗА УПРАВЛЕНИЕ С ДВОЙНИ АЛГЕБРИЧНИ *Lie*-ДИФЕРЕНЦИАТОРИ

Предназначението, свойствата и ефективността в управлението на алгебричната структура (фиг.9) в системите за управление са основанието в настоящата разработка да бъде предложена нова по същността си структура (фиг.15) на фрактална система за управление (фиг.15) с два ***Lie***-алгебрични диференциатора. В нея първата алгебрична структура обхваща за ***Fliess***-оценка обекта за управление $G(p)$, а втората структура обхваща за ***Fliess***-оценка отворената система $W(p)$.



Фиг.15

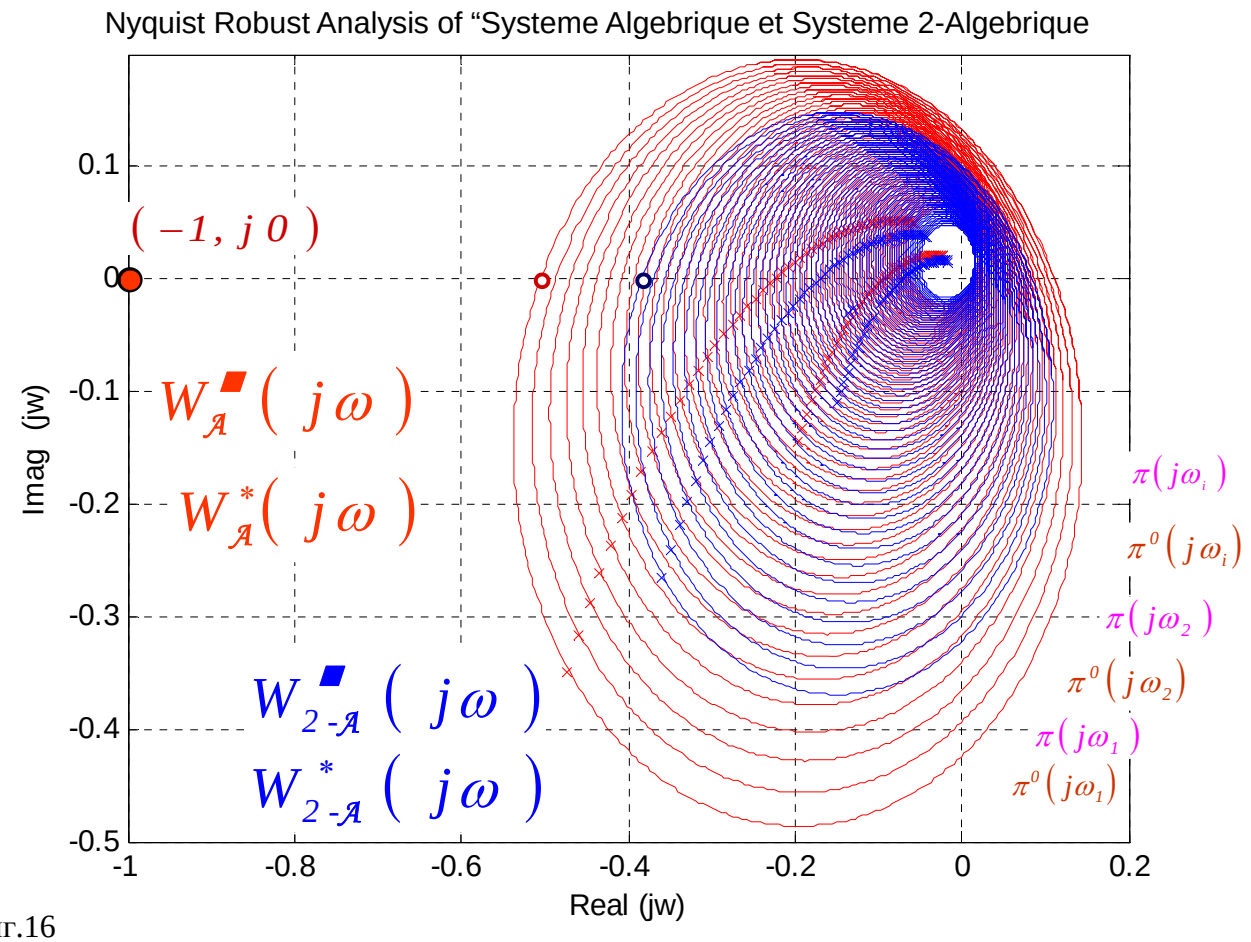
Докато в системата (фиг.9) управлението $U^{algebra}_{\lozenge}$ с най-малко две адитивни съставящи се определя с (64), (65), то в системата (фиг.15) с два алгебрични ***Lie***-диференциатори управлението $U^{algebra}_{\blacksquare}$ с най-малко четири адитивни съставящи се определя с (66), основните от които са изразени с помощта на (67).

$$U^{algebra}_{\lozenge}(p) = -\frac{F}{\alpha} + \frac{[\mathcal{D}^{Lie} y(p)]}{\alpha} + U_R(p) \tag{64}$$

$$F(p) = [\mathcal{D}^{Lie} y(p)] - \alpha e^{-p\tau} u(p) \tag{65}$$

$$U^{algebra}_{\blacksquare}(p) = -\frac{F}{\alpha} - \frac{F^{\blacksquare}}{\beta} + \frac{[\mathcal{D}^{Lie} y(p)]}{\alpha} + \frac{[\mathcal{D}^{Lie}_{\blacksquare} y(p)]}{\beta} + U_R(p) \tag{66}$$

$$F(p) = [\mathcal{D}^{Lie} y(p)] - \alpha e^{-p\tau} u(p)\ ;\ F^{\blacksquare}(p) = [\mathcal{D}^{Lie}_{\blacksquare} y(p)] - \beta e^{-p\tau} y^0(p) \tag{67}$$



Фиг.16

И за двете системи (фиг.9,фиг.15) са отчетени моделите $w^{*}_{\mathcal{A}}(j\omega_i), w^{*}_{2-\mathcal{A}}(j\omega_i)$ на номиналните и на смутените на най-горна граница $w^{\blacksquare}_{\mathcal{A}}(j\omega_i), w^{\blacksquare}_{2-\mathcal{A}}(j\omega_i)$ отворени системи, както и на априорна неопределеност, моделирана с площта на кръг $\pi(j\omega_i)$ (59) с радиус $r^0(\omega_i)$ (60) на окръжност $\pi^0(j\omega_i)$ (61), за да е възможно провеждането на робастен анализ по характеристиките на отворените системи. Резултатите от него доказват (фиг.16), че алгебричните системи (фиг.9,фиг.15) удовлетворяват изискванията и за робастна устойчивост (62), и изискванията за робастно качество (63), но очевидно, запасите на робастно качество и на робастна устойчивост на системата с два алгебрични ***Lie***-диференциатора (фиг.15) са несравнимо по-високи от съответните запаси на системата (фиг.9) с един алгебричнен ***Lie***-диференциатор (фиг.9). Това е доказателство за ефективността на двойното използване на ***Fliess***-оценка и на обекта за управление $G(p)$, и на отворената система $w(p)$.

11. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новите и оригинални елементи в настоящата работа са:

- систематизираните, анализираните и доразвитите теоретични основи на един принципно нов алгебричен подход за управление на индустриални обекти, предложен от ***Michel Fliess***, основаващ се не на идентификация и моделиране на

управлявания обект, а на използването на оценки на производни с помощта на ***Lie***-алгебрично диференциране и анихилатори;

● предложеният фракталнен ***Lie***-алгебричен анихилатор и анализ на неговите характеристики;

● аналитичното представяне и анализът на процедурата за оценка на производните за много кратък интервал от време с помощта на специалната ***Heaviside***-функция;

● подходът за аналогия при определяне на физическия еквивалент на числената оценката на производните;

● моделирането и анализа на времевите и честотни характеристики на системите за управление с алгебрични ***Lie***-диференциатори;

● структурата на нов клас системи за управление с двойни алгебрични ***Lie***-диференциатори;

● сравнителният анализ, робастен анализ и систематизация на предимствата на представените в настоящата работа фрактални системи за алгебрично управление.

12. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Fliess M., Sira Ramírez H. (2004), ***Control via state estimations of some nonlinear systems***. In: Proc. Symp. Nonlinear Control Systems (NOLCOS'04), Stuttgart, 2004

2. Fliess M., Mboup M., Mounier H., Sira-Ramírez H. (2003), ***Questioning some paradigms of signal processing via concrete examples***. In: Sira-Ramírez,H., Silva-Navarro G. (eds.) Algebraic Methods in Flatness, Signal Processing and State Estimation. Innovation ed. Lagares, México, 2003

3. Mboup M., Join C., Fliess M. (2007), ***A revised look at numerical differentiation with an application to nonlinear feedback control***. In: 15th Mediterranean conference on Control and automation (MED'07), Athens, Greece, 2007

4. Mboup Mamadou, Cedric Join, Michel Fliess (2009), ***Numerical differentiation with annihilators in noisy environment***, Numerical Algorithms 50, 4 (2009) 439-467

5. Yosida K. (1984), ***Operational Calculus: A Theory of Hyperfunctions***, Springer, 1984, 516 p.

6. Nikolov E. (2010), ***Robust Fractional Control* (*Approaches Predictive and Algebraic, Distributed Control Systems*),** Sofia 2010, © 2010 Ed. of Technical University Sofia, 2010, ISBN 978-954-438-851-5, 375 p.

Автор: Емил Николов, проф. дтн, д-р, катедра „Автоматизация на Непрекъснатите Производства”, Факултет Автоматика, Технически Университет - София, E-mail address: *nicoloff@tu-sofia.bg*

Постъпила на 28.04.2012 **Рецензент** чл. кор. проф. дтн П. Петков

Годишник на Технически Университет - София, т. 62, кн.3, 2012
Proceedings of the Technical University - Sofia, v. 62, book 3, 2012

КАСКАДНИ СТРУКТУРИ ЗА УПРАВЛЕНИЕ В СИСТЕМИТЕ ЗА СГРАДНА АВТОМАТИЗАЦИЯ

Тодор Йонков

Резюме. *В настоящата статия се описва подход за синтез на многомерни каскадни системи за управление на обекти за сградна автоматизация. В основата му стои идеята за декомпозиране на многомерните обекти на каскадно свързани подсистеми, характеризиращи фазовите координати, които подлежат на ограничаване в процеса на управление на сградната система. Целта на изследването е да бъдат синтезирани конкретни структури за управление и изведени алгоритми за настройка на техните елементи.*
Ключови думи: *каскадна система, сградна автоматизация, икономия на енергия*

CASCADING MANAGEMENT STRUCTURES IN BUILDING AUTOMATION SYSTEMS

Todor Ionkov

Abstract. *This article describes an approach for the synthesis of multivariable cascade control systems for building automation objects. The idea of decomposition of multidimensional objects of cascaded subsystems characterizing the phase coordinates to be limiting in the process of building management system stay in its base. The aim of this study is to be synthesized specific management structures and algorithms for setting of their elements.*
Keywords: *cascade system, building automation, energy saving*

1. ОБЕКТ ЗА УПРАВЛЕНИЕ

Прост модел на на сградна инсталация (фиг.1) е представен като разлика в температурните потоци, осигурени от нагревателя Q_{in} и загубите през сградната изолация Q_{loss}:

$$mc\frac{d}{dt}(T_{in}-T_{out})=Q_{in}-Q_{loss} \qquad (1)$$

където m е сградната маса (kg), c е средната специфична топлоемкост ($J/kg.K$), Q_{loss} и Q_{in} са стойностите на топлинните потоци (J/s или W) и T_{in} и T_{out} са температури ($°C$). Когато външната температура T_{out} е константа, (или се променя много бавно) уравнението се променя и добива вида:

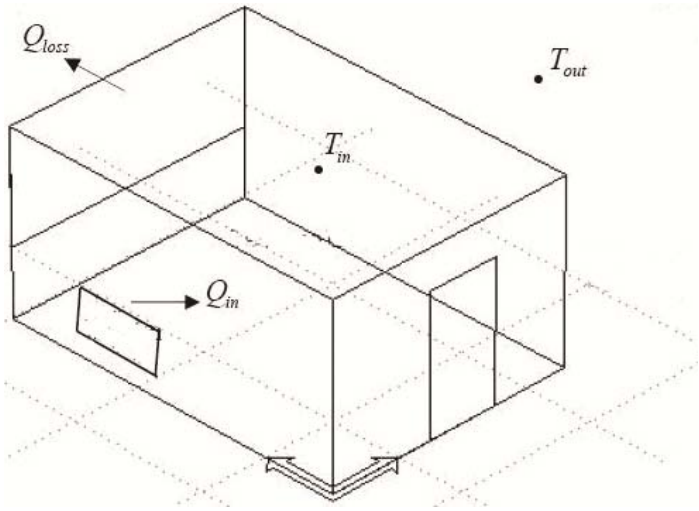
© 2012 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved
ISSN 1311-0829

$$mc\frac{d}{dt}(T_{in}) = V_h^2 / R - Q_{loss} \qquad (2)$$

където V_h е напрежението на нагревателя, а R е електрическото съпротивление на нагревателя. Стойността на топлината Q_{loss}, загубена през сградната изолаци [1], е пропорционална на температурната разлика от двете страни на изолацията:

$$Q_i = U_0(T_{in} - T_{out}) \qquad (3)$$

където U_0 е коефициент на температурни загуби (W/K).



Фиг.1. Модел на сграден обект за отопление, вентилация и климатизация

От изразите по-горе следва представянето в пространство на състоянията:

$$\frac{d}{dt}T_{in} = -\frac{U_0}{m.c}T_{in} + \frac{1}{m.c}Q_{in} + \frac{U_0}{r.c}T_{out} \qquad (3)$$

където $\frac{U_0}{r.c}T_{out}$ отразява главните смущаващи въздействия. Следователно:

$$\dot{x} = -\frac{U_0}{m.c}x + \frac{1}{m.c}u + \frac{U_0}{r.c}\xi \qquad (4)$$

Обобщеното описание на разглеждания обект - система за отопление, вентилация и климатизация [2], може да бъде представено във вида:

$$\left| \begin{array}{l} \dot{x} = Ax + Bu + Gz \\ y = cx \end{array} \right. \qquad (5)$$

където x е n-мерен вектор на състоянията, y - регулируема величина, z - смущаващо въздействие; B, G и C са вектори, A - матрица $n \times n$.

2. ДЕКОМПОЗИРАНЕ НА СИСТЕМАТА

Нека състоянията, които в процеса на регулиране трябва да бъдат ограничени, се описват с вектора y_1, който се получава от вектор x_1, подвектор на x. Тогава цялата система може да бъде разделена на две подсистеми, съответстващи на векторите x_1 и x_2, съответно от ред n_1 и n_2 (за улеснение x се преподрежда така, че x_1 да стои в началото му):

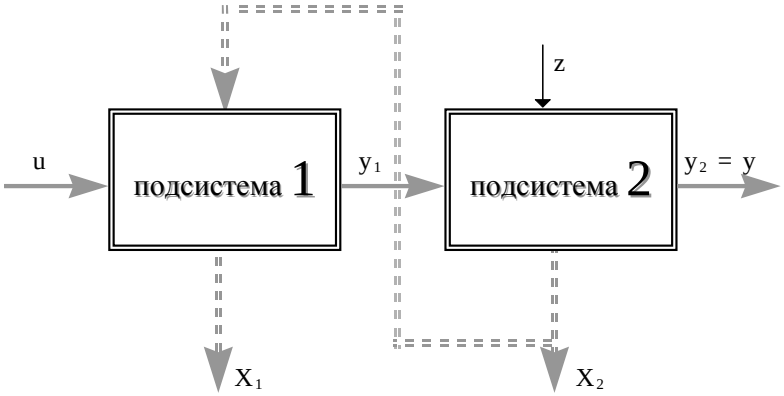
$$\begin{cases} \dot{x}_1 = A_1 x_1 + A_{12} x_2 + B_1 u \\ y_1 = c_1 x_1 \end{cases} \qquad (6)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = A_2 x_2 + A_{21} x_1 + G_2 z \\ y = y_2 = c_2 x_2 \end{cases} \qquad (7)$$

Външните смущения в обектите, които се разглеждат, постъпват само върху втората подсистема, но това не стеснява валидността на по-нататъшните разглеждания при наличие на вектор $G_1 \neq 0$. Основната идея на метода се състои в намирането на такъв вектор B_2, за който е в сила зависимостта:

$$A_{21} x_1 = B_2 c_1 x_1 = B_2 y_1 \qquad (8)$$

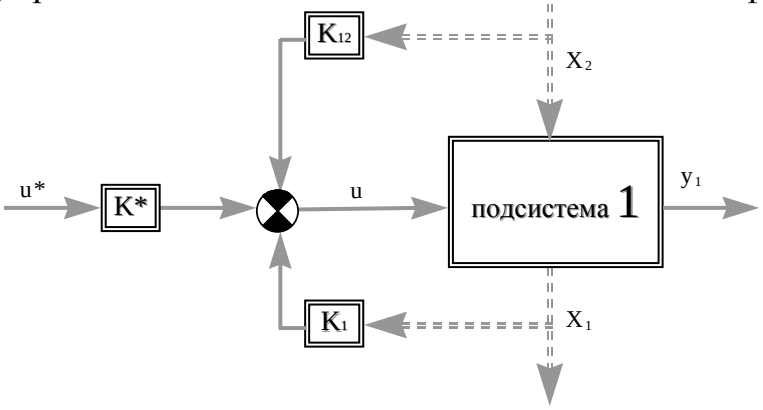
Очевидно $B_2 c_1 = A_{21}$ и винаги може да се намери векторът B_2. По този начин структурата на обекта за управление, разделен на подсистемите 1 и 2, може да се представи във вида на фиг.2. На базата на тези разглеждания следва, че "подчинена" е подсистемата 1.



Фиг.2. Структура на каскадните подсистеми

3. УПРАВЛЕНИЕ НА ПОДСИСТЕМИТЕ

Синтезът на затворени системи с желано разположение на полюсите е достатъчно добре разработен [3,4]. В настоящата работа се с демонстрират неговите идеи за синтез на управляващи въздействия към двете подсистеми. Нека структурата на управление на подсистема 1 е показаната на фиг.3.



Фиг.3. Управляващи контури в подчинената подсистема

Необходимо е да бъдат определени коефициента K^* и векторите K_1, K_{12} в управляващия алгоритъм:

$$u = K^* u^* - K_1 x_1 - K_{12} x_2 \qquad (9)$$

където u^* е заданието за подсистема 1. Коефициентът K^* е подходящо да бъде определен от съображения за точност в установен режим - $y_1 = u^*$. Тогава е изпълнено:

$$\left| \begin{array}{l} \dot{x}_1 = (A_1 - B_1 K_1) x_1 + (A_{12} - B_1 K_{12}) x_2 + B_1 K^* u^* = 0 \\ y_1 = c_1 x_1 = u^* \end{array} \right. \qquad (10)$$

Ако допуснем, че K_{12} е определен така, че е компенсирано влиянието на втората система върху първата, то е в сила:

$$(A_1 - B_1 K_1)\, x_1 + B_1 K^* c_1 x_1 = 0 \qquad (11),$$

следователно:

$$K^* = \frac{1}{C_1 (-A_1 + B_1 K_1)^{-1} B_1} \qquad (12)$$

Векторът K_1 е възможно да бъде определен също при предположението, че влиянието на x_2 върху система 1 е компенсирано. Тогава чрез линейната обратна връзка K_1 затворената по x_1 подсистема, ще има характеристично уравнение с неизвестни коефициенти - компонентите на вектора K_1. При синтез по желани полюси - p_i^* трябва да бъде изпълнена зависимостта:

$$\det \left| pI - A_1 + B_1 K_1 \right| = \prod_{i=1}^{n_1} \left(p - p_i^* \right) \qquad (13)$$

Чрез приравняване на коефициентите пред еднаквите степени на p се определят компонентите на вектора K_1.

Премахването на влиянието на втората подсистема върху първата може да бъде постигнато чрез подходящ избор на вектора K_{12}. Тук са налице две възможности. При желание за компенсиране влиянието на втората подсистема върху всичките състояния на първата в установен режим $\dot{x}_1 = 0$ от зависимост (10) следва, че K_{12} се определя съгласно:

$$A_{12} - B_1 K_{12} = 0 \qquad (14)$$

Не винаги е възможно определянето на K_{12} съгласно зависимост (14) т.к. размерността на участващите матрични коефициенти може да не позволи това. Ето защо е по-рационално да се търси компенсиране влиянието на втората подсистема само върху изходните състояния на първата. По такъв начин ще бъде подобрена динамиката и на самата втора подсистема. От (10) следва, че в установен режим е изпълнено равенството:

$$y_1 = c_1 x_1 = -c_1 (A_1 - B_1 K_1)^{-1} (A_{12} - B_1 K_{12}) x_2 - c_1 (A_1 - B_1 K_1)^{-1} B_1 K^* u \qquad (15)$$

$$K_{12} = \left[c_1 (A_1 - B_1 K_1)^{-1} B_1 \right]^{-1} c_1 (A_1 - B_1 K_1)^{-1} A_{12} \qquad (16)$$

Направените разглеждания за намирането на K_1 и K_{12} с цел компенсация в установен режим с лекота могат да се приложат и при отчитане на динамичното поведение на системата. Затворената система при избрания начин за управление се описва с:

$$\left| \begin{array}{l} \dot{x} = A^* x + B^* K^* u^* + G^* z \\ y = cx \end{array} \right. \qquad (17)$$

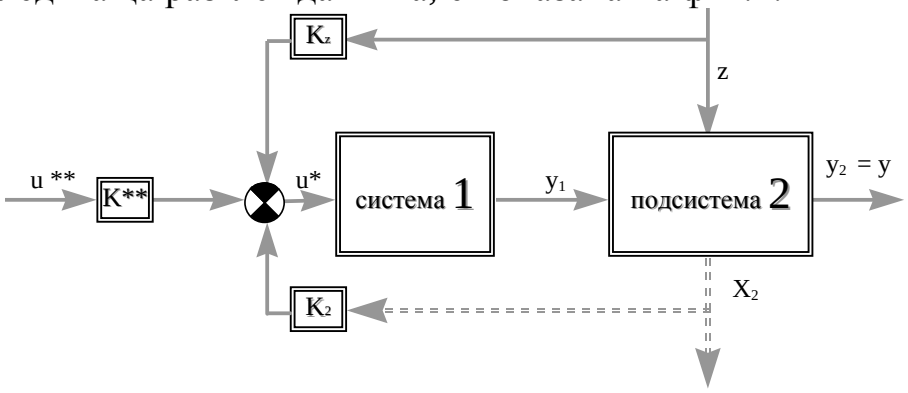
$$A^* = \begin{bmatrix} A_1 - B_1K_1 & A_{12} - B_1K_{12} \\ A_{21} & A_2 \end{bmatrix}, \qquad B^* = \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix}, \qquad G^* = \begin{bmatrix} 0 \\ G_2 \end{bmatrix}, \qquad c = [c_1 \quad 0]$$

Ако се въведе обобщен вектор на линейните обратни връзки $K = [K_1 \ K_{12}]$, тогава затворената система по задание се описва с:

$$W(p) = \frac{y_1(p)}{u^*(p)} = C\left(pI - A^* + B^*K\right)^{-1} B^*K^* \qquad (18)$$

В този случай компонентите на вектора К се определят от зададено разположение на полюсите на посочената предавателна функция. Чрез синтезираното управление за подсистема 1 нейната динамика може се сведе до звено от I ред с малка некомпенсирана времеконстанта T_μ.

Идеите на подчиненото регулиране [5] са подходящи при по -нататъшните разглеждания. Управлението на втората подсистема, което е със същата структура като на първата, ще бъде определено, но при отчитане на вече постигнатите динамични качества на "вътрешния" контур. Структурната схема, онагледяваща разглежданията, е показана на фиг.4.



Фиг.4. "Подчиняване" на подсистемата

Целта е да бъдат определени K^{**}, K_2, K_z при условие, че система 2 се описва с (7), система 1 (със състояние $y_1 = \nu$) се описва с уравнение:

$$\nu = -\frac{1}{T_\mu}\nu + \frac{1}{T_\mu}u^* \qquad (19)$$

а управлението u^* е от типа:

$$u^* = u^{**}K^{**} - K_2x_2 - K_zz \qquad (20)$$

Обектът за управление е от $n_2 + 1$ ред:

$$\left| \begin{array}{l} \dot{x} = Ax + Bu^* + Gz \\ y = cx \end{array} \right. \qquad (21)$$

$$x^T = [\nu \quad x_2] \qquad A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_\mu} & 0 \\ B_2 & A_2 \end{bmatrix}, \qquad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_\mu} \\ 0 \end{bmatrix}, \qquad G = \begin{bmatrix} 0 \\ G_2 \end{bmatrix}, \qquad c = [0 \quad c_2]$$

Управлението е:

$$u^* = -Kx + K^{**}u^{**} - K_zz \qquad (22)$$

където $K = [0 \quad K_2]$

Всички компоненти на обратните връзки се определят по начин, аналогичен на изложения за първата подсистема:

$$K^{**} = \frac{1}{C(-A+BK)^{-1}B} \qquad (23)$$

$$K_z = \frac{C(-A+BK)^{-1}G_2}{C(-A+BK)^{-1}B} \qquad (24)$$

Компонентите на обратните връзки по състоянията K_2 се намират от съображения корените на характеристичното уравнение на затворената система да имат определено разположение в комплексната равнина. Предавателната функция на затворената система е:

$$W(p) = C(pI - A + BK)^{-1}BK^{**} \qquad (25)$$

Следователно трябва да бъде изпълнено равенството:

$$\det|pI - A + BK| = \prod_{i=1}^{n_2+1}\left(p - p_i^*\right) \qquad (26)$$

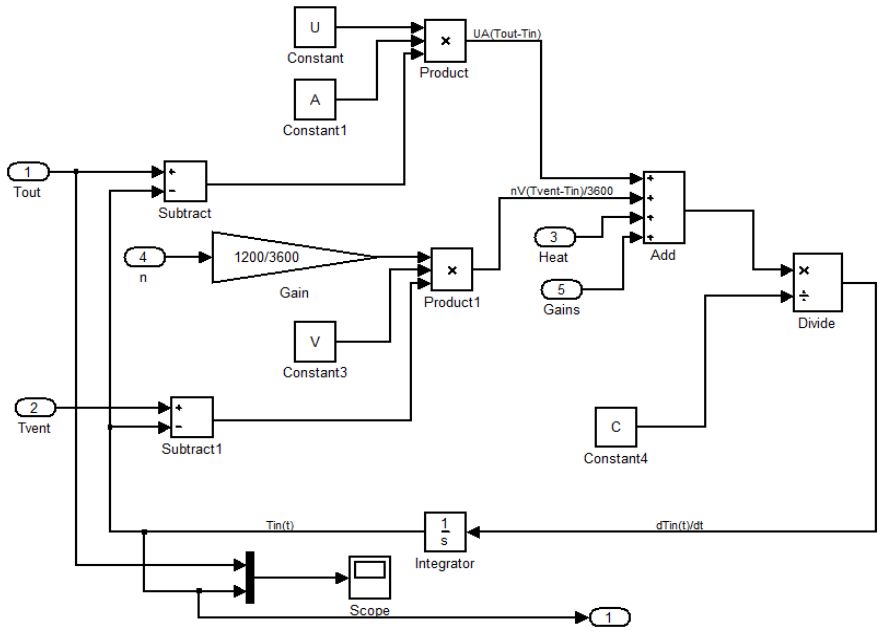
където pi* са предварително зададените корени на характеристичното уравнение.

4. СИМУЛАЦИОННИ И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

Изследванията, валидиращи свойствата на предлаганите подходи за управление, са проведени върху термален модел на климатизиран обект [6,7], базиран на уравнението на енергийния баланс за вътрешния въздух, отчитащ топлообмена между въздуха и стените, пода, покрива и др., както и топлинните потоци от околната среда (излъчване на слънцето, вятър, осветление и др.):

$$C\frac{dT_{ind}(t)}{dt} = U.A.[T_{out} - T_{ind}(t)] + \frac{(n.\rho.c_p)_a.V}{3600}[T_{vent} - T_{ind}(t)] \qquad (27)$$

Тук C е обобщения топлинен капацитет на сградата, $T_{ind}(t)$ е температурата на въздуха вътре в сградата, T_{out} е външната температура и T_{vent} е температура, дължаща се на вентилацията. A и V са структурни параметри на сградата, n е коефициент, характеризиращ вентилацията (4), U е константа, характеризираща топлообмена между сградата и външната среда. Моделът е реализиран в Simulink и е показан на Фиг. 5. Вентилацията зависи от температурата на вътрешния въздух. Това означава, че когато тази температура варира между 20°C и 30°C, параметърът n се променя в диапазона $[0.3\text{-}1.5]h^{-1}$.



Фиг.5. Термален симулационен модел на сграда

Проведено бе компютърно симулиране при следните числови данни:

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5. & -10 & -2.10^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 & -10^2 & 0 & 10^3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 & 0 & -2.10^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & 0 \end{bmatrix} \qquad B = \begin{bmatrix} 10^{-1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

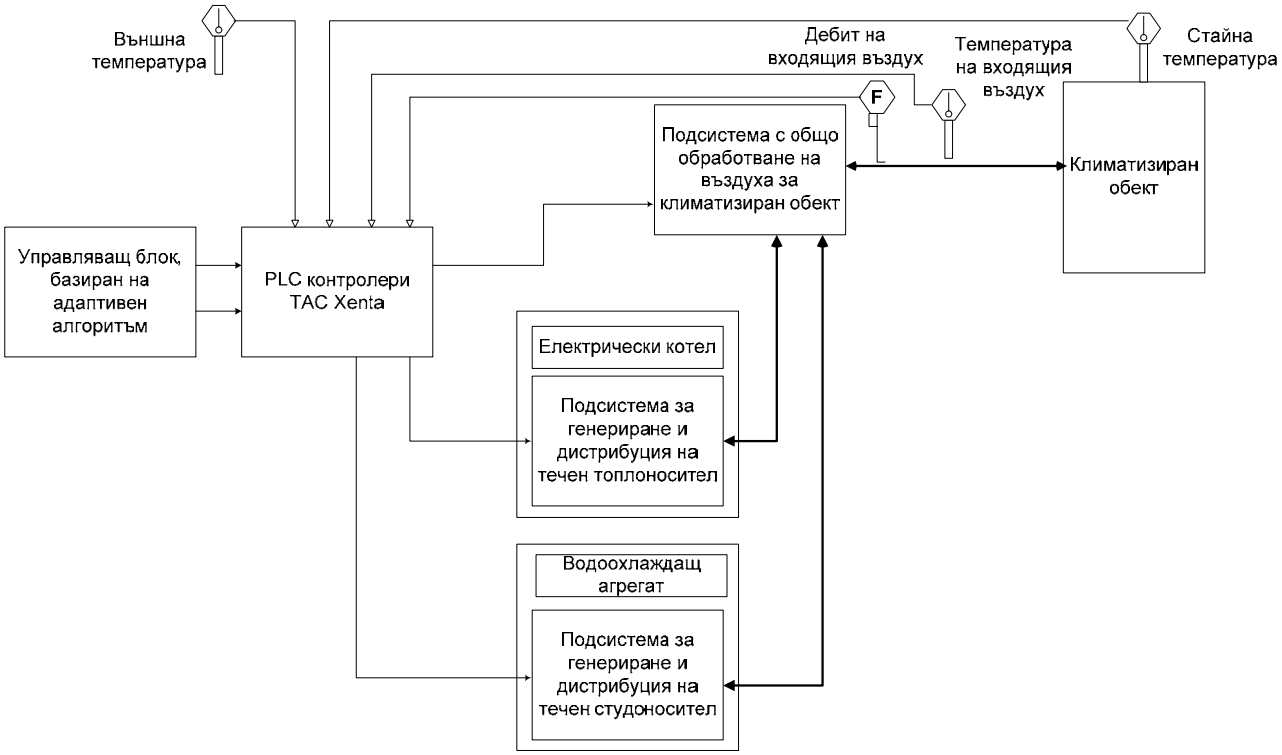
За каскадните контури бяха получени следните стойности на компенсиращите обратни връзки:

$$K_{12\,1`} = \left[-10, \quad 10^2, \quad 50, \quad -10^2\right], \qquad \frac{1}{T_\mu} = 300s^{-1}$$

$$K_{12\,2} = \left[-1, \quad 0, \quad 10\right], \qquad \frac{1}{T_\mu} = 550s^{-1}$$

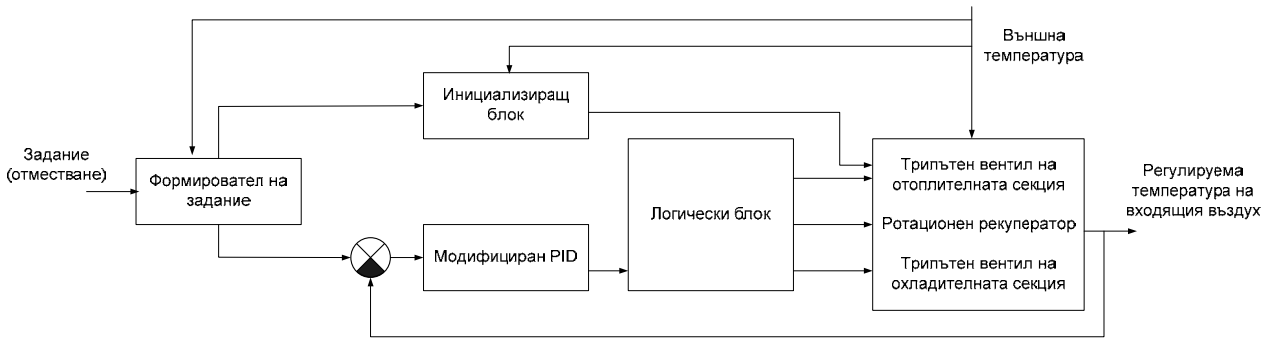
Преходните процеси показаха апериодичен характер при време на затихване за двата контура, съответно 24s и 55s.

Общата блокова схема на изследвания обект е показана на фиг.6:



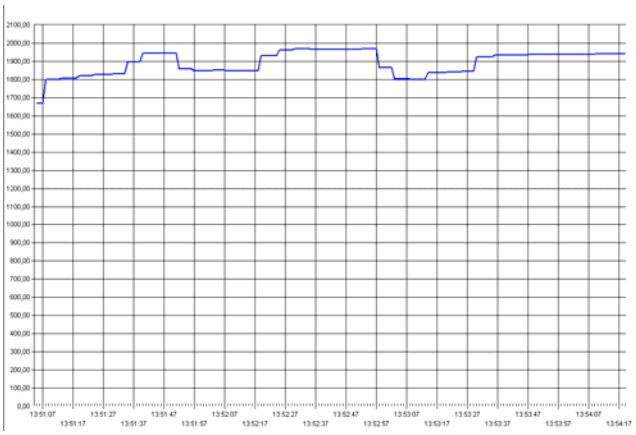
Фиг.6. Обща блокова схема на изследвания обект

Структурната схема на затворената система за управление на изпълнителните механизми за регулиране на температурата на входящия въздух (трипътен вентил на отоплителна секция, ротационен рекуператор, трипътен вентил на охладителна секция) е показана на фиг.7.



Фиг.7. Каскадна структура за управление на температурата

Експериментално снетите преходни процеси са показани на фиг.8а и фиг.8б



Фиг.8а. Дебит на обменения въздух

Фиг.8б. Управлявана величина - температура на постъпващия въздух

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложеният в статията подход дава възможност за следните по-важни изводи:

1. Динамиката на многомерните системи в обектите за сградна автоматизация може да бъде подобрена чрез синтез на подчинени контури за регулиране на състоянията с помощта на линейни обратни връзки по състоянията.

2. Предложеният метод дава възможност за синтез на алгоритми за управление на многомерни системи, като се постига желано разположение на полюсите на затворените системи.

3. Изложеният подход позволява синтез на класически системи за подчинено регулиране, като скъпите и понякога трудно реализуеми динамични регулатори могат да бъдат заменени с линейни обратни връзки.

БЛАГОДАРНОСТИ

Изследванията са финансирани по договор ДТК 02/1 от НФНИ – МОМН.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Braun, J.E., J.W. Mitchell, and S.A. Klein, (1987), ***Performance and control characteristics of a large cooling system***, ASHRAE Transactions 93(1):1830-52.

[2] Hach, L., and Y. Katoh, (2003), ***Thermal responses in control loop in indirect control of indoor environment of non-air conditioned space with quasi-steady-state model***, JSME International Journal, Series C: Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing 46(1):198-211.

[3] Кузовков Н., (1976), ***Модальное управление и наблюдающие устройства***, Москва, Знергия

[4] Kessler C, (1976), ***Ein Beitrag zur Theorie mehrschleifiger Regelungen***, Regelungstechnik, 8

[5] Hull, D.G., (2003), ***Optimal Control Theory for Applications***. New York: Springer-Verlag, Inc.
[6] Chang, Y.C., W.H. Chen, C.Y. Lee, and C.N. Huang, (2006), ***Simulated annealing based optimal chiller loading for saving energy***, Energy Conversion and Management 47(15-16):2044-58.
[7] Xu, J., P.B. Luh, W.E. Blankson, R. Jerdonek, and K. Shaikh, (2005), ***An optimization-based approach for facility energy management with uncertainties***, HVAC&R Research 11(2):215-37.

Автор: Тодор Йонков, доц. д-р - катедра "Автоматизация на електрозадвижванията", Технически Университет - София, Факултет “Автоматика”, E-mail address: *tsj@tu-sofia.bg*

Постъпила на 10.07.2012 **Рецензент** доц. д-р Р. Райнов

Годишник на Технически Университет - София, т. 62, кн.3, 2012
Proceedings of the Technical University - Sofia, v. 62, book 3, 2012

ЕНЕРГОИКОНОМИЧНО УПРАВЛЕНИЕ НА ВЕНТИЛАЦИОННА СГРАДНА СИСТЕМА

Тодор Йонков

Резюме. *В настоящата статия се описва подход за синтез на система за управление на вентилационна сградна система при минимизация на консумираната енергия. В основата му стои идеята за генериране на оптимални задания към рекуператорните топлообменници, чрез което се постига запазване на комфорта в помещението при намалена консумация на енергия. Целта на изследването е да бъдат синтезирани конкретни структури за управление и изведени алгоритми за настройка на техните елементи.*
Ключови думи: *температурен комфорт, енергоикономично управление*

ENERGY-SAVING CONTROL OF VENTILATION BUILDING SYSTEM

Todor Ionkov

Abstract. *This article describes an approach for the control synthesis of building ventilation system with the goal to minimize energy consumption. The idea of generating optimal references to heat exchangers recuperators, which is achieved by maintaining the comfort room at reduced energy consumption is in its base. The object of the study is to be designed management control structures and algorithms for setting of their elements.*
Keywords: *thermal comfort, energy saving control*

1. ДЕФИНИРАНЕ НА КЛИМАТИЧЕН КОМФОРТ

Основните фактори, характеризиращи сградния микроклимат, са температурата, влажността и скоростта на въздуха. Вентилационната система захранва сградата със свеж въздух и извежда застоялия извън нея. Скоростта на въздушния поток трябва да бъде в определени граници - при скорости над 0.25m/s се получава дискомфорт, а при ниски скорости под 0.15m/s - не може да се осигури добра циркулация. Другите два водещи показатели също трябва да бъдат в определени граници - температурата през зимата - 20-22^{0}C , през лятото 22-24^{0}C, влажност - 40-60% [1].

Тези граници на температурата на усещане (фиг.1), са приемливи за 80% от обитателите. Показани са две зони при различно термично съпротивление на облеклото. Диапазонът на температурата на усещане, ограничаващ стойностите за съпротивлние на облеклото, се определя чрез линейна интерполация между границите за двете зони:

© 2012 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved
ISSN 1311-0829

$$T_{min,\,Icl} = [(I_{cl} - 0.5clo)T_{min,\,1.0clo} + (1.0clo - I_{cl})T_{min,\,0.5clo}] / 0.5clo\,, \quad (1)$$

$$T_{max,\,Icl} = [(I_{cl} - 0.5clo)T_{max,\,1.0clo} + (1.0clo - I_{cl})T_{max,\,0.5clo}] / 0.5clo\,, \quad (2)$$

където:

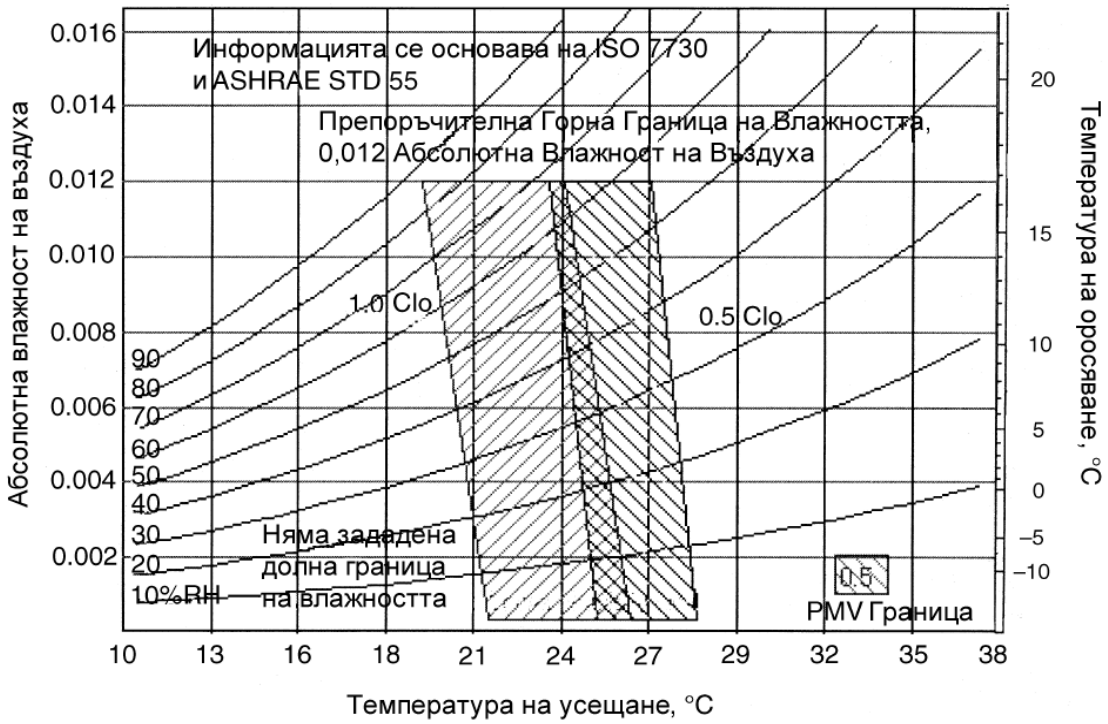
$T_{max,\,Icl}$ е горна граница на температурата на усещане при термично съпротивление на облеколото I_{cl};

$T_{min,\,Icl}$ – долна граница на температурата на усещане при термично съпротивление на облеколото I_{cl};

I_{cl} – термично съпротивление на облеклото.

clo – единица за термично съпротивление на облекло - 1 clo = 0,155m^2 °C/W.

Ако скоростта на въздуха е по-голяма от 0.20 m/s, това може да се използва, за да се увеличи горната граница на температурата на усещане в комфортната зона, но само при определени обстоятелства [2].



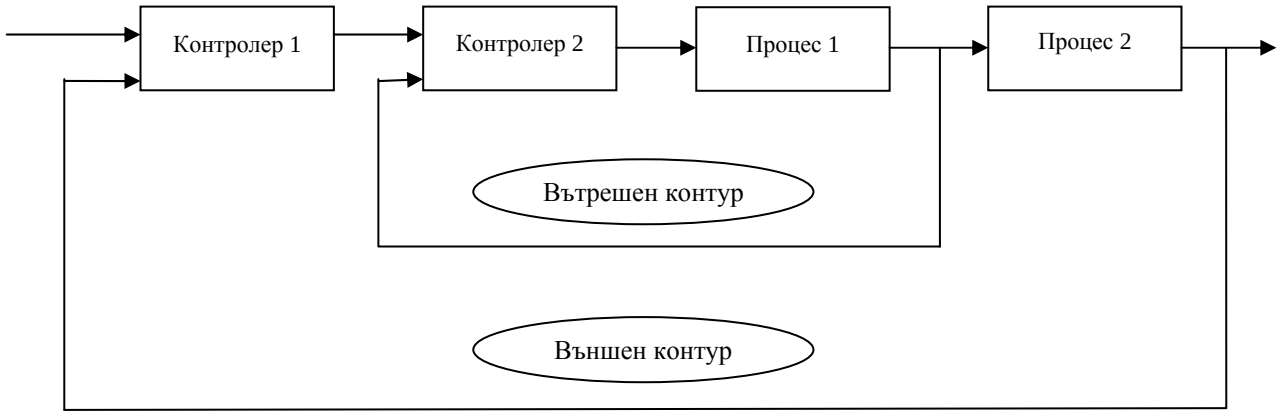
Фиг.1. Граници на изменение на температура на усещане и влажност на въздуха

2. ОБЕКТ ЗА УПРАВЛЕНИЕ

Използването на рекуператор на топлинна енергия води до максимално оползотворяване на енергията, запасена във въздуха, напускащ помещението. В настоящата работа се изследва вентилационна система, състояща се от рекуператор, топлообменник и вентилатори за входящ и изходящ въздушен поток. Система е двуконтурна (фиг.2). Вътрешният контур е реализиран на базата на последователно разделено управление между рекуператора на енергия и топлообменника, комбиниран с пропорционален регулатор на температурата на подавания в помещението въздух. Външният контур за основната управлявана величина - стайната температура е реализиран на базата на ПИ- регулатор, осигуряващ точност в установен режим.

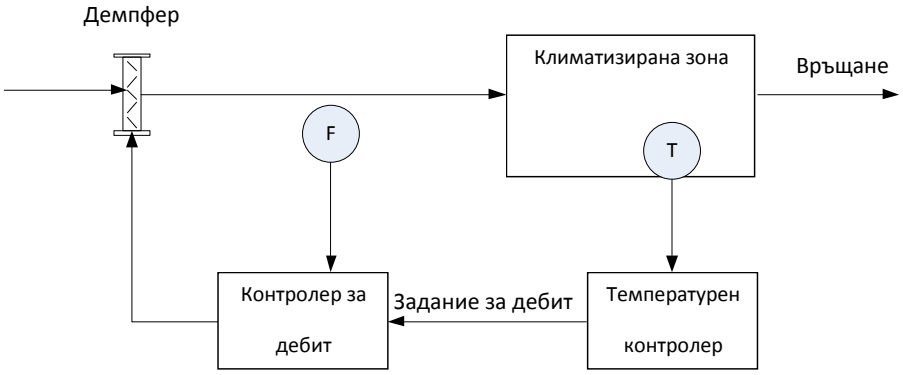
В работата се предлага оптимално формиране на заданието, чрез което се постига минимален разход на енергия при запазване на комфорта в помещението.

Избраните регулатори са лесни за настройка и максимално опростени, което се улеснява от бавните процеси в системите за сградна автоматизация.



Фиг.2. Блокова схема на система с каскадно управление

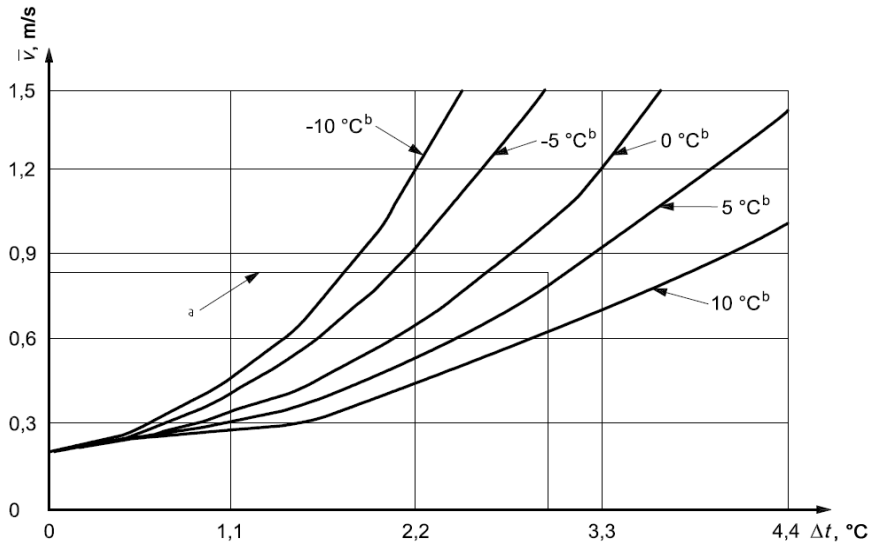
Заданието на пряко управляваната величина (дебит на въздуха) се изчислява от контролер (на първичния контур) в съответствие с измерената величина. Поради спецификата на големите времезакъснения и времеконстанти в сградните системи температурата не се използва директно като регулируема величина (възможно е да се стигне до пререгулиране или недорегулиране), а се използва като репер за определяне на необходимия въздушен дебит, съвместно с локално ПИД управление по грешката между необходимия и измерения дебит на въздуха (фиг.3). Динамиката на контурите по налягане/дебит е много по-добра от тази на контурите по температура, поради което всяка флуктуация в налягането [3] се отработва от системата преди да повлияе на температурата в сградния обект.



