



ISSN 1310-8271

JOURNAL

**OF THE TECHNICAL UNIVERSITY - SOFIA
PLOVDIV BRANCH, BULGARIA
FUNDAMENTAL SCIENCES
AND
APPLICATIONS
Volume 20, 2014**

СПИСАНИЕ

**НА ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - СОФИЯ
ФИЛИАЛ ПЛОВДИВ, БЪЛГАРИЯ
ФУНДАМЕНТАЛНИ НАУКИ
И
ПРИЛОЖЕНИЯ
том 20, 2014**



© Journal of the Technical University - Sofia
Plovdiv branch, Bulgaria
"Fundamental Sciences and Applications"
Vol. 20, 2014

EDITORIAL BOARD

EDITOR-in-chief

Prof. Marin Nenchev, DSc Eng., DSc Phys.

РЕДАКЦИОННА КОЛЕГИЯ

ГЛАВЕН РЕДАКТОР

проф. д.т.н., д.ф.н. Марин Ненчев

EDITORS

1. Prof. Sonia Tabakova, PhD
2. Prof. Michail Petrov, PhD
3. Prof. Angel Vachev, PhD
4. Prof. Andon Topalov, PhD
5. Prof. Dimitar Katsov, PhD
6. Prof. Grisha Spasov, PhD
7. Prof. Angel Zumbilev, PhD

ЧЛЕНОВЕ

1. проф. д-р Соня Табакова
2. проф. д-р Михаил Петров
3. проф. д-р Ангел Вачев
4. проф. д-р Андон Топалов
5. проф. д-р Димитър Кацов
6. проф. д-р Гриша Спасов
7. проф. д-р Ангел Зюмбилев

EDITORIAL BOARD

1. Prof. Angel Vachev, PhD
2. Prof. Venelin Zhivkov, DSc
3. Prof. Georgi Andreev, DSc
4. Prof. Georgi Totkov, DSc
5. Prof. Emil Nikolov, DSc
6. Prof. Ivan Iachev, DSc
7. Prof. Marin Hristov, PhD
8. Prof. Ognian Nakov, PhD
9. Acad. Nikola Sabotinov DSc
10. Prof. Marc Himbert DSc
11. Prof. Yasser Alayli DSc
12. Prof. Tinko Eftimov DSc
13. Acad. Yuriy Kuznietsov DSc

РЕДАКЦИОНЕН БОРД

1. проф. д-р Ангел Вачев
2. чл. кор. проф. д.т.н. Венелин Живков
3. проф. д.х.н. Георги Андреев
4. проф. д.м.н. Георги Тотков
5. проф. д.т.н. Емил Николов
6. проф. д.т.н. Иван Ячев
7. проф. д-р Марин Христов
8. проф. д-р Огнян Наков
9. акад. д.ф.н. Никола Съботинов
10. проф. д.ф.н. Марк Амбер
11. проф. д.т.н. Ясер Алайли
12. проф. д.ф.н. Тинко Ефтимов
13. акад. д.т.н. Юрий Кузнецов



CONTENTS

1. MARGARITA DENEVA, STANISLAVA RABADGIISKA, TZONKO UZUNOV, TODOR UZUNOV, NADEJDA KAIMAKANOVA, MARIN NENCHEV	5
DEVELOPMENT OF HIGH POWER LASER EMITTERS WITH SPATIALLY AND TEMPORALLY FORMED EMISSION FOR IMPROVEMENT OF HARD TISSUE TREATMENT IN THE DENTAL MEDICINE	
2. SVETOSLAV IVANOV, YANCA KISSOVA	11
THEORETICAL AND GRAPHICAL REPRESENTATION OF TRANSITION PROCESS IN THE SCHEME FOR OBTAINING HIGH-ENERGY PULSES FOR EXCITATION OF LASER WITH DISCHARGE LAMPS	
3. STANISLAVA RABADGIISKA	17
THEORETICAL INVESTIGATION OF THE PENETRATION OF IR LASER RADIATION IN HUMAN DENTIN	
4. VASIL SPASOV	23
IMPROVING THE EFFICIENCY OF SQUIRREL CAGE INDUCTION MOTORS	
5. IVAN KANEV	27
SOFTWARE TOOLS FOR THE DESIGN OF ROM BASED FSM IMPLEMENTED IN FPGA	
6. EMIL TOSHKOV, ALEKSANDAR GEORGIEV, RUMEN POPOV	33
MEASURING SYSTEM OF A HYBRID INSTALLATION WITH GROUND SOURCE HEAT PUMP AND SOLAR COLLECTORS	
7. NIKOLAY PETKOV, HRISTO BAHCHEDZHIEV, TETIANA CHOLAKOVA	39
CATHODE SPOT - PHYSICAL PROPERTIES, EQUIVALENT CATHODE SPOT AREA	
8. NIKOLAY PETKOV, HRISTO BAHCHEDZHIEV, TETIANA CHOLAKOVA	43
MATHEMATICAL MODEL OF THE ELECTRIC ARC CATHODE EVAPORATION IN VACUUM	
9. JANA PETKOVA, KRASTENA NIKOLOVA, DOYCHIN BOYADZHIEV, ANNA ALADJADJIYAN, GINKA ANTOVA	49
MATHEMATICO-STATISTICAL ANALYSIS OF SEED OILS FROM MELON AND PUMPKIN BY USING COLOR PARAMETERS	
10. PETKO BOZOV	53
STRUCTURE-INSECTICIDAL ACTIVITY RELATIONSHIPS OF TRITERPENS ON THE COLORADO POTATO BEETLE LARVAE	
11. ROSSITZA SARDJEVA, VLADIMIR ANGELOV	59
INVESTIGATION OF COLOR QUALITY IN DIGITAL DRY OFFSET PRINTING WITH DIRECT IMAGING	

12. ANASTAS STOYANOV	65
METHODOLOGY FOR THE STUDY OF LATENT HEAT ACCUMULATOR AS A PART OF SOLAR SYSTEM	
13. ANTON DEMIREV	73
CORROSION POTENTIAL OF STEEL 1.4439	
14. ILIYCHO ILIEV	77
A NONLINEAR PARAMETRIC MODEL OF SECOND DEGREE FOR Cu+ Ne-CuBr LASER'S SERVICE LIFE	
15. IVAYLO ATANASSOV	83
ANALYSIS OF THE MULTILEVEL PRIORITY QUEUES SERVICING	
16. IVAYLO ATANASSOV	89
LOAD BALANCING THREADS FOR MULTILEVEL PRIORITY QUEUE USING MAIN THREAD APPROACH	
17. RUMEN POPOV, ROSITSA KAZAKOVA	95
RESEARCH ON STATISTICAL ALGORITHMS FOR PARAMETER ESTIMATION OF THE CHAOTIC SYSTEMS	
18. ROSITSA KAZAKOVA, RUMEN POPOV	103
STRUCTURAL SYSTEM IDENTIFICATION USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE ALGORITHMS	
19. IVAN KOSTOV, VASIL SPASOV, GEORGI IVANOV	109
INVARIANTS OF ELECTRICAL MOTORS POWER SAVING CONTROL LAWS	
20. ZACHARY KAVROSHILOV	117
ADVANTAGES OF USING NEW CONTROL SYSTEMS OF RATIO „AIR-FUEL”	
21. SEVIL AHMED	123
CONTROL SYSTEM CONFIGURATION OF A ROBOTIZED WIRELESS SENSOR NETWORK	
22. VALENTIN BACHEV	131
KINEMATICS OF A TWO-AXIS OFF-ROAD VEHICLE	
23. VALENTIN BACHEV	139
AN AUTOMATIC MACHINE WITH A RECHARGE MECHANISM DRIVEN BY TWO GAS ENGINES	
24. VALYO NIKOLOV	145
MECHANICAL-MATHEMATICAL MODEL OF STIRLING ENGINE WITH RHOMBIC DRIVE MECHANISM	
25. NIKOLA NACHEV	149
ADVANTAGES OF THE GEROLLER NON-SEPARATOR CONSTRUCTION OVER THE ONE ONLY WITH CYCLOID PROFILES	
26. HRISTINA DAYLYANOVA, IVANKA DEKOVA	153
INTERNSHIPS AND PRACTICAL TRAINING OF STUDENTS	
27. TONI MIHOVA	159
PUBLIC-PRIVATE PARTNERSHIPS IN BULGARIA	



DEVELOPMENT OF HIGH POWER LASER EMITTERS WITH SPATIALLY AND TEMPORALLY FORMED EMISSION FOR IMPROVEMENT OF HARD TISSUE TREATMENT IN THE DENTAL MEDICINE

MARGARITA DENEVA¹, STANISLAVA RABADGIISKA¹, TZONKO UZUNOV²,
TODOR UZUNOV², NADEJDA KAIMAKANOVA³, MARIN NENCHEV¹

Abstract: *We have developed and tested special Nd:YAG laser sources that provide convenient emission for improved teeth problem treatment with laser light in the dental medicine. The lasers produce a pulsed light that combine ~0.5 ms annular cross section emission with temporally delayed superimposed short operating Q-switched beam in the internal part, generated in the internal part of the rod. The principle for improvement of early stage enamel caries treatment with our laser is related with controlled heating of the annular surrounding area to the caries before to be illuminated by the high power Q-switched pulse. Thus, the temperature gradient on the tooth surface decreases and this decreasing prevents the tracking of the tooth enamel. Experimental results are carried out.*

Key words: *coaxial beams laser, heating problem a caries treatment*

1. Introduction

The lasers traditionally are of interest for use in health procedures, including in the dental medicine, and their potential for such treatment, is actual and are under continuous development. The application of the high power/energy laser radiation for treatment of caries or other defects in hard tooth tissues is considered as a perspective procedure [1]. Increasing the energy parameters of the operating light, on one hand, facilitates and in many cases – allows effective treatment of the hard dental tissue, however, by general reasons, especially due to non-homogeneous heating of the tooth tissue, can lead also to tooth damage. The aim of this work is to introduce the developed and patented by us specialised coaxial two-beam geometry lasers with convenient spatial and temporal characteristics for improved treatment of the hard dental tissue problems, especially the early stage of enamel caries.

2. Discussion of the problem with enamel and the general presentation of the property of our new lasers, which makes them of interest for solving the problem.

During our previous study of the processes of laser light treatment of tooth tissues [2,3], we have clearly observed the problem of enamel crack when the tooth surface is treated by high energy density laser light. From the general and well clear physical reasons, the problem with enamel cracking during the caries removal via high energy and short time duration pulses can be related with appearance of high temperature gradient that creates a mechanical tension, combined with the heated volume expansion. Both non-desired effects are favoured by the strong temperature difference. Also, such crack is favoured by appearance of the structural transformation for long time illumination (~ 20 s, ~ 0.1 J in the pulse) and probably by enamel melting (after 800°C) [4]. In our work, the obtained maximal temperature in the treated enamel areas (to ~ 700°C) and the use of single pulse operation permits to not consider the last two processes. We will accept that for our conditions the main reason for the cracks appearance is the mechanical tension as a result of the high temperature differences. For the cases, considered in this work, when a small dimension early caries of enamel with a diameter of ~1 mm and depth of

part of mm) are treated with single pulses with relatively low energy of order of 0.5 - 1 J and pulse with a short duration of order of nanoseconds and microseconds, focalized on the enamel caries a crack traces formation is typical phenomenon (our proper observation, also from the literature [4]). There are practically not heat dissipation that provides the noted strong difference between the temperature of the caries and surrounding and respectively strong mechanical tension there. The created by the short pulse laser light temperature difference between the heated area and its surrounding is dissipated for a time that can be evaluated by the formula $\tau = z^2/4\alpha$ [4]. Here α is the coefficient of the thermo-conductivity depending on the coefficient of the heat conductivity, the mass and the specific heat; z is the depth of the light beam (energy) penetration. For the enamel typically $\alpha \sim 2.7 \times 10^{-3}$ and for our conditions with $z \sim 0.3$ mm and we obtain $\tau \sim 10$ ms that is essentially higher time in the scale of used by us nano- and microsecond pulses. Such laser pulse duration is also typical for practically applied pulsed lasers in dental medicine. Thus, practically there is not heat removal from the illuminated places during the pulse treatment. The produced temperature difference can reaches essential values. Really, let's evaluate the reached temperature in the place of small caries, illuminated via focalized laser beam from Q-switched laser. Let's, as example accept the following realistic parameters (according also to our experiments, described below): **A**) for the laser light - 1/. Operating beam focalization on the tooth surface in the spot with near homogeneous intensity distribution and with diameter of ~ 1 mm (dimension of a small caries), 2/. Laser energy of 0.5 J (~ 1.6 J/cm²); laser pulse duration of 100 - 1000 ns; 3/. Laser wavelength 1.06 μ m; **B**) for the caries on the enamel surface - the depth of absorption of the laser light of 0.3 mm, (our experiment, also evaluation from the data in the literature), the enamel thickness bigger than 0.5 mm, more of 80 % absorption of the light in the dark-brown caries tissue - evaluation from our experiments. Also we accept that the caries mass density and specific heat are such that this one for the enamel (~ 3 g/cm³ and ~ 1 J/g. ΔT° C, respectively). For the given values of the parameters (energy density), following the classical physical dependences between the absorbed energy, object mass and specific heat and the temperature change ΔT , we can calculate that the temperature of the treated tissue increases with $\Delta T \sim 680^\circ$ C to be $T \sim 720^\circ$ C, including the initial temperature of $\sim 36^\circ$ C. The temperature of the caries surrounding is the normal for the human body of $\sim 36^\circ$ C. As consequence, this temperature difference of $\sim 680^\circ$ C

leads, as a rule, to the cracks of the tooth enamel as shows our experimental observation.

In Fig. 1 is given the photograph of the tooth after treating via focalized laser light with near same parameters that this one given below. Note that to improve absorption by the caries we have coloured the illuminated tooth's surface with appropriate very thin black dye layer. The crack traces on the enamel are clearly evident.

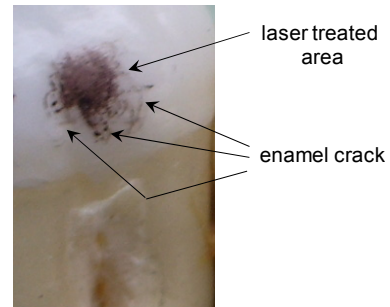


Fig. 1. Photograph of the dental caries (diameter ~ 1 mm) on the enamel after treating via focalized microsecond duration laser pulse with energy of 0.5 J. The formed cracks in the enamel can be seen.

Our experimental investigations also confirm that the crack of the enamel can be observed for the used by us laser pulses with duration of 0.1 to 500 μ s and in this time range the illuminating light energy has a main influence for crack appearance. More generally, from our experiment with many teeth samples, we obtain that, as a rule, the temperature difference of $\sim 650^\circ$ C between the non-illuminated enamel and the blacked or the dark brown caries places with diameter of ~ 1 mm as a rule, leads to the presence of enamel crack traces. In the described above experimental tooth case, such temperature is achieved for the illuminated beam energy of ~ 0.3 -0.5 J. For the lower temperature difference less than $\sim 300^\circ$ C, between the heated place and surrounding enamel no crack was produced. The lower temperature than 300° C needs operating pulse energy lower than ~ 0.2 J. However, for such energy the caries treatment is not effective (our experiments), and such approach is not appropriate.

The noted above discussion incite us to propose and apply reasonable and general for the tooth's treatment method, using the developed by us new coaxial- geometry two-beam high energy lasers (the last, on the base of our patented principle, generally - each beam with different wavelength) [8,9]. The emitted in a single pump pulse two-coaxially disposed beams are with independent energy and temporal control. The external beam has the annular energy density distribution and the internal part - the bi-mode ($TEM_{00} + TEM_{01^*}$), Gaussian like, distribution. During of ~ 1 ms pump

pulse the annular emission can firstly start with duration of 0.5 ms and the second beam can be Q-switched ~ 100 ns pulse. The principle for improvement of the caries treatment with our laser is related with carefully chosen heating of the annular region around the caries by the initial laser light before to be illuminated by the acting Q-switched pulse. Thus, the temperature gradient in the tooth surfaces can be conveniently decreased and thus prevents the cracking of the tooth enamel. The other technique that also was tested by us with specialized laser source, is to heat with pre-pulse the area around the caries including also the caries. The pre-pulse in this case is with normal spot (full disk) what is easy of technical point of view. However, here we have generation of the two pulses in common active volume that, due to the competition effect [7] worsens essentially the pulse parameters control. Also, the caries heating is difficult to be reliably controlled when the two pulses are superimposed in a common area. Thus, the application of the coaxial geometry two-beam lasers is advantageous, what shows also our experimental observation. Our test-realization with our coaxial-geometry lasers is based on Nd:YAG active laser medium with a flash-lamp pumping. The side diode pumping is also convenient.

3. Technical description of our two-beam laser – principle and construction, action and calculation of the needed energies for caries treatment without cracks on the enamel.

Principle and construction of the two-coaxial beams Nd:YAG laser

Here, a short technical description of our coaxial geometry laser will be given. More detailed description is given in our work [6]. The optical scheme of the laser is presented in Fig. 2. For the advantageous realization we use low-Nd³⁺-doped (in our work ~ 0.5 %) Nd:YAG crystal. Such doping, instead of typical ~ 1 %, is also commonly used and assures sufficient efficiency of the generation in combination with high quality of the output beam. The cylindrical YAG rod (diameter $\varnothing = 0.7$ cm and length $l = 8$ cm) was with silvered envelope wall. Our study shows that a laser active element with the given parameters assures a notable focusing effect in the axial region, resulting in an increase of $\sim 2\frac{1}{2}$ times for the pump power density in the near axial rod part. In the experimental arrangement, the laser rod was in a close position with the pump flash-lamp in a commercial pump-chamber with UV-absorbing quartz elliptic cylinder-pump light concentrator (by silvered walls; axes 23 x 29 mm, length 78 mm) and with holes for the laser rod and the lamp of $\varnothing 9.5$ mm and 11.5 mm. The lamp (IFP 1200 type, 700 Torr of Xe,

$\varnothing 0.95$ cm, Russia) and the crystal were surrounded with cooled flowing water at temperature $18 \pm 0.3^\circ\text{C}$. The electrical supply was standard, homemade, providing electric energy from 70 to 160 J in ~ 400 μs FWHM lamp pulse duration (at 1 Hz repetition rate). Typically, we have used pump energy of 140 J.

The light generation at two beams was achieved in two, coaxially arranged and optically separated parts of the Nd:YAG laser rod, each equipped with its own 40 cm length resonator (hatched differently in Fig. 2 (a)). The optical separation is realized using a rectangular separating prism SPr with a hole (in our experiment with 3.7 mm diameter, length of 4 mm) through the cathetus and the hypotenuse. A thin metal tube with ~ 0.12 mm thick wall and 30 mm length was introduced in the hole. The external part is coupled with its resonator by reflection of the SPr outside the hole. The described prism separator assures very

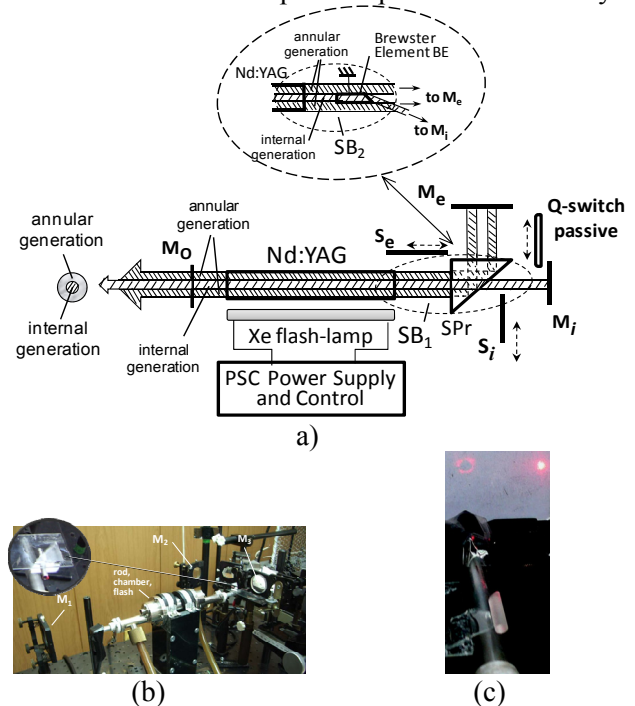


Fig. 2. Top (a) – Schematic of the developed two-coaxial beam emitting Nd:YAG lasers using as separator of the channels a prism SPr with a hole (or a Brewster cylinder-in the inset) and selective-flat mirror resonators. Bottom: (b)-the actual photograph of the installation with SPr – in the inset SPr, (c) – the Brewster Cylinder Separator and visualized spots with used for adjustment He-Ne laser.

good separation of the two channels. The separation of the channels also was obtained using a Brewster angle cut at one end of small diameter (3.6 mm) glass cylinder (BE) as it is shown in the inset in Fig. 2(a). This arrangement is very effective and simple and permits practically to obtain completely closed

external ring generation, however needed special preparation of the cylinder separator. Such realization is essentially advantageous if the laser rod is fabricated with this appendix, especially for dual- generation laser operation. The resonator for the generation in the annular periphery part of the laser rod - first channel - consists of the output mirror M_0 , common for both resonators (reflectivity $R=35\%$ for $1.06\ \mu\text{m}$), reflection of the prism SP_r and the end mirror M_e (with reflectivity of 98%). The resonator of the generation in the internal part-second channel- consists of M_0 , transmission through the SP_r hole and the end mirror M_e ($R=99\%$ for $1.06\ \mu\text{m}$). In the internal resonator is introduced the passive Q-switcher ($\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ plate with convenient parameters).

Two-coaxial beam generation. Calculation of the needed energies for caries treatment without cracks providing on the enamel surface.

For the 160 J electric pump energy the laser produce the desired two coaxial beams generation with near equal energy of $\sim 0.45\ \text{J}$. The near field pattern of the external generation has annular shaped with external diameter $\sim 6.7\ \text{mm}$ and internal of $\sim 3.7\ \text{mm}$; the internal part has the near disc shape with diameter of $3.5\ \text{mm}$. The photograph of the spot (laser with BCS) made on the thermo sensitive paper, used in the range of the proportionally of the bleaching to the illuminating energy density, is shown in Figs. 3(a) and 3(b). When the coaxial beam is focalized (in our study with a lens with focussing length of $10\ \text{cm}$), the spot distribution in different distance between the lens and its focal point conserves its structure. This permits easily to be obtained the needed illuminating light spatial distribution on the treated sample. At the convenient distance of the lens we obtain the annular shaped light of external diameter of $2\ \text{mm}$ and with internal diameter of $\sim 1\ \text{mm}$ and inside – the spot with quazi Gaussian distribution (combination of the modes TEM_{00} and TEM_{01*}) diameter of $\sim 1\ \text{mm}$. The illumination of the tooth surface is illustrated in Fig. 3(c). The external generation is free lasing with duration of $300\ \mu\text{s}$ (HWFEM) and the internal –Q-switched with pulse length $\sim 100\ \text{ns}$ (Fig. 3(c)). If the spots are with different energy densities they heat differently the two spots and thus create corresponding fields with different temperature increasing ΔT_1 and ΔT_2 as it is shown in the figure. The energy in any generation can be varied by introducing variable neutral filters with conveniently chosen transmission. Following the presented above approach to calculate the temperature increasing as a function of the energy in the illuminating pulse, we can calculate the energy in the two beams that assures convenient

caries treatment without crack of the surrounding enamel. We easily assure that the coaxial beams pattern in the output of the laser to be composed by

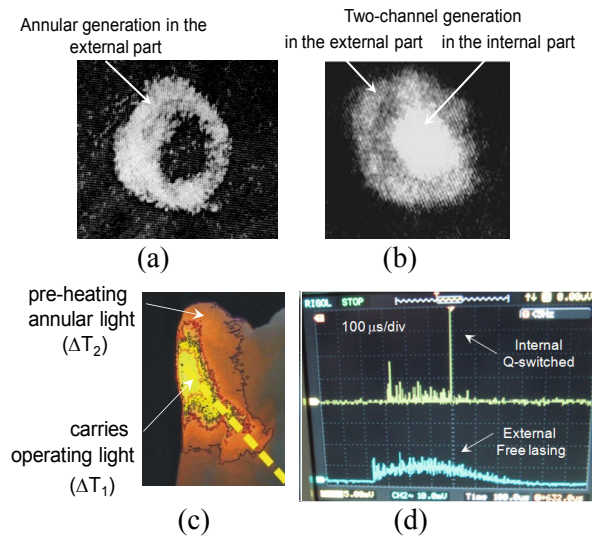


Fig. 3. Actual photograph of the spot of the external generation at the output of the laser ((a), annular) and of both generations (b). The picture (c) of the different heating of the tooth surface by composite spot of two coaxial beams (type (b)), with different energy density, providing different temperature rising in the illuminated places, (c) the oscilloscope traces of both generation ($\mu\text{s}/\text{div}$).

the internal disc part with diameter of $3.7\ \text{mm}$ (diameter of BE) and the external annular part with internal and external diameters of $3.7\ \text{mm}$ and of $6.7\ \text{mm}$ respectively. This beam passes through a lens with focus distance of $10\ \text{cm}$ and at given distance from it we obtain the needed dimension of the complex light spot for illumination of our object. The needed heating and temperatures in the internal and external parts of the spot are calculated in the given above manner. We calculate that if we adjust the energy in the internal disc part of the spot to be $0.5\ \text{J}$ and in the external annular part to be $0.4\ \text{J}$ the temperature increasing in the internal part of the treated tooth area will be $\Delta T_1 \approx 680^\circ\text{C}$ and in the external - $\Delta T_2 \approx 360^\circ\text{C}$ (by adding the initial temperature of the $36^\circ\text{C} \approx 720^\circ\text{C}$ and $\approx 400^\circ\text{C}$ respectively total temperatures). For the focusing of the composite spot in order to be with two-times smaller diameter and decreased 4 time energy for each beam, the same temperature values in the corresponding illuminating places can be achieved. This transformation we have realized for practical testing in real situation the improvement of the laser treatment with new laser, as it is shown below. It is easy to find two near equal structure places in one caries if the dimension of the acting focalised laser beam is smaller in comparison with the dimension of the caries – e.g. as we have used the caries

dimension of ~2.5 mm and the focused composite spot with of 0.5 mm.

Experimental test of the caries treatment:

We provide a series of test of the action of the coaxial beams laser on the dental tissue. As a rule, in the case with pre-heating with the annular ring with the discussed above conveniently chosen parameters, the action on the caries tissue of the internal pulse without cracks is typical. We will illustrate this with one typical result. Applying the emission with calculated above parameters we have illuminated sequently two parts of the caries lesion on the dentin surface with diameter of dark-brown spot of 2.5 mm. The tooth is disposed at a distance from the noted 10 cm focus length lens where the internal spot was with diameter of 0.5 mm and the external ring is with diameters inside and at the periphery approximately of 0.5 mm and 1 mm. respectively. Firstly, we screening the external resonator and illuminated the caries only with the partially focused internal beam (0.25 J, Q-switched pulse with duration ~100 ns). As it is calculated above, the predicted temperature rising in the illuminated place in this case is ~680°C and respectively we have obtained the caries ablation accompanied with strong crack- line in the surrounding of the formation hole. This case is illustrated in Fig. 5(a). After translation of the tooth at distance of ~1.2 mm perpendicular to the laser beam and removing the screen S_e the laser generates the composite two-coaxial beams emission, partially focused on the new, non-disturbed place, of the caries. The energy in the external part was 0.2 J. The obtained picture is shown in Fig. 5(b), where the high quality treatment of the caries tissue – the hole without any trace of crack can be seen.

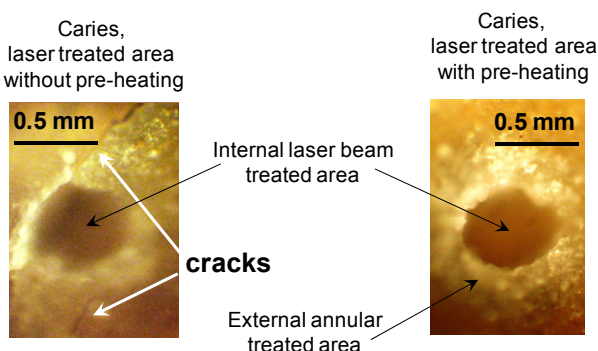


Fig.6. The photograph of caries treated are with direct illumination with a Q-switched pulse (a) and with annular illumination before high power pulse – no trace of crack can be seen.

Conclusion

In the work we have described the developed special Nd:YAG laser sources that

provide convenient emission for improved teeth problem treatment with laser light in the dental medicine. The lasers produce a pulsed light that combine ~ 500 μ s annular cross section emission with temporally delayed superimposed short operating Q-switched beam (pulse ~ 0.1 μ s) in the internal part, generated in the internal part of the rod. We have analysed and demonstrated the principle for improvement of early stage enamel caries treatment with our laser. The principle is related with controlled heating of the annular surrounding area to the caries before to be illuminated by the high power Q-switched pulse. Thus, the temperature gradient on the tooth surface decreases by two stages of temperature change – 700°C – 420 °C – 36°C and this manner of decreasing prevents the cracking of the tooth enamel. The last have places for the temperature difference high than 400°C that difference is avoided by the applied two-stage heating field with our laser. The technique and the laser proposed can be developed for the other treatment of the teeth surface including for high caries lesions. In the work is shown one of the applications of our coaxial-beam emitting condensed matter laser. The other applications in development are related with convenient use of the light pressure. This concern the bio-cells treating with translation-stopping by the external annular beam and operating by the internal; for light collection of nanoparticles with the annular beam and accelerating by internal (light pressure “rifle”) [8] and light pressure pump where the collapsed in time annular beam collect inside nanoparticle [9].

Acknowledgement.

Thanks of the contracts DNTS/Austria 01/3 (Pr. No. BG 07/2013) and D RILA 01/7-19 (TR PHC RILA 2011 pr.No25197 VB) and Technical University of Sofia, R&D Department and Br. Plovdiv. Thanks of D-r Hr.Kissov for his technical help.

References

- 1.Beena V.S, Laser application in dentistry, J.of.D., *Indian Dental Associaton*, Vol.63, 3 (1992) 1-7
- 2.Uzunova P, T.Uzunov, S. Rabadjiiska, N. Kaimakanova, M. Deneva, M. Nenchev, Analysis of the penetration of the laser radiation in dental tissue, *J. Techn. Univ. Sofia, br. Plovdiv*, Vol. 16, (2011) 179-183
- 3.Uzunova P.,Rabadjiiska S, Uzunov Tz., Kisov Hr. Kaimakanova N., Dinkov E, Deneva M., Nenchev M., Study the penetration of IR laser

radiation in human teeth - determination of the absorbed and scattered parts, Proc. SPIE, Vol.8770-50 (2013) 87701A-1-7

4.R. Bedini, *Ann. Inst. Super. Santina*, Vol.46, 2 (2010)

5. M.Nenchev, Multicolor laser, Bulg. patent IIR No25954/reg.38529, 15 June (1978)

6. M. Deneva, M. Nenchev, E.Wintner, S. Topcu, Two-Line High-Power Single Active Element Nd:YAG Quantum Electronics Generator with Coaxial Architecture-Optimization, *Ann. J. of Electronics*, ISSN 1314-0078, Vol.8 (2014) 9-12

7. Louyer Y, Wallerand J-P, Himbert M, Deneva M, Nenchev M. Two-wavelength passive self injection controlled operation of a diode pumped cw Yb:doped crystal lasers. *Appl Opt*, Vol, 42, 27 (2003) 5463-76; **Deneva M, Uzunova P., Nenchev M**, Tunable. subnanosecond laser pulse generation using an active mirror concept, *Opt. Quant. Electron*, 39 (2007) 193-212

8. Nenchev,M, Deneva M, Alaylly Y, Topcu S, Chassagne L, Himbert M, Quantum electronics and optical techniques and devices for applications in biology, atmosphere monitoring ,optical communications and sciences, inv.paper, J.Techn. Univers.–Sofia, Plovdiv branch, “*Fundamental Sciences and Applications*”, Vol. 19 (2013) 3-15

9. Nenchev M, Deneva M, work under preparation

¹Technical University of Sofia, Plovdiv Branch and R&D Department ,QOEL Laboratory, , 25 Tsanko Dystabanov St., 4000 Plovdiv

²Faculty of Stomatology – Medical University, Sofia,

³Plovdiv’s University “Paissii Hilendarski” BULGARIA

E-mail: mdeneva@yahoo.com

E-mail: s1983@abv.bg

E-mail: marnenchev@yahoo.com



ТЕОРЕТИЧНО И ГРАФИЧНО ПРЕДСТАВЯНЕ НА ПРЕХОДНИТЕ ПРОЦЕСИ В СХЕМА ЗА ПОЛУЧАВАНЕ НА ВИСОКОЕНЕРГИЕН ИМПУЛС ПРИ ВЪЗБУЖДАНЕ НА ЛАЗЕР С ГАЗОРАЗРЯДНА ЛАМПА

СВЕТОСЛАВ ИВАНОВ, ЯНКА КИСОВА

Резюме: За възбуждане на багрилни лазери и лазери с F - центри с газоразрядни лампи е подходящ методът „двоен импулс“, комбиниращ сравнително маломощен и продължителен предразряд през газоразрядната лампа, върху който се наслажда мощния основен разряд. В предложената статия са представени теоретичните изследвания на електрическа схема за генериране на два последователни импулса за управление на газоразрядна лампа. Преходните процеси са изследвани с компютърна симулация, като е съставена заместваща схема на газоразрядната лампа. Изменението на тока през импулсната лампа е описано аналитично с уравнения отнасящи се до отделните времеви интервали на преходния процес. Показана е заместващата схема, използвана при теоретичния анализ. Представени са графичните решения на съставените уравнения, получени с компютърна симулация.

Ключови думи: електрическа схема “двоен импулс“, анализ на преходни процеси, ксенонова импулсна лампа.

THEORETICAL AND GRAPHICAL REPRESENTATION OF TRANSITION PROCESS IN THE SCHEME FOR OBTAINING HIGH- ENERGY PULSES FOR EXCITATION OF LASER WITH DISCHARGE LAMPS

SVETOSLAV IVANOV, YANCA KISSOVA

Abstract: For excitation lasers and of the colorants lasers F - centers with gas discharge lamps suitable method "double pulse" combining a relatively low-powered and long before discharge through the gas discharge lamp that superimposes on the powerful main discharge. The proposed article presents theoretical studies of the electrical circuit for generating two consecutive impulse for control discharge lamp. Transient processes were investigated by computer simulation, has been drawn of a replacement sheme for gas discharge lamp. Change of current through the flash lamp is described analytically with equations relating to individual intervals of the transition process. Shown is the replacement scheme used in the theoretical analysis. Are presented graphical solutions composed of equations obtained by computer simulation.

Key words: electrical system type “double pulse”, analysis of transient processes, xenon flash-lamp.

1. Introduction.

Pulse discharge lamps are among the most common sources of optical excitation due to their advantages. They are cheaper and allow to be inflated larger volumes active environment. Their disadvantage is the lower efficiency of the pump, because not all radiation spectrum involved in the resettlement of the upper working level and the inability to transfer all the energy emitted from the lamp to the active environment [1]. The main purpose of this type of source to excite the dye and solid-state active environment.

Typical requirement for excitation lamps for dye lasers is radiation energy to be short ($\sim 10\mu s$) pulse with a rapid increase in the front. Only in this case reaches the required power of the exciting radiation for generation and reduces the deleterious effect of the resettlement of triplet level and creation by illumination inhomogeneities thermoptic [3,4]. For this purpose, is applyd the method "double pulse".

2. Description of the scheme for for the preparation of a high energy pulse with a steep edge "double pulse"

To obtain a high-energy pulse ($\sim 100 \div 300J$) with a steep front ($\sim 1\mu s$) is used as a method of management called a "double impulse". The circuit diagram for realizing this method is shown in Fig. 1. In this method, to the electrodes of the lamp is turned on cumulative capacitor C_1 .

To cause discharge between the electrodes through additional Igniter connected to the lamp is fed a high-voltage ($15 \div 30kV$) low-energy ($0,1J$) pulse duration ($\sim \mu s$). This pulse in advance ionize

the gas. The resistance of the lamp falls and accumulation capacitor is diluted through it.

As a result of the discharge radiates powerful pulse duration determined by the capacity of the accumulator capacitor C_1 and the inductance of the discharge circuit L_1 .

From a source of constant voltage $V_3 = 400V$ charging capacitor C_3 . Upon receipt of a control impulse management system includes thyristor D_1 , resulting in capacitor C_3 is diluted through the primary coil of transformer. Thus arises the initial ionization of the gas in the lamp and it is ready to be incorporated into their core supply $V_1 = 5kV$. The pulse generator generates pulses V_4 with TTL - levels.

From the made experiment pulse duration is $26\mu s$. The discharge of the capacitor C_1 , turned parallel to the first power source V_1 , formed pre-ionization preliminary low-energy pulse which provides intensive ionization of the lamp. The breakdown voltage of the surge arrester U_1 is selected so that, before the discharge of the capacitor C_1 the voltage between its electrodes is less than the breakdown voltage.

During this discharge voltage arrestors U_1 is constantly increasing and at a given time it reaches the required value to provide a breakthrough. In this way the second main high energy pulse starts with a steep edge ($\sim \mu s$) by the discharge of the capacitor C_2 , connected in parallel to the second power source $V_2 = 10kV$.

Intensive pre-discharge protects the lamp from damage and provides a very steep front of the main pulse. This scheme on excitation pulse is very suitable for the excitation of dye lasers.

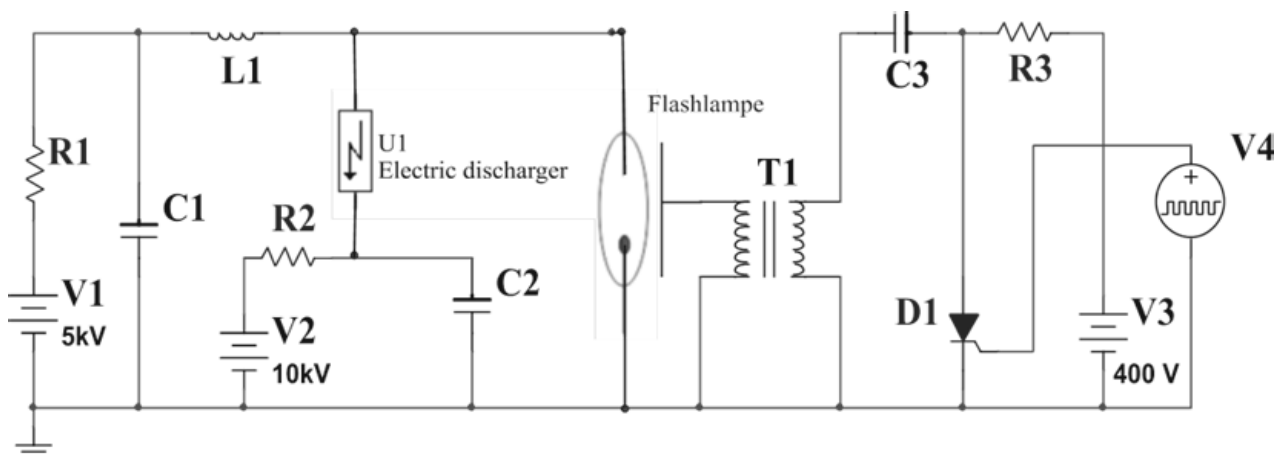


Fig. 1. Scheme for electrical excitation laser type "double impulse"

On the basis of experimental research of the shape of the voltage and the current through the

lamp [6] was created replacement scheme of discharge lamp.

Figure 2 shows equivalent circuit of the lamp, through which it is involved in designing an electric circuit for receiving a high-energy pulse with a steep edge. It is represented by a resistor connected in parallel R_4 and capacitor C_4 , and consistently included inductance L_2 .

In Fig. 3 shows the change of the flash lamp currents I_{L2} , coil L_1 and arrestors I_{C2} . Until such time of turn on a surge arrester in the flash lamp and the coil L_1 flows through the same current. After inclusion arrestors current through the flash lamp I_{L2} growing by leaps and bounds as follows amendment of currents arrestors I_{C2} .

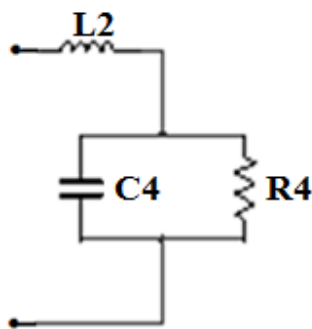


Fig. 2. Equivalent circuit of the flash-lamp

Part of the current through the surge arrester flows through the coil L_1 and capacitor C_1 charging voltage to a value $U_{C1} = 5,9kV$. Amplitude value of the current through the arrester is $I_{C2} = 4,6kA$, and the amplitude value of the current charging the capacitor C_1 is $I_{L1} = 730A$. Voltages of the power supplies V_1 and V_2 are the $5kV$ and $10kV$. Simulation researches have been done in an programme environment Multisim.

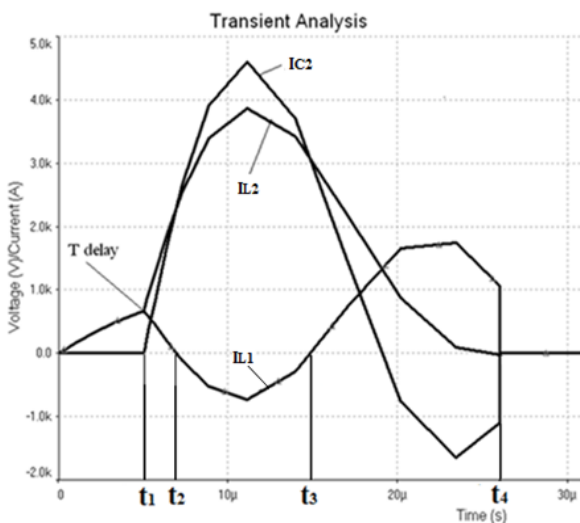


Fig. 3. Graphs of $I_{L1}(t)$, $I_{L2}(t)$ and $I_{C2}(t)$

3. Results of the graphical solution of the compiled equations describing transient processes.

In Fig. 4 shows a substitution scheme of an electrical excitation of a laser-type "double pulse". It consists of two resonant loops. The first includes a capacitance C_1 with a value of $1\mu F$, resistance R_4 with a value of 1Ω and two inductors L_1 and L_2 , respectively, with values $20\mu H$ and $10\mu H$.

Moment of the inclusion of the capacitor C_1 is simulated by the scheme switch S_1 , which replaces the control circuit and surge arrester in the real circuit (Fig. 1) is replaced by switch S_2 .

The inclusion of two charged capacitors C_1 and C_2 provide the initial conditions of the transition process.

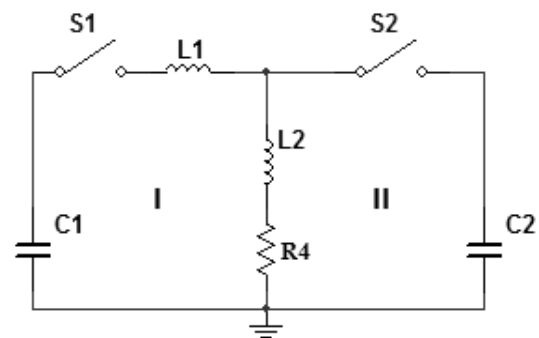


Fig. 4. Replacement scheme for electrical excitation laser type "double impulse"

The transitional processes prevailing in the scheme is best described by introducing the four time intervals. watch: $0 \div t_1$, $t_1 \div t_2$, $t_2 \div t_3$, $t_3 \div t_4$. For a description of these processes are introduced magnitudes damping ratio and circular frequency of α and β [5]. They are expressed by the formulas:

$$\alpha = \frac{R}{2L} \quad (1)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{LC} - \alpha^2} \quad (2)$$

These magnitudes represent real and imaginary part of the complex conjugate roots of the characteristic equation of the transition process of RLC -circuit:

$$p^2 + \frac{R}{L} \cdot p + \frac{1}{LC} \quad (3)$$

In this equation, R , L and C are respectively active resistance, inductance and capacitance of the looking circuit. At the moment $t = 0$ closes the switch S_1 (Fig. 4). In the scheme includes a

capacitor C_1 , which is charged to a voltage $5kV$. In the scheme includes a capacitor C_1 , which is charged to a voltage $5kV$.

In Fig. 2 shows the direction of current flow in the loop. The capacitor C_1 is diluted to a voltage approximately $3,16kV$, where at the moment t_1 and closes switch S_2 . In the circuit includes the capacitor C_2 , which is charged to a voltage $10kV$.

His inclusion is about $5\mu s$ after inclusion of capacitor C_1 , which is the time required for the appearance of the main high-energy pulse with a steep front impulse discharge lamp whose control scheme is considered.

Because in the range $0 \div t_1$ scheme consists of only one loop capacity C is represented by the capacity C_1 of the contour and the inductance L by the sum of the two inductances $L_1 = 20\mu F$ and $L_2 = 10\mu F$ i.e. $C = C_1 = 1\mu F$ and $L = L_1 + L_2 = 30\mu H$. Active resistance of the loop is $R = R_2 = 1\Omega$. By Formula (1) and (2) were obtained the values of the damping ratio and the corresponding angular frequency $\alpha = 17.10^3$ and $\beta = 182.10^3 rad/s$.

To be found the law under which vary the current through the lamp i_{L2} in time, using the formula:

$$i(t) = \frac{U_0}{\beta L} \sin(\beta t) e^{-\alpha t} \quad (4)$$

where U_0 is a voltage means to which is charged capacitor C_1 , included in the loop. In this case, the current i_{L2} is equal to the current through the inductor L_1 and its graphic solution obtained by the program Maple15, shown in Fig. 5. The examined time interval has duration of $5\mu s$.

At time t_1 the current in the primary circuit i_{L1} value of about $730A$. It is derived from the graphical solution of the transition process through the program Maple15, as well as through the simulation of the process made by the software product Multisim.

At the moment t_1 in the scheme includes a second capacitor with capacity C_2 . In the time interval $t_1 \div t_2$ is diluted capacitor C_2 and through the coil L_1 flows current i_{L1} , which is due to the accumulated magnetic energy in it.

At the moment t_2 this current is equal to zero and the current through the inductor L_2 is leveled with the current through the capacitor C_2 that is $i_{L2} = i_{C2}$.

The duration of the time interval $t_1 \div t_2$ is about $2\mu s$. The period of transition processes is about $T = 34\mu s$. The scheme consist of two contour in contrast to the time interval $0 \div t_1$, which is considered only one contour. In the case of secondary loop $L = L_2 = 10\mu H$, $C = C_2 = 3\mu F$ and

$R = R_2 = 1\Omega$. Magnitudes damping ratio and circular frequency by formulas (1) and (2) for the second contour values are respectively: $\alpha = 50.10^3$ and $\beta = 175.10^3 rad/s$.

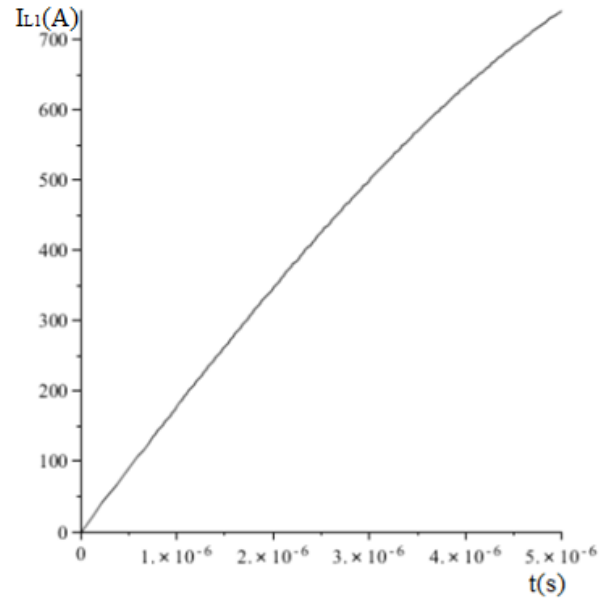


Fig. 5. Graph of $I_{L1}(t)$ in the range $0 \div t_1$ in program product Maple

In the time interval t_2 current i_{L1} changes direction and starts loading again capacitor C_1 . To be found the law under which amends current i_{L2} in time will use the principle of superposition. According to him, this current is the sum of the currents in the two circuits passing through the lamp, i_{L1} and i_{C2} , ie

$$i_{L2}(t) = i_{L1}(t) + i_{C2}(t) \quad (5)$$

The change of the current through the inductor L_1 at the time is described by the equation [2]:

$$i_{L1}(t) = I_{L1}(0) - \left[\frac{u_{C2} - u_{C1}}{L_1} \right] t \quad (6)$$

In the last formula $I_{L1}(0)$ is the current flowing through the first contour at the moment t_1 , which is the initial time interval $t_1 \div t_2$ and has a value of $730A$. The equation describing the change of the voltage on the capacitor C_1 in the first contour is:

$$u_{C1}(t) = \frac{c_1 U_{C1}(0) - i_{L1} t}{c_1} \quad (7)$$

Here $U_{C1}(0)$ is the voltage to which the capacitor C_1 is discharged at the time t_1 . In the case

$U_{C1}(0)=3,16kV$. Voltage on the capacitor C_2 is amended by law [3]:

$$u_{C2}(t) = \frac{U_{C2}(0)}{\beta\sqrt{L_2C_2}} \cos(\beta t - \gamma) e^{-\alpha t} \quad (8)$$

In the last formula $U_{C2}(0)$ is the voltage to which the capacitor C_2 is charged and has a value of $10kV$. It is included in the scheme at the time t_1 by closing the switch S_2 . The value γ is expressed by the formula:

$$\gamma = \arctg \frac{\alpha}{\beta} \quad (9)$$

The current flowing through the second contour, i_{C2} is determined by formula (4). It is replaced by U_0 is replaced by $U_{C2}(0)$, L is replaced by L_2 , α is replaced by the damping ratio for the second contour $\alpha = 50 \cdot 10^3$, and β is replaced by the angular frequency of secondary loop $\beta = 175 \cdot 10^3 \text{ rad/s}$.

The current through the lamp is given by the sum of the two resonant current i_{L1} and i_{C2} , which pass through the inductor L_2 during the interval $t_1 \div t_2$. Its graphical solution obtained through the program Maple 15, shown in Fig. 6.

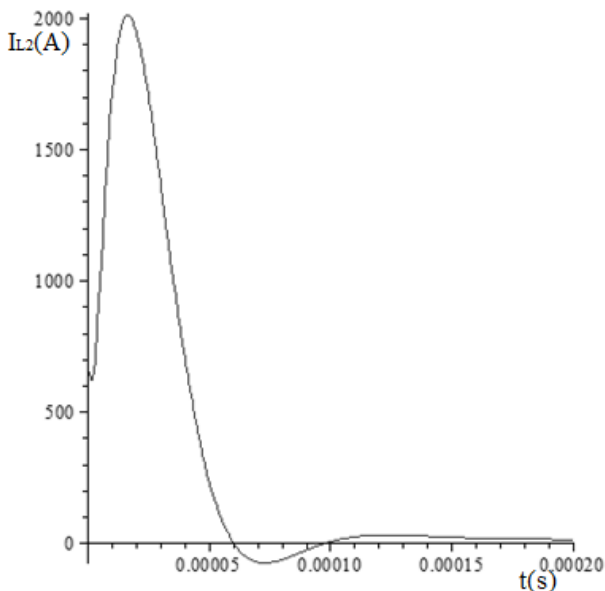


Fig. 6. Graph of $I_{L2}(t)$ in the interval $t_1 \div t_2$ in program product Maple

In the time interval $t_2 \div t_3$ maximum value reached by the current through the lamp, in this case, the current through the inductance L_2 , is $i_{L2} = 3,8kA$, and capacitor C_1 is charged to a maximum value $U_{C1} = 5,9kV$, at the end of current pulse through its lamp voltage reaches a value $-7,4kV$.

In this interval the current through the inductor L_2 is again expressed through the sum of the currents flowing through the primary and secondary circuit, respectively i_{L1} and i_{C2} , formula (5). The current i_{L1} is expressed by similar formula (4) with the difference that it is a reverse phase. U_0 is replaced by $2,77kV$. This is the voltage to which the capacitor C_1 is discharged at the time $t = t_2$.

The law on which amends current i_{C2} in time in this interval is similar to the law in which this current changes in the time interval $t_1 \div t_2$, but into account the it's initial phase φ , which for the time interval $t_2 - t_1$, corresponds to

$$\varphi = \frac{t_2 - t_1}{T} \cdot 2\pi \quad (10)$$

At time t_3 the current through the primary circuit i_{L1} becomes equal to zero, then changes direction, as shown in Fig. 3.

The current through the lamp I_{L2} is represented by the sum of the two resonant currents flowing through the inductor L_2 during the interval $t_2 \div t_4$. Its graphical solution obtained by Maple program 15 shown in Fig. 7.

At time $t_3 = 16\mu s$ from the beginning of this interval, the current passing through the inductor is $i_{L2} = 3,1kA$.

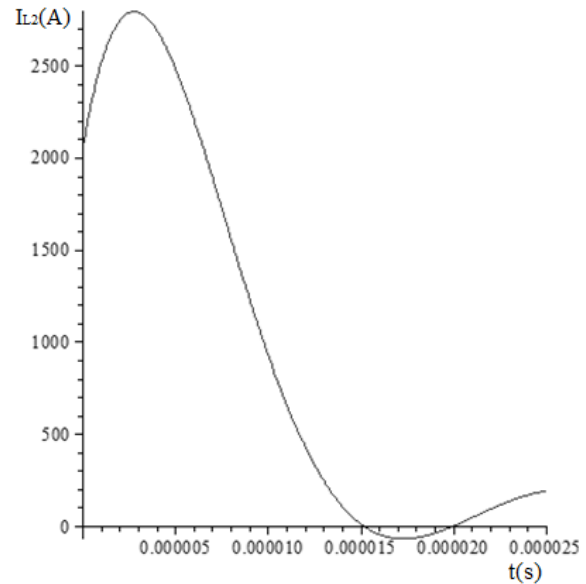


Fig. 7. Graph of $I_{L2}(t)$ in the interval $t_2 \div t_4$ in program product Maple

If it continues the transition process in time two resonant loops behave like a resonant circuit at a frequency $f_0 = 29 \text{ kHz}$.

4. Conclusions

In the proposed article presents simulation and theoretical studies of excitation circuit for a

discharge lamp of the type "double pulse". Described is the principle of operation of the scheme to generate two successive pulses with varying energy. Also shown is the equivalent circuit of the flash lamp used in the computer simulation of transients with software "Multisim".

Transitional processes of change of current through the flash lamp are divided into four time intervals. The resulting separation allows for the compilation of equations describing analytical processes in the respective interval.

The analysis is based on the composition substitute scheme, including the main elements involved in the formation of the current pulses. Done equations of transients in individual time intervals were determined graphically and the results are presented in the article.

Graphic solutions coincide with the results obtained by computer simulation of the scheme, which is a proof of their authenticity. Graphical solutions are obtained using software Maple.

References

- 1. Ненчев, М., С. Салтиел.** Лазерна техника. София, Наука и изкуство, 1994, ISBN 954-07-0253-4.
- 2. Brown M.,** Power Supply Cookbook—2nd ed., Boston, ISBN 0-7506-7329-X6, 2001, McGraw - Hill Book Company, New-York,1969
- 3. Demtroder W.,** Laser spectroscopy: basic concept and instrumentation, 2003, 3-th edn., Springer, Germany
- 4. Deneva M., P.Uzunova, M.Nenchev,** OPT.QUANT. ELECTRON. (2007)39;193-212, (Springer, West. Eur). "Tunable subnanosecond laser pulse generation using an active mirror concept; M.Nenchev,A.Gizbrekht, Opt. Communs.,45(1983)266;
- 5. Desoer Ch.,** Basic Circuit Theory, McGraw-Hill Book Company, New-York,1969
- 6. Ivanov S., Yanca Kissova,** Analysis and simulation investigation of "Double pulse" flash-lamp pump laser electrical system, Journal of the Technical University – Sofia, Plovdiv branch, Bulgaria, "Fundamental Sciences and Applications" Vol. 19, 2013

Department of Electrical Engineering
Technical University–Sofia, Branch Plovdiv
25 Tsanko Dystabanov St.
4000 Plovdiv
BULGARIA
E-mail: etehsv@gmail.com
E-mail: yankakiss777@yahoo.com



THEORETICAL INVESTIGATION OF THE PENETRATION OF IR LASER RADIATION IN HUMAN DENTIN

STANISLAVA NENOVA RABADGIISKA

Abstract: *In this article we present theoretical investigation of the penetration of IR laser radiation in human dentin tissue applied the Monte Carlo mathematical modeling the laser light propagation. For calculations we used appropriately chosen experimental data for specific absorption and scattering coefficients and real geometry of the investigated dentin. We compared experimental data with theoretical calculations for coefficients related to penetration of IR laser radiation with wavelength 1.36 μm in human dentin.*

Key words: *propagation laser radiation, dental tissue, human tooth, Monte Carlo Model, Nd:YAG laser*

1. Introduction

The lasers are of interest for applications of healthy procedures, including oral soft and hard tissues. Their potential for such treatment is actual and are under continuous development.

In the different medical treatments with lasers, it is very important to be known the dose and the parameters of illuminating radiation inside the tissues. Increasing of the dose leads to adverse side - to undesired for the health effects. Thus the applications of the laser radiation need careful physical investigations and good knowledge of the penetration of the laser radiation in the dental tissues – depth, absorbed and scattered parts depend on the laser wavelength, polarization and formulate the approach for evaluation of the dose of the absorbed light into the tissue.

In earlier paper [1] we reported results for reflectivity of human tooth dentin, the spatial distribution of the intensity in the cross-section of the penetrated light intensity in the tooth's dentin and combining the optical and calorimetric techniques, we have obtained separately the absorbed and the diffused part of the light that permit to calculate the absorption and scattering coefficients in the dentin.

Our investigation is made for the laser light of 1.36 μm , emitted by the Nd:YAG laser. This laser is very popular in many laboratories and medical institutions, but the wavelength of 1.36 μm is not fundamental one. Similar researches, which are related to interaction between laser radiation with this wavelength and dentin sample, have limited results in the scientific articles. The typical commercially available Nd:YAG laser operates generally at 1.06 μm , however with easy modification can produce light in 1.32-1.36 μm interval. In addition, as it is well known, the light at wavelength near 1.36 μm (more generally - in range 1.4-1.5 μm in the limits of which is the noted wavelength) has essentially higher absorption in the human dentin than the light at 1.06 μm and thus it is of interest for biomedical applications and dentistry.

Dental hard tissues are inhomogeneous materials. Dentin is a complex structure, honeycombed with dental tubules of 1-3 μm in diameter. Each of these tubules is surrounded by a matrix of needle-shaped, hydroxyapatitelike crystals in a protein matrix largely composed of collagen. This complex structure has the scattering distributions which are generally anisotropic and depend on tissue orientation relative to the irradiating laser source.

The laser-tissue interaction is characterized by laser parameters as the wavelength, repetition rate, pulse energy, spatial and temporal characteristics and optical properties of the tissue as the refractive index, the scattering and absorption coefficients and the scattering anisotropy. Derivation of the absorption and scattering coefficients from a set of measurements requires a theoretical model whose results to be compared to experimental data. This comparison leads to more completely scientific knowledge for laser-tissue interaction.

Such accumulation of experimental and theoretical data, is of interest, because of the different regions in the world, the human teeth tissues have different material properties (including optical properties). The study in this paper is based on vitro-teeth fresh extracted samples from people of Bulgaria, Sofia region.

In the present article we used the numerical method Monte Carlo to direct statistical modeling of light transmission in human dentin by receiving and converting random numbers. Thus we can select the appropriate manner, such as scattering coefficient and the anisotropy coefficient, so the model can produce results commensurable to those of the experiment. The aim of this investigation is made possible fast calculations and estimates the influence of such radiation on the dentin.

2. Materials and methods

For mathematical modeling we used dentin piece with plane-parallel sections of 0.5 x 0.5 mm and 1 mm thickness. Dentin piece is cutting longitudinally. The samples are chosen to be without defects and they are not chemically treated after the preparation. The transmitted light through dentin was measured using the schematic setup shown in Fig. 1 [1]. The incident light is perpendicular to plane-parallel sections. It is very important in the theoretical model to choose the scattering coefficient μ_s . This coefficient changes its value in the range of 200-1400 cm^{-1} [2].

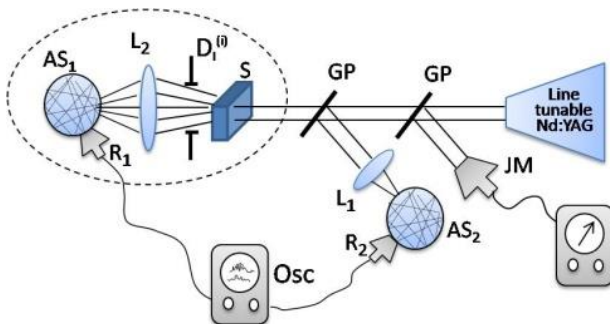


Fig. 1. Experimental setup. [1]

In the realization, given in Fig.1. GP is the glass plate, S is the sample, $D_1^{(i)}$ is diaphragm with

diameter 5 mm, L_1 and L_2 are the lenses with a focal distance of 5 cm and 8 cm; L_2 is with high aperture of 4 cm, AS_1 and AS_2 are the averaged spheres, R_1 and R_2 are nanosecond-resolution receivers for IR, Osc is two-channels storage oscilloscope, JM is a energy measurer.

We measured [1] E_{in} (incident energy), E_{tr} (transmission energy) and increasing of the temperature of the sample after the illumination by the laser pulse; we calculated the absorption coefficient μ_a . For the wavelength 1.36 μm for the sample with length $l = 1$ mm and mass $m=0.0632\text{g}$ and measured increasing of the temperature of 0.1 degree after illumination, we calculated that the absorbed energy is 8.8×10^{-3} J. The E_{in} and E_{tr} is measured to be 10.5×10^{-3} J and 0.84×10^{-3} J.

3. Monte Carlo Model

General scheme of Monte Carlo method is based on Central limit theorem in probability theory. It affirms that the random number $Y = \sum_{i=1}^N X_i$ is equal to a sum of large number of N random numbers X_i with the same mathematical expectations m and dispersion σ^2 which are always normally distributed with mathematical expectation $N.m$ and dispersion $N.\sigma^2$.

3.1. Photon Initialization

The Monte Carlo method starts launching a photon into the tissue [3]. If a collimated beam normally incident on a slab is simulated then the photon's initial direction is chosen downwards into the tissue. If a diffuse irradiance is simulated then the photon's direction is chosen randomly from all possible directions in the downward hemisphere. The coordinates of the photon are usually identical for all photons. This allows convolution techniques to be used to determine influence from a wide variety of beam shapes.

Variance reduction techniques are used to reduce the number of photons necessary to achieve the desired accuracy for the Monte Carlo calculation. These techniques have a long history and most important ones were first implemented by Kahn. One simple technique to improve the efficiency of a Monte Carlo program is to propagate many photons along each pathway. Usually only one photon follows each pathway, and at each step the photon may be either absorbed or scattered. If a packet of photons followed each pathway then some portion of the packet would be absorbed at each step. The size of this packet is called the weight of the photon. Its initial weight is set to unity.

3.2. Generating the Propagation Distance

The simplest Monte Carlo method propagates each photon with small, fixed

incremental step size. The fixed step size Δs must be small relative to the average mean free path length of a photon in the tissue. The mean free path length is the reciprocal of the total attenuation coefficient.

$$\Delta s \ll \frac{1}{\mu_t} = \frac{1}{\mu_s + \mu_a} \quad (1)$$

where μ_t , μ_a and μ_s are the total attenuation, the absorption and the scattering coefficients respectively. If the step size is too small the photon will rarely interact with the tissue and the Monte Carlo method will be inefficient, conversely if the step size is too large then the distanced travelled by a photon is a poor approximation to that of a real photon.

A much more efficient method chooses different step size for each photon step. The probability density function for the step size follows Beer's law (it is more likely to the photon to travel short distance than long distance and the probability is proportional to $e^{-\mu \Delta s}$.) The function of a random variable (ξ) uniformly is distributed between zero and one which yields a random variable with this distribution and is

$$\Delta s = \frac{-\ln \xi}{\mu_t} \quad (2)$$

The step size Δs found using equation (2) represents the distance that the photon will travel before interacting (through absorption or scattering) with the tissue.

3.3. Moving the photon

A photon is uniquely described by five variables: three spatial coordinates for the position and two directional angles for the direction of travel. However it is convenient to describe the photon's spatial position with three Cartesian coordinates and the direction of travel with three direction cosines. The required formulas for propagation are simple, and the angle variables describing photon direction do not change unless the photon's direction changes. The direction cosines are specified by taking the cosine of the angle that the photon's direction makes with each axis. These are specified by μ_x , μ_y and μ_z corresponding to each of the x, y and z-axis, respectively. For a photon located at (x,y,z) travelling a distance Δs in the direction (μ_x , μ_y , μ_z), the new coordinates (x', y', z') are given by

$$\begin{aligned} x' &= x + \mu_x \Delta s \\ y' &= y + \mu_y \Delta s \\ z' &= z + \mu_z \Delta s \end{aligned} \quad (3)$$

3.4. Internal reflection

The possibility of internal reflection occurs when the photon is propagated across the boundary into the region with a different index of refraction. The probability that the photon will be internally reflected is determined by the Fresnel reflection coefficient $R(\theta_i)$

$$R(\theta_i) = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\theta_i - \theta_t)}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)} + \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_t)}{\tan^2(\theta_i + \theta_t)} \right] \quad (4)$$

where $\theta_i = \cos^{-1} \mu_z$ is the angle of incidence on the boundary and the angle of transmission θ_t is given by Snell's law

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \quad (5)$$

where n_i and n_t are the indices of refraction of the medium from which the photon incident and transmits, respectively. The random number ξ uniformly distributed between zero and one is used to decide whether the photon is reflected or transmitted. If $\xi < R(\theta_i)$ then the photon is internally reflected, otherwise the photon exits the tissue and the event is recorded as backscattered light (when the photon exits the top) or transmitted light (when it exits the bottom). If the photon is internally reflected, then the position and direction of the photon are adjusted accordingly. For a slab geometry, infinite in the x and y directions with a thickness t in the z-direction, the internally reflected photon position (x'',y'', z'') is obtained by changing only the z-component of the photon coordinates

$$\begin{aligned} (x'', y'', z'') &= (x, y, -z) \text{ if } z < 0 \\ (x'', y'', z'') &= (x, y, 2\tau - z) \text{ if } z < \tau \end{aligned} \quad (6)$$

The new photon direction (μ_x', μ_y', μ_z') is

$$(\mu_x', \mu_y', \mu_z') = (\mu_x, \mu_y, -\mu_z) \quad (7)$$

And both μ_x and μ_y remain unchanged.

3.5. Photon absorption

The technique of implicit capture assigns a weight to each photon as it enters tissue. After each propagation step, the photon packet is split into two parts- a fraction is absorbed and the rest is scattered. The fraction of the packet that is absorbed is

$$f_a = \frac{\mu_a}{\mu_s + \mu_a} = 1 - \frac{\mu_s}{\mu_s + \mu_a} = 1 - a \quad (8)$$

where a is the single particle albedo. Consequently, the new photon weight is given by $\omega' = a\omega$, which represents the fraction of the packet that is scattered on this step.

An absorption event require that both the location and the amount of light absorbed be recorded. For example, the appropriate element of the absorption matrix is incremented by $(1-a)\omega$. The number of bins in the absorption matrix is determined by the spatial resolution desired. Increasing the number of entries increases the spatial resolution, but also increases the absorption uncertainly in each element (because fewer absorption events will take place in each element and the error is inversely proportional to the square root of the number of absorption events). The influence rate is obtained by dividing the final value of each matrix element by 1 the equivalent spatial volume of the element, 2 the absorption coefficient, 3 the total number of photons propagated and 4 the initial weight of each photon.

3.6. Photon termination

The weight's photon never reach zero, however during propagation it decreases enough so to yield little information. Scattering the photon its weight falls below a minimum (e.g. 0.0001), then we can consider that it disappears (or we say it has absorbed into the medium). The technique called roulette is used to terminate the photon once its weight drops below the specified minimum. The roulette technique gives such of photon one chance in m of surviving with a weight $m\omega$ or else its weight is reduced to zero. The photon is thereby killed in an unbiased fashion, without sacrificing energy conservation and without continuing propagation until its weight has reach zero.

3.7. Changing photon direction-scattering

A normalized phase function describes the probability density function for the azimuthal and longitudinal angles for a photon when it is scattered. If the phase function has no azimuthal dependence, then the azimuthal angle ψ is uniformly distributed between 0 and 2π , and may be generated by multiplying a pseudo-random number ξ uniformly distributed over the interval zero to one by 2π ($\psi = 2\pi\xi$). The deflection angle θ for an isotropic distribution is given by

$$\cos\theta = 2\xi - 1 \quad (9)$$

Since scattering in tissue is characterized by the Henyey-Greenstein phase function, the

generating function for the Henyey-Greenstein phase function is

$$\cos\theta = \frac{1}{2g} \left\{ 1 + g^2 - \left[\frac{1-g^2}{1-g+2g\xi} \right]^2 \right\} \quad (10)$$

If scattering is isotropic (anisotropy factor $g=0$) then equation (9) be used.

If a photon is scattered at an angle (θ, ψ) from the direction (μ_x, μ_y, μ_z) in which it is travelling, then the new direction (μ'_x, μ'_y, μ'_z) is specified by

$$\mu'_x = \frac{\sin\theta}{\sqrt{1-\mu_z^2}} (\mu_x \mu_z \cos\psi - \mu_y \sin\psi) + \mu_x \cos\theta$$

$$\mu'_y = \frac{\sin\theta}{\sqrt{1-\mu_z^2}} (\mu_y \mu_z \cos\psi + \mu_x \sin\psi) + \mu_y \cos\theta$$

$$\mu'_z = -\sin\theta \cos\psi \sqrt{1-\mu_z^2} + \mu_z \cos\theta$$

4. Results

In the modeling we have assumed that the photons enter the tissue one by one perpendicular to the plane-parallel sections. Also we assume that the azimuthally angular distribution of photons is with equal probability. The deflection angle θ ($0 \leq \theta < \pi$) and azimuthal angle ψ ($0 \leq \psi < 2\pi$) will be sampled statistically.

Once the photon packet has reached an interaction site and its weight decreased, the photon packet with the updated weight is ready to be scattered.

We consider that the scattering in tissue is characterized by the Henyey-Greenstein (HG) phase function [4] with anisotropy factor $g=0.3$, absorption coefficient $\mu_a=2[\text{cm}^{-1}]$ [2] and scattered coefficient $\mu_s=850[\text{cm}^{-1}]$. It is known that these coefficients depend mainly on the structure of the tissue (its components), their orientation and the wavelength of the incident radiation.

The photons penetrate into the tissue on the z -axis at a point with Cartesian coordinates $x=0, y=0, z=0$ (**Fig.2, Fig.3, Fig.4**) and begin to scatter in different directions determined by the deflection angle θ and azimuthal angle ψ . Length of the free path of photons between two dissipates is defined statistically as it shown in Chapter 3. The minimum weight that the photon exits is 10^{-4} . When the weight (it is related to the energy of the photon) is smaller than 10^{-4} we suppose that the photon was absorbed in the medium.

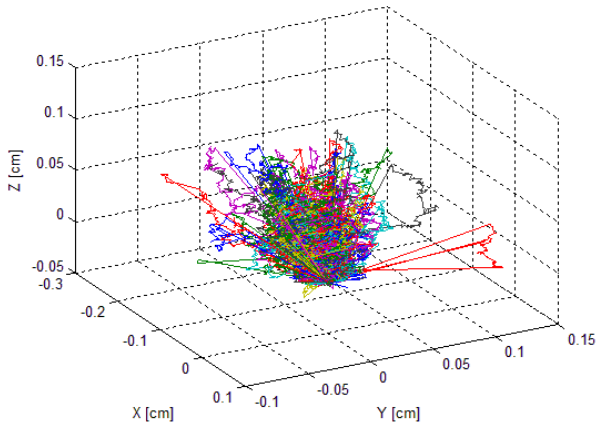


Fig. 2. Graphical results showing the path of the incident photons in the XYZ Cartesian coordinate system.

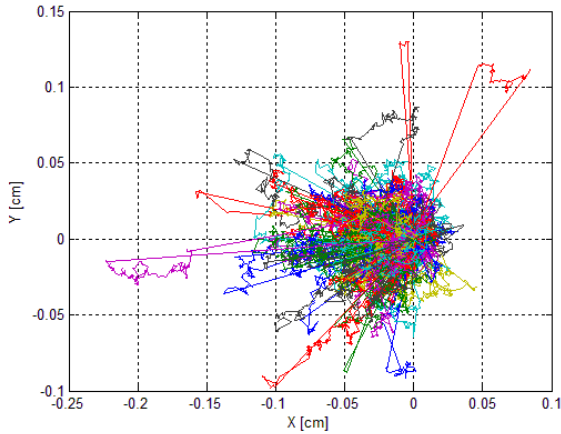


Fig. 3. Graphical results showing the path of the incident photons in the XY Cartesian coordinate system.

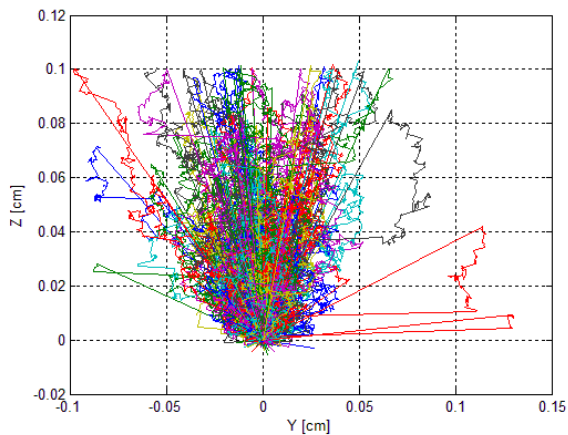


Fig. 4. Graphical results showing the path of the incident photons in the YZ Cartesian coordinate system.

The graphs of Fig.2, Fig.3 and Fig.4 have been obtained by the Monte Carlo method for $N = 1000$ number of photons introduced into the dentin

as described above manner. The numerical calculations in this same method for $N = 10000 = 1000 \times 10$ number of photons are presented in Table 1. On the base of these results we find the average number of absorbed (Ab), transmitted (Tr) and reflected (Ref) photons in the tooth sample.

Table 1.

Calculating the arithmetic mean of the number of absorbed, reflected and transmitted photons through the dentin.

No	Ab	Tr	Ref
1.	647	72	281
2.	640	87	273
3.	635	84	281
4.	648	82	270
5.	637	72	290
6.	646	89	265
7.	648	71	281
8.	634	77	289
9.	637	85	278
10.	630	86	284
Average number	640.2	80.5	279.2
Average number [%]	64.02	8.05	27.92

The model gives, as results, approximately 64 % absorption, 8 % transmission and 28 % reflection of the incident photons. On the other side the experiment [1] gives us approximately 80 % absorption, 7 % transmission and 13 % reflection of the incident photons. The obtained error of the experimental data is in the range of 10-20%. The estimation error for used Monte Carlo method is roughly proportional to $1/\sqrt{N}$ where N is independent statistical trials. In the current case N is the number of incident photons. In this case the model gives relative close data to the experimental one. Increasing the number of N we can improve the accuracy of the numerical calculations. However this leads to significantly increasing of the time for calculation to obtain final results.

If we change the main input, which are related to the properties of the tissue (g, μ_a, μ_s), we can obtain different values for absorption, transmission and reflection of the light. For comparison such results are presented in Table 2 where it seems that outcomes are much more sensitive to change of anisotropy factor g and less sensitive to change of scattering coefficient μ_s .

Table 2.

Values of absorbed, transmitted and reflected parts of the light **Ab**, **Tr**, **Ref** for different values of anisotropy factor g , absorption μ_a , and scattering μ_s coefficients.

$g=0.3, \mu_a=2\text{cm}^{-1}, \mu_s=850\text{cm}^{-1}$		
Ab	Tr	Ref
64%	8%	28%
$g=0.4, \mu_a=2\text{cm}^{-1}, \mu_s=850\text{cm}^{-1}$		
53%	14%	33%
$g=0.4, \mu_a=2\text{cm}^{-1}, \mu_s=1100\text{cm}^{-1}$		
56%	8%	36%
$g=0.5, \mu_a=2\text{cm}^{-1}, \mu_s=1400\text{cm}^{-1}$		
42%	6%	52%

As we can see in the Table 2 the initial parameters, which we chose, are the closest to the experimental data.

4. Conclusions

The Monte Carlo method is convenient for calculation of absorption, transmission and reflection of incident photons in the tissue. This method permits to make fast estimations for influence of a specific laser radiation on dental tissue.

Acknowledgements

I would like to thank my scientific supervisor and Head prof. D.Sc. Marin Nenchev for full support for this work.

References

- 1. Uzunova P., S. Rabadgiiska, T. Uzunov, H. Kisov, N. Kaimakanova, M. Deneva, E. Dinkov, M.Nenchev** Study of the penetration of IR laser radiation in human teeth – determination of the absorbed and scattered parts, Proc. of SPIE Vol. 8770, 2013, 87701A-1-7, USA.
- 2. Fried D., E. R. Glena, B. D. J. Featherstone, W. Seka** Nature of light scattering in dental enamel and dentin at visible and near-infrared wavelengths, Appl Opt Vol 34, No.7, 1995, 1278-1285.
- 3. Prahl A. S., M. Keijzer, S. L. Jaques, A. J. Welch** A Monte Carlo model of Light Propagation in Tissue, SPIE Institute Series Vol. IS 5, 1989
- 4. Kienle A., M. Patterson** Determination of the optical properties of turbid media from a single Monte Carlo simulation, Phys. Med. Biol. 41, 1996, 2221-2227

Department of Electrical Engineering
 Technical University–Sofia, Branch Plovdiv
 25 Tsanko Dystabanov St.
 4000 Plovdiv
 BULGARIA
 E-mail: s1983@abv.br



IMPROVING THE EFFICIENCY OF SQUIRREL CAGE INDUCTION MOTORS

VASIL SPASOV

Abstract. *A comparison of the performance characteristics of an induction motor with aluminium rotor cage and with copper rotor cage is presented. For this purpose a three-phase squirrel cage motor is modeled by the finite element method. Computed are the current-speed and torque-speed characteristics, efficiency, power factor, copper and iron losses. Based on the obtained results, conclusions are drawn about the advantages and drawbacks when using copper rotor cage instead of the conventional aluminium one. It is shown that due to the total losses reduction, the motor with copper rotor cage has higher efficiency, power factor and rated torque.*

Key words: *induction motor, efficiency, copper rotor cage, aluminium rotor cage, FEM.*

1. Introduction

The efficiency of electric motors is of paramount importance nowadays, since they are major consumers of energy in modern society. Electric motors consume 69% of produced energy in the industrial sector of the European Union [1]. 90% of this energy is used to supply three-phase, low voltage squirrel cage induction motors (IM). Increasing the efficiency of those motors by only a few percent can significantly reduce energy consumption and CO₂ emissions. In the United States alone, one percent increase in IM efficiency could save 20 billion kWhrs annually [2].

To reduce energy consumption, leading manufacturers of IM motors around the world adopted an energy efficiency classification that was put in place by the IEC and has been published as a globally relevant standard IEC 60034-30 (Rotating electrical machines - Part 30: Efficiency classes of single-speed, three-phase, cage-induction motors). This International Standard classifies motors into three levels depending on how efficiently they convert electricity into mechanical energy. IE1 is the base standard for efficiency, IE2 stands for high efficiency and IE3 for premium efficiency. The standard also mentions a future level above IE3 to be called IE4 super premium efficiency. Products in this category are not yet commercially available.

The classification system stimulated competition among motor manufacturers and generated massive technology improvements. The

EU adopted it and issued EC Regulation No. 640/2009, which came into effect on 16 June 2011 [3]. As of that date, only motors that meet or exceed IE2 energy efficiency levels are allowed to be sold and installed in the EU. In a second stage, from January 2015 all motors will need to reach IE3 efficiency levels.

The coming dates of EC Regulation No. 640/2009 has motivated induction motors manufacturers to develop innovative technological solutions for higher efficiency.

This paper presents a simple but powerful method for improving IM efficiency. It is based on replacing the aluminium rotor cage with die-cast copper cage. The paper is organized as follows. The methods for improving IM efficiency are presented in Section 2. The induction motor specifications and method of analysis are discussed in Section 3. In Section 4 a comparison is made between characteristics of the IM with aluminium rotor cage and with copper cage. Finally, conclusions are drawn in Section 5.

2. Methods for improving induction motors efficiency

The cheapest method to produce more efficient induction motors is to keep designs and use improved magnetic materials such as premium-grade low-loss steel and copper rotor cage [4]. In this case the stator and rotor slots dimensions and the inner and outside stator diameter are unchanged.

The second strategy is to change the stack length and the stator winding. A more expensive strategy foresees also the change of stator and rotor slots dimensions. This requires new lamination punching tools even if inner and outside stator diameters are unchanged.

The most expensive design strategy requires to change all motor dimensions and to reduce losses in the motor [5]. Decreasing windage losses by reducing the external fan diameter improves motor efficiency. The tradeoff is temperature rise in windings resulting in increased stator resistance losses. Hence when following this strategy, designers have to find a balance between different losses in order to optimize motor efficiency.

To fulfill the NEMA Premium efficiency standard, additional design and production techniques could also be required [5].

In this paper the simplest method for improving efficiency is chosen, namely replacing the aluminium rotor cage with die-cast copper cage.

The use of copper in place of aluminium rotor cage can lead to significant benefits [6]:

Lower resistive losses and lower operating temperature, due to the fact that the electrical conductivity of copper is nearly 60% higher than that of aluminum. Lower losses mean higher efficiency.