Фиг.3. Блокова схема за каскадно управление

Скоростта на въздуха в дадено помещение влияе върху конвективния топлообмен между човека и околната среда. Това се отразява и на температурния комфорт на тялото (загуба на топлина), изразен чрез локалния температурен дискомфорт, причинен от течение. Увеличената скорост на въздуха може да се използва, за да се намали усещането за топлина, причинено от увеличената температура. Комбинациите от скорост на въздуха и температура, определени от линиите на фиг.4, завършват с еднаква загуба на топлина от кожата. Опорната точка на тези линии е горната температурна граница на комфортната зона (PMV

- предполагаема средностатистическа оценка +0,5) и скорост на въздуха 0.20 m/s. Тази графика съответства на леко облечен човек (с изолация на облеклото 0.5 ÷ 0.7 clo), който води сравнително неактивна физическа дейност (със скорост на метаболизма 1,0 ÷ 1,3 met, 1 met = 58,2 W/m2, енергията, произведена за единица площ от индивид чрез метаболизъм в състояние на покой. Средна телесна повърхност на възрастен индивид е 1,8 m^2).



Фиг.4. Необходима скорост на въздуха за компенсация на повишената температура

(означения: Δt - нарастване на температурата над 26 °C; $\bar{v}$ - скорост на въздуха, m/s; *a* – граници за леко облекло и заседнала физическа дейност; *b* – (t_r – t_a)°C)

Когато средната температура на излъчване е ниска, а температурата на въздуха е висока, повишението на скоростта на въздуха е по-малко ефективно за увеличение загубата на топлина. И обратното – увеличението на скоростта на въздуха е по-ефективно за увеличаване загубата на топлина, когато средната температура на излъчване е висока, а температурата на въздуха е ниска. Увеличаването на скоростта на въздуха може да се използва за компенсация на повишението в температурата на въздуха и средната температура на излъчване, но не с повече от 3.0°C над установените стойности за зоната на комфорта.

Стратегията за вентилация обаче не може адекватно да отговори на нуждата от вентилация при много ситуации. Например абсолютната концентрация на CO_2 не е надежден показател за необходимостта от вентилация. Пространството може да се вентилира дори и когато нивото на CO_2 е под определена зададена граница. Качеството на въздуха може да е приемливо дори когато концентрацията на CO_2 е над зададения лимит в други ситуации. Освен това вентилацията не може ефективно да премахне замърсителите, които не са с произход от обитателите (от строителни материали, обзавеждане и други) особено когато замърсителите с такъв произход доминират. Поради това минимална външна вентилация не се определя само от обитаемостта, но и от площта, която се обитава:

$$DVR = R_p P + R_B A \qquad (3)$$

където DVR е изискуемият минимум поток вентилация, P е броят на обитателите, A е площта на затвореното пространство, R_p е необходимият свеж въздух на човек, R_B е необходимият свеж въздух на квадратен метър. Така се вземат предвид замърсяванията, които не са генерирани от обитателите, но се изисква идентификация на действителната обитаемост на помещението. Доразвитие в тази насока е използване на концентрацията на CO_2 , успоредно с измервания на потока, както е показано в уравнението:

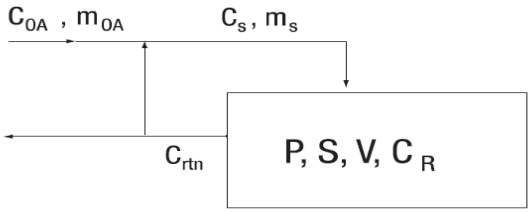
$$P = V_s E_{ac}(C_R - C_S)/S \qquad (4)$$

където E_{ac} е ефективността на вентилацията.

За пространство, обслужвано от еднозонова вентилационна система, както е показано на фиг.5, балансът на CO_2 може да бъде представен с уравнението:

$$PS + m_s C_s - m_s C_{rtn} = V\frac{dC_R}{dt} \qquad (5)$$

където m_s е подаваният обем въздух, C_s и C_{rtn} са концентрациите на CO_2 в подавания и отработения въздух съответно, V е обемът въздух в климатизираното затворено пространство, C_R е концентрацията на CO_2 в климатизираното пространство, S е средното ниво на генериран CO_2 от един обитател.



Фиг.5. Баланс на CO_2 при еднозонова вентилация

На база баланса на CO_2 се основават две категории методи за управление: определяне на стационарното състояние, показано в уравнение (4) и определяне на динамично състояние. Методът за динамично оценяване отчита стационарния баланс на CO_2 и производната на функцията $\frac{dC_R}{dt}$ на концентрацията на CO_2, използвайки измерената концентрация на CO_2 в текущият и предходният момент, както е показано в уравнението:

$$\frac{dC_R}{dt} \approx \frac{C_R^i - C_R^{i-1}}{\Delta t} \qquad (6)$$

където индексите i и i-1 представляват текущия и предходния момент на измерване, Δt е времето за измерване. Обитаемостта за текущото измерване се определя по уравнението:

$$P^i = \frac{E_{ac}(m_{OA}^i + m_{OA}^{i-1})(C_R^i - C_{OA}^i)}{2S} + V\frac{C_R^i - C_R^{i-1}}{S\Delta t} \qquad (7)$$

В дясната част на уравнението първото събираемо разглежда стационарния баланс, а второто част - промяната на концентрацията на CO_2, където m_{OA} е обем на свежия въздух, C_{OA} е концентрация на CO_2 в свежия въздух и E_{ac} е ефективност на смяната на въздуха.

Уравнението на топлинния баланс на непрекъснато действащ рекуперативен топлообменник с два топлоносителя в най- общ вид е :

$$Q_1 = Q_2 + Q_{заг} \qquad (8)$$

или

$$Q_1 = \eta . Q_2 \qquad (9)$$

където Q_1 е количеството топлина, предадено от горещия топлоносител , [J];

Q_2 - количество топлина, получено от загрявания топлоносител,[J];

$Q_{заг}$ - загуба на топлина в околната среда, [J];

η - коефициент на полезно действие (к.п.д.)

$$\eta = 1 - \frac{Q_{заг}}{Q_1} = \frac{Q_2}{Q_1} \qquad (10)$$

$$Q = Q_2 = k.A.\Delta t_{ср} \qquad (11)$$

където $\Delta t_{ср}$ - средна температурна разлика между топлоносителите , $[^0C]$.

Конкретният вид на уравнението на топлинния баланс зависи от дебитите и агрегатното състояние на топлоносителите. В работата се разглежда топлообменник с температура на входящата вода до 90^0C:

$$G_1.c_1.(t_{1вх} - t_{1изх})\eta = G_2.c_2(t_{2изх} - t_{2вх}) , \qquad (12)$$

където G_1 и G_2 са дебитите на двата потока *kg/s*; c_1 и c_2 - специфични топлинни капацитети $\left[\frac{J}{kg.[^0C]}\right]$; $t_{1вх}$ и $t_{1изх}$ - температури на греещ топлоносител на входа и изхода от апарата, $[^0C]$; $t_{2вх}$ и $t_{2изх}$ - температури на нагряван топлоносител на входа и изхода от апарата, $[^0C]$.

Управлява се изходната температура на нагрявания топлоносител т.е. $t_{2изх}$ чрез дебита на входа на топлообменника G_1. Това обуславя необходимостта от намирането на връзка [4] между двете величини - входния дебит и мощността на изхода на топлообменника. За коефициента на усилване от уравнението на топлинния баланс се получава следната зависимост :

$$k = \frac{Q_2}{G_1} = c_1.(t_{1вх} - t_{1изх})\eta \qquad (13)$$

За да бъде определена времеконстантата се използва закона на Нютон:

$$Q = h.A.(t_{ст} - t_c)` \qquad t_{ст} = T \qquad t_c = T_f \qquad (14)$$

където: A - е площ на топлообменната повърхност, $[m^2]$; h - специфична енталпия $\left[\frac{J}{kg}\right]$; $t_{ст} = T$ - температура на стената , $[^0C]$; $t_c = T_f$ - температура на околната среда , $[^0C]$;

Известно е уравнението на топлопроводността в диференциален вид:

$$-Q = \rho.V.c.\frac{dT}{dt} \qquad (15)$$

където: ρ - плътност , $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$; V - обем , [m^3] ;

$$\rho.V.c.\frac{dT}{dt} = -h.A(T - T_f)$$
$$\rho.V.c.\frac{dT}{dt} = -h.A.T + h.A.T_f \qquad (16)$$

След Лапласова трансформация се получава:

$$\rho.V.c.Tp = -h.A.T + h.A.T_f$$
$$Tp.V.c.\rho + h.A.T = T_f.h.A$$
$$\frac{Tp.V.c.\rho + h.A.T = T_f.h.A}{h.A}$$
$$\Rightarrow \frac{Tp.V.c.\rho}{h.A} + T = T_f. \qquad (17)$$
$$T\left(\frac{p.V.c.\rho}{h.A} + 1\right) = T_f.$$
$$T = T_f.\frac{1}{\frac{p.V.c.\rho}{h.A} + 1} \quad \Rightarrow \textit{Времеконстантата е } T = \frac{V.c.\rho}{h.A}$$

3. ОПТИМИЗАЦИЯ НА ЗАДАНИЕТО

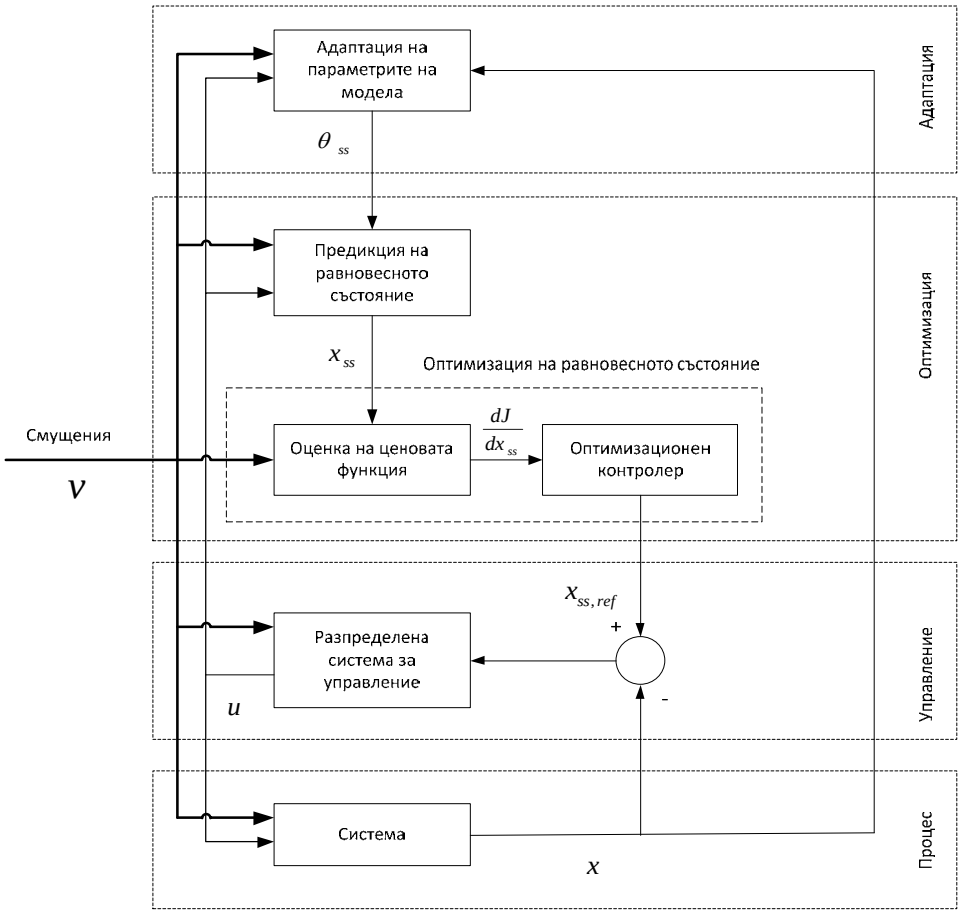
Естествен път за разделяне на системата за управление е йерархичният начин [5], които е мотивиран от наличието на смущения с различна честота и влиянието върху оперативните разходи. Системата се декомпозира на 4 слоя, включващи самоорганизация, адаптация, оптимизация и управление. Задачата за управление в горните слоеве е да се осигури работоспособност и да се поддържат оптимални задания под влияние на „бавни" смущения. За „бързите" смущения се грижат разпределените контролери в управляващите слоеве. Динамичната оптимизация се прави на ниво регулиране, докато оптимизацията на заданието се прави на ниво оптимизация. Като се приеме, че с „бързите" смущения се занимава регулаторният слой, процесът може да се счита за квази-статичен на ниво оптимизация. Като се пренебрегва останалата „бавна" динамика проблемът за оптималното управление (на това ниво) може да се формулира като оптимизация на равновесното състояние [6]:

$$\min J(x_{ss}, u_{ss}, v_{ss})$$
$$h(x_{ss}, u_{ss}, v_{ss}) = 0 \qquad (20)$$
$$g(x_{ss}, u_{ss}, v_{ss}) \le 0$$

Където x_{ss} е вектор, съдържащ съответните състояния, u_{ss} е управляващият сигнал и v_{ss} е смущението към системата; J е тегловна функция, оценяваща относителните качествени индекси. h и g са вектори, описващи оперативните ограничения. Различни методи могат да се приложат за онлайн-оптимизация на тази функция. В настоящото изследване бе приложен един от индиректните методи - така нареченият метод на самооптимизационния контрол. Той използва характеристиките на системата, за да намери подходящи управляващи променливи. По този начин управляващата структура държи системата близко до оптималното равновесно състояние. Моделно базираните методи ползват модел и база данни за квази-статичната стойност на смущението v_{ss}, за да бъдат пресметнати оптималните стойности за u^*, x^* и J^*. Индиректната моделно базирана схема за

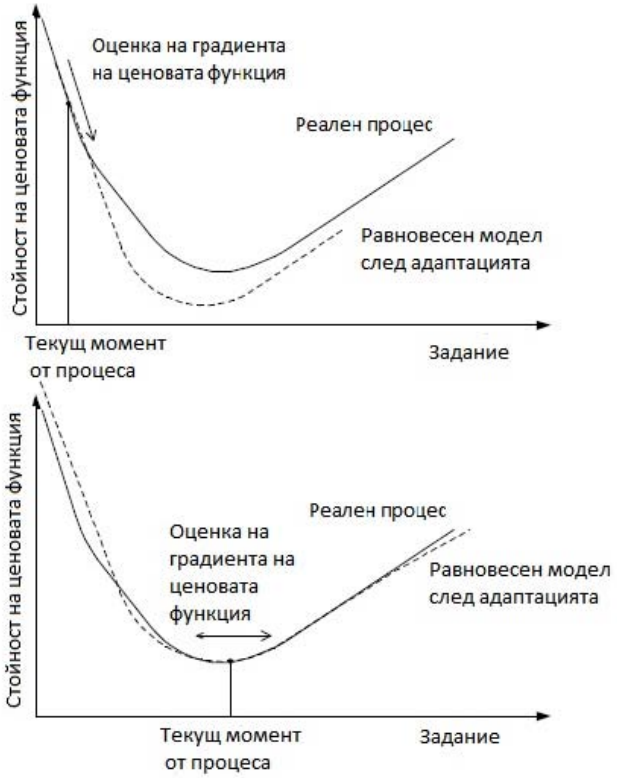
онлайн оптимизация [7, 8] бе допълнена с ниво за динамична адаптация. Този метод може да се разглежда като оптимизационно ниво на върха на съществуващата система за управление.

Предложеният метод може да се раздели на три части, наречени оптимизация на равновесното състояние, предикция на равновесното състояние и адаптация на параметрите на модела, както е показано на фиг.6.



Фиг.6. Оптимизационна структура, използваща градиентен подход

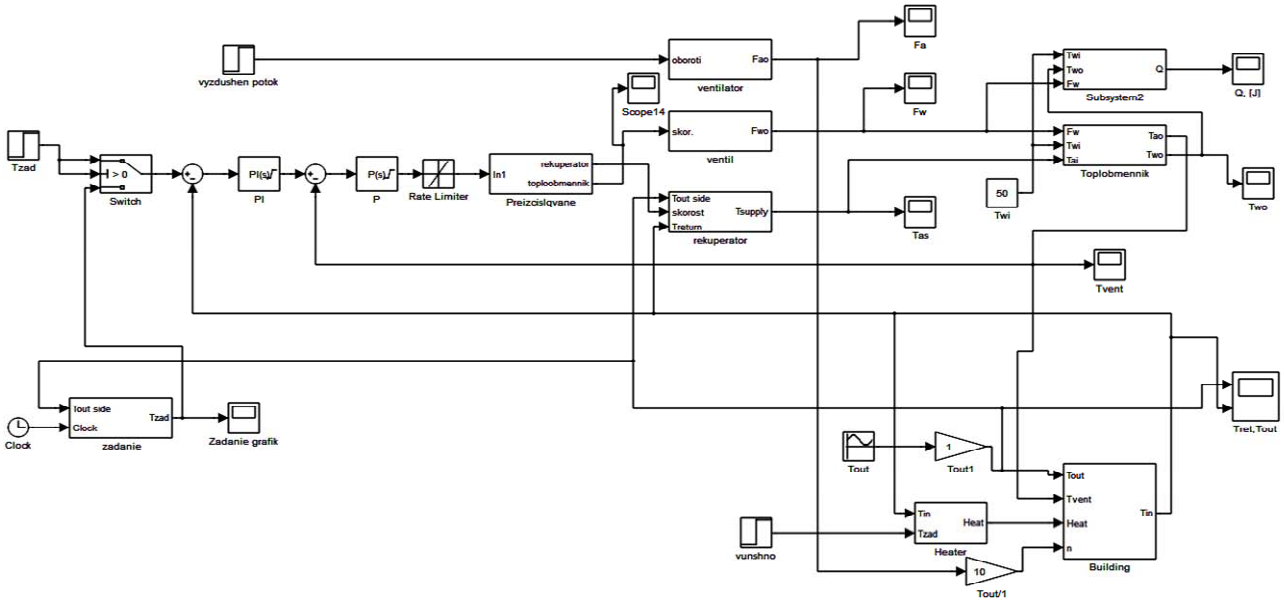
Идеята е да се използват знанията за текущите входове и смущенията за целите на предикция на равновесното състояние на градиента на оценъчната функция и тогава да се настрои системата към нулев градиент, изчислявайки оптималните задания. За намаляване на предиктивната грешка параметрите на равновесния модел непрекъснато се адаптират към текущите работни точки на реалната система. фиг.7 изобразява основната идея. Горната част на фигурата показва ситуация, където заданията се движат към оптимума за моделираната система. В долната част оптимумът е достигнат и адаптацията [9, 10] е премахнала възможните отклонения между реалният процес и модела.



Фиг.7. Градиентно оценяване

4. СИМУЛАЦИОННИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

Цялостната система за управление, върху която са проведени симулациите, е показана на фиг.8.



Фиг.8. Модел на системата

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Температурата на водата за подгряване на топлообменника е зададена 50^0C, за да може да се използва максимално ефективно предвидената термопомпа. В противен случай трябва да се използва външен бойлер за загряване на водата до по-високи температури, което ще увеличи мощността, отделяна от топлообменника. С малки корекции в управлението системата може да работи не само в режим на отопление, но и в режим на охлаждане, при което ще се наложи термопомпата да работи в режим на охлаждане на водата.

Според снетите характеристики на системата пререгулирането е в рамките под 5%, независимо от промяната на външната температура или промяната в заданието. Логиката за оптимизация на заданието на база температурата на въздуха извън помещението осигурява намален разход на енергия при максимален комфорт в помещението по време на работния ден, като през останалото време поддържа температурата на санитарният минимум, но не под него, като така се осигуряват оптимални начални условия за загряване на помещението преди следващия цикъл на работно време.

БЛАГОДАРНОСТИ

Изследванията са финансирани по договор ДТК 02/1 от НФНИ – МОМН.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Милчев В., Киров Д., (2004), ***Топломасообменни уредби***, АВС Техника ООД, София

[2] A. K. Samantaray, B. O. Bouamama, (2008), ***Model-based Process Supervision***, Springer

[3] Feng G., Lozano R., (1999), ***Adaptiv control systems***, Newnes, Oxford

[4] S. Nithya, A. Si. Gour, N. Sivakumaran, T. K. Radhakrishnan, (2007), ***Model Based Controller Design for Shell and Tube Heat Exchanger***, 30 October 2007, http://www.sensorsportal.com

[5] ASHRAE, (2007), ***Handbook-HVAC applications***, Atlanta, Georgia: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

[6] CIBSE, (2000), ***Guide H-building control systems***, Oxford: Butterworth-Heinemann

[7] Sun, J. and Reddy, A., (2005), ***Optimal control of building HVAC&R systems using complete simulation-based sequential quadratic programming***, Building and Enviroment

[8] Matlab Version 7 (2004), ***User Guide***, The MathWorks, Inc., 3 Apple Hill Drive Natick, www.mathworks.com

[9] Zhuang Wu, Roderick V.N. Melnik, (2009), ***Model-based analysis and simulation of regenerative heat wheel***, Sciencedirect.com

[10] Е. Йончев (2010), ***Адаптивен по скорост и статорно съпротивление наблюдател на потокосцепление за системи за безсензорно векторно управление***, Годишник на ТУ - София, ISSN 0374-342X , 84 – 93

Автор: Тодор Йонков, доц. д-р - катедра "Автоматизация на електрозадвижванията", Технически Университет - София, Факултет “Автоматика”, E-mail address: *tsj@tu-sofia.bg*

Постъпила на 10.07.2012 **Рецензент** доц. д-р Р. Райнов

Годишник на Технически Университет - София, т. 62, кн.3, 2012
Proceedings of the Technical University - Sofia, v. 62, book 3, 2012

МЕТОД ЗА ОЦЕНЯВАНЕ МАГНИТНОТО СЪСТОЯНИЕ НА АСИНХРОННИ ЕЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

Евтим Йончев

Резюме: *В работата е представен метод за оценка магнитното състояние на честотноуправляеми асинхронни мотори с автономни инвертори на напрежение с импулсно управление, приложим за общопромишлени задвижвания с широк диапазон на регулиране на скоростта. Използва се наличието в изходното напрежение на инвертора на висш хармоник с честота равна на комутационната, който създава ток с нулева последователност, чиято амплитуда зависи от насищането на главния магнитен поток на двигателя.*
Ключови думи: *наблюдател на магнитен поток, инвертор на напрежение асинхронен мотор*

ESTIMATING MAGNETIC STATE METHOD OF INDUCTION MOTOR

Evtim Yonchev

Abstract: *In this work is presented method for estimating magnetic state of frequency controlled induction motors with voltage-sourced inverters with pulse control, applicable for industrial drives with wide range of speed regulations. It is used because of presence in the output voltage of the inverter on higher harmonic with frequency equal to the switching, that creates current with zero sequence which amplitude depends on saturation of the major magnetic flux of the motor.*
Keywords: *magnetic flux observer, voltage source inverter, induction motor*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Единственият начин за реализиране на честотно управление при постоянство на магнитния поток е определянето му по пряк или косвен начин и стабилизацията му чрез затворен контур за управление на статорното напрежение не само във функция от честотата, а и от натоварването. Прякото измерване на потока в машината е свързано с необходимостта от вграждане на термостабилизирани датчици на Хол в магнитната междина, водещо до оскъпяване и често пъти е неприемливо поради което се предпочита косвения подход.

Алгоритмите за оценка на потока и скоростта (наблюдатели) чрез статорните напрежения и токове могат да се категоризират в две основни групи. Първата е „наблюдатели без обратна връзка”, когато он-лайн работещият модел на двигателя не използва корекция чрез обратната връзка. Втората е „наблюдатели - зат-

© 2012 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved
ISSN 1311-0829

ворена система”, където корекцията на обратната връзка се използва заедно със самия модел на машината, за да подобри точността в оценяването[1].
Наблюдателите без обратна връзка използват различни форми на диференциалните уравнения на асинхронния двигател. Наблюдателят без обратна връзка базиран на токовия модел [2] използва измерените статорен ток и скорост на ротора. Наблюдателят без обратна връзка базиран на напреженовия модел използва като входни сигнали измерените стойности на напрежението и тока на статора. При тези наблюдатели се изисква чисто интегриране, което е трудно приложимо при ниски честоти (дрейф), а също така има и затруднения при определяне на началните условия. Един начин за избягване на недостатъците свързани с чистото интегриране при оценяване на потокосцеплението е като се използват измерените напрежение и ток на статора, скоростта на ротора и се диференцира електродвижещото напрежение. Но диференцирането прави метода по-чувствителен към случаен шум от другите методи, а също така е необходимо измерване или оценяване на роторната скорост подобно на токовия модел.
При наблюдателите от пълен ред, когато се използват като входни сигнали измереното напрежение на статора и скоростта на ротора, статорния ток играе роля на оценена променлива. Поради зависимостта на потокосцеплението от оценената стойност на статорния ток, наблюдателят от пълен ред не показва подобри качества от токовия модел. Като допълнение, съществуват и проблеми с чувствителността на наблюдателя към вариации на параметрите и при настройване на коефициента на усилване [3].
Тези структури на наблюдатели са изцяло основани на модела на асинхронния двигател и не използват никаква обратна връзка. Затова, те са много чувствителни към вариации в параметрите, което изисква допълнително оценка на някои параметри за постигане на необходимата точност.
Чрез въвеждане обратни връзки се постига робастност към вариации на параметрите. С тази цел са предложени много структури на затворени системи използващи различни модели на двигателя и управляващи методи. Сред тях са адаптивен наблюдател с еталонен модел (MRAS) които функционират по няколко различни алгоритъма. В MRAS като цяло се сравняват изходните сигнали на два наблюдателя[4]. Първият наблюдател не съдържа като променлива на състоянието оценяваната величина и се приема за еталонен модел на двигателя. Вторият, който съдържа оценяваната величина, се смята за настройваем модел. Грешката между тези два модела се използва като входна величина на адаптационен механизъм. За безсензорни алгоритми в повечето случаи величината, която различава еталонния модел от настройваемия е скоростта на ротора. Оценената роторна скорост в настройваемия модел се променя по такъв начин, че грешката клони към нула асимптотично, при което оценената скорост на ротора е равна на действителната.
Калмановият филтър (KF) е друг метод, базиран на измерените ток и напрежение на статора, който се използва за идентификация на скоростта и роторния поток на асинхронен двигател [5],[6],[7]. Подходът на Калмановия филтър е базиран на модела на системата и математическия модел, описващ динамиката на асинхронния двигател. Отклоненията в параметрите и смущенията при измер-

ването са отчетени в KF. За тази цел ковариационните матрици на Калмановия филтър следва да бъдат правилно инициализирани. KF се използва при линейни системи. За нелинеен модел на асинхронен двигател се използва Разширен Калманов филтър (Extended Kalman Filter - EKF) [8]. Реализацията на алгоритъма на EKF изисква голям компютърен ресурс и зависи от точността на модела на двигателя. В EKF модела предложен в [7], може да се определят потока и скоростта на ротора, необходими при управлението с ориентацията по полето. EKF може да се използва и за определяне на параметрите на асинхронния двигател в реално време [9]. Предложени са модели от понижен ред за оптимизиране и ускоряване на цялостния EKF [10].

За общопромишлени задвижвания с широк диапазон на регулиране на скоростта от особена важност е създаване на метод и устройство за определяне на модула на магнитния поток при ниски честоти, включително и нула на статорните напрежение и ток. За целта може да се използва факта, че в изходното напрежение на автономните инвертори на напрежение освен основния първи хармоник съществува ясно изразен висш хармоник с честота равна на комутационната, който от своя страна създава ток със същата честота.

2. ПРИНЦИП НА МЕТОДА

Уравнението за равновесие на напреженията в статорната намотка е

$$U_S = U_{S1} + \tilde{U}_S = r_S(I_{S1} + \tilde{I}_S) + pl_{S\sigma}(I_{S1} + \tilde{I}_S) + pl_m(I_{m1} + \tilde{I}_m) \qquad (1)$$

Или за висшите хармонични

$$\tilde{U}_S = r_S\tilde{I}_S + pl_{S\sigma}\tilde{I}_S + pl_m\tilde{I}_m \qquad (2)$$

Насищането на статорната индуктивност на разсейване настъпва при увеличение на статорния ток над пет пъти спрямо номиналния. Експериментално е установено, че индуктивността на разсейване за токовете с нулева последователност зависи от насищането на главния магнитен поток в машината, което би могло да бъде използвано, чрез измерване на токовете с нулева последователност за стабилизация на магнитното състояние на двигателя.

Статорната индуктивност на разсейване $l_{s\sigma}$ се разделя на индуктивност на разсейване за токовете с нулева последователност - $l_{s\sigma 0}$ и индуктивност на разсейване за намагнитващите токове - $l_{s\sigma m}$: $l_{s\sigma} = l_{s\sigma 0} + l_{s\sigma m}$. Тъй като основната част от стойността на статорната индуктивност се пада на $l_{s\sigma 0}$, е удачно да се разглежда $l_{s\sigma m} = const$, а $l_{s\sigma 0} = l_{s\sigma 0}(\vec{\Psi}_m)$.

$$\tilde{U}_S = r_S\tilde{I}_S + pl_{S\sigma}(|\vec{\Psi}_{m1}|)\tilde{I}_S + pl_m(|\vec{\Psi}_{m1}|)\tilde{I}_m \qquad (3)$$

Тъй като модулационната честота е от порядъка на няколко килохерца в (3) индуктивните падове на напрежение са значително по-големи от активния, поради което той може да се пренебрегне:

$$\tilde{U}_S \approx pl_{S\sigma}(|\vec{\Psi}_{m1}|)\tilde{I}_S + pl_m(|\vec{\Psi}_{m1}|)\tilde{I}_m \qquad (4)$$

Уравнение (4) показва принципната възможност за определяне на $|\vec{\Psi}_{m1}|$ от висшите хармонични на статорните токове $\tilde{I}_S$. Поради наличието на магнитна връзка между фазните намотки на статора и трудностите свързани с определя-

нето на $\tilde{I}_m$, оценяването на от хармоничните на фазните напрежения и токове е значително затруднено. За статорното напрежение и ток с нулева последователност е валиден израза:

$$u_{SZ} = r_S i_{SZ} + p l_{S\sigma 0} i_{SZ} \tag{5}$$

където:

$$u_{SZ} = U_{S0} = \frac{\sqrt{2}}{3}(u_{Sa} + u_{Sb} + u_{Sc}) \tag{6}$$

$$i_{SZ} = I_{S0} = \frac{\sqrt{2}}{3}(i_{Sa} + i_{Sb} + i_{Sc}) \tag{7}$$

Уравнение (5) е значително по-просто от (3) поради факта, че при симетрична машина токовете с нулева последователност i_{SZ} не създават магнитно поле в междината на машината и оттам не си взаимодействат с токовете в ротора. Ако отчетем $l_{s\sigma 0} = l_{s\sigma 0}(\vec{\Psi}_m)$, уравнение (5) се преобразува до:

$$U_{S0} = r_S I_{S0} + p l_{S\sigma 0}(\left|\vec{\Psi}_{m1}\right|) I_{S0} \tag{8}$$

За тока се получава:

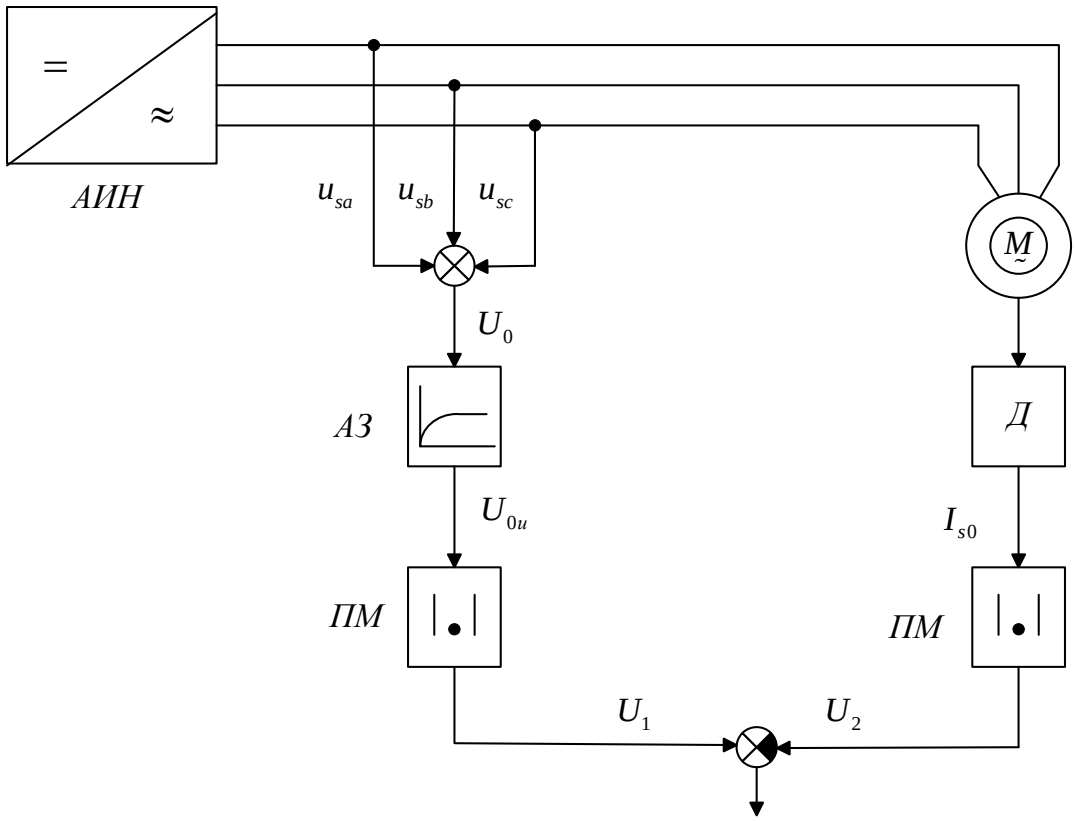
$$I_{s0} = \frac{1/r_s}{T_{s0}(\left|\vec{\Psi}_m\right|)p + 1} U_{s0} \tag{9}$$

където $T_{s0}(\left|\vec{\Psi}_m\right|) = \dfrac{l_{s\sigma 0}(\left|\vec{\Psi}_m\right|)}{r_s}$

По тази начин чрез измерване на фазните напрежения и последващото им сумиране се получава напрежението с нулева последователност, което от своя страна посредством апериодично звено с параметри – коефициент на предаване $1/r_s$ и времеконстанта $\dfrac{l_{s\sigma 0}(\left|\vec{\Psi}_{m_N}\right|)}{r_s}$ се преобразува в междинно напрежение U_{ou} , пропорционално на тока с нулева последователност, който би се получил при номинален магнитен поток. Модулът на това напрежение се означава като U_1.

Измерва се токът с нулева последователност I_{s0} , след което се преобразува по модул в напрежение $U_2 \equiv \left|I_{s0}\right|$. По разликата $U_3 = U_1 - U_2$ се съди за магнитното състояние на двигателя.

Блокова схема на устройството, реализиращо описания метод, е показана на фиг.1



Фиг.1. Блокова схема на устройството за определяне на магнитното състояние на АД

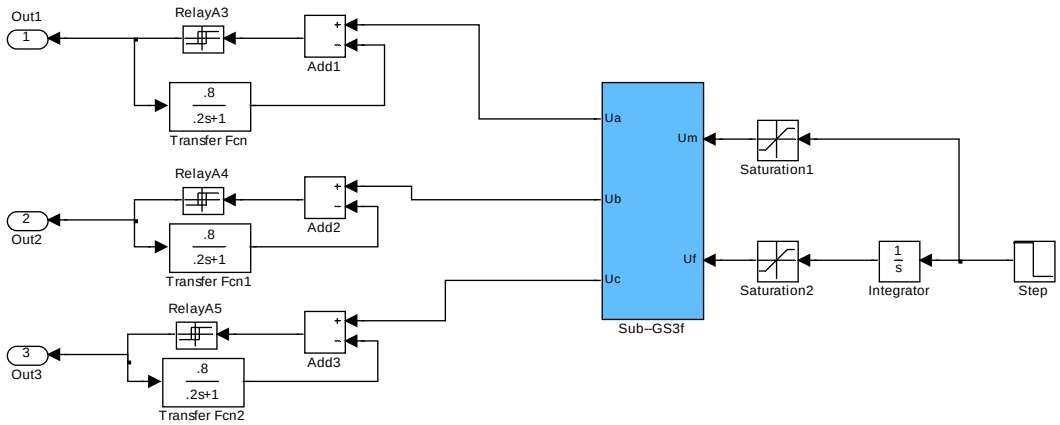
На база експерименти за определяне на токовете с нулева последователност с опитна система за честотно управление е установено, че функцията $l_{s\sigma 0}(\vec{\Psi}_m)$ може да се представи като:

$$l_{s\sigma 0}(\left|\vec{\Psi}_m\right|) = \kappa l_{s\sigma 0_N} + (1-\kappa) l_m(\left|\vec{\Psi}_m\right|) \frac{l_{s\sigma 0_N}}{l_m(\left|\vec{\Psi}_{m_N}\right|)} \qquad (10)$$

където κ е коефициент, зависещ от конструкцията на асинхронния двигател, като за двигатели с малка мощност $\kappa = 0.2 - 0.4$, а $l_{s\sigma 0_N}$ - номинална стойност определена при $\left|\vec{\Psi}_m\right| = \left|\vec{\Psi}_{m_N}\right|$ - номиналната стойност на магнитния поток.

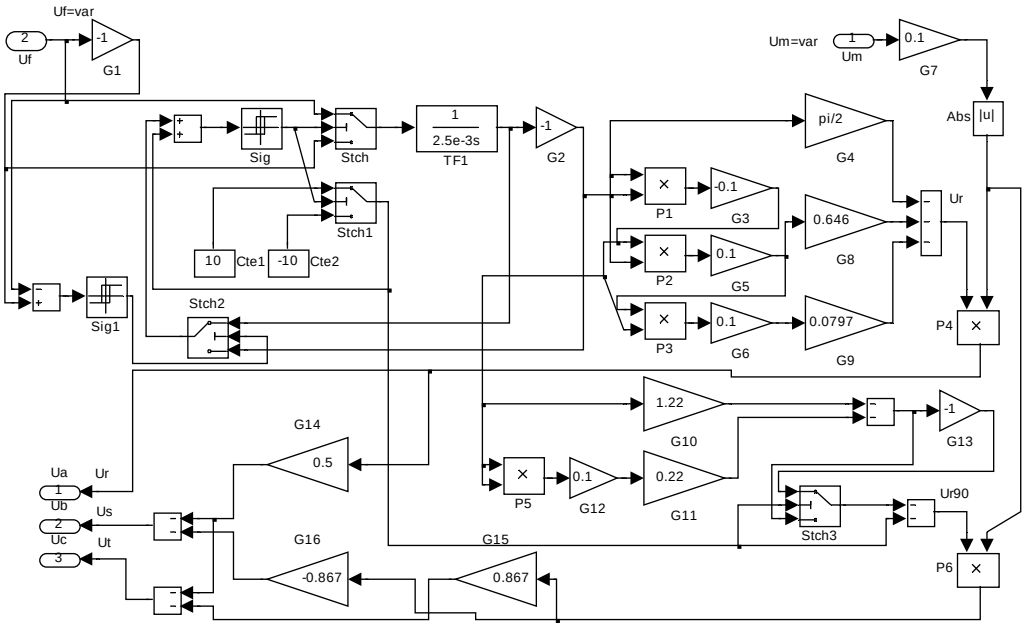
3. СИМУЛАЦИОННО ИЗСЛЕДВАНЕ

Симулациите са проведени с Matlab/Simulink, като входните напрежениято двигателя са генерирани от идеализиран инвертор на напрежение(без отчитане на комутационните процеси) (фиг.2) с релейни хистерезисни регулатори и отрицателна обратна връзка по напрежение чрез апериодично звено.



Фиг.2. Инвертор на напрежение

Блокът Sub-GS3f от фиг.2 е трифазен задаващ синусоидален генератор с входове за управление на честотата и амплитудата на генерираната симетрична система задаващи напрежения. Параметрите на апериодичните звена в обратната връзка са определени така, че да се осигури необходимото отношение на първия хармоник на изходното импулсно модулирано напрежение и честотата, както и претоварваща способност при ниски честоти.



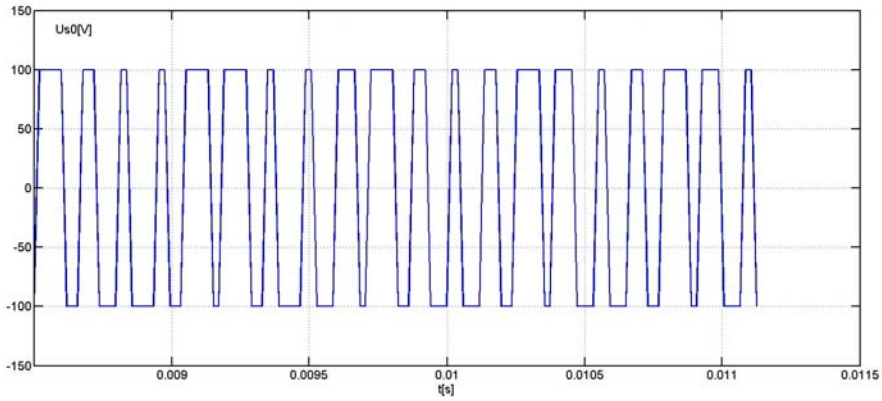
Фиг.3. Трифазен задаващ синусоидален генератор

Използван е модел на асинхронен двигател описан в статорна координатна система със следните параметри:

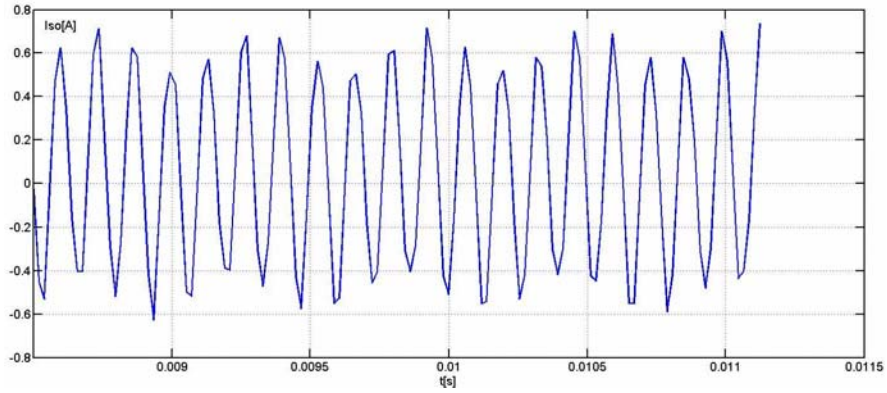
$$U_n = 220V\ ;\ P_n = 7.5kW\ ;\ f_n = 50Hz\ ;\ R_r = 0{,}816\Omega\ ;$$

$$R_s = 0{,}435\Omega\ ;\ l_{r\sigma} = 4mH\ ;\ l_{s\sigma} = 4mH\ ;\ l_m = 69{,}31mH\ ;\ J = 0{,}16kgm^2\ ;\ p = 1$$

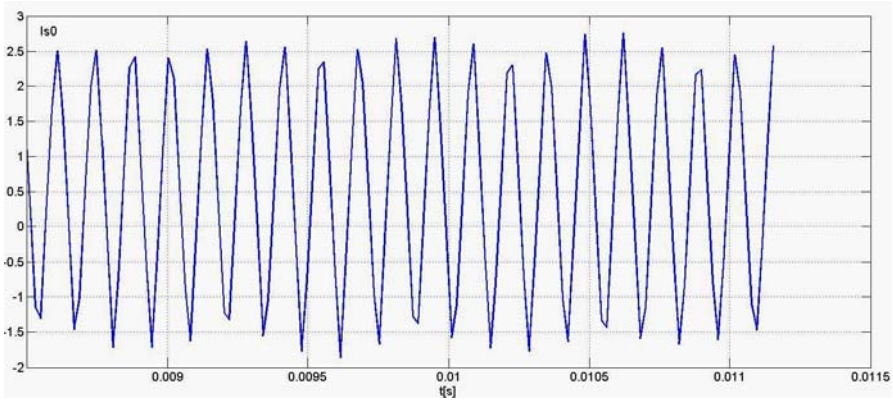
В модела е отчетена зависимостта на индуктивността на разсейване за токовете с нулева последователност от насищането на главния магнитен поток в машината, както и насищане на намагнитващата индуктивност т.е. $\vec{\psi}_m = G_{m\psi}^{-1}\left(\left|\vec{\psi}\right|\right)\vec{\psi}$;



Фиг.4. Напрежение с нулева последователност при $f^* = 5Hz$ *и* $U^* = U_{nom}$



Фиг.5. Ток с нулева последователност при $f^* = 5Hz$ *и* $U^* = U_{nom}$



Фиг.6. Ток с нулева последователност при $f^* = 5Hz$ *и* $U^* = 1.25U_{nom}$

Изследванията са проведени при постоянна честота(ниска) и вариране на напрежението чрез изменение на амплитудата на задаващото напрежение на трифазния задаващ генератор. На фиг.4 е показано напрежението с нулева последователност в квазиустановен режим, при зададена честота $f^* = 5Hz$ и задаващо напрежение U^* съответстващо на номиналното. На фиг. 5 и 6 съответно е даден токът с нулева последователност при задаващо напрежение равно на номиналното и завишено с 25%.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В обобщение на горното може да се направи извода, че е възможно да се използва предложения метод за реализиране на общопромишлени задвижвания на базата на хистерезисното честотно управление, които едновременно със запазване на простотата на схемното решение, осигурява повишен диапазон на регулиране

на скоростта и намалени загуби, вследствие поддържане или регулиране на магнитния поток в мотора.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторът изказва своята благодарност на ФНИ-МОМН за финансирането на проект ДТК02/1-2009, във връзка с който са настоящите изследвания.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Т. Йонков, ***Подчинено регулиране на електромеханични системи с еластичност,*** Годишник на ТУ София, т. 50, кн. 1, 1999, 68-75

[2].Jansen P.L. and Lorenz R.D. (1994) ***"Observer based direct field orientation: Analysis and comparison of alternative methods***", IEEE Tran. IA, vol. 30, no.4, pp.945-953, Jul/Aug,

[3] T. Ionkov (2001), ***Integral forwardstepping control for parametric variable motion system***, Conf. IEEE, Sofia

[4] Butler H. ,(1992)***"Model Reference Adaptive Systems"*** London: Printice Hall

[5] Д. Бакърджиев, Т. Йонков, ***Управление квазиустойчивым режимом одного класса нестационарных взаимосвязанных электроприводов***, Осмая общегосударственная конференция с международным участием Электрические приводы и силовая электроника, Кошице, 1988, 89-97

[6] Kim H.W. and Sul S.K. (1996) ***" A New Motor Speed Estimator using Kalman Filter in Low Speed Range",*** IEEE Tran. IE vol. 43, no. 4, pp. 498-504,Aug.

[7] Р. Райнов, Вл. Христов (2006)"***Влияние на производната на ускорението върху производителността на производствените механизми с цикличен режим на работа"***, - Международна юбилейна научна конференция, посветена на 20 годишнината от основаване-то на Филиал Пловдив -ТУ-София

[8] Zarchan P., (2005),***"Fundamentals of Kalman Filtering - A Practical Approach",*** Second Edition, MIT Lincoln Laboratory Lexington Massachusetts, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc.

[9] Д. Цанков, Т. Йонков, ***Оценяване ефективността на термопомпа в интегрирани сградни системи***, Сборник доклади от годишната университетска научна конференция на НВУ „Васил Левски", ISSN 1314-1937, том 5, 2010, 68-74

[10] T. Ionkov, I. Ionkova, (2007), ***Application of Kalman Filter algorithms in a control strategy for air-lift cultivation process of Astragalus hairy roots for saponin's production***, Proceedings of the 5 Inter-national Symposium on Phytopharm - Biopharm, Leiden, 1-2 July, The Netherlands, 79-86

Автор: Евтим Йончев, гл.ас., д-р, кат.АЕЗ, ФА, ТУ-София, E-mail address: *efo@tu-sofia.bg*

Постъпила на 10.07.2012 **Рецензент** доц. д-р Р. Райнов

Годишник на Технически Университет - София, т. 62, кн.3, 2012
Proceedings of the Technical University - Sofia, v. 62, book 3, 2012

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ШУМА, ГЕНЕРИРАН ПРИ ДВИЖЕНИЕ НА КОЛООС ПО РЕЛСОВ ПЪТ

Иван Кралов, Красимир Неделчев, Игнат Игнатов

Резюме: *В работата е представено експериментално изследване на шума, предизвикан от контакта колело-релса. Направени са измервания на грапавостта по повърхността на търкаляне на релсата и са установени нивата на звуково налягане при движение на колоос с постоянна скорост. Резултатите са обработени числено чрез Matlab.*
Ключови думи: *шум, релса, колоос, нива на звуково налягане.*

EXPERIMENTAL STUDY OF THE NOISE GENERATED BY WHEEL-RAIL INTERACTION

Ivan Kralov, Krasimir Nedelchev, Ignat Ignatov

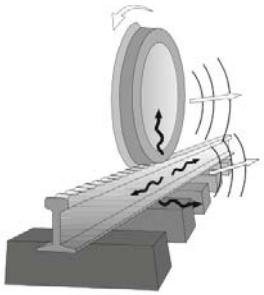
Abstract: *An experimental study of the wheel/rail noise generation is carried out. Measurements of the rail head roughness are made, and the noise levels are recorded during pass by tests of a wheel axle with a constant velocity. The results are processed in Matlab.*

Keywords: *noise, rail, wheel axle, noise pressure level.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Основно място в спектъра на излъчвания шум при движение на ЖПС е шумът от търкаляне. При движение на ЖПС със скорост V по неравност с дължина на вълната λ, възникват трептения с честота f, която може да се пресметне с уравнението [3, 7]:

$$f = \frac{V}{\lambda} \quad (1)$$



Фиг.1-1. Визуално представяне на механизъм за генериране на шум при търкаляне на колооста [7]

© 2012 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

Амплитудите на тези трептения варират от десети от микрометра до повече от микрометър. Тези малки премествания могат да допринесат за високи нива на шум, но трябва да се отбележи, че при звуковите полета в чуваемата област амплитудите на трептенията на въздушната среда са от същия порядък [1, 2, 7]. Визуално механизмът за генериране на шум при търкаляне на колооста е представен на фиг.1-1 [7].