Extended life expectancy. As motor life is doubled for every 10°C reduction in operating temperature, the lower operating temperature results in extended motor life expectancy. The lower operating temperature, combined with the high thermal conductivity of copper, allows for smaller cooling fans. In this way windage losses are decreased.

Smaller size and cost. Due to the higher efficiency when using copper rotor, it is possible to decrease the motor overall length while matching the performance of the motor with aluminium rotor. The shorter stator windings can save up to 500 000 tons of copper in the world annually [7].

Lower CO₂ emissions. Recycling of copper leads to significant energy savings. To extract copper from copper ore, the energy required is approximately 100 GJ/ton. Recycling copper uses about 10 GJ/ton. This energy saving leads to the conservation of valuable reserves of fossil fuels and consequent reduction of CO₂ emissions.

Due to the above benefits, copper rotor motors are proving a cost-effective way of meeting the new IE4 super premium efficiency level. The active development of the copper die-casting technology since 1997 has resulted in a growing world market of copper rotor motors.

3. Motor specifications and method of analysis

The specifications of the three-phase squirrel cage induction motor, analyzed in this paper, are given in Table 1.

Table 1

Specifications of the analyzed motor

Parameter	Value
Supply voltage, V	380
Frequency, Hz	50
Rated power, kW	1.5
Number of poles	2
Rated slip	0.055
No. of stator slots	24
No. of rotor slots	26
Winding connection	Wye

The cross section of the analyzed motor is shown in Fig. 1. The dimensions of rotor and stator slots in millimeters are given in Fig. 2.

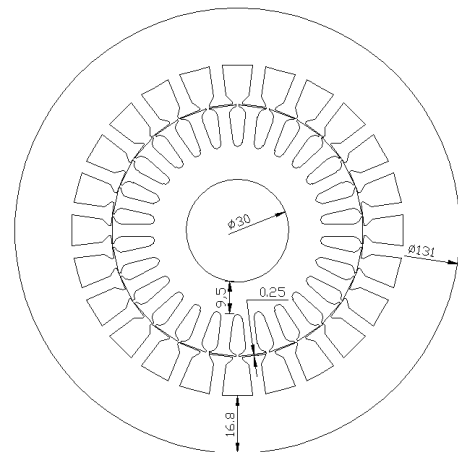


Fig. 1. Cross section of the analyzed motor

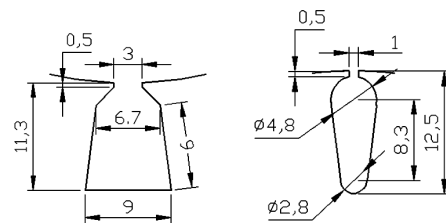


Fig. 2. Dimensions of rotor and stator slots

To analyze the induction motor, the 2D Finite Element Method is used [8]. The numerical model is voltage-fed and takes into account rotor and stator end turn resistances and leakage reactances, steel saturation and eddy currents in rotor bars.

Due to the symmetry, only one pole of the motor is modeled. The finite element mesh consists

of 10560 second-order triangles. When generating the finite element mesh, the depth of penetration

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}} \quad (1)$$

is taken into account. Here σ is the electrical conductivity and μ is the magnetic permeability of material.

Based on the obtained numerical results, electromagnetic torque, stator and rotor currents, steel and copper losses, power factor and efficiency at different slips are computed.

4. Comparison of the results for aluminium and rotor bars

Fig. 3 shows the motor current-speed characteristics computed at different slips by the finite element analysis. The torque-speed characteristics are given in Fig. 4.

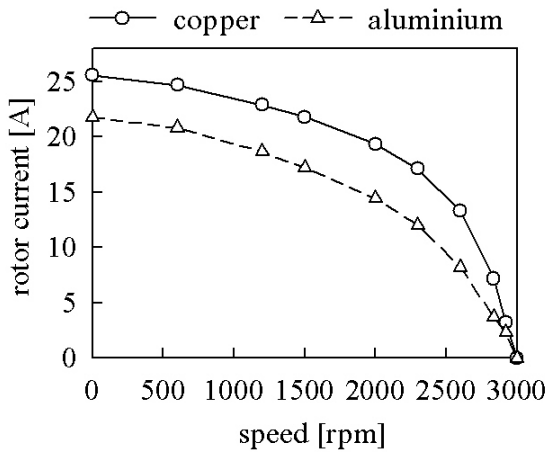


Fig. 3. Current-speed characteristics

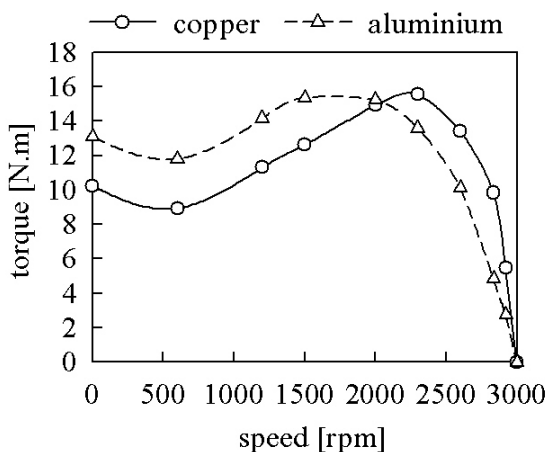


Fig. 4. Torque-speed characteristics

The performance characteristics at rated load are shown in Table 2. Here Al stands for aluminium rotor and Cu for copper rotor cage.

The efficiency is computed by the formula:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - P_\Sigma}{P_1}, \quad (2)$$

where P_1 is the consumed active power and P_2 is the output power. The total losses P_Σ include stator and rotor copper losses, iron losses, windage and friction losses, and stray losses [9].

Currents, efficiency and other parameters at rated slip, computed by the finite element analysis, are presented in Table 2. There is a significant increase in the overall efficiency of the copper cage motor produced at lower rated stator current. The higher conductivity of copper leads to lower total loss and consequently higher efficiency for the copper rotor cage.

Table 2

Performance characteristics at rated load

Parameter	Al	Cu	% change
Rated power, kW	1.5	1.5	0
Rated stator current, A	3.71	3.21	-13
Full load speed, rpm	2835	2922	+3
Rated slip	0.055	0.026	-53
Efficiency, %	81	84	+3.7
Power factor	0.61	0.71	+16

As seen in Table 2, the copper rotor cage achieves the rated torque with 53% less slip. This creates a motor that does not slow down much under load and is very responsive on variable frequency drives. When variable torque loads like fans and pumps are applied, however, potential problems may arise. With 1% increase in full load speed, the energy consumed by these applications goes up by 3% [10].

Table 3 compares the torques produced by the motor. There is a 12% increase in the rated torque for the copper cage rotor. The breakdown torques are very close. Due to the higher conductivity of copper, the starting torque of the copper cage IM is 13% lower, but still about twice the rated torque. This could be problematic for high-inertia loads.

Table 3

Torques produced by the motor

Parameter	Al	Cu	% change
Rated torque, N.m	4.85	5.45	+12
Starting torque, N.m	13.65	10.46	-13
Breakdown torque, N.m	15.55	15.67	+0,8
Pull-out torque, N.m	11.75	9.07	-23

Table 4 compares the losses in the motor. The losses are computed by the formula:

$$p = k_h B_{\max}^2 f + k_c (B_{\max} f)^2 + k_e (B_{\max} f)^{1.5}, \quad (3)$$

where B_{max} is the magnetic flux density amplitude; k_h , k_c and k_e are coefficients taking into account hysteresis, eddy currents and the steel structure.

As expected, the copper rotor conduction losses are more than two times lower than the aluminium rotor conduction losses. This is one of the main advantages when replacing the aluminium cage with copper cage.

Table 4
Losses in aluminium and copper cage motor

Parameter	Al	Cu	% change
Stator copper losses, W	155	148	-4.5
Rotor bars losses, W	94.2	41.3	-56
Steel losses, W	32.4	32.6	+1

Copper, however, has a drawback as compared to aluminium, namely higher mass density. This results in higher coefficient of inertia and damping coefficients, shown in Table 5. The finite element method simulations showed that the aluminium rotor motor reached steady state no-load speed about twice faster than the copper rotor motor.

Table 5
Coefficients of inertia and damping coefficients

Parameter	Al	Cu
Coefficient of inertia, kg.m ²	0,00257712	0,00451673
Damping coefficient, N.m.sec/rad	0,0017	0,0035

5. Conclusions

The comparison of the performance characteristics shows that the induction motor with copper rotor cage outperforms the induction motor with aluminium rotor cage. The use of copper in place of aluminium rotor cage leads to a significant 3.7% increase in motor efficiency produced at lower rated stator current. There is a 12% increase in the rated torque for the copper cage rotor, achieved at 53% less slip. Due to the higher conductivity of copper, however, the starting torque of the copper cage IM is 13% lower but still about twice the rated torque. The copper rotor bars losses are more than two times lower than the aluminium bars losses. This leads to lower operating temperature and extended motor life expectancy.

Based on the obtained results, it can be concluded that the use of copper rotor cage results in significant improvements in induction motor efficiency and represents a powerful alternative to conventional motors with aluminum rotor cage.

References

- Daut I. et al.** Comparison of copper rotor bars with aluminium rotor bars using FEM software – a performance evaluation. Second International Conference on Computer and Electrical Engineering, 2009, pp. 456-459.
- Thieman M. et al.** Copper motor rotors: energy saving efficiency, now also economic feasibility. Proceeding of Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, 2007, pp. 328-333.
- European Commission.** Commission Regulation (EC) No. 640/2009 of 22 July 2009 implementing Directive 2005/32/EC of the European Parliament regarding ecodesign requirements for electric motors, Official Journal L 191, July 2009, pp. 26-34.
- Parasiliti F. et al.** Three-phase induction motor efficiency improvements with die-cast copper rotor cage and premium steel. SPEEDAM, 2004, pp. 338-343.
- Malinowski J. et al.** Advances in construction techniques of ac induction motors preparation for super premium efficiency levels, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 40, No. 6, 2004, pp. 206–211.
- Manoharan S. et al.** Review on efficiency improvement in squirrel cage induction motors by using DCR technology. Journal of Electrical Engineering, Vol. 60, No. 4, 2009, pp. 227–236.
- Peters D. et al.** Improved motor energy efficiency and performance through the die-cast copper rotor, Proc. of ICEM 2002 15th Conference on Electrical Machines, Brugge, Belgium, August 2002, p. 117 (Book of Abstracts).
- Jin J.** The finite element method in electromagnetics, John Wiley & Sons, 1993.
- Fitzgerald A.** Electric Machinery. McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 6th edition, 2002.
- Stark C. et al.** Copper in the rotor for lighter, longer lasting motors. ASNE San Diego Section Fleet Maintenance Symposium, 2005.

Assoc. Prof. Vasil Spasov, Ph.D.
Department of Electrical Engineering
Technical University - Sofia, Branch
Plovdiv
25 Tsanko Dyustabanov Str.
Email: vasilspasov@yahoo.com



SOFTWARE TOOLS FOR THE DESIGN OF ROM BASED FSM IMPLEMENTED IN FPGA

IVAN KANEV

Abstract: *Modern FPGAs have on-chip blocks of memory which can be utilized to build ROM-based FSMs. The paper presents one approach to developing software tools aimed at facilitating the FSM design, and referred to as FSM ROMizer. A method for defining FSMs, as well as rules for describing the states of FSMs, is set forth. The syntax of software tools is defined through using Extended BNF. The states of the FSMs having been translated, FSM ROMizer generates an output memory initialization file (MIF) and a timing diagram which is used to represent the states of FSMs. The application range of FSM ROMizer can be broadened by means of the output MIF file being converted to some other frequently used formats such as HEX, COE etc.*

Key words: *FPGA, ROM, FSM, ROMizer, MIF, HEX, COE, VHDL, Verilog*

1. Introduction

Modern FPGAs have on-chip blocks of memory which can be configured as ROM [1]. This is a strong basis for the utilization of these blocks for building ROM-based FSMs [2,3,4,9,12,13]. Compared to the conventional methods of FSM design which use logic elements (LEs), the ROM-based FSMs have some specific advantages.

1. Only the resources of ROM are utilized for the purposes of FSM realization. This results in the reduction of logic elements in FPGAs. With ROM-based FSMs the effect achieved by LEs reduction proves to be of considerable importance when FSMs have a number of internal states involved in the generation of constants and control signals[4].

2. Maximum clock frequency of ROM-implemented FSMs is not dependent upon their complexity[3].

3. When designing FSMs, it is possible to exactly specify the resources of the ROM being used [2,3,4].

The designing of ROM-based FSMs encounters serious difficulties due to three basic factors:

1. There are no tools for defining and describing the states of FSMs.

2. The labored encoding of memory initialization file (MIF) with the states of FSMs

3. There are no tools for presenting the graphs or the timing diagrams of FSMs.

It is the building of software tools used to facilitate the FSM design, and called FSM ROMizer, that this study is focused on.

The designing of ROM-based FSMs through using FSM ROMizer requires for the following problems to be solved:

1. Setting forth a method for the defining of FSM.

2. Establishing rules for describing the states of FSM.

3. Defining syntax for FSM ROMizer. This syntax provides a basis for building the parser which, having realized the translation, generates the following: a list of the uncovered errors; an output file for memory initialization in .mif format; a timing diagram representing the states of FSM.

Fig. 1. shows: the stages in designing ROM-based FSMs through using FSM ROMizer; the integration of the output file into Altera's Quartus II IDE [11]; the simulation of the VHDL/ Verilog project through using Altera's ModelSim [10].

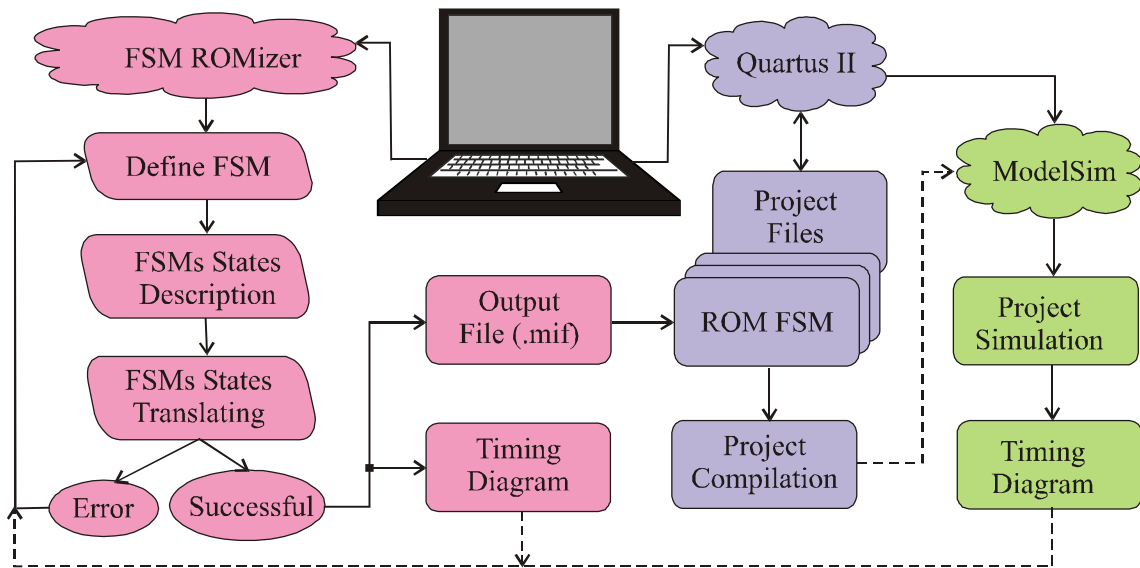


Fig. 1. Design of ROM-based FSM, with "FSM ROMizer"

2. Method for defining FSM

One or more ROM-based finite state machines implemented in FPGA are defined within *Section of definitions* which is confined between the directives DEFINE FSM and END DEFINE. The defining of FSM starts with DEFINE FSM. Immediately following this directive, there is a colon and the name of the defined ROM FSM. This name will be used by ROMizer to build the memory initialization file (.mif) containing the states of the finite state machines.

```

DEFINE FSM: MyFsmName;
Section of definitions
END DEFINE;
    
```

The section of definitions describes the correspondence between the set of signals which represents the input alphabet and the signals which represent the output functions. For the purposes of terminological coherence in the description of finite state machines, the input signals are also designated "input variables" and the output functions -"output variables".

There are two forms of input variable declaration:

1. User defined input variables. This form provides the user with the option of defining variables equivalent to the variables used in the VHDL project or the Verilog project.

2. Predefined input variables. Some finite state machine specific input variables are defined in advance. In FSM ROMizer these are the variables "state" or "addr". All input variables are defined through the directive "address".

User defined variables and predefined variables are linked to "address" by the assignment operator "<="". In the section of definitions this directive can be found only on the left side of the assignment operator:

```

Address [absolute-range] <= Input
Variables [relative-range].
    
```

There are two forms of output variable declaration:

User defined output variables;

Predefined output variables. In FSM ROMizer these are the variables "next_state" or "next_addr". All output variables are defined through the directive "q".

User defined variables and predefined variables are linked to "q" by the assignment operator. In the section of definitions this directive can be found only on the right side of the assignment operator:

```

Output Variables [relative-range] <= q
[absolute-range];
    
```

The needed bit range used to define one directive or variable is put into square brackets.

[index] - defining one-bit directives or variables pointed by index;

[msb:lsb] - defining directives or variables which are represented by several consecutive bits. The stated range includes all the bits between msb (most significant bit) and lsb (least significant bit). If "C" is used to denote the number of bits which are needed to define multibit directives or variables, then $C = msb - lsb + 1$.

Rules for specifying the range.

1. Specifying the range of directives:

```

[absolute-range] = [msb : lsb];
[absolute-range] = [index].
    
```

Apart from specifying the range, *msb*, *lsb* and *index* are also used to denote: the address inputs which the input variables are linked to, when the input variables are related to the directive “address”; which outputs the output variables are linked to, when output variables are related to the directive “q”.

2. Specifying the range of variables:

[*relative-range*] = [*msb* : 0];

[*relative-range*] = [*index* = 1].

Range specification can be omitted for a variable which points to a one-bit signal. In this case only the name of the variable is used.

A finite state machine having been defined, it is possible to specify the parameters which are needed for computing the resources of the used ROM.

If we denote:

m_a (m_q) - the number of one-bit input (output) variables;

n_a (n_q) - the number of multibit input (output) variables;

C_a (C_q) - number of bits in a multi-bit

input (output) variable

then:

$$ROMdept = m_a + \sum_{i=1}^{n_a} C_{a_i}, \text{ where}$$

$ROMdept$ is the total number of input variables;

$2^{ROMdept}$ is the number of internal states of the finite state machine;

$$ROMwidth = m_q + \sum_{i=1}^{n_q} C_{q_i}, \text{ where}$$

$ROMwidth$ is the total number of output variables;

$$M = 2^{ROMdept} \times ROMwidth, \text{ where}$$

M is used to denote the size of ROM needed for the realization of the defined finite state machine.

The defining of FSM can be represented by the following example:

```
DEFINE FSM: FSM_Example;
enable    <= q[0];
strobe    <= q[1];
data[3:0] <= q[5:2];
next_state[3:0] <= q[9:6];
address[3:0] <= state[3:0];
address[4] <= S;
END DEFINE;
```

The FSM `FSM_Example` generates up to 16 four-bit “data” constants synchronized by the signals `enable` and `strobe`. The variable “S” suggests an option to implement in ROM one more FSM, which is defined with the same variables, but using different values of the internal states.

For the specified range of the directives in **FSM_Example**: $ROMdept = 5$;

$ROMwidth = 10$; $M = 32 \times 10$.

3. FSM Description

The states of FSM, which has already been defined, are described in “section of descriptions” confined between the directives `CONTENT BEGIN` and `END`:

```
CONTENT BEGIN
```

```
    section of descriptions
```

```
END;
```

Generally, the syntax of section of descriptions can be represented the following way:

```
address of ROM : Description of states;
```

where:

address of ROM is used to specify the absolute value of the address. Each *address of ROM* is used to describe one of the states of FSMs.

With respect to that, *address of ROM* can also be interpreted as a number of the states of FSMs.

description of states is used to describe the values of variables:

```
<description of states>:= variable[msb : 0]
= b"value",..., variable= b'value';
```

For the purposes of compactness in the description of the states of FSM, the following rules are defined: after Reset all input and output variables are set to zero; if, for a certain state of FSM, a specified value is assigned to a variable, the variable will retain this value until it is changed in some other state of the FSM; the predefined input or output variables (`state`, `next_state`) can be followed by the unary operation “post increment” (`++`). The automatic increment continues to the next state of FSM, in which new values are assigned to the variables.

Example of description of one version of `FSM_Example`:

```
CONTENT BEGIN
```

```
0 : state[3:0] = b"0000"++,
    next_state[3:0] = b"0001"++,
    S = b'0', enable = '1',
    data[3:0] = b"0001", strobe = '0';
```

```
1 : data[3:0] = b"0010";
```

```
2 : data[3:0] = b"0001";
```

```
3 : data[3:0] = b"0010";
```

```
4 : data[3:0] = b"0100";
```

```
5 : data[3:0] = b"0010";
```

```
6 : data[3:0] = b"0001";
```

```
7 : data[3:0] = b"0010";
```

```
8 : data[3:0] = b"0001", strobe = '1';
```

```
9 : data[3:0] = b"0000", strobe = '0',
```

```
state[3:0] = b"1001", enable = '0',
```

```
next_state[3:0] = b"0000";
```

```
UNUSED_ADDR[A..1F] : 0;
```

```
END;
```

The described FSM has ten states in which the constants *data*, $data = \{1,2,1,2,4,2,1,2,1\}$, and the control signals *enable* and *strobe* are generated.

4. Translating the states of FSMs

One or more finite state machines having been defined, and their states having been described, it is possible to proceed to translation. The translation is realized in three stages:

1. Parsing. At this stage, the translator performs its typical analyses [6,14]. Detailed description of the syntax of FSM ROMizer is shown in "Table 1." If some discrepancy between the rules of defining and describing the FSM and the syntax of the FSM ROMizer occurs, the process of translation is discontinued and a list of errors is generated.

2. Generating the output file. If the analysis is successful, an output file with the name of the FSM and the extension .mif is generated [1]. The syntax, which the output file is described by, is as follows:

ROM address : *ROM data*; -- comment,

where:

“*ROM address*” is the absolute address in ROM, which is the result of the concatenation ("&") of all input variables ;

“*ROM data*” is the output function, which is the result of the concatenation of all output variables .

For the FSM “FSM_Example”, FSM ROMizer generates the following output file:

```
-- FSM_Example.mif :
-- ROM address <= S & state
-- ROM data <= next_state & data &
strobe & enable
WIDTH=10; -- ROMwidth
DEPTH=32; -- ROMdept
ADDRESS_RADIX= HEX;
DATA_RADIX= HEX;
CONTENT BEGIN
0 : 045 ; -- state[3:0] = b"0000"++,
-- next_state[3:0] = b"0001"++,
-- S = b'0', enable = '1',
-- data[3:0] = b"0001", strobe = '0';
1 : 089 ; -- data[3:0] = b"0010";
2 : 0C5 ; -- data[3:0] = b"0001";
3 : 109 ; -- data[3:0] = b"0010";
4 : 151 ; -- data[3:0] = b"0100";
5 : 189 ; -- data[3:0] = b"0010";
6 : 1C5 ; -- data[3:0] = b"0001";
7 : 209 ; -- data[3:0] = b"0010";
8 : 247 ; -- data[3:0] = b"0001", strobe = '1';
9 : 000 ; -- data[3:0] = b"0000", strobe = '0',
-- state[3:0] = b"1001", enable = '0',
-- next_state[3:0] = b"0000";
[A..F] : 0 ; -- UNUSED_ADDR[A..F] : 0;
END;
```

The output file also includes the descriptions of "FSM_Example" as comments ("--").

3. Generating the diagram of the states. To represent the states of FSMs, FSM ROMizer generates a timing diagram which is used to display in a graphical way the states of the input and output variables (Fig. 2.).

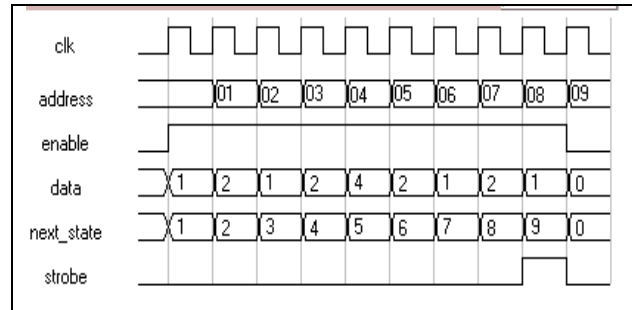


Fig.2. FSM_Example – timing diagram

Source : FSM ROMizer.

In some cases, the timing diagram is not sufficient for the detailed analysis of the designed FSMs. The problem can be solved through a Quartus II-based project, in which the structure of FSMs is described using VHDL or Verilog. After compiling the project with the output file included, ModelSim should be utilized to conduct a precise research of the designed FSMs (Fig. 1.).

5. Results

FSM ROMizer project is implemented in the language Perl. Its functional capabilities are tested with two types of FSM:

1. FSM, whose states are consecutive to a state machine. This test demonstrates the overall functionality of the software tools and action of unary operator "post increment" (+). The results of this test are shown in this article, with "FSM_Example".

2. FSM, whose states are changed periodically. Practical tests are used graphs of automata that implements algorithms "MADM" [8,9].

Comparative analysis of the tested automata created in VHDL and FSM ROMizer, it is in complete compliance.

Table 1.
Syntax of FSM ROMizer in extended Backus–Naur Form[7].

digit = '0' '1' '2' '3' '4' '5' '6' '7' '8' '9';
decimal digit = digit;
number = digit, {digit};
binary digit = '0' '1';
hexadecimal digit = digit 'a' 'A' 'b' 'B' 'c' 'C' 'd' 'D' 'e' 'E' 'f' 'F';
letter = 'a' 'A' .. 'z' 'Z';
word character = letter number '_';
word = letter, {word character} ;
reserved word = 'q' 'address' 'addr' 'next addr';
legal word = word – prereserved word;
whitespace = ' ' '\t';
new line = '\n' '\r\n';
nl = new line, {new line};
sc = ',';
end_of_line = sc,nl;
eol = end_of_line, {end_of_line};
ws = {whitespace};
all_whitespace = ' ' '\t' '\n';
empty_line = {ws},nl;
comment or el = ({comment} {empty line});
nonword character = ',' '.' '/' '\' ' ' '"' "'" '(' ')' '-' '+' '=' ':' ';' '[' ']' '{' '}' ;
single line sequence = {word character whitespace nonword character};
comment = ('-' '/' '/'),[single line sequence],nl;
fsm name = legal word;
fsm program = {comment or el},fsm definitions,{comment or el},fsm states,{comment or el};
fsm_definitions = 'DEFINE FSM',ws,':',ws,fsm_name,sc,[comment], definitions,'END DEFINE',ws,eol;
definitions = definition,{definition},nl;
definition = input defintion output defintion;
input_definition = (input,ws,'<=',ws,legal_variable,ws,sc,(comment nl)) inc_input;
output_definition = (legal_variable,ws,'<=',ws,output,ws,sc,(comment nl)) inc_output;
range = '[' ,number,[: ,number],']';
input = 'address',range;
output = 'q',range;
legal_variable = legal word,[range];
defined_variable = (legal word 'state' 'addr' 'next addr'),[range];
inc_input = 'address',range,ws,'<=',ws,('state' 'addr'),range, sc,(comment nl) ;
inc_output = 'next addr',range,ws,'<=',ws,'q',range, sc,(comment nl) ;
fsm_states = 'CONTENT BEGIN',ws,[comment nl,state,{state}, 'END',sc(comment nl);
state_code = hexadecimal digit, {hexadecimal digit};
state = (ws,state_code,ws,':',ws,assignment, {ws,','},[comment],ws,assignment}, sc, (comment nl)) unused space;
unused_space = ws,'UNUSED_ADDR',ws,['state_code','..state_code,'] ,ws,':', hexadecimal digit, {hexadecimal digit},sc,(comment nl);
assignment = (defined_variable,ws,['<'],'=',ws,legal_value,ws) inc_assignment;
legal_value = bin_value dec_value hex_value;
bin_value = ((('b' 'B'),'' ,binary_digit, '') ((('b' 'B'),'' ,binary_digit, {binary digit}, ''));
dec_value = ('d' 'D'),'' ,decimal digit, {decimal digit}, '' ;
hex_value = ('h' 'H'),'' ,hexadecimal digit, {hexadecimal digit}, '' ;
inc_assignment = ('next addr' 'addr'),range,ws,['<'],'=',ws,legal_value,'++',ws

5. Conclusions

Original software tools, called FSM ROMizer, and aimed at facilitating and accelerating the FSM design have been developed. A method for defining the FSMs has been set forth. The rules, employed to define the correspondence between the set of variables that represents the input alphabet of FSMs and the variables that represent the output functions, have been described. The parameters needed for computing the resources of the used ROM have been defined. Rules focused on compact description of the states of the defined FSMs have been set forth. The syntax of FSM ROMizer has been defined, using the Extended BNF. This syntax provides the basis for building the parser which, having realized the translation of the states of FSMs, generates the following: a list of the uncovered errors; an output file for memory initialization in *.mif* format; a timing diagram representing the states of FSM.

Acknowledgements

The author owes a debt of gratitude to:

Nefize Mustafa for her active participation in the FSM ROMizer project and its programming in Perl;

Trifon Ruskov and Nadezhda Ruskova for the constructive recommendations in the realization of the FSM ROMizer project;

Dimitar Kromichev for the scientific editing of this paper.

References

1. **Altera Corporation**, „Internal Memory (RAM and ROM) - User Guide”, May 2013.
2. **Altera Corporation**, *Quartus II Handbook*, Version 13.0, 2012.
3. **Cong J., Yan, K.**, “Synthesis for FPGAs with embedded memory blocks”, Proc. ACM/SIGDA International Symposium on Field Programmable Gate Arrays, San Jose, California, Feb. 2000, pp. 75-82, February 2000.
4. **Garcia-Vargas I., Senhadji-Navarro, R. Jimenez-Moreno, G., Civit-Balcells, A., Guerra-Gutierrez, P.**, "ROM-Based Finite State Machine Implementation in Low Cost FPGAs," Industrial Electronics, 2007. ISIE 2007. IEEE International Symposium on , vol., no., pp.2342,2347, 4-7 June 2007.
5. **H. Selvaraj, M. Rawski, T. Łuba**, “FSM implementation in embedded memory blocks of programmable logic devices using functional decomposition,” in Proceedings of International Conference on Information Technology: Coding and Computing (ITCC), p. 355, 2002.
6. **Iltchev V.**, *Parsing Table Structure and Algorithm for the LR(k) Parsing Method*, 22-th International DAAAM Symposium, 23-26th November, 2011, Vienna University of Technology, Vienna, Austria.
7. **International Standard ISO/IEC 14977 - The standard metalanguage Extended BNF.**
8. **Kanev I.**, *FPGA Based MADM Decoder*, Proc. of University of Russe “Angel Kantcev”, Vol. 44, book 3.2, ISSN 1311-3321, , pp 88 – 107, Russe, 2005
9. **Kanev I.**, *Implementation of MADM Algorithms on FPGA Based Platform*, Proc. of CompSys Tech’04, Int. Conf. on Computer Systems and Technologies, 2004, 1.7.1 –1.7.9.
10. **M. Rawski, H. Selvaraj, and T. Luba**, “An application of functional decomposition in ROM-based FSM implementation in FPGA devices,” Journal of Systems Architecture, vol. 51, p. 424, 2005.
11. **Mentor Graphics**, *ModelSim® Reference Manual Software*. ©, 1991-2012.
12. **R. Senhadji-Navarro, I. García-Vargas, G. Jiménez-Moreno, A. Civit-Balcells**, *ROM-based FSM implementation using input multiplexing in FPGA devices*, Electronics Letters, Volume 40, issue 20, September 2004, p. 1249 – 1251.
13. **Timothy Kam, Tiziano Villa, Robert K. Brayton, Alberto L. Sangiovanni-Vincentelli** *Synthesis of Finite State Machines: Functional Optimization, 1st edition*, Springer, 2010.
14. **Wirth N**, *Compiler Construction*, Addison-Wesley, ISBN 0-201-40353-6, Zürich, 2005.

Technical University–Sofia, Branch Plovdiv
Dept. of Comp. Systems and Technologies
25 Tsanko Dyustabanov St.
4000 Plovdiv, BULGARIA
E-mail: itkanev@yahoo.com



ИЗМЕРВАТЕЛНА СИСТЕМА НА ХИБРИДНА ИНСТАЛАЦИЯ СЪС ЗЕМНО БАЗИРАНА ТЕРМОПОМПА И СЛЪНЧЕВИ КОЛЕКТОРИ

ЕМИЛ ТОШКОВ, АЛЕКСАНДЪР ГЕОРГИЕВ, РУМЕН ПОПОВ

Резюме: В статията е представена измервателната система на инсталация със земно базирана термопомпа и слънчеви колектори за кондициониране на жилищни сгради. Описани са сензорите за измерване на параметрите на системата и приборите за събиране и обработка на данни. Направен е анализ кои параметри трябва да се измерват при различните работни режими на инсталацията – отопление, охлаждане и зареждане на земята с използване на различни източници на енергия.

Ключови думи: земно базирана термопомпа, слънчеви колектори, хибридна система, измервателна система

MEASURING SYSTEM OF A HYBRID INSTALLATION WITH GROUND SOURCE HEAT PUMP AND SOLAR COLLECTORS

EMIL TOSHKOV, ALEKSANDAR GEORGIEV, RUMEN POPOV

Abstract: The measuring system of an installation with ground source heat pump and solar collectors for air conditioning of residential buildings is presented in this article. The sensors for parameter measuring of the system and the devices for data collecting and treatment are described. An analysis is performed which parameters are to be measured at different installation working modes – heating, cooling and charging of the ground by means of various sources of energy.

Key words: ground source heat pump, solar collectors, hybrid system, measuring system

1. Introduction

The Ground Source Heat Pump (GSHP) systems are promising for long-lived heating and cooling because they are using the ground like heat source or sink with nearly constant yearly temperature. The combination of solar collectors with GSHP is the way to make such systems more effective – higher COP and better working conditions [1, 2]. It is possible also to use the solar energy from collectors directly for space heating and to store the thermal energy into the ground when it is abundant [3]. That helps to keep the ground temperature constant and to avoid the so

called thermal depletion of soil when the system operates a long time [4].

The aim of the present paper is to represent the measuring system of such experimental installation – the sensors and devices which collect data during experiments and the parameters in different modes – heating, cooling and thermal charging.

2. Description of the GSHP system

An experimental system with ground source heat pump and solar collectors was constructed at

the Technical University – Sofia, branch Plovdiv (the main scheme is presented in Fig. 1) [5].

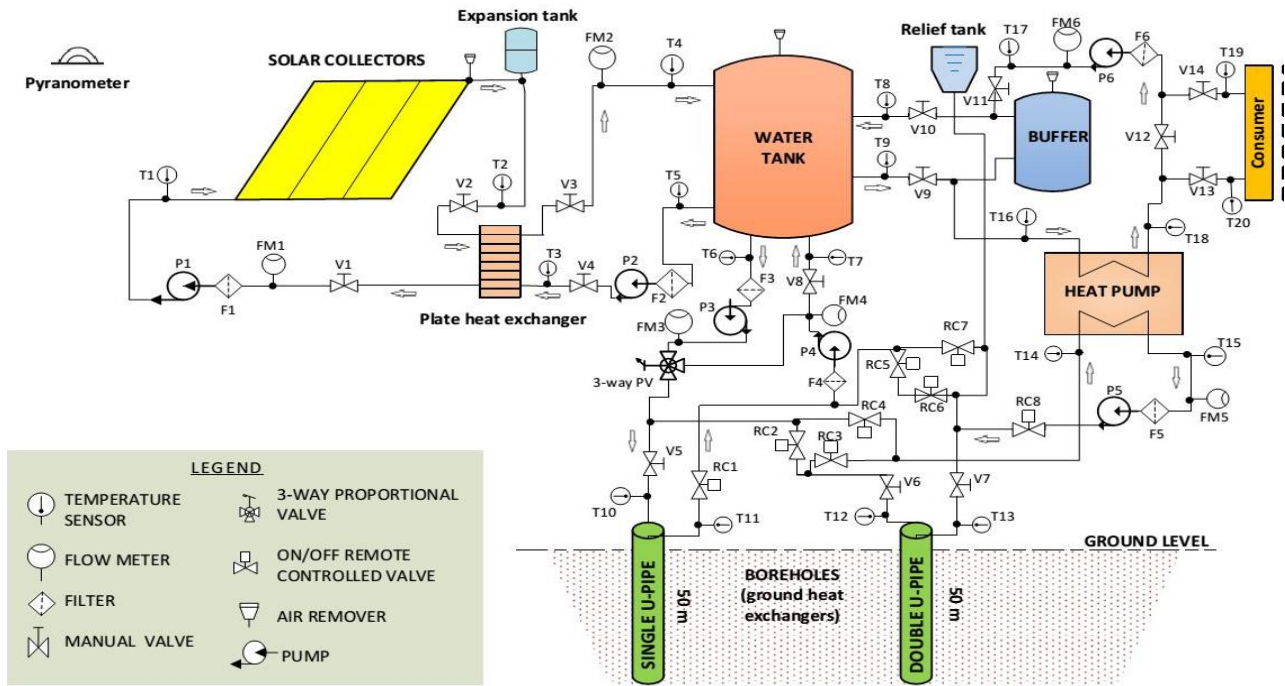


Fig.1 Main scheme of the hybrid installation [6]

- It consists of the following main parts:
- Two borehole heat exchangers (BHE) - 50m of depth and 165 mm in diameter each; they are of a single and double piping type;
 - Three flat plate solar collectors in parallel with 2,15 m² area each (“Sunsystem” Ltd, Bulgaria); they are equipped with a pump station P1 and expansion tank;
 - Brazed plate heat exchanger of the type GEA; it transfers the heat from the solar loop to the water storage tank;
 - Water storage stainless steel tank with a volume of 300 l - it is thermally insulated;
 - Heat pump water – water (production of “Maxa”, Italy); it is controlled by a microprocessor based device “Eliwell”, Italy;
 - Buffer vessel with thermal insulation – 150 l;
 - Convector of the air-water type – it is used like a heat consumer;
 - Water pumps: two DAB JET 82M centrifugal pumps with Active Driver 1.1 M P4 and P5; they are used to deliver flow to two boreholes;
 - Water pumps: two wet rotor circulating pumps DAB VA 35/130 P2 and P3: they are used to deliver the flow to the storage tank and boreholes;

- Water pump of the type DAB Evoplus P6 with electronic control for the consumer loop;
- Plastic relief tank with a volume of 10 l;
- Eight remote controlled 2-way valves Hertz TS 90 with thermal actuating drive 220V (RC1 – 8) are used to control the water flows in different modes during the system operation;
- 3-way mixing valves of the type VMBT4-Italy with proportional actuating drive MVT57; they are used to inject thermal energy from the water tank to the boreholes;
- Manually opened valves V1-V14;
- Piping – 32mm polypropylene tubes Aquatherm with thermal insulation “Aeroflex”.

3. Measuring system of the installation

A/ Sensors: they are needed to measure the operating parameters – temperatures, water flow rates, electric power, integral solar radiation, and to provide data to the data logger, which is necessary to calculate the energy transfer between the main elements of the hybrid system and effectiveness in the different working modes.

Temperature: the sensors are of the type 3-wire platinum resistors Pt100, class A in special copper closed tubes; they are fitted on every input and output of the constituent system parts T1-T20 (Fig.2). The sensors are mounted into

polypropylene T-diverter on a water flow – that assures precise measuring of the inlet and outlet temperatures.

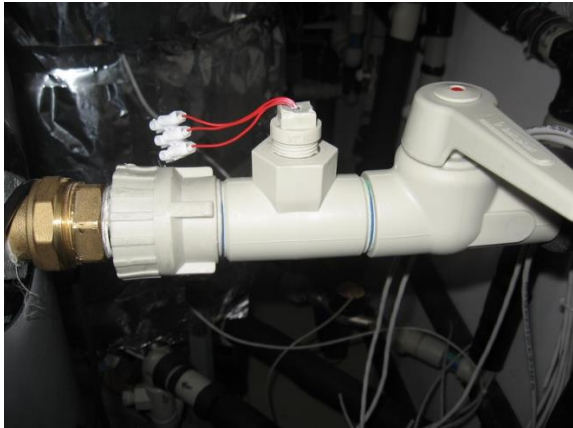


Fig.2 Temperature sensor Pt 100 in housing

Volumetric flow rate: six flow meters BEL90 FM1-FM6 are mounted on every circulating loop – the maximal flow rate is till 5 m³/h and the digital pulse output offers sensitivity of 10 l/pulse (Fig. 3).