Установено е, че неравности с по-големи дължини на вълните допринасят за възбуждането на по-нискочестотни трептения, имащи отношение към комфорта при движение на ЖПС, както и на трептения на основната баластова призма на железния път. Неравности с дължина над 1 m причиняват деформации в основата на железния път и нарушения в геометрията на релсата. Посочените неравности подлежат на редовен контрол, както и са критерии за поддръжка на изправността на железния път. Неравности, с дължина на вълната приблизително равна на дължината на търкалящата окръжност на колелото (около 3 m), допринасят за ексцентрично натоварване на лагерния възел. Това може да доведе до вибропремествания с амплитуда до 1 mm. Първите няколко хармоника на трептения, породени от такава неравност, имат отношение към дефекти, свързани с геометрията на колелото [6, 7, 8].

Неравностите най-често са резултат от производствени дефекти и износване на двете работни повърхности. Значителни квази-периодични неравности (грапавост), наричана още „набръчкване” (corrugation) са наблюдавани при определени обстоятелства. Амплитудите на трептенията, възбудени от тези дефекти достигат 50 μм, като дължината на вълната им е от същия порядък [5, 7].

Неравност (грапавост), с размер на вълната по-малки от 1 mm (микрограпавини), има косвено отношение към излъчването на шум от движението на ЖПС, но е по-значима за адхезията в контакта (теглителни и спирачни свойства) и за електрическата проводимост, ето защо не трябва да бъде с ниски стойности [6, 7, 8].

При измерванията на дължини на вълните по линията на търкаляне на релсата, се използват различни устройства. Една от основните конструкции представлява греда с прав ръб, монтирана върху релсата. Преобразувателите за преместване се движат по монтираната греда, измервайки неравностите на повърхността на търкаляне, като могат да се извършват корекции, отчитащи неравност и в гредата, посредством предварително калибриране с гладки повърхности. Основният недостатък на това устройство е ограничението в дължината му.

Друга конструкция за измерване на неравности представлява подвижна количка, с монтирани възприемателе за ускорение, движеща се по горната част на глава релса. Приспособлението позволява да се измерват неравности значително бързои и на дълги отсечки. Разстоянията се отчитат посредством тахо-проба. Необходима е стабилна постоянна скорост, за да може да се извърши интегриране в реално време, като се препоръчва ръчно управление, за да се изключат вибрациите от евентуално автономно задвижване [7].

Основна връзка, между трептения на твърдо тяло и нивото на звукова мощност, породено от тези трептения, се дава с уравнението [3, 7]:

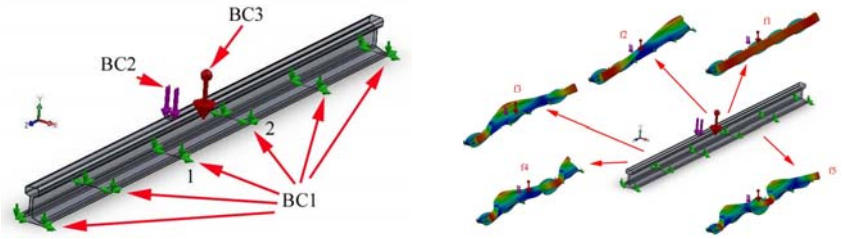
$$W = c_0 \rho_0 S \left\langle v^2 \right\rangle \sigma, \qquad (2)$$

където $c_0 \rho_0$ са характеристиките на средата, с която контактува тялото (в случая импеданса на въздушното пространство), S е площта на излъчващия източник, σ е ефективността на разпространение (зависи от формата на източника по граничния преход) и v е скоростта на повърхността на източника, взета с нейната средно квадратична стойност [3, 7]. Посоката на разпространение на шума може да бъде снета, посредством масив от микрофони, образуващи дъга от окръжност, поставени в свободно звуково поле [3, 7, 10, 13].

Целта на настоящото изследване е събирането на достатъчен обем от експериментални данни за грапавостта на релсов път и ниво на звуково налягане при движение на колоос върху него с оглед възможността за числено моделиране на нивото и разпространението на излъчвания шум, породен от контактното взаимодействие между колелото и релсата. Получените експериментални данни ще служат и за верификация на числените резултати. Така още в процеса на проектиране посредством числени модели ще могат да се предвиждат нивата на звуково налягане и при необходимост да се въздействат върху тях.

2. ЧИСЛЕНО ОПРЕДЕЛЯНЕ НА СОБСТВЕНИТЕ ЧЕСТОТИ НА КОЛООС И РЕЛСА

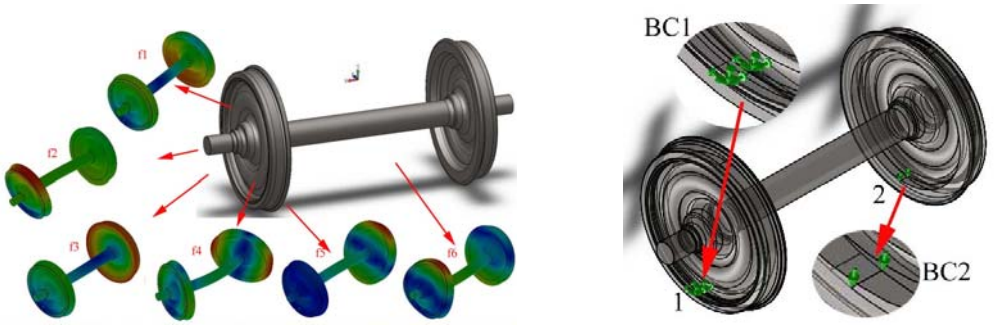
От съществено значение при изследването на вибрациите и излъчваният шум е познаването на собствените честоти на трептящите елементи. В случая това са релсата и колооста. За целта е изграден 3D модел на релса UCI60, начертан в SolidWorks. На фиг.2-1 моделът е показан със зоните и вида на приложените на гранични условия. Лините, по които са наложени ограничения на премествания *BC1* по трите оси X, Y и Z са разположени на разстояние 0,58 m една от друга. Релсата е натоварена с вертикална сила *F = 5000 N*. Приложената сила *BC2* съответства на вертикалното натоварване действащо върху релсата при движението на колооста. Приложена е и силата от теглото на релсата *BC3*.



Фиг.2-1 а) 3D модел на релса UIC60 с вида и местата на прилагане на граничните условия. BC1 – зона на закрепване на релсата; BC2 – зона на прилагане на вертикална сила F=5000 N; BC3 – сила на тежестта на релсата; **б)** Първите пет собствени форми на изследваната релса при зададените гранични условия

При честотният анализ на показаният модел на релса UIC60 с приложени върху него гранични условия (фиг.2-1) в среда на CosmosWork са изчислени първите пет собствени честоти: f_1 = 232,65 Hz; f_2 = 254,09 Hz; f_3 = 313,76 Hz; f_4 = 392,69

Hz и f_5 = 485,96 Hz. Собствените форми на релсата при тези честоти са показани на фиг. 2-1.



Фиг.2-2. 3D модел на вагонна колоос с вида и местата на прилагане на граничните условия и първите шест собствени форми на първите шест собствени честоти на изследваната колоос, при зададените гранични условия.

Геометрията на вагонната колоос е моделиран в SolidWorks. На фиг.2-2 е показан 3D модела на колооста със зоните и вида на приложените на гранични условия. По линия 1 са наложени ограничения на преместванията и завъртанията *BC1* по трите оси X, Y и Z. По линия 2 са наложени ограничения на вертикалните премествания *BC2* по ос Y. При честотният анализ на показаният модел на вагонна колоос (фиг. 2-2), в CosmosWorks са изчислени първите пет собствени честоти: f_1 = 10,245 Hz; f_2 = 37,824 Hz; f_3 = 58,517 Hz; f_4 = 90,99 Hz; и f_5 = 112,08 Hz. Собствените форми на колоста при тези честоти са показани на фиг. 2-2.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ

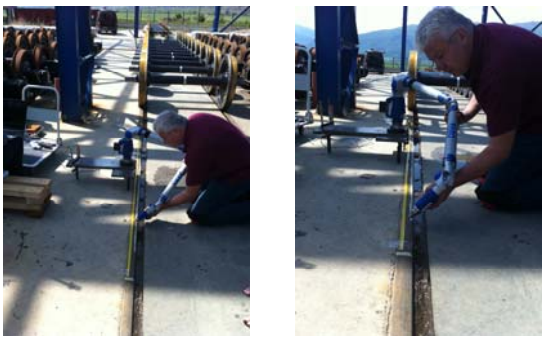
За измерването на грапавостта и отклоненията в профила на релсите е използвана измервателна апаратура FARO, а за измерване на шума – прицизна измервателна апаратура PULSE на фирмата Bruel&Kaer, Дания.

Системата FARO представлява преносима координатно измерваща установка. Тя се състои от опорен фланец, който може да бъде закрепен към всяко подходящо за това място и няколко звена свързани помежду си с по 2 ротационни стави. На крайното звено е монтиран регистриращо устройство със сферичен накрайник, който може да бъде твърд или електромеханичен. Работната зона представлява сфера с диаметър 3 метра. Всеки измерен (заснет) елемент от детайла, бива автоматично моделиран в моделната област с измерените си параметри.

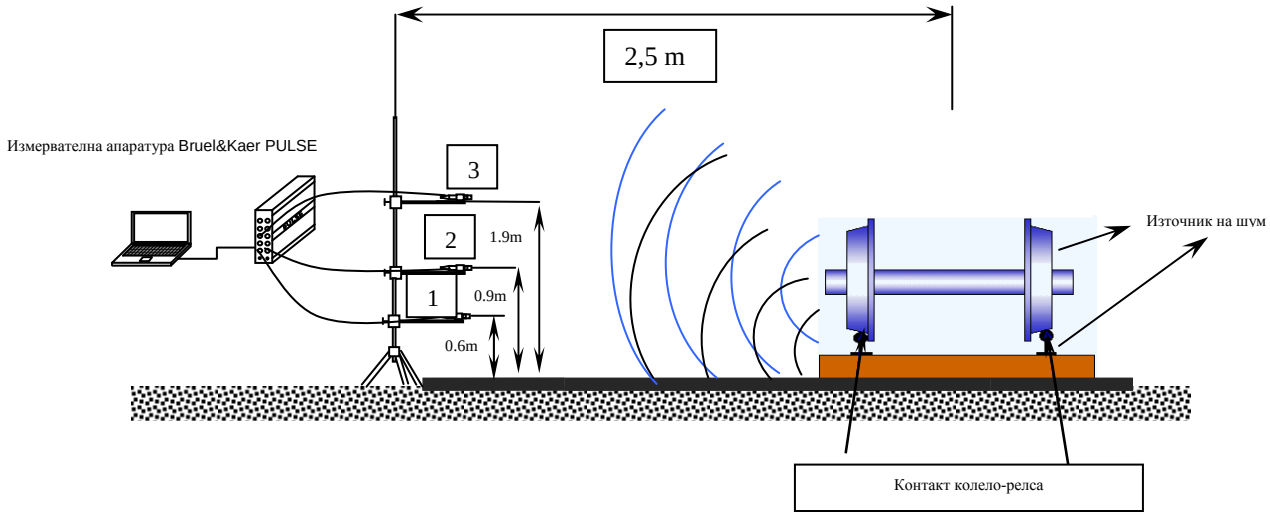
Едновременно със снемането на профилите и параметрите на грапавост се провежда и замерване на нивото на излъчвания шум от контакта колело-релса. Последният е регстриран чрез шумоизмервателен тракт, включващ микрофони 4958, свързани към система PULSE 3560-B, производство на фирмата Bruel&Kaer, Дания. Записите и визуализациите са извършвани със софтуер на същата фирма.

Обработката на сигналите е направена с допълнителни програми в среда на Matlab.

Измерването на профила на релсите е извършен върху два типа релсови участъци - вграден в бетонова основа, и участък с основа баластова призма. Измерванията са правени по средната линия на работния участък на релсите.



Фиг.3-1. Измерване на вълнобразност на релсите със система FARO при това изследване

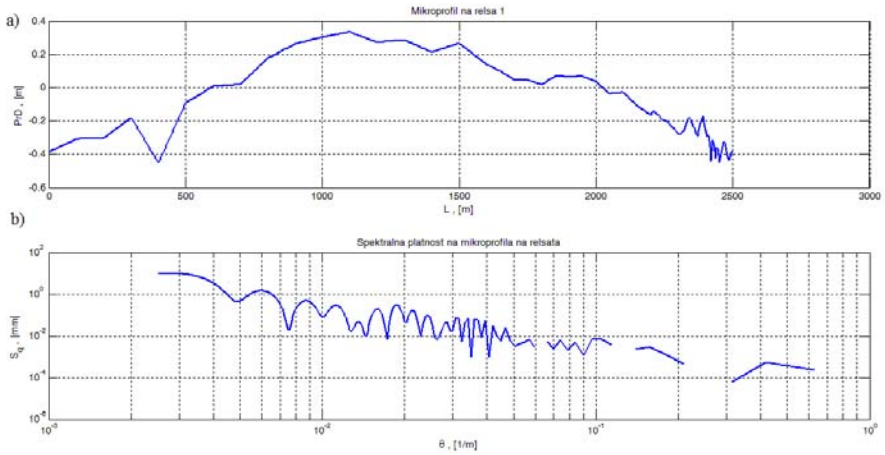


Фиг.3-2. Схема на измерване на шума при това изследване

Измерването на шум е осъществено съгласно фиг.3-2. Направени са записи на звуково налягане при преминаване на колоос тип 50457KJ92 БДЖ5136, с постоянна скорост от 1 m/s, в участъка, в който е измерен профилът на релсите. За премахване влиянието на останалите източници на шум при релсовите возила, измерванията са направени при ръчно задвижена колоос без талига, купе, дигател и др. Преди измерванията е извършвано калибриране на измервателния тракт с помощта на звуков калибратор. За оценка влиянието на шумовия фон, последният е записван при всяка серия от измервания. В съответствие със стандартните изисквания (ISO (1996-1-2003)) за всеки източник са провеждани серия от измервания и е взета тяхната осреднена стойност.

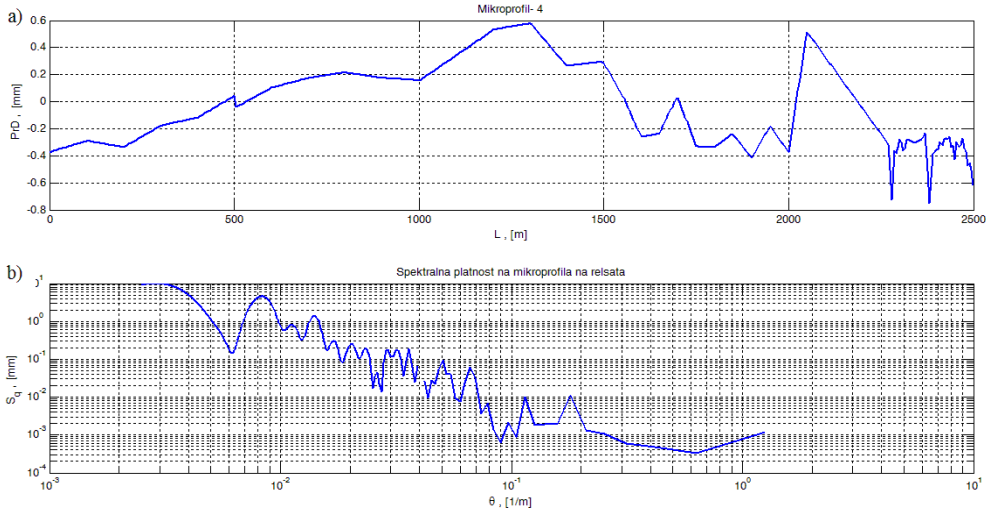
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

На фиг.4-1 е показан измерения профил на участък 2,5 m от релса, вградена в стомано-бетонна основа. Показан е и спектъра на измерения участък, където с Sq е означена средноквадратичната спектрална плътност и с θ честотата на разпределение на различните дължини на вълните в измерения участък.

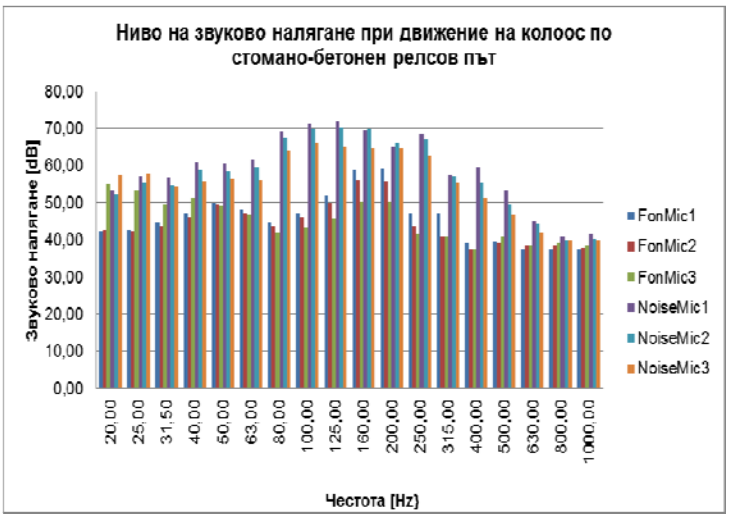


Фиг.4-1. Профил на релса, вградена в стоманобетонна основа и спектър на измерения профил

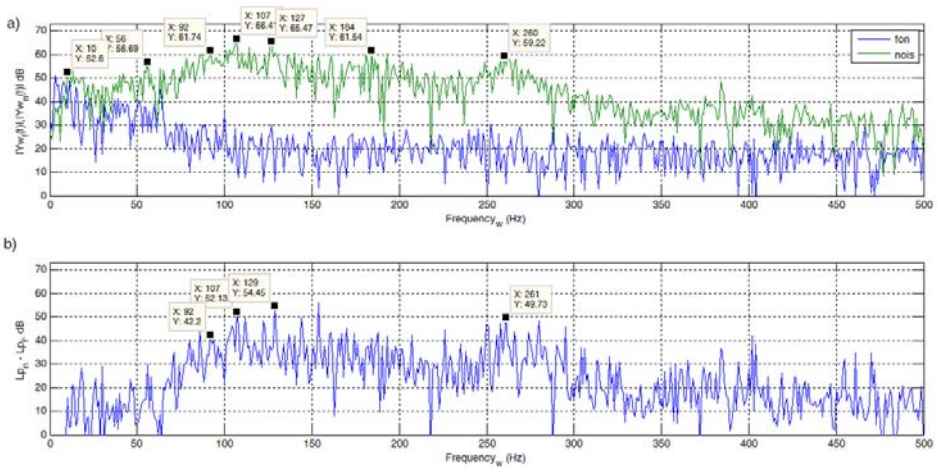
Фиг.4-2а показва профила на участък 2,5 m от релса, част от релсов път с баластова основа. На фиг.4-2б е показана отново и спектралната плътност на профила.



Фиг.4-2. Профил на релса от работещ релсов път и спектър на измерения профил

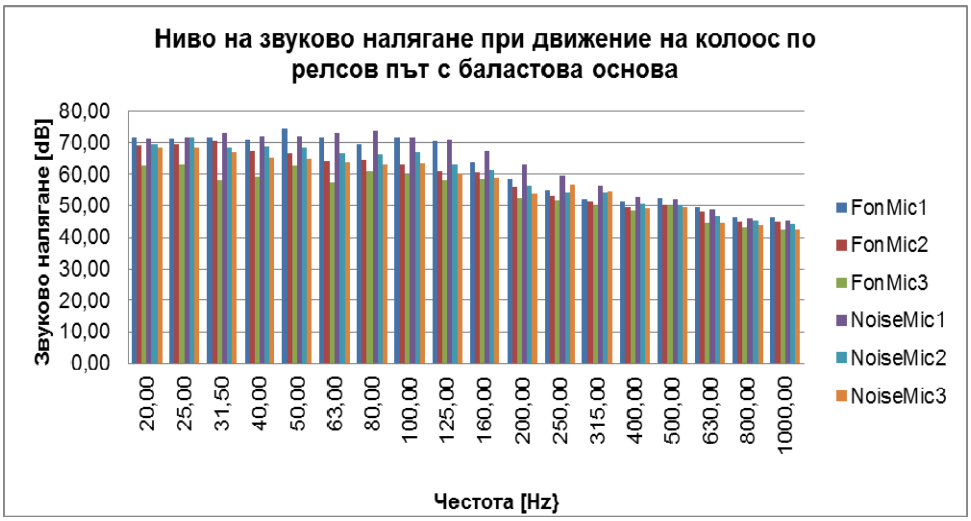


Фиг.4-3. Резултати от измерването на шума в честотна област, от търкалянето на колоос по релсов път с стоманобетонна основа.

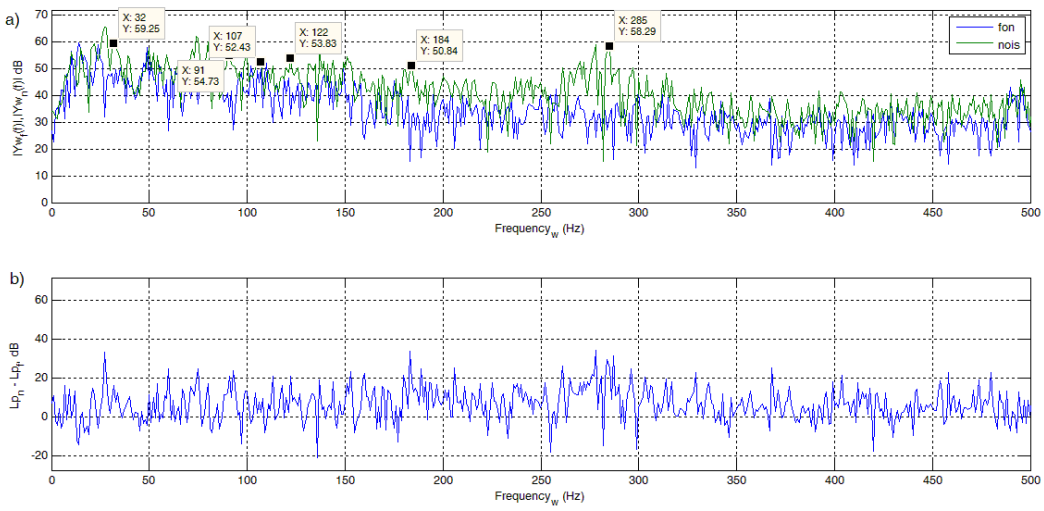


Фиг.4-4. Резултати от измерването на шума в честотна област при стоманобетонен релсов път: a) FFT спектър на шума в dB за интервал от време 1 s; b) разлика между нивото на звуковото налягане на фоновия шум и шума излъчен при търкалянето на колооста

На фиг.4-3 са показани и записи на фоновия шум и шума от преминаването на колооста със скорост 1 m/s по релсовият път. Направен е FFT анализ на спектъра на шума. На фиг.4-4a са показани графики на нивото на звуково налягане на фоновият шум и шума излъчен от колоста при движение по стоманобетонен релсов път със скорост 1 m/s. На следващата фиг.4-6b е показана разликата ($dL_p = L_{p,n} - L_{p,f}$) между нивото на звуково налягане на фоновият шум ($L_{p,f}$) и шума, излъчен от колооста ($L_{p,n}$). На фиг.4-5 са показани записи на фоновия шум и шума от преминаването на колооста със скорост 1 m/s по релсов път с баластова основа. Представен е и FFT анализ на спектъра на шума. На фиг.4-6a са показани графики на нивото на звуково налягане на фоновият шум и шума излъчен от колоста за този случай. На фиг.4-6b е показана разликата ($dL_p = L_{p,n} - L_{p,f}$) между нивото на звуково налягане на фоновият шум ($L_{p,f}$) и шума излъчен от колоста ($L_{p,n}$).



Фиг.4-5. Резултати от измерването на шума в честотна област, от търкалянето на колоос по релсов път с баластова основа



Фиг.4-6 Резултати от измерването на шума в честотна област при релсов път с баластова основа: a) FFT спектър на шума в dB за интервал от време 1 s; b) разлика между нивото на звуковото налягане на фоновия шум и шума излъчен при търкалянето на колооста

От графиките показващи спектъра на профила на измерените релси, се забелязват големи амплитуди при големите дължини на вълните, както и малки амплитуди за малки дължини на вълните, което е типичен спектър на вълнообразност.

Измерванията на нивото на звуково налягане при движението на колооста по закрепен в стомано-бетонна основа релсов път достигат максимални стойности в ниско-честотни области (фиг.4-3). Нива с честота, близка до 250 Hz (както и до други близки до числено пресметнатите собствените честоти на колооста) са приети като възбудени от колооста. Те се разпространяват като структурен шум, поради слабото демпфиране на колооста. При експериментът на железен път с баластова основа и конвенционално закрепване на релсите, максималните стойности на звуково налягане се проявяват в по-широк диапазон и при по-голям набор от честоти.

При движение по релсов път със стомано-бетонна основа, нивото на звуковото налягане на излъченият шум превишава звуковия фон в честотния интервал от 70 до 300 Hz с над 20 dB. При движението по релсов път с баластова основа, нивото на излъчения шум превишава фоновия шум основно при честоти близки до собствените честоти на колооста с около 10 dB, а при честоти около 280 Hz превишението е над 20 dB. Поради разликата от над 10 dB спрямо нивото на фоновия шум, резултатите за нивото на източниците са коректни и могат директно да бъдат анализирани.

От получените резултати и анализът им се вижда, че:

- вълнообразността на профила на релсата е съставена от хармоници в широк честотен диапазон, което обуславя и възбуждане на кинематични смущения също в широк честотен диапазон;
- има разлика между профилите на един и същи тип релси при различен фундамент. Това е породено от различните въздействия и износване, вследствие на нееднаквите коравини на фундаментите;
- най-високи са нивата на излъчения шум при движение на колоос с ниска скорост по релсов път в честотния интервал 50÷300 Hz;

- нивото на шума при релсов път с бетонна основа има по-ясно изразен тонален спектър, като основните пикове са около някои от собствените честоти на колооста;
- нивото на шума при релсов път с баластова основа има по-широк честотен спектър, без ясно изразени пикове около собствените честоти на колооста. Този факт показва широкоспектърно разпространение на звуковите вълни и тяхната интерференция, при отразяването и разпространението им.

10. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В резултат на получените експериментални и числени резултати и техния анализ, като заключение от изследването може да се обобщи:

- вълнообразността на профила на релсата, съставена от хармоници в широк честотен диапазон, обуславя и възбуждане на шум също в широк честотен диапазон;
- за изследваните случаи, най-голямо е нивото на излъчения шум при движение на колоос с ниска скорост по релсов път е в честотният интервал 50 ÷ 300 Hz;
- появяват се ясно изразени пикове в спектрите на шума от движението на колооста по релсовия път при честоти близки до собствените честоти на колоостта;
- нивото на шума при релсов път с бетонна основа има по-ясно изразен тонален спектър, като основните пикове са около някои от собствените честоти на колоост;
- нивото на шума при релсов път с баластова основа има по-широк честотен спектър, без ясно изразени пикове около собствените честоти на колооста.

Анализът на получените резултати изцяло съответства на известните научни разработки и изследвнания в областта.

БЛАГОДАРНОСТИ

Изследването обект на тази статия е извършено благодарение на договор в помощ на докторанта № 112пд003-4.

ЛИТЕРАТУРА

[1] AEJ Hardy, RRK Jones, **Rail and wheel roughness - implications for noise mapping based on the Calculation of Railway Noise procedure**, A report produced for Defra, AEATR-PC&E-2003-002.

[2] A.Van Beek, M. Beuving, M. Dittrich, X. Zhang, H. Jonasson, F. Letourneaux, C. Talotte, M. Ringheim, **Rail Sources-State of the art-Technical Report**, Research and Technology department physics of the railway System and Comfort, 05/08/2002.

[3] BRACCIALI, M. PIPPERT, S. CERVELLO, **Railway noise:the contribution of wheels**, p 2009 Lucchini RS.

[4] Burkhard Schulte-Werning, David Thompson, Pierre-Etienne Gautier, Carl Hanson, Brian Hemsworth, James Nelson, Tatsuo Maeda Paul de Vos, **Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation**, Systems, Proceedings of the 9th International Workshop on Railway Noise, Munich, Germany, 4–8 September 2007.

[5] C. Talotte, P.-E. Gautier, D.J. Thompson, C. Hanson, **Identification, modelling and reduction potential of railway noise sources: a critical survey**, Journal of Sound and Vibration 267 (2003) 447–468.

[6] D.J. Thompson , C.J.C. Jones, T.P. Waters, D. Farrington, A tuned damping device for reducing noise from railway track, Applied Acoustics 68 (2007) 43–57.

[7] D.J. Thompson, **Railway Noise and Vibration**,p.6-10, p. 127-173, Elsevier, 2009.

[8] D. J. THOMPSON , C. J. C. JONES, **A Peview of the Modelling of Wheel/Railnoise Generation**, Journal of Sound and vibration (2000) 231(3), 519-536.

[9] Mikael Ogren, **Noise emission from railway traffic**, VTI Report 559, 2006.

[10] Paul J. Remington, **Wheel/rail rolling noise, I: Theoretical analysis**, BBN LaboratoriesIn corporated, 10 Moulton Street,CambridgeMassachusets, 31.10.1987.

[11] T.X. Wu, D.J. Thompson, **The effects on railway rolling noise of wave reflections in the rail and support stiffening due to the presence of multiple wheels**, Applied Acoustics 62 (2001) 1249–1266.

[12] Xinbiao Xiao, Xuesong Jin, and Xiaozhen Sheng, **A Hybrid Model for Noise Generation from a Railway Wheel Due to Wheel/Rail Impact**, Noise and Vibration Mitigation, NNFM 99, pp. 278–284, 2008.

[13] Xuetao Zhang, **The directivity of railway noise at different speeds**, Journal of Sound and Vibration 329 (2010) 5273–5288.

Автори: Иван Кралов, доц. д-р инж. от катедра „Механика“ Технически Университет - София, E-mail address: *kralov@tu-sofia.bg*; Красимир Неделчев, гл. ас. д-р инж. - катедра „Механика”, Технически Университет - София, E-mail address: *krasined@tu-sofia.bg;* Игнат Игнатов, докторант от катедра „Механика“ Технически Университет - София, E-mail address: *i_ignatov@tu-sofia.bg*

Постъпила на 18.07.2012 **Рецензент** проф. дтн Борис Белниколовски

Годишник на Технически Университет - София, т. 62, кн.3, 2012
Proceedings of the Technical University - Sofia, v. 62, book 3, 2012

ЕЛЕКТРОМАГНИТНО ОРАЗМЕРЯВАНЕ НА ТОКООГРАНИЧАВАЩИ РЕАКТОРИ СЪС СТОМАНЕН МАГНИТОПРОВОД И ВЪЗДУШНИ МЕЖДИНИ ЗА РАБОТА С ТРАНСФОРМАТОРИ ЗА НАПРЕЖЕНИЕ 400kV

Кирил Стойков

Резюме: *В работата е предложена методика за електромагнитно оразмеряване на токоограничаващи реактори със стоманен магнитопровод и немагнитни междини за съвместна работа с трансформатори за напрежения 400 kV, използвани в енергетиката на Република България. Разработената методика е универсална, т.к. токоограничаващи реактори се използват и за други цели.*

Ключови думи: *токоограничаващи реактори, магнитен поток, шунтиращ поток, немагнитна междина, магнитна силова линия, активно сечение.*

ELECTROMAGNETIC DESIGN OF THE CURRENT-LIMITING REACTORS WITH STEEL FERROMAGNETIC CORE AND NONMAGNETIC INTERSPACES WORKING WITH 400 kV TRANSFORMERS

Kiril Stoykov

Abstract: *In the work an approach for designing the current-limiting reactors with steel ferromagnetic core and nonmagnetic interspaces. These reactors work with 400 kV transformers, using in Bulgarian energetics. The suggested method is universal, because current-limiting reactors use for other area.*

Keywords: *current-limiting reactors, magnetic flow, nonmagnetic interspace, magnetic force line, active intersection*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Токоограничаващите реактори със стоманен магнитопровод намират приложение в различни области на енергетиката – за ограничаване на токовете на късо съединение в енергийната система, при трансформатори за захранване на електрдъговите пещи и др. Магнитопроводът служи за локализиране на основното магнитно поле на реактора. Характерно е това, че в отделни участъци главният магнитен поток минава през немагнитни междини.

Токоограничаващите реактори могат да бъдат свързани в енергийната мрежа или последователно или паралелно. Компенсационните реактори обикновено се свързват паралелно. Прието е да се наричат шунтиращи реактори. Намотките на трифазните шунтиращи реактори се свързват най-често в електрическо съеди-

© 2012 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

нение “звезда” (и по-рядко в електрическо съединение “триъгълник”). Тук ще се анализират само шунтиращите (компенсационните) реактори.

2. МЕТОД ЗА ЕЛЕКТРОМАГНИТНО ОРАЗМЕРЯВАНЕ НА РЕАКТОРИ СЪС СТОМАНЕН МАГНИТОПРОВОД

Разглеждат се трифазни и еднофазни реактори с ядрен равнинен магнитопровод и еднофазни реактори с мантиен магнитопровод, с равнинно и пространствено разположени яреми [1], [3], [5], [8].

В [1] се разглеждат основните конструкции на магнитни вериги намерили широко приложение в трансформаторостроенето. Дефинирани са основните изисквания към токоограничаващите реактори и са посочени съответните мерки за удовлетворяването им. Индуктивното съпротивление се определя чрез предварително зададената мощност на реактора, респ. чрез спада на напрежението му, който спад е отношение на мощността на реактора към мощността на трансформатора към който ще се включва. Разглеждат се само токоограничаващи реактори които се използват за съвместна работа със захранващи устройства на електродъгови пещи.

Опит за технико-икономическа оценка и оптимизация на реактори е направен в [9]. Направен е извод, че принципа на подобието при токоограничаващи реактори е практически неприложим. Предлагат се коефициенти и конкретни аналитични изрази за отделни конструкции, които не са приложими в общ вид.

В известната и достъпна техническа литература не се срещат аналитични изрази в най-общ вид, с помощта на които да може лесно да се вземат бързи решения при изготвяне на съответна офертна дейност.

В настоящата работа се разглеждат токоограничаващи реактори използвани като шунтиращи (компенсационни), т.е. за паралелно включване в енергийната мрежа.

Основните параметри, необходими за електромагнитното оразмеряване на реакторите са:

- номинална мощност P_N;
- линейно напрежение $U_л$, респ. фазово напрежение $U_ф$;
- индуктивност L или съответно индуктивно съпротивление X_L;
- ефективна стойност на номиналния ток I_N.

При известни номинална мощност и номинално напрежение, предварително се изчисляват индуктивността на една фаза и номиналният ток на реактора:

$$L = \frac{m.U_ф^2}{\omega P_N}.10^{-3}, H. \qquad (1)$$

Наличието на стоманен магнитопровод води до увеличаване на индуктивността на реактора, която от своя страна зависи от тока, което в повечето случаи е от съществено значение.

Важна особеност при токоограничаващите реактори е това, че се изисква линейност на ампер – веберната характеристика. Именно, това предопределя из-

бора на номиналната стойност на магнитната индукция в стоманения магнитопровод.

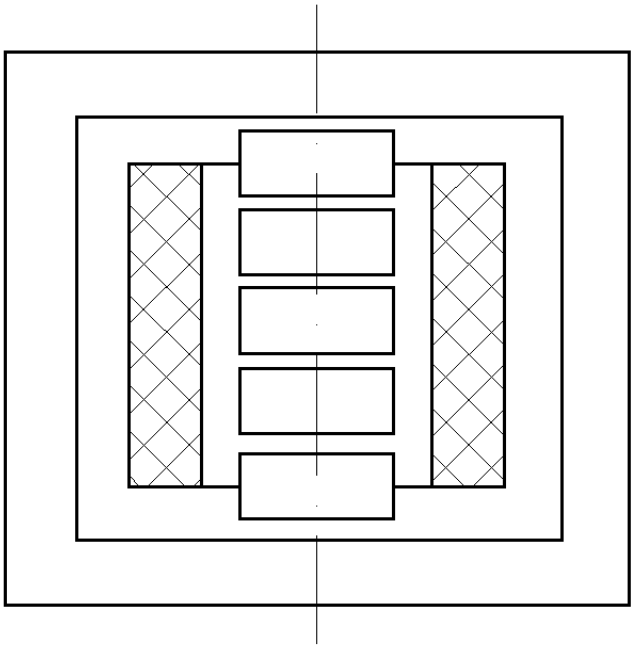
Ако конструкцията на токоограничаващия реактор е известна (фиг.1., фиг.2), то индуктивността може да се определи съгласно израза [7],[8]:

$$L = \frac{\Psi}{\sqrt{2}I} = w\left(\frac{\Phi_а}{\sqrt{2}I} + \frac{\Phi_ш}{\sqrt{2}I}\right), \qquad (2)$$

където Ψ е пълен магнитен поток; w – брой на навивките на намотката; $\Phi_а$ - основен магнитен поток, канализиран през магнитопровода; $\Phi_ш$ - шунтиращ поток, преминаващ изцяло през немагнитна среда.

За немагнитна среда се приема канала между ядрото на магнитопровода и намотката на реактора (самата намотка участва също). Приема се, че извън намотката магнитен поток не преминава или ако има такъв той е пренебрежимо малък.

На фиг.3 е показана заместваща електрическа схема на еднофазен токоограничаващ реактор с немагнитни междини.



Фиг.1. Еднофазен токоограничаващ реактор с въздушни междини

От нея става ясно, че основният магнитен поток среща по своя път две магнитни съпротивления – едното на феромагнитните пакети и другото на въздушната среда (немагнитните междини).

Величините $R_а$ и R_δ са съответно магнитно съпротивление на феромагнитния участък и немагнитните междини. Те се определят съгласно изразите:

$$R_а = \frac{\ell_с}{\mu S_а}$$

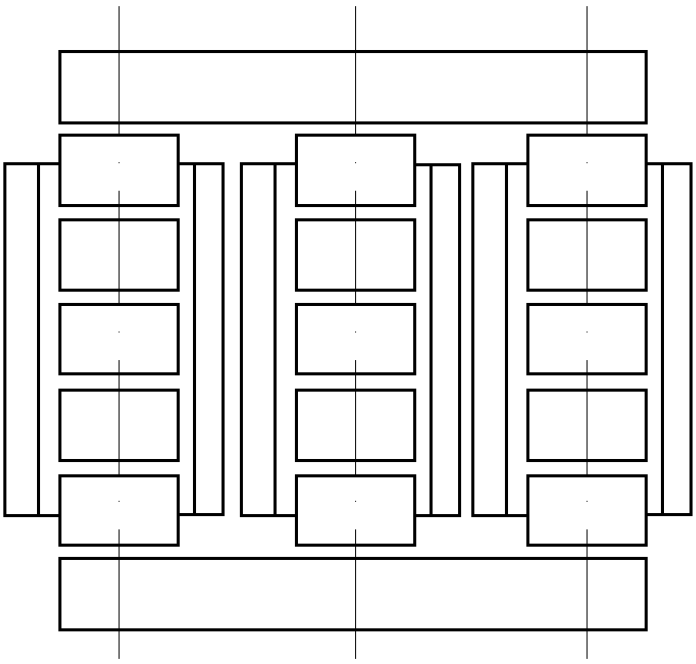
$$R_\delta = \frac{\ell_\delta}{\mu_0 S_\delta},$$

където μ_0 е магнитна константа на вакуума. Практически магнитната константа и магитната проницаемост на въздуха са равни.

На фиг. 4 е показан пътя на шунтиращия поток за еднофазен токоограничаващ реактор.

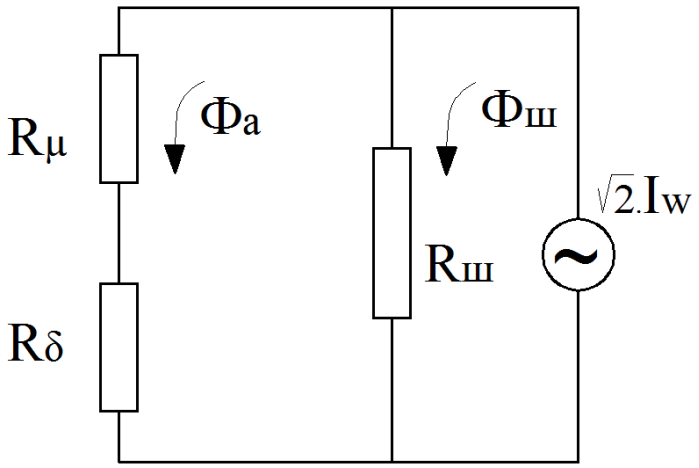
Означенията от фиг. 4 и необходимите за анализа на електромагнитното оразмеряване са:

- δ - ширина на немагнитна междина;
- n_δ - брой на немагнитните междини в ядрото;
- δ_γ - технологична немагнитна междина;
- $\ell_с$ - дължина на магнитните силови линии в стоманения магнитопровод;
- $\ell_ш$ - дължина на магнитните силови линии на шунтиращия магнитопровод;
- S_δ - сечение на немагнитните междини;
- $S_а$ - активно сечение на стоманеното ядро;
- μ - относителна магнитна проницаемост на електротехническата стомана;
- $S_ш$ - сечение на шунтиращия поток.

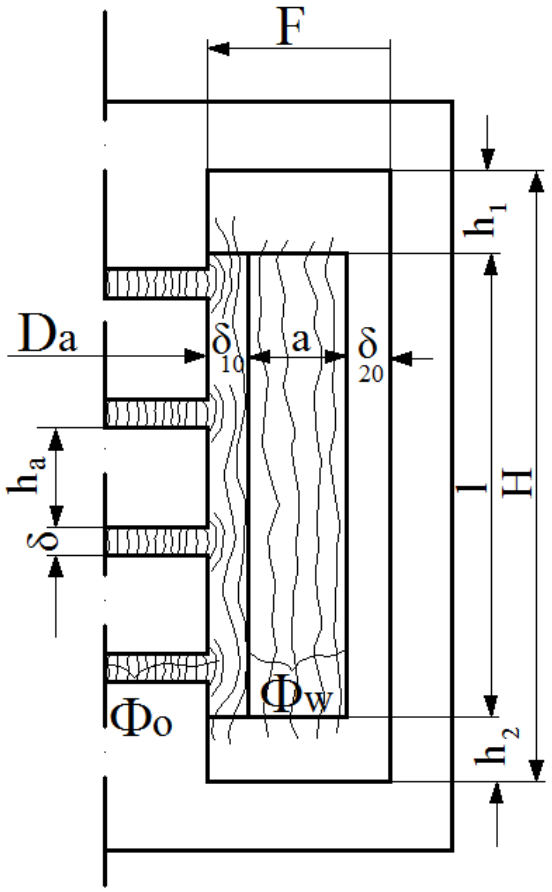


Фиг.2. Трифазен токоограничаващ реактор с въздушни междини

Разпределението на силовите линии на магнитното поле е показано на фиг.4. От фигурата става ясно, че магнитният поток е съставен от две компоненти – една която минава през магнитопровода и втора, която се затваря във въздушна среда. Това от своя страна говори за различни размери на геометричното сечение на магнитните пакети и сечението на немагнитните междини. При това, последното е по-голямо от сечението на феромагнитния пакет.



Фиг.3. Заместваща електрическа схема на еднофазен токоограничаващ реактор



Фиг.4. Шунтиращ поток при еднофазен токоограничаващ реактор

Като се използва заместващата схема на еднофазен шунтиращ реактор за основния магнитен поток, след някои преобразования се извежда:

$$\Phi_a = \frac{\sqrt{2}IwS_\delta \mu_0}{\left[1+\frac{1}{n_\delta.\delta}\left(\delta_\gamma + \frac{\ell_c}{\mu}.\frac{S_\delta}{S_a}\right)\right].n_\delta.\delta}. \qquad (3)$$

Аналогично и за шунтиращия поток се извежда:

$$\Phi_ш = \frac{\sqrt{2}IwS_ш \mu_0}{\ell_ш}. \qquad (4)$$

Окончателно, след заместване на (3) и (4) в (2) за индуктивността на шунтиращия реактор се извежда:

$$L = \mu_0 w^2 \left(\frac{\frac{S_a}{K_{Fe}} + \Delta S_\delta}{\left[1+\frac{1}{n_\delta.\delta}\left(\delta_\gamma + \frac{\ell_c}{\mu}.\frac{S_\delta}{S_a}\right)\right].n_\delta \delta} + \frac{S_ш}{\ell_ш} \right). \quad (5)$$

От последния израз става ясно, че индуктивността на токоограничаващия реактор се определя изцяло от геометричните му размери.

Величината ΔS_δ се нарича допълнително сечение, което е свързано с уширението на пълния магнитен поток, който се развива около немагнитните междини. Той може да се определи чрез геометричните размери на реактора [8]:

$$\Delta S_\delta = \pi D_a.\delta.K_\delta,$$

където D_a е диаметър на ядрото на реактора, K_δ - коефициент зависещ от типа на намотката.

За определяне на сечението на шунтиращия поток се допуска, че магнитното поле в прозореца на магнитопровода има само осово разпределение. Тогава сечението на шунтиращия поток изразено чрез геометричните размери е:

$$S_ш = \frac{\pi}{4}\left[\left(D_a + 2\delta_{10}\right)^2 - D_a^2\right] + \pi\left(D_a + 2\delta_{10} + a\right).\left(\frac{\delta_k}{4} + \frac{a}{3}\right) - 0,75\pi D_a \delta K''_\delta, \quad (6)$$

където K''_δ е коефициент, чиято числена стойност е свързана с типа на намотката.

На практика магнитното поле в прозореца на магнитопровода има както осово , така и радиално разпределение. Практиката показва, че при това положение за дължината на силовата линия на шунтиращия поток може спокойно да се приеме, че е равна на височината на намотката на реактора, т.е. $\ell_ш = \ell$.

Ако (6) се замести в (5) се установява, че индуктивността на шунтиращ реактор се определя като функция на броя на навивките на намотката, нейните геометрични размери, сумарният размер на немагнитните междини, сечението на ядрото и магнитната индукция в стоманеното ядро.

Вижда се, че основното уравнение за оразмеряване на токоограничаващ реактор се явява уравнението за индуктивността. Това налага една част от неизвестните да се приемат за параметри, които да се изменят в определени граници, а други да се определят във функция на тях и зададената индуктивност.

Основна величина, която трябва да се задава и евентуално да се изменя в определени граници е стойността на магнитната индукция в стоманата на ядрото. Това е така, защото при тези реактори се налага ограничението задължително линейност на ампер – веберната характеристика.

Освен това, една величина която също може да се задава е диаметъра на ядрото на магнитопровода. Ако той е известен, то и сечението на ядрото ще бъде определено. При това положение основният магнитен поток също е известна величина. Често на практика при конструиране на реактори, геометричните размери на намотката се изразяват чрез размерите на проводниковия материал. По този начин уравнението се опростява и остава като неизвестна величина броят на навивките.

Уравнението се решава по отношение на броя на навивките, след което може да се определи размерът на единичната немагнитна междина по израза:

$$\delta = \frac{\frac{S_a B_a}{K_{Fe}}\left[\mu_0\left(\sqrt{2}Iw - \ell_c.\frac{B_a}{\mu_0\mu}\right) - K_{Fe}.\delta_\gamma\right]}{n_\delta.S_a.B_a - \mu_0\pi D_a K_\delta\left(\sqrt{2}Iw - \ell_c\frac{B_a}{\mu_0\mu}\right)} . \quad (7)$$

Броят n_δ на немагнитните междини се задава, като се определя по конструктивни и технологични съображения. Като критерий служи минимално допустимата височина на единичния пакет на ядрото.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работата е направен анализ на проблемите при електромагнитно оразмеряване на токоограничаващи реактори, които се използват като шунтиращи при трансформатори с високо първично напрежение. Получени са аналитични изрази, които са по-общи и могат да се използват при проектиране и на други типове токоограничаващи реактори, използвани в различни области на енергетиката.

Аналитичните изрази са пригодени за автоматизирано пресмятане на този тип изделия.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Стойков К. ***Токоограничаващи реактори за електропещни трансформатори***, Годишник на ТУ – София, т.62, кн.3, 2012.

[2] Петров Г. Н., ***Электрические машины.Часть первая-трансформаторы.*** ГЭИ, Москва – Ленинград, 1956.

[3] СтернинВ. Г., А. К.Карпенски. ***Сухие токоограничивающие реакторы*** Энергия, Москва – Ленинград, 1965.

[4] Аншин В. Ш., А. Г. Крайз, В. Г. Мейксон. *Трансформаторы для промышленных электропечей.* Энергоиздат, Москва, 1982.

[5] Стойков К. С. ***"Специални проблеми при проектиране на захранващи устройства за електрически пещи"***. Дисертация, 2012.

[6] Машкилейсон Л. Е., Н. Е.Лысов. ***К расчету коэффициента самоиндукции реакторов без железа.*** Вестник электропромышленности. №3, 1930.

[7] Лейтес Л. В. ***Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов***., Энергия, Москва, 1981.

[8] Манькин Э. А. ***Расчет реакторов со стальным магнитопроводом и зазорами***. Электричество №7, 1959.

[9] Лейтес Л. В. ***Особенности проектирования мощных реакторов для кратковременной работы.*** Электричество №10, 1963, с.67-69, Энергия, Москва, 1981.

Автор: Кирил Стойков, гл.ас. д-р, катедра „Обща електротехника", Технически университет - София, E-mail address: *к_stoykov@tu-sofia.bg*

Постъпила на 18.07.2012 **Рецензент** доц. д-р маг. инж. Симона Петракиева

Годишник на Технически Университет - София, т. 62, кн.3, 2012
Proceedings of the Technical University - Sofia, v. 62, book 3, 2012

ТОКООГРАНИЧАВАЩИ РЕАКТОРИ ЗА ЕЛЕКТРОПЕЩНИ ТРАНСФОРМАТОРИ

Кирил Стойков

Резюме: *В работата се разглеждат въпросите свързани с токоограничаващи реактори използвани във веригата на високото напрежение на електропещните трансформатори. Анализират се само токоограничаващи реактори с феромагнитен магнитопровод и немагнитни междини.*

Ключови думи: *токоограничаващ реактор, индукция, индуктивно съпротивление*

CURRENT – LIMITING REACTORS FOR FURNACE TRANSFORMERS

Kiril Stoykov

Abstract: *In the work some problems related to the current-limiting reactors for the furnace transformers, are discussed. The reactors considered are connected in the high-voltage circuit of the transformer. Only current-limiting reactors with ferromagnetic core are analysed.*

Keywords: *reactor, current – limiting reactors, induction, inductive resistance*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

При захранване на електродъгови пещи с трансформатори с мощност по- малка от 8 MVA, с цел ограничаване на експлоатационните къси съединения, възникващи на вторичната страна на трансформатора, в процеса на стопяване на шихтата се налага включване на устройства, които ограничават тока на късо съединение. Прието е тези устройства да се наричат токоограничаващи реактори. Големият брой експлоатационни къси съединения (достигащ до десетки и стотици само за една плавка) налага да се ограничи кратността на токовете на късо съединение до $3 \div 4$. Използването на тези устройства се налага само в случаите когато индуктивното съпротивление на късата мрежа е сравнително малко. Реакторите се включват последователно към намотка високо напрежение (ВН). Възбуждат се от работния ток на електропещния трансформатор. При изменение на тока се изменя индукцията на магнитното поле и индуктивността на реактора.

В практиката на производство на електропещни трансформатори с токоограничаващи реактори са известни различни конструкции.

© 2012 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

2. ИЗЛОЖЕНИЕ

Сведения за използването на токоограничаващи реактори съществуват още преди 1930г. [5], [2]. Там се обсъжда въпроса за устройства ограничаващи тока на късо съединение в разпределителните мрежи. Разглеждат се реактори без магнитопровод. Анализират се шунтиращите и заземяващите реактори.

Още Максвел е разглеждал въпроса за оптималните съотношения на размерите на въздушен реактор без магнитопровод.

В [8] се анализират основните параметри на токоограничаващи реактори без магнитопровод, като се изхожда от изискването за сериозна електродинамична устойчивост. Пак там се обсъжда и въпроса за активното съпротивление на реактора.

В [1] авторът анализира реактори с феромагнитен магнитопровод. Първите изследвания са върху реактори без въздушни междини. Доказва се, че при този тип реактори за да се извърши ограничение на тока на късо съединение, конструкцията трябва да има много големи размери, т.е. икономически неизгодно. Авторът анализира токоограничаващи реактори с немагнитни междини. Препоръчва се индукцията в магнитопровода да не надвишава 0,7 ÷ 1,2 Т.

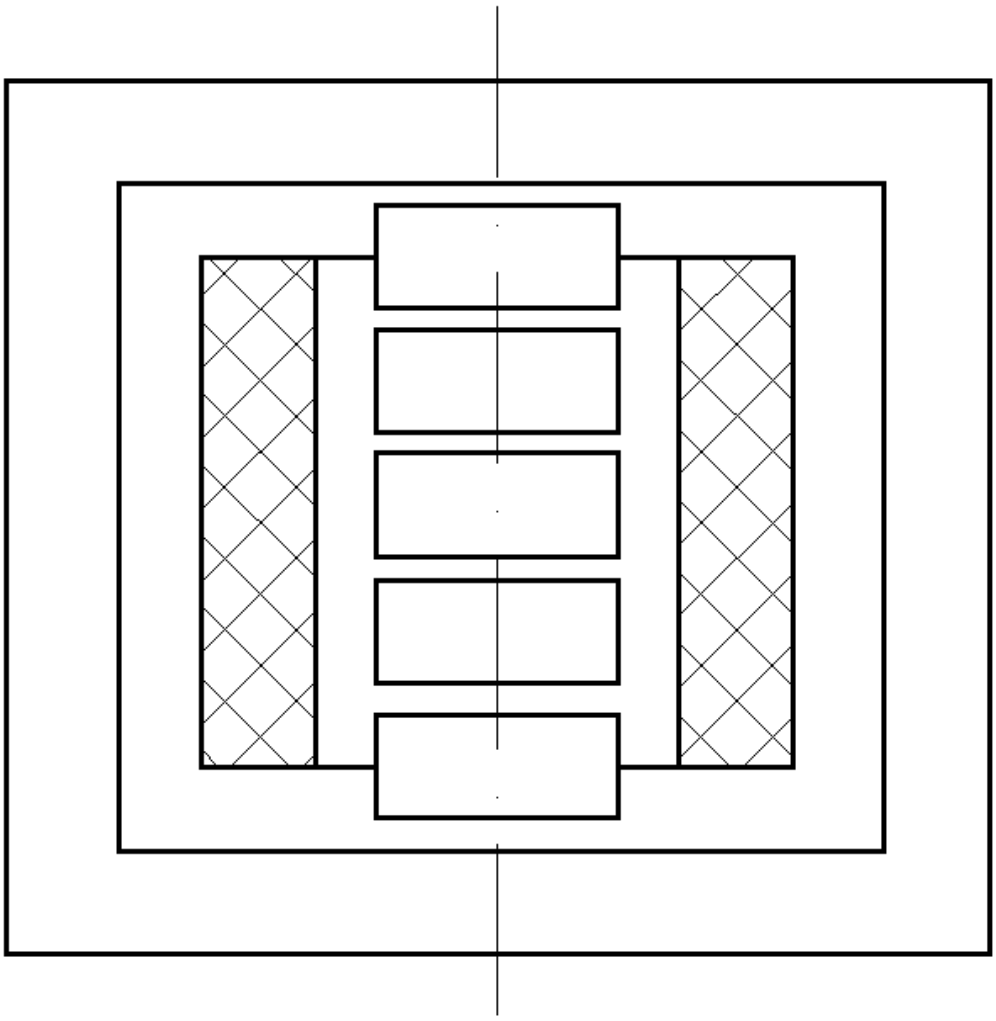
В [3],[5]и[6] се разглеждат съвременни конструкции на токоограничаващи реактори с феромагнитен магнитопровод. Авторите препоръчват кога и как да се използват известните методи за пресмятане на силови трансформатори при анализа и проектирането на реактори. В кои случаи да се използва понятието поле на разсейване при токоограничаващи реактори и кога може да се пренебрегне.

Направените проучвания показват, че съществуващите литературни източници се отнасят само до токоограничаващи реактори без феромагнитен магнитопровод. Не се дават конкретни данни за токоограничаващи реактори намиращи приложение в електротермията.

При захранващите устройства за електродъговите пещи се използват реактори ядрен тип с немагнитни междини и затворена магнитна система. Най-често немагнитните междини са въздушни (въздушните междини са условни, т.к. те се изпълват с подходящ електроизолационен материал – електрокартон, гетинакс и др.). Характерна особеност на токоограничаващите реактори с въздушни междини е това, че имат практически линейна вебер-амперна характеристика до определена стойност на работния ток. Обаче, при стойности на работния ток много по-големи от номиналния настъпва насищане на магнитната верига и силно намаляване на реактивното индуктивно съпротивление, т.е. в такъв режим реакторът не изпълнява своето предназначение. Въпросът с насищането на електротехническата стомана е причината токоограничаващите реактори да са с повишен разход на активни материали, загуби и габаритни размери. Колкото са по-големи изискванията към линейността на вебер - амперната характеристика на токоограничаващия реактор, т.е. колкото е по-голяма кратността на тока при който трябва да се запази линейността, толкова по-ниска трябва да е индукцията избрана за номинален режим.

При разтопяването на шихтата се налага изменение на индуктивното съпротивление на токоограничаващия реактор, а на следващия етап от обработката на разтопения материал той се изключва. Това може да се постигне чрез проектиране и конструиране на подходящи схемни решения. Във веригата на захранващите устройства за електродъгови пещи, това се постига като последователно с намотка високо напрежение се включи токоограничаващ реактор. При такова схемно решение индуктивното съпротивление на токоограничаващото устройство ще зависи само от броя на навивките на намотката и намагнитващия ток, който ще се изменя при различните стъпала на регулиращото устройство. Това е особеност на последователните токоограничаващи реактори.

Ако конструкцията не позволява промяна на работния ток, изменението на индуктивното съпротивление на реактора може да се постигне чрез превключване (включване и изключване) на навивки от намотката му.



Фиг.1. Конструкция на реактор с мантиен магнитопровод

На фиг.1 е показана конструкцията на еднофазен реактор с мантиен магнитопровод.

Тази конструкция намира приложение много рядко (най-често при трансформатори с много малка мощност и сухо изпълнение, т.е. въздушна изолация.

Най-широко приложение намират еднофазните и трифазни реактори с ядрен равнинен магнитопровод – фиг.2 и фиг.3.

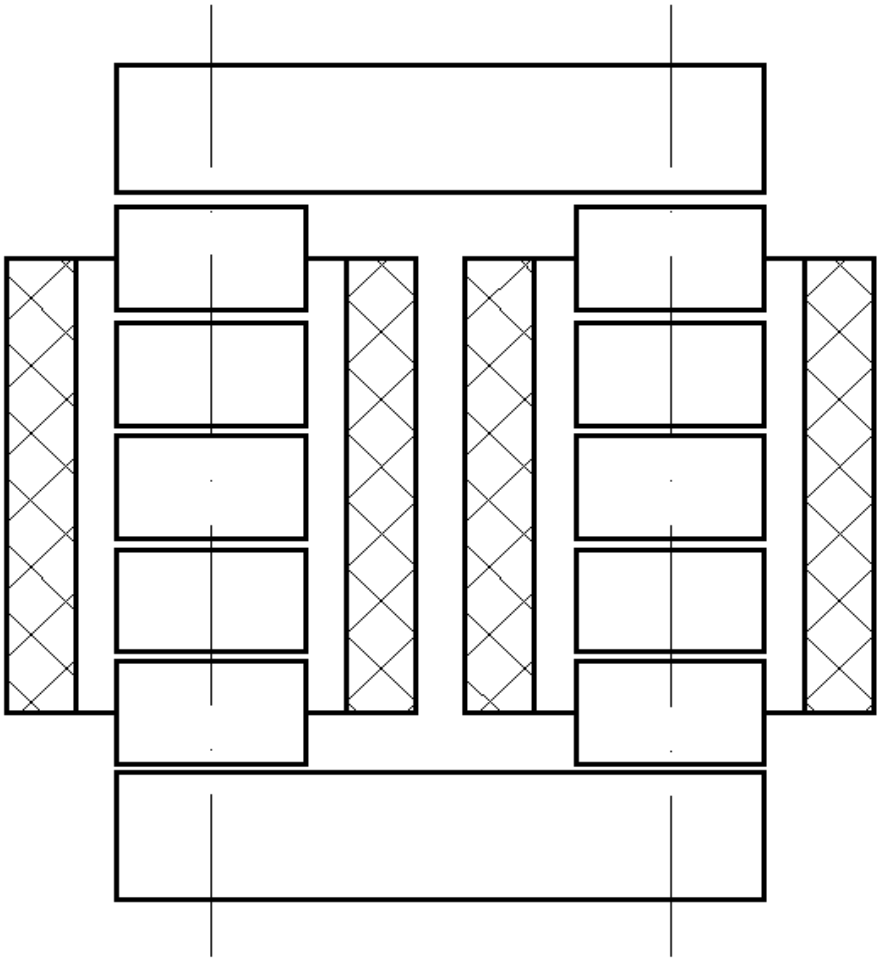
Практиката показва, че при проектирането на токоограничаващи реактори за електропещни трансформатори се поставят определени изисквания:

-да имат линейна “вебер-амперна”харатеристика, т.е. да останат с ненаситена феромагнитна верига при възникване на къси съединения в пещта, респ. индуктивното им съпротивление да остане практически неизменно при кратност на тока $3 \div 3{,}5$;

-да имат достатъчна импулсна, електрическа и електродинамична якост;

- да позволяват регулиране на индуктивното съпротивление, т.е да имат възможност за превключване на навивките на намотката на реактора;

- да позволяват вграждане в казана на електропещния трансформатор, без да се увеличават габаритните размери.

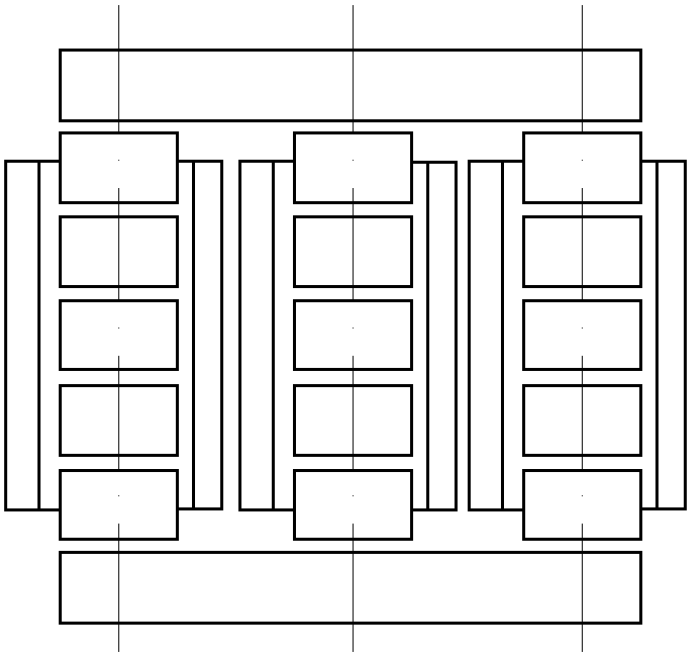


Фиг.2. Конструкция на реактор с равнинен магнитопровод(двуядрен)

За да се удовлетворят горните изисквания обикновено се постъпва така:

1. Феромагнитната верига се изпълнява от студеновалцувана електротехническа стомана с висока магнитна проницаемост и въздушни междини. Магнитната индукция се избира да бъде не по-висока от 0,6 Т при номинален режим на електропещния трансформатор. При късо съединение в пещта, т.е. при разтопяване на шихтата индукцията не превишава $2 \div 2{,}2$Т (с отчитане на очакваната

кратност на токовете на късо съединение). Обикновено при проектирането на токоограничаващи реактори за магнитната верига се избира електротехническа стомана с много висока точка на насищане. Феромагнитните пакети са плоскошихтовани, а вложките които определят немагнитните междини са от немагнитен материал.



Фиг.3. Конструкция на трифазен реактор с равнинен магнитопровод

2. Намотката се избира дискова непрекъсната, която притежава добра импулсна , електрическа, топлинна и електродинамична устойчивост. За да се повиши импулсната якост на дисковата намотка се извършва преплитане на част от секциите на намотката от към края, свързан с линейния извод на трансформатора по който постъпва импулсната вълна.

Проучванията показват, че реакторът влияее върху мълниевите пренапрежения.

3. За да се постигне превключване на навивките на намотката на реактора, при дисковите намотки се използват преплетени дискови секции (фиг.4). При такава конструкция не се образуват големи празнини в дисковата намотка, които биха довели до големи напречни потоци в реактора. На фиг.4 е показана намотка на токоограничаващ реактор използван при електропещен трансформатор с мощност 1000kVA и за трансформатор 750 kVA с преплетени по две секции.

4. Токоограничаващи реактори които ще се вграждат в казана на електропещния трансформатор се избират с магнитна верига от равнинен ядрен тип. Реакторите могат да бъдат в легнало положение, като трите фази са разположени една над друга или в нормално изправено положение. Вариянтът за реактор в легнало положение се изпълнява конструктивно доста трудно и повечето производители го пренебрегват. Вторият вариант води до реално изпълнима конструкция. Разбира се и при него има проблеми защото се получава отклонение от оптималния вариант на изпълнение на реактора , поради необходимостта да се получи относително малък външен диаметър на намотката. Това води до

относително висок магнитопровод с малка стойност на навивковото напрежение, относително голям брой навивки, респ. големи загуби в намотката на реактора, а от там и увеличени загуби на целия електропещен агрегат.

Индуктивното съпротивление на токоограничаващите реактори се определя по методика изложена в [7].

Тук се предлага различен подход от методиката изложена в [7].

Особеното тук е това, че кратността на тока на късо съединение се обуславя от импеданса на електропещния трансформатор z_t, на токоограничаващия реактор z_r и от късата мрежа z_{km}. Обикновено z_t е известна величина. При зададени параметри на късата мрежа може да се определи импеданса на реактора. Често потребителят не задава параметрите на късата мрежа, а се задава мощността на токоограничаващия реактор. Това налага определянето на индуктивното съпротивление на реактора да става чрез спада на напрежението му:

$$\Delta U\,[\,\%] = \frac{P_r}{P_t}.100 \approx \frac{I_\phi X_r}{U_\phi}\,100\ ,$$

където P_r е мощността на реактора, а P_t съответно мощността на трансформатора. Величините I_ϕ и U_ϕ са фазов ток и напрежение, а X_r индуктивното съпротивление на реактора.

Необходимото индуктивно съпротивление ще бъде

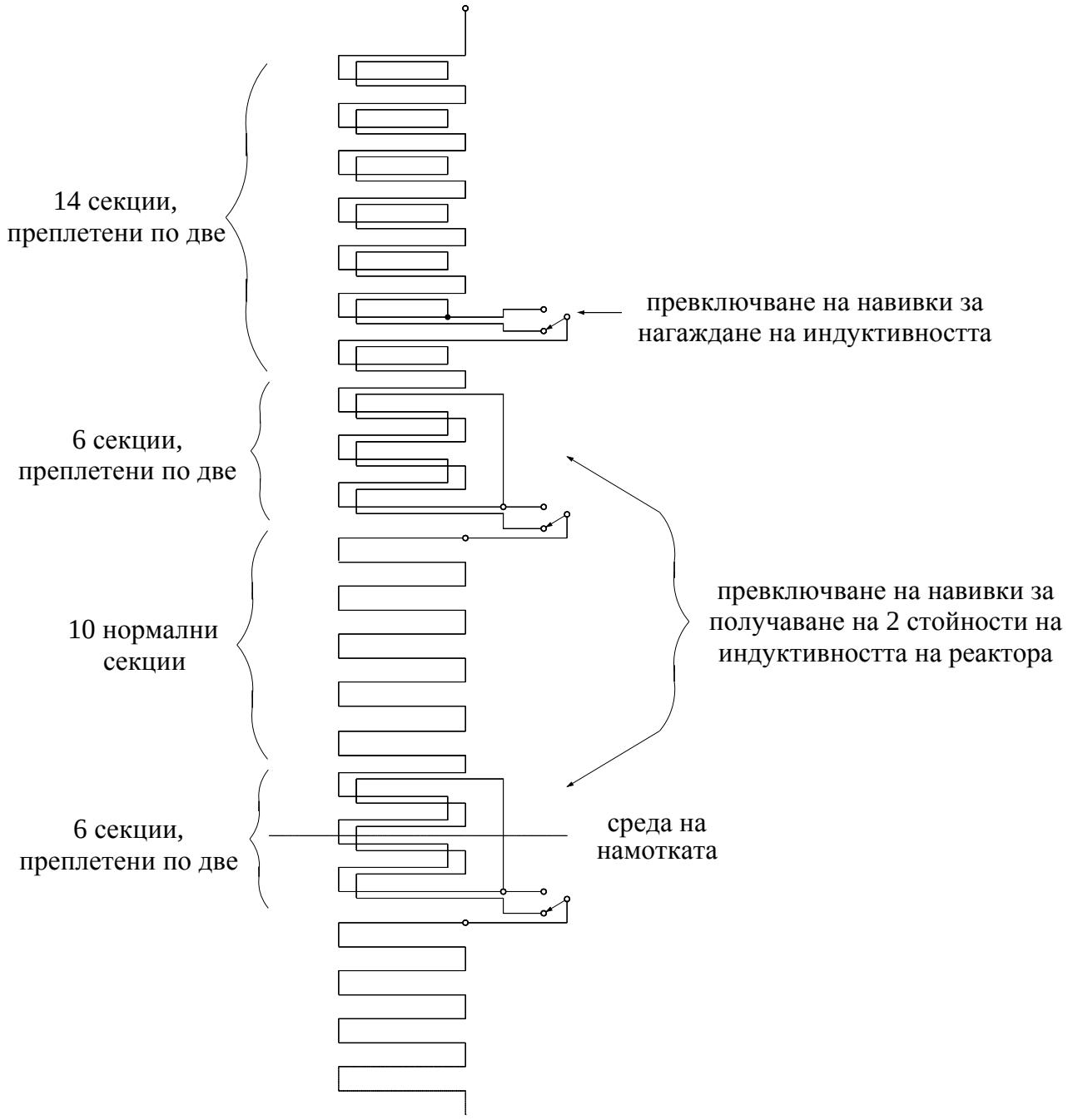
$$X_r = \frac{\Delta U\%}{100}.\frac{U_\phi}{I_\phi},\Omega\ . \quad (1)$$

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА НАМОТКИ ЗА ТОКООГРАНИЧАВАЩИ РЕАКТОРИ

Разработен е реален модел на дискова намотка, която се състои от отделни секции, които позволяват свързване на подходящо избрана клемна дъска. Към всеки проводник е залепен измервателен проводник. Моделът позволява създаване на различни комбинации от последователно свързване на произволен брой секции, включително и преплитане по две и повече секции. Измерванията са извършвани при различен натиск на съединителните пластини и при различни температури.

С помощта на този реален модел се измерват индуктираните е.д.н. и циркулационните токове в отделните паралелни клонове.

Конструктивно може да се постигне такава схема на свързване на дисковете, че при паралелно свързване на отделните клонове протичат товарни токове в различни посоки, т.е. не намагнитват реактора и неговото индуктивно съпротивление е равно на нула. Това положение на токоограничаващите реактори се използва при ограничаване на тока на късо съединение при стъпалните регулатори.



Фиг.4. Схема на преплетена намотка на токоограничаващ реактор

Тъй като експерименталният материал е доста обемист, обработката му е автоматизирана. За целта е създаден алгоритъм в който се определят:

- е.д.н. в контур, образуван от две лежащи една под друга навивки от два съседни диска с номера i и i+1, при това навивките могат да бъдат и противовключени;

-е.д.н. при преплитане на крайните секци по двойки или по повече секции;

-е.д.н. при изключване на навивки от намотката с цел получаване на подходящо индуктивно съпротивление на токоограничаващия реактор. Изчисленията са извършени със софтуерен продукт MATLAB 6.3.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Направен е опит да се обобщят проучванията и експерименталните изследвания върху токоограничаващите реактори с немагнитни междини използвани при електропещните трансформатори за захранване на електродъгови пещи. От направените проучвания следва, че принципът на геометричното подобие е невъзможно да се прилага при токоограничаващи реактори. Понятието типова мощност не може да се приложи към този тип устройства. В практиката се използват различни по тип конструкции. Трудно могат да се намерят близки прототипи.

Ако се използват конструктивни схеми които съчетават двата начина на регулиране на индуктивното съпротивление – чрез изменение на работния ток при постоянно число на броя на навивките и при константен ток и промяна на броя на навивките на намотката, могат да се получат теоретично много голям брой реактори с различни индуктивни съпротивления.

Получен е аналитичен израз за определяне на индуктивното съпротивление на токоограничаващ реактор при зададени мощност на самия реактор и електропещен трансформатор.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Петров Г. Н., ***Электрические машины.Часть первая-трансформаторы.*** ГЭИ, Москва – Ленинград, 1956.

[2] Стернин В. Г.,А. К. Карпенски. ***Сухие токоограничивающие реакторы.***

Энергия, Москва – Ленинград, 1965.

[3] Аншин В. Ш., А. Г. Крайз, В. Г. Мейксон. *Трансформаторы для промышленных электропечей.* Энергоиздат, Москва,1982.

[4] Стойков К. С. ***"Специални проблеми при проектиране на захранващи устройства за електрически пещи"***. Дисертация, 2012.

[5]Машкилейсон Л. Е., Н. Е.Лысов. ***К расчету коэффициента самоиндукции реакторов без железа.*** Вестник электропромышленности. №3, 1930.

[6] Лейтес Л. В. ***Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов***.

Энергия, Москва, 1981.

[7] Манькин Э. А. ***Расчет реакторов со стальным магнитопроводом и зазорами***. Электричество №7, 1959.

[8] Лейтес Л. В. ***Особенности проектирования мощных реакторов для кратковременной работы.*** Электричество №10, 1963, с.67-69.

Энергия, Москва, 1981.

Автор: Кирил Стойков, гл.ас. д-р - катедра „Обща електротехника",Технически университет, София, E-mail address: *к_stoykov@tu-sofia.bg*

Постъпила на 18.07.2012 **Рецензент** Доц. д-р маг. инж. Симона Петракиева

Годишник на Технически Университет - София, т. 62, кн.3, 2012
Proceedings of the Technical University - Sofia, v. 62, book 3, 2012

ОПТИМИЗАЦИЯ НА МЕТОДА НА ХАКИМИ ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ АБСОЛЮТЕН ЦЕНТЪР НА НЕОРИЕНТИРАН ГРАФ

Симона Филипова-Петракиева

Резюме: *В настоящата статия е решена класическата задача за определяне на абсолютен център в неориентиран граф чрез метода на Хакими, като се предлага допълнителна процедура за предварително оценяване на входните данни с цел неанализиране на тези ребра в разглеждания неориентиран граф, върху които със сигурност не лежи абсолютният център и те не влияят върху крайното решение. Подобрената версия на алгоритъма на Хакими е приложена върху реален пример за определяне на положението на склад, снабдяващ множество магазини и гарантиращ минимален сумарен път, който се изминава от доставчика, тръгвайки от склада и преминавайки през всеки от търговските обекти.*

Ключови думи: *абсолютен център на неориентиран граф, метод на Хакими*

OPTIMIZATION OF THE HAKIMI METHOD FOR DETERMINING THE ABSOLUTE CENTER OF THE UNDIRECTED GRAPH

Simona Filipova-Petrakieva

Abstract: *In the work, the problem for determining the absolute center of the undirected graph, using Hakimi method, is solved. The procedure for estimation of the initial data, with respect to reduce the number of analyzed edges, is suggested. This reduction guarantees the fact that the absolute center doesn't belong to the edges eliminated and they haven't influence on the final solution. The improved version of the Hakimi method is applied on the real example for determining the position of the storage, providing trade centers and shops and guarantying the minimum of the total path, from the storage to all of the trading centers considered.*

Keywords: *absolute center of the undirected graph, Hakimi method*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Анализът на задачи от стратегическото планиране е от ключово значение при вземането на правилно решение при управление на дадена фирма. Задачата за избор на стратегии при кооперативни задачи, моделирани с неориентирани графи, е базова задача в това направление [1, 2, 3]. Математически тя се описва чрез неориентиран граф $G = < V,\ L >$, където V е множество от върхове, съответстващи на анализираните системи, а L – множество от ребра, описващи пътната мрежа между тях [4]. Матрицата g е квадратна матрица с размерност $(n \times n)$, де-

© 2012 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

финираща тегловните коефициенти, съответстващи на разстоянията между съответните върхове в графа:

$$g = \left[g\left(V_i,\ V_j\right) \right]_{nxn} = \begin{bmatrix} g\left(V_1,\ V_1\right) & g\left(V_1,\ V_2\right) & \dots & g\left(V_1,\ V_n\right) \\ g\left(V_2,\ V_1\right) & g\left(V_2,\ V_2\right) & \dots & g\left(V_2,\ V_n\right) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g\left(V_n,\ V_1\right) & g\left(V_n,\ V_2\right) & \dots & g\left(V_n,\ V_n\right) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

където елементите по главния и диагонал са $g\left(V_i,\ V_i\right) = 0,\ i = \overline{1,n}$, а останалите са симетрични спрямо него, т.е. $g\left(V_i,\ V_j\right) = g\left(V_j,\ V_i\right)$.

Възможно е елементите $g\left(V_i,\ V_j\right)$ на матрицата g да се коригират във вида $g_i.g\left(V_i,\ V_j\right)$, като се отчитат тегловните коефициенти $g_i,\ i = \overline{1,n}$ на върховете $V_i \in V$. Тези коефициенти отчитат значимостта на всяка от разглежданите системи (респ. върхове в графа), което се взима предвид при бъдеща коалиция.

Забележка: Без да се нарушава общността на разглежданията е прието, че тегловните коефициенти $g_i = 1,\ i = \overline{1,n}$.

Търси се абсолютният център $\hat{V}^{abs}$ (точка върху някое от ребрата на неориентирания граф) и абсолютният радиус $r\left(\hat{V}^{abs}\right)$. (Абсолютният център е пунктът **T** от пътната мрежа, гарантиращ минимум на изследваната целева функция, която е сума от изминатите разстояния.).

2. ДЕФИНИРАНЕ НА ПРОБЛЕМА

Нека разгледаме неориентиран граф $G = < V,\ L >$ с n на брой възли $V_i,\ i = \overline{1,n}$ и съответни дъги $L_s = L_{ij} = \left(V_i,\ V_j\right),\ i, j = \overline{1,n},\ s = \overline{1,m}$. Разстоянията между отделните върхове са дефинирани съгласно матрицата g (ф-ла (1)) и е прието $g_i = 1,\ i = \overline{1,n}$. Целта на решението е да се намери такава точка, лежаща върху някое от ребрата на графа, че тръгвайки от нея да се премине през всички върхове на графа. Целевата функция, която е сумата от изминатите разстояния по ребрата, трябва да бъде минимум.

3. АЛГОРИТЪМ НА ХАКИМИ ЗА РЕШАВАНЕ НА ПРОБЛЕМА

Преди да се премине към описание на алгоритъма на Хакими за намиране на абсолютен център в неориентиран граф е необходимо да се дефинират следните коефициенти, съответстващи на всеки от върховете V_i на графа:

$$d^{+}\left(V_i\right) = \max_{V_j \in V} \left[g\left(V_i,\ V_j\right) \right], \quad (2а)$$

$$d^{-}\left(V_i\right) = \max_{V_j \in V} \left[g\left(V_j,\ V_i\right) \right], \quad (2б)$$

където: $d^{+}\left(V_i\right)$ - външен предавателен коефициент на връх V_i;

$d^{-}\left(V_i\right)$ - външен предавателен коефициент на връх V_i.

Върхът $V_k \in V$, за който е изпълнено условието

$$d^+(V_k) = \min_{V_i \in V}\left[d^+(V_i)\right] = \min_{V_i \in V}\left[\max_{V_j \in V}\left(g(V_i,\ V_j)\right)\right] \tag{3а}$$

се нарича външен център за неориентирания граф, а върхът $V_k \in V$, за който е изпълнено условието

$$d^-(V_k) = \min_{V_i \in V}\left[d^-(V_i)\right] = \min_{V_i \in V}\left[\max_{V_j \in V}\left(g(V_j,\ V_i)\right)\right] \tag{3б}$$

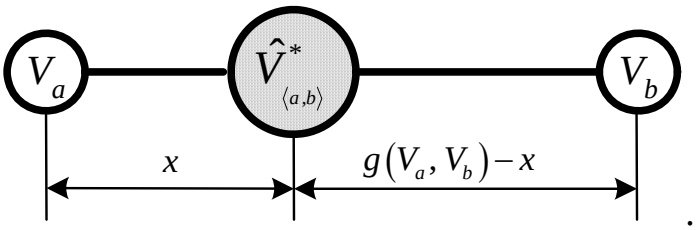
се нарича вътрешен център за неориентирания граф.

Предложеният от Хакими алгоритъм за определяне на абсолютен център в неориентиран граф [5] се състои в следните процедури:

Процедура 1: Върху всяко ребро $L_s = (V_i,\ V_j),\ s = \overline{1,m}$ на неориентирания граф *G* се търси точка (или точки) $\hat{V}_s$, която е най-близо до всички върхове и се нарича локален център за него.

Процедура 2: Определя се множеството $\hat{V}_\Sigma = \left(\hat{V}_{s,i}\right),\ i = \overline{1,m_s}\ (m_s \geq m)$, от което се избира точката, за която коефициентът $d^+(V_s)$ (респ. $d^-(V_s)$) е най-малък, т.е. точката, която е най-малко отдалечена от върховете на анализирания неориентиран граф.

Същността на *Процедура 1* се състои в изследване на отдалечеността на съответната точка (точки) $\hat{V}_s$, лежаща върху произволно избрано ребро $\langle V_a,\ V_b\rangle$, от върховете на неориентирания граф *G* (фиг.1).



Фиг.1

Съгласно (2а) за произволна точка $\hat{V}_s \in \langle V_a,\ V_b\rangle$ се определя:

$$d^+\left(\hat{V}_s\right) = \max_{V_i \in V}\left[g\left(\hat{V}_s,\ V_i\right)\right] = \max_{V_i \in V}\left[\min\left\{\left(g\left(\hat{V}_s,\ V_a\right) + g(V_a,\ V_i)\right);\ \left(g\left(\hat{V}_s,\ V_b\right) + g(V_b,\ V_i)\right)\right\}\right], \tag{4}$$

където $g\left(\hat{V}_s,\ V_a\right)$ и $g\left(\hat{V}_s,\ V_b\right)$ са съответно разстоянията от точка $\hat{V}_s$ до краищата V_a и V_b на реброто $\langle V_a,\ V_b\rangle$, като

$$g\left(\hat{V}_s,\ V_a\right) + g\left(\hat{V}_s,\ V_b\right) = g(V_a,\ V_b). \tag{5}$$

Мястото на точката $\hat{V}_s$ не е точно фиксирано върху реброто $\langle V_a,\ V_b\rangle$, поради което се приема, че разстоянието $g\left(\hat{V}_s,\ V_a\right)$ е променлива величина от вида:

$$g\left(\hat{V}_s,\ V_a\right) = x,\ 0 \leq x \leq g(V_a,\ V_b), \tag{6а}$$

откъдето следва, че

$$g\left(\hat{V}_s,\ V_b\right) = g\left(V_a,\ V_b\right) - x. \qquad (6б)$$

След заместване на (6) в (4) и (5) се получава:

$$d^+\left(\hat{V}_s\right) = \max_{V_i \in V}\left[g\left(\hat{V}_s,\ V_i\right)\right] = \max_{V_i \in V}\left[\min\left\{\left(x + g\left(V_a,\ V_i\right)\right);\ \left(\left(g\left(V_a,\ V_b\right) - x\right) + g\left(V_b,\ V_i\right)\right)\right\}\right]. \qquad (7)$$

За всеки връх $V_i,\ i = \overline{1,\ n},\ i \neq a \neq b$, дефиниран посредством (7), се определя двойка линейни уравнения по отношение на x, където $0 \le x \le g\left(V_a,\ V_b\right)$

$$\left|\begin{array}{l} g\left(V_i\right) = f_i\left(x\right) = g\left(V_a,\ V_i\right) + x \\ g^{'}\left(V_i\right) = f_i^{'}\left(x\right) = g\left(V_a,\ V_b\right) - x + g\left(V_b,\ V_i\right) \end{array}\right., \qquad (8)$$

които се сравняват за дефинирания възможен диапазон на изменение на x от 0 до $g\left(V_a,\ V_b\right)$ и се избира онази част от тях, за която е изпълнено условието:

$$\max_{V_i \in V}\left[\min\left(g\left(V_i\right),\quad g^{'}\left(V_i\right)\right)\right],\ i = \overline{1,\ n}. \qquad (9)$$

Всички точки от окончателната по части линейна функция отговарят на условията (4) и (7). Върху нея се търси точка $\left(g\left(V_i\right),\quad x\right)$, задоволяваща условието (3а) или (3б) и по нея се определя локалният център $d^+\left[\hat{V}^*_{\langle a,b\rangle}\right]$ за реброто $\langle V_a,\quad V_b\rangle$ на анализирания неориентиран граф $G = \langle V,\quad L\rangle$.

Така описаната *Процедура 1* се повтаря за всяко ребро на графа и на втория етап от алгоритъма - *Процедура 2* – от множеството на локалните центрове за всяко от ребрата V_Σ се определя абсолютния център $\hat{V}^*$ съгласно условието:

$$\hat{\rho}^* = d^+\left(\hat{V}^*\right) = \min_{\hat{V}^*_{\langle a,b\rangle} \in V_\Sigma}\left[d^+\left(\hat{V}^*_{\langle a,b\rangle} \in \langle V_a,\quad V_b\rangle\right)\right] \to \hat{V}^*. \qquad (10)$$

4. ОПТИМИЗАЦИЯ НА АЛГОРИТЪМА НА ХАКИМИ ЧРЕЗ ОТСТРАНЯВАНЕ НА "НЕНУЖНИТЕ" РЕБРА В НЕОРИЕНТИРАНИЯ ГРАФ

Предложената оптимизация на описания в предходната точка алгоритъм на Хакими се състои в предварително изключване от процеса на анализ онези ребра от изследвания неориентиран граф, върху които практически не е възможно да се намира търсения абсолютен център. За реализация на така поставената цел се прилага следната процедура:

Процедура 3:

1. За всяко ребро $\langle V_a,\quad V_b\rangle$ от анализирания неориентиран граф се извършва следното.
   1.1. Определят се минималните разстояния от това ребро до всеки от върховете (като се преминава или през V_a или през V_b, в зависи-

мост от това, кой път до съответния връх $V_i,\ i=\overline{1,\ n}$ е минимален), т.е.

$$p_i\left(\langle V_a,\ \ V_b\rangle\right)=\min\left(g\left(V_a,\ V_i\right),\ g\left(V_b,\ V_i\right)\right),\ i=\overline{1,\ n}. \qquad (11)$$

1.2. От така намерените съгласно (11) разстояния се избира максималното, както следва:

$$p\left(\langle V_a,\ \ V_b\rangle\right)=\max_{i}\left[p_i\left(\langle V_a,\ \ V_b\rangle\right)\right] \qquad (12)$$

2. Определя се максимално допустимото разстояние

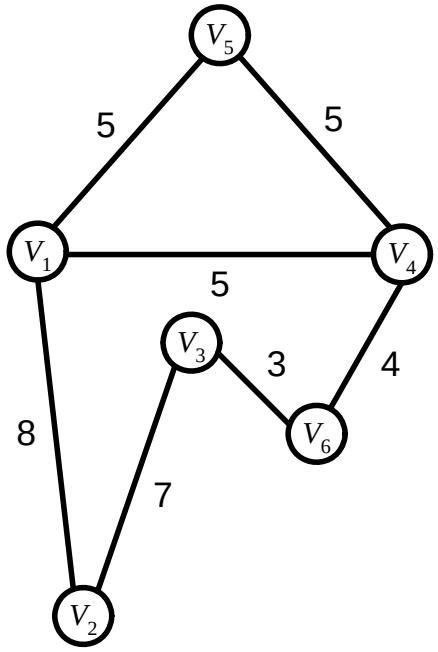
$$H \quad = \quad \min_{\forall\langle V_a,\ \ V_b\rangle\in G}\left[p\left(\langle V_a,\ \ V_b\rangle\right)+\frac{1}{2}g\left(V_a,\ \ V_b\right)\right]. \qquad (13)$$

3. Ребрата с $p\left(\langle V_a,\ \ V_b\rangle\right)>H$ се изключват от разглежданията, тъй като не е възможно върху тях да се намира търсеният абсолютен център на анализирания неориентиран граф.

Той се намира след прилагане на описаните в предходната точка *Процедура 1* и *Процедура 2* от метода на Хакими.

5. ИЛЮСТРАТИВЕН ПРИМЕР

Приложението на подобрения метод на Хакими ще бъде илюстрирано върху следния пример. Фирма е собственик на $N=6$ магазина, разположени в показаната чрез следния неориентиран граф комуникационна мрежа.



Фиг.2

Разстоянията между магазините (в km) са указани в следната табл.1:

Таблица 1

g_i	1	1	1	1	1	1
$g(V_i \setminus V_j)$	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6
V_1	-	8		5	5	
V_2	8	-	7			
V_3		7	-			3
V_4	5			-	5	4
V_5	5			5	-	
V_6			3	4		-

Фирмата желае да построи склад С, който да снабдява със стоки всеки от магазините и е на най-близко разстояние до всеки от тях. Складът трябва да бъде разположен върху ребро от неориентирания граф съгласно показаната на фиг.2 комуникационна мрежа.

Последователността от етапи за решаване на тази задача е следната.

5.1. ОТСТРАНЯВАНЕ НА "НЕНУЖНИТЕ" РЕБРА В РАЗГЛЕЖДАНИЯ НЕОРИЕНТИРАН ГРАФ (Процедура 3):

Целта на този етап е предварително да се освободим от ребрата, върху които практически не е възможно да е разположен търсения абсолютен център на графа. За нейното постигане ще се анализират минималните разстояния от всяко ребро на графа до всички негови върхове $p_i(\langle V_a,\ V_b\rangle)$ съгласно формула (11) (вж. табл. 2).

Таблица 2

$p_i(\langle V_a,\ V_b\rangle)$	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	$p(\langle V_a,\ V_b\rangle)$
$\langle V_1,\ V_2\rangle$	0	0	7	5	5	9	9
$\langle V_1,\ V_4\rangle$	0	8	7	0	5	4	8
$\langle V_1,\ V_5\rangle$	0	8	12	5	0	4	12
$\langle V_2,\ V_3\rangle$	8	0	0	7	12	3	12
$\langle V_3,\ V_6\rangle$	9	7	0	4	9	0	9
$\langle V_6,\ V_4\rangle$	5	10	3	0	5	0	10
$\langle V_4,\ V_5\rangle$	5	13	7	0	0	4	13

От така намерените минимални разстояния се избира максималното $p(\langle V_a,\ V_b\rangle)$, съответстващо на всяко ребро, съгласно (12) (вж. последната колона от табл. 2). Максимално допустимото разстояние H се определя от формула (13) като се отчетат резултатите от таблици 1 и 2, т.е.

$$H = \min\left[(9+4),\ (8+2.5),\ (12+2.5),\ (12+3.5),\ (9+1.5),\ (10+2),\ (13+2.5)\right] =$$
$$= \min[13,\ 10.5,\ 14.5,\ 15.5,\ 10.5,\ 12,\ 15.5] = 10.5$$

Откъдето следва, че ребрата $\langle V_1,\ V_5\rangle$, $\langle V_2,\ V_3\rangle$ и $\langle V_4,\ V_5\rangle$ с коефициенти $p(\langle V_a,\ V_b\rangle) > H$ могат да не се анализират, тъй като не е възможно абсолютният център на графа да се намира върху някое от тях, защото в противен случай складът няма да бъде разположен максимално близко до всеки от магазините, които ще снабдява.

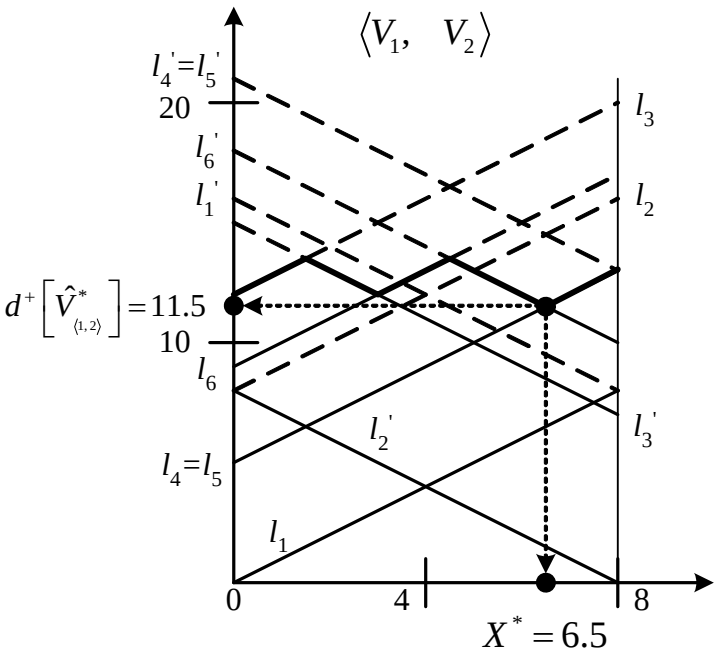
5.2. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ЛОКАЛНИТЕ ЦЕНТРОВЕ $\hat{V}_s$ ЗА ВСЯКО ОТ АНАЛИЗИРАНИТЕ РЕБРА ($\langle V_1,\ V_2\rangle$,$\langle V_1,\ V_4\rangle$,$\langle V_3,\ V_6\rangle$ И $\langle V_6,\ V_4\rangle$) НА НЕОРИЕНТИРАНИЯ ГРАФ (Процедура 1):

В табл.3 са показани зависимостите (8) - $g(V_i)$ и $g'(V_i)$, $i=\overline{1,6}$ - съответстващи на върховете на ребрата на анализирания неориентиран граф.