Fig. 3 Digital flow meter BEL 90

Solar radiation: a pyranometer of the type Kipp & Zonen CMP 6 (Holland production) is mounted on the roof with the aim to measure the global solar radiation, which falls in the area of the thermal collectors (Fig.4). Its technical characteristics are as follows [6]:

- Spectral diapason – 285-2800 nm;
- Sensitivity – 12 μ V/W/m²;
- Response time – 18 s;
- Maximal radiation – 2000 W/m²;
- Visible field – 180⁰;
- Temperature diapason: -40 till +80°C.



Fig.4 Pyranometer CMP 6 [6]

Electric power: Wattmeter EL-EPM02FHQ is used to measure the electric consumption of the heat pump and the water pumps with accuracy of 0,5W and till 3,6 kW as a maximum load [7] (Fig. 5).



Fig.5 Wattmeter EL-EPM02FHQ [7]

B/ Measuring devices: they are used for the most important parameters – temperature and flow rate. The hybrid system is equipped with devices for parameter measuring and logging the obtained data on PC. It is produced by the company “Comeco”- Bulgaria [8].

Programmable Indicator TC800: it has the following characteristics:

- 8 inputs, 8 outputs and 16 alarms;
- 2 displays;
- Programmable ranges and alarms;
- Self-testing and system-failure alarm;

- RS485 serial interface available;
- 24 VAC power supply.

TC800 performs measuring and logging of temperature by means of Pt100 with digital compensation for RTD sensor line resistance and accuracy of 0,4 % from span. A rich set of parameters allows programming every aspect of controller operation and an RS485 serial interface allows network operation or connection to operator station. It is possible also to use some channels for voltage inputs – to measure the value of the solar radiation from the pyranometer (Fig.6).



Fig.6 Indicator TC800 [8]

Programmable Counter CT34: it has the following characteristics [8]:

- Pulse counting and batch counting;
- One or two 6-digit LED displays;
- Programmable divider and multiplier;
- 2 programmable relay outputs;
- RS485 serial interface available;
- 6 user-selectable operating modes;
- 24 VAC power supply.

With the help of this counter the volumetric flow rate of circulating water in different loops is measured and the data are logged on a PC (Fig.7).

All the measuring devices are coupled to a PC with an universal USB-to-Serial converter to log the data in the desired intervals of time 1-15 min.

An universal data acquisition program “Polymonitor” is used for logging data to a PC with RS485 interface.



Fig 7. Programmable Counter CT34 [8]

4. Working modes of the installation and the need to measure some parameters

The hybrid installation for heating and cooling of residential buildings can operate in 6 different modes depending on the seasonal conditions and needed load. That assures versatility and flexibility of the installation during the four seasons of the year with the aim of effective and low cost operation. The operating modes are as follows [5, 9]:

1. Solar energy diurnal storage – thermal energy (when present) is delivered to the water storage tank from the solar collectors.

2. Charging of the borehole storage – thermal energy (when present) is delivered during the summer to the boreholes from the solar collectors and the condenser of the heat pump.

3. Direct solar heating – a thermal energy from water tank is sent directly to the consumer.

4. Ground-source heat pump heating – the heat pump is working and the heat delivered to the evaporator of the heat pump come either from the single or double borehole heat exchanger.

5. Heating with solar assisted heat pump – the heat pump is operating and the heat sources are the solar collectors, respectively the water storage tank.

6. Ground source heat pump cooling – the boreholes are connected in this mode to the condenser of the heat pump.

There is the possibility to carry out two modes simultaneously - for example ground source heat pump cooling with the double BHE when charging the single one with solar energy. The main parameters that have to be measured during different operating modes are presented in Table 1.

Table 1. Measuring parameters during different operating modes

N=	Working mode	Pumps in operation	Temperatures to be controlled	Flow rate to be controlled	Solar radiation measuring
1	Solar energy diurnal storage	P1, P2	T1, T2, T3, T4	FM1, FM2	Yes
2	Charging of the borehole storage	P1, P2,P3, P4	T1, T2, T3, T4,T6, T7,T10,T11,T12,T13	FM1, FM2, FM3, FM4	Yes
3	Direct solar heating	P1, P2, P6	T1, T2, T3, T4, T8, T9, T19, T20	FM1, FM2, FM6	Yes
4	Ground-source heat pump heating	P5, P6	T8,T9,T10,T11,T12,T13,T14, T15,T16, T18, T19, T20	FM5, FM6	No
5	Heating with solar assisted heat pump	P1, P2, P4, P5	T1, T2, T3, T4, T6, T7, T8, T9, T14, T15,T16, T18, T19, T20	FM1, FM2, FM4, FM5	Yes
6	Ground source heat pump cooling	P5, P6	T8,T9,T10,T11,T12,T13,T14, T15,T16,T17, T18, T19, T20	FM5, FM6	No

The hybrid geothermal system can operate with either single or double loop borehole heat exchangers during heating and cooling modes. Also there is a choice which borehole to be used for charging of the thermal energy in the soil – the single or double one.

5. Conclusions

The main conclusions are the following:

A measuring system is equipped to a hybrid installation with ground source heat pump and solar collectors. It allows measuring the main operating parameters – temperatures, volumetric flow rates, electric power consumption and integral solar radiation. All the data can be logged on a PC in desired time intervals.

The installation can operate at different regimes with the aim to achieve optimal conditions for space heating and cooling during the measurement of the working parameters. Also the hybrid system has the possibility to store thermal energy to the boreholes and to the water tank and to use it in different operating modes.

Acknowledgments

This work has been supported financially by the:

- Research project 132ПД0022-24/28.03.2013 of the Technical University of Sofia;
- Research project N° BY-TH 212/06 “Design and construction of a mobile testing unit for performing in-situ determination (Thermal

Response Test, TRT) of geothermal properties of the ground (thermal conductivity and diffusivity) and implementation of some TRTs at different locations in Bulgaria involving monitoring and data analysis”. Bulgarian National Science Fund. 2006 – 2011.

References

1. **Xi C., Lin L., Hongxing Y.** Long term operation of a solar assisted ground coupled heat pump system for space heating and domestic hot water, *Energy and Buildings*: Vol.43, 2011, pp. 1835–1844.
2. **Kjellsson E., Hellstrom G., Perers B.** Optimization of systems with the combination of ground-source heat pump and solar collectors in dwellings. *Energy*: Vol. 35 (6), 2010, pp. 2667–2673.
3. **Wang E., Alan S. Fung A. S., Qi C., Leong W. H.** Build-up and long-term performance prediction of a hybrid solar ground source heat pump system for office building in cold climate. *Proc. of eSim 2012: The Canadian Conference on Building Simulation*.
4. **Trillat-Berdal V., Souyri B., Achard G.** Coupling of geothermal heat pumps with thermal solar collectors. *Applied Thermal Engineering*: Vol. 27, 2007, pp. 1750–1755.
5. **Toshkov E.** Build-up of hybrid installation with ground source heat pump and solar collectors, *сп. Топлотехника*, год. 4, кн. 2, 2013.

6. <http://www.kippzonen.com/Product/11/CMP-3-Pyranometer>

7. <http://ebookbrowse.net/gdoc.php?id=216049148&url=3c13c6e3643a643da37a4a34a6912674>

8. <http://comeco.bg/corp/cgc/katalog/start.htm>

9. **Popov, R., Georgiev, A.**, SCADA system for study of installation consisting of solar collectors, phase change materials and borehole storages, 2nd Int. Conference on Sustainable Energy Storage, June 19-21, Dublin, Ireland.

Department of Mechanics
Technical University–Sofia, Branch Plovdiv
25 Tsanko Dystabanov St. 4000 Plovdiv
BULGARIA
E-mail: emtoshkov@gmail.com
E-mail: ageorgiev@gmx.de
E-mail: rum_pop@yahoo.com



КАТОДНО ПЕТНО – ФИЗИЧНИ СВОЙСТВА, ЕКВИВАЛЕНТНА ПЛОЩ НА КАТОДНОТО ПЕТНО

НИКОЛАЙ ПЕТКОВ, ХРИСТО БАХЧЕДЖИЕВ, ТЕТЯНА ЧОЛАКОВА

Резюме: Моделирането на катодните процеси позволява разкриване на закономерности и параметри в зоната на катодния потенциал, включително тези, които все още е невъзможно да бъдат определени експериментално, като интензитета на полето, плътността на тока на електроните и йоните, и др. В тази статия се дискутира терминът "катодно петно", какво представлява, физичните му свойства и е дефинирана концепцията на термина "еквивалентна площ" на катодното петно.

Ключови думи: дъга във вакуум, катодно петно, площ на катодното петно

CATHODE SPOT - PHYSICAL PROPERTIES, EQUIVALENT CATHODE SPOT AREA

NIKOLAY PETKOV, HRISTO BACHCHEDZHIEV, TETIANA CHOLAKOVA

Abstract: The modeling of the cathode processes allows revealing of the regularities and the parameters in the cathode fall potential, including those that are still impossible to be determined experimentally as the intensity of the field, the current density of both electrons and ions, and etc. In this article is discussed the term "cathode spot", what is mean by it, its physical properties and is defined the concept of the term "equivalent area" of the cathode spot.

Key words: vacuum arc, cathode spot, cathode spot area

1. Introduction

Cathode erosion is still a problem hindering the wide-spread application of thermal plasmas in industry. In the last few years a strong interest in the numerical modeling of the cathode region of the thermal arc plasma has been aroused. It is motivated by the need to develop PVD plasma systems with a better performance.

The phenomenon of arc discharges was discovered at the beginning of the 19th century. However, serious efforts regarding their physical explanation and especially the modeling of electrode processes did not start until one century later [1].

The theory and conception of the cathode spot, as well as the cathode material erosion in a vacuum environment was widely discussed in the literature by Lee in 1951, 1960, 1961 [2, 3, 4], Ecker in 1963 [5], Hantysche in 1976 [6], Lyubimov in 1978 [7], Ivanov in 1985 [8], Nazarov in 1990 [9], Puchkarev in 1990 [10], Mitterauer in 1996 [11], Gayet in 1996 [12], Jüttner in 1997 [13], Anders in 1997 [14], Coulombe in 1997 [15, 16, 17] Anders in 2001 [18], Massaad in 2006 [19], Lefort in 2012 [20].

The modeling of the cathode processes allows revealing of the regularities and the parameters in the cathode fall potential, including those that are still impossible to be determined experimentally as

the intensity of the field, the current density of both electrons and ions, and etc [23].

In this article is discussed the term "cathode spot", what is meant by it, its physical properties and define the concept of the term "equivalent area" of the cathode spot.

2. Theory of Cathode Spot

The vacuum arc is a high current, low voltage electrical discharge between two electrodes situated in a vacuum ambient. The conducting medium which is required the arc supplies itself in the form of a highly ionized plasma of vaporized electrode material, produced by an intensive interaction of this plasma with the electrodes.

"Cathode spot" is generally associated with small brightly lit area of the cathode surface through which the transmission is performed on a current between the cathode and the electrode space in the arc discharge. The very term "cathode spot" uniting two physically different areas - the surface of metal, which can be heated in the spot area to a temperature much higher than the boiling point; and cathode plasma-sheath which is formed in the process of spot formation or continuously generated as a result of vaporization [7, 13]. Even the simple description of cathode spot and its intrinsic plasma parameters shows that it is a very particular physical object [7].

The difficulty in the experimental study of the cathode spot is associated with its very small size and very short lifetime, and its very high speed of moving on the cathode surface - up to 10 m/s. As a general rule, the cathode spots are non-stationary. They were born during the time of formation; change its size over lifetime and then moves. Any charge moving to area with cold surfaces mean the end of spot life and formation of a new spot, because heating and evaporation must restart again [13].

The mechanism of cathode spot operation is still enthusiastically debated, and two schools of thought have emerged. One characterizes the cathode spot process as a succession of explosions in adjacent locations, in which a small protrusion on the cathode surface is instantly vaporized and ionized. Each explosion produces conditions in adjacent locations conducive to triggering a further explosion. The other characterizes the cathode spot process as being quasistationary. The cathode surface in a minute region is heated by backflowing ions and electrons and Ohmic heating within the cathode but concentrated near the surface. The cathode spot surface is cooled by thermal conduction into the surrounding regions of the

cathode, radiation, evaporation, and electron emission. The electrons are emitted by some combination of thermionic and field emission (known as TF emission). The electrons are accelerated by a local electric field, colliding with the evaporated metal ions, exciting them, and ionizing them, forming a dense plasma. The electrons have a tendency to diffuse away from this concentrated plasma ball faster than the more massive ions, and thus a local positive space charge is formed within the dense plasma, which assists in the emission of electrons from the cathode and their acceleration as well as the acceleration of ions in all directions. However, the primary mechanism for accelerating the ions to the high velocities and directed energies observed experimentally is akin to the mechanism occurring in a jet engine; as the hot gas expands, there is a conversion of random or thermal energy to directed energy. In the case of the cathode spot plasma jet, as the plasma expands, it is further heated ohmically by the electrical current passing through it, thus providing further thermal energy which can be converted to directed energy [1, 24].

3. Spot size

For the cathode spot size is judging by the crater traces left behind of the arc burning in the cathode spot. The main crater diameter is 4 μm for arc current of 3 \div 10 A, and about 8 μm for arc current of 40 \div 70 A. The crater has a spherical segment shaped (but is not a semisphere), and its radius significantly exceeds its depth (approximately five times) [10]. The spot radius is determined by the size of the area at the heated surface [13].

The increase in track width of the crater compared to the main diameter of the crater can be explained by the cathode spot division and the coexistence of several spots. The crater diameter of single cathode spot weakly depends on the current [10].

4. Cathode spot moving and current density

Since the first observations of electric arc Stark and Reich have found quickly chaotic movement and division of "brightly lit area near to the cathode", named by Stark "cathode spot", later often have called cathode-sheet field discharge [7]. This concept has always been associated with a lower surface of the cathode, through which is passed the cathode current of the arc. Sometimes, it being considered only a part of the surface of the cathode, which is connected with certain laws of emission, erosion, accommodation the charged particles and etc. Thus it separated as a region of the

surface that is performed by the transmission of current from the metal to the plasma between the electrodes. But such a definition cannot be physically closed because physical processes passed on the surface of the cathode in the spot area are closely related to the processes in the plasma near to the surface, and its parameters. In this respect, the surface of the cathode in the spot area and the plasma near to it are inseparable physically and generally naturally be regarded as one physical object - a cathode spot [7].

The moving of the cathode spot represents dying of the spot on one place and forming of new spot elsewhere over cathode. It is important to answer the question of what happens first: both dying of cathode spot is followed by a jump (forming spot elsewhere on the surface) or jump is occurred prior conditions for the death of a cathode spot area [10]. The cleavage of the cathode spot starts randomly which evidence to the second condition. When splitting does not take place the crater became larger. It appears that in this case the jump is a result of the death of the cathode spot, and is accompanied by an increase in the voltage of the arc, the amplitude of which substantially exceeds the average level of the arc voltage. Cathode spot moves with step approximately equal to its radius. There are different explanations for the jump of the cathode spot. With Joule heating and heat running of the voltage drop in the cathode body increase until a new emission center is appeared on the crater edge [10].

The spot movement or its displacement is the stage of its life cycle, as in the absence of a magnetic field it is chaotic. Provided that there is applied a magnetic field, the movement of the cathode spot is oriented in the $-J \times B$ direction [24], where J is the current density and B is the vector of magnetic induction. The speed of the cathode spot movement on the hot and cold cathodes is equal and depends only on the current amplitude [10].

In the current close to a certain minimum value called threshold, the whole current power is concentrated in one spot. With the current increasing is observed growing trend towards division spot. Moreover, since some current value the probability to exist two or more spots leads asymptotically to one [7].

The current at the cathode spot significantly depends on the cathode material, the type of the cathode spot, the rate of the current increase, the discharge burning conditions, and etc. This is related to the fact that the physical processes determining the forming or dying of the spots are different in these conditions.

The presence of the electric arc burning in a vacuum environment, or the existence of the electric arc, means that the processes of forming, growing and dying of the cathode spots is continuously, i.e. invariable during the of the arc. Because the processes time of forming, growth and dying of the cathode spots are much shorter than the lifetime of the arc (per unit time we have a steady stream of the generated sheath-plasma during the existence of the arc), this allows us to assume that the area in which is realize the current transfers between the cathode and an electrode space in arc discharge, at the constant arc current, is constant value and we call it "equivalent area of the cathode spot".

5. Conclusions

In this article is discussed the term "cathode spot", what is mean by it, its physical properties and is defined the concept of the term "equivalent area" of the cathode spot. They are the foundation of the explanation of the processes of the cathode surface during burning of the electric arc. Their good knowledge allows their modeling and simulation, as well as revealing of the regularities and the parameters in the cathode fall potential, including those that are still impossible to be determined experimentally.

References

1. **Boxman R.L., D.M. Sanders, Ph.J. Martin, J. M. Lafferty**, "Handbook of vacuum arc science and technology", Noyes Publications, (1995)
2. **Lee T.H.**, "T-F Theory of Electron Emission in High Current Arcs", *J. Appl. Phys.*, Vol. 30, pp. 166 – 171 (1959)
3. **Lee T.H.**, "Energy Distribution and Cooling Effect of Electrons Emitted from Arc Cathode", *J. Appl. Phys.*, Vol. 31, pp. 924 – 927 (1960)
4. **Lee T.H., A. Greenwood**, "Theory for the Cathode Mechanism in Metal Vapor Arcs", *J. Appl. Phys.*, Vol. 32, pp. 916 – 923 (1961)
5. **Ecker G., W. Kröll**, "Lowering of the Ionization Energy for a Plasma in Thermodynamic Equilibrium", *The Physics of Fluids*, Vol. 6, pp. 62 – 69 (1963)
6. **Hantzsche E., B. Jüttner, V.F. Pushkarov, W. Rohrbeck, H. Wolff**, "Erosion of metallic cathodes by arcs and breakdowns in vacuum", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 9, pp. 1771 -1781 (1976)
7. **Lyubimov G.A., V.I. Rahovskij**, "Cathode spot in vacuum arc", *Uspehi fizicheskikh nauk (Advances in Physical Sciences)*, Vol., 125, pp. 665 – 706 (1978) – in Russian.

- 8. Ivanov V.A., B. Juttner, H. Pursch**, “Time-Resolved Measurements of the Parameters of Arc Cathode Plasmas in Vacuum”, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. PS-13. No. 5. Pp. 334 – 336 (1985)
- 9. Nazarov S.N., V.I. Rakhovsky, V. G. Zhurbenko**, “Voltage Drop Over a Vacuum Arc and the Cathode-Spot Brightness”, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 18, pp. 682 – 684 (1990)
- 10. Puchkarev V.F., A.M. Murzakayev**, “Current density and the cathode spot lifetime in a vacuum arc at threshold currents”, J. Phys. D: Appl. 23, pp. 26 – 35 (1990)
- 11. Mitterauer J.**, “Field emission from thin liquid metal metal films”, Applied Surface Science 94/95, pp. 161 – 170 (1996)
- 12. Gayet R., C. Harel, T. Josso, H. Jouin**, “A simple model for cathode electronic emission enhanced by low-energy ions in high-pressure arcs”, J. Phys. D: Appl. Phys. 29, pp. 3063 – 3070 (1996)
- 13. Jüttner B.**, “Properties of Arc Cathode Spots”, J. Phys IV France 7, Colloque C4, Supplement au Journal de Physique III d’octobre 1997, pp. 31 – 45 (1997)
- 14. Anders A.**, “Ion charge state distribution of vacuum arc plasma: The origin of species”, Physical Review E, Vol. 55, pp. 969 – 981 (1997)
- 15. Coulombe S., J-L Meunier**, “Arc-cold cathode interactions: parametric dependence on local pressure”, Plasma Sources Sci. Technol. 6, pp. 508 – 517 (1997)
- 16. Coulombe S., J-L Meunier**, “Importance of High Local Cathode Spot Pressure on the Attachment of Thermal Arcs on Cold Cathodes”, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 25, No. 5, pp. 913 – 918 (1997)
- 17. Coulombe S.**, “A Model of the Electric Arc Attachment on Non-refractory (Cold) Cathodes”, Ph.D. Thesis, McGill University, Montreal, Canada (1997)
- 18. Anders A.**, “Atomic scale heating in the cathodic arc plasma deposition”, Applied Physics Letters Manuscript Code # L01-3420, LBNL-48989, (2001)
- 19. Messaad M., A.W. Belarbi, A. Lefort, M. Abbaoui**, “Model for a low current vacuum arc cathode region. Effect of the electronic temperature”, Acta Electrotechnica et Informatica, No. 3, Vol. 6, pp. 1 – 8 (2006)
- 20. Lefort A., M Abbaoui**, “Theory about cathode arc root: a review”, ISAPA, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 29 (2012)
- 21. Bochkarev M., A. Murzakaev**, “Investigation of vacuum arc cathode spots with high temporal and spatial resolution”, Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Proceedings ISDEIV XVIIIth International Symposium on (Vol. 1), pp. 244 – 251(1998)
- 22. Stepanov A, Yu Sotokina**, "Discrete structure of the cathode spot and the conductive channel of electric arc", Journal of Science of Siberia, Vol. 2 (3), pp. 128 – 134 (2012) – in Russian
- 23. Kulyapin V., I. Aslyamov**, "Cathode processes of electrical discharges", Vestnik UGATU, V. 13, № 1 (34), pp. 180 – 186, (2009) – in Russian
- 24. Boxman R.L., V.N. Zhitomirsky**, “Vacuum arc deposition devices”, Review of Scientific Instruments, 77, 021101 (2006)

Central Laboratory of Applied Physics
Bulgarian Academy of Sciences
61, Sankt Petersburg Blvd.
4000 Plovdiv
BULGARIA
E-mail: petkovnik@gmail.com
E-mail: hristo_bah@abv.bg
E-mail: ipfbn-dve@mbox.digsys.bg



МАТЕМАТИЧЕСКИ МОДЕЛ НА ЕЛЕКТРОДЪГОВО КАТОДНО ИЗПАРЕНИЕ ВЪВ ВАКУУМ

НИКОЛАЙ ПЕТКОВ, ХРИСТО БАХЧЕДЖИЕВ, ТЕТЯНА ЧОЛАКОВА

Резюме: В тази статия е представен математически модел и изчислителен алгоритъм, даващи връзката между тока на дъгата и изпаряваното количество материал на катод - ерозия на катода в PVD плазмени системи. За да се илюстрира модел е използван пример с електродъгово изпаряване на титанов катод във вакуум. За определяне на изпареното количество материал се използва информацията от експлоатацията на масивен титан катод. Експерименталното изчисление на ерозията на катодната повърхност бе направена използвайки свръх чиста титанова мишена и ток на дъгата от 70А. Моделът е подходящ за процеса на изпаряване във вакуум на масивни катода чрез постояннотокава дъга.

Ключови думи: дъга във вакуум, катодно петно, PVD

MATHEMATICAL MODEL OF THE ELECTRIC ARC CATHODE EVAPORATION IN VACUUM

NIKOLAY PETKOV, HRISTO BACHCHEDZHIEV, TETIANA CHOLAKOVA

Abstract: In this paper is presented a mathematical model and calculation algorithm which gives the relationship between arc current and the evaporated quantity of cathode material - erosion of the cathode in PVD plasma systems. To illustrate the model is used an example of arc evaporation in vacuum of titanium massive cathode. To determination the value of the evaporated quantity of material the information from exploitation of massive titanium cathode is used. The experimental calculation of cathode surface erosion was executed using high purity titanium target and 70A arc current value. The model is suitable for the vacuum evaporation process of the massive metal cathodes with DC arc current.

Key words: vacuum arc, cathode spot, PVD

1. Introduction

Cathode erosion is still a problem hindering the wide-spread application of thermal plasmas in industry. In this case, in the past years a strong interest to numerical modeling of the cathode region of thermal arc plasma is aroused. It is motivated by the need to develop PVD plasma systems with better performances such as a lower cathode erosion rate. Nowadays, the erosion problem in cathodes

continues to be a basic question which has been intensively investigated in recent years.

Cathode erosion has been theoretically studied by various researchers using models based on the balance of energy flux and charged particles between the spot and the near-cathode region.

The topic of arc discharges has been discovered at the beginning of the 19th century, serious efforts regarding their physical explanation and especially the modeling of electrode processes did not start

until one century later [1]. One of the earliest investigations of this area are the works of Langmuir [2, 3], Tonks and Langmuir [4], Makeown [5]. As Riemann reported in [6] the basic features of the plasma-sheath transition have been revealed in the works of Langmuir [3] – especially in the famous kinetic analysis of the low-pressure column due to Tonks and Langmuir [4]. Years later Dolan and Dyke [7] and Murphy [8] presented their works “Temperature and field emission of electrons from metal” and “Thermionic emission, field emission, and the transition region”, following by Lee with his works over T-F theory of electron emission in high current arcs [9], energy distribution and cooling effect of electrons emitted from an arc cathode [10], and theory of the cathode mechanism in meal vapor arcs [11], which has been turned in a base for the later works over understanding and modeling the cathode arc processes.

The theory and conception of the cathode spot, as the cathode material erosion in vacuum is wide discussed in literature by Lee in 1951, 1960, 1961 [9, 10,11], Ecker_1963 [12], Hantysche in 1976 [13], Lyubimov in 1978 [14], Ivanov in 1985 [15], Nazarov in 1990 [16], Puchkarev in 1990 [17], Mitterauer in 1996 [18], Gayet in 1996 [19], Jüttner in 1997 [20], Anders in 1997 [21], Coulombe in 1997 [22, 23, 24] Anders in 2001 [25], Massaad in 2006 [26], Lefort in 2012 [27].

As is reported by Kimblin in 1973 [28] the maximum ion current is in range of 7 – 10% of the arc current for the both refractory and non-refractory electrodes with DC arc current level. Furthermore, the maximum ion current increases essentially linearly with the arc current. He made his experiments with wide number of elements (Cd, Zn, Ag, Cu, Cr, Fe, Ti, C, Mo, and W) and in arc current range of 50 – 1000 A. A year later in [29] Kimblin reported that the maximum ion current from the cathode regions had a value of approximately 8% of the arc current. This led to the conclusion that ion currents of approximately 8% of the arc current are emitted from the cathode regions associated with arc spots on the cathode materials in general.

As a Coulombe is reported in [23] that a net positive space charge sheath, or cathode sheath, of voltage drop V_c is formed at the plasma-cathode boundary due to the presence, in different amounts, of three charge carriers [6]: 1) the ion generated by ionization of the atoms vaporized at the cathode spot surface, accelerated back toward the cathode; 2) the Boltzmann distributed plasma electrons retro-diffusing toward the cathode; and 3) the thermo-field electrons emitted by the cathode spot surface.

Some authors as Boxman [1], Coulombe [22, 23, 24], Massaad [26] and Lefort [27] have suggested the models of the processes near to the cathode surface which are based on the knowledge the temperature of cathode spot and electrons, the material vapor pressure (some of the earlier works about material vapor pressure are Langmuir’s [30, 31]). Their models are quite good to understanding the processes around the electric arc and the cathode spot region, but in these cases making the mathematical modeling and simulation require additional information (the temperature of cathode spot and electrons, the material vapor pressure) to predict the cathode erosion.

In this paper is presented a mathematical model and calculation algorithm which gives the relationship between arc current, as the only one parameter that is possible to be changed in the evaporation process, and the evaporated quantity of the cathode material. The model is suitable for the vacuum evaporation process of the massive cathode with DC arc current for all metals.

2. Cathode surface

The main processes which occur at the cathode surface are emission of electrons and neutral species. When both temperature and field are high, the emission process is strongly dependent on both variables, it has been named “T-F” emission by Dolan and Dyke [7, 9]. The electron emitted current density from the heated metal surface to the temperature T_s by the T-F emission may be express with the Richardson-Dushman equation for the thermionic emission once corrected for the Schottky effect is [1, 24, 32]:

$$J_{TF} = \frac{4\pi e m_e k^2 T_s^2}{h^3} \exp\left(-\frac{e\phi_{eff}}{kT_s}\right) \quad (1)$$

$$\phi_{eff} = \phi - \sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon_0}} \quad (2)$$

where: m_e and e are the mass and charge of the electron, k and h are the Boltzmann and Planck constants, ϕ_{eff} and ϕ are the effective work function and the work function of the cathode material, ϵ_0 is the permittivity of vacuum, and E is the electric field near to the cathode surface.

The total current density J_T on the cathode surface is composed of three parts [1]:

$$J_T = J_i + J_e + J_{e,p} \quad (3)$$

where the electron current density J_e is given mainly by J_{TF} , while $J_{e,p}$ is the electron current density from the plasma to the cathode, and J_i is the ion current density arriving at the cathode surface.

The influence of the $J_{e,p}$ can be neglected and for the current density is obtained:

$$J_T = J_i + J_e \quad (4)$$

From other hand the total current density can be calculated as a ratio between the arc current I_a and cathode spot area $S_{cs} = \pi r_{cs}^2$, where r_{cs} is the cathode spot radius [1, 26].

$$J_T = \frac{I_a}{S_{cs}} \quad (5)$$

The electric field at the cathode E is calculated by Mackeown's equation [5, 9, 11]:

$$E^2 = \frac{4}{\epsilon_0} J_T \left[(1-s) \left(\frac{M}{2e} \right)^{1/2} - s \left(\frac{m_e}{2e} \right)^{1/2} \right] (V_c)^{1/2} \quad (6)$$

where: M is the ion mass, V_c is the cathode fall, s is the fraction of current carried by electrons in the cathode spot region; $J_T(1-s)$ is equal to the ion current density J_i and $J_T s$ is equal to the electron current density, and equation Eq.(6) can be written as:

$$E^2 = \frac{4}{\epsilon_0} \left[J_i \left(\frac{M}{2e} \right)^{1/2} - J_e \left(\frac{m_e}{2e} \right)^{1/2} \right] (V_c)^{1/2} \quad (7)$$

The power density of heat conduction in the cathode body S_T can be estimated as [26]:

$$S_T = \frac{T_s - T_0}{r_{cs}} K_T \sqrt{\pi} \quad (8)$$

where: T_s is the cathode spot temperature, $T_0 = 300 K$ is the ambient temperature far from the cathode spot, r_{cs} is the cathode spot radius, K_T is the thermal conductivity of the cathode material.

The Joule heating power density in a massive cathode is calculated following the method of Rich [33] reduced to the cathode spot area:

$$S_J = 0,32 \frac{r_{cs} J_T^2}{\sigma_{el}} \quad (9)$$

where σ_{el} is the electrical conductivity of the cathode material.

The energy balance at the cathode surface is expressed as is suggested Boxman [1]:

$$\frac{1}{e} J_i (eV_c + V_i - \phi_{eff}) - \frac{1}{e} J_e \phi_{eff} + \frac{2kT_e J_{e,p}}{e} - \left(W_{ev} + \frac{2kT_s}{m_n} \right) \Gamma_T m_n - \sigma_{sb} T_s^4 + S_r + S_J - S_T = 0 \quad (10)$$

where V_i is the ionization potential, S_r is the radiation from the plasma, W_{ev} is the energy of evaporation (J/kg), and σ_{sb} is the Stefan-Boltzmann constant. The first term of the Eq. (10) expresses ion impact heating. The second term expresses electron emission cooling. The third term expresses

heating from the back-flux of plasma electrons. The fourth term expresses evaporative cooling. The fifth term expresses radiative cooling from the cathode surface. The plasma radiation is given with sixth term. The Joule heating term is the seventh, and the eighth term expresses the conductive cooling. The third and the sixth term have an insignificant influence in the equation, so they can be neglected. In this case the balance expression can be written as:

$$\frac{1}{e} J_i (eV_c + V_i - \phi_{eff}) - \frac{1}{e} J_e \phi_{eff} - \left(W_{ev} + \frac{2kT_s}{m_n} \right) \Gamma_T m_n - \sigma_{sb} T_s^4 + S_J - S_T = 0 \quad (11)$$

3. Algorithm

The presented mathematical model of arc evaporation in vacuum gives the relationship between arc current, which is the only one parameter that is possible to be changed in the evaporation process and the evaporated quantity material. The calculation algorithm has the follow steps:

1. Chosen value of the arc current;
2. Determination the cathode spot radius;
3. Calculation the total current density;
4. Calculation the ion and electron current density;
5. Calculation the electric field value;
6. Calculation the effective work function of the cathode material;
7. Calculation the cathode spot temperature;
8. Calculation the Joule heating;
9. Calculation the conductive cooling;
10. Calculation the evaporated quantity material.

4. Calculation

For calculation the evaporated quantity of cathode material we have chosen arc evaporation of the titanium cathode with 70A arc current.

The cathode spot radius r_{cs} is determined according the value of the arc current by the extrapolation of the fig. 12 from [17], and for the chosen arc current the cathode spot radius is $r_{cs} = 4,6125 * 10^{-6} m$.

The total current density is calculated by the Eq.(5) and it is $J_T = 1,047 * 10^{12} Am^{-2}$.

The ion current density and ion current for different metals is between 7% and 10% from the total current density and the arc current as it Kimblin is

shown in [28, 29] and for the titanium it is 8% [29]. Therefore the ion current density is $J_i = 8,378 * 10^{10} Am^{-2}$, and using the Eq.(4) for the electron current density is received $J_e = 9,635 * 10^{11} Am^{-2}$.

The electric field value is calculated by the Eq. (7) where mass of the titanium ion is $M = 8,0123 * 10^{-26} kg$, the electron mass is $m_e = 9,1093898 * 10^{-31} kg$, the electron charge is $e = 1,60217733 * 10^{-19} C$, the permittivity of vacuum is $\epsilon_0 = 8,8541878176 * 10^{-12} C^2/Jm$, and the cathode fall for the titanium cathode is $V_c = 16,8 V$ is taken from [14]. Therefore for the electric field value is computed: $E = 8,635 * 10^9 Vm^{-1}$.

The effective work function of the cathode material $\phi_{eff} = 0,8037 eV$ is calculated by Eq.(2) where the value of work function of the titanium is $\phi = 4,33 eV$, taken from [34].

The cathode spot temperature for the chosen example is calculated graphically by the Eq.(1) and its value is $T_s = 3454,1 K$.

The Joule heating is calculated by Eq.(9): $S_j = 6,8 * 10^{11} Wm^{-2}$.

The conductive cooling $S_T = 2,654 * 10^{10} Wm^{-2}$ is calculated by Eq.(8) where the thermal conductivity of the titanium is $K_T = 93,7 Wm^{-1}K^{-1}$, taken from [35].

The evaporated quantity of material (the total heavy particle flux [1]) $\Gamma_T = 2,236 * 10^{30} atoms/sm^2$ is calculated by Eq.(11), where the value of the ionization potential $V_i = 6,83 eV$ is taken from [21]. The obtained result for Γ_T is the all evaporated heavy particles from the cathode – those which are returned to the cathode and those that left the cathode surface.

For determination the value of the evaporated quantity of material the information from exploitation of massive titanium cathode is used. The calculation of cathode surface erosion was executed using high purity titanium target. Prior to arching the target was cleaned by degreasing solvents in ultrasonic bath, heating in a reducing atmosphere and degassed in a high vacuum environment. The cleaning and degassing process ensured a minimum contamination on the surface. The exploitation parameters are the cathode life time or working time in 22 hours and 45 minutes (81 900 s), and arc current 70 A as it was calculated the evaporated material matter with 0,2425 kg mass.

For the evaporated quantity of material is obtained the value of $5,529 * 10^{29} atoms/sm^2$, which

means that about 25% from the calculated evaporated quantity of the material leaves the cathode, i.e. $5,591 * 10^{29} atoms/sm^2$ for chosen case – titanium cathode and 70A arc current.

The presented mathematical model for the arc cathode evaporation is used to be found the relationship between arc current and evaporated quantity matter which leaves the cathode – erosion of the cathode. The result, the evaporation quantity velocity of the titanium cathode in kilograms per second for amperes is shown in fig. 1.

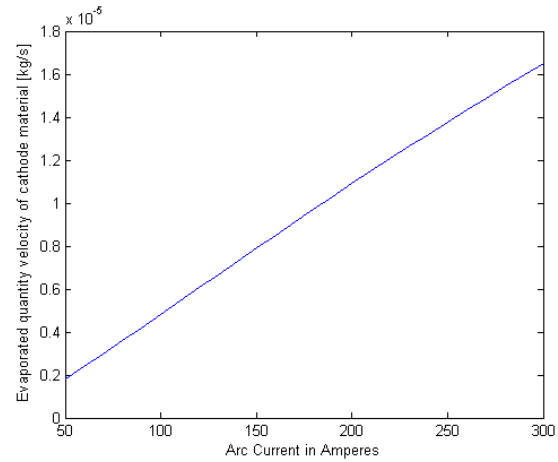


Fig. 1. The relationship between arc current and velocity of the evaporated quantity matter which leaves the titanium cathode.

4. Conclusions

The presented in this paper mathematical model is based on the physics of metals evaporation process by electric arc in vacuum and some empirical dependencies obtained by different authors.

The model gives the relationship between the arc current and the evaporated quantity of the cathode material as is not necessary additional preliminary information as a cathode spot temperature and/or vapor pressure of the cathode material. This information is necessary to be known if the mathematical models presented in literature [1, 24, 27] are used.

The developed model is applicable to all massive metal cathodes evaporated by electric arc in vacuum.

References

- R.L. Boxman, D.M. Sanders, Ph.J. Martin, J. M. Lafferty**, "Handbook of vacuum arc science and technology", Noyes Publications, (1995)
- I. Laugmuir**, "Scattering of electrons in ionized gases", Physical Review, Vol. 22, pp. 585 – 613 (1925)

3. **I. Laugmuir**, "The interaction of electron and positive ion space charges in cathode sheaths", *Physical Review*, Vol. 13, pp. 954 – 989 (1929)
4. **L. Tonks, I. Laugmuir**, "A general theory of the plasma of an arc", *Physical Review*, Vol. 34, pp. 876 – 922 (1929)
5. **S.S. Mackeown**, "The cathode drop in an electric arc", *Physical Review*, Vol. 34, pp. 611 – 614 (1929)
6. **K-U Riemann**, "The Bohm criterion and Sheath formation – Review", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 24, pp. 493 – 518 (1991)
7. **W.W. Dolan, W.P. Dyke**, "Temperature-and-Field Emission of Electrons from Metals", *Physical Review*, Vol. 95, pp. 327 – 332 (1954)
8. **E.L. Murphy, R.H. Good, Jr.**, "Thermionic Emission, Field Emission and the Transition Region", *Physical Review*, Vol. 102, pp. 1464 – 1473 (1956)
9. **T.H. Lee**, "T-F Theory of Electron Emission in High Current Arcs", *J. Appl. Phys.*, Vol. 30, pp. 166 – 171 (1959)
10. **T.H. Lee**, "Energy Distribution and Cooling Effect of Electrons Emitted from Arc Cathode", *J. Appl. Phys.*, Vol. 31, pp. 924 – 927 (1960)
11. **T.H. Lee, A. Greenwood**, "Theory for the Cathode Mechanism in Metal Vapor Arcs", *J. Appl. Phys.*, Vol. 32, pp. 916 – 923 (1961)
12. **G. Ecker, W. Kröll**, "Lowering of the Ionization Energy for a Plasma in Thermodynamic Equilibrium", *The Physics of Fluids*, Vol. 6, pp. 62 – 69 (1963)
13. **E. Hantzsche, B. Jüttner, V.F. Pushkarov, W. Rohrbeck, H. Wolff**, "Erosion of metallic cathodes by arcs and breakdowns in vacuum", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 9, pp. 1771 -1781 (1976)
14. **G.A. Lyubimov, V.I. Rahovskij**, "Cathode spot in vacuum arc", *Uspehi fizicheskikh nauk (Advances in Physical Sciences)*, Vol., 125, pp. 665 – 706 (1978) – in Russian.
15. **V.A. Ivanov, B. Juttner, H. Pursch**, "Time-Resolved Measurements of the Parameters of Arc Cathode Plasmas in Vacuum", *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. PS-13. No. 5. Pp. 334 – 336 (1985)
16. **S.N. Nazarov, V.I. Rakhovsky, V. G. Zhurbenko**, "Voltage Drop Over a Vacuum Arc and the Cathode-Spot Brightness", *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 18, pp. 682 – 684 (1990)
17. **V.F. Puchkarev, A.M. Murzakayev**, "Current density and the cathode spot lifetime in a vacuum arc at threshold currents", *J. Phys. D: Appl.* 23, pp. 26 – 35 (1990)
18. **J. Mitterauer**, "Field emission from thin liquid metal metal films", *Applied Surface Science* 94/95, pp. 161 – 170 (1996)
19. **R. Gayet, C. Harel, T. Josso, H. Jouin**, "A simple model for cathode electronic emission enhanced by low-energy ions in high-pressure arcs", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 29, pp. 3063 – 3070 (1996)
20. **B. Jüttner**, "Properties of Arc Cathode Spots", *J. Phys IV France* 7, Colloque C4, Supplement au Journal de Physique III d'octobre 1997, pp. 31 – 45 (1997)
21. **A. Anders**, "Ion charge state distribution of vacuum arc plasma: The origin of species", *Physical Review E*, Vol. 55, pp. 969 – 981 (1997)
22. **S. Coulombe, J-L Meunier**, "Arc-cold cathode interactions: parametric dependence on local pressure", *Plasma Sources Sci. Technol.* 6, pp. 508 – 517 (1997)
23. **S. Coulombe, J-L Meunier**, "Importance of High Local Cathode Spot Pressure on the Attachment of Thermal Arcs on Cold Cathodes", *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 25, No. 5, pp. 913 – 918 (1997)
24. **S. Coulombe**, "A Model of the Electric Arc Attachment on Non-refractory (Cold) Cathodes", Ph.D. Thesis, McGill University, Montreal, Canada (1997)
25. **A. Anders**, "Atomic scale heating in the cathodic arc plasma deposition", *Applied Physics Letters Manuscript Code # L01-3420, LBNL-48989*, (2001)
26. **M. Messaad, A.W. Belarbi, A. Lefort, M. Abbaoui**, "Model for a low current vacuum arc cathode region. Effect of the electronic temperature", *Acta Electrotechnica et Informatica*, No. 3, Vol. 6, pp. 1 – 8 (2006)
27. **A. Lefort, M Abbaoui**, "Theory about cathode arc root: a review", *ISAPA, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 29 (2012)
28. **C.W. Kimblin**, "Erosion and ionization in the cathode spot regions of vacuum arcs", *J. Appl. Phys.*, Vol. 77, pp. 3074 – 3081 (1973)
29. **C.W. Kimblin**, "Cathode spot erosion and ionization phenomena in the transition from vacuum to atmospheric pressure arcs", *J. Appl. Phys.*, Vol. 45, pp. 5235 – 5244 (1974)

30. I. Laugmuir, “The vapor pressure of metallic tungsten”, Physical Review, Vol. II, pp. 329 – 342 (1913)

31. I. Laugmuir, “The vapor pressure of the metals platinum and molybdenum”, Physical Review, Vol. IV, pp. 377 – 386 (1914)

32. J. Paulini, T. Klein, G. Simon, “Thermo-field emission and the Nottingham effect”, J. Phys. D: Appl. 26, pp. 1310 – 1315 (1993)

33. J.A. Rich, “Resistance Heating in the Arc Cathode Spot Zone”, Journal of Applied Physics, Vol. 32, pp. 1023 – 1031 (1961)

34. D.R. Lide, “CRC Handbook of Chemistry and Physics”, 89th edition, p. 12 – 114 (2008)

35. C.Y. Ho, R.W. Powell, P.E. Liley, “Thermal Conductivity of the Elements”, J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 1, No.2, pp. 279 – 421 (1972)

Central Laboratory of Applied Physics
Bulgarian Academy of Sciences
61, Sankt Petersburg Blvd.
4000 Plovdiv
BULGARIA

E-mail: petkovnik@gmail.com

E-mail: hristo_bah@abv.bg

E-mail: ipfbn-dve@mbox.digsys.bg



МАТЕМАТИКО СТАТИСТИЧЕСКО МОДЕЛИРАНЕ ПО ЦВЕТОВИ ПАРАМЕТРИ НА НЕТРАДИЦИОННИ МАСЛА ОТ СЕМЕ НА ПЪПЕШ И ТИКВА

ЖАНА ПЕТКОВА, КРЪСТЕНА НИКОЛОВА, ДОЙЧИН БОЯДЖИЕВ,
АННА АЛАДЖАДЖИЯН, ГИНКА АНТОВА

Резюме: Чрез прилагане на математико- статистически анализ на масла от семена на различни сортове тиква и пъпеш е доказано различие в цветовите параметри и съдържанието на пигменти като хлорофил и β - каротен. Оценена е значимостта на отделните показатели при моделирането на групите от масла. Чрез приложение на дискриминантен анализ са обработени данни за масла, получени от семена на различни сортове тиква и пъпеш, с оглед да се проучи възможността за приложение на математико-статистическо моделиране на отделни сортове с различен произход

Ключови думи: масла от семе на пъпеш и тиква, дискриминантен анализ, махаланобисови разстояния

MATHEMATICO - STATISTICAL ANALYSIS OF SEED OILS FROM MELON AND PUMPKIN BY USING COLOR PARAMETERS

JANA PETKOVA, KRASTENA NIKOLOVA, DOYCHIN BOYADZHIEV,
ANNA ALADJADJIYAN, GINKA ANTOVA

Abstract: Difference in color parameters and in the content of pigments chlorophyll and beta carotene for different sorts, melon- and- pumpkin seed oils, has been proved by applying mathematico- statistical analysis. The significance of the different indicators for modeling the oils groups has been estimated. Data on different sorts of melon and pumpkin fruit oils have been processed by applying discriminant analysis to study the possibility to create discriminatory procedures for modeling the various sorts and their origin.

Key words: seed oils of melon and pumpkin, color parameters, discriminant analysis mathematic statistical analysis

1. Introduction

The study aims to analyze a database of color parameters of seeds oils obtained from of different varieties of pumpkin and melon grown in Bulgaria, and to explore the possibility of application of mathematical and statistical modeling to different varieties of different origin.

To achieve this objective the following tasks have been formulated:

- Obtaining and analyzing a database of colorimetric analysis of seed oils of different varieties of pumpkin and melon.
- Establishing significant differences in the values of investigated indicators

- Modeling and analysis of the groups representing different varieties.

2. Materials and methods

Seed oils from three pumpkin varieties (*Cucurbita moschata*, *Cucurbita pepo* and *Cucurbita maxima*) and three melon varieties (Desserten 5, Medena rossa and Hybrid 1) have been investigated. Seed oil for investigation has been obtained through extraction with organic solvent (hexane) in Soxhlet extractor for 8 hours and subsequently removing of the solvent in a rotary evaporator under nitrogen atmosphere [1].

Color parameters in two different colorimetric systems - XYZ (for large color differences) and CIE Lab (for small ones) have been obtained using colorimeter Lovibond PFX 880 (UK) and cuvette with length 10 mm [2]. All measurements have been carried out at room temperature immediately after oil extraction. Color coordinates, color parameters a, b and brightness L of tested samples have been measured. A software program developed specially for the equipment allowed determination of chlorophyll and β -carotene.

All results have been measured in five replicates of the experiments.

Programme “Statistica” has been used for data processing. Data distribution has been found to be normal according to the criterion of Kolmogorov - Smirnov [3-4]. To establish statistically significant differences between the characteristics for studied varieties Tukey criterion for multiple comparisons was applied [5]. When modeling the groups per varieties discriminant analysis with a priori equal probabilities for hit in groups has been used [6-7]. Data about Mahalanobis distances have been obtained.

3. Results

Color parameters of investigated seed-oils from different melon and pumpkin varieties have been obtained. Data are presented in tables 1 and 2. Fisher’s test significance is 0,00.

Unlike the other pumpkin seed oil varieties, the one for variety *Cucurbita maxima* possesses negative color component a. This color parameter means that the green component predominates over the red in that sample, although none of pumpkin seed oil contains chlorophyll. Mentioned variety probably is reach on pigments, different from chloropyll. Similar observation for the same variety has been announced by Leila Rezig [8], who has obtained rather lower values for brightness (44.8) of seed oil of the same variety pumpkin grown in Tanzania.

Table 1

Color parameters and pigments in seed oils of different pumpkin varieties

Variety	<i>Cucurbita pepo</i>		<i>Cucurbita moschata</i>		<i>Cucurbita maxima</i>	
	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD
X	4.64	0.07	34.09	2.56	26.02	1.18
Y	3.54	0.12	34.58	2.73	28.36	1.23
Z	0.18	0.02	4.90	0.53	8.32	0.61
Brightness L	22.31	0.02	66.42	0.02	60.80	0.001
a	16.49	0.02	0.61	0.00	-7.31	0.01
b	35.69	0.05	71.63	0.05	48.18	0.02
Chlorophyll, ppm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
β -carotene, ppm	62.84	4.78	72.91	2.32	1222.33	0.72

\bar{x} -average value; SD – standard deviation

Most pronounced yellow component has been observed for pumpkin seed oil of variety *Cucurbita moschata*, the lowest brightness has been obtained for the seed oil of variety *Cucurbita pepo*. Color component b of pumpkin seed oils is several times higher than that measured in other vegetable oils such as soybean, sunflower, rapeseed etc. For the listed vegetable oils this parameter changes from 9.2 to 10.4 while for pumpkin seed-oils it lies between 35 and 72. Similar data for seed oil of *Cucurbita maxima* has been obtained by Hsu and Yu[9]

Table 2

Color parameters and pigments in seed oils of different melon varieties

Melon seed oil	<i>Medena rossa</i>		<i>Desserten 5</i>		<i>Hybrid 1</i>	
	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD
X	53.17	10.02	75.78	0.50	19.47	0.25
Y	56.74	10.64	80.12	0.43	20.88	0.21
Z	40.88	9.44	64.72	0.37	4.17	0.02
Brightness L	76.70	0.94	91.78	0.06	48.29	1.83
a	-4.04	0.10	-5.21	0.01	-3.51	0.21
b	25.44	0.05	22.05	0.05	49.44	1.22
chlorophyll, ppm	0.04	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00
β -caroten, ppm	8.73	0.71	6.58	0.03	35.97	4.31

\bar{x} -average value; SD – standard deviation

The brightness for melon seed oils has highest values for the oil of variety Desertten 5 and the lowest one for the oil of variety Hybrid 1. Unlike the pumpkin seed oils, melon seed oils possess negative color component *a* for all the varieties, which means, that in melon oils the green component prevails over the red one. Last observation can be explained with the presence of chlorophyll in all samples of melon oils. In melon seed oils with raising the content of β – carotene raises the color component *b*. Strongest prevalence of yellow nuance has been observed in seed oils of variety Hybrid 1 – about twice as higher as this of two other varieties.

Tests have been made about the homogeneity of dispersions. Tukey test has showed differences between the varieties, which is sufficient for modeling. After applying the incremental discriminant analysis with grouping variable "variety of pumpkin or melon" the discriminant functions ensuring 100% recognition of the different varieties have been derived.

The parameters involved in the modeling in order of their inclusion in the model for oil of pumpkin seeds are: brightness (L), color component *a* and β - carotene. To illustrate the groups designating studied pumpkin varieties, additionally canonical analysis has been made. The result presented in FIG. 1 confirms the distinct varietal differences and ensures 100% recognition.

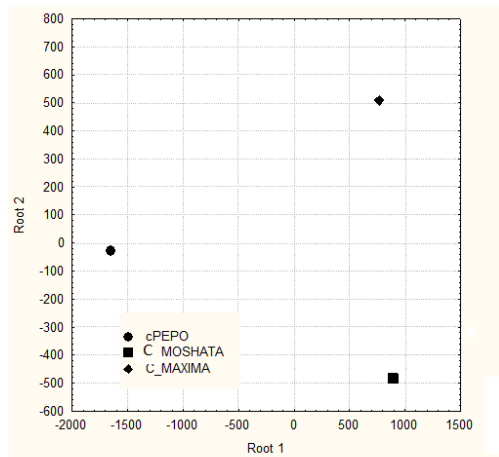


Fig. 1. Location of the varieties of pumpkin seed oil according to the first two canonical variables

For further clarification of these differences also Mahalanobis distances between centroids of the individual groups have been identified. Results are represented in the table 3.

According to data on the distances between the centroids of the individual groups, pumpkin oil from variety Cucurbita pepo is relatively equidistant from the varieties Cucurbita moschata and Cucurbita maxima. Pumpkin seed oil of variety

Cucurbita moschata is most distant from the one obtained for the variety Cucurbita maxima.

The parameters involved in the modeling of melon seed oils in order of their inclusion in the the model for oils of melon seeds are: chlorophyll, color component *a*, β - carotene and color components *b*. To illustrate the groups designating studied melon varieties as well canonical analysis has been made as in the case of pumpkin varieties. Again 100% recognition of the groups has been ensured. The latter fact is illustrated on Figure 2.

Table 3
Mahalanobis distances between different varieties pumpkin seed oils

Pumpkin variety	Mahalanobis distances		
	<i>Cucurbita pepo</i>	<i>Cucurbita moschata</i>	<i>Cucurbita maxima</i>
<i>Cucurbita pepo</i>	0	8966170	8205937
<i>Cucurbita moschata</i>	8966170	0	1332496
<i>Cucurbita maxima</i>	8205937	1332496	0

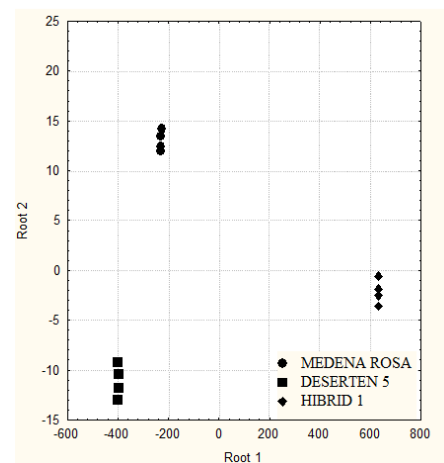


Fig. 2. Location of the varieties of melon seed oil according to the first two canonical variables

For each sample group (pumpkin oil or melon oil of studied varieties) the mahalanobis distances have been calculated and in the same time canonical analysis has been performed, because mahalanobis distances give an idea about the peculiarities of observed group in the original area, while the canonic presentations serve for better visualization of different groups, since their canonical variables represent linear combinations of the primary color indicators. Mahalanobis distances reveal the dynamics of changing the distance between the centroids of the individual groups.

Table 4
Mahalanobis distances between different varieties
pumpkin seed oils

Melon variety	Mahalanobis distances		
	Medena rossa	Desserten 5	Hybrid 1
Medena rossa	0.0	38524	985990
Desserten 5	38524.3	0	1409382
Hybrid 1	985990.1	1409382	0

According to the distances between the centroids of the individual groups the melon seed oil of the variety Medena rossa is closest to that of Desserten 5 and most distant of the oil from variety Hybrid 1. The melon seed oil of variety Hybrid 1 differs strongest from melon seeds oils of the other two melons varieties.

4. Conclusions

1. The analysis of the database on color parameters of oils from Bulgarian varieties of pumpkin and melon fruits showed the possibility to characterize certain groups varieties by discriminant analysis.

2. Color parameters in CIE Lab colorimetric system and pigments (chlorophyll and β - carotene) determine the specificity of oils of different varieties.

3. Color indicators in the XYZ colorimetric system are not important in distinguishing oils from pumpkin and melon.

4. In the case of melon seed oils the oil seed of variety Hybrid 1 differs the most strongly by color parameters and in the case of pumpkin oil - that one of *Cucurbita moschata*.

5. It has been statistically shown that there are differences in the values of the considered parameters for different groups of oils - pumpkin and melon ones. This makes efficient the use of the discriminant analysis for qualitatively differentiate various oils, non-traditional for food technologies.

References

1. ISO 659:2009. Oilseeds – Determination of oil content (Reference method). 2009. p. 12.
2. Commission Internationale de l'Éclairage Recommendations on uniform color spaces. color difference equations. Psychometric color terms. CIE publication no 15 (F. 1. 3. 1.) 1971. supplement 2. Bureau central. de la Commission Internationale de l'Éclairage. Vienna. 1978.

3. **Geoffrey J., Mc. Lachlan** Discriminant Analysis and Statistical Pattern Recognition. John Wiley & Sons, Inc. 1992.

4. **Vandeginste B., G.M. Massart, D. L. Buydens, L. M .C. De Jong, S. Lewi, P. J Smeyers, J. Verbeke** (ed.) Handbook of Chemometrics and Qualimetrics Part A. Part B. Elsevier, 1998.

5. **Красимир Калинов**, Статистически методи в поведенческите и социалните науки, НБУ, София, 2001.

6. **Бондарь А., Г. Статюха**, Планирование эксперимента в химической технологии, Москва, Изд. Высшая школа, 1976.

7. **Лакин Г.**, Биометрия, Изд. Высшая школа, Москва, 1990.

8. **Leila Rezig, Moncef Chouaibi, Kamel Msaada, Salem Hamdi**, Chemical composition and profile characterisation of pumpkin (*Cucurbita maxima*) seed oil, Industrial Crops and Products 37, 2012, 82– 87,

9. **Hsu, S. Y., S. H. Ju**, Comparisons of 11 plants oil fat substitutes for low- fat kung-wans. Journal Food Engineering, vol.51, 2002, 215-220.

Department of “Mathematic and Physics”
University of Food Technologies
26 Maritza
4002 Plovdiv
BULGARIA
E-mail: kr.nikolova@abv.bg

Department of Applied mathematics and modeling
PU „Paisii Hilendarsky”
24 „Tsar Assen” Str.
4000 Plovdiv
BULGARIA
E-mail: dtb@uni-plovdiv.bg

Department of Chemical Technology
PU „Paisii Hilendarsky”
24 „Tsar Assen” Str.
4000 Plovdiv
BULGARIA
E-mail: jana_petkova@mail.bg
E-mail: ginant@uni-plovdiv.bg

Department of Mathematic, informatics and physics
Agricultural University
12 „Mendeleev” Blvd.
4000 ПЛОВДИВ
BULGARIA
E-mail: anna@au-plovdiv.bg



ВЗАИМОВРЪЗКА СТРУКТУРА-ИНСЕКТИЦИДНА АКТИВНОСТ НА ТРИТЕРПЕНИ ВЪРХУ ЛАРВИ НА КОЛОРАДСКИ БРЪМБАР

ПЕТКО БОЗОВ

Резюме: Четири природни тритерпеноида изолирани от *Lavandula spica* L. и девет полусинтетични производни са тествани за инсектицидна активност срещу ларви на Колорадски бръмбар (*Leptinotarsa decemlineata* say), използвайки тест с избор при хранене с картофени дискове, който изисква малки количества от веществата: дози 10 000 ppm (333.33 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) and 1000 ppm (33.33 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$). Това изследване установи, че тестваните тритерпени действат като силно токсични съединения когато са прилагани локално. Урсоловата киселина показва висока активност при доза 10000 ppm и запазва забележим ефект при 1000 ppm. 3-монохлорацетилното производно на урсоловата киселина проявява при доза от 10000 ppm активност близка до синтетичния инсектицид вастак приложен в доза от 50 ppm. Специфични изменения в активността са отнесени в промяната на някои функционални групи на съединенията. Някои забележими аспекти на връзката структура-активност са дискутирани.

Ключови думи: *Lavandula spica*; *Labiatae*, тритерпени, химични производни, *Leptinotarsa decemlineata* Say, инсектицидна активност.

STRUCTURE-INSECTICIDAL ACTIVITY RELATIONSHIPS OF TRITERPENS ON THE COLORADO POTATO BEETLE LARVAE

ПЕТКО БОЗОВ

Abstract: Four natural triterpenoids isolated from *Lavandula spica* L. and nine hemisynthetic derivatives have been assayed for the insecticidal activity against the Colorado potato beetle larvae (*Leptinotarsa decemlineata* say), using potato disk in choice nutritional test that requires only small amounts of the compounds: dose 10 000 ppm (333.33 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) and 1000 ppm (33.33 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$). This study shows that tested triterpenes acts as acute toxic compounds when were applied topically. Ursolic acid showed strong activity at dose 10000 ppm and maintain observable effect at 1000 ppm. The 3-monochloroacetoxy derivative of ursolic acid displayed at dose 10000 ppm close results to the synthetic insecticide vastak applied at 50 ppm. Specific changes in the activity were associated with variance of some functional groups of the compounds. Some considerable structure-activity relations are discussed.

Key words: *Lavandula spica*; *Labiatae*, triterpenoids, chemical derivatives, *Leptinotarsa decemlineata* Say, insecticidal activity.

1. Introduction

The economic important damage in agriculture caused by Colorado potato beetle (*Leptinotarsa decemlineata* Say) resulted in the use of variety of chemical substances for control of its population. This insect quickly develop resistance to many synthetic insecticides [5, 6], which stimulate the search for new insect pest control agents which are biodegradable and demonstrate low impact on the environment. Some natural products, mainly alkaloids and terpenoids, show relevant activity as insecticides and antifeedants that could be successfully used like source of new method to protect agriculture crops [2, 7, 8]. Ursolic acid (**1**) is a pentacyclic triterpene widespread in the plants: lavender, apples, bilberries, cranberries, peppermint, rosemary, oregano, thyme, basil and others. It is the main compound in the *Lavandula spica* L. (*L. vera* DC), together with other triterpenoids [4, 14, 15]. Ursolic acid is of interest on account of its varied biological activity as antitumour effects [3, 9, 11, 21], anticancer [10], antibacterial [22], antioxidative property [18, 23], antiinflammatory, antiviral [24] and many others. Nevertheless, there is little information about its action on insects. Insecticide properties have been report for other natural triterpenes, and theirs chemical derivatives [12, 13, 16, 17].

I report here on the effect of four natural triterpenoids: ursolic acid (**1**), oleanolic acid (**8**), betulin (**12**), betulinic acid (**13**), isolated from *Lavandula spica* and of nine synthetic derivatives on the insecticide behavior of larvae of the Colorado potato beetle in order to elucidate the structural features of the compounds and the functional groups responsible for higher activity. The goal of this study was to correlate phytochemical compounds with their insecticidal activity to identify possible biopesticides of botanical origin for insect population control.

2. Description of the force computation methods

Test compounds. The triterpenes and their synthetic derivatives Fig. 1 were available from previous works. Natural compounds **1,8,12** and **13** were isolated from *Lavandula spica* L. as was described previously [7,8]. Derivatives **3, 4** and **10** were prepared from **1** and **8**, respectively by treatment with diazomethane in a solution of diethyl ether and additionally oxidation of **4** [4, 15]. Compound **2** and **9** were obtained in the same manner. Treatment of **1** and **8** with acetic anhydride-pyridine or monochloroacetic acid-

pyridine resulted to products **5, 11** and **7**, respectively. Finally, substance **6** was received by lithium aluminium hydride reduction of **1**.

33.3 mg from each compounds were dissolved in 1 mL acetone to obtain work solutions.

Insects. Newly emerged fourth instar larvae of Colorado potato beetle used for bioassays were collected from potato fields located around Plovdiv (Bulgaria).

Bioassays. Summary. The bioassay was carried out in petri dishes (15 x 105 mm), with covered bottom with filter paper, using potato leaf disks with 2.0 cm² area. The upper surface of the disks was treated with 20 μ L acetone solution of the test compounds, provided dose 333.33 μ g/cm² (10000 ppm), with a microsyringe and after evaporation of the solvents received treated disks (TD). After ten and a hundred multiple dilution with acetone were prepared solutions for testing of compounds with dose 1000 ppm and 100 ppm, respectively. For the arena of bioassays were used fifteen petri dishes. In thirteen of them were used fifteen TD prepared by each test solutions. In the standard sample (S) the potato leaf disks were treated analogously with the solution of vastak with dose 100 and 50 ppm. In the control probe (C) was used pure solvent. In each arena were placed fifteen newly emerged fourth instar larvae where they were allowed to feed. Every morning and evening disks were replaced by fresh ones. Daily, at the same time, during a week were report on the results to calculate the relevant toxicity to larvae expressed like efficiency in per cent. Bioassays were performed at 25 \pm 1.C, 65 % RH, and a 16:8 (L:D) photoperiod.

Evaluation of effectiveness. Mortality was assessed every 24 hours for 12 days, and mortality was adjusted using the Abbott formula [1]. Insects were considered death when tactile stimuli elicited no visible normal reaction. Data were analyzed using the Kruskal-Wallis test, and Dunn's multiple comparisons test ($P < 0.05$). The program used for the analysis of the data was GraphPad Prism 4; GraphPad Software Inc. Effectiveness was calculated in per cent.

Statistical analysis. The data were corrected using Abbott's formula [1] for the mortalities in the controls, and the data were subjected to probit analyses using SPSS [19] for Windows to estimate LC50 values of the natural compounds. Percentage

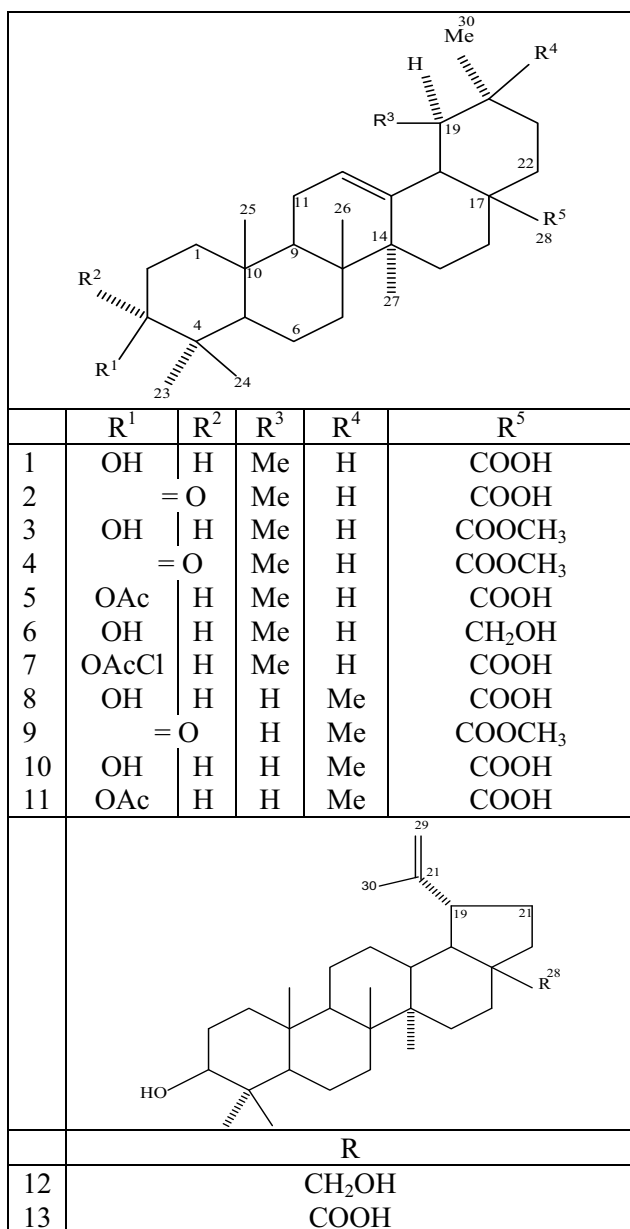
mortality values for different exposure times were subjected to analysis of variance using the same statistical program [19] for probit analysis. Data were transformed using arcsine \sqrt{x} transformation to meet normality, which is recommended for analysis of variance [20]. Means were separated at the 5% significance level by the least significant difference (LSD) test.

3. Results

Among the natural triterpenoids and the hemisynthetic compounds tested against Colorado potato beetle larvae there are three different groups

Fig. 1. Molecular structures of the triterpenoids tested against Colorado potato beetle larvae.

*Natural compounds: **1** (ursolic acid), **8** (oleanolic acid), **12** (betulin), **13** (betulinic acid).



from a structural point of view: with ursane (**1-7**), oleanane (**8-11**) and lupane (**12** and **13**) skeleton (see Fig 1).

From the results for natural compounds (shown in Table 1) can see that **1**, **8** and **12**, which are chain isomers, exhibit almost equivalent activity (Oleanolic acid showed a little bit stronger action), while **13** demonstrated less effect. That may Table 1. Insecticidal activity of the test compounds reported on effectiveness (%)

Com po und	Dose μg/cm ²	N	Effectiveness (%) day			
			2	5	8	12
S	3.33	3	100			
	1.66	3	80.25	100		
1	333.33	7	4.05	44.30	67.75	75.80
	33.33	7	-	9.85	22.22	25.31
2	333.33	5	-	31.01	34.23	45.00
	33.33	3	-	-	13.00	22.45
3	333.33	5	-	29.14	38.57	45.33
	33.33	3	-	-	14.05	15.55
4	333.33	3	-	16.05	22.53	25.49
	33.33	3	-	-	10.00	10.60
5	333.33	5	5.66	47.78	69.47	75.54
	33.33	5	-	15.56	25.12	25.92
6	333.33	3	-	5.00	15.35	20.60
	33.33	3	-	-	10.40	15.48
7	333.33	7	17.89	60.44	81.55	90.05
	33.33	7	3.15	25.63	40.54	50.37
8	333.33	7	4.22	45.36	68.88	76.86
	33.33	7	-	12.55	26.80	28.20
9	333.33	5	-	33.23	36.53	48.77
	33.33	3	-	-	14.56	23.74
10	333.33	5	-	32.47	39.65	47.53
	33.33	3	-	-	15.52	16.20
11	333.33	5	5.90	48.04	69.98	76.05
	33.33	5	-	16.25	25.85	26.03
12	333.33	7	2.19	41.23	65.75	73.38
	33.33	7	-	8.85	20.04	23.22
13	333.33	7	4.31	44.23	66.88	75.20
	33.33	7	-	9.32	21.84	24.67
C	-	7	-	-	-	-

N - number of replications

S - standard sample

C - control probe

be attributed to the exchange of C-28 carboxyl with hydroxy-methylene group suggesting that more mobile hydrogen in acid moiety caused antibiosis mode of action. The different behavior of the hemisynthetic derivatives **2-7** and **9-11** must be assigned to their different functionalized carbons C-3 and C-28. The oxidation of the hydroxyl group at C-3 in **1** and **8** lead to decrease of activity in

carbonyl derivatives **2** and **9**, while its acetylation resulted in increase of insecticide effect in **5** and **11**. The substitute of carboxyl group at C-28 with methyl ester (**3**, **10**) or hydroxy-methylene group (**6**) caused reducing of the activity. When in the molecule there are two chemical conversion: of carboxyl at C-28 to hydroxyl and of C-3 – hydroxyl group to carbonyl as in compound **4**, the activity decreased drastically. Extremely high activities demonstrated the 3-monochloroacetoxy derivative of ursolic acid (**7**). When it is applied at dose 10000 ppm its efficiency is 90 %, which is close to that of the standard. The concentration used to achieve this effect is much higher than for the commercially available synthetic insecticides such as vastak active at dose 50 ppm. Nevertheless, triterpenoids could be used as potential source of novel more ecological acceptable compounds with insecticidal activity which may have role as preservatives of the cultures. The lethal concentration of some compounds needed to kill 50 % of the pest (LC₅₀) was determined (Table 2).

Table 2. Lethal concentration of some compounds needed to kill 50 % of the pest

compound	dose ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	LC ₅₀ (Days)
1	333.33	7
5	333.33	6
7	333.33	4
	33.33	12
8	333.33	7
11	333.33	8
13	333.33	7

Ursolic acid is the most perspective in view of it is represented in big quantity (up to 0.4 % of the dry stems) in *Lavandula spica* L., a cultivated species utilized in the cosmetics and perfumery industry.

4. Conclusions

The results reached in this study on the biological action of triterpenoids against Colorado potato beetle larvae, confirm previous works on the activity of these compounds against other insect pests and displayed observable differences in biological action according to the variance of the substitutes. It is worth to note that all natural products demonstrated good insecticidal effect. So that, it may concluded that some plants are high efficient in the synthesis of chemical substances with defensive properties against insects and that the biological activity depend on the hole molecular structure of the secondary metabolites.

5. Acknowledgements

I thank Prof. G. Y. Papanov for providing samples of triterpenoids.

References

- Abbott W. S.** J. Econ. Entomol, 1925, Vol., 18, 265-267.
- Alford R. A., J. A. Cullen, R. A. Storch, M. D. Bentley** Journal of Economic Entomology. 1987, Vol. 80, № 4, 575-578.
- de Angel R. E., S. M. Smith, R. D. Glickman, S. N. Perkins, S. D. Hursting** Nutr. Cancer, 2010, Vol. 62, № 8, 1074-1086.
- Bozov P. I., G. Y. Papanov, P. Y. Malakov** Universite de Plovdiv "Paissi Hilendarski" Travaux scientifiques, Chimie, 1990, Vol. 28, № 5, 69-80.
- Forgash A. J. In J. H. Lashomb and R. Casagrande** Advances in potato pest management, (Eds.), Stroudsburg, PA: Hutchinson Ross: 1981, 34-36.
- Forgash A. J.** Insecticide resistance of the Colorado potato beetle, In D. N. Ferro & R. H. Voss (Eds.). Proceedings XVII International Congress of Entomology, Mass. Agric. Exp. Stn.: 1985, 33-52.
- Hough-Goldstein, J. A.** Environmental Entomology, 1990, Vol. 19, 234-237.
- Huang F. Y., B. Y. Chang, M. D. Bentley, M. D. Alford, A. R.** *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1995, 43, 2513-2516.
- Jie Li, W. J. Guo, Q.Y. Yao** World Journal of Gastroenterology, 2002, Vol. 8, № 3, 493-495.
- Ju-Hong F, Wei C., Zhao Y., Xiu-Lian Ju.** The Open Nat. Prod. Journal, 2009, Vol. 2, № 1, 48-52.
- Kim, S. H, Byung-Zun, A., Ryu, S. Y.** *Phytotherapy Research*, 1998, Vol. 12, № 8, 553-556.
- Lugemwa F. F., M. B. Huang, M. Mendel, R. A. Alford** J. Agric. Food Chem. 1990, Vol. 38, 493-496.

13. **Natakani M. S., A. Abdegaleil, S. M. Kassem, K. Takezaki, H. Okamura, T. Iwagaura, D. Matsumi** J. Nat. Prod. 2002, Vol. 65, 1219-1221.
14. **Papanov G. Y., P. Y. Malakov, K. Tomova** Universite de Plovdiv "Paissi Hilendarski" Travaux scientifiques, Chimie, 1984, Vol., 22, № 1, 214-220.
15. **Papanov G. Y., P. I. Bozov, P. Y. Malakov** Phytochemistry, 1992, Vol. 31, № 4, 1424 – 1426.
16. **Reed D. J., E. U. Warthen, G. Reed** J. Econ. Entomol. 1982, Vol. 75, 1109-1113.
17. **Rodriguez B., C. Caballero, F. Ortego and P. Castanera** J. Nat. Prod, 2003, Vol. 66, 452-454.
18. **Somova L. O., A. Nadar, P. Rammanan, F. O. Shode**, Phytomedicine, 2003, Vol.10, № 2-3, 115-121.
19. **SPSS**. SPSS Version 10.0. SPSS Inc, 233 S. Wacker Drive, Chicago, Illinois. 2001.
20. **Steel R. G. D., J. H. Torrie** Principles and Procedures of Statistics: A Biometrical Approach. 2nd Edition. McGraw-Hill,
21. **Sultana N.** Med. Chem, 2011, Vol. 26, № 5, 616-642.
22. **Wolska K. I., A. M. Grudniak, B. Fiecek, A. Kraczkiewicz-Dowjat, A. Kurek** Central European Journal of Biology, 2010, Vol. 5, № 5, 543-553.
23. **Yin M., K. Chan** J Agric Food Chem., 2007, Vol. 55, № 17, 7177-7181.
24. **Yim E., M. Lee, K. Lee, S. Um** J. S. Park Int. J. Gynecol. Cancer, 2006, Vol. 16, № 6, 2023-31.

Гл.ас. д-р Петко Иванов Бозов
Department of Biochemistry and microbiology, Plovdiv University, Plovdiv
24 Tsar Asen St.
4000 Plovdiv
BULGARIA

E-mail: bozov@uni-plovdiv.bg



ИЗСЛЕДВАНЕ КАЧЕСТВОТО НА ЦВЕТА В ДИГИТАЛНИЯ СУХ ОФСЕТОВ ПЕЧАТ С ДИРЕКТНО ЕКСПОНИРАНЕ

РОСИЦА САРДЖЕВА, ВЛАДИМИР АНГЕЛОВ

Резюме: *Дигиталният сух офсетов печат с директно експониране се позиционира като подходяща печатна технология, която би могла да удовлетвори актуалните изисквания за ефективно производство на къси тиражни серии с високо качество на печата. Технологичните особености и характеристики на тази печатна технология, високата дигитализация и автоматизация, широката гама от използвани субстрати и мастила са факторите, които са предимствата тук и които я правят значима в различни пазарни сегменти.*

CtPress дигиталният офсетов печат или както още е известен Direct Imaging (DI) или Smart offset, се отличава със своето високо качество и производителност на дигиталния работен поток. Това означава директен пренос на работния файл вътре в печатната машина, чрез термално лазерно експониране, без проявяване, което значително повишава ефективността и рационалността на производствения процес. Постигнатите висококачествени резултати от тази технология също така са резултат на сухия офсетов печатен процес, а липсата на овлажняващ ратвор, намалява макулатурите като елиминира проблеми, свързани с емулгирането на мастилото.

Ключови думи: *дигитален сух офсет, директно експониране, качество, цвят, хартия*

INVESTIGATION OF COLOR QUALITY in DIGITAL DRY OFFSET PRINTING with DIRECT IMAGING

ROSSITZA SARDJEVA, VLADIMIR ANGELOV

Abstract: *Digital dry offset with direct laser imaging of information inside the printing machine is one of those impulses in the information and communication sector which provided a positive impact for the whole graphic arts industry. It is a relative new printing technology, named also CtPress or Direct Imaging (DI). The use of computer-to-press systems now is already widespread and is undergoing continuous development having an example Presstek DI systems.*

In order to achieve a smooth flow of digital data from prepress to press, the integration networking and digitalization of all processing steps is essential, all which are available in DI systems. Printing process here is being increasingly controlled and adjusted electronically, which leads to consistent high color print quality and greater productivity.

The great advantage of this technology is improved product quality, achieving even so called photographic level of quality. DI technology now offers a high flexibility in the processing of a large variety of substrates, which is very important for variable packaging products.

Key words: *digital dry offset, direct imaging,, paper, print quality*

1. Introduction

Current digital technologies struggle to meet the standards of classical printing quality criteria. Digital solution is undeniably better as run lengths grow shorter, turnaround times get faster, just-in-time production rises.

Nowadays the trend for permanent high printing quality of food packaging is a strong and dominates in current printing development.

Factors defined problem-less printing process and quality as, type of technology, inks, substrates and their mutual influences, are the topic of this study. The purpose is to definite what are possibilities of digital waterless offset printing with direct imaging (DI) of information inside the printing machine, in the field of color packaging production.

Generally DI presses are digital sheet-fed waterless offset, highly automated, and available in 4- to 6-colour models. DI presses provide a fast return on investment and enable easy entry into the profitable digital offset printing market. A large diversity of substrates is optional in this technology. Here can be used different types of papers and cardboards, chemical papers, coated glossy and matt papers, aqueous coating is optional on them, self-adhesive papers, plastics, low grade of mechanical papers like supercalandered, light weight coated papers and etc.

For the purpose of this study is used digital sheet-fed dry offset printing machine, Heidelberg Quickmaster DI 46-4. Printing process here is characterized as Computer-to-Press digital method, with direct thermal laser imaging of roller substrate on the plate cylinder's surface inside the machine. This is a perfect digital (DI) offset printing machine, proper for the short run series of four color production, including advertising, packaging and printing-on-demand products.

Quickmaster DI is an example of satellite configuration of printing sections with integrated four plate and four offset rollers, running around common pressure cylinder with four time bigger diameter and consequently inks applying.[1]. (Fig. 1) Quickmaster DI 46-4 is on the base of dry offset principles associated them with requirements of Toray analogue waterless offset plates and thus are available 12 chill zones into the inks system.

Printing "plates" here are polyester dry roll substrate, placed on the plate cylinder surface fully automatically. These are process free plates, with silicon layer as a carrier of non-printing elements, known for yielding dramatic environmental and economic benefits for customers without sacrificing quality and output. This kind of process-less substrate eliminates the need of plate processor, which requires chemicals, water and energy while

generating waste. Temperature control is essential for dry offset and realizes by cool water for the whole four printing sections including zonal cooling. But for the runs of 5000 copies there is no need of cooling at all.

This machine is equipped with integrated imaging system of 16 thermal laser diodes (IR - 830 nm) for each color. Laser heads in the imaging system expose information on the polyester roller surface on press. As a result of the thermal sensitive physical reaction, known as "ablation", due to the thermal laser energy, silicon layer of the plate surface is destructed and then in the same place are forming printing elements. Unexposed silicon fields are hydrophilic and become non-printing elements, repulsive printing inks. The plate surface is cleaned by the towel damped with cleaning solution and special device is responsible for sucking the silicon powder.

Printing plates are inking by forming 12 zones, which can be adjusted manually or automatically by the blades on duct roller, like the way in some conventional printing machine.

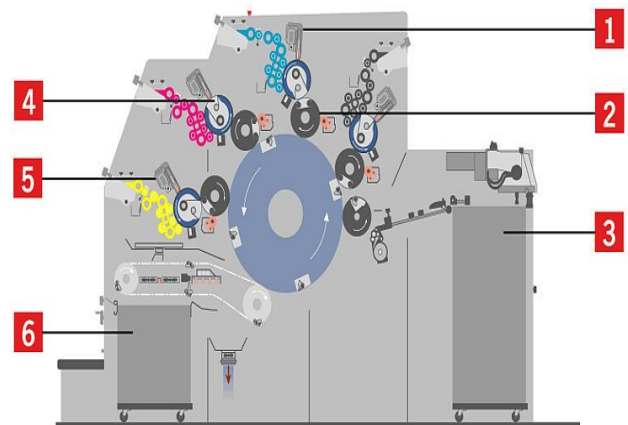


Fig.1 Heidelberg Quickmaster DI-46, sheet-fed digital offset printing machine (1-exposure system, 2-offset roller, 3- paper system, 4- plate cylinder, 5- inks system, 6-output device)

Heidelberg Quickmaster DI 46-4 has a extremely short starting time, of around 10-15 min, including plate changing, exposure time, washing and register adjusting. This machine with its precise register is offering the lowest cost per sheet in runs of 500 to 20,000 copies, and it takes even less than ten minutes to go from digital file to the first sellable colour print with resolutions of up to 300 lpi AM or with FM (frequency-modulated) screening. This type of DI technology offers additional opportunities to use varnish and other methods for having luxurious products quality.