Таблица 3

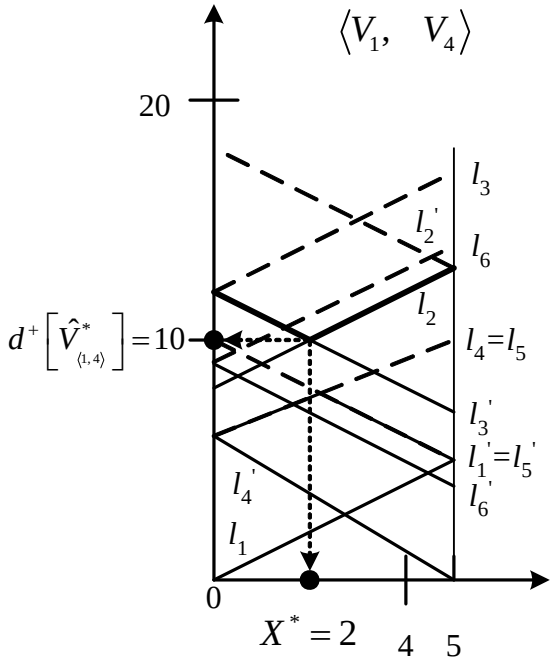
V/L	$\langle V_1,\ V_2\rangle$	$\langle V_1,\ V_4\rangle$	$\langle V_3,\ V_6\rangle$	$\langle V_6,\ V_4\rangle$
V_1	$l_1:\ f_1=x$ $l_1':\ f_1'=16-x$	$l_1:\ f_1=x$ $l_1':\ f_1'=10-x$	$l_1:\ f_1=12+x$ $l_1':\ f_1'=12-x$	$l_1:\ f_1=9+x$ $l_1':\ f_1'=9-x$
V_2	$l_2:\ f_2=8+x$ $l_2':\ f_2'=8-x$	$l_2:\ f_2=8+x$ $l_2':\ f_2'=18-x$	$l_2:\ f_2=7+x$ $l_2':\ f_2'=13-x$	$l_2:\ f_2=10+x$ $l_2':\ f_2'=17-x$
V_3	$l_3:\ f_3=12+x$ $l_3':\ f_3'=15-x$	$l_3:\ f_3=12+x$ $l_3':\ f_3'=12-x$	$l_3:\ f_3=x$ $l_3':\ f_3'=6-x$	$l_3:\ f_3=3+x$ $l_3':\ f_3'=11-x$
V_4	$l_4:\ f_4=5+x$ $l_4':\ f_4'=21-x$	$l_4:\ f_4=5+x$ $l_4':\ f_4'=5-x$	$l_4:\ f_4=7+x$ $l_4':\ f_4'=7-x$	$l_4:\ f_4=4+x$ $l_4':\ f_4'=4-x$
V_5	$l_5:\ f_5=5+x$ $l_5':\ f_5'=21-x$	$l_5:\ f_5=5+x$ $l_5':\ f_5'=10-x$	$l_5:\ f_5=12+x$ $l_5':\ f_5'=12-x$	$l_5:\ f_5=9+x$ $l_5':\ f_5'=9-x$
V_6	$l_6:\ f_6=9+x$ $l_6':\ f_6'=18-x$	$l_6:\ f_6=9+x$ $l_6':\ f_6'=9-x$	$l_6:\ f_6=3+x$ $l_6':\ f_6'=3-x$	$l_6:\ f_6=x$ $l_6':\ f_6'=8-x$

По тях се определят (съгласно (9)) локалните центрове $\hat{V}_s$, съответстващи на разглежданите ребра, както следва:



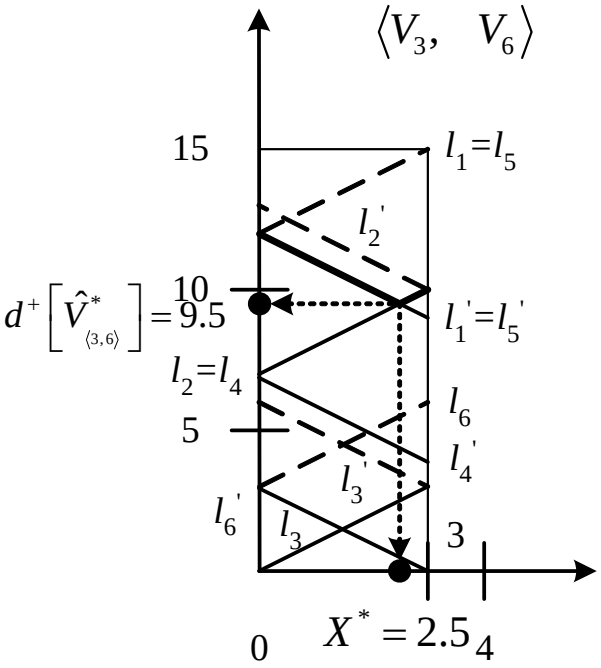
$\hat{V}^*_{\langle 1,2\rangle}$ е на разстояние 6.5 от връх V_1 и

$d^+\left[\hat{V}^*_{\langle 1,2\rangle}\right]=11.5$



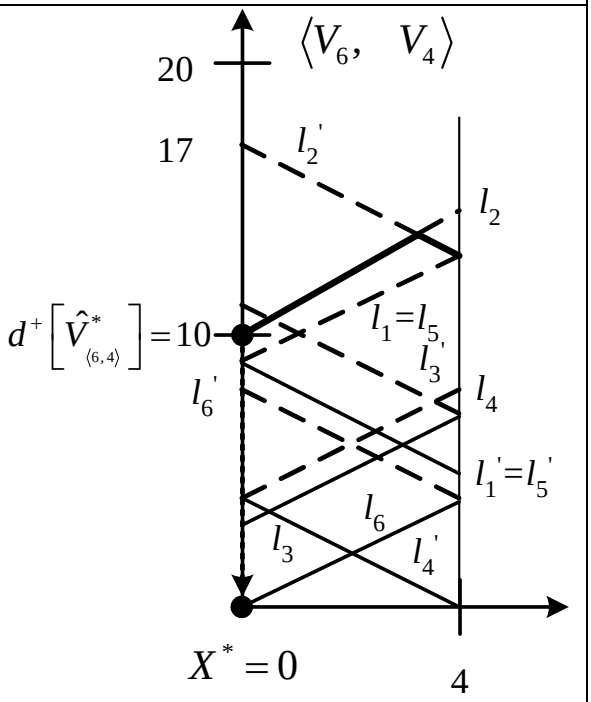
$\hat{V}^*_{\langle 1,4\rangle}$ е на разстояние 2 от връх V_1 и

$d^+\left[\hat{V}^*_{\langle 1,4\rangle}\right]=10$



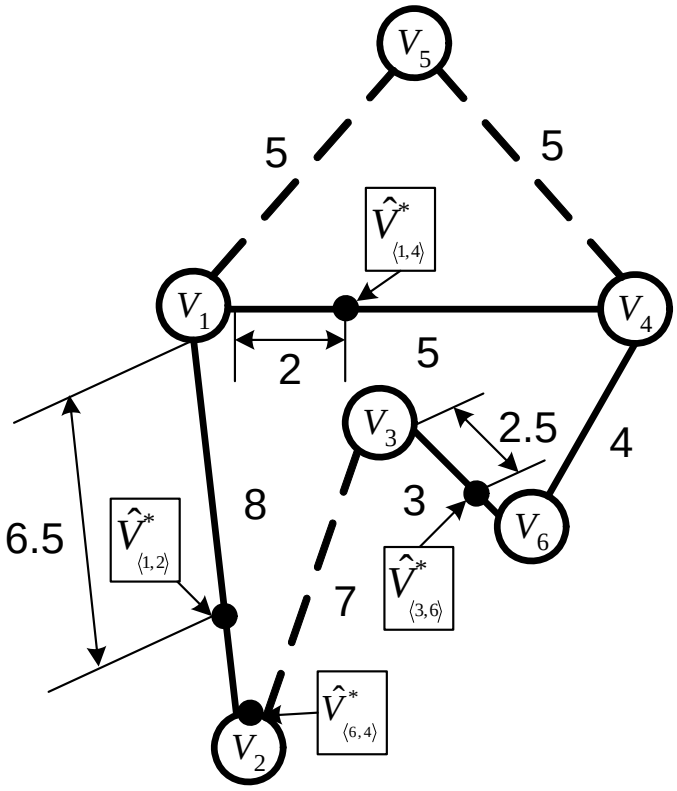
$\hat{V}^*_{\langle 3,6\rangle}$ е на разстояние 2.5 от връх V_3 и

$d^+\left[\hat{V}^*_{\langle 3,6\rangle}\right]=9.5$



$\hat{V}^*_{\langle 6,4\rangle}$ е на разстояние 0 от връх V_6 и

$d^+\left[\hat{V}^*_{\langle 6,4\rangle}\right]=10$



Фиг.3

5.3. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА АБСОЛЮТНИЯ ЦЕНТЪР В АНАЛИЗИРАНИЯ НЕОРИЕНТИРАН ГРАФ (Процедура 2):

Разположението върху ребрата на неориентирания граф на така получените локални центрове е показано на фиг.3. На базата на тази информация се определя абсолютният център на графа, прилагайки (10):

$$\hat{\rho}^* = d^+\left(\hat{V}^*\right) = \min\left[11.5,\quad 10,\quad 9.5,\quad 10\right] \rightarrow \hat{V}^*_{\langle 3,6\rangle} = \hat{V}^*.$$

Следователно икономически най-изгодно за фирмата ще бъде да построи склада върху реброто $\langle V_3,\quad V_6\rangle$ на разстояние 2.5 km от връх V_3.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящата статия е решена задачата за определяне на абсолютен център в неориентиран граф чрез прилагане на метода на Хакими. Предложена е допълнителна процедура за предварително оценяване на входните данни с цел неанализиране на тези ребра в разглеждания неориентиран граф, върху които със сигурност не лежи абсолютния център и те не влияят върху крайното решение. По този начин броят на изчисленията значително намалява, което опростява и улеснява анализа. Подобрената версия на алгоритъма на Хакими е приложена върху реален пример за определяне на положението на склад, снабдяващ множество магазини. Мястото на склада гарантира минимален сумарен път, който се изминава от доставчика, тръгвайки от склада и преминавайки еднократно през всеки от търговските обекти.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Таха, Х. А., ***Введение в исследование операции***, Седмое издание, Москва, изд. Вильямс, 2005, 903 стр., ISBN 5-8459-0740-3

[2] Yu, P. L., ***Forming Winning Strategies: An integrated Theory of Habitual Domains***, New York, Springer Verlag, 1989.

[3] Сапунджиев, Г. Н., ***Стратегическо управление при конфликт и при коалиция***, С., Изд. Технически университет, 2003.

[4] Емеличев, В., О. Мельников, В. Сарванов, Р. Тыкевич, ***Лекции по теории графов***, М., Наука, 2000.

[5] Кристофидес, Н., ***Теория графов. Алгоритмический подход***, Москва, МИР, 1978, 432 стр.

Автори: Симона Филипова-Петракиева, доц. д-р катедра “Теоретична електротехника”, Факултет “Автоматика”, Технически Университет - София, E-mail address: *petrakievas-te@tu-sofia.bg*

Постъпила на 28.04.2012 **Рецензент** проф. д-р В. Младенов

Годишник на Технически Университет - София, т. 62, кн.3, 2012
Proceedings of the Technical University - Sofia, v. 62, book 3, 2012

ЗАГУБА НА ЯДРЕНИ ЗНАНИЯ – ОЧАКВАНИ ЗАТРУДНЕНИЯ И ВЪЗМОЖНИ ПОДХОДИ ЗА ТЯХНОТО ПРЕОДОЛЯВАНЕ

Калин Филипов

Резюме:*Разгледани са проблемите, свързани със съхранението на знанията и в частност проблемите, които произтичат от загубата на ядрените знания. Изложени са стратегиите, предприети от някои държави със силни икономики във връзка с необходимостта от запазване на ядрените знания. Обобщени са най-добрите практики, свързани с управлението на ядрените знания. Разгледани са проблемите на съхранението на ядрените знания в България.*
Ключови думи:*съхранение на знания, управление на ядрени знания, управление на знания, университет, държавен орган, квалифицирани кадри*

NUCLEAR KNOWLEDGE LOSS - ANTICIPATED DIFFICULTIES AND POSSIBLE APPROACHES TO OVERCOME THEM

Kalin Filipov

Abstract: *Problems with the knowledge preservation are discussed and in particular issues arising from the nuclear knowledge loss. Exposed are the strategies taken by some countries with strong economies in relation to the need to preserve nuclear knowledge. Summarized are the best NKM practices. Discussed are the problems of preservation of nuclear knowledge in Bulgaria.*

Keywords: *knowledge preservation, nuclear knowledge management, knowledge management, university, government, professionals*

1. СЪХРАНЕНИЕ И ПРЕДАВАНЕ НА ЗНАНИЯТА

Управлението на знанията представлява интегриран систематичен подход за определяне и идентифициране, придобиване, трансформиране, създаване, разпространение, употреба, споделяне и съхранение на практическите знания с цел постигане на специфични цели. Управлението на знанията помага на организациите да се развият, усъвършенстват и обучат благодарение на собствения си опит. Специфичните дейности в областта на управлението на знанията помагат на организациите да усвоят, съхранят и използват знанието. Знанието от своя страна позволява разбирането и правилното интерпретиране на специфичната информация. Често знанията са свързани с конкретна личност или с конкретна дейност. Могат да бъдат дефинирани два типа знания – явни и неявни. Явните знания позволяват сравнително лесно да бъдат документирани и съхранени. Не така обаче стои въпросът с неявните скрити знания. Те представляват знания и

© 2012 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved
ISSN 1311-0829

практически умения, които принадлежат на отделен индивид. Това прави изключително трудно тяхното определяне, съхранение и предаване. Явните знания могат да бъдат съхранени във вид на документи, чертежи, изчисления, проекти, бази данни, ръководства и така нататък. За разлика от тях, неявните знания често са придобити от конкретна личност в резултат на собствения й практическия опит. Те се съхраняват единствено в съзнанието на човека и поради тази причина не могат да бъдат записани и размножени. Ако такъв процес се реализира, то тогава скритите знания вече придобиват явен характер. Други съществени затруднения, свързани с неявните знания, представляват правилното определяне на точните носители на знанията и правилното уточняване на необходимите знания. Обикновено знанията от този тип се предават от човек на човек при личен контакт (съзнателно или несъзнателно) и тяхната природа не позволява документиране под каквато и да е форма. Неявните знания имат жизнена роля в науката.

Същността на неявните знания и на тяхното предаване и съхранение налага да се обръща специално внимание на управлението на работната ръка в специфичните области, където съществува риск от загуба на знания. В тези случаи е необходимо да се извършва добро предварително планиране, да се създават тренировъчни програми и обучения за персонала и като цяло да бъде изградена фирмена политика за управление на знанията.

От изключителна важност е своевременно да бъде установен рискът от загуба на специфични знания. Това включва правилното определяне на носителите на критични знания, категоризиране и класифициране на знанията и определяне на възможните решения. Необходимо е това да стане преди възможността за предаване на знанията да бъде загубена.

2. УПРАВЛЕНИЕ НА ЯДРЕНИТЕ ЗНАНИЯ

Ядрената енергетика е сравнително нов клон от промишлеността, създаден от военната индустрия, който, поради своята специфика, в ранните години е бил развиван изключително в затворени общества. В този смисъл съществува реален риск от загуба на ядрени знания, което би довело до значителни затруднения за организациите, експлоатиращи ядрени съоръжения.

От една страна в подобни структури съществува голям набор от недокументирани знания, тъй като много от експлоатираните съоръжения са първи по рода си. Дори и да съществуват подобни съоръжения, много често за конкретната държава или за конкретната експлоатираща организация наборът от ядрени съоръжения е сравнително малък, особено например в сравнение със съоръженията от конвенционалната енергетика. Въвеждането в експлоатация на подобен род оборудване винаги е свързано с придобиването на практически опит и недокументирани познания в много голям обем. Освен това, относително слабото разпространение на ядрените съоръжения определя и дългите срокове, необходими за създаване на кадри с добра професионална подготовка.

От друга страна, почти навсякъде по света, началото на интензивното развитие на ядрената енергетика е по едно и също време – 70-те и 80-те години на дваде-

сети век. По това време се създават много работни места и се натрупват големи количества от знания – както явни, така и неявни. В годините след аварията в АЕЦ „Чернобил“ се наблюдава значителен отлив от ядрената енергетика и някои държави временно преустановяват или дори напълно прекратяват програмите си за развитие на ядрени мощности. Това довежда както до преминаване на голяма част от квалифицираната работна ръка към други сектори, така и до значително намаляване на желаещите реализация в областта, съответно намаляване и на постъпващите на работа млади работници.

Относително малката възраст на ядрения отрасъл води и до още един силно нежелан ефект – значителна част от професионалистите с висока квалификация, които са участвали едновременно в етапите на изграждането, въвеждането в експлоатация, а след това и експлоатацията на съоръженията, днес са в близка до пенсионната възраст, което ще доведе до рязък спад в броя на заетите специалисти в ядрения сектор.

Проблемът, свързан със запазване на знанията, в наши дни е общ за всички области на науката и промишлеността. Съвкупността от горните ефекти определя необходимостта от предприемане на специални мерки по отношение на запазване конкретно на ядрените знания поради големия риск от тяхната загуба и голямата цена, която бихме платили, ако това се случи.

Съхранението на ядрените знания изисква ресурси и то не само материални. Необходимо е създаването на държавна политика, която да следва тази насока, тъй като тук става въпрос за продължителен процес, а не за еднократен акт. Подобна политика е създадена в много държави, които експлоатират ядрени съоръжения. Програма за съхранение на ядрените знания се изгражда също така и в държави, които вече са преустановили плановете си за експлоатиране на ядрени мощности. Това е така, тъй като дори и след прекратяване на експлоатацията на ядрените съоръжения, следва продължителен период, свързан с извеждането им от експлоатация и управление на радиоактивните отпадъци, генерираните както по време на експлоатацията, така и след това, в етапите на извеждането от експлоатация.

Следващите няколко примера демонстрират доколко значителен може да бъде подобен проблем, дори и за силни икономики на държави като Китай, Германия и САЩ, които търпят развитие.

В Китай интензивното икономическо развитие през последните години води след себе си до значително повишаване на нуждите от електроенергия. Днешните планове са за разширяване на енергопроизводството до 40000 MW през 2020 година, съчетано с построяването на поне един блок от 1000 MW годишно. Това изисква значителни инвестиции в ядрената безопасност, инфраструктурата и човешките ресурси, които трябва да бъдат оптимизирани, за да е възможно постигането на бързото и икономически изгодно строителство на нови ядрени мощности. За целите на строителството и на експлоатацията на новите ядрени електроцентрали се очаква да бъдат разкрити приблизително 12000 нови работни места за квалифициран персонал. Този персонал ще заеме работни позиции, които се намират в нови ядрени електроцентрали, поради което няма да

има възможност да наследи скритите познания на експлоатиращ персонал с опит. От съществена важност след вземе ще бъде осигуряването на условия този нов персонал да предаде уменията си на следващото поколение.

В Германия политическото решение за прекратяване на експлоатирането на ядрени енергийни мощности нанесе значителни последствия върху сегашното и бъдещото състояние на пазара за специализирана работна ръка от областта на ядрената енергетика. Първият удар от това решение се поема от университетите и другите академични институции, които обучават висококвалифицирани кадри за нуждите на ядрената енергетика. Съвсем разбираемо, веднага след приемането на подобно решение, броят на записалите се за обучение в специалностите от областта на ядрената техника и ядрена енергетика в университетите рязко намалява. В допълнение, немалка част от вече заетите в ядрения сектор професионалисти започват да търсят и намират реализация в други географски региони или в други области на промишлеността. Комбинирането на тези фактори с неизбежното пенсиониране на голяма част от персонала води до сериозен недостиг на кадри както към момента, така и в бъдеще. Това от своя страна се отразява на плановете и възможностите за извеждане от експлоатация на ядрените мощности. Освен това, все още не са дефинирани алтернативи на ядрените мощности, които да компенсират тяхното отпадане от енергийната система. Загубата на ядрени знания и на квалифициран персонал обаче ще се отрази сериозно на възможността за удължаване на срока на експлоатация на ядрените съоръжения, което евентуално би се наложило, докато бъдат изградени алтернативни съоръжения, които да заместят ядрените електроцентрали. Ситуацията в Германия е различна от тази в Китай, но проблемът е общ и намирането на решение и за двете страни има общ корен.

В САЩ въпросът дали да се строят нови ядрени мощности изглежда ясен и не се дискутира. Обществената нагласа е положителна, включително и настроенията на екологичните организации. През 2005 година Патрик Мур, сочен като един от основателите на организацията Грийнпийс, завява „Ядрената енергия е единственият възможен източник на чиста електроенергия, произведена без отделяне на въглеродни емисии, която адекватно може да задоволи сегашните и бъдещите нужди на икономическия растеж, без значително да въздейства на околната среда“. Подобни изказвания от защитниците на околната среда помагат значително за развитието на преговорите и вземането на решения за използването на ядрената енергия. Допълнителен тласък в развитието решенията за експлоатиране на ядрената енергия дават и някои събития, като например отпадането на електрозахранването през 2003 г., което засяга над 55 милиона души в САЩ и Канада и ураганът Катрина, който, освен инфраструктурата, засяга и производствените мощности на нефтопреработвателните предприятия в Мексиканския залив. Очакваното строителство на нови ядрени мощности, в съчетание с увеличаването на срока на експлоатация на голяма част от старите съоръжения, неминуемо ще доведе до значителен дефицит на кадри със специална подготовка. В САЩ допълнително влияние оказва и още един фактор – в близкото минало част от служителите с висока квалификация са били чужденци, привле-

чени от перспективите за развитие и високите технологии. Днес обаче много страни развиват собствени съвременни технологии и голяма част от висококвалифицираните кадри предпочитат да бъдат в родината си.

3. ДОБРИТЕ ПРАКТИКИ

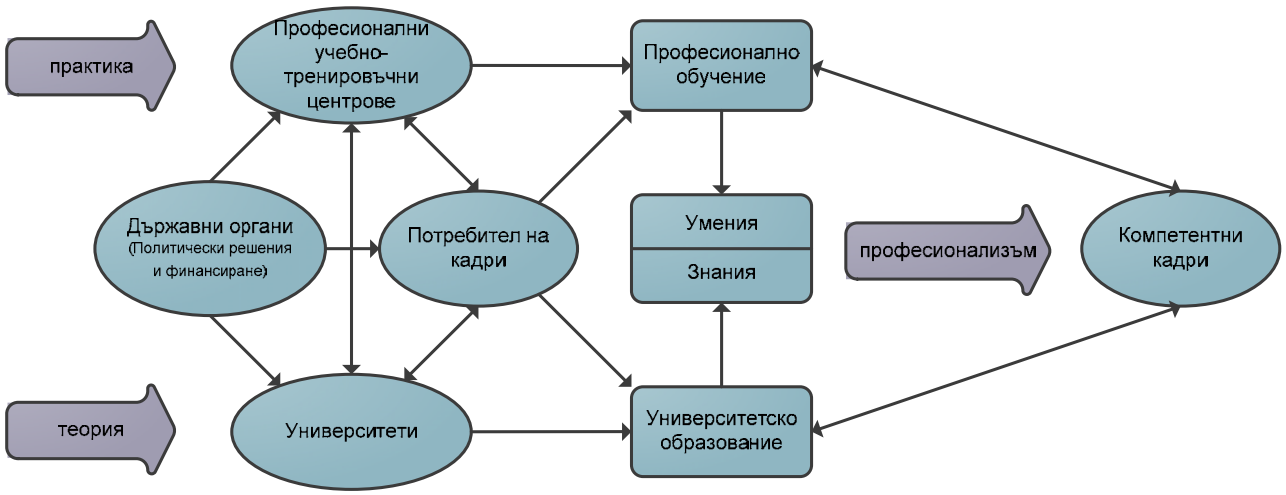
Към момента в света се експлоатират 436 ядрени реактора, разположени в 30 държави. Освен тях се експлоатират още около 400 ядрени плавателни средства и 300 изследователски реактора в 50 държави. В допълнение има други държави, които възнамеряват да стартират своя ядрена програма за да повишат енергийната си независимост и да осигурят икономическия си растеж. Съществуват и държави, които възнамеряват да експлоатират само изследователски реактори. Тяхното приложение може да бъде за производство на изотопи за целите на диагностичната медицина и лечение на ракови заболявания, за целите на обучението, като източник на неутрони и много други.

Работещите в ядрената област трябва да преминат през специализирано обучение. Това не се отнася само за професионалистите, които експлоатират ядрените съоръжения, а и за допълнителен широк кръг от професионални дейности в индустрията, правителствените организации, регулаторните органи и университетите. Нивото и типът на работата определят нивото и съответно продължителността на обучението. Високата компетентност на всеки един зает в ядрения сектор е условие за безопасна експлоатация на ядрените съоръжения и осигуряване на защита на персонала, населението и околната среда.

В стратегическите дейности, свързани със съхранение на ядрените знания, участват редица организации. Един опростен модел може да бъде представен като взаимодействие и близко сътрудничество между държавните организации, академичната общност и индустрията.

Ролята на държавните структури е да осигурява политически решения и финансова средства, за да подкрепя дейностите на индустрията и научните организации. Взаимодействието между трите основни участника в стратегията – държавните структури, индустрията и университетите, може да бъде в най-разнообразна форма и степен, но при всички положения основна роля имат политическите действия. Решенията на държавните организации моментално рефлектират върху останалите участници и върху общото развитие на ядрения сектор. Първите организации, които променят дейността си спрямо тези решения, са университетите и другите обучаващи институции – изменението в броя на обучаваните води и до изменение в учебните програми и предлагани възможности. Следващата структура, повлияна от решенията на държавната политика е индустрията, която е основен потребител на кадрите, произвеждани от образователните институции.

На фиг.1 е представена зависимостта между трите организации.



Фиг.1. Взаимовръзки между основните организации, които участват в процеса на запазване на ядрените знания

Първото звено, върху което трябва да се взаимодейства, е академичната общност. По този начин ще се повиши качеството на завършващите обучението си млади специалисти, които след това могат да намерят реализация в сферата на образованието или в индустрията. Въздействието върху второто основно звено – индустрията, главно се изразява в повишаване на квалификацията и провеждане на професионално обучение на вече заетите специалисти.

Сътрудничеството между трите организации се определя като решаващо както за повишаване на качеството на обучението, така и за привличането на талантливи млади специалисти. Близките взаимоотношения между образователните институции и индустрията са от особена важност поради няколко причини. От една страна, знанията и уменията на завършващите студенти могат да отговарят по-точно на нуждите на потребителите на кадри, при което те ще инвестират по-малко време и средства в професионалното обучение, което може вече да бъде насочено конкретно към спецификата на работното място. От друга страна, с помощта на индустрията, могат да бъдат създадени практически и стажантски програми, да бъдат осигурени целенасочени стипендии и съвместни изследователски проекти. Добра практика е също така и участието на кадри от страна на индустрията като преподаватели в университетите.

4. СИТУАЦИЯТА В БЪЛГАРИЯ

България е държава с традиции в областта на ядрената енергетика и ядрените изследвания. През 1961 г. е пуснат в експлоатация изследователският реактор ИРТ-2000, а през 1974 г. започва да работи и ядрената електроцентрала АЕЦ „Козлодуй“. До 1982 г. са инсталирани четири блока от типа ВВЕР-440, а в периода 1988-1993 г. са пуснати в експлоатация още два блока с реактори ВВЕР-1000. Освен АЕЦ „Козлодуй“, през 1981 г., е взето решение за изграждане и на втора атомна електроцентрала – АЕЦ „Белене“. Проектът преминава през различни етапи, като през 1990 г. временно е спрян, през 2002 г. отново е възстановен, през 2006 г. площадката на АЕЦ е лицензирана от АЯР, а през

2012 г. е взето решение за прекратяване на строителството. Днес вече се говори за строителство на нова ядрена мощност – блок 7 в АЕЦ Козлодуй.

Без значение какво решение ще бъде взето, България е ядрена държава и ще бъде такава през следващите десетилетия. Най-песимистичният вариант за ядрената енергетика у нас е да се прекратят окончателно плановете за изграждане на нови мощности в АЕЦ „Белене“ и АЕЦ „Козлодуй“, да не се осъществи изграждането на изследователския реактор в ИЯИЯЕ към БАН и да не се удължи срокът за експлоатация на блокове 5 и 6 в АЕЦ „Козлодуй“. Дори и да се намерят технологични и екологични алтернативи на произвежданата от АЕЦ „Козлодуй“ електроенергия и да бъде взето решение за прекратяване на експлоатирането на ядрените мощности, предстои един сравнително дълъг период от време, свързан с извеждането от експлоатация на шест ядрени енергийни блока в АЕЦ „Козлодуй“ и един изследователски реактор в ИЯИЯЕ към БАН. Само по себе си извеждането от експлоатация представлява мащабна дейност, а извеждането на шест блока и един изследователски реактор, спрени по различно време, изисква значителни ресурси – не само финансови, но и човешки и времеви. Като допълнение трябва да се добави и необходимостта от изграждане на ново хранилище за съхранение на радиоактивни отпадъци и продължаващото експлоатиране и евентуално преструктуриране и модернизиране на вече съществуващите.

През годините плановете за ядрената енергетика в България са се изменяли многократно, но неведнъж е дискутирана възможността за изграждането на блокове 7 и 8 в АЕЦ „Козлодуй“, както и удължаване на срока на експлоатация на блокове 5 и 6. Едновременно с това, въпреки днешното решение на държавно ниво, не бива да се изключва и възможността за строителство на втората ядрена електроцентрала АЕЦ „Белене“.

Всичко казано дотук потвърждава, че дори и в най-песимистичния вариант, необходимост от висококвалифицирани професионалисти от областта на ядрената енергетика ще съществува още десетилетия. За съжаление у нас, както и в почти всички други места по света, броят на ядрените специалисти е близко до критичния минимум. През последните години се заговори за предстоящия проблем и се предприеха различни дейности, свързани със съхраняване на ядрените знания. В резултат на това бяха постигнати известни резултати, но същественото е, че липсва трайна стратегия и тези резултати имат временен характер. Най-разпространеният и опростен модел за изграждане на стратегия за съхранение на ядрените знания, който включва в себе си трите основни организации – държавните институции, университетите и потребителите на кадри, у нас не е завършен и все още не функционира.

Между академичната общност и индустрията съществуват определени взаимоотношения. Основният израз на взаимоотношенията представляват стажантските програми и специализиращите практики, където сътрудничеството е на много високо ниво, но трябва да се потърсят и някои от другите форми на взаимодействие.

Що се отнася обаче до основата в изложения модел – подкрепата на държавните институции и изграждането на обща държавна политика – предложените решения и постигнатите резултати са незначителни.

Част от ефектите, породени от крехките взаимоотношения, е неравномерният характер на броя на обучаващите се за оператори на ядрен енергиен блок в АЕЦ „Козлодуй“. И докато към днешна дата съществува излишък на кадри, в миналото е имало периоди, когато ситуацията е изглеждала коренно различна. Съществени затруднения, свързани с недостиг на професионалисти, ще възникнат при евентуалното строителство на нови ядрени мощности или при удължаване на срока на експлоатация на настоящите, в съчетание с необходимостта от извеждане на първите четири блока на АЕЦ „Козлодуй“.

ЛИТЕРАТУРА

[1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Status and Trends in Nuclear Education, IAEA Technical reports, No. NG-T-6.1, IAEA, Vienna (2011)

[2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Management System for Facilities and Activities, IAEA Safety Standards Series No. GS-R-3, IAEA, Vienna (2006)

[3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Application of the Management System for Facilities and Activities, Safety Standards Series No. GS-G-3.1, IAEA, Vienna (2006)

[4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Knowledge Management for Nuclear Industry Operating Organizations, IAEA-TECDOC-1510, IAEA, Vienna (2006)

[5] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Managing Nuclear Knowledge IAEA Proceedings, STI/PUB/1266, ISSN: 0074-1884, IAEA, Vienna (2006)

[6] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The nuclear power industry’s ageing workforce: transfer of knowledge to the next generation, IAEA-TECDOC-1399, IAEA, Vienna (2004)

[7] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Nuclear Power Plant Organization and Staffing for Improved performance: Lessons learned, IAEATECDOC-1052, IAEA, Vienna (1998)

[8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Risk Management of Knowledge Loss in Nuclear Industry Organizations, STI/PUB/1248, IAEA, Vienna (2006)

Автор: Гл. ас. д-р Калин Боянов Филипов, катедра „Топлоенергетика и ядрена енергетика“, Технически Университет - София, 02 965 2297; E-mail address: *filipov@tu-sofia.bg*

Постъпила на 18.07.2012 **Рецензент** проф. д-р Владимир Велев

Годишник на Технически Университет - София, т. 62, кн.3, 2012
Proceedings of the Technical University - Sofia, v. 62, book 3, 2012

ТЕРМИЧНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ЛЕТЯЩА ПЕПЕЛ ОТ ИЗГАРЯНЕТО НА ЛИГНИТНИ ВЪГЛИЩА В ТОПЛОЕЛЕКТРИЧЕСКА ЦЕНТРАЛА

Силвия Бойчева

Резюме: *Настоящата статия е част от задълбочено изследване върху състава,структурата и свойствата на летяща пепел, получена като минерален остатък от изгарянето на лигнитни въглища в топлоелектрическа централа, уловена в електрофилтрите на прахоулавящата инсталация. Представени са резултати за термичните характеристики на проби летяща пепел, получени чрез диференциално-термичен анализ. При термичната обработка са регистрирани следните характеристични температури: температура на размекване на аморфната фаза - T_g= 265 °C, кристализация на две фази – T_{cr1}=508 °C и T_{cr2}=627 °C и термично разлагане при T_m=564 °C. Установените термични ефекти са дискутирани във връзка със състава и кристалографията на изследваната летяща пепел.*
Ключови думи: *термични характеристики на летяща пепел, диференциално-термичен анализ, оползотворяване на летяща пепел*

THERMAL CHARACTERISTICS OF FLY ASH FROM THE INCINERATION OF LIGNITE COALS IN A THERMAL POWER PLANT

Sylvia Boycheva

Abstract: *The present paper is a part of comprehensive studies on the composition, structure and properties of fly ash, obtained as a mineral byproduct from the incineration of domestic lignite coals in a Thermal Power Plant and collected in the electrostatic precipitators at the dust collecting installation. Results for the thermal characteristics of fly ash samples measured by differential thermal analysis are presented. The following characteristic temperatures were registered during the performed thermal treatment: transition temperature of the amorphous phase - T_g= 264.64 °C, crystallization of two phases – T_{cr1}=507.93 °C and T_{cr2}=620.77 °C and thermal decomposition at T_m=563.90 °C. The observed thermal effects were discussed in relation with the composition and the structure of the investigated fly ash.*
Keywords: *thermal characteristics of fly ash, differential-thermal analysis, fly ash utilization*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

При изгарянето на въглища, минералната маса в състава им се модифицира при температурите в пещната камера с формиране на пепелен остатък. Една част от пепелта остава на дъното на горивната камера във вид на агломерати с размери

© 2012 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved
ISSN 1311-0829

0,15 до 20,00 mm (дънна пепел), а фината фракция се унася с димния газ в резултат на тягата в горивната инсталация, т.нар. летяща пепел. Съставът и количеството на летящата пепел се изменя в широки граници в зависимост от състава на минералната маса на въглищата, вида на горивната уредба и организацията на горивния процес. При инсталациите с прахово изгаряне количеството й достига до ~ 90 % от негоримия остатък.

В общия случай летящата пепел (ЛП) представлява фин прах със смесена аморфно-кристална структура, в състава на който се включват макрокомпоненти, като аморфен силициев диоксид (a:SiO_2), аморфни и кристални алумосиликати, както и други кристални фази като кварц (α-SiO_2), брушит ($CaPO_3(OH).2H_2O$), хематит (α-Fe_2O_3), магнетит (γ-Fe_3O_4), оксиди на алкалните и алкалоземните метали, микроколичества от оксиди на преходни метали и широка гама от трасиращи елементи [1,2].

Пред вид състава й ЛП може да се разглежда като алумо-силикатна суровина и в тази връзка са изследвани различни възможности за оползотворяването на пепелта от изгарянето на въглища, които са систематизирани на фиг.1.

Фиг.1. Възможности за оползотворяване на летящата пепел от изгарянето на въглища.

Депонирането на ЛП създава редица проблеми, поради неблагоприятната й стойност на pH и съдържанието на тежки метали, които се инфилтрират в почвите и подпочвените води.

На основата на ЛП се разработват сорбентни материали, които се характеризират с висок сорбционен капацитет спрямо редица замърсители от газови и течни среди, такива като газообразни киселинни оксиди (SO_x, NO_x), тежки метали

(Hg), органични циклични въглеводороди, неорганични замърсители (фосфати, халогениди, бор), както и пестициди, оцветители др. [3,4].

ЛП с високо съдържание на аморфни алумо-силикати е подходящ изходен материал за получаването на синтетични зеолити, характеризиращи се със силно развита специфична повърхност и дефиниран размер на порите [5,6]. Високото съотношение Al(III)/Si(IV) в състава на тези синтетични зеолити определя високия йонообменен капацитет на някои зеолитни форми, като NaP1, 4A, X, KM, F, кабазит, хершелит и фуджасит, които се прилагат успешно в очистването на кисели отпадъчни води от миннодобивната промишленост и почви от тежки метали [7]. Видът на получената зеолитна форма и диаметърът на структурните празни пространства могат да бъдат управлявани посредством прецизирането на съотношението ЛП/алкален сорбент, изборът на подходяща комбинация от алкални сорбенти, оптималната процесна температура и налягането, както и прилагането на съвременни технологии за активация на хидро-алкалната конверсия. Възможностите за контролиран синтез разкриват нови перспективни приложения на зеолитите на основата на летяща пепел като молекулни сита за селективно улавяне на компоненти от смесени газови потоци въз основа на разликите в диаметъра на молекулите им.

Понастоящем оползотворяването на ЛП от ТЕЦ у нас не е намерило мащабни технологични приложения, въпреки големия дял на произвежданата топлинна и електрическа енергия от изгарянето на твърди горива. По данни на ECOBA (European Coal Combustion Products Association) произведеното количество пепелен отпадък в Европа през 2011 г. възлиза на 44 млн.t., 50 % от които се оползотворяват в недотам ефективните приложения в строителната индустрия, рехабилитацията на минини, изграждането на пътни настилки и запълването на терени и само 1 % се използва за извличане на дефицитни продукти и получаването на материали с висока практическа стойност. Ефективното оползотворяване на ЛП ще осигури икономия на редица природни ресурси и повишаване на екологията на свързаните технологии.

Представеното изследване е част от задълбоченото проучване на състава, структурата и физико-химичните свойства на летяща пепел, получена от изгарянето на местни въглища в ТЕЦ в Р. България с оглед търсенето на възможности за оползотворяването на този отпадъчен продукт [8,9].

Статията акцентира върху изследването на термичните свойства на летяща пепел, получена от изгарянето на лигнитни въглища от басейн “Марица-изток”, чрез диференциално-термичен анализ с цел определяне на характеристичните температури на фазовите превръщания и оптималния температурен интервал за термична обработка и активация на този материал и подходящите условия за конвертирането му чрез твърдофазен синтез.

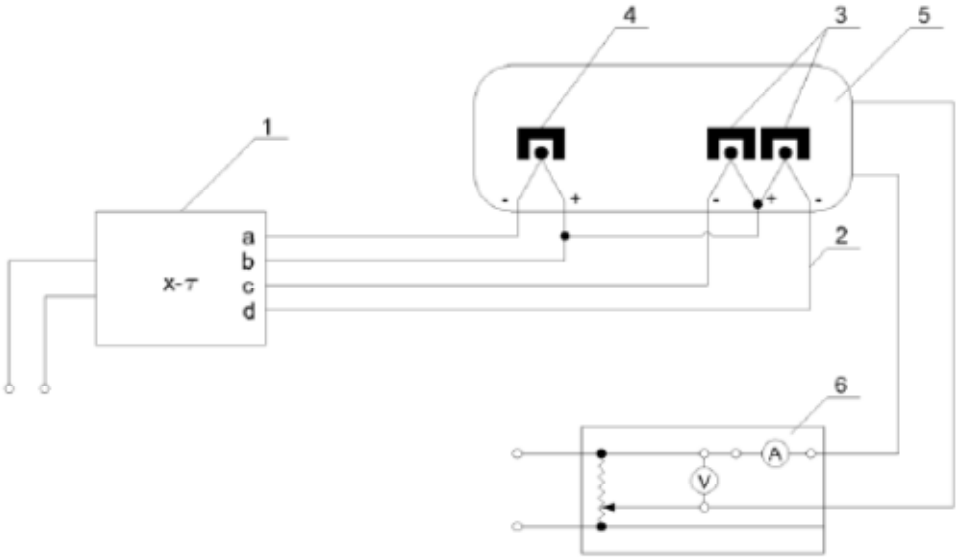
2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ПРОЦЕДУРИ

Изследвани са термичните характеристики на летяща пепел, взета като средна проба от електрофилтрите на ТЕЦ “Марица-изток 2” към котел No.9.

Измерването на характеристичните температури е проведено чрез диференциално-термичен анализ (ДТА) в апаратура от типа F.Paulik-J.Paulik-L.Erday,

MOM-Hungary. Принципната схема на апаратурата за провеждане на ДТА е представена на фиг.2.

При този метод се нагряват едновременно два образеца – единият от изследвания материал, а другият е еталонен. Изменението на температурата в двата образеца се регистрира чрез диференциална термодвойка, състояща се от две термодвойки, съединени с едноименните си краища, а свободните им - са включени към прибор, регистриращ е.д.н. във веригата. Едната спойка на тази комбинирана термодвойка се намира в изследваното вещество, а другата - в еталонното. Ако изследваният материал не претърпява химични или физични превръщания в определен температурен интервал, резултантното е.д.н. е нула, а диференциалният запис е права линия. При отделяне или поглъщане на топлина, в резултат на термично превръщане в изследвания образец, неговата температура се отклонява от тази на еталона, като знакът на регистрираното резултантно е.д.н. се определя от екзотермичността или ендотермичността на топлинния ефект.



Фиг.2. Принципна схема на апаратура за ДТА: 1-X-τ записвач; 2-комбинирана термодвойка; 3-кварцови тигли с изследваните проби; 4-тигел със стандартен образец; 5-термостатиращ блок; 6-регулиращ блок (латер, волтметър и амперметър).

Ендотермичните ефекти върху ДТА-кривата могат да бъдат предизвикани от термична дисоциация с отделяне на газова фаза (дехидратация, декарбонизация), химично разлагане, полиморфно превръщане, топене (конгруентно и инконгруентно) и др., а екзотермичните се свързват с полиморфни превръщания, кристализация на преохладени стопилки и стъкла, хемисорбция и др.

Основно изискване към еталонното вещество е отсъствие на каквито и да е фазови превръщания в изследвания температурен интервал, както и неговата топлопроводност и топлинен капацитет да бъдат близки до тези на изследваното вещество. За целите на настоящето изследване като еталонно вещество беше използван накален γ-Al_2O_3. Еталонът и изследваната проба бяха нагрявани в специални кварцови съдчета (съдчета на Степанов), които бяха оставени открити предвид очакваното високо съдържание на абсорбирани газови продукти в

летящата пепел. Беше спазено изискването дисперсността на пробата и еталона, формата и размерът на тиглите, степента на уплътняване на веществата, както и количествата им да бъдат относително еднакви.
Резултатът от ДТА е представен във вид на термограми - криви на нагряване и от вида $\Delta T = f(\tau)$ и $\Delta T_e = f(\tau)$, където: τ е времето на нагряване, а ΔT е разликата между температурите на образеца (T_x) и еталона (T_e). Чрез сравняване на кривите $\Delta T = f(\tau)$ и $T_e = f(\tau)$ бяха определени температурите на фазовите превръщания в изследвания материал.

3. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИИ

3.1. Състав и кристалография на изследваната летяща пепел

Проведените предварителни изследвания върху състава и кристалографията на летящата пепел от електрофилтрите на ТЕЦ "Марица-изток 2" показват, че тя се характеризира със смесена аморфно-кристална структура в съотношение 43/57 mass %. В състава й са идентифицирани четири основни кристални фази α-SiO_2, брушит, α-Fe_2O_3 и мулит. Аморфната фаза е съставена основно от a:SiO_2 и стъклообразни алумосиликати [10]. Количественият анализ показва съдържание на 52.66 mass % SiO_2, 23.37 mass % Al_2O_3, 8.72 mass % Fe_2O_3, и по-малки количества от алкални и алкалоземни оксиди. Количеството на съдържащите се кристални фази е обобщено в табл.1.

Таблица 1.

Вид и съдържание на кристалните фази в състава на летяща пепел от източно-маришки въглища.

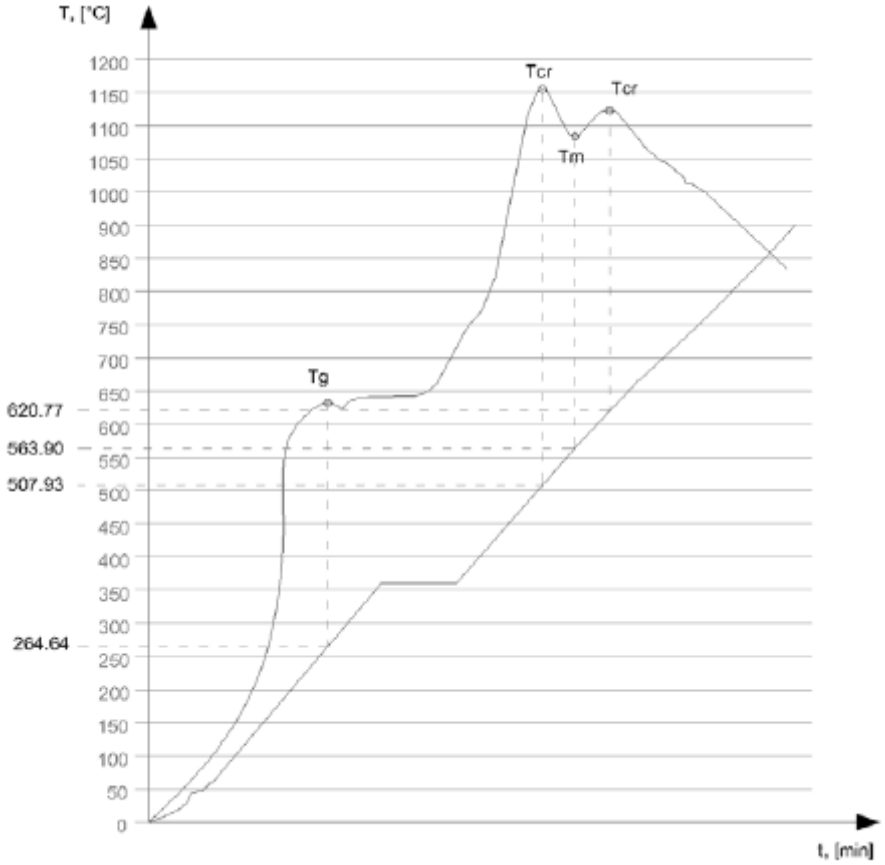
Компонент	Съдържание на кристалните фази, mass %
Кварц (α-SiO_2)	19
Брушит ($CaPO_3(OH).2H_2O$)	14
Хематит (α-Fe_2O_3)	9
Мулит ($Al_2O_3.2SiO_2$)	8
Други	7

Според гранолуметричния анализ изследваната летяща пепел се състои от частици с размери между 125 и 250 μm, а плътността й, определена по хидростатичен метод, е ~3.07 g/cm^3. Изследваната ЛП е предимно силикатен и алумосиликатен материал, който според международния кристалографски стандарт ASTMC-168 се отнася към клас F. Въз основа на този състав е проведен опит за алкално-термична конверсия в зеолитна форма, като условията на експеримента и резултатите от него са описани в [11].
Предвид комплексния състав на летящата пепел и наличието на множество кристални фази, интерпретацията на резултатите от диференциално-термичния анализ е невъзможна без предварителното охарактеризиране на пепелта.

3.2.Термични характеристики на летящата пепел

Експерименталната термограма на изследваната проба летяща пепел, получена от X-τ записвача на апаратурата за ДТА, е представена на фиг.3.

След мащабиране и изчисляване на характеристичните температури в съответствие с особеностите на използваната апаратура са получени резултатите, представени в табл.2.



Фиг.3. Експериментална термограма на изследваната летяща пепел.

Върху термограмата на ЛП ясно се регистрират четири ефекта: първият е с малък интензитет и размит макисмум, като тази особеност върху ДТА-кривите обикновено се асоциира с температурата на размекване на наличната аморфна и стъклообразна фаза, означавана като T_g. Тази стойността на термичния ефект съответства на температурата, при която се разкъсват около 5 % от химичните връзки в структурата на веществото при неговото нагряване. Поради това, че в аморфните и стъклообразните вещества дължината и енергията на химичните връзки не е еднаква, както е при кристалните, то термичният ефект няма изразен остър максимум. Тъй като температурата на размекване на чистия аморфен силициев диоксид T_g е висока (за чистия SiO_2 T_g=1450 K), то регистрираната от термограмата сравнително ниска стойност на T_g (таблица 3) съответства на температурата на размекване на смесените аморфни алумосиликати, което е в потвърждение за алумосиликатния състав на аморфната съставляваща на летящата пепел. Причината за това, че енергията на връзките (енергията, необходима за разрушаване на химичната връзка), изграждащи SiO_2, -Si-O-Si-, е значително по-висока от тази на –Al-Si-O- в смесените алумосиликати.

Температурата на размекване на летящата пепел е важна нейна характеристика показваща интервала на нейната термична стабилност и технологичната температура, оптимална за синтеза на алумо-силикатни сорбенти чрез твърдофазни

реакции. Последните се провеждат при температури надвишаващи тази на размекване на аморфната фаза в състава на ЛП и по-ниски от температурата на кристализация.

Таблица 2.

Характеристични температури на ЛП, получени чрез ДТА-анализ

Температурен ефект	Вид на ефекта	Означение	Стойност
Температура на размекване на аморфната фаза	Промяна в наклона или малка особеност върху термограмата	T_g	265 °C
Температура на кристализация на аморфната фаза	Екзотермичен ефект	T_{cr1}	508 °C
Температура на топене или разлагане на фаза от състава на ЛП	Ендотермичен ефект	T_m	564 °C
Температура на последваща кристализация	Екзотермичен ефект	T_{cr2}	621 °C

Третият ефект съответства на ендотермичен процес, който може да е топене или разлагане на някоя от съставящите фази. Като се имат предвид високите температури на топене на компонентите на ЛП, представени в табл.3, по-вероятно е този ефект да е свързан с разлагане на най-нестабилната фаза и това е брушит.

Таблица 3.

Температури на топене на съставните компоненти на летящата пепел

Компонент	Температура на топене, °C	Компонент	Температура на топене, °C
SiO_2	1715	Na_2SiO_3	875
Al_2O_3	2045	K_2SiO_3	975
TiO_2	1840	$Al_2O_3\,Na_2O\,6SiO_2$	1100
Fe_2O_3	1565	$Al_2O_3\,K_2O\,6SiO_2$	1150
CaO	2520	$FeSiO_3$	1145
MgO	2800	$CaO\,Fe_2O_3$	1250
Na_2O	сублимира при 1275	$CaO\,MgO\,2SiO_2$	1390
K_2O	разлага се при 350	$CaSiO_3$	1540

Брушитът е термически нестабилна фаза и се разлага на няколко етапа в температурния интервал 450 – 650 °C, трансформирайки се последователно в калциев ортофосфат и калциев пирофосфат по схемата:

$$CaHPO_4 \rightarrow Ca_2(P_2O_7) \rightarrow Ca_3(PO_4)_2 \qquad (1)$$

Вторият и четвъртият ефект съответстват на екзотермични реакции, като възможните такива в случая са кристализацията на фаза от аморфната маса или началното формиране на кристални зародиши за частична кристализация до получаването на кристално-аморфни алумосиликати. По-високата кристализационна

температура T_{cr2} се свързва с формирането на кристални фази от типа: $CaAl_2SiO_6$. И двата екзотермични ефекта не са с остър максимум, което означава наслагаване на ефектите на повече от един кристализационен процес, твърдофазна реакция или многостепенно протичане на процесите.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В резултат на проведения диференциално-термичен анализ на летяща пепел, получена от изгарянето на лигнитни въглища в ТЕЦ "Марица-изток 2" са установени следните термични характеристики: температура на размекване на аморфната фаза T_g= 265 ^oC, формиране на нови кристални фази при температури – 508 ^oC и 621 ^oC и разлагане на кристалната фаза брушит при 564 ^oC. Резултатите от термичните изследвания са в добро съответствие с тези от химичния и структурния анализ на пепелта.