Compared to digital electro-photographic dry toner print systems, QM-DI 46-4 is an ideal for optimal runs of around 10 000 copies, but with

excellent printing quality, more often named as photographic quality.[2]

The flexibility towards substrates and ease of service are advantages, incomparable with other digital printing machine. More over this machine can be used as a proofing system for high-qualitative high runs products, produced by conventional printing machines.

Table 1
Technical data of Quickmaster DI-46

№	Parameters	
1.	Max size	460 mm x 340 mm
2.	Max print surface	450 mm x 330 mm
3.	Sheet thickness	0,1mm – 0,4mm
4.	Speed of printing	10 000 sheets/h
5.	Register	0,02 mm
6.	Exposure resolution	1270 ; 2540 dpi
7.	Exposure time	7 min–1270 dpi 14 min-2540dpi
8.	Additional options	Automat. register, varnish, anti-copy powder, t°control

2. Experimental

Key elements of our experimental work include calibrating the printing system, designing test forms containing legal CMYK images and colour-managed pictorial images and performing quantitative and visual tests and analyses. For this purpose have been used test files as a characterization target for device profiling and for quantitative analyses. Test files were printed by the press QM DI-46, using 175 lpi AM screening.

In generated test forms there are several elements to be measured - single, double and three inks coverage patches, gray balance, gradation patches for different process colours, positive and negative lines under 0° and 45° for small details. (Fig.2) In the visual test form there are also colour images for very ease visual colour deviation assessment.

Test files have been generated by the help of spectrophotometer x-Rite i1Profiler, which offers ICC application, optimized on the real halftone illustrations, using process colors (CMYK), black, white and different PANTONE colors or other spot colors.

i1Profiler is equipped with the x-Rite standard Graphic Arts (XRG) and its software is developed for the series of steps as a methodology aimed for researching of test-tables and profiles.[3]

i1Profiler offers an unprecedented level of flexibility and features a number of unique color management capabilities. *i1Profiler* software brings even more functionality and workflow improvements for color management products. You simply scan the target to generate a high quality custom ICC profile. The software will automatically detect and crop the targets, as following: ColorChecker Classic; ColorChecker Digital SG; Reflective IT8.7/2; Transmissive 4x5 and 35 mm IT 8.7/1. Principally here there is an option to choose standard table for test or generating special table in order to answer of real terms of test (color, CMYK or Pantone, type of papers etc.).

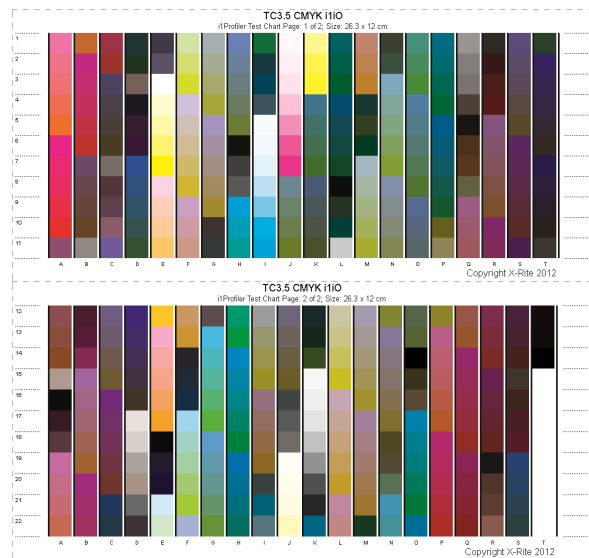


Fig.2 Table of generated *i1Profiler*Test

In order to assess printing quality are used ISO 12647-2, compatible media methods as for example IDEAlliance Digital Control, FOGRA Media Color Control. [4, 5] For evaluating color quality printing were measured and checked fast and easily such parameters like: optical densities, color spectral characteristics, color coordinates, color deviation, papers whiteness and etc.

Test Chart file is created according integrated x-Rite software: Patch Set, Test Chart, Measurement, Lighting, Profile Settings, ICC Profile. For the test-table (Fig.2) are applied first two steps with editing some changes according to printing conditions. After steps Patch set and Test chart then have to be chosen respective adjustments towards: C, M, Y, K %; double colors and substrate surface (glossy); ambient lightening; color separation scheme - way of black generation; source of light (D50); device type – printing machine; color space depending of experimental - CMYK; orientation of paper sheet in the machine.

Also have been printed pictorial test, as an illustrative test for ease and visual quality control

assessment of existing specific colors, difficult for reproducing.

The test-forms are printed on the high quality three types of coated glossy papers, *Premium Coated*, WFC (wood free coated) with different grades and then they have been compared on the base of the results achieved. [6]

Paper type 1 – WFC, two sided coated, glossy paper, 130 g/m², thickness 122 μm, density 1,065 g/cm³, smoothness - 1000 s.

Paper type 2 – WFC, two sided coated paper, glossy, 170 g/m², thickness 145 μm, density 1,172 g/cm³, smoothness - 1100 s.

Paper type 3 – WFC, two sided coated glossy paper, 200 g/m², thickness 178 μm, density 1,224 g/cm³, smoothness - 1300 s.

This study has processed by using Toyo CMYK printing inks for dry offset. These types of dispersions cover large number of substrates without any requirements. Their characteristics are: high viscosity, adequate for waterless offset, high color intensity, drying chemically, high rubber resistance, compatibility with different varnish systems and finishing processes. [7]

Quickmaster DI is equipped by automatic register system which is big advantage for paper wastages minimizing. Start wastes are at least 40 - 50 copies. During the starting time have to be adjusted printing conditions as paper, speed of printing, pressure in the nip zone, inking process in different zone and etc. All these can be corrected additionally after measurement and visual printouts control for each color.

Then for the purpose of this study all process factors like – workflow, printing speed, pressure, inking and others have been kept constant in order to see paper's type impact on the color print quality.

3. Results and discussion

The whole results are shown in Table 2 and Fig.3, Fig.4. In our case have been measured important for the color printing quality parameters, as: solid inks densities (SID), color coordinates in CIE L*a*b* space, color deviation (Δ E) and color gamut as well.

The results are different according of paper's type, but in the same time all they are typical for the waterless sheet-fed offset printing process with wood free coated papers.

For achieving optimal inking and optimal transfer of inks are important solid inks densities – SID (Fig.3). During the printing process it is considerable to achieve max value of optical densities with minimal ink quantity. In our study SID are measured for the whole process colors C,M,Y,K, depending on the paper used. Towards

our types of papers in advance can be said that on the WFC papers must be achieved possibly higher SID values. In addition this reason also can be resulted by waterless process.

Despite of this preliminary prediction our three types of papers have their own values, which correlate with their specifics, like different grade, smoothness, caliper, coating and brightness. On the results achieved it is not possible to show clear preferable type of paper, because differences are not indicative.

Table 2
Solid Inks Densities and color deviation ΔE

CMYK	SID	L*	a*	b*	ΔE
Paper type 1					
C	1,58	60,62	-41,63	-5,02	4,31
M	1,49	52,74	71,83	0,89	5,72
Y	1,42	84,16	2,69	96,82	5,93
K	1,69	21,75	1,65	0,91	2,85
Paper type 2					
C	1,58	59,7	-38,8	-43,9	3,95
M	1,48	52,34	71,95	0,75	5,18
Y	1,39	85,02	-4,36	94,67	5,33
K	1,82	21,55	1,53	0,88	2,60
Paper type 3					
C	1,56	58,2	-37,5	-43,1	3,68
M	1,44	52,11	72,02	0,69	4,86
Y	1,33	85,67	-5,21	91,35	5,02
K	1,56	21,23	1,49	0,83	2,15

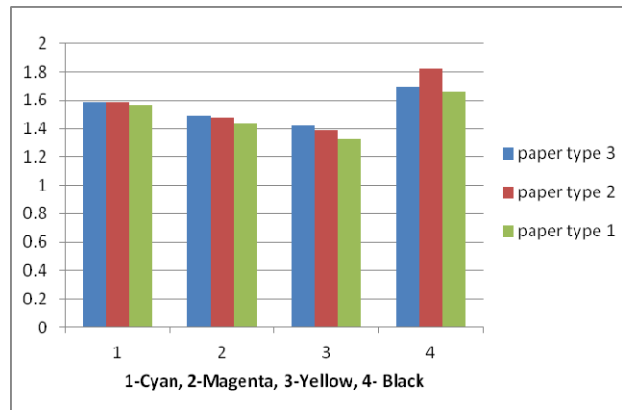


Fig.3 Solid Inks Densities on printed samples

Color deviation is a characteristic used for making comparison between two colors by calculating ΔE, according to ISO12647-2. [4] Colour deviations here are different for process inks, but for three types of papers there is similarity as a trend - some values (magenta, yellow) are just on the limits of nominal tolerances, according to ISO 12647-2 and for cyan and black ΔE values are

very acceptable. (Table 2). All this is attributive from the total paper quality which according to ISO is defined as class 1. [4]

On the base of huge of measurements can be defined what kind of color reproduction will have each type of paper and what color gamut would generate each of them. Through our measuring of color coordinates for each paper type has generated graph, shown color gamut in the CIEL*a*b* space (L^* , a^* , b^*). On the Fig. 4 all curves describes color gamut of the corresponding papers types and giving possibility to evaluate them. It is well known that the larger the color gamut the better the color reproduction paper capabilities. Color gamut profiles of our papers have shown some insignificant larger of gamut for *paper type 3* compared to other two papers types.

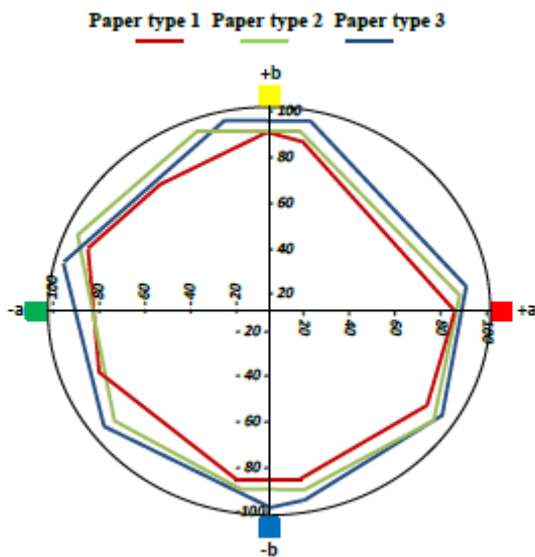


Fig.4 Color gamut of used paper types

The conclusion of color gamut achieved is that wood free coated papers (WFC) have high possibilities to reproduce a large color gamut and therefore to show on the print numerous colors of originals and thus to have as higher as possible quality of color printing reproduction. DI waterless process provides higher color quality with higher ink densities that expand the color gamut and present more saturated color. Generally waterless printing provides approximately 20% larger color gamut than conventional offset printing. [8]

Detailed analysis of Fig. 4 shows that can be defined parts of this gamut where our papers are very similar, with almost overlapped profiles. On the other hand there are parts where they are differentiated. For example in red-green field is observed closer color gamut even crossing in red-violet, blue-green and yellow fields. But more visual differences are observed in the fields of

violet-blue and blue-green. Furthermore, in this space are detected points of crossing for several color values.

Even in the almost equal class of papers types color gamut varies depending on detailed discrepancy which can be important for the print quality. It is the most important factor when assess the printing of color capability for reproducing true colors and fine details. The larger the color gamut, the closer the color print reproduction to the original. Printing process always results on the paper of decreasing color gamut of original, no matter of printing technology and other improvements. That is why paper quality with its cellulose substrate, surface geometry, smoothness and white thick coatings is one of such factors which can enlarge the color gamut. In our case we have such type of papers which proof this consideration and show the importance of paper used at all.

The great contribution for these results has the waterless offset printing process on Quickmaster DI-46, where we have applied specific offset inks, completely different of those in conventional sheet-fed offset. [7] Dry offset process needs strong, tacky and high viscosity inks, usually up to 100 Pa.s. In our case inks viscosities have been varied of around $\eta=85-90$ Pa.s, what is an additional reason for receiving high color print quality. In this case is very important to keep temperature constant in due limits. All this is compulsory for waterless offset technology since the viscosity could be influenced by the temperature during the printing process, because of lack of fountain solution. When the press temperature achieves 30°C , then the viscosity can be down by 7-8% and thus may cause inks color problems and plate toning. [9]

Besides that, these kind of offset inks have not to be dried on the inks rollers during their transfer to the offset blankets. So this increases much more the importance of these rheological inks characteristics as viscosity, tack, flow etc. in dry offset printing process.

4. Conclusion

The whole results obtained in this research can be guarantee that this digital printing technology covers basic requirements for color quality reproduction, what is important for packaging printing. Also these results confirm that digital DI offset known also as a Smart offset plays an important role in the field of printing industry and its future is not under doubt.

With runs getting shorter and turnaround times quicker, the highly automated waterless offset DI press is ideal for short print runs of high-quality

with fast turnaround times and cutting of wastages. There is no need for a separate platemaking system. Waterless printing eliminates the need to maintain ink/water balance, making operation easier, reducing operator intervention and variables, and delivering fast makeready and superior inking. Inks for this technology are modified, in order to achieve chemical and rub resistance, what is very important properties for food packaging. Digital dry offset printing technology with direct imaging (DI) on press is proper for high quality printing products. Possibilities to apply high grade of wood free coated papers named as premium coated including cardboards, enlarge the source of substrates for packaging industry.

Nowadays there are already next generation DI solution that could give us the print results we required with the consistency of quality both within each job and from job to job.

References

1. **Sardjeva R.**, Printing Technologies, Siela soft and Publishing, ISBN 978-954-28-0606, 424, Sofia, 2009
2. **Sardjeva R., Mollov T., Angelov V.**, A Study in Colour Reproduction Capability of Digital Dry Toner Electro-photography Compared to Smart Offset, 42 International Circle Conference, Athens, 25-30 of May, 2014
3. *Instructions for iIProfiler spectrophotometer Apply, x-Rite XRG standard*, 2012
4. *ISO 12647-2:2004, Graphic Technology – Process control for the production of half-tone color separation, proof and production prints – Part 2: Offset lithographic processes*
5. www.idealliance.org, IDEAlliance, GRACoL specifications for standardised printing workflow, including ICC profiles, 2012
6. **R. D. Sardjeva, V. A. Angelov**, Application of digital dry offset printing with direct imaging for packaging, Second International Scientific Conference: Development of the Science, Technologies and Techniques for the Manufacture, Packaging, Storage and Distribution of Foods, University of Food Technology, Plovdiv, 9-10 May, 2014
7. **Sardjeva R.**, Inks, Siela Norma, ISBN 978-954-28-1383-5, 260, Sofia, 2013.
8. www.presstek.com Waterless offset yields higher quality, more accurate color, Presstek Digital Offset Presses
9. **Kipphan, Helmut**, Handbook of Print Media, 1.4 Print Quality, Springer, 1207, 2001, Germany

Department of Mechanical Engineering,
Graphic Arts specialty
Technical University–Sofia, Branch Plovdiv
25 Tsanko Diustabanov St.
4000 Plovdiv
BULGARIA

sardjeva@mail.bg
v.angelov@abv.bg



МЕТОДИКА ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЛАТЕНТЕН ТОПЛИНЕН АКУМУЛАТОР КАТО ЧАСТ ОТ СЛЪНЧЕВА ТОПЛИННА СИСТЕМА

АНАСТАС СТОЯНОВ

Резюме: Разработена е методика за изследване на латентен топлинен акумулатор с течен топлоносител, като част от слънчева топлинна система с термопомпа. Показано е положението на използваните измервателни уреди спрямо латентния акумулатор. Дефинирани са измерваните величини и точността на измерването им. Посочени са използваните измервателни уреди и последователността при провеждане на изпитването.

Ключови думи: материали с промяна на фазовото състояние, топлинен латентен акумулатор, термопомпа, слънчеви колектори, измервателна система

METHODOLOGY FOR THE STUDY OF LATENT HEAT ACCUMULATOR AS A PART OF SOLAR SYSTEM

ANASTAS STOYANOV

Abstract: Methodology for the Study of the heat latent accumulator with a liquid heat carrier as part of a solar thermal system with heat pump has been developed. The position of the measuring instruments used compared to the heat latent accumulator is presented. The measured values and the accuracy of their measurement are defined. The used measuring equipment and the consistency in the test are specified.

Key words: phase change materials, heat latent accumulator, heat pump, solar collectors, measuring system

1. Въведение

Целта на разработката е да се определят топлотехническите характеристики на слънчева енергопреобразуваща топлинна система с течен топлоносител, плоски слънчеви колектори, латентен топлинен енергиен акумулатор на основата на материали с промяна на фазовото състояние (МПФС) и термопомпа „вода-вода“ без допълнителен източник на енергия [1]. Цели се също да се даде възможност за извършване на сравнителна оценка на такива слънчеви системи

при използване на различни МПФС в латентния топлинен акумулатор.

Необходимо е да бъде приложена техническата документация на образците както следва [2, 3]:

2. Техническа документация

2.1. Плоски слънчеви колектори с течен топлоносител:

- габаритни размери;

- приемна повърхност, съвпадаща с активната площ на абсорбера;
- маса на колектора;
- вид на топлоносителя и неговото количество в колектора;
- работно налягане;
- физико-механични и химични характеристики на материала на поглъщащото покритие на абсорбера;
- брой, материал и физико-механични характеристики на прозрачното покритие на колектора;
- вид, търговско наименование и физико-механични характеристики на топлинната изолация;
- физико-механични характеристики, конструктивни особености и тегло на колекторната кутия.

2.2. Латентен топлинен акумулатор на основата на МПФС с течен топлоносител за зареждане и разреждане:

- вид, брой и конструктивни особености на контейнери за използвания при изпитването МПФС;
- топлообменна повърхност на единичен контейнер;
- спецификация на използвания при изпитанието МПФС, съдържаща физико-химичните му свойства;
- обем на съхранявания от единичен контейнер МПФС;
- физико-химични характеристики на използвания топлоносител;
- обем на топлоносителя в акумулатора;
- техническа спецификация на използваните топлообменници за топлинно зареждане и разреждане;
- общ обем на акумулатора;
- номинален дебит на топлоносителя през всеки един от използваните топлообменници в акумулатора;
- температура на околната среда;
- тегло на топлообменния апарат;
- номинален дебит на топлоносителя през всеки от топлообменниците за зареждане и разреждане на акумулатора;
- номинален температурен режим на работа;
- вид, търговско наименование и физико-механични свойства на топлинната изолация на акумулатора.

2.3. Термопомпен агрегат „вода-вода“:

- тип, производител и търговско наименование на термопомпата;
- тип на компресора;

- номинална инсталирана мощност на компресора;
- вид на хладилния агент;
- ходов обем на компресора;
- номинално студопроизводство;
- номинална температура на изпарение;
- номинална температура на кондензация;
- температура на околната среда;
- габаритни размери на изпарителя и кондензатора;
- топлообменна повърхност на изпарителя и кондензатора;
- физико-механични характеристики на използваните материали и конструктивни особености на изпарителя и кондензатора;
- тегло на термопомпния агрегат;
- работно налягане във всеки от топлообменници за зареждане и разреждане в акумулатора.

3. Теоретична част

3.1. Ефективност на плосък слънчев колектор с течен топлоносител:

Ефективността на единичен слънчев колектор с течен топлоносител се определя като отношение на пълния топлинен поток, отведен от колектора и пълното количество слънчева радиация, попаднала върху неговата повърхност, определени за единица време:

$$\eta_{ск} = \frac{\dot{Q}_{ск}}{A_{аб} \cdot I_{ск}} \quad (1)$$

Добитото количество топлинна енергия от Слънцето за единица време се определя от:

$$\dot{Q}_{ск} = m_{ск} \cdot c_{ск} \cdot (t''_{ф.ск} - t'_{ф.ск}) \quad (2)$$

$m_{ск}$ – масов дебит на топлоносителя през слънчевия колектор, kg/s ;

$c_{ск}$ – специфичен топлинен капацитет на топлоносителя в слънчевия колектор, $J/kg.K$;

$t'_{ф.ск}$ – входяща температура на топлоносителя в слънчевия колектор, $^{\circ}C$;

$t''_{ф.ск}$ – изходяща температура на флуида от слънчевия колектор, $^{\circ}C$;

$A_{аб}$ – площ на абсорбера на слънчевия колектор, m^2 ;

$I_{ск}$ – интензитет на сумарната слънчева радиация, попаднала на повърхността на колектора, W/m^2 .

3.2. Ефективност на латентния топлинен акумулатор на основата на МПФС с течен топлоносител [3]:

Обобщената ефективност $\eta_{ак}$ на латентния акумулатор, включващ процесите на зареждане и разреждане се състои от три частни ексергийни ефективности – ексергийна ефективност при зареждане ξ_z , ексергийна ефективност отчитаща загубите към околната среда $\xi_{ок}$ и ексергийна ефективност при разреждане ξ_p :

$$\eta_{ак} = \xi_z \cdot \xi_{ок} \cdot \xi_p \quad (3)$$

3.3. Определяне загубите към околната среда:

Ефективността на акумулатора се определя като отношение на ексергията при разреждане към ексергията при зареждане и представлява функция на отношението на температурите. В експерименталната уредба е възможна единствено ниско температурна акумулация:

$$\xi_{ок} = e^{-\frac{2.k.A.z}{m_{ак} \cdot c_p}} \quad (4)$$

където:

A – повърхност на акумулатора, m^2 ;

c_p – специфичен топлинен капацитет при постоянно налягане на топлоносителя през изпарителя на термopомпата или през консуматора, $J/kg.K$;

$m_{ак}$ – акумулираща маса, kg .

Използвания латентен акумулатор съдържа едновременно МПФС и течностен топлоносител:

$$m_{ак} = m_{МПФС} + m_{mn} \quad (5)$$

z – време отчетено от момента на завършване на зареждането на латентния акумулатор, s ;

k – обобщен коефициент на топлопреминаване, $W/m^2.K$.

Определянето на k е както следва:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\pi \cdot d_1 \cdot \alpha_1} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_1 \cdot l} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_2 \cdot l} \cdot \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\pi \cdot d_3 \cdot \alpha_2}} \quad (6)$$

l – височина на съда на латентния акумулатор, m ;

d_1 – вътрешен диаметър на съда на латентния акумулатор, m ;

d_2 – външен диаметър на съда на латентния акумулатор без топлинната изолация, m ;

d_3 – външен диаметър на съда на латентния акумулатор с топлинната изолация, m ;

α_1 – коефициент на топлопредаване между топлоносителя през изпарителя на термopомпата или през консуматора и вътрешната стена на латентния акумулатор, $W/m^2.K$;

α_2 – коефициент на топлопредаване между топлоизолационния слой на латентния акумулатор и околната среда, $W/m^2.K$;

α_1 и α_2 се определят в зависимост от конкретните условия, при които се извършва топлопренасянето и най-често се използват справочни данни. Имайки предвид условията на настоящия експеримент се приемат

$\alpha_1 = 300 \frac{W}{m^2.K}$ за случая на свободно движение

на течностния топлоносител в акумулатора, поради малкия му дебит през циркуляционната

помпа и $\alpha_2 = 4 \frac{W}{m^2.K}$ за случая на въздух под

атмосферно налягане и естествена конвекция. За по-прецизно изчисление е възможно определянето на α_2 да се извърши по:

$$\alpha_2 = B \cdot \sqrt[4]{t_{изол} - t_{ок}} \quad (7)$$

където при цилиндрична стена на латентния акумулатор $B = 2,56$.

3.4. Ефективност на термopомпения агрегат „вода-вода”, зададена чрез отоплителен коефициент [2, 5]:

Отоплителният коефициент на термopомпата k_o се определя като отношение на кондензаторната мощност $\dot{Q}_к$ и консумираната електрическа мощност N_{mn} :

$$k_o = \frac{\dot{Q}_к}{N_{mn}} \quad (8)$$

Кондензаторната мощност се определя като:

$$\dot{Q}_k = \dot{m}_k \cdot c_k \cdot (t''_{\phi,k} - t'_{\phi,k}) \quad (9)$$

където:

\dot{m}_k – масов дебит на топлоносителя през кондензатора, kg/s ;

c_k – специфичен топлинен капацитет на топлоносителя в кондензатора, $J/kg.K$;

$t'_{\phi,k}$ – входяща температура на топлоносителя в кондензатора, $^{\circ}C$;

$t''_{\phi,k}$ – изходяща температура на топлоносителя от кондензатора, $^{\circ}C$.

3.5. Обща ефективност на система с течностни слънчеви колектори, латентен акумулатор и термopомпа „вода-вода“ (без допълнителен източник на енергия):

Ефективността на системата се определя като отношение на спечеленото от Слънцето и околната среда количество топлина за единица време към пълното количество вложена енергия за единица време:

$$\eta_c = \frac{\dot{Q}_{ск}}{\dot{Q}_{ск} + N_{mn} + N_{цп}^{ск} + N_{цп}^{МПФС} + N_{цп}^{сmp} + N_{цп}^{изп} + N_{цп}^k + N_{ел}^{упр}} \quad (10)$$

N_{mn} – консумирана мощност от компресора

на термopомпата, W ;

$N_{цп}^{ск}$ – консумирана мощност от циркуляционната помпа, включена в контура на слънчевия колектор, W ;

$N_{цп}^{МПФС}$ – консумирана мощност от циркуляционната помпа, включена в контура за зареждане на латентния акумулатор, W ;

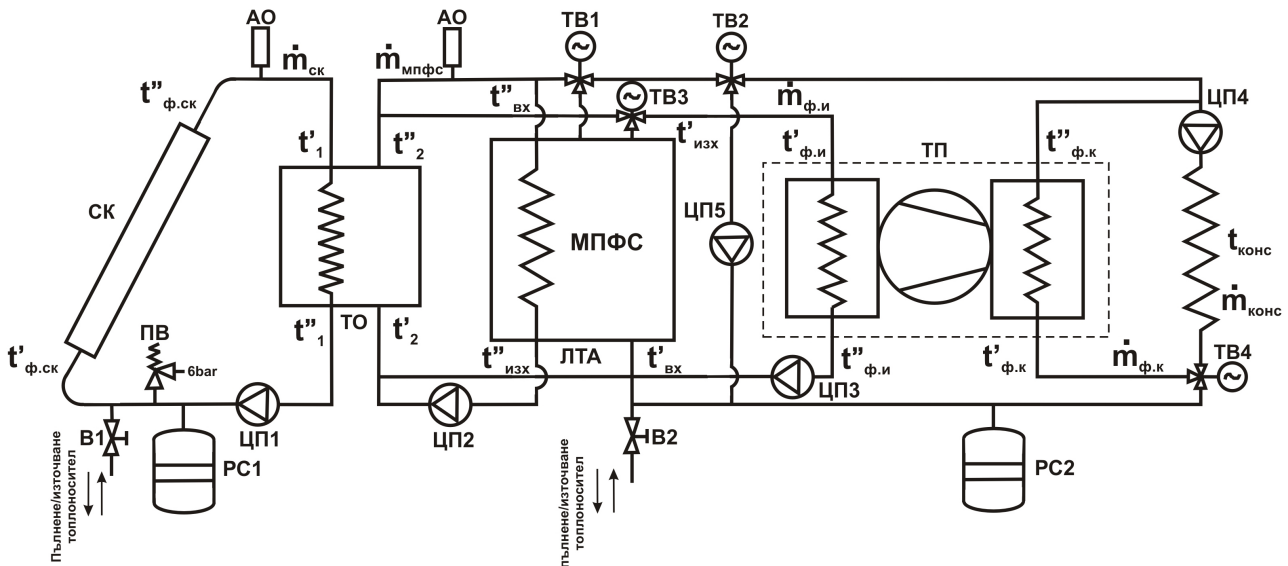
$N_{цп}^{сmp}$ – консумирана мощност от циркуляционната помпа, включена в контура за намаляване на стратификацията в латентния акумулатор, W ;

$N_{цп}^{изп}$ – консумирана мощност от циркуляционната помпа, включена в контура на изпарителя, W ;

$N_{цп}^{ск}$ – консумирана мощност от циркуляционната помпа, включена в контура на кондензатора, W ;

$N_{ел}^{упр}$ – консумирана мощност от управляващата системата микропроцесорна апаратура, измервателно и друго оборудване, W .

Принципна схема на изпитваната слънчева система е показана на Фиг.1.



- СК - слънчев колектор
- ТО - топлообменник
- ЛТА - латентен топлинен акумулатор
- ТП - термopомпа
- ЦП - циркуляционна помпа
- РС - затворен разширителен съд

- АО - автоматичен обезвъздушител
- В - ръчен вентил
- ТВ - трипътен електромагнитен вентил
- МПФС - материал с промяна на фазовото състояние
- ПВ - предпазен вентил за 6 bar

Фиг. 1 Принципна схема на слънчева система с течностни слънчеви колектори, латентен акумулатор и термopомпа „вода-вода“

4. Провеждане на изпитанието

4.1. Видове измервани величини:

- Интензитет на сумарната слънчева радиация върху равнината на слънчевия колектор – $I_{ск}$, W/m^2 ;

- Температура на околната среда – $t_{ок}$, $^{\circ}C$;

- Температура на външната страна на изолационния слой на латентния акумулатор – $t_{изол}$, $^{\circ}C$;

- Входяща температура на топлоносителя в слънчевия колектор – $t'_{ф.ск}$, $^{\circ}C$;

- Изходяща температура на топлоносителя от слънчевия колектор – $t''_{ф.ск}$, $^{\circ}C$;

- Температура на топлоносителя в контура на слънчевия колектор, измерена на входа на топлообменния апарат – t'_1 , $^{\circ}C$;

- Температура на топлоносителя в контура на слънчевия колектор, измерена на изхода на топлообменния апарат – t''_1 , $^{\circ}C$;

- Температура на топлоносителя в контура на латентния акумулатор, измерена на входа на топлообменния апарат – t'_2 , $^{\circ}C$;

- Температура на топлоносителя в контура на латентния акумулатор, измерена на изхода на топлообменния апарат – t''_2 , $^{\circ}C$;

- Входяща температура на топлоносителя в изпарителя на термopомпата – $t'_{ф.и}$, $^{\circ}C$;

- Изходяща температура на топлоносителя от изпарителя на термopомпата – $t''_{ф.и}$, $^{\circ}C$;

- Входяща температура на топлоносителя в кондензатора на термopомпата – $t'_{ф.к}$, $^{\circ}C$;

- Изходяща температура на топлоносителя от кондензатора на термopомпата – $t''_{ф.к}$, $^{\circ}C$;

- Входяща температура на топлоносителя в контура на топлообменния апарат, измерена на входа на латентния акумулатор – $t''_{вх}$, $^{\circ}C$;

- Изходяща температура на топлоносителя в контура на топлообменния апарат, измерена на изхода на латентния акумулатор – $t''_{изх}$, $^{\circ}C$;

- Входяща температура на топлоносителя в контура на термopомпата или консуматора, измерена на входа на латентния акумулатор – $t'_{вх}$, $^{\circ}C$;

- Изходяща температура на топлоносителя в контура на термopомпата или консуматора, измерена на изхода на латентния акумулатор – $t'_{изх}$, $^{\circ}C$;

- Температура измерена при консуматора – $t_{конс}$, $^{\circ}C$;

- Масов дебит на топлоносителя в контура на слънчевия колектор и топлообменния апарат – $m_{ск}$, kg/s ;

- Масов дебит на топлоносителя в контура на топлообменния апарат и латентния акумулатор – $m_{МПФС}$, kg/s ;

- Масов дебит на топлоносителя в контура на изпарителя на термopомпата и латентния акумулатор – $m_{ф.и}$, kg/s ;

- Масов дебит на топлоносителя в контура на кондензатора на термopомпата и консуматора – $m_{ф.к}$, kg/s ;

- Масов дебит на топлоносителя в контура на консуматора – $m_{конс}$, kg/s ;

- Налягане на хладилния агент в изпарителя на термopомпата – $p_{х.и}$, kg/cm^2 ;

- Налягане на хладилния агент в кондензатора на термopомпата – $p_{х.к}$, kg/cm^2 ;

- Скорост на вятъра – v , m/s ;

- Консумирана мощност от компресора на термopомпата – N_{mn} , W ;

- Консумирана мощност от циркуляционната помпа, включена в контура на слънчевия колектор – $N_{цп}^{ск}$, W ;

- Консумирана мощност от циркуляционната помпа, включена в контура за зареждане на латентния акумулатор – $N_{цп}^{МПФС}$, W ;

- Консумирана мощност от циркуляционната помпа, включена в контура за намаляване на стратификацията в латентния акумулатор – $N_{цп}^{смп}$, W ;

- Консумирана мощност от циркуляционната помпа, включена в контура на изпарителя – $N_{цп}^{изп}$, W ;

- Консумирана мощност от циркуляционната помпа, включена в контура на кондензатора – $N_{цп}^к$, W ;

- Консумирана мощност от управляващата системата микропроцесорна апаратура, измервателно и друго оборудване – $N_{ел}^{уп}$, W .

4.2. Условия и режими на изпитване:

4.2.1. Измерването на всички величини в дадения режим се провежда едновременно през всеки 3 минути, в течение на 27 минутен

интервал.

4.2.2. Изпитанията се провеждат в квазистационарни условия.

4.2.3. Изпитваните колектори се ориентират към Слънцето и се установяват с ъгъл на наклон към хоризонта равен на $\varphi - \delta$, където φ е географската ширина, а δ е деклинацията.

4.2.4. В течение на 27 минутния интервал на измерване е задължително да се изпълнят следните условия:

- масовите дебити на топлоносителите в контурите на: слънчевите колектори $m_{ск}$, топлообменния апарат и латентния акумулатор $m_{МПФС}$, изпарителя на термопомпата и латентния акумулатор $m_{ф.и.}$, кондензатора на термопомпата $m_{ф.к}$, консуматора $m_{конс}$, трябва да се поддържат с точност $\pm 5\%$;

- измерваните температури трябва да се поддържат с точност $\pm 1^\circ C$;

- изменението на интензитета на сумарната слънчева радиация не трябва да превишава $\pm 10\%$;

- грешката на монтажа на слънчевите колектори по отношение на ъгъла на наклон към хоризонта не трябва да превишава $\pm 2\%$;

- изменението на измерваните електрически мощности не трябва да превишава $\pm 5\%$;

- изменението на скоростта на вятъра v не трябва да превишава $\pm 0,5 m/s$ (когато $v < 2 m/s$ се приема $v = 0 m/s$).

4.3. Обработка на експерименталните резултати:

4.3.1. Средноинтегралните, за 27 минутния интервал на измерване на температурите се определя както следва:

$$\bar{t} = \left(\frac{t_1 + t_{10}}{2} + \sum_{i=2}^9 t_i \right) \cdot \frac{\Delta \tau_i}{\tau_0} \quad (11)$$

t_1 и t_{10} – стойности на температурите, получени при първо и последно измерване за 27 минутен интервал на измерване, $^\circ C$;

t_i – стойност на температурата, получена при междинни измервания, $^\circ C$;

$\Delta \tau_i = 3 min$ – промеждутък от време между две последователни измервания;

$\tau_0 = 27 min$ – продължителност на един

интервал на измерване;

4.3.2. Средноинтегрална, за 27 минутния интервал на измерване, стойност на интензитета на сумарната слънчева радиация върху повърхността на колектора се определя както следва:

$$\bar{I}_{ск} = \left(\frac{I_1 + I_{10}}{2} + \sum_{i=2}^9 I_i \right) \cdot \frac{\Delta \tau_i}{\tau_0} \quad (12)$$

4.3.3. Средноинтегрална, за 27 минутния интервал на измерване, стойност на масовия дебит на топлоносителите се определя както следва:

$$\bar{m} = \left(\frac{m_1 + m_{10}}{2} + \sum_{i=2}^9 m_i \right) \cdot \frac{\Delta \tau_i}{\tau_0} \quad (13)$$

4.3.4. Средноинтегрална, за 27 минутния интервал на измерване, стойност на налягането на хладилния агент на кондензация и изпарение:

$$\bar{p} = \left(\frac{p_1 + p_{10}}{2} + \sum_{i=2}^9 p_i \right) \cdot \frac{\Delta \tau_i}{\tau_0} \quad (14)$$

4.3.5. Средноинтегрална, за 27 минутния интервал на измерване, стойност на скоростта на вятъра се определя както следва:

$$\bar{v} = \left(\frac{v_1 + v_{10}}{2} + \sum_{i=2}^9 v_i \right) \cdot \frac{\Delta \tau_i}{\tau_0} \quad (15)$$

4.3.6. Средноинтегралните, за 27 минутния интервал на измерване, стойности на електрическите мощности на компресора на термопомпата и циркуляционните помпи се определя както следва:

$$\bar{N} = \left(\frac{N_1 + N_{10}}{2} + \sum_{i=2}^9 N_i \right) \cdot \frac{\Delta \tau_i}{\tau_0} \quad (16)$$

4.4. Точност на измерваните величини:

4.4.1. Допустими отклонения на пряко измерваните величини:

- интензитетът на сумарната слънчева радиация трябва да се измерва с точност $\pm 2\%$;

- температурите трябва да се измерват с точност $\pm 2\%$;

- масовият дебит на топлоносителите трябва да се измерват с точност $\pm 2\%$;

- скоростта на вятъра трябва да се измерва с точност $\pm 6\%$;

- електрическите мощности трябва да се измерват с точност $\pm 5\%$.

4.4.2. Допустими отклонения на косвено измерваните величини:

- кондензаторната мощност на термopомпата трябва да се измерва с точност $\pm 6\%$;

- пълният полезен топлинен поток, отведен от слънчевите колектори, трябва да се измерва с точност $\pm 6\%$;

- ефективността на слънчевите колектори трябва да се измерва с точност $\pm 6\%$;

- отоплителният коефициент на термopомпата трябва да се измерва с точност $\pm 6\%$;

- общата ефективност на слънчевата система трябва да се измерва с точност $\pm 6\%$.

4.4.3. Използвани измервателни уреди:

- 8-канален програмируем индикатор TC800 (Табл.1.) с 8 входа, 8 изхода, 16 аларми и 2 дисплея — за стойността и за канала. Уредът има програмируеми обхвати и алармени граници, самодиагностика и системна аларма, както и възможност за сериен интерфейс RS485 [7];

Табл. 1 Технически характеристики на TC800

Аналогови входове	
Pt100 ($w=1.385$)	от -100 до +200 °C
Линеен напреженосен 0...1/ 2/ 5/ 10 V	от -999 до 9999, програмира се
Линеен ток 0(4)...20 mA	от -999 до 9999, програмира се
Цифрови входове	
Брой	2
Вид на входния сигнал	контакт
Функция на 1ви вход	външен избор на канал
Функция на 2ри вход	външна защита на програмата
Изходи	
Реле електромеханично	3A/250V
Реле електронно (SSR)	1A/250VAC
МОП ключ	0,1A/60V, оптично изолиран
Изход за външно SSR	от 5 до 24 V, 30 mA
Системна аларма	EMP с НО/НЗ контакт, реле № 9
Сериен интерфейс	RS485, изолиран
Захранване	
Мрежово захранване	230 VAC
Импулсно захранване	от 90 до 250 V
Изолирано	от 12 до 24 VAC

нисковолтово	
Консумирана мощност	макс. 4 VA
Индикация и настройка	
Дисплей за номер на канала	2 разряда LED, 14 mm; зелен
Дисплей за стойността	4 разряда LED, 14 mm; червен
Работни условия	
Околна температура	от -10 до 65 °C
Околна влажност	от 0 до 85 %RH
Конструкция	
Габаритни размери	96x96x107 mm
Тегло	макс. 650 g
Защита, лице/клеми	IP54/IP20

- Универсален програмируем брояч СТ34 (Табл.2.) със 6 различни режима на работа, 2 регулируеми релейни изхода и оптична изолация на входа до 1500 VAC [7]. Уредът работи като брояч на импулси с програмируеми делител и множител, оборотомер, честотомер и комбиниран режим. Има възможност за натрупване;

Табл. 2 Технически характеристики на СТ34

Входове	
Броячен импулсен вход с настройка на фронта	механичен контакт (НО) или електронен (от PNP/NPN датчик)
Максимална честота	5 kHz
Входен филтър	за трептения
Мащабиращи коефициенти	програмират се от 1 до 9999
Режими	
Режими на работа	7
Режими на броене	на импулси или на партиди
Обхват на броене програмиране	от 0 до 2147483647 чрез клавиатурата
Изходи	
Реле електромеханично МОП ключ	5A/250V с НЗ контакт 0,1A/60V, оптично изолиран
Изход за външно SSR	от 5 до 24V, 30 mA
Време на изходния импулс	от 0,1 до 99,9 s, програмират се
Индикация и настройка	
Дисплей за измерване	6 разряда LED, 9 mm
Светодиоди	2 LED за изходите
Клавиатура	4 мембранни бутна
Захранване	
Импулсно захранване	от 90 до 250 VAC/DC
Неизолирано нисковолтово	от 12 до 24 VAC/DC

Консумирана мощност	макс. 6VA
Работни условия	
Работна температура	от -10 до +65 °C
Работна влажност	от 0 до 85% RH
Конструкция	
Габаритни размери	48x48x110 mm
Максимално тегло	200 g
Защита, лице/клеми	IP 54/20

- Измерител на мощност EL-EPM02FHQ, показан на Фиг.2, с технически характеристики посочени в Табл. 3 [8].