Термичното изследване показва най-благоприятен температурен интервал за твръдофазен синтез на алумо-силикатни материали на основата на изследваната летяща пепел – 265 - 500 °C и термична активация на този материал до температури под температурата на размекване, т.е. по-ниски от 265 °C.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Monte M. D., Sabbioni C. (1984), ***Morphology and Mineralogy of Fly Ash from a Coal-Fueled Power Plant***, Arch. Met. Geoph. Biocl., Ser. B 35, pp. 93-104.

[2] White S. C., Case E. D. (1995), *Characterization of fly ash from coal-fired power plants*, Journal of Material Science, vol. 25, pp. 5215-5219.

[3] Sakulpitakphon, T., Hower J.C., Trimble A.S., Thomas G.A. (2000), ***Mercury capture by fly ash: Study of the combustion of a high-mercury coal at a utility boiler***, Energy&Fuels, vol.14 (3), pp.727-733.

[4] Ahmaruzzaman M. (2010), ***A review on the utilization of fly ash***, Progress in Energy and Combustion Science, vol. 36, pp. 327–363.

[5] Moreno N., Auerol X., Ayora C., Pereira C.F., Janssen-Jurkovicova M. (2001), *Utilization of Zeolites Synthesized from Coal Fly Ash for the Purification of Acid Mine Waters*, Environ. Sci. Technol., vol. 35, pp. 3526-3534.

[6] Inada M., Tsujimoto H., Eguchi Y., Enomoto N., Hojo J. (2005), ***Microwave- assisted zeolite synthesis from coal fly ash in hydrothermal process***, Fuel, vol. 84, pp.1482-1486.

[7] Cama J., Ayora C., Querol X., Ganor J. (2005), ***Dissolution Kinetics of Synthetic Zeolite NaP1 and Its Implication to Zeolite Treatment of Contaminated Waters***, Environ. Sci. Technol., vol. 39, pp. 4871-4877.

[8] Жеглова А., Колева М., Василев В., Бойчева С., Първанов С. (2007), ***Електрофизични характеристики на полимерни композити, съдържащи отпадни прахове от енергопроизводството***, 23-24 Ноември 2007, UNITECH'07, Габрово, Технически Университет – Габрово, Сборник с доклади, Университетско Издателство "В. Априлов", т. II, стр. II-344-II.349, ISSN 1313-230X.

[9] Boycheva S., *Sulphur dioxide reactivity potential of different types of coal fly ash*, Environmental Science, Trade Science Inc., ISSN 0974-7451, (in press).

[10] Boycheva S. (2012), ***Fly ash from thermal power plants burning lignite coals as a silicate material for zeolite synthesis***, Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy, in press.

[11] Бойчева С., Згурева Д. (2012), ***Оползотворяване на летящата пепел за получаването на синтетични зеолити***, списание "Екологично инженерство и опазване на околната среда", т. 1, стр. 35-43.

Автор: Силвия Бойчева, гл. ас. д-р инж., катедра "Топлоенергетика и ядрена енергетика", Технически Университет - София, E-mail address: *sboycheva@tu-sofia.bg*

Постъпила на 18.07.2012 **Рецензент** Доц. д-р Никола Станков

Годишник на Технически Университет - София, т. 62, кн.3, 2012
Proceedings of the Technical University - Sofia, v. 62, book 3, 2012

АМИННИ ТЕХНОЛОГИИ ЗА УЛАВЯНЕ НА CO_2 ВЪВ ВЪГЛЕРОДОЧИСТВАЩИТЕ ИНСТАЛАЦИИ НА ТЕРМИЧНИТЕ ЕЛЕКТРОЦЕНТРАЛИ – ТЕХНОЛОГИЯ НА ФИРМА „CANSOLV TECHNOLOGIES Inc.“ (CTI) – КАНАДА

Димитър Попов, Милко Йовчев, Петьо Гаджанов

Резюме: *В статията е представена аминната технология на фирма „Cansolv Technology Inc.“ (Канада) за улавяне на CO_2 от димните газове на термичните електроцентрали. За целта се използва патентния абсорбент „Cansolv DC 103“, който за разлика от конвенционалните абсорбенти на база моноетаноламин запазва абсорбционните си свойства в присъствие на SO_2. Това дава възможност за интегриране на сероочистващите и въглеродочистващите инсталации, което води до значимо намаление на капиталните и експлоатационните разходи.*

Ключови думи: *въглероден диоксид, изгаряне на въглища, амини, серен диоксид, сулфати, абсорбция*

AMINES BASED TECHNOLOGIES FOR CO_2 CAPTURE FROM THERMAL POWER PLANTS FLUE GASES – TECHNOLOGY OF „CANSOLV TECHNOLOGY Inc.“ - CANADA

Dimitar Popov, Milko Iovchev, Petyo Gadjanov

Abstract: *A technology of „Cansolv Technology Inc.“ (CTI) – Canada for CO_2 capture from thermal power plants gases is presented and discussed is this paper. It is stressed that due to particular properties of the developed by „CTI“ absorbent named „Cansolv DC 103“ it is possible to capture both SO_2 and CO_2 in a combined installation; this giving an opportunities to decrease the energy consummation and allover capital cost of the system for purification of the flue gases.*

Keywords: *carbon dioxide, coal combustion, amines, sulfur dioxide, sulphates, absorption*

© 2012 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

Както вече беше изтъкнато в една от предишните наши публикации [1] през 2005 г. Европейската Комисия прие документа „Европейска Технологична Платформа за изграждане на термични електроцентрали с нулеви емисии“ [2], чиято основна задача беше да подкрепи развитието на т.нар. CCS - технологии[1] в борбата с измененията на климата. Във връзка с това специално внимание започна да се отделя на т. нар. аминни технологии за улавяне на CO_2 от димните газове, за които се очаква да бъдат базови технологии при изграждането на термичните електроцентрали с нулеви емисии. Тук е необходимо да се подчертае, че тези технологии се развиват от различни фирми в различни варианти, чиято крайна цел е реализацията на въглеродочистващи инсталации (ВОИ) с минимални капитални и експлоатационни разходи. Като пример за такива технологии, които представляват безспорен интерес за България бяха представени в други наши публикации две аминни технологии със съответните фирмени означения, както следва:

- Econamine FG във варианта Econamine FG Plus (EFG+) – собственост на фирма „Fluor“ САЩ [3] и
- KM – CDR (Kansai Mitsubishi – Carbon Dioxide Recovery) – собственост на японските фирми „Mitsubishi Heavy Industry“ и KEPCO (Kansai Power Company) [4].

Целта на настоящата статия е да представи друга комерсиализирана аминна технология за улавянето на CO_2 от димните газове на различни обекти произвеждащи такива газове, която е собственост на фирмата „Cansolv Technology Inc.“ и която е известна в техническата литература с абревиацията CTI [5].

Фирмата „Cansolv Technology Inc.“ е създадена през 1997 год. с цел да разработва технологии и съответни устройства за улавяне на SO_2 от димни газове от различни обекти вкл. и от заводи за производство на H_2SO_4. Технологиите, които развива тази фирма са изградени на известния принцип абсорбция/десорбция, при което въз основа на патентен фирмен абсорбент с търговско название „Cansolv DS“ са построени различни сероочистващи инсталации (СОИ) с дебит на газовете до 82 000 Nm^3/h при начално съдържание на SO_2 до 12 % - до остатъчно съдържание ~ 10 ppmv (29 mg/Nm^3) в пречистения газ [6]. Тези постигнати от фирма „CTI“ параметри вероятно се дължат на свойствата на използвания абсорбент „Cansolv DS“, който както личи от фирмената литература, е на аминна основа. През следващите години обаче, въз основа на събраната информация от експлоатацията на сероочистващите инсталации работещи с абсорбента „Cansolv DS” и като взема под внимание очакваното преференциално развитие на CCS – технологиите в света фирма „CTI“ насочва своето внимание и към създаването на абсорбенти селективни спрямо CO_2 в димни газове получени при изгарянето на въглища. Като отчитат обаче предимствата и недостатъците на други известни фирми прилагащи в своите инсталации аминни технологии, например „Fluor“, или „Mitsubishi Heavy Industry & KEPCO“ и др.

[1] Carbon, Capture & Storage - технологии

фирма „ CTI“ си поставя за цел да разработи технология и съответен абсорбент за улавяне на CO_2 от димни газове, който да отговаря на следните условия:

- абсорбентът трябва да бъде толерантен към SO_2[2];

- абсорбентът трябва да бъде на база амини и да се регенерира с минимално количество пара.

- абсорбентът трябва да бъде стабилен в окислителна среда, т.е. при високо съдържание на кислород в димните газове;

- абсорбентът трябва да реагира енергично с CO_2 и да освобождава лесно този газ, като крайният продукт на изхода на десорбционната колона да бъде с гарантирана чистота 99,9 %; освен това задължително е той да отделя минимално количество замърсители в околната среда.

Такъв абсорбент под фирменото название „Cansolv DC 103“ действително е бил създаден от фирма „CTI“. Той отговаря в общия случай на формулираните погоре условия и става база за развитието на нова „Cansolv – технология“, при която би било възможно в една и съща инсталация при подходящо ситуиране на отделните основни възли да се извършва едновременно очистване на димните газове от SO_2 и CO_2. Реализацията на този проект на фирма „Cansolv Technology Inc.“ обаче е свързано с решаването и на редица други междинни технологични задачи, които се коментират в следващия текст.

Както е известно, конвенционалните амини от типа на моноетаноламина притежават свойството да се разграждат под действието на SO_2 и O_2, които се съдържат в димните газове. Това води до намаляване на абсорбциония им капацитет и изисква по-честа смяна на абсорбента. Поради тези съображения концентрацията на SO_2 на входа на въглеродочистващата инсталация трябва да бъде ~ 1 ppmv, при което абсорбиращите свойства на абсорбента се запазват подълго време. За да се достигне обаче такава висока степен на очистване на димните газове излизащи от сероочистващите инсталации са необходими значителни допълнителни капитални разходи. Нещо повече – при аварийно попадане на SO_2 във въглеродочистващата инсталация абсорбентът (MEA) губи способността си да абсорбира CO_2.

За разлика от конвенционалните амини абсорбентът разработен от фирма „CTI“ и по-специално продукта „Cansolv DC 103“ е толерантен към серния диоксид. Това означава, че ако концентрацията на SO_2 след СОИ е по-голяма от 1 ppmv абсорбентът „Cansolv DC 103“ не губи абсорбционните си свойства спрямо CO_2. Той не се разрушава и от кислорода съдържащ се във входящите газове. Обяснението на това съществено предимство на технологията „CTI“ е следното:

[2] т.е. да запазва абсорбционните си свойства спрямо CO_2 в присъствие на SO_2 и да не се разрушава по време на работа.

Когато остатъчният SO_2 съдържащ се в димните газове след сероочистващата инсталация попадне в абсорбционната колона на въглеродочистващата инсталация той реагира с водата („Cansolv DC 103“ е воден разтвор на амин) и се получава H_2SO_3, която под въздействието на кислорода (от газовете) преминава в H_2SO_4. Всъщност SO_2 преминава в абсорбента като сулфатен йон, т.е. получават се т.нар. термично стабилни соли (TSS), които нарушават абсорбционните свойства на абсорбента и трябва да бъдат изведени от него. Технологията, по която TSS се извеждат от абсорбента „Cansolv DC 103“ е патентована от фирма „CTI“ и се реализира чрез байпасно обработване на абсорбента в специална очистваща от сулфати аминна пречистваща инсталация (АПИ) (Amine Purification Unit). Това в общия случай изменя философията, върху която се изграждат инсталациите за очистване на димните газове от SO_2 и CO_2, тъй като скъпо струващото фино очистване на газовете от SO_2 (почти до нула) се заменя с въвеждането в схемата на въглеродочистващата инсталация на допълнително звено – аминна пречистваща инсталация (АПИ). По този начин се реализират следните предимства на технологията „CTI“ пред другите известни технологии, например „EFG+“ или „KM – CDR“.„Cansolv DC 103“, както вече беше казано, е напълно толерантен към SO_2.

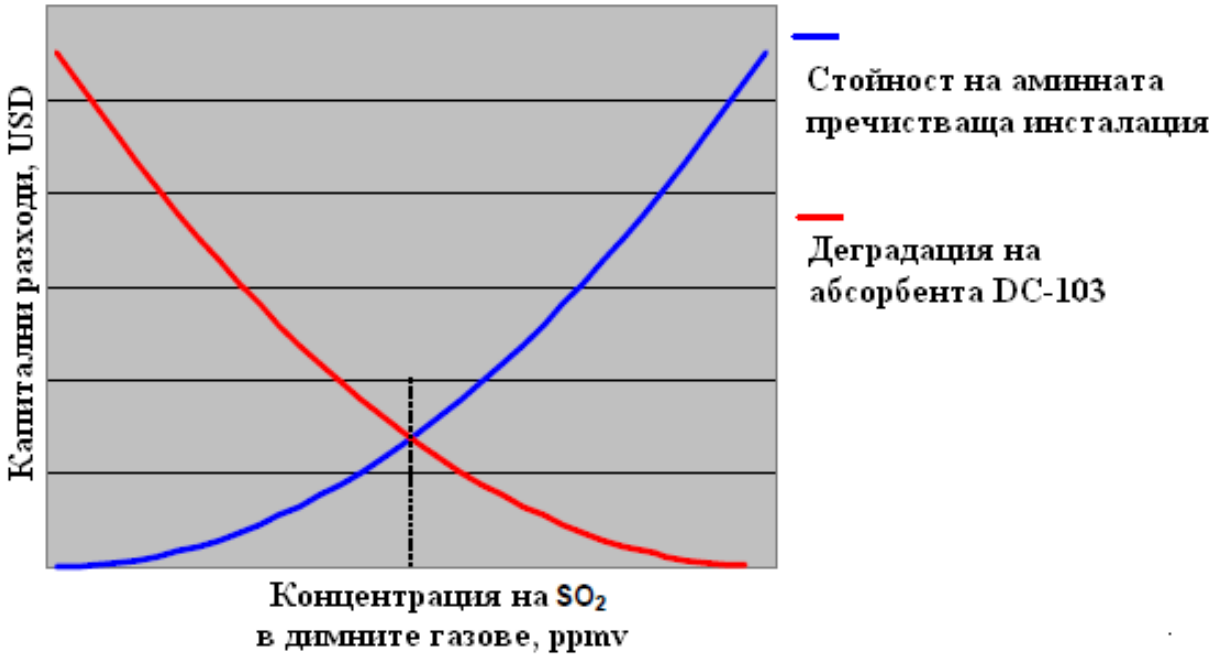
- „Cansol DC 103“ изцяло абсорбира SO_2 съдържащ се в димните газове (ако той не бъде уловен напълно в СОИ);

- SO_2 напуска въглеродочистващата инсталация като сулфат през аминната пречистваща инсталация (АПИ);

- SO_2 не разгражда „Cansolv DC 103“, тъй като лесно преминава в H_2SO_3, а след това и в инертен спрямо абсорбента сулфат и др.

Друг е въпросът как този серен диоксид преминал през сероочистващата инсталация на централата и прехвърлил се в съответен сулфат може да бъде изведен технологично от абсорбционно/десорбционния цикъл на ВОИ. Във връзка с това фирма „Cansolv Technologies Inc.“ експериментално проверява и сравнява експлоатационните разходи при работата на аминната пречистваща инсталация (АПИ) със средствата, които би заплатила същата фирма, ако такава инсталация няма, т.е., ако абсорбентът вследствие натрупването на сулфати в него трябва да бъде заменен изцяло с нов продукт.

Резултатите от тази проверка са показани качествено на фиг. 1, от което се вижда, че оптималната концентрация на влизащия във ВОИ серен диоксид трябва да бъде в границите 15 – 35 ppmv. И още нещо докато горната граница (35 ppmv SO_2) на концентрацията на SO_2 не е фатална за успешната работа на ВОИ, то спазването на долната граница (15 ppmv SO_2) е абсолютно необходимо, тъй като SO_2 свързва кислорода съдържащ се в димните газове и запазва абсорбента „Cansolv DC 103” от разграждане.



Фиг.1. Допустима оптимална концентрация на SO_2 , ppmv
преди ВОИ на “Cansolv”

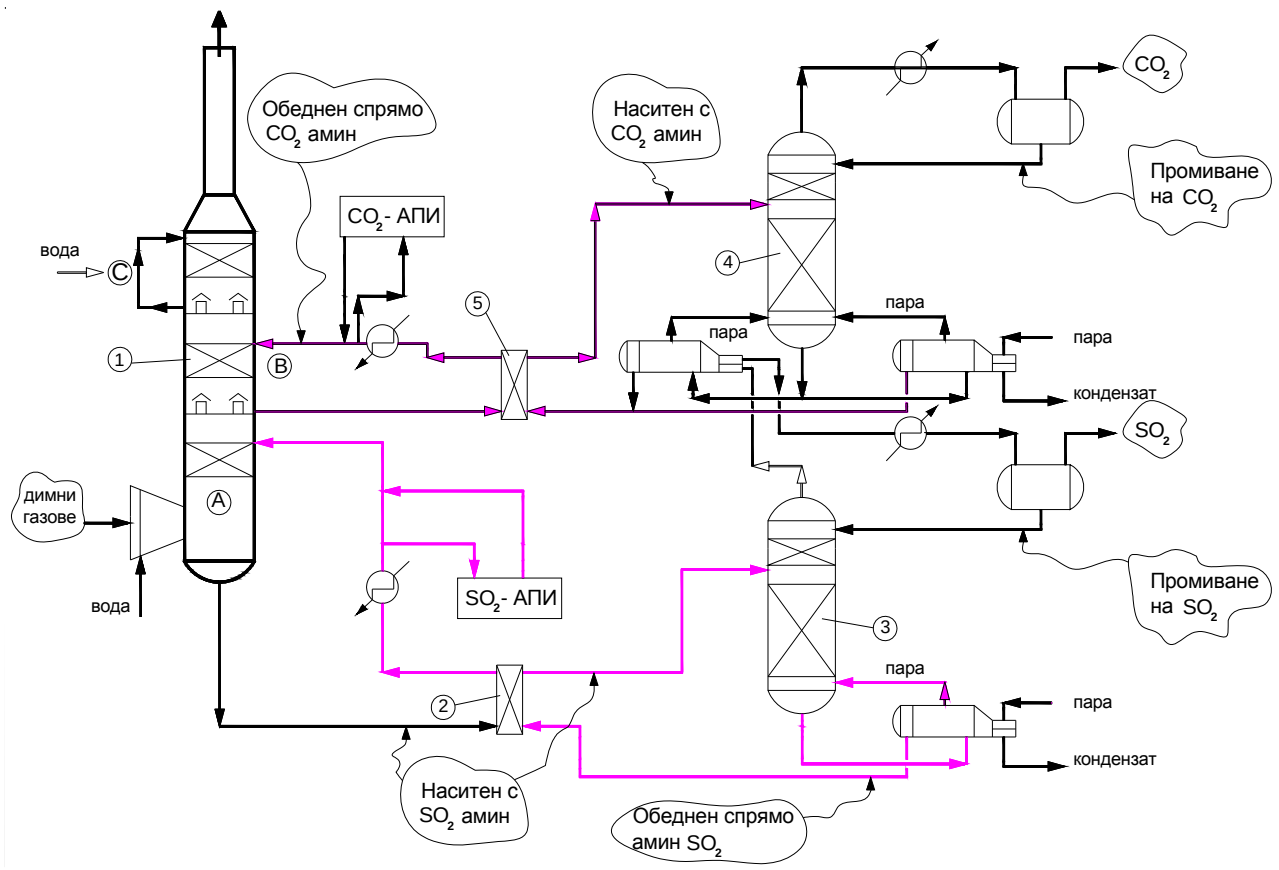
И така благодарение на специфичните свойства на продукта „Cansolv DC 103” фирма „Cansolv Technology Inc.” решава един от основните въпроси свързани с очистването на димните газове от SO_2 и CO_2 – въпросът за съвместимостта на двете технологии, което открива възможност за тяхното интегриране. Възможностите за това интегриране са систематизирани в табл.1.

Таблица 1

СОИ система „Cansolv” (SO_2)	ВОИ система „Cansolv” (CO_2)
pH на абсорбента – 4,5 – 5,5	pH на абсорбента – 9 – 10
Свързващ анион - HSO_3	Свързващ анион - HCO_3
Ниска степен на деградация	Ниска степен на деградация
Отделяне на HSS в АПИ	Отделяне на HSS в АПИ
CO_2 преминал през СОИ – 99,99 %	SO_2 уловен във ВОИ – 99 %

Въз основа на данните представени в табл.1 и на други фирмени документи фирма „CTI” разработва проект на структурна схема на инсталация, в която димните газове се пречистват едновременно от SO_2 и CO_2 като се използва един и същ абсорбент (в случая „Cansolv DS”). Структурната схема на тази инсталация е показан на фиг.2.

Както се вижда от фиг.2 димните газове след електрофилтрите, които са пречистени от летяща пепел, но съдържат SO_2 и CO_2 постъпват в долния край на интегрираната абсорбционна колона 1, след като предварително се охлаждат с вода. Интегрираната абсорбционна колона е разделена на три секции, както следва:



Фиг.2. Структурна схема на инсталация за едновременно очистване на димните газове от SO_2 и CO_2 (Патент на Cansolv)

А. За улавяне на SO_2 посредством обеднен спрямо този газ амин. Обедненият амин предварително се охлажда в топлообменника 2 посредством наситен разтвор на амин постъпващ от десорбционната колона 3.

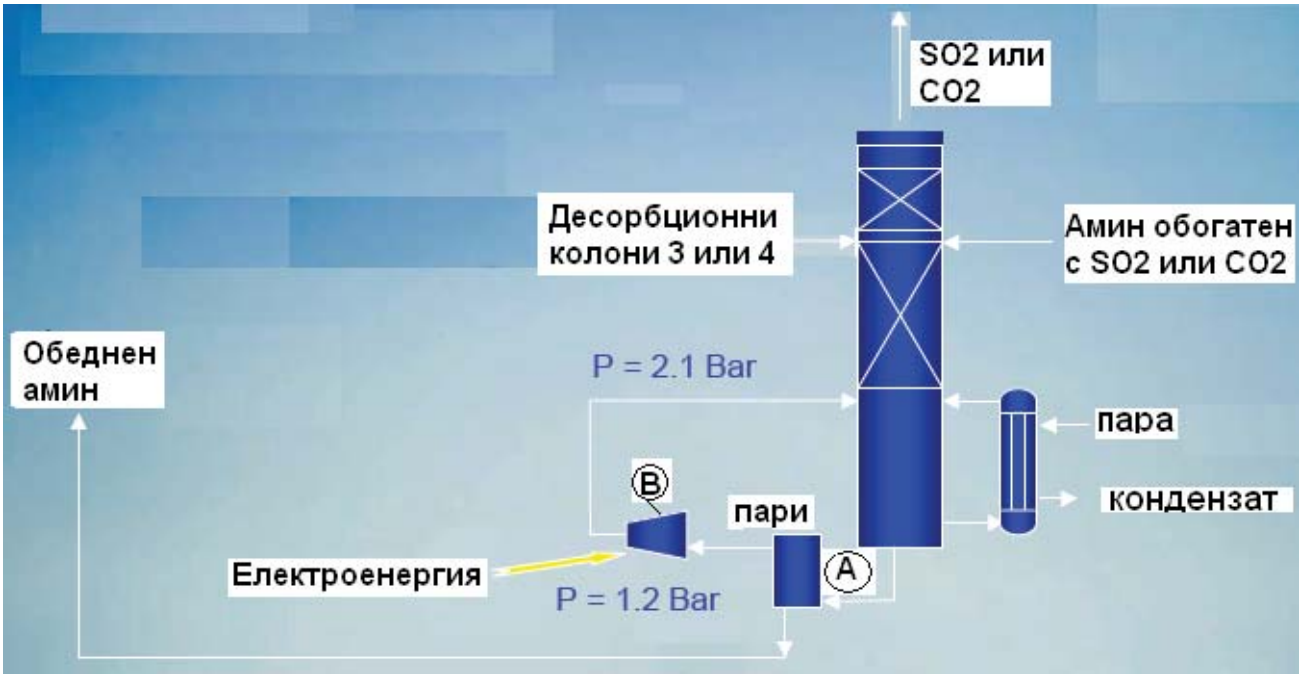
В. За улавяне на CO_2 посредством обеднен спрямо този газ амин. За целта обедненият амин предварително се охлажда в топлообменника 5 посредством наситен разтвор на амин постъпващ от десорбционната колона 4.

С. Пречистеният от SO_2 в секция А и от CO_2 в секция В газ се промива с вода в секция С, след което се изпуска в атмосферата.

Байпасното очистване на абсорбента „Cansolv DS” се извършва в аминните пречистващи инсталации, които са означени на схемата както следва „SO_2 – АПИ” и „CO_2 – АПИ”. И двете инсталации са свързани с тръбопроводите, по които текат обеднени разтвори на амин, т.е. с минимално съдържание на SO_2 и CO_2.

За подобряване на енергийната ефективност на интегрираната SO_2/CO_2 инсталация фирма „CTI” въвежда известни изменения в абсорбционната част на схемата (фиг. 3) с цел да се използва остатъчната топлина на регенерирания амин. За целта, както се вижда от фиг.3 регенериращият амин от десорбционните колони 3 (SO_2) и 3 (CO_2) се подава в един разширителен съд А, където налягането е по-ниско (1,2 Bar). Това предизвиква самоизпарение на водните пари от обеднения амин, които от своя страна се засмукват от компресора В. Той повишава налягането им (а следователно и тяхното топлосъдържание) до 2,1 Bar, след което те се подават в десорбционните колони 3 или 4. По-нататък обедненият

амин отново се връща в цикъла, например в топлообменника 2 или **топлообменника** 5.



Фиг.3. Структурна схема на инсталация за използване на топлината на обеднения амин напускащ десорбционните колони

Така изглежда по документи интегрираната система за едновременно последователно извличане на SO_2 и CO_2 от димните газове от термичните електроцентрали разработена от фирма „Cansolv Technology Inc”. Понастоящем (2012 г.) не бяха открити в литературата данни за реализацията на тази система. „Въглеродната” част на тази схема обаче е в процес на реализация в Канада и по-специално в ТЕЦ „Boundary Dam”, където целта е да се произведе CO_2 за нуждите на технологията EOR [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технологията за улавяне на CO_2 от димните газове на ТЕЦ развита от фирма „Cansolv Technology Inc.” има едно съществено предимство изразяващо се в съвместимостта на абсорбента „Cansolv DC 103“ със серния диоксид. Това дава възможност инсталациите използващи тази технология да бъдат надстроявани към съществуващите сероочистващи инсталации, които, както е известно не улавят SO_2 напълно. В този смисъл тази технология е особено интересна за старите български електроцентрали, където вече има изградени сероочистващи инсталации и където би могла да бъде приложена.

Приети символи и означения
ВОИ – Въглеродочистваща инсталация
CCS – Carbon capture and storage (technologies)
EFG+ - Econamine Flue Gas Plus
KM – CDR – Kansai Mitsubishi Carbon Dioxide Recovery

KEPCO – Kansai Electric Power Company
CTI – Cansolv Technology Incorporated
АПИ – Аминна пречистваща инсталация
СОИ – Сероочистваща инсталация
HSS – Heat Stable Salts

Настоящата статия е представена във връзка с изпълнението на научноизследователски 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 Министерство на образованието, младежта и науката.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. Йовчев, Д. Попов, П. Гаджанов, ТЕЦ с нулеви емисии – платформата на ЕС и пътища за нейната реализация, Наука, 2010, 4, 47-50.
2. European Technology Platform for Zero Emission Fossil Fuel Power Plants, 2005.
3. Д. Попов, М. Йовчев, П. Гаджанов, Аминни технологии за улавяне на CO_2 във въглеродочистващите инсталации на термичните електроцентрали – технология на фирма „Fluor”(САЩ) (под печат).
4. Д. Попов, М. Йовчев, П. Гаджанов, Аминни технологии за улавяне на CO_2 във въглеродочистващите инсталации на термичните електроцентрали – технология на фирмите „Mitsubishi Heavy Industry“ и KEPCO”, Япония (под печат).
5. Paul – Emmanuel Just, and Devin Shaw, Cansolv SO_2 Control and CO_2 Capture in Coal Fired Power Plants, Paper 53, Cansolv Technologies Inc., *pe-just@cansolv.com*
6. D. K. Stevens et al, Revue of Cansolv SO_2 scrubbing system – first commercial operation and applications in the oil and gas industry, 54 Annual Laurance Reid Gas Conditioning as by Cansolv, Power Plants CCS, March, 26, 2010.

Автори: Димитър Ангелов Попов, доц. д-р инж., Технически Университет – София, ЕМФ, кат. „Топлоенергетика и ядрена енергетика“, E-mail address: *dpopov@tu-sofia.bg*
Милко Петров Йовчев, проф. д-р инж., Технически Университет - София, ЕМФ, кат. „Топлоенергетика и ядрена енергетика“, E-mail address: *m_iovchev@tu-sofia.bg;* Петьо Георгиев Гаджанов, доц. д-р инж. кат. „Топлоенергетика и ядрена енергетика“, ЕМФ, Технически Университет - София, E-mail address: *gadjanov@tu-sofia.bg*

Постъпила на 18.07.2012 **Рецензент** доц. д-р Никола Станков

Годишник на Технически Университет - София, т. 62, кн.3, 2012
Proceedings of the Technical University - Sofia, v. 62, book 3, 2012

ИЗСЛЕДВАНЕ НА DC/DC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛ С МОСТОВ ИНВЕРТОР СЪС СРЕДНА ТОЧКА С ПОМОЩТА НА PSPICE

Костадин Миланов, Минчо Минчев и Михаела Славкова

Резюме: *В доклада е изследвано влиянието на обратен диод, включен във вторичната страна на трансформатора в DC/DC преобразовател с мостов инвертор. За целта е симулирана работата на DC/DC преобразователя с помощта на програмния продукт PSpice. Създадени са две схеми за изледване и е направена съпоставка на получените симулационни реултати.*

Ключови думи: *DC/DC преобразовател, мостов инвертор, обратен диод, PSpice.*

INVESTIGATION OF DC/DC FULL BRIDGE CONVERTER WITH CENTER-TAPPED TRANSFORMER VIA PSPICE

Kostadin Milanov, Mintcho Minchev and Michaela Slavkova

Abstract: *The influence of opposite diode, connected in the secondary part of transformer in full bridge DC/DC converter, is investigated in paper. For that purpose the simulation of an operation of full bridge DC/DC converter with center-tapped transformer is made by means of PSpice. Two electrical diagrams and also the comparison of simulation results are carried out.*

Keywords: *DC/DC converter, full bridge, opposite diode, PSpice.*

1. Въведение

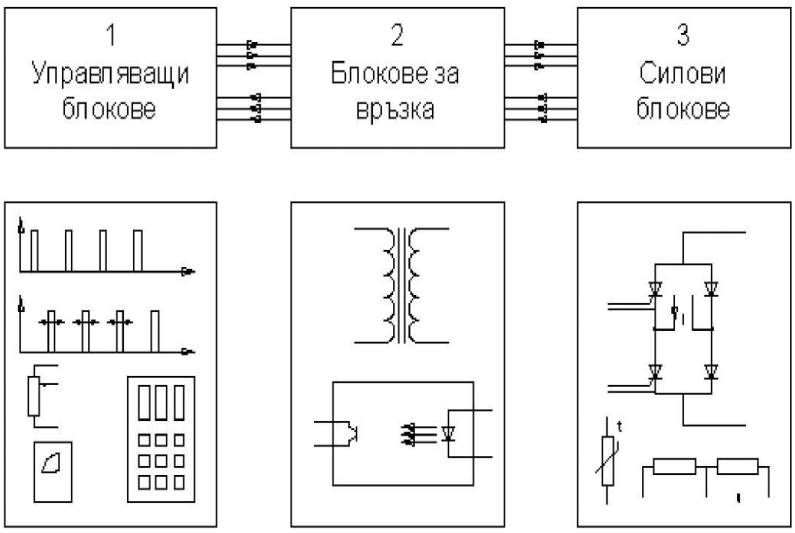
В последните години непрекъснато се разширяват областите на приложение на DC/DC преобразователите. Структурната им схема се състои най-малко от две схеми, едната от които изпълнява ролята на инвертор, а другата на токоизправител. В случаите, когато е необходимо галваническо разделяне на двете базови схеми се включва трансформатор. Характерно е, че те работят при висока честота от порядъка на десетки килохерци (фиг.1) [1].

Цел на представяната статия е да се симулира работата на DC/DC преобразовател с мостов инвертор със средна точка и добавен “обратен диод” на вторичната страна на трансформатора преди дросела. Идеята е да се изследва ефекта, който оказва обратния диод върху протичащите в схемата процеси.

Чрез програмния продукт PSpice са създадени два модела без и с добавен “обратен диод”, направена е оценка на работата на схемата преимущества и недостатъци.

© 2012 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829



Фиг.1. Принципна им блокова схема на DC/DC преобразователите [1]

2. Изследване на DC/DC преобразовател с помощта PSpice

Изследваният DC/DC преобразовател е двутактен, с галванично разделяне. Двутактните преобразователи се използват в случаите, когато е необходимо да се получи голяма изходна мощност.

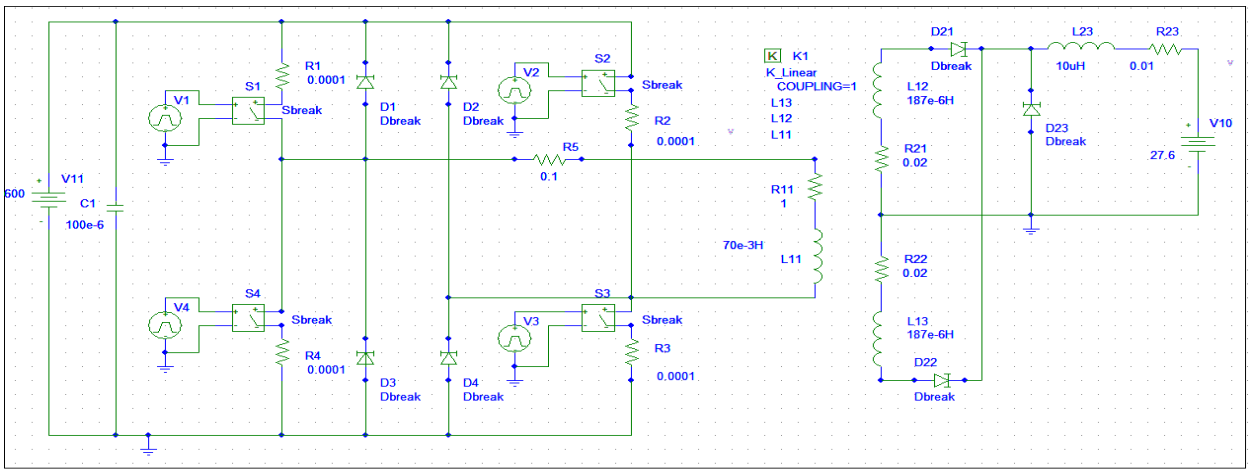
При всички схемни решения трансформаторът работи в режим на пълно пренамагнитване. Токоизправителната част се изпълнява с полумостова или с мостова схема. В случая изследваният DC/DC преобразовател е с мостова схема като вторичната намотка на трансформатора е със средна точка. Характерно за схемата е, че обратното напрежение върху диодите е два пъти по-високо от изходящото (фиг.2) .

Ако схемата е реализирана без «обратен диод» на вторичната страна на трансформатора преди дросела (D23) в полупериода, когато транзисторите не провеждат, токът във вторичната страна се поддържа от енергията в дросела. Той протича и през двата диода – D22 и D23, както и през двете части на намотката.

При свързан «обратен» диод в полупериода, когато транзисторите не провеждат, токът поддържан от дросела протича само през обратния диод. Не протича през изправителните диоди и вторичните намотки на трансформатора.

Ефектът от свързването на «обратния» диод се свежда до:

- общ по-малък пад в този полупериод, респективно и по-висок кпд;
- по-малко натоварване на изправителните диоди и на вторичните намотки на трансформатора.



Фиг.2. Елекрическа схема с обратен диод за симулиране на процесите в изследвания DC/DC преобразовател с мостов инвертор и средна точка на вторичната страна на трансформатора.

Във връзка с поставената задача схемната реализация на трансформатора със средна точка на вторичната страна на трансформатора с помощта на PSpice се извършва в следната последователност:

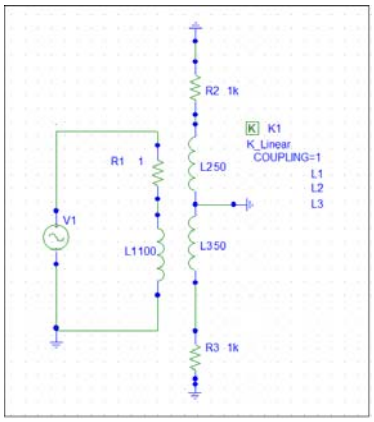
1. В схемния редактор Schematics се чертае електрическа верига с едно активно съпротивление R1 и едно индуктивно съпротивление L1 като те се захранват от източник на синусоидално захранващо напрежение тип VSIN.

2. След това се чертаят по още две индуктивни съпротивления – L2 и L3 , както и две активни R2 и R3, свързани последователно, но отделени и несвързани с R1 и L1 от първия контур.

3. Свързват се двете съпротивления 2 и R3 съответно с всяка една от индуктивностите и да се заземят от двете противоположни страни с елемент GND_EARTH.

4. Заземява се центъра на схемата, намиращ се между двете индуктивни съпротивления L1 и L2 от втория контур.

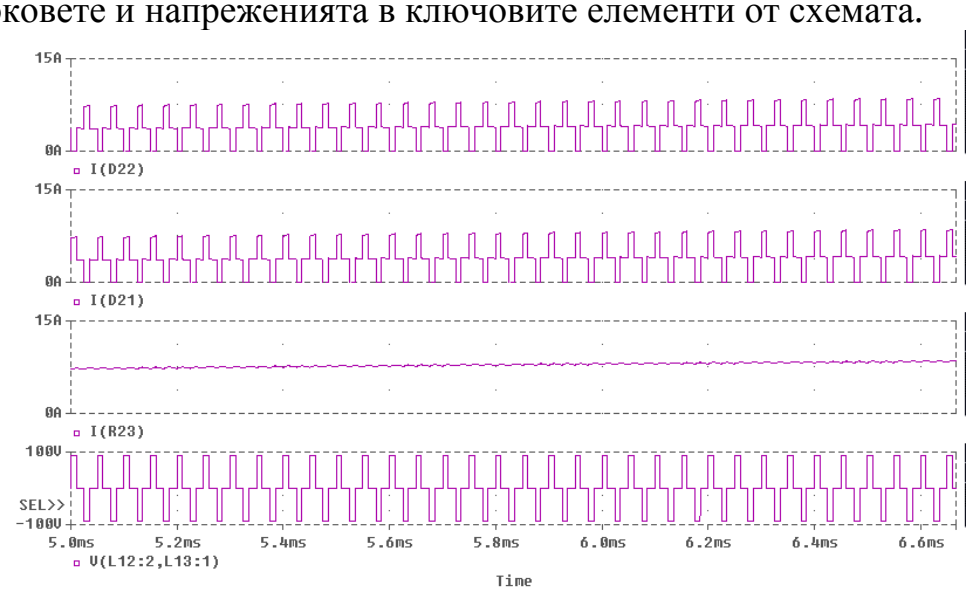
5. За да се създаде трансформатора е необходимо да се използва елемента “K_Linear”, който е желателно да се позиционира между първия и втория контур, (фиг.3).



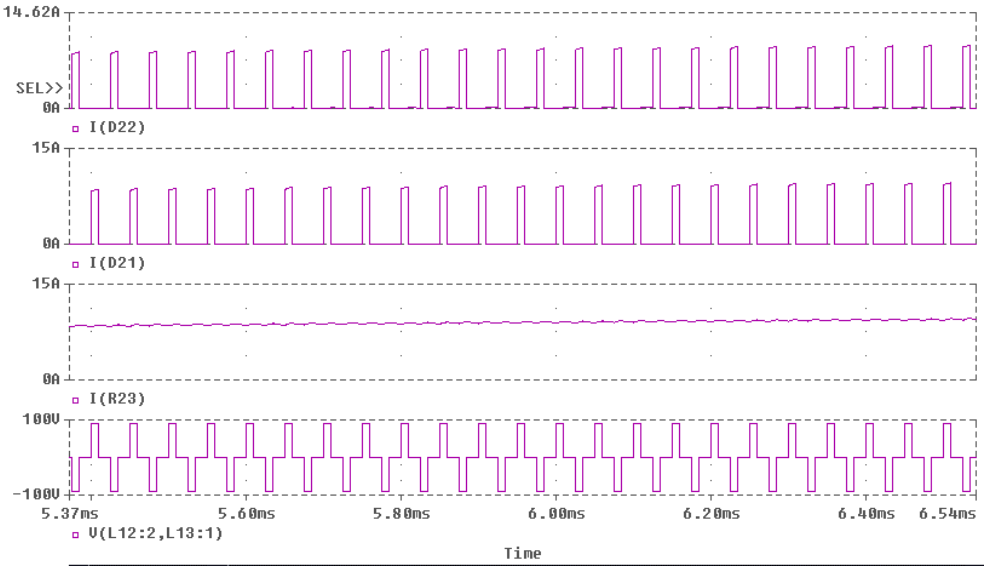
Фиг.3. Схемна реализация на трансформатор със средна точка на вторичната страна на транформатора.

По този начин е съставена и схемата на DC/DC преобразователя, (фиг.2) с мостов инвертор със средна точка на вторичната страна на трансформатора, с и без обратен диод, в средата на PSpice [2, 3, 4].

Задачата е да се симулира работата на преобразователя като се представят графики на токовете и напреженията в ключовите елементи от схемата.

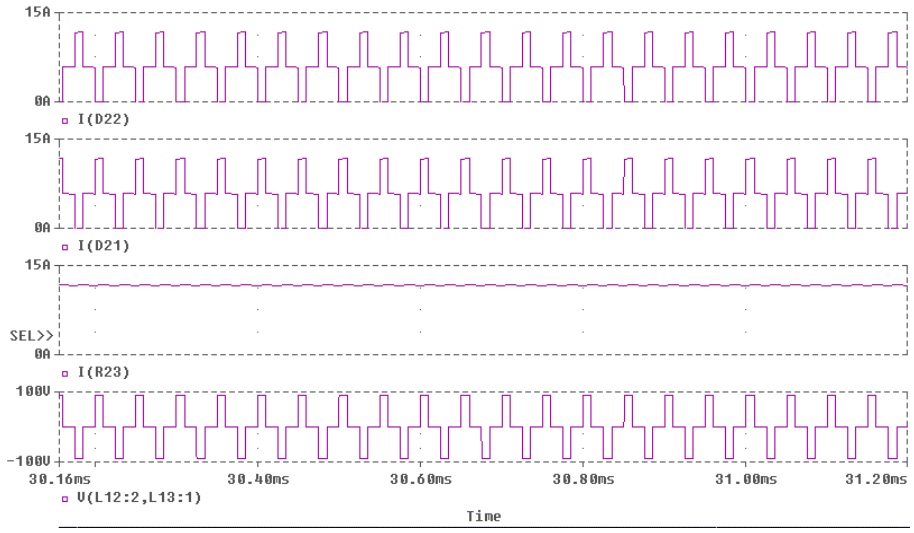


Фиг.4. Резултати от симулациите без “обратен диод” с помощта на Pspice за време ~ 6 ms

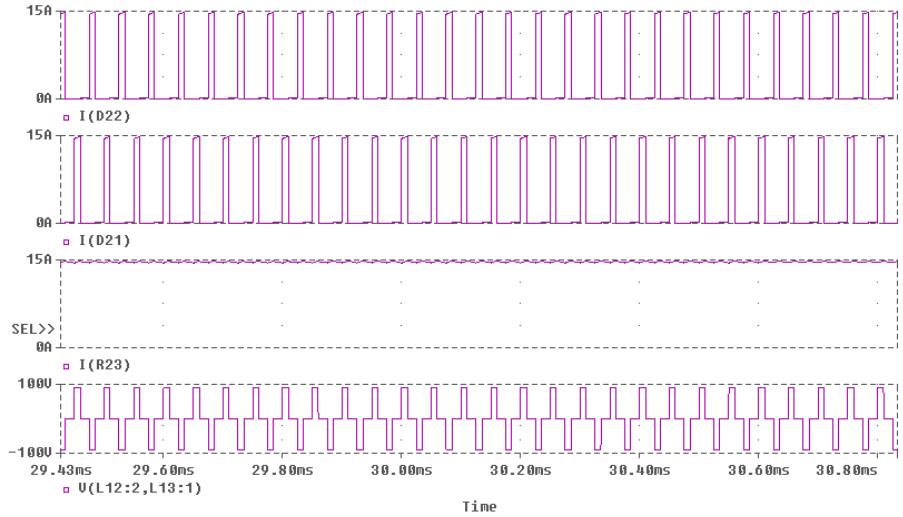


Фиг.5. Резултати от симулациите с “обратен диод” с помощта на Pspice за време ~ 6 ms

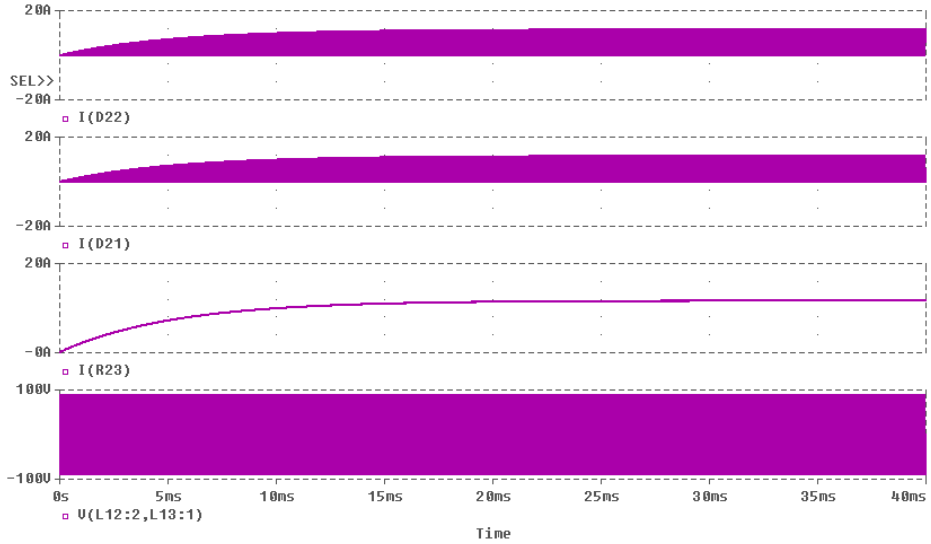
От получените изходни диаграми може да се обобщи, че при включване на обратен диод токът, който протича през изправителните диоди и през вторичните намотки е или равен на изходящия или е „0”. Ако „обратен диод” не е включен, през посочените елементи винаги тече ток, който е или равен на изходящия или е 50% от него.



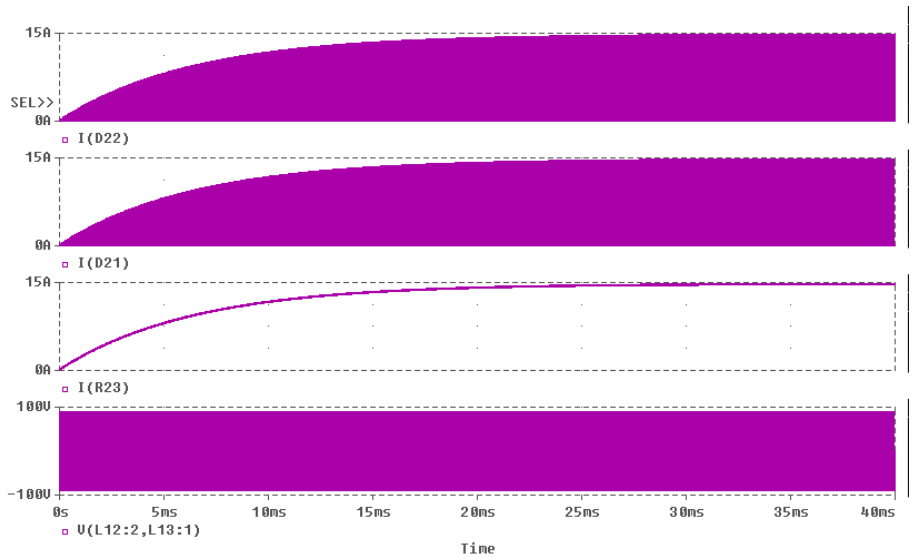
Фиг.6. Резултати от симулациите без “обратен диод” с помощта на Pspice за време ~ 30 ms



Фиг.7. Резултати от симулациите с “обратен диод” с помощта на Pspice за време ~ 30 ms



Фиг.8. Резултати от симулациите без “обратен диод” с помощта на Pspice за време ~ 40 ms



Фиг.9. Резултати от симулациите с “обратен диод” с помощта на Pspice за време ~ 40 ms

3. Заключение

Направените симулации потвърждават изказаните теоретични изменения в работата на DC/DC преобразователя, при включване на обратен диод във вторичната страна на трансформатора преди дросела. Включването му в схемата води до по-ниско натоварване както на изправителните диоди, така и на вторичните намотки на трансформатора. Изчислителната мощност на трансформатора се понижава. Ефектът от това по-ниско натоварване на посочените елементи е по-подчертан при преобразователи, които работят с широк диапазон на изменение на изходящите параметри.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Минчев М.,Й. Шопов, Е. Рац. (2006), ***Преобразувателна техника***, Авангард Прима, София 2006, ISBN-10: 954-323-233.