Фиг. 2 Измерител на мощност EL-EPM02FHQ [8]

Табл. 3 Технически характеристики на EL-EPM02FHQ

Захранващо напрежение	220V/ 50Hz
Максимален товар	16A, 3680W
Точност на измерваната мощност	+/-0,5 % max
Собствена консумация	<0,5W
Точност на часовника	+/-1min. за месец

Уредът измерва също максимална мощност, ток и напрежение.

4. Заключение

Слънчевите топлинни системи ефективно използват част от достигащата земната повърхност слънчева енергия за производство на топла вода и за отопление на сгради на битови и промишлени консуматори. Добавянето на топлинни акумулатори с МПФС, съхраняващи латентната топлина е съвременно решение при изграждането на слънчевите топлинни инсталации и подобрява тяхната ефективност. Това се дължи на възможността МПФС да съхраняват 5-14 пъти повече топлина за единица обем от материалите за съхранение на явна топлина [4,6].

Благодарности

Работата беше подкрепена финансово от:
- Вътрешен проект към ТУ София за подкрепа на докторанти 132ПД0023-24/28.03.2013.

- Вътрешен научен проект към ТУ София № 102ни063-24 от 05.05.2010.

ЛИТЕРАТУРА

1. Георгиев А., С. Табакова, Р. Попов, И. Вълков, С. Моев, С. Бързилова, С. Лишев, К. Такев, А. Василев, А. Бойчев, Изграждане и моделиране на топлинен енергиен акумулатор на основата на материали с промяна на фазовото състояние, J. of Technical University of Plovdiv, 2011, Vol. 16, book 2, "Fundamental Sciences and Applications", 45-51.

2. Георгиев А., Я. Картелов, Изпитване на система термопомпа "вода-вода" - водни слънчеви колектори. Топлотехника за бита, 2004, №12, 15-18.

3. ANSI/ASHRAE Standard 94.1-2002, Method of Testing Active Latent-Heat Storage Devices Based on Thermal Performance, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc..

4. Bal, L., S. Satya, S. Naik, Solar dryer with thermal energy storage systems for drying agricultural food products: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010), pp. 2298–2314.

5. Georgiev, A., Testing solar collectors as an energy source for a heat pump, Renewable Energy 33 (2008), pp.832–838.

6. Sharma, A., V. Tyagi, C. Chen, D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. Energy Reviews 13 (2009) 318–345.

7. www.comecogroup.com

8. <http://ebookbrowse.net/gdoc.php?id=216049148&url=3c13c6e3643a643da37a4a34a6912674>

Department of Mechanics
Technical University–Sofia, Branch Plovdiv
25 Tsanko Dystabanov St.
4000 Plovdiv
BULGARIA
E-mail: anastas.stoyanov@abv.bg



КОРОЗИОНЕН ПОТЕНЦИАЛ НА СТОМАНА 1.4439

АНТОН ДЕМИРЕВ

Резюме: В промишлени условия е определен електродният потенциал на неръждаема стомана 1.4439. Стоманата е конструкционен материал на технологично съоръжение, работещо в среда на сяронокисел електролит за хидрометалургичен добив на цинк. Измерванията са проведени в експлоатационен режим на съоръжението, без прекъсване на технологичния процес. Получените резултати показват наличието на потенциална разлика между различни точки на съоръжението, което е предпоставка за развитието на електрохимичен корозионен процес.

Ключови думи: стомана 1.4439, корозионен потенциал

CORROSION POTENTIAL OF STEEL 1.4439

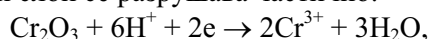
ANTON DEMIREV

Abstract: In industrial conditions defined electrode potential of stainless steel 1.4439. Steel is a construction material technology of plant operating in an environment of sulfuric acid electrolyte for the hydrometallurgical extraction of zinc. Measurements were performed in the operating mode of the unit without interrupting the process. The results indicate a potential difference between different points of the facility, which is a prerequisite for the development of electrochemical corrosion process.

Key words: steel 1.4439, corrosion potential

1. Въведение

Хром – никеловите стомани показват високо корозионно съпротивление в много среди [1]. Въпреки това, след нагряване и последващо бавно охлаждане, образуващите се като резултат от високата скорост на дифузия на въглерода и азота в сплавта карбиди и нитриди на хрома ги правят податливи на интеркристална корозия [2]. От друга страна, в силно кисела среда, формиращият се на метала пасивен слой се разрушава частично:



което дава възможност за развитието върху металната повърхност на локални корозионни

процеси. Всичко това обикновено налага мероприятия по защита на съоръжения от тези сплави, работещи в тежки производствени условия – дори когато стоманата съдържа и молибден.

Оценката на корозионния риск при всяка конкретна система и изборът на метод за защита изискват определянето на електродния потенциал на метала. Във водни разтвори електродите винаги се разглеждат като смесени [3], поради протичането на повече от една спрегнати електродни реакции. Определеният от стационарното състояние на електродната система неравновесен потенциал всъщност е

корозионен (смесен). Корозионният потенциал, E_c , V, е свързан с макропроцес, който при дадени условия е достигнал стационарно състояние и макар да не обезпечава информация за неговата кинетика, той може да даде полезни указания за активното (пасивното) поведение на сплавта в дадени условия. Определянето на потенциала е намерило широко разпространение в прилагането на катодни и анодни системи за електрохимична защита [4].

Цел на настоящото изследване е да бъде определен електродният потенциал, E_c , V, на стомана 1.4439 в производствени условия. Стоманата е основен конструкционен материал на технологично съоръжение в промишлено предприятие, за което експлоатационният опит е показал необходимостта от проектирането на антикорозионна защита.

2. Методика

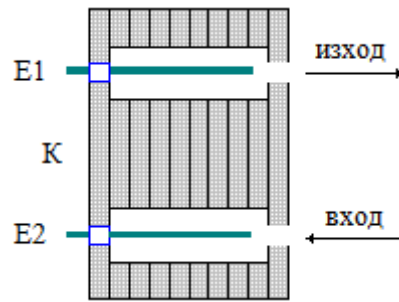
Конструкцията на съоръжението не позволява измерването на електродния потенциал на стоманата спрямо някой от познатите сравнителни електроди. По тази причина той е определен спрямо електроди от неръждаема стомана Ø 18, облечена в лист пирометалургично олово 99.95 % с дебелина 2 mm.

Потенциалът на металите е измерен в лабораторни условия. Използван е наситен каломелов електрод, чийто равновесен потенциал E_{SCE} при 293 K е + 0.242 V [5]. При всички измервания са отчитани достигнатите стационарни стойности на електродния потенциал, след което те са отнесени към стандартен водороден електрод (SHE).

Отново в лабораторни условия е измерена и потенциалната разлика между стоманата и оловия сравнителен електрод (Pb 99.95 %). Всички лабораторни тестове са проведени температура 293 и 313 K в работната среда на съоръжението – сяроокисел електролит за хидрометалургичен добив на цинк, с помощта на дигитален мултиметър V 560 с клас на точност 1.5.

Преди провеждането на тестовете в промишлени условия се извърши замерване на електричното съпротивление между корпуса на съоръжението и цеховия заземяващ контур. То показва неговото изолиране от железобетонната конструкция на сградата.

Монтажът на оловните електроди (E1 и E2) се извърши в пространството между захранващия и изходен колектор на съоръжението, изолирани спрямо неговия корпус (K). Температурата на флуида на вход/изход е съответно 295 и 313 K – фигура 1:



Фиг. 1. Схема на експеримента

Измерванията са извършени с волтметър DT 890 В, като общия проводник на уреда COM се свързва към корпуса K.

3. Резултати и обсъждане

Измерените и приведени към стандартен водороден електрод потенциали на стоманата и оловото са показани в таблица 1. Също там са дадени и измерените между тях потенциални разлики. Взети са предвид усреднените стойности на измерваната величина при петкратно измерване:

Таблица 1

Стойности на електродните потенциали на стомана 1.4439 и олово 99.95 % в сяроокисел електролит (лабораторно измерване)

$E_{\text{олово}}, V$		$E_{\text{стомана}}, V$		$\Delta E_{\text{измерена}}, V$	
293 K	313 K	293 K	313 K	293 K	313 K
+ 0.140	+ 0.100	+ 1.104	+ 1.082	+ 0.964	+ 0.987

Очевидно, в условията на експеримента, оловото достига до пасивното си състояние – потенциалът му се отества от стандартната му стойност в положителна посока с ~ 300 mV.

Разликата между измерените при различни температури (293 и 313 K) стационарни потенциали може да се обясни с известното влияние на температурния фактор върху корозионното поведение на металите. Вероятно това влияние е различно върху тестваните метали, тъй като се забелязва и нарастване на потенциалната разлика между тях с нарастването на температурата.

Резултатите от проведените в промишлени условия измервания на електродния потенциал на стоманата спрямо сравнителните електроди – олово 99.95 %, са представени в таблица 2. Корпусът на съоръжението (стомана 1.4439) остава електроположителен спрямо сравнителните електроди при всички проведени тестове. Това показват и посочените по-горе резултати от лабораторните изследвания. Същевременно, между захранващия и изходен колектор на

съоръжението, е установена потенциална разлика:

Таблица 2

Стойности на електродния потенциал на стомана 1.4439 спрямо потенциала на олово 99.95 % в сяроокисел електролит

№	1	2	3	4	5
между електроди E1 и E2					
$E_{E1/E2}, V$	+0.05	+0.02	+0.03	-0.09	-0.01
между корпус К и електрод E1					
$E_{E1/K}, V$	-0.93	-0.96	-1.03	-1.00	-0.97
между корпус К и електрод E2					
$E_{E2/K}, V$	-0.89	-0.86	-0.95	-0.96	-0.90

Средноквадратична неопределеност [6] на измерваната величина S_x има стойности между 0.0014 и 0.0017. Това показва добро съвпадение на данните от измерванията, особено като се имат предвид динамичните условия при които те са проведени.

Регистрираната потенциална разлика между захранващия и изходен колектор на съоръжението варира при отделните измервания между 40 и 100 mV, но винаги електроотрицателен остава да бъде изхода на флуида. При различния температурен режим на вход/изход електролит това е очаквано с оглед термодинамиката на електродните системи [7].

Съществуването на потенциална разлика между две точки на поставена в контакт с електролит метална повърхност е основната предпоставка за възникването и непрекъснатото протичане на електрохимичен корозионен процес. В изследвания случай такава разлика се поддържа от термичния фактор и въпреки силно положителния стационарен потенциал (над +1V) на сплавта такъв процес става възможен.

В среда на сярна киселина и при ограничения достъп на атмосферен кислород се очаква стомана 1.4439 да кородира с водородна деполяризация. Кинетиката на процесите в тези случаи силно зависи от водородното свръхнапрежение, което определя скоростта на корозионния процес.

4. Заключение

В промишлени условия е определен корозионния потенциал на неръждаема стомана 1.4439. Измерванията са проведени при експлоатационен режим в работната среда на сплавта – сяроокисел електролит за добив на цинк. Получените резултати показват:

- положителни стойности на корозионния (смесения) потенциал на стоманата в средата, в която работи;

- наличието на потенциална разлика между различни точки на металната повърхност, което най-вероятно се дължи на температурни различия;

- възможна електрохимична корозия на стоманата с участието като деполяризатор на водородните йони от електролита.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Dundas, H.J.; Bond, A.P.** Intergranular Corrosion of Stainless Alloys, ASTM, Philadelphia, 1978.
- 2. Cowan II, R.L.; Tedmon Jr., C.S.** Corrosion Science and Technology, Plenum Press, New York, 1973.
- 3. Л. Киш** Кинетика електрохимического растворения металлов, Мир, Москва, 1990.
- 4. V. Ashworth and C. J. L. Booker** Cathodic Protection. Theory and Practice, Ellis Horwood, Chichester, 1986.
- 5. M. S. Antelman and F. G. Harris** The encyclopedia of chemical electrode potentials, Plenum press, New York, 1982.
- 6. European co-operation for accreditation EA – 4/16** Указания на ЕА за изразяване на неопределеността при количествени изпитания, 2003.
- 7. В. Бъкман, В Швенк** Катодная защита от коррозии, Металлургия, Москва, 1984.

Department of Mathematics, Physics, Chemistry
 Technical University–Sofia, Branch Plovdiv
 25 Tsanko Dystabanov St.
 4000 Plovdiv
 BULGARIA
 E-mail: a.demirev@abv.bg



ЕДИН НЕЛИНЕЕН ПАРАМЕТРИЧЕН МОДЕЛ ОТ ВТОРА СТЕПЕН ЗА ВРЕМЕТО НА ЖИВОТ НА UV Cu⁺ Ne-CuBr ЛАЗЕР

ИЛИЙЧО ИЛИЕВ

Резюме: За първи път е развит нелинеен параметричен модел от втора степен за определяне влиянието на 10 независими лазерни величини на времето на живот на UV Cu⁺ Ne-CuBr лазер. С методите на регресионния анализ и на основата на голямо количество експериментални данни е получено регресионно уравнение от втора степен, което описва в явен вид зависимостта на времето на живот на лазерния източник. Направена е оценка за адекватността на регресионното уравнение. На негова основа е оценена степенята на влияние на всичките 10 независими величини. Направен е анализ и физическа интерпретация на получените резултати.

Ключови думи: UV Cu⁺ Ne-CuBr лазер, регресионен анализ, нелинеен параметричен модел от втора степен, време на живот на лазерния източник

A NONLINEAR PARAMETRIC MODEL OF SECOND DEGREE FOR Cu⁺ Ne-CuBr LASER'S SERVICE LIFE

ILIYCHO ILIEV

Abstract: For the first time a nonlinear parametric model of second degree for determining the influence of 10 independent laser quantities over the ultraviolet (UV) Cu⁺ Ne-CuBr laser's service life is developed. On the basis of a huge amount of experiment data a regression model of second degree is obtained, which describes in an explicit form the dependence of the laser's service life. The adequacy of the regression model is made and the influence of the 10 laser quantities is estimated. Analysis and physical interpretation of the obtained results is performed.

Key words: UV Cu⁺ Ne-CuBr laser, regression analysis, nonlinear parametric model of second degree, laser's service life

1. Въведение

За лазерите с пари на медта и нейните съединения се смята, че са добре познати и изучени. Те притежават редица уникални свойства - продължават да са най-мощните източници във видимия диапазон (516.6 nm и 578.2 nm), имат по-висока кохерентност и

сходимост на лазерния лъч. По тази причина те продължават да бъдат обект на активно развитие и са предмет на комерсиален интерес. Особено активно този тип лазери се развиват като източници на УВ излъчване. Медният йонен лазер с пари на меден бромид UV Cu⁺ Ne-CuBr е иновационен продукт с големи перспективи

поради уникалните си свойства и стабилна работа. Първите лазери от този тип са конструирани в Лабораторията по ЛМП към ИФФТ на БАН през 1999 г. [1]. Медният йонен лазер с пари на меден бромид излъчва в дълбоката ултравиолетова зона при пет спектрални линии - 248.6, 252.9, 259.7, 260.0 и 270.3 nm. Експериментално е достигната максимална средна изходна мощност от 1.3 W за всичките пет линии и 0.85 W за линията 248.6 nm. Установено е също, че малки добавки на водород (0.02-0.04 Torr) увеличават двойно лазерната мощност.

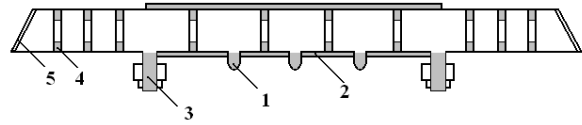
Поради тесния диапазон на излъчването в няколко спектрални линии и високата кохерентност на лъча, медният йонен лазер с пари на меден бромид се прилага за обработки, където е необходима висока разрешителна способност, като запис на информация, флуоресценция, фино пробиване, рязане, изчистване, модифициране на нови материали, физикохимията и др. [1-2]. Намира разнообразни приложения в медицината, микроелектрониката, микробиологията, фотолитографията, генетичното инженерство и др. Предстои разработването му до стадий за промишлено внедряване. За ускоряване на този процес се провеждат както експериментални изследвания, така и изследвания с помощта на математическо и статистическо моделиране [3 - 4] и софтуерния прототип LasSim [5].

Изходната лазерна мощност е най-важната изходна характеристика за лазерните изделия, в т.ч. и за лазерите с пари на металите и техните съединения. Тази характеристика е предмет на многобройни експериментални и теоретични изследвания. Независимо, че лазерните изделия не са предмет на масово производство, често се изследва и друга изходна характеристика - лазерната ефективност. На практика отсъстват изследвания, свързани със срока на служба на лазерното изделие. Тази изходна величина е изключително важна за промишленото приложение на лазера като цяло и присъства навсякъде в характеристиките на лазерния източник.

Целта на настоящата статия е чрез методите на регресионния анализ да се продължи изследването на срока на служба на UV Cu+ Ne-CuBr лазер. Първоначален линеен параметричен модел от първа степен е развит в [6]. По същество тази статия се явява продължение на [6]. Тъй като лазерните източници имат силно нелинеен характер, важно е установяване на нелинейните зависимости и тяхното влияние на времето на живот на лазерния източник.

2. Предмет на изследване

Предмет на изследване е медният йонен лазер с пари на меден бромид, създаден в Лабораторията по лазери с пари на металите към Института по физика на твърдото тяло „Акад. Георги Наджаков”, БАН [1, 2]. Обща схема на лазерната тръба е дадена на Фиг. 1.



Фиг. 1. Принципна схема на лазерна тръба:

1- резервоари с меден бромид, 2- топлинна изолация на активния обем, 3- медни електроди, 4-вътрешни диафрагми (пръстени), 5- изходни прозорци

Ще разгледаме следните 10 независими величини (предиктори): D (mm) – вътрешен диаметър на лазерната тръба, DR (mm) – вътрешен диаметър на пръстените, L (cm) – разстояние между електродите (дължина на активната зона), PIN (kW) – входна мощност с отчитане на загубите, $PH2$ (Torr) – налягане на водорода, PL (W/cm) – специфична мощност на единица дължина, PRF (kHz) – честота на повторение на импулсите, PNE (Torr) – налягане на неона, C (nF) – еквивалентен капацитет на кондензаторната батерия, TR (°C) – температура на резервоара с меден бромид.

Зависима изходна величина ще бъде $Ltime$ – срок на служба на лазерния източник.

3. Класификация на лазерните параметри с метода на множествената регресия

Множественият регресионен анализ се използва за построяване на модели, количествено описващи връзките между няколко независими променливи (предиктори или регресори) x_1, x_2, \dots, x_p и една или няколко зависими от тях променливи y . Търси се някаква явна функционална зависимост от типа $\hat{y} = f(x_1, x_2, \dots, x_p; a_1, a_2, \dots, a_m)$, отразяваща влиянието на отделните независими променливи на зависимата величина. При условие за нормално разпределение на всички променливи, регресионното уравнение е линейно относно коефициентите на регресия и има вида:

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1x_{i1} + b_2x_{i2} + \dots + b_px_{ip}, \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

където $y_i = \hat{y}_i + \varepsilon_i$, $i = 1, 2, \dots, n$, b_0, b_1, \dots, b_p са коефициентите на регресия, $\varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n)$ е вектор на грешките, n е размерът на извадката.

За определяне на относителното влияние на всяка независима величина се използва трансформация с помощта на z -значения. Получава се стандартизирано регресионно уравнение от вида:

$$\hat{y} = \beta_1 z_1 + \beta_2 z_2 + \dots + \beta_p z_p \quad (2)$$

В (2) коефициентите $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ се наричат стандартизирани коефициенти. Те показват относителното влияние на всяка една от независимите величини на зависимата променлива в намереното уравнение. За определянето на коефициентите на регресия се използва добре известният метод на най-малките квадрати.

Както вече бе отбелязано, целта на дадената статия е да се определи степента на влияние на всяка една от десетте независими величини на зависимата величина *LTime*. Направените изследвания до този момент за изходните характеристики изходна лазерна мощност и лазерна ефективност показаха, че тези величини зависят нелинейно от десетте независими величини. По тази причина ще

търсим коефициентите на регресионно уравнение от втора степен от вида:

$$Ltime = \sum_{\substack{i,j=0 \\ i \leq j}}^{10} a_{i,j} x_i x_j \quad (3)$$

В уравнение (3) участват величините от първа степен и всички възможни комбинации от два елемента, включително и повторенията. Необходимо е да бъдат определени общо 65 неизвестни коефициенти. От всички неизвестни коефициенти трябва да изберем само тези, които са статистически значими, в частност с ниво на значимост $Sig. < 0,05$. За тази цел с помощта на програмния продукт SPSS провеждаме регресията с метода на постъпкова регресия (Stepwise). Последната има това предимство, че следи за нивото на значимост на неизвестните коефициенти. Всеки един коефициент, за който не е изпълнено условието $Sig. < 0,05$, се отстранява като и повече не участва в регресионния анализ. Получените резултати са показани в Табл. 1. За конкретния случай са необходими 10 стъпки, за да бъдат изчислени всички статистически значими коефициенти, а всички незначими да бъдат отхвърлени.

На основание на получените резултати в Табл.1, можем да запишем следното нестандартизирано уравнение:

$$\begin{aligned} \hat{Ltime} = & 4182,369 - 99,837PL + 1,859D.PNE + 0,493D.TR - 1,132DR.L - 4,445DR.PNE \\ & - 23,277DR.PL - 0,038PIN.PRF - 789,072PNE.PH2 + 0,104PNE.C \\ & + 27,291PH2.TR - 0,020TR.C - 7,827D^2 + 2,439DR^2 + 0,056L^2 \\ & - 0,463PH2^2 + 0,562PRF^2 - 0,006TR^2 + 197,974PL^2 + 0,006C^2 \end{aligned} \quad (4)$$

Таблица 1

Резултати от регресионния анализ. Зависима променлива: *LTime*.

Модел с 10 променливи	Нестандартизирани коефициенти		Стандартизирани коефициенти	Критична стойност t	Значимост Sig
	B	Станд. грешка	Beta		
Константа	4182,369	171,650		24,366	0,000
<i>PL</i>	-99,837	30,456	-0,517	-3,278	0,001
<i>D.PNE</i>	1,859	1,078	0,178	1,724	0,046
<i>D.TR</i>	0,493	0,017	5,563	29,379	0,000
<i>DR.L</i>	-1,132	0,118	-1,007	-9,609	0,000
<i>DR.PNE</i>	-4,445	1,080	-0,429	-4,115	0,000
<i>DR.PL</i>	-23,277	3,164	-0,616	-7,358	0,000
<i>PIN.PRF</i>	-0,038	0,007	-0,650	-5,314	0,000
<i>PNE.PH2</i>	-789,072	203,875	-0,765	-3,870	0,000
<i>PNE.C</i>	0,104	0,019	0,969	5,504	0,000
<i>PH2.TR</i>	27,291	6,800	0,789	4,013	0,000

<i>TR.C</i>	-0,020	0,001	-3,257	-19,829	0,000
<i>D.D</i>	-7,827	0,141	-4,800	-55,630	0,000
<i>DR.DR</i>	2,439	0,445	0,515	5,481	0,000
<i>L.L</i>	0,056	0,010	0,189	5,524	0,000
<i>PH2.PH2</i>	-0,463	0,116	-0,289	-4,001	0,000
<i>PRF.PRF</i>	0,562	0,113	0,269	4,979	0,000
<i>TR.TR</i>	-0,006	0,000	-0,685	-15,131	0,000
<i>PL.PL</i>	197,974	24,432	1,124	8,103	0,000
<i>C.C</i>	0,006	0,000	2,445	17,668	0,000

В (4) участват всичките 10 независими величини, като има само една величина от първа степен - *PL*. Всички други величини са от втора степен. Това още веднъж показва, че процесите в лазерната тръба и лазерната генерация са силно нелинейни. На практика всяка една от независимите величини няма самостоятелно въздействие, а чрез сложно взаимодействие с останалите оказва своето влияние на изходната величина *Ltime*.

За проверка за адекватност на (4) е направено изчисление на величината *Ltime* за известни експериментални резултати-колона *LtimePre*. Получените резултати са дадени в Табл.2. От нея се вижда, че средната относителна грешка е в рамките на 2.49%. Това показва, че развитият регресионен модел достатъчно адекватно описва получените експериментални данни.

Таблица 2

Проверка на адекватността на развития модел.

<i>D</i> , mm	<i>DR</i> , mm	<i>L</i> , cm	<i>Pin</i> , W	<i>PNE</i> , Torr	<i>PH2</i> , Torr	<i>PRF</i> , KHz	<i>TR</i> , °C	<i>PL</i> , W/cm	<i>C</i> , pF	<i>Ltime</i> , Hour	<i>LtimePre</i> , Hour	Отн. грешка, %
7	7	87	1300	17	0,03	20	495	7,47	735	180	187,6	4,2
7	7	87	1300	16	0,03	20	495	7,47	735	180	176	2,2
7	7	87	1300	17	0,03	20	495	7,47	735	180	187,6	4,2
7	7	87	1300	17	0,04	20	495	7,47	372,2	700	702,4	0,34
7	7	87	1300	18	0,028	20	495	7,47	372,2	700	679,1	3
7	7	87	1400	17	0,026	20	495	8,05	372,2	700	688,4	1,66
7	7	87	1400	17	0,021	20	495	8,05	372,2	700	685,9	2,01
7	7	87	1400	17	0,031	20	495	8,05	372,2	700	690,8	1,31
7	7	87	1400	17	0,03	20	490	8,05	372,2	700	730,7	4,38
7	7	87	1600	17	0,03	25	490	8,05	372,2	700	711	1,57

Коефициентите на стандартизираното уравнение са дадени в Табл.1, колона Стандартизирани коефициенти (Beta). Както вече бе казано, всеки един коефициент показва степента на влияние на всяка една двойка от независимите величини на *Ltime*. На практика не е възможно да се оцени самостоятелното влиянието на 10 независими величини, защото всяка една от тях не действа непосредствено на *Ltime*, а само с комбинация с някоя от останалите величини, при това повече от един път.

По тази причина, за оценка степента на влияние на всяка една от 10 независими величини ще използваме нестандартизираното уравнение (4). На база последния ред в Табл. 2 всяка една от 10 величини е увеличена в

рамките на 10%, изчислена е новата стойност на *Ltime* и нейното относително изменение в %.

Резултатите са показани в Табл.3.

4. Анализ и физическа интерпретация на получените резултати

Получените резултати от Табл. 3 показват в относително величини степента на влияние на всяка една от независимите величини на величината *Ltime*. Ще се спрем на влиянието на само 4 от тях, за които има ясна физическа интерпретация- това са величините *TR*, *C*, *PH2* и *PRF*.

Величината *TR* има негативно влияние на *Ltime*. С увеличаване на температурата на резервоара се увеличава концентрацията на парите на CuVg и лазерната генерация нараства.

Но в същото време се увеличават загубите на CuBr поради дифузия в студените зони на лазерната тръба. Тъй като лазерната тръба е отпоена, увеличените загуби на CuBr довеждат да бързо спадане на лазерната генерация във времето и по този начин величината *Ltime* намалява.

Величината *PRF* също има негативно влияние. С увеличаване на честотата на повторение на хранящите импулси се увеличава разпрашаването на електродите и замърсяването на лазерната среда. Това намалява лазерната генерация и величината *Ltime*.

С увеличаване на величината *C* нараства подаваната електрическа енергия в лазерната тръба съгласно формулата $E = \frac{1}{2} U^2 C$, където *U* е напрежението между електродите на тръбата. Това довежда до физическото разрушаване на лазерната тръба и до намаляване на времето на живот *Ltime*.

Таблица 3
Оценка на относителното влияние на 10 независими величини.

Независими величини, увеличени с 10%	Относително изменение на <i>Ltime</i> , %
<i>D</i>	0,720641
<i>DR</i>	-1,60659
<i>L</i>	-17,3644
<i>PIN</i>	20,83068
<i>PNE</i>	-0,03434
<i>PH2</i>	0,00119
<i>PRF</i>	-0,01495
<i>TR</i>	-2,98427
<i>PL</i>	21,44909
<i>C</i>	-0,80259

Величината *PH2* има позитивно влияние на *Ltime*. С увеличаване на *PH2* при една и съща подавана електрическа мощност намалява токът през тръбата за сметка на увеличаване на приложеното напрежение. По-ниският ток намалява разпрашаването на електродите и тръбата живее по-дълго. *Ltime* расте.

5. Заключение

За първи път е развит явен параметричен модел от втора степен за времето на живот на UV Cu+ Ne-CuBr лазер. Получено е регресионно уравнение от втора степен, в което участват всичките 10 независими променливи. Направена е оценка за адекватност на статистическия

модел с известни експериментални резултати. Направена е качествена оценка за относителното влияние на всяка една от независимите величини на величината *Ltime*. Извършен е анализ и физическа интерпретация на получените резултати.

ЛИТЕРАТУРА

- Vuchkov N. K., K. A. Temelkov, P. V. Zahariev, N. V. Sabotinov.** UV Lasing on Cu+ in a Ne-CuBr pulsed longitudinal discharge. IEEE J. Quantum Electron, Vol. 35, No. 12, 1999, 1799-1804.
- Vuchkov N.** High discharge tube resource of the Uv Cu+ Ne-CuBr laser and some applications. In: New Development in Lasers and Electric-Optics Research, ed. W. T. Arkin, Nova Science Publishers, 2007, 41-74.
- Gocheva-Ilieva S. G., I. P. Iliev.** Statistical models of characteristics of metal vapor lasers, Nova Science Publishers Inc., New York, 2011.
- Gocheva-Ilieva S. G, D. S. Voynikova, I. P. Iliev.** Modeling of output characteristics of a UV Cu+ Ne-CuBr laser. Math Probl Eng, Vol. 2012, No. 420782, 2012, 1-22.
- Gocheva-Ilieva S. G., C. P. Kulin,** Development of LasSim software prototype for simulating physical characteristics of laser devices, Scientific Works of Plovdiv University, Vol. 37, book 3-Mathematics, 45-52.
- I. P. Iliev, S. G. Gocheva-Ilieva.** Study of UV Cu + Ne – CuBr laser lifetime by statistical methods. Quantum electronics, Vol. 43, No. 11, 2013, 1014 – 1018.

Department of Mathematics, Physics and Chemistry
Technical University–Sofia, Branch Plovdiv
25 Tsanko Diustabanov St.
4000 Plovdiv
BULGARIA
E-mail: iliev55@abv.bg



ИЗСЛЕДВАНЕ ПОВЕДЕНИЕТО НА ПРИОРИТЕТНИ ОПАШКИ НА МНОЖЕСТВО НИВА ПРИ НЕПРЕКЪСНАТ ПОТОК ОТ СЪОБЩЕНИЯ

ИВАЙЛО АТАНАСОВ

Резюме: Настоящата статия разглежда реализация на приоритетни опашки на множество нива с ограничен брой приоритети и динамично изчисляване на приоритета. Проведени са експерименти, които проследяват поведението на опашката при непрекъснат поток от съобщения. Целта е да се установи по какъв начин се обслужват различните слотове и дали не се получава продължително необслужване на даден слот за сметка на други.

Ключови думи: приоритетни опашки, планиране, операционни системи, динамичен приоритет

ANALYSIS OF THE MULTILEVEL PRIORITY QUEUES SERVICING

IVAYLO ATANASSOV

Abstract: The current paper offers an implementation of multilevel priority queues with limited set of priorities and dynamic priority calculation. Experiments are conducted to estimate the behavior for everlasting message flow. The goal is to obtain the model of servicing and based on it, to make conclusions about the queuing model.

Key words: priority queue, scheduling, operating systems, dynamic priority

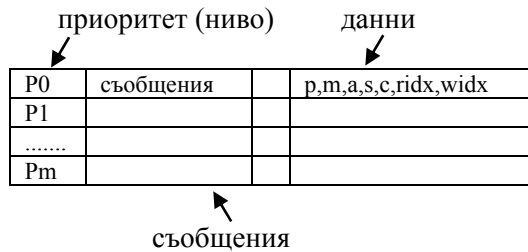
1. Въведение

Приоритетните опашки са широко използвана структура в компютърните системи [1, 2, 3, 9]. Реализират чрез heap, skip lists, дървета, множество нива [4, 5, 6, 7]. Настоящата статия разглежда реализация на приоритетни опашки на множество нива с ограничен брой приоритети [5, 7, 8] и динамично изчисляване на приоритета. Проведени са експерименти за да се проследи поведението на опашките и да се анализира дали се избягва явлението „starvation”

[5, 6], при което се наблюдава продължително необслужване на един или повече слотове. Експериментите са проведени със симулация на непрекъснат поток от съобщения.

2. Структура на опашките

Общата структура на предложената приоритетна опашка на множество нива е представена на фиг. 1.



Фиг. 1. Структура на опашката.

Всяко съобщение се записва в съответното ниво според статичния си приоритет. За всяка от опашките се следи:

- брой на последователно извършени четения
- брой на последователни пропуска, т.е. колко пъти последователно е била необслужена

При заявка за четене за всеки слот се изчислява оценка и на нейна база се взима решение от кое ниво да се прочете поредното съобщение. Отделните опашки се обслужват на FIFO принцип. Формулата за динамично изчисляване на оценката (приоритета) е:

$$M_i = \left\lfloor \frac{P_i * m_i * 2^{k_i+10}}{a_i} \right\rfloor \quad (1)$$

където:

$$k_i = \left\lfloor \frac{s_i}{c_i} \right\rfloor \quad (2)$$

$$c_i = \max p - P_i + d \quad (3)$$

P – статичен приоритет на опашката
 m – брой съобщения в опашката
 a – брой последователни обръщения за четене от опашката

s – брой последователни пропуснати обръщения към опашката

maxp – максимален приоритет

d – параметър за регулиране на нарастването на оценката

Прочитане, премахване и изпълнение на съобщението се извършва за слота с най-висока оценка. На фиг. 2 е представен алгоритъма за намиране на най-високата оценка.

алгоритъм за четене (dequeue)

```
begin
index=0
current_highest_mark = -1
current_index = -1
```

```
for each slot do
begin
mark=according (1)
if mark>current_highest_mark then
begin
slot[current_index].s++
slot[current_index].a=1;
current_index=index
current_highest_mark=mark
end
else
begin
slot[index].s++
slot[index].a=1;
end
index++
end for
if current_index <> -1
begin
slot[current_index].a++
slot[current_index].s=0
read_data_for_slot(current_index)
end
end algorithm
```

Фиг.2. Изчисляване на най-високата оценка.

3. Проведени експерименти

Проведени са експерименти, които да илюстрират поведението на опашката за различни стойности на параметъра d.

Таблица 1. Параметри

параметър	стойност
брой нива	10
брой съобщения	30 000
максимален брой съобщения в опашка	10000
брой нишки за обслужване	10

Следващите таблици показват резултатите от експериментите и графичното им представяне, разделено на две графики. В таблиците колоните са брой обръщения към съответната опашка за серии от 5000 четения, общо 6 серии за 30000 съобщения.

- Qn – съответната опашка.
- Sn – съответната серия от обръщения
- S1 – от 1 до 5000
- S2 – от 5001 до 10000
- S3 – от 10001 до 15000
- S4 – от 15001 до 20000
- S5 – от 20001 до 25000
- S6 – от 25001 до 30000

Таблица 2. Параметър d=1

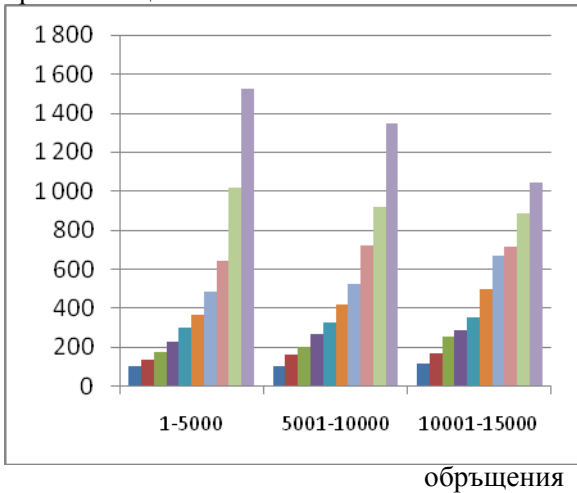
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Q1	103	108	117	124	153	158
Q2	141	161	170	182	238	252
Q3	178	203	253	269	295	296
Q4	232	269	292	319	349	392
Q5	304	330	358	471	599	596
Q6	371	419	501	615	565	628
Q7	485	524	667	668	693	632
Q8	645	722	714	725	744	718
Q9	1 016	918	886	872	905	846
Q10	1 525	1 346	1 042	755	459	482

Таблица 2. Параметър d=3

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Q1	105	116	122	141	155	173
Q2	150	182	194	243	258	294
Q3	205	245	284	300	322	313
Q4	267	310	335	375	390	467
Q5	377	407	431	515	558	606
Q6	474	491	585	609	557	615
Q7	580	608	713	656	675	628
Q8	720	786	763	662	678	662
Q9	990	926	787	722	686	637
Q10	1 132	929	786	777	721	605

Фиг. 3а и 3б са графичното представяне на резултатите.

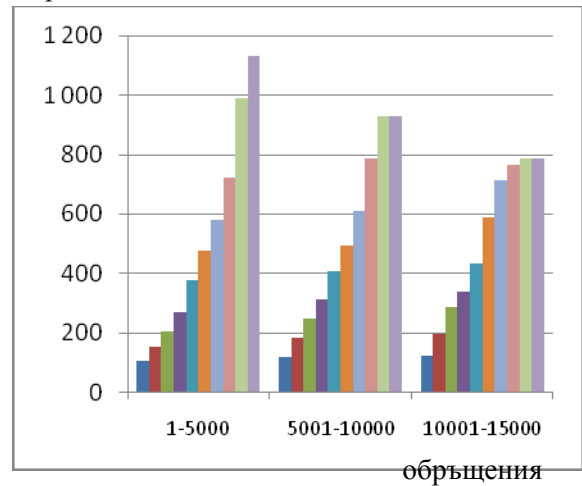
брой съобщения



Фиг. 3а. Серии S1 – S3

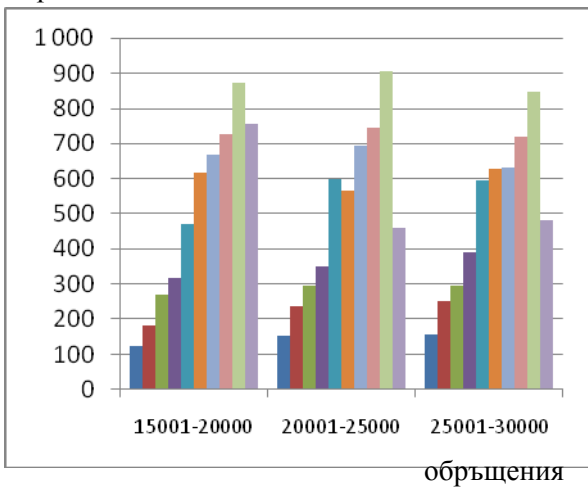
Фиг. 4а и 4б са графичното представяне на резултатите.