[2] Document number: ***PSP02445***, PSpice ver. 9.1, 9.0; Capture, Cadence Design Systems, Inc , 2005.

http://www.orcad.com/documents/community.faqs/pspice/020445.aspx.

[3] Брандиски К., В. Младенов. (1998), ***Ръководство за решаване на задачи по Торетична електротехника с Pspice***, Сиела, София 1998, ISBN 954-649-116-0.

[4] Славкова М., К. Миланов. (2011), ***Изследване на DC/DC преобразовател с полумостов инвертор със средна точка с помощта на Pspice***, Сборник доклади на III-та научна конференция Дни на науката в ТУ-София, 30.09-03.10, 2011, с. 163-168 Созопол, България.

Автори: Костадин Миланов, маг. инж. асистент в катедра “Електрически апарати”, E-mail address: *k.milanow@abv.bg*; Минчо Минчев, проф. дтн. в катедра “Електрически апарати”, E-mail address: *mintchev@tu-sofia.bg*; Михаела Славкова, маг. инж. главен асистент в катедра “Електрически апарати”, E-mail address: *michaela_ds@tu-sofia.bg*

Постъпила на 14.11.2012 **Рецензент** проф. дтн Михаил Анчев

Годишник на Технически Университет - София, т. 62, кн.3, 2012
Proceedings of the Technical University - Sofia, v. 62, book 3, 2012

ИЗСЛЕДВАНЕ ЕФЕКТИВНОСТТА НА РЕЖИМИТЕ ПРИ ИЗВЛИЧАНЕ НА СМЕТИЩЕН ГАЗ ОТ ДЕПО „СУХОДОЛ”

Боян Димитров

Резюме: *Настоящото изследване е направено с цел намиране на оптимални режими за извличане на сметищен газ при оползотворяването му в инсталация за производство на електроенергия. Основният водещ критерий е търсенето на максимум получена електроенергия при оползотворяването на сметищния газ от депо Суходол. Получените резултати са използвани при настройването на работата на системата за извличане на биогаз, генериран в първи етап и 1-ва клетка на втори етап на депото.*
Ключови думи: *сметищен газ, депа за отпадъци, извличане на биогаз*

RESEARCH ON THE EFFECTIVENESS OF THE REGIME OF EXTRACTING LANDFILL GAS LANDFILL "SUHODOL"

Boian Dimitrov

Abstract: *This research was done to find optimal regimes for the extraction of landfill gas utilization in the plant to produce electricity. The main criteria is leading the search for maximum power obtained from the utilization of landfill gas from the landfill Suhodol. The results are used in configuring the system to extract biogas generated in the first stage and the first cell of the second stage of the landfill.*
Keywords*: landfill gas, landfill, biogas recovery*

1. Въведение

От две години на депо Суходол функционира инсталация за оползотворяване на сметищния газ, представляваща генератор, задвижван от ДВГ, работещ с енергоносител сметищен газ. Инсталацията е проектирана да се захранва със сметищния газ, образуван в по-голямата част от депото. До момента поради организацията на експлоатацията и рекултивацията на депото, инсталацията се захранва само от клетките, в които са депонирани най-старите отпадъци (до 1999 г.). За тях отдавна е отминала фазата на интензивно газоотделяне.

Това наложи оптимизирането на добива на сметищен газ, чрез оптимизирането на режимите на извличането му с цел генерирането на максимално количество електроенергия.

2. Предпоставки за извършването на експеримента

Ограничителните условия при тази оптимизационна задача, които не могат да се променят, в обобщен вид са:

© 2012 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved
ISSN 1311-0829

- геометрията и дълбочината на тези клетки, които са установени;
- известно, макар и с приближение, количество депониран отпадък;
- има данни за морфологичния състав на отпадъците, предоставени от собственика на депото, които не могат да се приемат за напълно достоверни поради липсващата информация за методологията, по която са получени и кога са направени експериментите;
- има изградена система за газоулавяне по проект.

Газоуловителните системи за отделните клетки на депото са проектирани като активни – за принудително извличане на сметищен газ. Основен момент при проектирането е приемането на определен радиус на въздействие на кладенците. Този периметър се приема от проектанта по емпиричен път. Няма установени в световната практика математически зависимости за определянето му. Проектите и изграждането на газоуловителните системи за тези две клетки са едни от първите у нас, при липса на натрупан опит и наблюдения за работата на такива системи.

Това вероятно е довело и до допускане на неточности в проектите от гледна точка на получаването на оптимален добив от сметищен газ.

Това твърдение се подкрепя и от наличието на съществена разлика между проектите за тези първи две клетки и останалите клетки на депото, проектирани след като има наблюдения и опит при експлоатацията на инсталации за принудително извличане на сметищен газ, от които се очаква и основният дебит на такъв газ.

При тези условия основната задача на оптимизационната процедура се свежда до определяне радиуса на въздействие на кладенците за улавяне на сметищен газ при различен вакуум на извличане на сметищния газ.

Оценката на радиуса на въздействие на всеки кладенец зависи от геометрията на площадката, физическите характеристики на отпадъците, възрастта на отпадъците и процентното съдържание на сметищен газ, генериран в отпадъчната маса.

Към настоящия момент хидравличните характеристики на отпадъците са малко познати, основно поради трудности при тяхното измерване на сметището или в лабораторни условия.

С известно приближение тези характеристики могат да се приемат за близки до тези на почвата [2,3]. Например, при моделни изчисления с TOUGH2-LGM [1] се приема, че отпадъците имат характеристики на песъклива почва и се прилагат съответните капилярни параметри.

Моделът за генериране на сметищен газ се определя чрез следната опростена експоненциална функция на времето (този модел е от първи ред и е разновидност на LanGem модела) :

$$G_g = G_i^{(-ct)} \qquad (1),$$

където: G_g – степен на генериране на сметищен газ, m^3t^{-1}; G_i – началният потенциал на генериране на сметищен газ, m^3t^{-1}; C – цялостен коефициент на биоразлагане на депонираните отпадъци,(год.$^{-1}$); t – време,(год.).

В (1) стойностите G_i = 9,5 m^3t^{-1} и C = 0,055 год.$^{-1}$ са при пресен отпадък. Тези стойности се редуцират в зависимост от възрастта на отпадъците. Подробни прогнози за дебита на сметищен газ по клетки от депо „Суходол” е даден от [4].
Прогнозните количества за добив на сметищен газ послужиха за определяне на максималните очаквани стойности на дебита от всеки кладенец. Възприето беше, че количеството газ, което може да се извлече от даден кладенец, е пропорционално на радиуса на действие на кладенеца и дълбочината му. В нашия случай дълбочината е фиксирана.

3. Планиране и провеждане на експерименталните изследвания

Извършени бяха експерименти за отделните кладенци. С помощта на инсталацията за обезвреждане на сметищния газ се създаваше вакуум и се изследваше дебитът на даден кладенец, при изключени останали кладенци и клетки. Проведените експерименти бяха при вакуум 100, 300 и 400 мм воден стълб, измерван на входа на инсталацията.
Радиусът на въздействие се определя от обема на извлечения сметищен газ при постоянно съдържание на метан. За всеки кладенец е известна височината му. При оценката на радиуса на въздействие е прието, че се извлича 90% от генерирания метан съгласно прогнозата, която не е напълно точна, поради значителната степен на неопределеност на входните параметри при моделирането на процеса на газообразуване.

4. Анализ на получените резултати

Резултатите потвърдиха, че радиусът е пропорционален на налягането на извличане от кладенеца. От обобщената графика на фиг.1 се вижда, че при вакуум до около 300 мм воден стълб зависимостта е линейна и може да се представи със зависимостта:

$$R = 0{,}08.p \quad [m] \qquad (2)$$

където: R – е радиусът в метри; P – е вакуумът на извличане в мм воден стълб.
Очевидно е, че със значителното повишаване на налягането се увеличава и радиусът на извличане, но същевременно поради по-голямото разстояние значително нараства и хидравличното съпротивление и характеристиката преминава в нелинейна.
Освен това, при създаването на голямо разреждане, респективно и при увеличаване радиуса на действие на даден кладенец, започват да се припокриват зоните на действие на съседните кладенци. Това води до бързо изчерпване на сметищния газ и намаляване на концентрацията на метан в него, а от там и до по-ниска ефективност на извличането.
От друга страна, големият вакуум може да провокира постъпване на кислород в тялото на депото, защото се касае за обект с площ (за изследвания участък) над 170 дка и е възможно да има минимални пропуски през горния изолационен екран, а и първа и втора клетка на втория етап на депото са свързани.
Това означава, че депото все още не е затворено напълно и достъпът на въздух ще бъде улеснен при силно разреждане в тялото на депото, което ще попречи на нормалното газообразуване.

Фиг.1

5. Заключение

На базата на тези експериментални данни се извърши настройването на системата за извличане на сметищен газ. При настройката се търсеше осигуряване на максимално време на дебит на сметищен газ с концентрация на метан от 60% до 30%, подаван към инсталацията.

Системата бе настроена така, че първоначално да се работи при малък радиус на действие на кладенеца и в процеса на експлоатация с намаляването на концентрацията на метан, т.е. изчерпването на газа в близост до кладенеца, да се увеличава вакуумът на извличане – респективно радиусът на действие на кладенеца.

Този начин на работа на системата за извличане осигурява по-голямо производство на електроенергия, отколкото работата на инсталацията при максимален товар за по-кратко време.

Установеният режим показва, че се достига до използване на дебита на сметищния газ по време на работния цикъл на инсталацията до над 90% спрямо теоретично определения прогнозен такъв.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Vigneault Harold, René Lefebvre, Miroslav Nastev, Numerical Simulation of the Radius of Influence for Landfill Gas Wells Vadzone journal 10.2136 2004. 0909.2004 p. 909–916,*
2. *Young Alan , Mathematical Modeling of Landfill Gas Extraction, Journal of Environmental Engineering, December 1989, ISSN (online): 1943-7870 Vol. 115, No. 6 : pp. 1073-1087*
3. *Nastev, M. 1998. Modeling landfill gas generation and migration in verisanitary landfills and geological formations. Ph.D. diss. Laval University, Quebec, Canada*
4. *Ганев, И. Оценка на количествата сметищен газ в съществуващи депа за твърди битови отпадъци, I-ва годишна конферанция Waste infrastructure & services, София, юни 2010*

Автор: Боян Димитров, гл.ас. инж., Колеж по енергетика и електроника, Технически университет - София, E-mail address:*biogas@abv.bg*

Постъпила 20.11.2012 **Рецензент** Доц. д-р Огнян Бекриев

Годишник на Технически Университет - София, т. 62, кн.3, 2012
Proceedings of the Technical University - Sofia, v. 62, book 3, 2012

ВЕРИФИКАЦИЯ НА МОДЕЛИТЕ, ИЗПОЛЗВАНИ ЗА ПРОГНОЗИРАНЕ НА СРЕДНИЯ ГОДИШЕН ДОБИВ НА СМЕТИЩЕН ГАЗ ОТ ДЕПО „СУХОДОЛ”

Ивайло Ганев

Резюме: *Настоящото изследване представлява верификация на прогнозните данни за добива на сметищен газ от депо за неопасни отпадъци в Суходол. Като основа за верификацията са използвани данните, получени от работата на инсталацията за оползотворяването му чрез производство на електроенергия. Получените резултати показват, че направената прогноза е била сравнително точна, въпреки множеството недетерминирани входни параметри.*

Ключови думи: *сметищен газ, депа за отпадъци, прогнози, LanGem*

VALIDATION OF A MODEL PREDICTING THE MEAN, ANNUAL LANDFILL GAS GENERATION IN LANFILL "SUHODOL"

Ivaylo Ganev

Abstract: *This study is a verification of forecasted data for extraction of landfill gas from municipal solid waste landfill in Suhodol. The verification procedure is processed with the use of a data set, obtained during the operation of the plant for landfill gas utilization through electricity generation. The results show that the forecasts were adequate despite the uncertainties in the input parameters of the applied models.*

Keywords: *landfill gas, landfills, forecasts, LanGem*

1. Въведение

От средата на м. февруари 2011 г. на депо Суходол е въведен в експлоатация генератор, работещ с енергоносител сметищен газ. Сравнително краткият период на експлоатация и проблемите, свързани с факта, че се утилизира сметищния газ само от малка част от депото, попречиха да се получат пълни данни за общото количество емитиран газ. Въпреки относително малката информация, с която се разполагаше, се направи опит за първи път у нас да се сравнят получените реални данни с прогнозните такива.

© 2012 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

2. Прогнозиране

Прогнозите за дебита на сметищния газ е извършена по методиката, използвана от Американската агенция за околна среда, използвайки LanGEM модел [1,2,3,4].

Общият вид на LanGEM модела е:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^{n} k.L_0 .M_i) (e^{-kt_i}) \qquad (1)$$

където:

Q_{CH_4} = прогноза за генериран метан в $м^3$/г ;

i = нарастване на годините ;

n = година на изчисление ;

k = процент на генериран метан (1/год) ;

L_o = количество отделян метан в $м^3$ от 1 мегаграм или 1 тон отпадъци ;

M_i = количество депонирани отпадъци в $i^{тата}$ година в тонове ;

t_i = възраст на отпадъците, депонирани през $i^{тата}$ година .

Приема се, че съдържанието на метан в сметищния газ е 50%.

Въпреки че наглед всичко е ясно, изключително трудно е определянето на двата коефициента: k и L_o

В (1) L_o определя количеството генериран метан от 1 тон отпадъци. Теоретично той е в диапазона от 6 до 270 $м^3$/тон. Този коефициент зависи основно от морфологичния състав на отпадъка. От него се получават данните за процентното съдържание на биоразградимите компоненти в отпадъка, а също и каква е скоростта им на разграждане – ниска, средна или висока. Данни за морфологичния състав на отпадъка ни бяха предоставени от собственика на депото като достоверни, но не е известно да се правени експериментални изследвания, съгласно утвърдените методики за получаването му.

В (1) k – е коефициент, определящ скоростта на генериране на метан. Той зависи основно от влажността на отпадъците, наличието на бактерии, предизвикващи образуването на метан, pH на отпадъка, температурата в тялото на депото.

Върху тези коефициенти освен горепосочените параметри влияние оказват и следните данни за съответното депо за отпадъци: наличието на самозапалвания, профила и дълбочината на депото, организацията на експлоатацията е важна предпоставка за създаване на условия за анеаробно газообразуване, проекта на депото, климатичните особености и др.

Очевидно е, че промяната на всеки един от тези параметри оказва силно влияние върху прогнозата за добив на биогаз.

Информацията, която ни бе предоставена за прогнозите, се свеждаше основно до геометрични характеристики на депото и количеството на отпадъците. За количеството на отпадъците има точни данни след 2000 г. (от тогава се извършват измервания с кантар на постъпващото количество отпадък). Количеството на

отпадъците, депонирани преди това, беше определено на базата на експертна оценка. У нас и до момента няма актуална база данни за количеството и състава на отпадъците. Това е валидно за всички градове.

На базата на тези оскъдни данни бе направена прогнозата за дебита на сметищен газ – респективно метан. Трябва да отбележим, че все пак имахме и наблюдения върху експлоатацията на инсталацията за изгаряне на сметищен газ, която обслужваше само най-старата част на депото. Това ни накара да коригираме коефициентите (L_o и k) към по-песимистична прогноза [5]. Т.е . извършихме две прогнози. Данните за направените прогнози са обозначени като:

- LanGEM – това е прогнозата, направена с модела на Американската агенция с входни данни, подадени от собственика на депото.
- ИГ – това е прогнозата, направена от нас, със същия модел, но са коригирани входните параметри, по наша експертна оценка базирана на многогодишни наблюдения и измервания на свободно изтичащия метан от кладенците на депото, както и от анализа на работата на инсталацията за високотемпературно изгаряне на биогаз, работеща на депото. Тази прогноза е послужила при избора на параметрите на генериращата мощност в Суходол.

3. Реални данни

Оценката на количеството оползотворен метан е получена на базата на обратния баланс на инсталацията:

$$Q_{CH_4} = P_{el}/(\eta . B) \qquad (2)$$

където:

- Q_{CH_4} е количество оползотворен метан;
- P_{el} – количество произведена енергия ;
  η – к.п.д. на инсталацията – за номинален режим е 39%, а в случая на 50% това е около 30%
- B – калоричност на метана в kW/Nm3 – 9.7 kW/$Nm^{3;}$
- P_{el} – произведената енергия за година.

Отчетено е , че инсталацията не работи непрекъснато. През 2011 и 2012 г. тя работи 28.5% от времето в годишен аспект или това са 2500 часа. Поради обстоятелството, че инсталацията е предназначена да бъде захранвана от цялото депо, а в момента се черпи газ само от най-старите клетки на депото, не може да се осигури достатъчно газ за поддържането на непрекъснатата работа на инсталацията. Когенераторът не може да работи при товар под 50%, което означава, че дебитът на сметищния газ трябва да е над 520 $м^3$/h. Режимът на работа на инсталацията е след пускането й тя да работи при минимален товар до намаляването на концентрацията на метана до нивото на взривоопасност и след това генераторът се изключва и депото се „възстановява” – т.е увеличава се концентрацията на метан. Разбира се, в процеса на възстановяване има свободно изтичане на сметищен газ, защото единият край на депото е отворен. Възприета е разлика от 10% на дебита на изтичащия свободно сметищен газ и този от принудителното извличане при работата на когенератора.

Сравнението на резултатите е направено за сметищен газ със съдържание на метан 50%

$$Q_{СГ} = 2.\ Q_{CH_4} \qquad (3)$$

След като е определено годишното количество оползотворен сметищен газ, се определя дебитът му за час и определяме свободно изтичащия сметищен газ в интервалите от време, в които не работи когенераторът.

$$Q_{СГсв.изтичане} = 0{,}9 * Q_{СГ\ оползотворен} \qquad [m^3/h] \qquad (4)$$

Средно часовият дебит в годишен разрез се получава по формулата

$$Q_{СГ} = (H1.\ Q_{СГоползотворен} + H2.Q_{СГсв.изтичане}) / 8760 \qquad [m^3/h] \qquad (5)$$

където: H1 – са часовете на работа на когенератора, а H2 – часовете, в които не работи инсталацията.

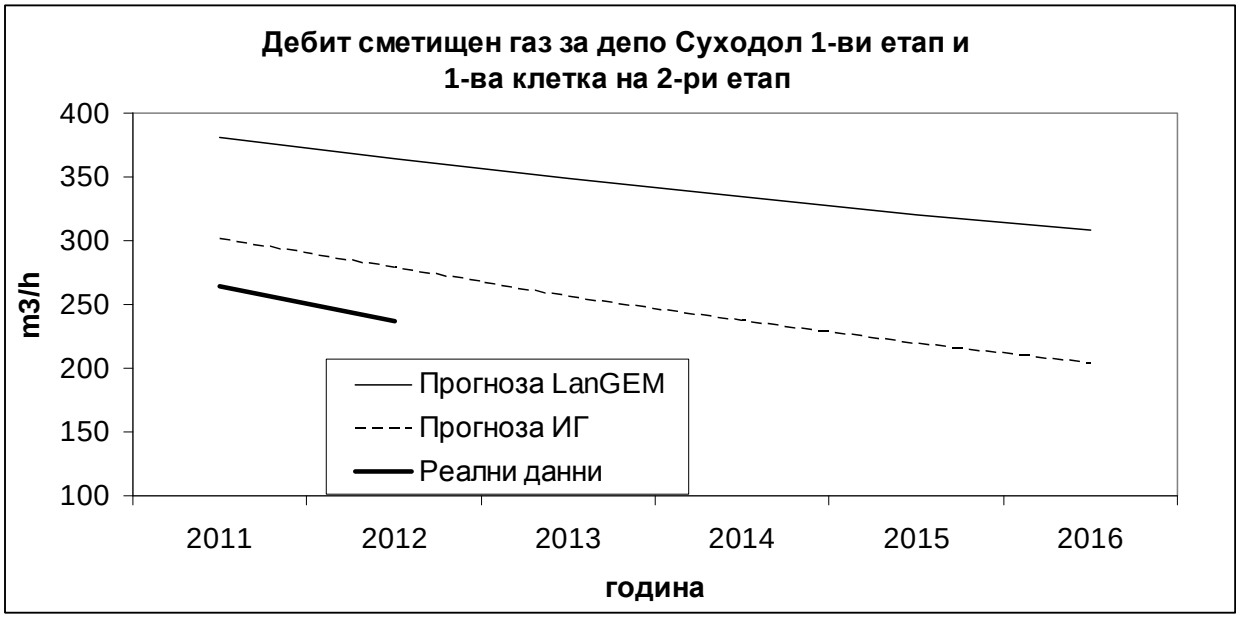
4. Получени резултати

Получени са следните данни при направените изчисления – дебитът е в $м^3/h$:

Таблица 1

	Дебит на сметищен газ								
	Прогноза с LanGEM			Прогноза на ИГ			Реално	Грешка от	
Год.	1-ви етап	1-ва кл. 2 етап	**Общо**	1-ви етап	1-ва кл. 2 етап	**общо**	От генератора	LanGem	ИГ
2008	196	243	**439**	118	256	**374**			
2009	188	229	**418**	109	240	**349**			
2010	181	217	**398**	100	224	**324**			
2011	174	206	**380**	92	209	**301**	**264**	31%	12 %
2012	168	196	**364**	84	194	**278**	**237**	35%	15 %
2013	162	187	**349**	77	179	**256**			
2014	156	178	**334**	70	167	**237**			
2015	150	170	**321**	64	155	**219**			
2016	145	163	**308**	59	144	**203**			

които графично са представени на фиг.1.



Фиг.1

5. Анализ на резултатите

При съпоставката на представените две прогнози с изчислените реални параметри става очевидно, че нашата прогноза е по-близка до реалните параметри от прогнозата, получена директно от модела LanGEM. Грешките при двете прогнози са за LanGEM – 30-35%, а за нашата прогноза ИГ – 12-15%.

Анализите показаха, че основната грешка идва от некоректните входни данни, най-вече за морфологичния състав на отпадъка. Очевидно е, че коефициентът L_o е значително увеличен. В нашата прогноза беше заложено L_o = 40 m^3/т, което се оказва даже завишено.

6. Заключение

Този първи опит да се сравнят прогнозните и реални резултати за добив на сметищен биогаз показват, че нямаме коректни изходни данни. Директното прилагане на познатия модел LanGEM (с входни данни, предоставени от собственика на депото), водят до резултати, силно преувеличаващи възможностите за добив и утилизация на сметищния газ. Това се потвърждава и от факта, че на всички депа в България (с изключение на Суходол), на които са монтирани инсталации за изгаряне на сметищния газ, те не могат да работят в номинален режим, поради преоразмеряването им по отношение на дебит сметищен газ.

Значително по-точни са данните от прогнозата, направена от нас (използвани и от община София), защото не е използван само теоретичния подход, а са извършени предварителни изследвания с цел да се получи точен резултат. Това налага преди разработването на инвестиционни програми да се извършат и експериментални изследвания на депото, за да има адекватност на прогнозните резултати.

Литература

1. *LFG Energy Project Development Handbook, Chapter 2. Landfill Gas Modeling, http://www.epa.gov/lmop/documents/pdfs/pdh_chapter2.pdf, USA, 08/09/2010*

2. *H. Kamalan, M. Sabour and N. Shariatmadari,. A Review on Available Landfill Gas Models. Journal of Environmental Science and Technology ISSN 1994-7887, 4: 79-92., 2011*

3. *Scharff, H. and J. Jacobs, 2006. Applying guidance for methane emission estimation for landfills Waste Manage., 26: 417-429.*

4. *Oonsld Augenstein, Comparison of models for predicting landfil methane recover, The solid waste association of north America, SR-430-2604 1, USA, 1997*

5. *Ganev I., I. Naydenova, Dimitrov B Development and implementation of the first system for efficient energy utilization of landfill gas in Bulgaria – poster, Cleaner combustion 2011, 2nd Annual Meeting, Detailed Chemical Models for Cleaner Combustion, Zaragoza, Spain, September 2011*

Автор: Ивайло Ганев, доц. д-р от Колеж по енергетика и електроника, Технически университет - София, E-mail address*: iganev@tu-sofia.bg*

Постъпила 20.11.2012 **Рецензент** Доц. д-р Огнян Бекриев

Годишник на Технически Университет - София, т. 62, кн.3, 2012
Proceedings of the Technical University - Sofia, v. 62, book 3, 2012

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ХИБРИДЕН ДВИГАТЕЛ НА STIRLING

Емил Рац, Цветелина Петрова

Резюме: *В работата е изследвана зависимостта на термичния коефициент на полезно действие и мощността на хибриден двигател на Стирлинг от температурата на горещия и студения източник на топлина. Представени са P-V диаграми, получени при работа на двигателя с три различни честоти. Представена е структурата на изотермичен модел в Matlab.*
Ключови думи: *двигател на Stirling, дисплейсър, коефициент на полезно действие на двигател на Стирлинг, мощност.*

INVESTIGATION OF A HIBRID STIRLING ENGINE

Emil Ratz, Tzvetelina Petrova

Abstract: *The work investigates the dependence of the thermal efficiency and output power of the hybrid Stirling engine from the temperature of the hot and the cold heat source. Presented are P-V diagrams obtained at the engine work with three different frequencies. Presented is the structure of isothermal model in Matlab.*

Keywords: *Stirling engine, displacer, efficiency of the Stirling engine, power*

1. Въведение

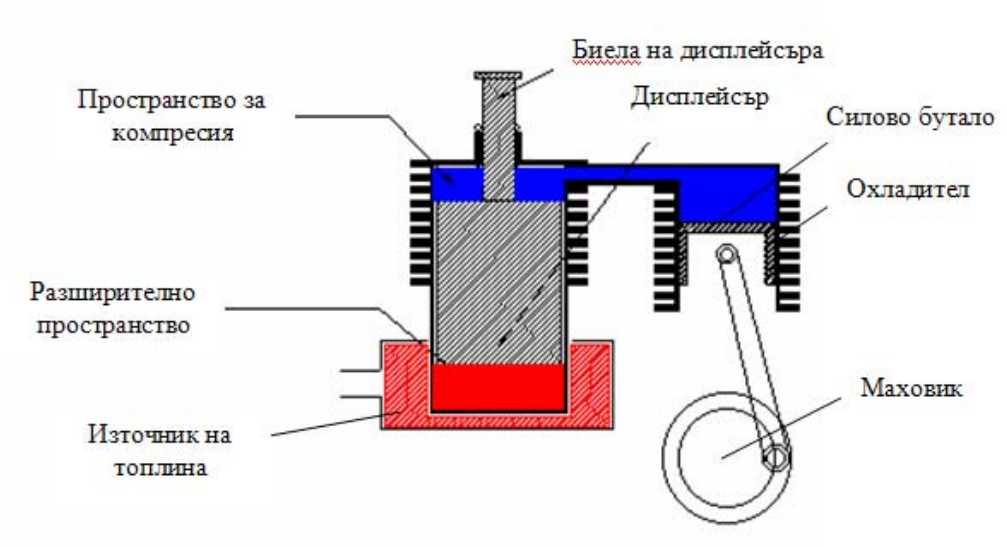
Двигателят на Stirling е двигател с външно горене. Той може да работи с различни източници на топлина (дърва, въглища, слънчева енергия, отпадна топлина от двигатели с вътрешно горене и др.). Работният му флуид е газ - водород, хелий или въздух. Двигателят на Stirling се състои от два свързани цилиндъра с различни напречни сечения и две бутала (фиг.1). По-малкото е силовото бутало, което разширяващия се газ избутва. По- голямото се нарича дисплейсър (изместващо бутало). Предназначението на това бутало е да измества газ, равняващ се на обема му, в посока, противоположна на неговото движение.

Последните години все по-активно се провеждат изследвания на различни видове двигатели на Stirling. Построени са инсталации за производство на електроенергия, включващи такива машини. Електрическото к.п.д. на инсталациите варира от 13,8% до 25% [1, 2]. В сравнение с тях инсталации с двигатели с вътрешно горене, изполващи биогаз, имат електрически к.п.д. около 34% [5].

От гледна точка на задвижването на буталата, двигателите на Stirling се разделят в две групи: с кинематично свързани бутала и със свободни бутала. В настоящата работа се изследва хибридният двигател на Stirling–Ringbom, показан на

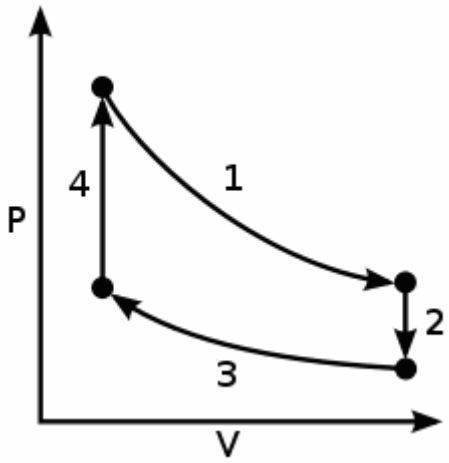
© 2012 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved
ISSN 1311-0829

фиг.1. „Хибриден” двигател означава, че дисплейсърът е свободно бутало, а силовото бутало е кинематично свързано към маховик.



Фиг.1. Хибриден двигател на Stirling-Ringbom

Идеализираният цикъл на Stirling (фиг.2) се състои от две изохори и две изотерми:



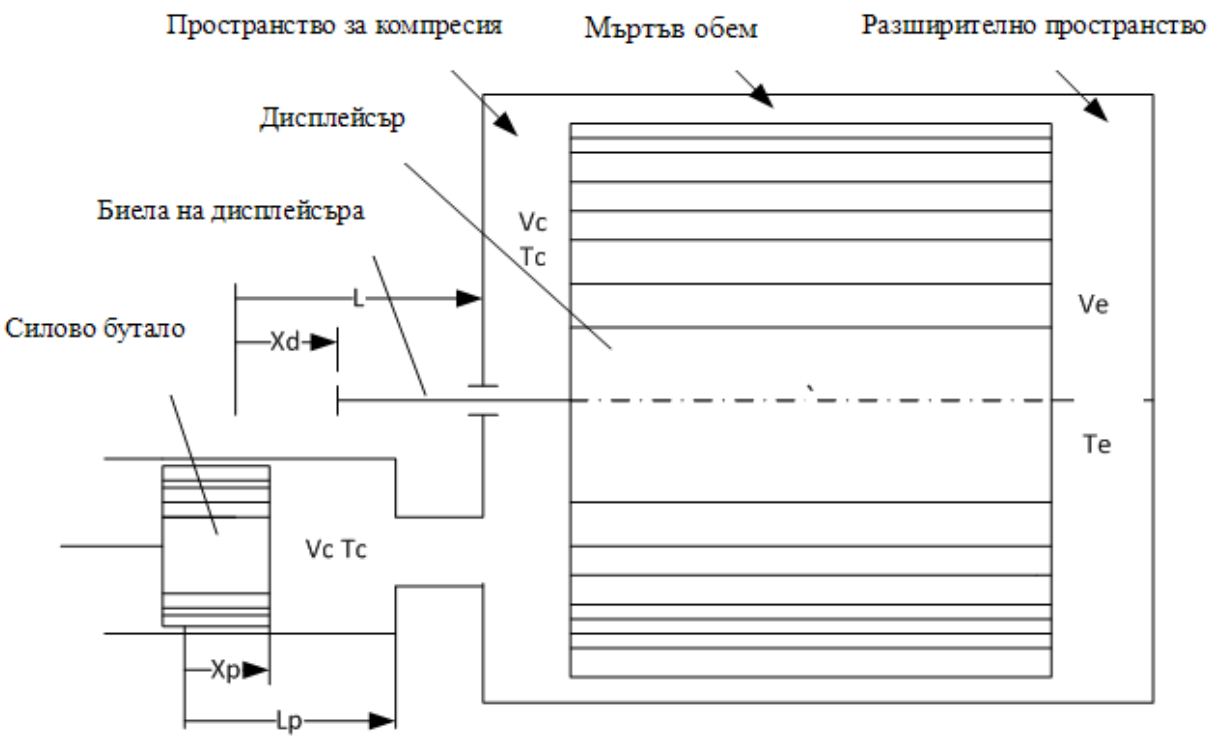
Фиг.2. P-V диаграма на цикъл на Стирлинг

1. Изотермично разширение - разширителното пространство и свързаният топлообменник са при постоянна висока температура. Газът е подложен на почти изотермично разширение, поемайки топлина от горещия източник.
2. Изохорно охлаждане – газът преминава през регенератора, където се охлажда, предавайки топлина на регенератора за употреба в следващия цикъл.
3. Изотермична компресия – пространството за компресия и свързаният топлообменник са под ниска температура, така че газът претърпява почти изотермична компресия, отдавайки топлина на студения източник.
4. Изохорно нагряване – газът минава обратно през регенератора, където си възвръща по-голяма част от топлината, предадена през фаза 2 (фиг.2), нагрявайки се по пътя си към разширителното пространство.

В хибридният двигател на Stirling-Ringbom се използва разликата в налягането на газа в напречно сечение на биелата на дисплейсъра. Тази разлика движи дисплейсъра напред и назад. По този начин средното налягане за един цикъл е приблизително равно на това на околната среда. Работното налягане на двигателя ще бъде по-високо или по-ниско от това на околната среда и ще породи почти равни движещи сили върху биелата на дисплейсъра и в двете посоки. В повечето случаи ефектът от гравитацията може да бъде пренебрегнат.
Силовото бутало е работното бутало. То компресира и избутва газа в цилиндъра на дисплейсъра [3, 4].

2. Аналитичен изотермичен модел на двигател на Stirling

В настоящата работа са представени резултати от изследване на изотермичен модел на хибриден двигател с работен флуид въздух. Принципната му схема е показана на фиг.3.



Фиг.3. Изотермичен модел на двигател на Stirling-Ringbom

Допусканията за изотермичния модел са следните:

1. Всяко от трите пространства (разширително пространство V_e, пространство за компресия V_c, мъртво пространство V_{dead}) в двигателят на Stirling - Ringbom е изотермично.
2. Работният флуид е идеален газ и общата му маса е константа.
3. Външното налягане на газа е константа и е равно на средното налягане през цикъла. Налягането е константа във всяко пространство.
4. Дисплейсърът е физически ограничен от твърди стопори.

5. Игнорирани са гравитационните и вискозните сили. Единствената сила, действаща върху дисплейсъра, когато е задържан в крайно горно или крайно долно положение, е разликата в налягането между външното и вътрешното налягане напречно на биелата на дисплейсъра.

6. Движението на силовото бутало е синусоидално.

Съгласно приетите допускания налягането на работният газ P се изчислява по следната зависимост:

$$P = \frac{M.R}{\left(\frac{V_e}{T_e} + \frac{V_c}{T_c} + \frac{V_{dead}}{T_{dead}}\right)}$$

където: M – маса на работния флуид; R- газова константа на работния флуид.

Разширителния обем и обемът на компресия зависят от положенията на дисплейсъра и на силовото бутало:

$$V_e = A.(L - X_d)$$

$$V_c = (A - A_r).(L + X_d) + A_p.(L_p - X_p)$$

където: A- напречно сечение на дисплейсъра; Ar – напречно сечение на диплейсърната биела; Ap – напречно сечение на силовото бутало.

Коефициентът на полезно действие се пресмята по следната зависимост:

$$\eta_t = \frac{Q_k + Q_h}{Q_h}$$

където: Q_h - топлината, предадена от горещият източник към работния газ; Q_k – топлината, отдадена от газа към студения източник.

Мощността се определя по формулата:

$$N_t = f.\int_t^{t+T} \frac{dW}{dt}$$

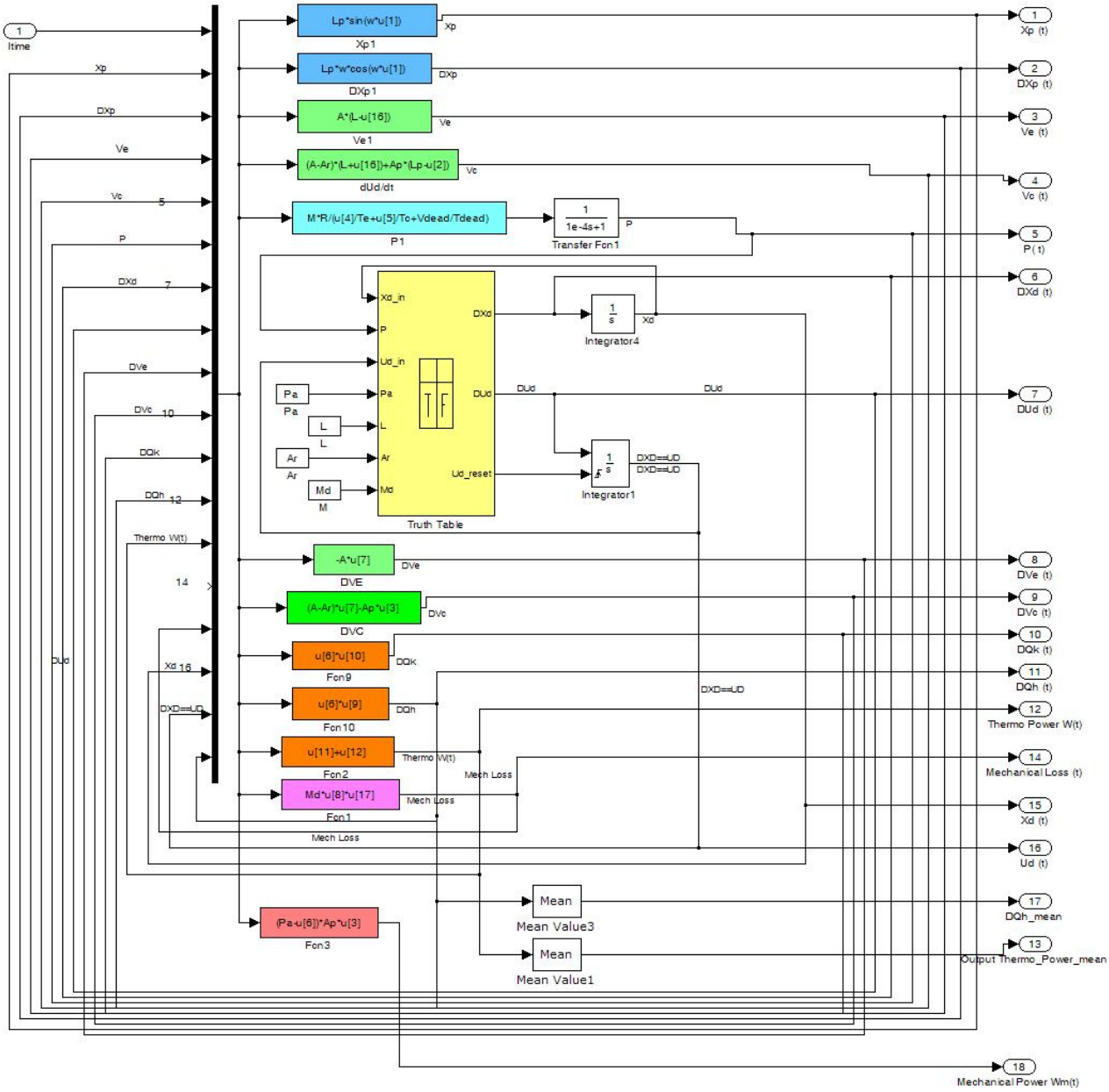
където: W – извършената работа; t – времето; f- честота на двигателя; T- период на един цикъл.

$$W = Q_k + Q_h$$

3. Програмен модел в Matlab

Двигателят е моделиран като подсистема в програмна среда Matlab (фиг.4). Тя има изчислителни инструменти, които улесняват симулирането на системи от различно естество. Моделът включва алгебрични и диференциални уравнения,

които са моделирани с инструменти на Simulink. Създаденият модел отразява ограниченията, свързани с хода на дисплейсъра.



Фиг.4 Структура на подсистемата двигател на Stirling-Ringbom в Matlab

4. Симулационни изследвания

Моделът е изследван при работа с въздух и с параметри, дадени в табл.1. Резултатите, дадени в табл.2, показват повишаване на термичният к.п.д. на двигателя на Stirling с повишаване на температурната разлика между горещия и студения източник на топлина.

Числените стойности на параметрите на модела се задават в маската на подсистемата.

Табл.1

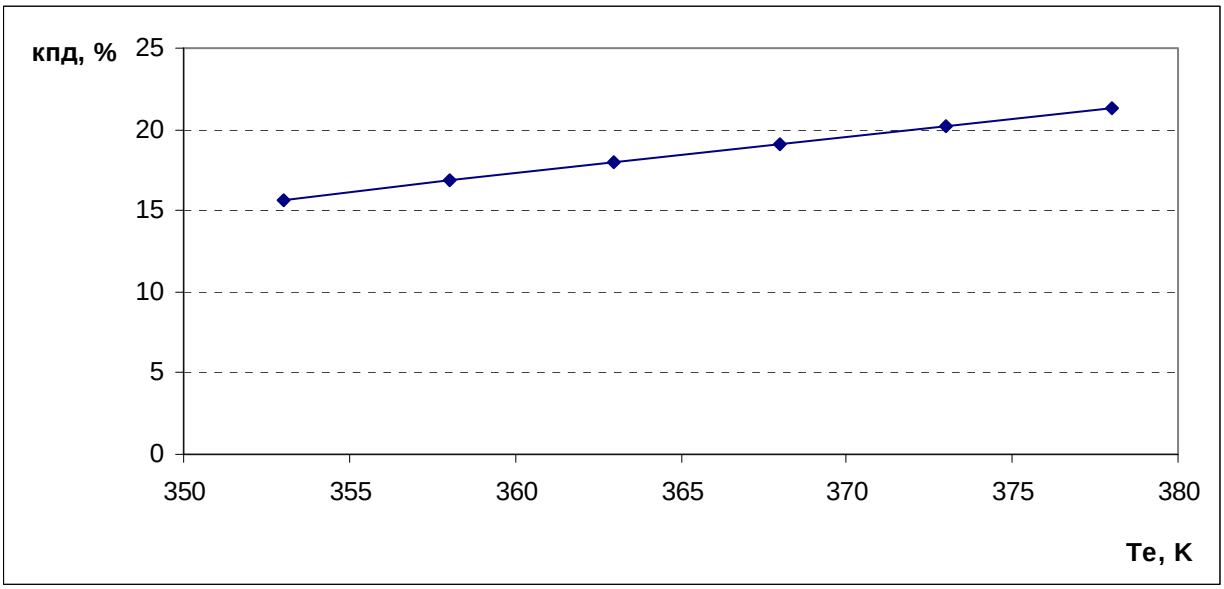
Стойности на параметри на изследвания двигател на Stirling-Ringbom

Площ на напречно сечение на дисплейсъра	$A = 2124.10^{-4}\ m^2$
Площ на напречно сечение на силовото бутало	$Ap = 314.10^{-4}\ m^2$
Ход на силовото бутало	Lp = 0,13m
Обем на мъртвото пространство	$Vdead = 1.10^{-3}\ m^3$
Температура на разширителното пространство	Te = 363K
Ефективна температура в мъртвото пространство	Tdead = 330,5K
Честота	f = 4Hz
Ъглова скорост	$\omega = 4.2.\pi$ rad/s
Маса на работния флуид (въздух)	M = 0,041625kg
Площ на напречно сечение на биелата дисплейсъра	$Ar = 78,5.\ 10^{-4}\ m^2$
Ход на дисплейсъра	L = 0,08m
Маса на дисплейсъра и на биелата му	Md = 0,530kg
Температура в пространството за компресия	Tc= 298K
Газова константа на въздуха	R = 287 J/kgK
Налягане на околната среда	$Pa = 1,01325.10^5 Pa$

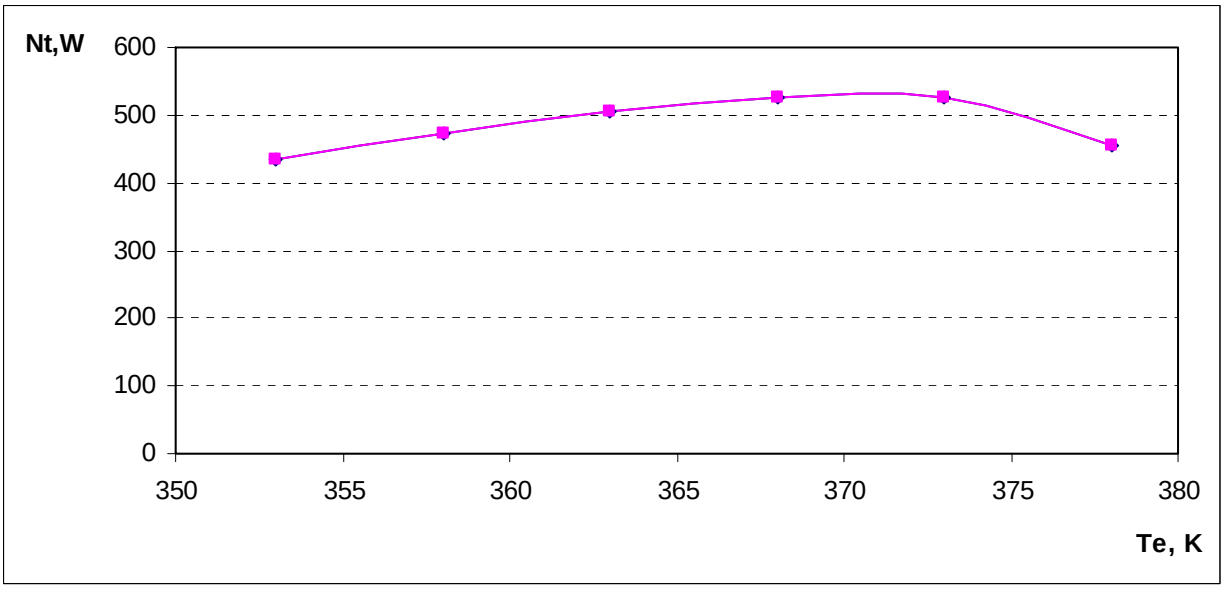
Табл. 2

Резултати при промяна на температурата на източника на топлина T_e

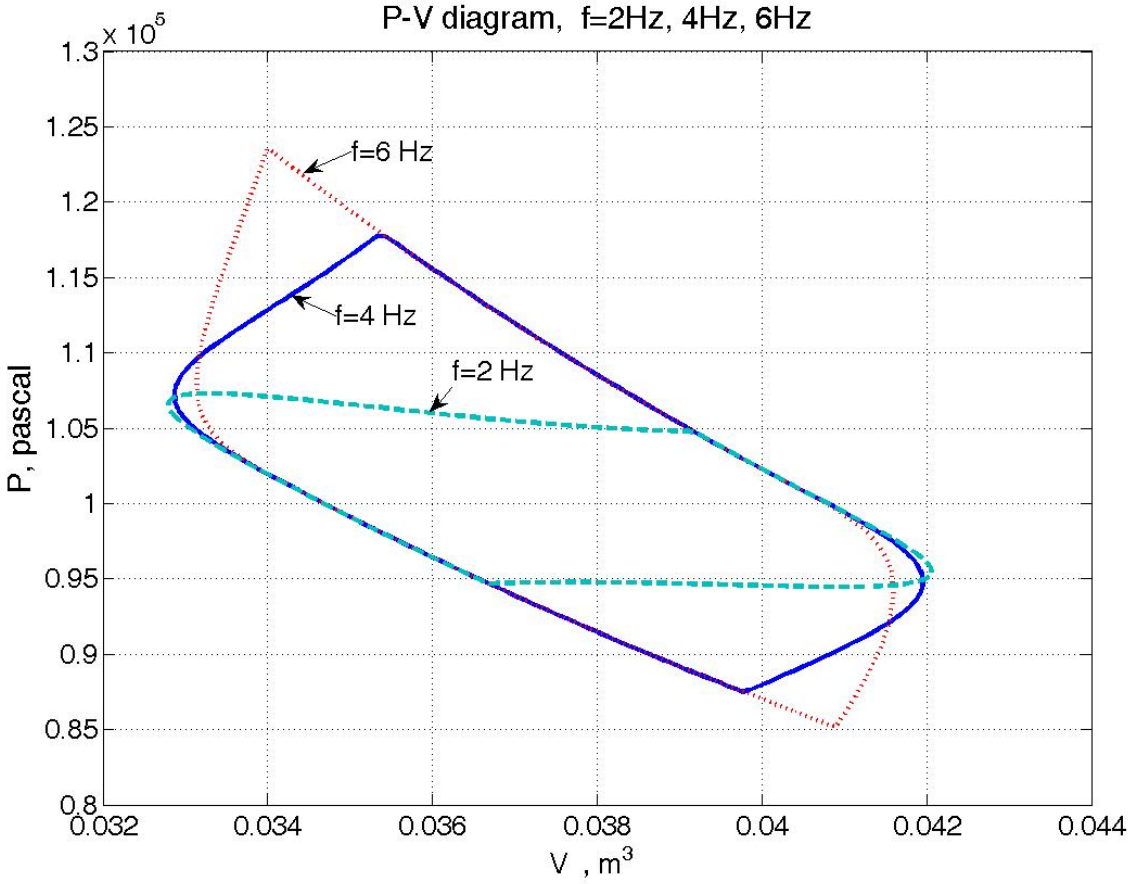
Входни данни							
Температура на източника на топлина, К	T_e	353	358	363	368	373	378
Температура на охладителя, К	T_c	298	298	298	298	298	298
Температура в мъртвия обем, К	$T_{dead}=(T_e+T_c)/2$	325,5	328	330,5	333	335,5	338
Честота на двигателя, Hz	f	4	4	4	4	4	4



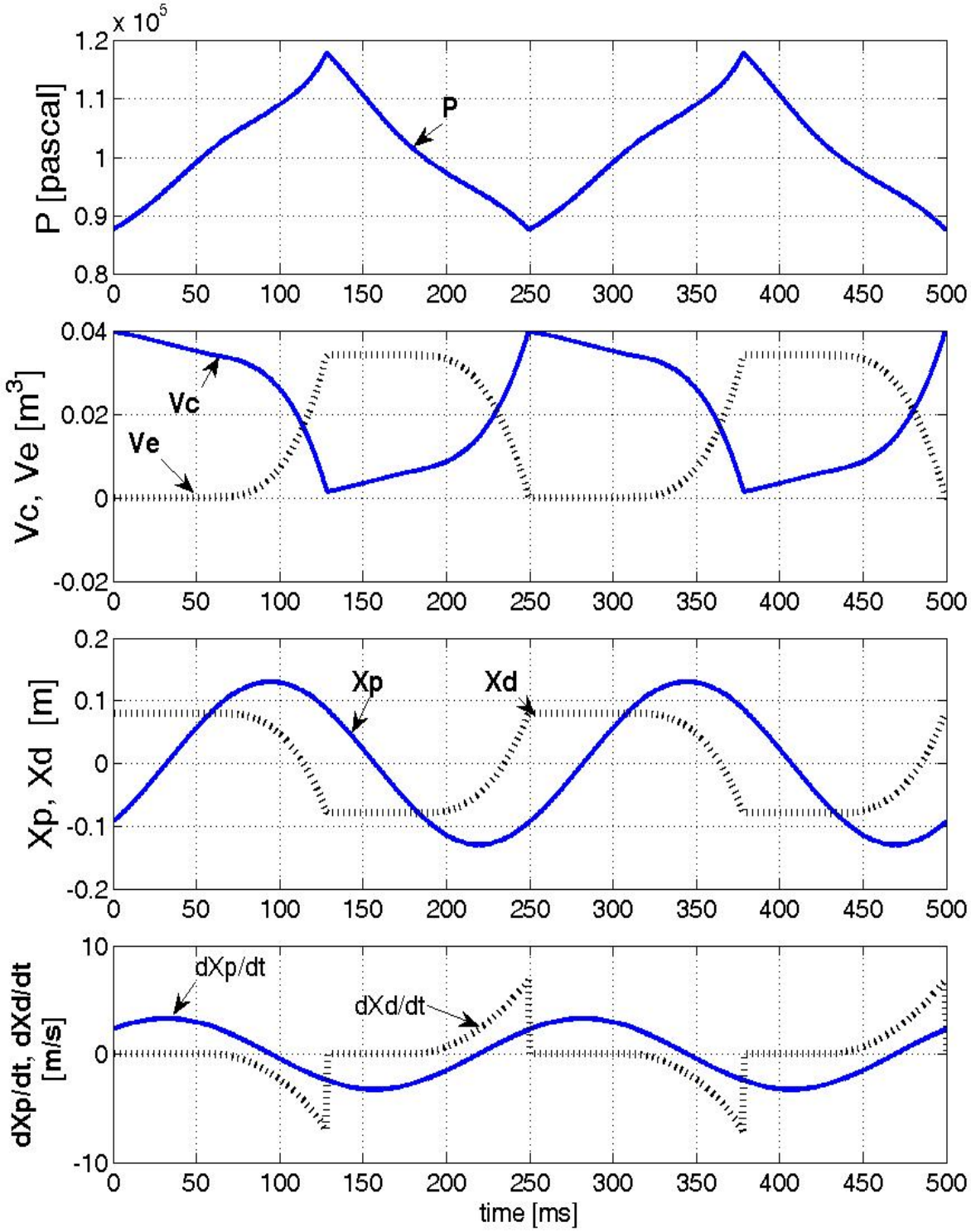
Фиг.5. Зависимост на η_t от температурата на горещия източник T_e



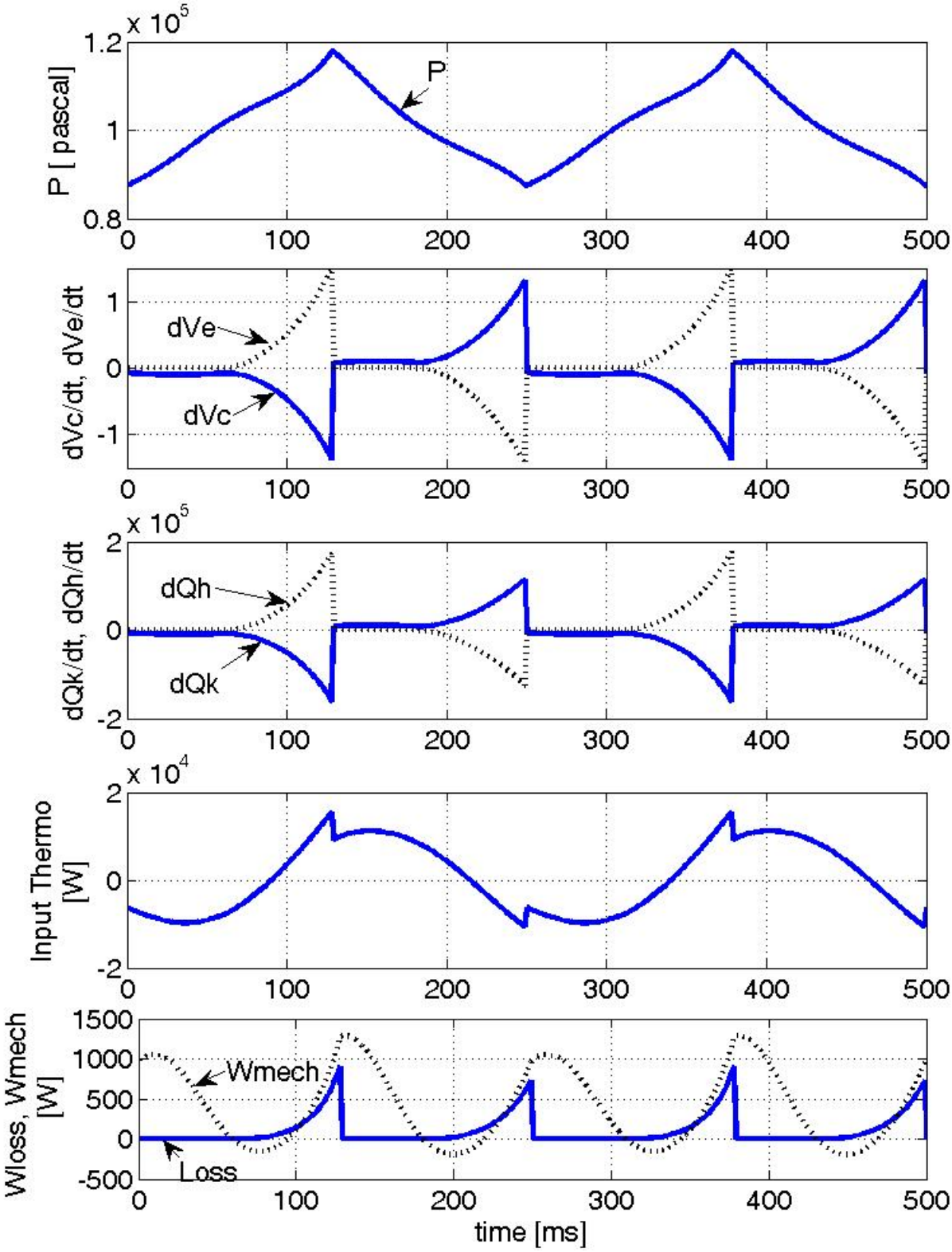
Фиг.6. Зависимост на N_t от температурата на горещия източник T_e



Фиг.7. Налягането като функция на обема при три фиксирани честоти



Фиг.8. Осцилограми във времето на налягането (P),
обемите на компресия (Vc) и на разширение (Ve),
положението на силовото бутало (Xp) и на дисплейсъра (Xd),
скоростта на движение на силовото бутало ($\frac{dX_p}{dt}$) и на дисплейсъра ($\frac{dX_d}{dt}$)



Фиг.9. Промяна във времето на налягането (P), пространството на компресия ($\frac{dV_c}{dt}$), пространството на разширение ($\frac{dV_e}{dt}$), внасяната топлинна мощност и др.

4. Заключение

Много параметри оказват влияние върху мощността и коефициента на полезно действие на двигателя. Двигателят на Stirling подлежи на оптимизация с цел постигане на максимална ефективност. С разработеният модел могат да се направят необходимите за целта изследвания. Показана е работоспособността на модела. Резултатите от него са сравнени и показват сходство с резултати, публикувани от други автори [3,6].

ЛИТЕРАТУРА

[1] Stephen J. Mraz, Infinia uses Stirling cycle for solar power and air conditioning, August 11, 2011
[2] http://www.innova.co.it
[3] Mingfei Chen, Computer Simulation of Ringbom Stirling Engine with Solar pond, Ohio University, June 1989
[4] Caleb C. Lloyd, A low temperature differential Stirling engine for power generation
[5] Ганев И., Димитров Б., Оценка на енергийният потенциал на сметищния газ, отделян от депо за твърди битови отпадъци „Суходол”, ЕМФ 2005, Созопол, септември 2005
[6] Sorea N., Cernomazu D., A computer simulation of solar L-27 LTD Stirling engine, Buletin AGIR, octombrie-decembrie, 2011

Автори: Емил Рац, проф. дтн - катедра „Елекрически машини”, Технически Университет - София, E-mail address: *emil_ratz@yahoo.com*; Цветелина Петрова - гл.ас., катедра „Енергетика и машиностроене”, Технически Университет - София, E-mail address: *petrova.kee@gmail.com*

Постъпила 21.11.2012 **Рецензент** Доц. д-р Нели Рац

Годишник на Технически Университет - София, т. 62, кн.3, 2012
Proceedings of the Technical University - Sofia, v. 62, book 3, 2012

МОДЕЛНО ПРЕДСКАЗВАЩО УПРАВЛЕНИЕ НА ЛАБОРАТОРЕН ТОПЛИНЕН ОБЕКТ

Станислав Енев

Резюме: *Работата представя проектирането и реализацията на алгоритъм за моделно-предсказващо управление на лабораторен топлинен обект. Описана е формулировката на оптимизационната задача и са разгледани някои приложни аспекти, свързани с реализацията и свойствата на алгоритъма. Представени са резултати от проведени реални експерименти.*

Ключови думи: *моделно предсказващо управление, приложни аспекти*

MODEL PREDICTIVE CONTROL OF A LABORATORY HEAT-EXCHANGE PROCESS EXPERIMENT

Stanislav Enev

Abstract: *This paper presents the design and implementation of a MPC scheme for a laboratory heat-exchange process. The optimization problem formulation is given and some practical aspects related to the implementation and the properties of the overall algorithm are discussed. Experimental results with the implemented control law are presented.*

Keywords: *model predictive control, application aspects*

1. Introduction

The model predictive control (MPC) scheme [1] in its many variations has been applied in industrial process control since more than thirty years. Nowadays, linear MPC may be called a mature industrial technology in the process control field. Methods already exist to characterize the control system stability and performance -wise including the potential issues related to optimization problem feasibility. Following the ever increasing computational power of modern day computers the areas of application of MPC grow in number and MPC applications are reported in power electronics control, automotive control applications and others with sampling frequencies going in the kHz range [2]. Simultaneously, there is active research and development of efficient optimization algorithms and implementations [3], new explicit schemes based on “off-line” optimization, and extensions to nonlinear systems with integration of fuzzy models and neural network approximators.

In this paper, a linear MPC scheme is implemented to control a laboratory heat-exchange process. Certain aspects related to the performance of the MPC are illustrated

© 2012 Publishing House of Technical University of Sofia
All rights reserved

ISSN 1311-0829

experimentally. Since, inherently to the MPC scheme, an open-loop optimal control problem is solved at each sampling instant, unmeasured disturbances and model mismatches can influence significantly control system performance and introduce undesired steady-state errors or offsets. Moreover, noisy measurements can also drastically degrade the performance if not properly "taken care of" as seen in experiments and simulations.

A formulation of the optimization problem on control input changes is developed, which augmented with a state observer attributes integral action of the overall control law. A Kalman-estimator updating scheme of the observer gain is used in order to attenuate effects of measurement noise, which turns out to be crucial in order to obtain good control. Some experimental results are presented, along with details concerning the implementation of the control algorithm.

2. Process description and model

The heat-exchange process is depicted in Fig. 1. The pump creates a forced circulation with flow rate $f_{hj} = const$ of a fluid (water) between the heating tank, where the fluid is being heated by an electric heater and the jacket, where it gives off its heat to modulate the temperature of the fluid (water) in the main tank. An inflow stream with controlled (constant) flow rate - f_{in} and temperature - θ_{in} is entering the main tank and an outflow stream, with flow rate - f_{out} is exiting the main tank. The agitator contributes to equalizing the temperature throughout the entire volume of the main tank (perfect mixing conditions) and to having $\theta_{out} = \theta_t$, $\theta_{out}(\theta_t)$ being the main process variable.

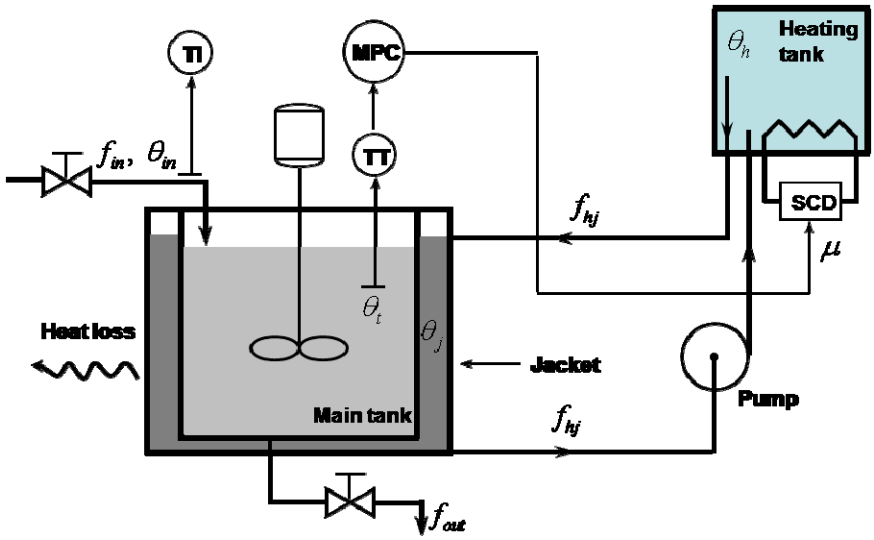


Fig. 1

The control input is the duty cycle - μ in the PWM scheme used to modulate the power to the electric heater mounted in the heating tank, i.e. the fraction of the maximal heating power available. The main disturbance is the temperature of the inflow stream - θ_{in}. With the existing installation it is observed that the jacket is not well thermally insulated from the environment and heat loss is present through the outer surface of the jacket.

The tank temperature is measured with 4-20 mA temperature transmitter using Pt100 resistor as sensor and a temperature indicator is available for the inflow stream temperature. The PWM control is implemented with a solid-state relay (SSR).

The discrete-time model used in the algorithm for predicting the future state and output of the process is obtained by discretization, assuming zero-order holds at the inputs, of the following continuous-time description:

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_t \\ \dot{\theta}_j \\ \dot{\theta}_h \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 \end{bmatrix}}_{\boldsymbol{A}_c} \begin{bmatrix} \theta_t \\ \theta_j \\ \theta_h \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ k_\mu \end{bmatrix}}_{\boldsymbol{b}_{1,c}} \mu + \underbrace{\begin{bmatrix} k_\theta \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_{\boldsymbol{b}_{2,c}} \theta_{in} \quad . \qquad (1)$$

Third-order dynamics are assumed with the temperatures in each vessel being the states. The structure is chosen based on a model of the process, developed by writing energy balances. Details can be found in [4]. With constant volume of fluid in the main tank and constant flow rate of the inpflow stream, a linear time-invariant system is described. As seen, the heat loss from the jacket outer surface is neglected in the model.

3. MPC convex QP problem formulation on control input changes

In this paragraph the formulation of the optimization problem is described. The underlying process model used is the following discrete-time description:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{x}_{(k+1)} &= \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}_{(k)} + \boldsymbol{b}u_{(k)} + \boldsymbol{b}_d d_{(k)} \\ y_{(k)} &= \boldsymbol{C}\boldsymbol{x}_{(k)} \end{aligned} , \qquad (2)$$

with: $\boldsymbol{x}_{(k)} \in \mathbf{R}^n$, $y_{(k)} \in \mathbf{R}$, $u_{(k)} \in \mathbf{R}$, $d_{(k)} \in \mathbf{R}$, $\boldsymbol{A} \in \mathbf{R}^{n \times n}$, $\boldsymbol{b} \in \mathbf{R}^n$, $\boldsymbol{b}_d \in \mathbf{R}^n$, $\boldsymbol{C}^T \in \mathbf{R}^n$, $s_{(k)}$ - being the value of the signal $s(t)$ at the sampling instant $t = kT_0$, and T_0 - the sampling period. The input structure is chosen according to the process model. It is clear that for the concrete case, we have $n = 3$.

The following so-called "prediction horizon vectors" vectors are defined:

$\boldsymbol{y}_{(k)} \equiv [y_{(k+1|k)}, y_{(k+2|k)}, \dots, y_{(k+N|k)}]^T \in \mathbf{R}^N$ - prediction horizon output vector;

$\boldsymbol{y}_{R,(k)} \equiv [y_{R,(k+1|k)}, y_{R,(k+2|k)}, \dots, y_{R,(k+N|k)}]^T \in \mathbf{R}^N$ - prediction horizon reference signal vector;

$\boldsymbol{u}_{(k)} = [u_{(k|k)}, u_{(k+1|k)}, \dots, u_{(k+N-1|k)}]^T \in \mathbf{R}^N$ - prediction horizon control input vector;

$\Delta\boldsymbol{u}_{(k)} = [\Delta u_{(k|k)}, \Delta u_{(k+1|k)}, \dots, \Delta u_{(k+N-1|k)}]^T \in \mathbf{R}^N$ - prediction horizon input change vector, with: $\Delta u_{(k+i|k)} = u_{(k+i|k)} - u_{(k+i-1|k)}$;

$\boldsymbol{d}_{(k)} = [d_{(k)}, d_{(k+1|k)}, \dots, d_{(k+N-1|k)}]^T \in \mathbf{R}^N$ - prediction horizon disturbance vector;

with N - the prediction horizon, $s_{(k+i|k)}$ being the predicted future value of the signal $s(t)$ at the sampling instant $t = kT_0$.

Remark: $u_{(k|k)}$ is the control input to be applied to the plant during the interval $kT_0 \le t < kT_0 + T_0$ (assuming zero-order hold at input), determined as a result of the optimization procedure, performed at $t = kT_0$.

At first the objective function is expressed in prediction horizon vector form as:

$$J_{(k)} = \frac{1}{2}(\boldsymbol{y}_{R,(k)} - \boldsymbol{y}_{(k)})^T \boldsymbol{Q}(\boldsymbol{y}_{R,(k)} - \boldsymbol{y}_{(k)}), \quad (3)$$

with: $\boldsymbol{Q} = \boldsymbol{diag}(q_i) \in \mathbf{R}^{N\times N}$, $i = 1..N$; q_i - weight coefficients.

We have the following:

$$\boldsymbol{y}_{(k)} = \boldsymbol{M}\boldsymbol{u}_{(k)} + \boldsymbol{G}\boldsymbol{x}_{(k)} + \boldsymbol{M}_d\boldsymbol{d}_{(k)}, \quad (4)$$

with $\boldsymbol{M} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{Cb} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \boldsymbol{CAb} & \boldsymbol{Cb} & 0 & \cdots & 0 \\ \boldsymbol{CA}^2\boldsymbol{b} & \boldsymbol{CAb} & \boldsymbol{Cb} & \ddots & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & 0 \\ \boldsymbol{CA}^{N-1}\boldsymbol{b} & \boldsymbol{CA}^{N-2}\boldsymbol{b} & \cdots & & \boldsymbol{Cb} \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{N\times N}$; $\boldsymbol{M}_d = \begin{bmatrix} \boldsymbol{Cb}_d & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \boldsymbol{CAb}_d & \boldsymbol{Cb}_d & 0 & \cdots & 0 \\ \boldsymbol{CA}^2\boldsymbol{b}_d & \boldsymbol{CAb}_d & \boldsymbol{Cb}_d & \ddots & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & 0 \\ \boldsymbol{CA}^{N-1}\boldsymbol{b}_d & \boldsymbol{CA}^{N-2}\boldsymbol{b}_d & \cdots & & \boldsymbol{Cb}_d \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{N\times N}$;

$$\boldsymbol{G} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{CA} \\ \boldsymbol{CA}^2 \\ \boldsymbol{CA}^3 \\ \vdots \\ \boldsymbol{CA}^N \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{N\times n}; \quad \boldsymbol{\Lambda} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{N\times N}; \quad \boldsymbol{1}_{[n]} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^n.$$

By expressing the prediction horizon input vector as: $\boldsymbol{u}_{(k)} = \boldsymbol{\Lambda}\Delta\boldsymbol{u}_{(k)} + \boldsymbol{1}_{[N]}u_{(k-1)}$ we have:

$$\boldsymbol{y}_{(k)} = \boldsymbol{M}\boldsymbol{\Lambda}\Delta\boldsymbol{u}_{(k)} + \boldsymbol{M}\boldsymbol{1}_{[N]}u_{(k-1)} + \boldsymbol{G}\boldsymbol{x}_{(k)} + \boldsymbol{M}_d\boldsymbol{d}_{(k)}, \quad (5)$$

or with $\boldsymbol{f}_{(k)} \equiv \boldsymbol{M}\boldsymbol{1}_{[N]}u_{(k-1)} + \boldsymbol{G}\boldsymbol{x}_{(k)} + \boldsymbol{M}_d\boldsymbol{d}_{(k)}$ finally:

$$\boldsymbol{y}_{(k)} = \boldsymbol{M}\boldsymbol{\Lambda}\Delta\boldsymbol{u}_{(k)} + \boldsymbol{f}_{(k)}. \quad (6)$$

Remarks: If no a priori information is available, typically constant disturbance is assumed during the prediction horizon, that is, $d_{(k+i|k)} = d_{(k)}$, $i = 1..N$.

* If $T_{opt} << T_0$ (T_{opt} - the time interval required to perform the optimization procedure), then an "acceptable" latency will be introduced. If $T_{opt} <\approx T_0$, either a one sampling period delay must be introduced in the plant description $(\boldsymbol{A}, \boldsymbol{b}, \boldsymbol{b}_d, \boldsymbol{C})$, or a prediction for $\boldsymbol{x}_{(k)}$ can be used in the output expression i.e. $\boldsymbol{x}_{(k)} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}_{(k-1)} + \boldsymbol{b}u_{(k-1)} + \boldsymbol{b}_d d_{(k-1)}$. Thus the optimization procedure yielding $u_{(k|k)}$ can be performed in the interval $kT_0 - T_0 \le t < kT_0$. Also, a prediction for $d_{(k)}$ must be used, e.g. $d_{(k)} = d_{(k-1)}$.

The objective function is now rewritten as:

$$J_{(k)} = \frac{1}{2}\left(\boldsymbol{y}_{R,(k)} - \boldsymbol{M\Lambda}\Delta\boldsymbol{u}_{(k)} - \boldsymbol{f}_{(k)}\right)^T \boldsymbol{Q}\left(\boldsymbol{y}_{R,(k)} - \boldsymbol{M\Lambda}\Delta\boldsymbol{u}_{(k)} - \boldsymbol{f}_{(k)}\right) + \frac{1}{2}\Delta\boldsymbol{u}_{(k)}^T \boldsymbol{P}\Delta\boldsymbol{u}_{(k)} =$$

$$= \frac{1}{2}\Delta\boldsymbol{u}_{(k)}^T \boldsymbol{\Lambda}^T\left(\boldsymbol{M}^T\boldsymbol{QM} + \boldsymbol{P}\right)\boldsymbol{\Lambda}\Delta\boldsymbol{u}_{(k)} + \left(\boldsymbol{f}_{(k)} - \boldsymbol{y}_{R,(k)}\right)^T \boldsymbol{QM\Lambda}\Delta\boldsymbol{u}_{(k)} \qquad (7)$$

$$+ \frac{1}{2}(\boldsymbol{y}_{R,(k)} - \boldsymbol{f}_{(k)})^T \boldsymbol{Q}(\boldsymbol{y}_{R,(k)} - \boldsymbol{f}_{(k)})$$

A term, penalizing large control deviations is added, with: $\boldsymbol{P} = \boldsymbol{diag}(p_i) \in \mathbf{R}^{N\times N},\ i = 1..N$; p_i - weight coefficients. In the implementation, the last line is removed from the expression since is no function of the optimization variables.

Let with L be denoted the control horizon. We have:

$$\Delta\boldsymbol{u}_{(k)} = \begin{bmatrix} \Delta\boldsymbol{u}_{L,(k)} \\ \hline \boldsymbol{0}_{[N-L]} \end{bmatrix},\ \Delta\boldsymbol{u}_{L,(k)} = [\Delta u_{(k)},\ \Delta u_{(k+1)},\ \dots,\ \Delta u_{(k+L-1)}]^T \in \mathbf{R}^L\ ,$$

$$\boldsymbol{\Lambda} = \left[\boldsymbol{\Lambda}_L \ \vdots\ -\right],\ \boldsymbol{\Lambda}_L \in \mathbf{R}^{N\times L},\ \boldsymbol{\Lambda}^T\left(\boldsymbol{M}^T\boldsymbol{QM} + \boldsymbol{P}\right)\boldsymbol{\Lambda} = \left[\begin{array}{c|c} \boldsymbol{S}_{11} & - \\ \hline - & - \end{array}\right] = \left[\begin{array}{c|c} \boldsymbol{\Lambda}_L^T\boldsymbol{M}^T\boldsymbol{QM\Lambda}_L & - \\ \hline - & - \end{array}\right],\ \boldsymbol{S}_{11} \in \mathbf{R}^{L\times L},$$

and finally for the objective function:

$$J_{(k)} = \frac{1}{2}\Delta\boldsymbol{u}_{L,(k)}^T \boldsymbol{\Lambda}_L^T\left(\boldsymbol{M}^T\boldsymbol{QM} + \boldsymbol{P}\right)\boldsymbol{\Lambda}_L\Delta\boldsymbol{u}_{L,(k)} + (\boldsymbol{f}_{(k)} - \boldsymbol{y}_{R,(k)})^T \boldsymbol{QM\Lambda}_L\Delta\boldsymbol{u}_{L,(k)} \qquad (8)$$

For the Hessian and the gradient of the objective function we have:

$$\nabla J_{(k)} = \boldsymbol{\Lambda}_L^T\left(\boldsymbol{M}^T\boldsymbol{QM} + \boldsymbol{P}\right)\boldsymbol{\Lambda}_L\Delta\boldsymbol{u}_{L,(k)} + (\boldsymbol{f}_{(k)} - \boldsymbol{y}_{R,(k)})^T \boldsymbol{QM\Lambda}_L,\ \nabla^2 J_{(k)} = \boldsymbol{\Lambda}_L^T\left(\boldsymbol{M}^T\boldsymbol{QM} + \boldsymbol{P}\right)\boldsymbol{\Lambda}_L. \qquad (9)$$

It is easily shown that the Hessian - $\boldsymbol{\Lambda}_L^T\left(\boldsymbol{M}^T\boldsymbol{QM} + \boldsymbol{P}\right)\boldsymbol{\Lambda}_L$ is a symmetric, positive definite matrix. Thus, $J_{(k)}$ is a convex function of $\Delta\boldsymbol{u}_{L,(k)}$ on $\mathbf{R}^L$.

Expressing the objective function in terms of control input changes has the following advantages:

- problem size reduction – the optimization problem is on $\mathbf{R}^L$, $L = 3-6(7)$ typically;
- equality constraints appearing when $L < N$ (which is practically always the case) are eliminated, that is, they are incorporated in the objective function (an additional useful feature as a result of the problem size reduction).

Ultimately, this leads to an unconstrained optimization problem.

Inequality constraints are introduced in the optimization problem to account for the limited power availability and physically possible, within the process experiment, control inputs. The control input should satisfy the following constraints:

$$0 \le u_{(k)} \le u_{\max},\ \forall k\ . \qquad (10)$$

These are written in standard form in terms of control input changes as:

$$\begin{aligned} \varphi_{i,1,(k)} &\equiv -\left(u_{(k-1)} + \sum_{j=k}^{k+i-1}\Delta u_{(j)}\right) \le 0,\ i = 1..L \\ \varphi_{i,2,(k)} &\equiv u_{(k-1)} + \sum_{j=k}^{k+i-1}\Delta u_{(j)} - u_{\max} \le 0,\ i = 1..L \end{aligned}\ . \qquad (11)$$

We have: $\varphi_{i,(k)} = \varphi_{i,1,(k)}\varphi_{i,2,(k)} = \left(u_{(k-1)} + \sum_{j=k}^{k+i-1} \Delta u_{(j)}\right)\left(u_{\max} - u_{(k-1)} - \sum_{j=k}^{k+i-1} \Delta u_{(j)}\right),\ i = 1..L$.

The sets $\boldsymbol{S}_{u,(k)} = \{\boldsymbol{u}_{(k)} \mid \boldsymbol{0}_{[N]} \le \boldsymbol{u}_{(k)} \le \boldsymbol{1}_{[N]} u_{\max}\}$ are obviously convex. So are the sets $\boldsymbol{S}_{\Delta,(k)}$, generated by an affine function from $\boldsymbol{S}_{u,(k)}$ i.e. $\boldsymbol{S}_{\Delta,(k)} = \{\Delta\boldsymbol{u}_{(k)} = \boldsymbol{\Lambda}^{-1}\boldsymbol{u}_{(k)} - \boldsymbol{\Lambda}^{-1}\boldsymbol{1}_{[N]} u_{(k-1)} \mid \boldsymbol{u}_{(k)} \in \boldsymbol{S}_{u,(k)}\}$ [5]. Finally, the sets $\boldsymbol{S}^{L}_{\Delta,(k)} = \{\Delta\boldsymbol{u}_{L,(k)} \mid \Delta\boldsymbol{u}_{(k)} \in \boldsymbol{S}_{\Delta,(k)}\}$ are also convex since they are obtained by projecting $\boldsymbol{S}_{\Delta,(k)}$ onto $\mathbf{R}^L$ according to the definition of $\Delta\boldsymbol{u}_{L,(k)}$. Thus, the overall problem is a convex optimization problem.

In order to incorporate the inequality constraints into the objective function a logarithmic barrier function [5] is constructed as:

$$\phi_{(k)} = \sum_{i=1}^{L} \phi_{i,(k)} \text{ , with } \phi_{i,(k)} = -\ln\left(-\varphi_{i,1,(k)}\right) - \ln\left(-\varphi_{i,2,(k)}\right) = -\ln\left(\varphi_{i,(k)}\right).$$

It can easily be shown that $\varphi_{i,(k)}$ is concave and positive on $\mathbf{S}^{-}_{u,(k)} = \{\boldsymbol{u}_{(k)} \in \mathbf{S}_{u,(k)} \mid \boldsymbol{u}_{(k)} \ne \boldsymbol{h}u_{\max}\}$ from which follows that the functions $\phi_{i,(k)}$ are convex on $\mathbf{S}^{-}_{u,(k)}$, $\mathbf{S}^{-}_{\Delta,(k)}$ and $\mathbf{S}^{L-}_{\Delta,(k)}$ ($\mathbf{S}^{-}_{\Delta,(k)}$ and $\mathbf{S}^{L-}_{\Delta,(k)}$ defined the same way, but on $\mathbf{S}^{-}_{u,(k)}$). Hence $\phi_{(k)}$ is convex. We have:

$$\nabla\phi_{i,(k)} = -\frac{1}{\varphi_{i,(k)}}\nabla\varphi_{i,(k)};\ \nabla^2\phi_{i,(k)} = \frac{1}{\varphi^2_{i,(k)}}\nabla\varphi_{i,(k)}\nabla\varphi_{i,(k)}{}^T - \frac{1}{\varphi_{i,(k)}}\nabla^2\varphi_{i,(k)};\ \nabla\phi_{(k)} = \sum_{i=1}^{L}\nabla\phi_{i,(k)};\ \nabla^2\phi_{(k)} = \sum_{i=1}^{L}\nabla^2\phi_{i,(k)};$$

$$\nabla\varphi_{i,(k)} = \left[\underbrace{\psi_{i,(k)},\ \psi_{i,(k)},\ ..,\ \psi_{i,(k)}}_{i\ \textbf{elements}},\ \boldsymbol{0}_{[1\times L-i]}\right]^T \in \mathbf{R}^L,\ \psi_{i,(k)} = -2\sum_{j=k}^{k+i-1}\Delta u_{(j)} + u_{\max} - 2u_{(k-1)};$$

$$\nabla^2\varphi_{i,(k)} = \left[\begin{array}{c|c} \boldsymbol{S}_2 & \boldsymbol{0}_{[i\times L-i]} \\ \hline \boldsymbol{0}_{[L-i\times i]} & \boldsymbol{0}_{[L-i\times L-i]} \end{array}\right] \in \mathbf{R}^{L\times L},\ \boldsymbol{S}_2 = -2.\boldsymbol{1}_{[i\times i]}\ .$$

The gradient and the Hessian operators are defined as follows:

$$\nabla f \equiv \left(\frac{df}{d\boldsymbol{x}}\right)^T = \left[\frac{\partial f}{\partial x_1},\ \frac{\partial f}{\partial x_2},\ ..,\ \frac{\partial f}{\partial x_n}\right],\ f \in \mathbf{R},\ \boldsymbol{x} \in \mathbf{R}^n,\ \nabla f \in \mathbf{R}^n \text{ , and}$$

$$\nabla^2 f \equiv \left(\frac{d}{d\boldsymbol{x}}\nabla f\right) = \left[\left(\frac{d}{d\boldsymbol{x}}\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^T,\ \left(\frac{d}{d\boldsymbol{x}}\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^T,\ ..,\ \left(\frac{d}{d\boldsymbol{x}}\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)^T\right]^T,\ \nabla^2 f \in \mathbf{R}^{n\times n}.$$

Output and state constraints, expressed using the underlying prediction model, can be introduced in the problem in the same way.

An approximate problem is formulated, in which to the objective function is added a barrier term, accounting for the inequality constraints:

$$\text{min. } \tilde{J}_{(k)} = J_{(k)} + r\phi_{(k)}. \quad (12)$$

We have also: $\nabla\tilde{J}_{(k)} = \nabla J_{(k)} + r\nabla\phi_{(k)}$; $\nabla^2\tilde{J}_{(k)} = \nabla^2 J_{(k)} + r\nabla^2\phi_{(k)}$

As $r \to 0$, the approximate problem goes to the inequality constrained problem.

As seen, the approximate problem is an unconstrained convex optimization problem.

The MPC is introduced by solving, at each sampling instant the above formulated unconstrained optimization problem, yielding the optimal sequence - $\Delta \boldsymbol{u}_{L,(k)}^{opt}$. From the optimal sequence, the first element is applied as a change in the control input to the process. As seen from the formulation, the term $\boldsymbol{f}_{(k)}$ is updated at each sampling instant, which requires state and disturbance measurements, though as noted earlier, a model-based prediction of the states can be used.

4. Extension of the basic algorithm and implementation

Since inevitably a model mismatch will be present, an integral action must be attributed to the MPC algorithm. In order to do so, first an observer is constructed using an extended model. The model itself is defined as follows:

$$\begin{aligned} \tilde{\boldsymbol{x}}_{(k+1)} &= \tilde{\boldsymbol{A}}\tilde{\boldsymbol{x}}_{(k)} + \tilde{\boldsymbol{b}}\Delta u_{(k)} + \tilde{\boldsymbol{b}}_d d_{(k)} \\ y_{(k)} &= \tilde{\boldsymbol{C}}\tilde{\boldsymbol{x}}_{(k)} \end{aligned}, \quad (13)$$

with: $\tilde{\boldsymbol{x}}_{(k)} \equiv \left[\boldsymbol{x}_{(k)}^T \mid \tilde{u}_{(k-1)}\right]^T \in \mathbf{R}^{n+1},\ \tilde{\boldsymbol{A}} \equiv \left[\begin{array}{c|c} \boldsymbol{A} & \boldsymbol{B} \\ \hline 0 & 1 \end{array}\right] \in \mathbf{R}^{n+1\times n+1},\ \tilde{\boldsymbol{b}} \equiv \left[\boldsymbol{b}^T \mid 1\right]^T \in \mathbf{R}^{n+1},$

$\tilde{\boldsymbol{b}}_d \equiv \left[\boldsymbol{b}_d^T \mid 0\right]^T \in \mathbf{R}^{n+1},\ \tilde{\boldsymbol{C}} \equiv \left[\boldsymbol{C} \mid 0\right]^T,\ \tilde{\boldsymbol{C}}^T \in \mathbf{R}^{n+1}$.

It should be noted that expressing the objective function in terms of control input changes as done previously in the section is equivalent to defining it (with the same structure) using the extended model.

Based on the extended model, a Luenberger type observer is constructed as:

$$\tilde{\boldsymbol{x}}_{(k+1)} = \tilde{\boldsymbol{A}}\tilde{\boldsymbol{x}}_{(k)} + \tilde{\boldsymbol{b}}\Delta u_{(k)} + \tilde{\boldsymbol{b}}_d d_{(k)} - \boldsymbol{L}(\tilde{\boldsymbol{C}}\tilde{\boldsymbol{x}}_{(k)} - y_{(k)}^{mes}). \quad (14)$$

$\boldsymbol{L} \in \mathbf{R}^{n+1}$ is chosen so that $\tilde{\boldsymbol{A}} - \boldsymbol{L}\tilde{\boldsymbol{C}}$ is Hurwitz (as defined, $\tilde{\boldsymbol{A}}$ has a pole on the unit circle).

Then, the optimization problem solved at each sampling instant is constructed using the estimated values - $\tilde{x}_{(k)}$ and $\tilde{u}_{(k-1)}$, that is, the term $\boldsymbol{f}_{(k)}$ in the objective function (8) and its gradient (9) is calculated with the estimates (this is what actually attributes the integral action of the algorithm [6]). For the disturbance prediction horizon vector, some sort of estimate for $d_{(k)}$ is used.

It is noted that the terms of the sequence $\tilde{u}_{(k)}$ aren't equal to the terms in the actual sequence of inputs applied to the plant - $u_{(k)}$. This requires an anti-windup like scheme, i.e. simply setting the current value of the input at the lower or the upper permissible limit when the limits are violated. The same is applied to the sequence of the estimated inputs $\tilde{u}_{(k)}$ so that it is kept in the allowed for $u_{(k)}$ range. Actually, no significant difference performance-wise was observed in simulations, related to this measure.

Simulations, conducted under model mismatch and unknown disturbance conditions showed that the integral action is actually present since offset-free control was

achieved for constant references. First experimental results, carried out with the control algorithm implemented as defined, showed fluctuations of the output and actually no steady-state achieved (Fig. 4 in the next section). The poor performance was confirmed by simulations conducted with noisy measurements. In order to attenuate this fluctuations, the overall algorithm was further extended with a Kalman-estimator updating scheme for the observer gain matrix - $\boldsymbol{L}$, given by:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{L}_{(k)} &= \tilde{\boldsymbol{A}}_{(k)}\boldsymbol{K}_{(k)}\tilde{\boldsymbol{C}}^T\left(\tilde{\boldsymbol{C}}^T\boldsymbol{K}_{(k)}\tilde{\boldsymbol{C}} + w_u\right)^{-1} \\ \boldsymbol{K}_{(k+1)} &= \tilde{\boldsymbol{A}}_{(k)}\boldsymbol{K}_{(k)}\tilde{\boldsymbol{A}}_{(k)}^T + \boldsymbol{W}_x - \boldsymbol{L}_{(k)}\left(\tilde{\boldsymbol{A}}_{(k)}\boldsymbol{K}_{(k)}\tilde{\boldsymbol{C}}^T\right)^T \end{aligned}, \quad (15)$$

with: $\boldsymbol{W}_x$ - the state noise covariance matrix, w_u - input noise variance.

In the algorithm, the estimation error covariance matrix is initialized to $\boldsymbol{K}_{(0)} = \boldsymbol{W}_x$.

The state noise covariance is determined by the noise in the output measurement and the adopted process model (1). The input noise is determined by limitations on the maximal refresh frequency of the outputs and grid voltage variations.

Finally, it should be noted that if the reference signal for $t = (k+1)T_0$ is known at the sampling instant $t = (k-1)T_0$, then it is possible to determine the control input (solve the optimization problem) to be applied in the interval $kT_0 \le t < (k+1)T_0$ in the interval $(k-1)T_0 \le t < kT_0$ since all the required information is available at $t = (k-1)T_0$. Though possible this is not exploited in the current implementation.

Though not advised [5], the optimization problem (12) is solved with fixed value of r by using Newton's method and backtracking line search [5]. Satisfying results were found during preliminary tests. The value of r was set to 10^{-8} and the Newton's algorithm sub-optimality tolerance, estimated with the Newton's decrement, was set to 10^{-7}.

The overall MPC algorithm was implemented in *Matlab* environment, using the capabilities of the *Data Acquisition Toolbox* to interface the USB DAQ device *NI 6009*, used to realize the physical interface to the process. A set of, preceding the actual experiments with the developed control scheme, experiments were conducted on the process in order to gather data for identification purposes. A continuous-time process model with a structure as in (1) was estimated using the functions available in *System Identification Toolbox* of *Matlab*. The model was then discretized assuming zero-order holds at the inputs using the routine *c2d*, available in *Control System Toolbox*. The following parameters were found:

$$a_0 = 2{,}67.10^{-8},\ a_1 = 7{,}58.10^{-5},\ a_2 = 1{,}71.10^{-2},\ k_\mu = 8{,}1.10^{-9},$$

corresponding to a process transfer function: $\dfrac{\theta_t(s)}{\mu(s)} = \dfrac{0{,}3}{(2600s+1)(120s+1)^2}$.

The value of the gain k_θ was set to a_0 / a_2, which corresponds to a DC gain with respect to the inflow stream temperature equal to 1. The sampling period was chosen to be equal to 60 sec. and the PWM period was set to 5 sec, thus having 12 PWM periods per sampling period.

5. Experimental results

For all of the presented results, the values of the following parameters were set to:

$$\boldsymbol{W}_x = \begin{bmatrix} 0,01 & 0,01 & 0,01 \\ 0,01 & 0,01 & 0,01 \\ 0,01 & 0,01 & 0,01 \end{bmatrix},\ w_u = 1,\ N = 25,\ L = 5,\ \boldsymbol{Q} = diag(q_i),\ q_i = 1,\ i = 1..N$$

The mean time, needed for solving the optimization problem with the used computer configuration was less than 0,01sec.

For the transients shown in Fig. 2, the input weight matrix was set to $\boldsymbol{P} = diag(p_i),\ p_i = 0,01,\ i = 1..N$. The disturbance for the entire experiment was set to the indication of the inflow stream temperature indicator at the beginning - 13 $^{\circ}C$. It is seen that a steady-state offset of around 0,1 $^{\circ}C$ seems to subside.

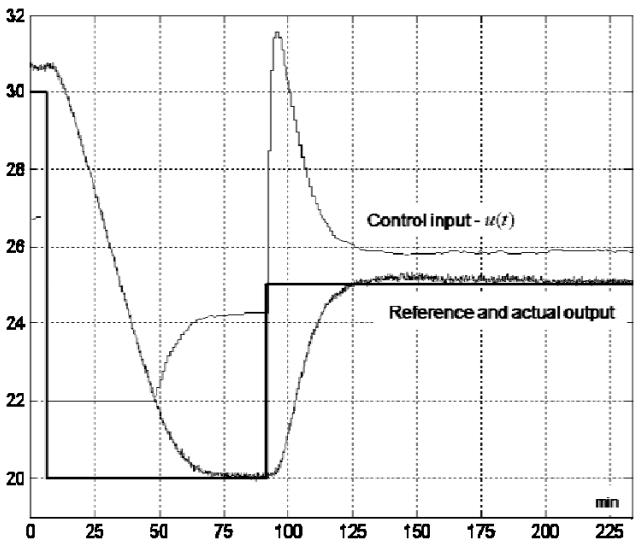


Fig. 2. Transient responses

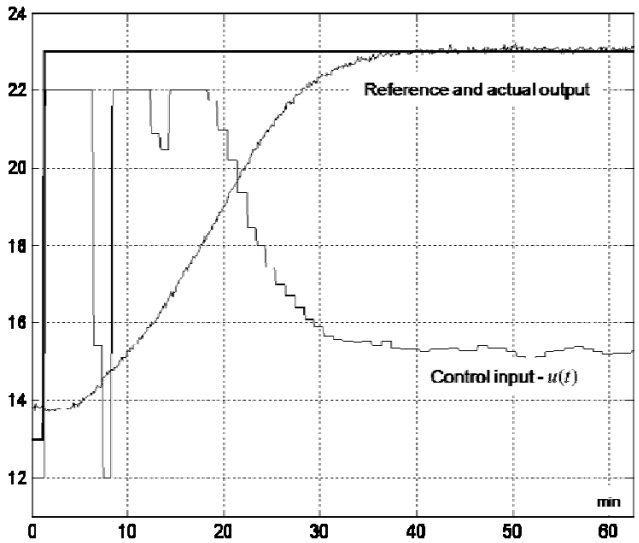


Fig. 3. Transient response

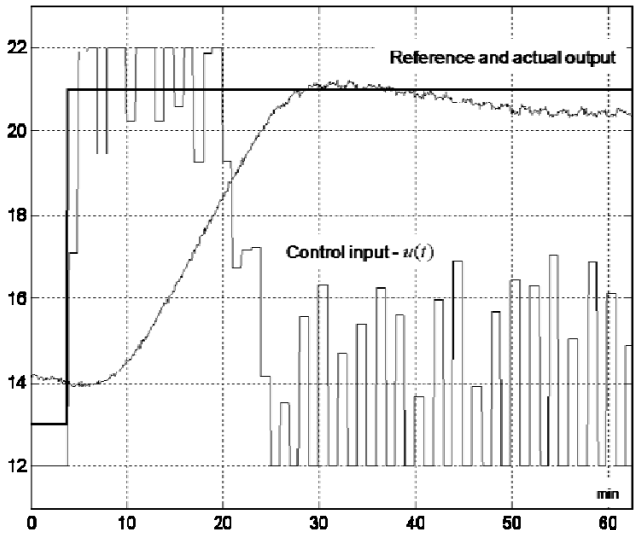


Fig. 4. Transient response

For the transient shown in Fig. 3 the input weight matrix is set to: $\boldsymbol{P} = diag(p_i),\ p_i = 0,002,\ i = 1..N$. The disturbance for this experiment was generated by integrating a sequence of normally distributed random numbers with standard deviation

equal to 0,1, starting from 13 $^{\circ}C$. Two ‘”unexpected” fluctuations of the control input are observed in the first 15 minutes, due to undesired oscillation determined by the initial convergence of the observer gain. Here, also a steady-state offset, though even smaller seems to be present. It should be noted also that after the 40th minute of the experiment, fluctuations of the disturbance of 0,2 - 0,3 $^{\circ}C$ were observed.

For illustration of the effects of noisy measurements on the performance, in Fig 4 are presented the transients when a constant observer gain is used in the algorithm. It is seen that the integral action of the algorithm is practically cancelled. Moreover, sustained fluctuation of the output (not entirely seen in the presented transient) with significant magnitude, far larger than the average noise magnitude, are observed.

6. Conclusion

An MPC scheme with integral action is implemented in order to control a heat-exchange process experiment. A set of experiments were conducted in order to confirm the expected performance. It was found the noisy measurements have significant effect on the obtained performance, a fact that was observed in simulations also. It was observed in experiments that the integral action of the control algorithm is destroyed and sustained fluctuations of the output appear. Thus, the use of a certain kind of statistically optimal estimation scheme, tuned for the parameters of the particular noise process seems to be compulsory. Naturally it is expected that shorter sampling times will also reduce the undesired effects.

REFERENCES

[1] Rawlings J. B., Mayne, D. Q. (2009), ***Model Predictive Control: Theory and Design,*** Nob Hill Publishing, 2009.

[2] Morari M. (2008), ***Predicting the future of model predictive control,*** Systems and process control centennial session, 2008 Annual AIChE Mtg, 2008.

[3] Wang Y., Boyd St. (2010), ***Fast model predictive control using online optimization***, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol 18, No. 2 , March 1993, pp.267-278.

[4] Enev St. (2011), ***Modeling and optimal control of a laboratory heat-exchange process experiment,*** Proceedings of Technical University of Sofia, Vol. 61, Issue 1, 2011, p.147-156.

[5] Boyd St., Vandenberghe L. (2004), ***Convex optimization***, Cambridge University Press, 2004.

[6] Maeder U. (2010), ***Augmented models in estimation and control,*** DSc Dissertation ETH Zurich, No. 19278, 2010.

Автор: Станислав Енев, гл. ас. д-р, катедра „Автоматизация на непрекъснатите производства”, Факултет „Автоматика”, Технически Университет - София, E-mail address: *enev@tu-sofia.bg*

Постъпила на 20.11.2012 **Рецензент** проф. дтн Емил Николов