брой съобщения



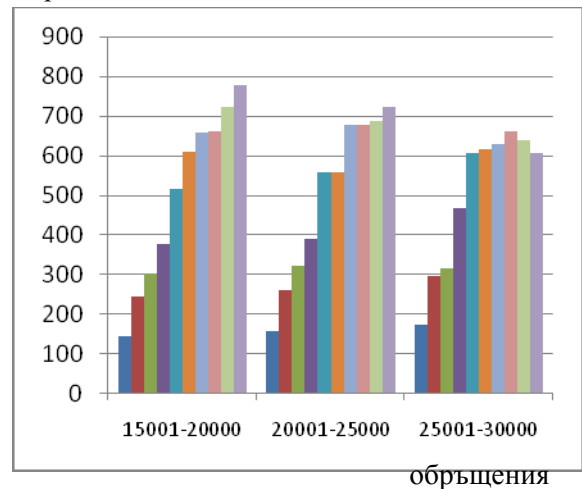
Фиг. 4а. Серии S1 – S3

брой съобщения



Фиг. 3б. Серии S4 – S6

брой съобщения



Фиг. 4б. Серии S4 – S6

Таблица 3. Параметър d=5

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Q1	101	112	113	138	159	161
Q2	148	177	178	280	311	304
Q3	193	270	349	337	341	354
Q4	282	369	361	373	398	401
Q5	417	418	419	531	618	560
Q6	465	468	609	625	532	700
Q7	534	665	696	665	690	571
Q8	675	822	762	650	672	670
Q9	1 053	843	795	718	640	646
Q10	1 132	856	718	683	639	633

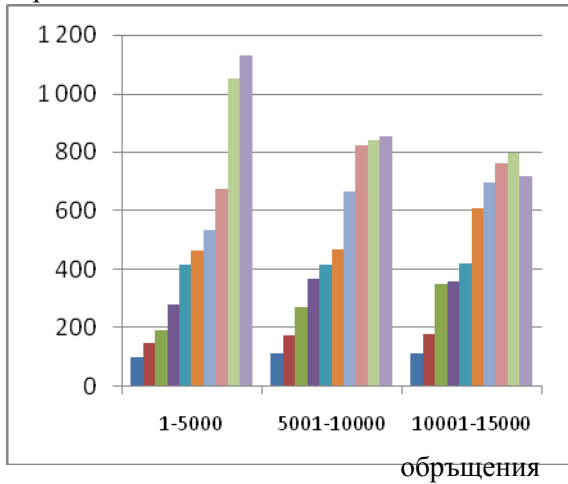
Таблица 4. Параметър d=8

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Q1	88	95	95	134	140	139
Q2	131	150	173	278	277	275
Q3	159	258	298	300	299	298
Q4	254	322	323	323	423	786
Q5	346	351	460	803	683	508
Q6	376	512	801	618	592	658
Q7	412	906	704	661	754	503
Q8	815	789	772	637	712	649
Q9	1 179	809	799	718	589	653
Q10	1 240	808	575	528	531	531

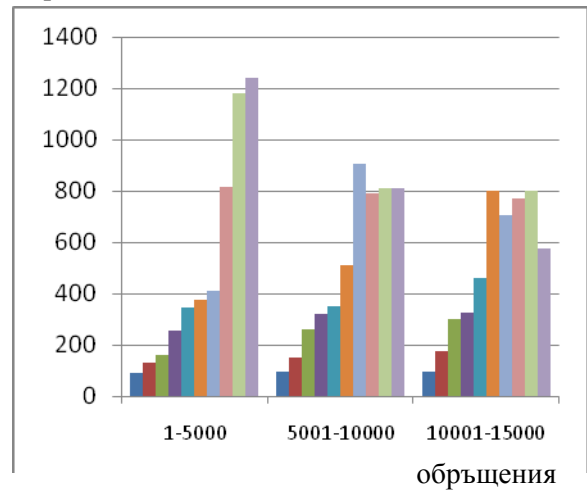
Фиг. 5а и 5б са графичното представяне на резултатите.

Фиг. 6а и 6б са графичното представяне на резултатите.

брой съобщения



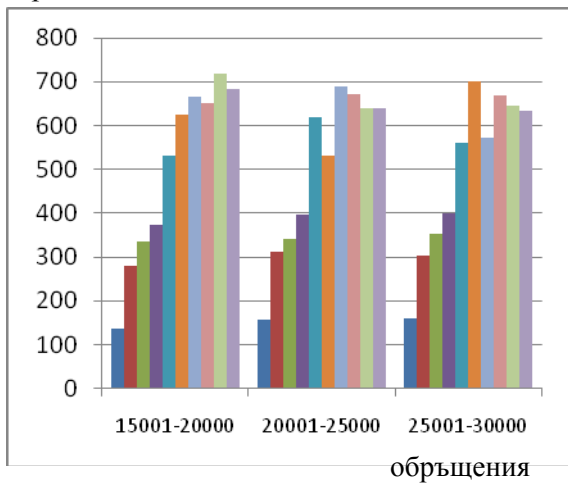
брой съобщения



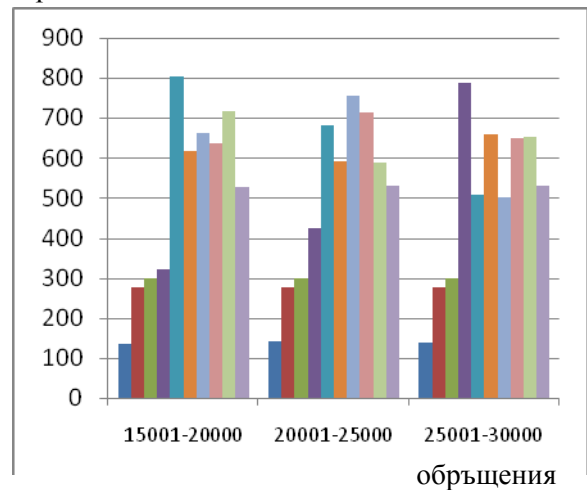
Фиг. 5а. Серии S1 – S3

Фиг. 6а. Серии S1 – S3

брой съобщения



брой съобщения



Фиг. 5б. Серии S4 – S6

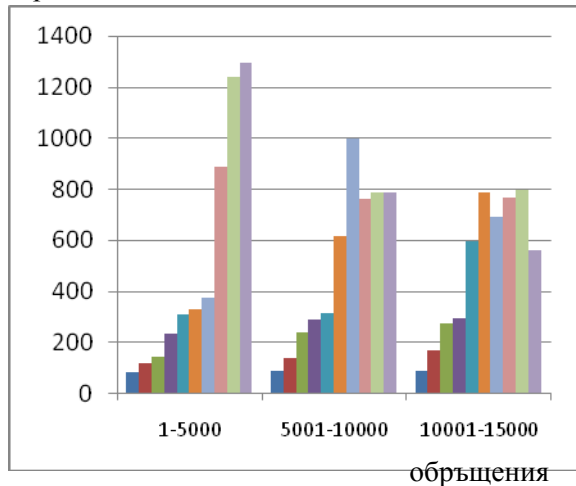
Фиг. 6б. Серии S4 – S6

Таблица 5. Параметър d=10

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Q1	80	85	88	126	127	127
Q2	118	134	166	257	253	254
Q3	142	239	270	273	273	272
Q4	233	288	290	291	609	795
Q5	307	310	596	828	652	516
Q6	329	614	787	642	567	669
Q7	372	999	688	679	738	504
Q8	885	760	763	654	695	645
Q9	1 239	786	795	729	572	650
Q10	1 295	785	557	521	514	568

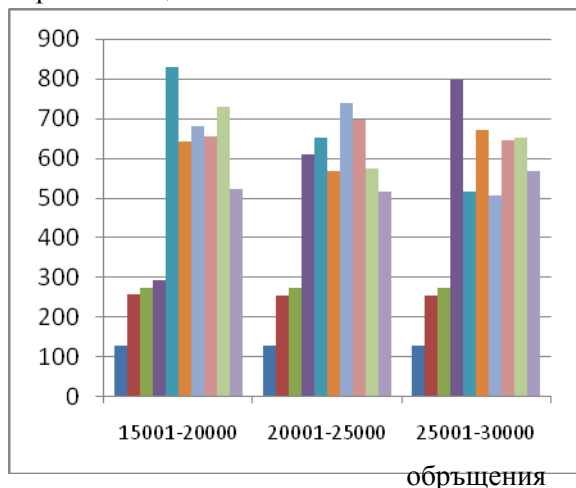
Фиг. 7а и 7б са графичното представяне на резултатите.

брой съобщения



Фиг. 7а. Серии S1 – S3

брой съобщения



Фиг. 7б. Серии S4 – S6

4. Коментар на резултатите

Забелязва се влиянието на параметъра d върху модела на обслужване на опашките. С увеличаване на стойността му се увеличава тенденцията за по-наситено обслужване на по-високоприоритетните слотове в първите серии – обръщения 1 – 10000. След това се наблюдава постепенно намаляване на броя на обръщенията с нарастване на сериите, т.е. колкото повече съобщения се прочитат, толкова по-рядко се извършва обръщение към високоприоритетния слот, за сметка на по-ниско приоритетните. Освен това се наблюдава и тенденция към уеднаквяване на броя на обръщенията с нарастване на параметъра d.

5. Заключение

За функционирането на опашките е необходимо добре да се познава моделът на поведението им. С помощта на проведените експерименти и обобщаването на резултатите може да се прецени кои параметри на опашките да се настроят, за да се получи обслужване според конкретните потребности.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Brown R.**, Calendar Queues: A Fast O(1) Priority Queue Implementation for the Simulation Event Set Problem, Communications of the ACM, ACM Digital Library, 1988, pp 1220-1227, ISSN 0001-0782
2. **Cherkassky, B., A. Goldberg, C. Silverstein**, Buckets, Heaps, Lists, and Monotone Priority Queues, Proceedings of the eighth annual ACM symposium on Discrete algorithms, ACM Digital Library, 1997, pp 83-92, ISBN 0-89871-390-0
3. **Hughes, C., T. Hughes**, Parallel and Distributed Programming Using C++ , Addison Wesley, 2003, ISBN 0-13-101376-9
4. **Lotan, I., N. Shavit**, Skiplist-Based Concurrent Priority Queues, International Parallel and Distributed Processing Symposium, Cancun, Mexico, May 2000.
5. **Raz, D., B. Itzhak, H. Levy**, Classes, Priorities and Fairness in Queueing Systems, Research report, Rutgers University, 2004, <http://rutcor.rutgers.edu/~rrr>
6. **Sedgewick, R., K. Wayne**, Algorithms, 4th Ed., Addison Wesley, 2011, ISBN 978-0-321-57351-3

7. Shavit N., A. Zemach, Scalable Concurrent Priority Queue Algorithms, PODC '99 Atlanta, USA, 1999

8. Silberschatz, A., P. Galvin, G. Gagne, Operating System Concepts, Seventh Edition, John Wiley & Sons Inc, 2005, ISBN 0-471-69466-5

9. Tanenbaum, A., Modern Operating Systems, Second Edition, Prentice Hall, 2001, ISBN 0-13-092641-8

Department of Computer Systems and Technologies
Technical University–Sofia, Branch Plovdiv
25 Tsanko Dystabanov St.
4000 Plovdiv
BULGARIA
e-mail: ivo_atan@tu-plovdiv.bg



БАЛАНСИРАНЕ НА НАТОВАРВАНЕТО НА НИШКИ ЗА ОБСЛУЖВАНЕ НА ПРИОРИТЕТНИ ОПАШКИ НА МНОЖЕСТВО НИВА ЧРЕЗ ГЛАВНА НИШКА

ИВАЙЛО АТАНАСОВ

Резюме: Настоящата статия разглежда реализация на приоритетни опашки на множество нива с ограничен брой приоритети, динамично изчисляване на приоритета и множество нишки за обслужване на съобщенията. Целта е да се постигне паралелизъм при четене и изпълнение на съобщения от опашката. Възникналите проблеми за балансиране на броя на нишките за обслужване се решава чрез подхода главна нишка, при който една нишка следи за натоварването на всички нишки и взема решения за създаване/унищожаване на работни нишки.

Ключови думи: приоритетни опашки, планиране, операционни системи, динамичен приоритет, баланс на натоварването

LOAD BALANCING THREADS FOR MULTILEVEL PRIORITY QUEUE USING MAIN THREAD APPROACH

IVAYLO ATANASSOV

Abstract: The priority queues are often used in the area of the computer systems. The current paper offers multilevel priority queue implementation with dynamic priority calculation and thread-level parallelism for dequeue operations. The servicing threads are automatically managed from the system. Thus, synchronization and load balancing issues arise. The count of the servicing threads is adjusted dynamically. The present paper offers a method for load balancing based on the "main thread" approach, where one thread estimates the load and makes decisions about creating/terminating worker threads.

Key words: priority queue, scheduling, operating systems, dynamic priority, load balancing

1. Въведение

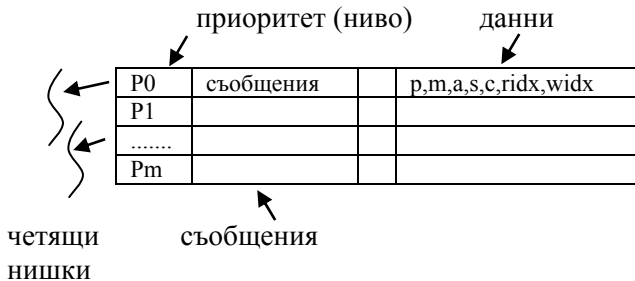
Приоритетните опашки са широко използвана структура в компютърните системи [2, 3, 4, 10]. Реализират чрез heap, skip lists, дървета, множество нива [1, 5, 7, 8]. Настоящата статия предлага реализация чрез множество нива [7, 9, 11]. Обслужването (dequeue) се базира на динамично изчисляване на

приоритета. Системата управлява множество работни нишки, които минават през опашките и четат съобщение от избраната. Броят на нишките се регулира динамично. Това е важен за доброто функциониране на системата процес, като балансирането на натоварването (Load Balancing – LB) и броя е ключов за постигане на по-добър паралелизъм и по-добра

производителност. Проведени са експерименти за оценка на поведението и са сравнени с алтернативен подход.

2. Структура на опашките

Общата структура на предложената приоритетна опашка на множество нива е представена на фиг. 1.



Фиг. 1. Структура на опашката.

Всяко съобщение се записва в съответното ниво според статичния си приоритет. Четящите нишки постоянно четат и изпълняват съобщения. Отделните опашки се обслужват на FIFO принцип. Формулата за динамично изчисляване на оценката (приоритета) е:

$$M_i = \left\lfloor \frac{P_i * m_i * 2^{k_i+10}}{a_i} \right\rfloor \quad (1)$$

където:

$$k_i = \left\lfloor \frac{s_i}{c_i} \right\rfloor \quad (2)$$

$$c_i = \max p - P_i + d \quad (3)$$

P – статичен приоритет на опашката

m – брой съобщения в опашката

a – брой последователни обръщения за четене от опашката

s – брой последователни пропуснати обръщения към опашката

max p – максимален приоритет

d – параметър за регулиране на нарастването на оценката

Прочитане, премахване и изпълнение на съобщението се извършва за слота с най-висока оценка. Това се прави от т.нар. четящи (работни) нишки. Винаги съществува поне една такава нишка, която се нарича *главна нишка*. Освен стандартното извличане и изпълнение на съобщение, тази нишка извършва и процеса на

балансиране на натоварването. Останалите нишки само извличат и изпълняват.

3. Процесът на балансиране на натоварването

Целта на всеки процес на балансиране е във всеки един момент да съществуват толкова нишки, колкото е необходимо, т.е. не трябва да има препълване на опашките поради малко нишки, нито малък брой съобщения за няколко почти бездействащи нишки. Процесът на LB съществува в множество системи и функционирането му зависи от конкретната система – garbage collectors [1], многопроцесорни системи, мрежови сървъри и др.

Ключов момент в LB е да се намери точен критерий за оценка на натоварването на нишките. В конкретния случай това може да бъде броят на съобщенията в опашките. Висок брой може да означава недостатъчен брой нишки и препълване на системата, нисък брой може да означава че има възможност за намаляване на броя на обслужващите нишки. Следователно, може да се каже че съществуват „нормални“ нива на натовареност (т.е. брой съобщения) в системата – например между 20% и 80% от капацитета. Нека тези две граници бъдат наречени съответно MMIN и MMAX. За да се реагира коректно на промяна в общия брой на съобщенията, следното трябва да се отчете:

- 1) създаването и унищожаването на нишки консумира време и ресурси и трябва да се избягва винаги, когато е възможно [6].
- 2) прехвърлянето на горната граница MMAX не трябва да води до незабавна реакция и създаване на нишка. Възможно е това да е някакъв пик и нерегулярно събитие и това трябва да бъде отчетено.
- 3) същото важи и за MMIN – не би трябвало веднага да се унищожават нишка
- 4) след всяко създаване/унищожаване на нишак е необходим период на „охлаждане“ на системата за LB, т.е. известно време не трябва да се прави отчитане, за да може системата да се стабилизира и адаптира към новия брой нишки.

Следствие на гореизложеното, въвежда се следното:

- във връзка с 2) и 3) се определя брой на последователните пикове, след които се приема, че това е постоянно явление и следва да се реагира. Това

са COUNTMIN за брой на пикове за MMIN и COUNTMAX за брой на пикове за MMAX.

- един брояч counter с първоначална стойност 0, който при четене на съобщение:

- 1) if MMIN<counter<MMAX then counter=0
- 2) if counter<MMIN then if counter<0 then counter— else counter=0 if counter<COUNTMIN then terminate thread
- 3) if counter>MMAX then if counter>0 then counter++ else counter=0 if counter>COUNTMAX then create thread

По този начин се избягва влиянието на пиковете и за да се вземе решение за създаване/унищожаване на нишка трябва да се отчете стабилна тенденция към някоя от крайните стойности. Както се вижда от алгоритъма, дори след няколко пика, ако следващата стойност е в нормални граници статистиките се нулират и отчитането започва отначало.

След извършване на някакво действие (създаване/унищожаване на нишка), механизмът на LB има т.нар. период на „охлаждане” (thread cooldown – TCD). Това е определен брой обръщения, през които LB временно не работи, за да може системата да се стабилизира.

3. Проведени експерименти

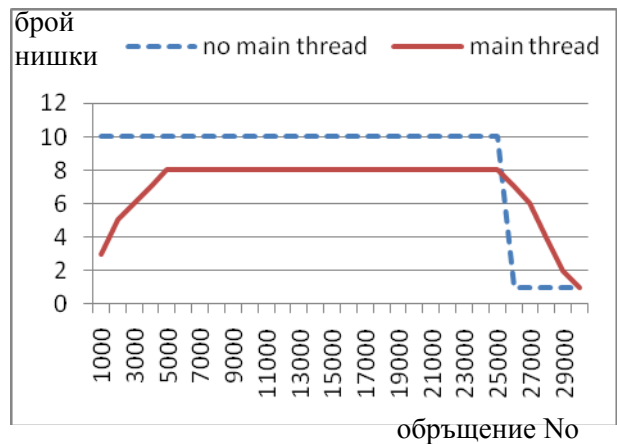
Проведени са експерименти за опашка от 10 нива, капацитет на всяка опашка 10000 съобщения, 30000 записани съобщения в опашките, COUNTMIN=20, COUNTMAX=20, MMIN=0.05, MMAX=0.25 и различни стойности за TCD (периода на успокояване). На графиките с плътна са стойностите от проведените експерименти, а с пунктирна линия са тези от предишни експерименти [12] с подход без главна нишка.

Таблица 1. TCD=100

обр., No	нишки, бр.	обр., No	нишки, бр.
1000	3	16000	8
2000	5	17000	8
3000	6	18000	8
4000	7	19000	8
5000	8	20000	8
6000	8	21000	8

7000	8	22000	8
8000	8	23000	8
9000	8	24000	8
10000	8	25000	8
11000	8	26000	7
12000	8	27000	6
13000	8	28000	4
14000	8	29000	2
15000	8	30000	1

Време за прочитане на всички съобщения: 6989ms.

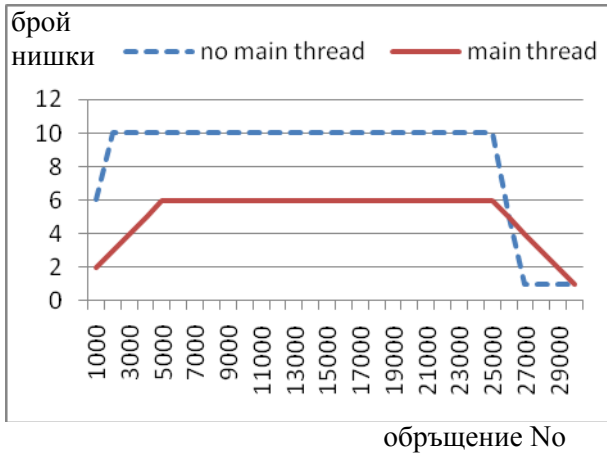


Фиг. 2. TCD=100

Таблица 2. TCD=200

обр., No	нишки, бр.	обр., No	нишки, бр.
1000	2	16000	6
2000	3	17000	6
3000	4	18000	6
4000	5	19000	6
5000	6	20000	6
6000	6	21000	6
7000	6	22000	6
8000	6	23000	6
9000	6	24000	6
10000	6	25000	6
11000	6	26000	5
12000	6	27000	4
13000	6	28000	3
14000	6	29000	2
15000	6	30000	1

Време за прочитане на всички съобщения: 8414ms

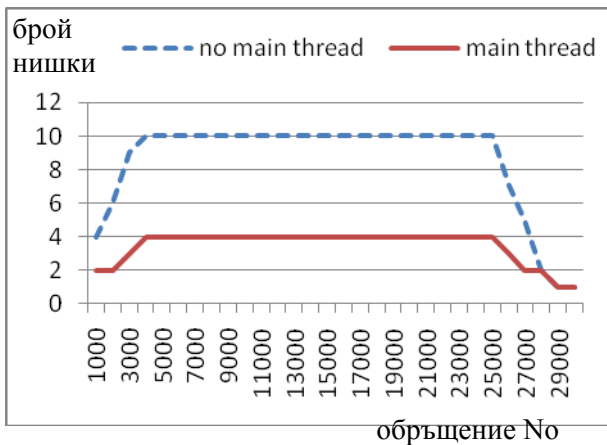


Фиг. 3. TCD=200

Таблица 3. TCD=400

обр., No	нишки, бр.	обр., No	нишки, бр.
1000	2	16000	4
2000	2	17000	4
3000	3	18000	4
4000	4	19000	4
5000	4	20000	4
6000	4	21000	4
7000	4	22000	4
8000	4	23000	4
9000	4	24000	4
10000	4	25000	4
11000	4	26000	3
12000	4	27000	2
13000	4	28000	2
14000	4	29000	1
15000	4	30000	1

Време за прочитане на всички съобщения: 11216ms.

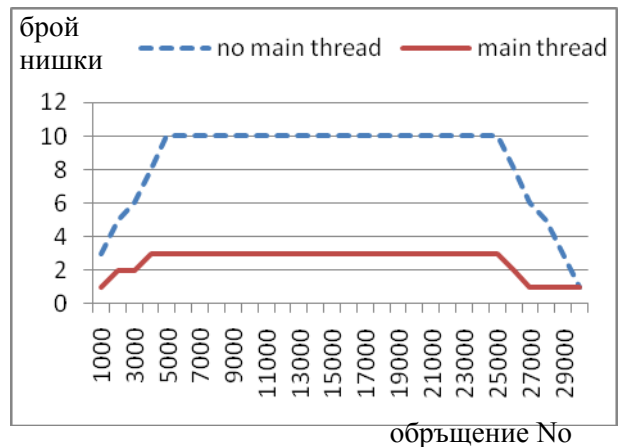


Фиг. 4. TCD=400

Таблица 4. TCD=600

обр., No	нишки, бр.	обр., No	нишки, бр.
1000	1	16000	3
2000	2	17000	3
3000	2	18000	3
4000	3	19000	3
5000	3	20000	3
6000	3	21000	3
7000	3	22000	3
8000	3	23000	3
9000	3	24000	3
10000	3	25000	3
11000	3	26000	2
12000	3	27000	1
13000	3	28000	1
14000	3	29000	1
15000	3	30000	1

Време за прочитане на всички съобщения: 13478ms.

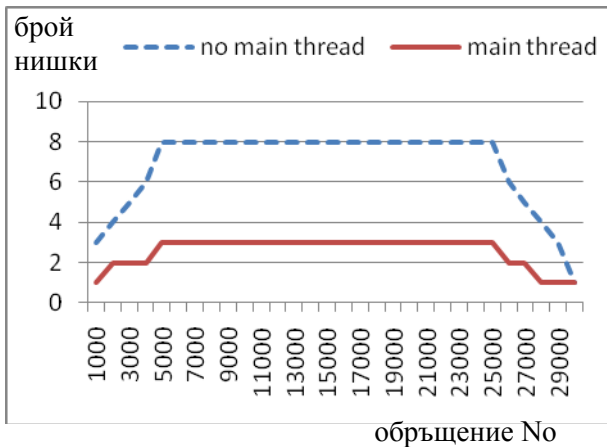


Фиг. 5. TCD=600

Таблица 5. TCD=800

обр., No	нишки, бр.	обр., No	нишки, бр.
1000	1	16000	3
2000	2	17000	3
3000	2	18000	3
4000	2	19000	3
5000	3	20000	3
6000	3	21000	3
7000	3	22000	3
8000	3	23000	3
9000	3	24000	3
10000	3	25000	3
11000	3	26000	2
12000	3	27000	2
13000	3	28000	1
14000	3	29000	1
15000	3	30000	1

Време за прочитане на всички съобщения: 13536ms.

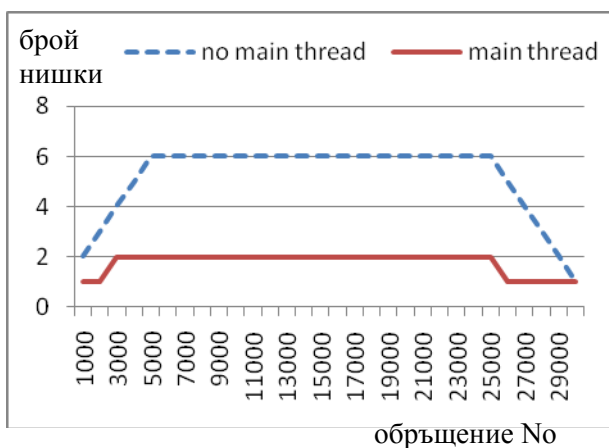


Фиг. 6. TCD=800

Таблица 6. TCD=1000

ref	th			
1000	1		16000	2
2000	1		17000	2
3000	2		18000	2
4000	2		19000	2
5000	2		20000	2
6000	2		21000	2
7000	2		22000	2
8000	2		23000	2
9000	2		24000	2
10000	2		25000	2
11000	2		26000	1
12000	2		27000	1
13000	2		28000	1
14000	2		29000	1
15000	2		30000	1

Време за прочитане на всички съобщения: 16837ms.



Фиг. 7. TCD=1000

Таблица 7 обобщава и сравнява резултатите от експерименти с главна и без главна нишка.

Таблица 7. Сравнение на двата подхода

TCD	без главна нишка		с главна нишка	
	max брой нишки	време за изпълнение, ms	max брой нишки	време за изпълнение, ms
100	10	10787	8	6989
200	10	10109	6	8414
400	10	8591	4	11216
600	10	6853	3	13478
800	8	8200	3	13536
1000	6	10763	2	16837

4. Коментар на експериментите

Проведените експерименти показват броят на работните нишки на всеки хиляда обръщения. Отбелязано е и времето за изчерване на съобщенията в опашките. Графиките сравняват резултатите от текущо проведените експерименти (с главна нишка) и тези от предишни експерименти [12] за подход без главна нишка. Забелязват се и разликите между двата подхода – в повечето от случаите този без главна нишка използва повече нишки за да прочете същия брой съобщения за повече време, но за някои стойности на tcd параметъра работи по-добре.

5. Заключение

Следва обобщение на предимствата и недостатъците на двата подхода.

Подход без главна нишка.

Предимства:

- всички нишки участвуват в процеса на балансиране
- която и да е нишка може да бъде блокирана без това да се отрази на работата

Недостатъци:

- необходимост от синхронизация

Подход с главна нишка.

Предимства:

- работните нишки не са нагажирани с балансиращите процедури
- няма необходимост от синхронизация

Недостатъци:

- главната нишка не трябва да блокира, т.е. дори при една работна нишка трябва да е активна

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Barabash, K., O. Ben-Yitzhak, I. Goft, E. K. Kolodner, V. Leikehman, Y. Ossia, A. Owshanko**, A Parallel, Incremental, Mostly Concurrent Garbage Collector for Servers, ACM Transactions on Programming Languages and Systems, Vol. 27, No. 6, November 2005, pp. 1097–1146
- 2. Brown R.**, Calendar Queues: A Fast O(1) Priority Queue Implementation for the Simulation Event Set Problem, Communications of the ACM, ACM Digital Library, 1988, pp 1220-1227, ISSN 0001-0782
- 3. Cherkassky, B., A. Goldberg, C. Silverstein**, Buckets, Heaps, Lists, and Monotone Priority Queues, Proceedings of the eighth annual ACM symposium on Discrete algorithms, ACM Digital Library, 1997, pp 83-92, ISBN 0-89871-390-0
- 4. Hughes, C., T. Hughes**, Parallel and Distributed Programming Using C++ , Addison Wesley, 2003, ISBN 0-13-101376-9
- 5. Lotan, I., N. Shavit**, Skiplist-Based Concurrent Priority Queues, International Parallel and Distributed Processing Symposium, Cancun, Mexico, May 2000.
- 6. msdn.microsoft.com**
- 7. Raz, D., B. Itzhak, H. Levy**, Classes, Priorities and Fairness in Queueing Systems, Research report, Rutgers University, 2004, <http://rutcor.rutgers.edu/~rrr>
- 8. Sedgewick, R., K. Wayne**, Algorithms, 4th Ed., Addison Wesley, 2011, ISBN 978-0-321-57351-3
- 9. Shavit N., A. Zemach**, Scalable Concurrent Priority Queue Algorithms, PODC '99 Atlanta, USA, 1999
- 10. Silberschatz, A., P. Galvin, G. Gagne**, Operating System Concepts, Seventh Edition, John Wiley & Sons Inc, 2005, ISBN 0-471-69466-5
- 11. Tanenbaum, A.**, Modern Operating Systems, Second Edition, Prentice Hall, 2001, ISBN 0-13-092641-8
- 12. Атанасов, И.**, Балансиране на натоварването на нишки за приоритетни опашки на множество нива, Списание „Автоматика и информатика”, 2014, ISSN 0861 -7562, под печат

Department of Computer Systems and Technologies
Technical University–Sofia, Branch Plovdiv
25 Tsanko Dystabanov St.
4000 Plovdiv
BULGARIA
e-mail: ivo_atan@tu-plovdiv.bg



ИЗСЛЕДВАНЕ НА СТОХАСТИЧНИ АЛГОРИТМИ ЗА ОЦЕНЯВАНЕ НА ПАРАМЕТРИТЕ НА ХАОТИЧНИ СИСТЕМИ

РУМЕН ПОПОВ, РОСИЦА КАЗАКОВА

Резюме: Изследва се възможността за прилагане на стохастични алгоритми за оценяване на параметрите на хаотични системи. Използвани са Генетичен алгоритъм (ГА) и оптимизация с интелекта на ято (Particle Swarm Optimization – PSO), за да бъдат оценени параметрите на хаотична система на Лоренц. Изпълнени са Монте Карло симулации и анализ на статистическата значимост на факторите (*F-test*). Резултатите са сравнени и анализирани.

Ключови думи: хаотични системи, идентификация на параметрите, генетичен алгоритъм, оптимизация, интелект на ято

RESEARCH ON STATISTICAL ALGORITHMS FOR PARAMETER ESTIMATION OF THE CHAOTIC SYSTEMS

RUMEN POPOV, ROSITSA KAZAKOVA

Abstract: The possibility to apply statistical algorithms for parameter estimation of the chaotic systems is investigated. The Genetic Algorithm (GA) and Particle Swarm Optimization – (PSO) are approved in Lorenz chaotic systems' parameter estimation task. The Monte Carlo simulations and uncertainly analysis of the factors (*F-tests*) are performed. The results are compared and analysed.

Key words: chaotic systems, parameter estimation, genetic algorithm, and particle swarm optimization

1. Въведение

Има редица области на идентификацията на системи, в които съществуват недобре решени проблеми. В частност някои широко използвани алгоритми за идентификация не дават добри резултати при оценката на параметрите на модели на силно нелинейни (в пространството на параметрите) системи или системи с негладки производни или нелинейни ограничения.

Типичен пример на нелинейни системи, динамиката на процесите в които силно зависят от избора на началните условия са хаотичните системи. През 1963 Лоренц открил първия хаотичен атрактор в тримерна автономна

система, докато изучавал атмосферната конвекция [2]. Да се създаде хаос нарочно може да се окаже не тривиална задача, но даваща база за интересни нови подходи в областите на научните изследвания и инженерните приложения. На тази база Чен създава хаотична система използвайки метода на инженерната обратна връзка [3], която топологически не е еквивалентна на тези на Лоренц [3,8,15].

Исторически системата уравнения на Лоренц е вероятно първата от нелинейните динамични системи, открити с цел изразяване на силна зависимост между начални условия и

хаос. Системата на Лоренц се описва чрез следните диференциални уравнения:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= a \cdot (y - x) \\ \dot{y} &= c \cdot x - x \cdot z - y \\ \dot{z} &= x \cdot y - b \cdot z \end{aligned} \quad (1)$$

Типични параметри за системата на Лоренц са $a = 10$, $c = 28$, и $b = 8/3$, съгласно формата на обобщената система на Лоренц от Ванечек и Селиковски [1],

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + x \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2)$$

Системата на Лоренц се описва чрез:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a & a & 0 \\ c & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + x \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -10 & 10 & 0 \\ 28 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -8/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + x \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (4)$$

Системата на Лоренц удовлетворява условието:

$$a_{12} \cdot a_{21} > 0, (10 \cdot 28 > 0).$$

Чен конструира друга хаотична система с помощта на метода за управление на обратната връзка [3], чиято топология се различава от тази на Лоренц [3,8,15]. Системата на Чен има следната форма:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= a \cdot (y - x) \\ \dot{y} &= (c - a) \cdot x - x \cdot z - c \cdot y \\ \dot{z} &= x \cdot y - b \cdot z \end{aligned} \quad (5)$$

Типични параметри за системата на Чен са $a=35$, $c=28$, и $b=3$. Тази система е двойствена и има подобна проста структура, но показва по-сложно динамично поведение [8,15].

Тук двойствеността се базира на класификационните условия, формулирани от Ванечек и Селиковски [1]. Съгласно генерализираната система на Лоренц, системата на Чен може да се опише чрез:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a & a & 0 \\ c-a & c & 0 \\ 0 & 0 & -b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + x \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -35 & 35 & 0 \\ -7 & 28 & 0 \\ 0 & 0 & -3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + x \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (7)$$

Системата на Чен удовлетворява:

$$a_{12} \cdot a_{21} < 0; (35 \cdot (-7) < 0).$$

Тя може да се класифицира използвайки условие в линейния участък $A = [a_{ij}]$: $a_{12} \cdot a_{21} > 0$, който включва познатата система на Лоренц, като специален случай, докато системата на Чен удовлетворява $a_{12} \cdot a_{21} < 0$. Следователно системата на Чен не принадлежи на обобщената фамилия системи на Лоренц. В действителност системата на Чен принадлежи на друга приета фамилия от хаотични системи [7-13]. Лю и Чен намират критична нова хаотична система [7-13], която удовлетворява условието $a_{12} \cdot a_{21} = 0$ и представлява преход между атракторите на Лоренц и Ченг. Този хаотичен атрактор се представя обобщено чрез следващата примерна автономна система:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= a \cdot (y - x) \\ \dot{y} &= -x \cdot z + c \cdot y \\ \dot{z} &= x \cdot y - b \cdot z \end{aligned} \quad (8)$$

Типичните параметри за системата на Лю са $a = 35$, $c = 28$, и $b = 3$. Тази система свързва системите на Лоренц и Чен. Съгласно обобщената система на Лю се описва чрез:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a & a & 0 \\ 0 & c & 0 \\ 0 & 0 & -b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + x \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -36 & 36 & 0 \\ 0 & 20 & 0 \\ 0 & 0 & -3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + x \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (10)$$

Системата на Лю удовлетворява $a_{12} \cdot a_{21} = 0$, ($36 \cdot 0 = 0$). Новата система не е дифеоморфична (дифеоморфизъм - изображение от определен тип между гладки многообразия) със системите на Чен и Лоренц тъй като структурите на собствената стойност не са еквивалентни в техните съответстващи точки. Още повече, че тези вериги не са топологично еквивалентни тъй като не съществува неединична координатна трансформация [7]. Лю конструира унифицирана система, която съдържа посочените по-горе три хаотични системи, които са свързани, но не са еквивалентни [5]. Новата унифицирана система се описва от:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (25 \cdot \alpha + 10) \cdot (y - x) \\ \dot{y} &= (28 - 35 \cdot \alpha) \cdot x - x \cdot z + (29 \cdot \alpha - 1) \cdot y \\ \dot{z} &= x \cdot y - \frac{\alpha+8}{3} \cdot z \end{aligned} \quad (11)$$

където $\alpha \in [0, 1]$. Линейният участък от системата в уравнение (5), постоянната матрица $A = [a_{ij}]$ осигурява критичната стойност $a_{12} \cdot a_{21}$, където съгласно тази критична стойност цялата фамилия от хаотични системи в уравнение (5) може да се класифицира както следва: когато $0 \leq \alpha < 0.8$, системата уравнения (5) принадлежи на обобщената система на Лоренц, защото с тези стойности на α имаме $a_{12} \cdot a_{21} > 0$; когато $\alpha =$

0.8, системата в (5) принадлежи на класа от хаотични системи, тъй като в този случай $a_{12} \cdot a_{21} = 0$; когато $0.8 < \alpha \leq 1$, системата в (5) принадлежи на обобщената система на Чен, формулирана в [13], за която $a_{12} \cdot a_{21} < 0$.

Лю и Чен откриват нова Лоренцо-подобна хаотична система, която може да демонстрира едновременно два хаотични атрактора[6].:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -\frac{a \cdot b}{a+b} \cdot x - y \cdot z + c \\ \dot{y} &= a \cdot y + x \cdot z \\ \dot{z} &= b \cdot z + x \cdot y \end{aligned} \quad (12)$$

където a, b, c са реални константи. Концепцията за обобщената система на Лоренц е развита до нов клас от системи подобни на тази на Лоренц в канонична форма [6]. Такава е следната фамилия от системи на Лоренц [6], [14]:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= a_1 \cdot x + a_2 \cdot y + a_{13} \cdot x \cdot z + a_{23} \cdot y \cdot z \\ \frac{dy}{dt} &= b_1 \cdot x + b_2 \cdot y + b_{13} \cdot x \cdot z + b_{23} \cdot y \cdot z + d_2 \\ \frac{dz}{dt} &= c_3 \cdot z + c_{12} \cdot x \cdot y + c_{11} \cdot x^2 \cdot z + c_{22} \cdot y^2 + c_{33} \cdot z^2 + d_3 \end{aligned} \quad (13)$$

където a_i, b_i, a_{ij}, b_{ij} за $i=1,2, c_{ij}$ за $j=1,2,3$, и c_3, d_2, d_3, c_{12} са реални константи. Системата в уравнение (10) е обща форма за повечето типични примерни квадратични автономни хаотични системи, включващи системата на Лоренц, системата на Чен [3], системата на Лю [7], системи подобни на системата на Лоренц [6] и системи на Спрот [9].

2. Използвани методи

За провеждане на симулации със стохастични модели най-често се използва методът Монте Карло. Това е универсален метод за симулация, който намира приложение в различни области на научните изследвания и в практиката. Методът Монте Карло има две важни особености:

- Проста структура на изчислителния алгоритъм;
- Грешката при изчисленията е пропорционална на $(D/N)^{1/2}$, където $D = \text{const}$ и N - брой на изпитанията.

За да се намали грешката с един порядък, трябва да се увеличи броят на опитите N . Методът Монте Карло позволява да се моделира произволен процес, на чието протичане влияят случайни фактори. За много задачи, несвързани със случайни фактори може изкуствено да се въведат вероятностни модели. Поради това за методът Монте Карло може да се говори като за универсален метод за решаване на задачи.

В нашия случай ще извършим по 90 симулационни теста на динамиката на хаотичната система с прилагане съответно на

ГА и PSO алгоритми за оценяване на търсените параметри. Ще се оценяват стойностите на началните условия по трите координати x_0, y_0 , и z_0 . По време на извършване на тестовете ще се варират стойностите на факторите, които оказват влияние върху качеството на работа на изследваните алгоритми. Това са вероятността за кръстосване и степента на мутация за ГА алгоритъма и фактора на корекция (обучение), и инерцията за PSO алгоритъма. Планът на експериментите е централно композиран с по 3 нива на изменение на факторите.

За оценяване на значимостта на факторите първоначално се извършва тест на нулева хипотеза, известен като тест на Фишер (F-тест).

3. Стохастични алгоритми за търсене, използвани при идентификацията на параметрите на модели

Важно място при идентификацията на системи заема процеса на идентификация на параметрите. Технически добре са обосновани редица методи като метод на най-малките квадрати, метод на инструменталната променлива и метод на максималното правдоподобие, които съществуват за оценка на параметрите на моделите. Ако пространството на търсене не е диференцируемо или линейно по отношение на параметрите, често тези техники не успяват в търсенето на глобален оптимум.

Понастоящем използването на техниките на изкуствения интелект (ИИ) става възможно при редица приложения в областта на управлението. Една от най-мощните техники на ИИ е генетичният алгоритъм (ГА), който е широко използван и прилаган в системите за контрол.

3.1 Генетичен алгоритъм

Генетичният алгоритъм (ГА) е метод за решаване на двата вида оптимизационни задачи с и без ограничения, които се основава на естествения подбор. Това е процесът, задвижващ биологичната еволюция. Генетичният алгоритъм многократно променя решенията на индивидуалната популация. Всеки път генетичният алгоритъм избира индивиди на случаен принцип от настоящата популация за родители и ги използва за възпроизводство на деца за следващото поколение. При следващото поколение популацията се развива като оптимално решение. Можем да приложим ГА за решаване на различни оптимизационни проблеми, при които не са подходящи стандартните оптимизационни алгоритми, включвайки проблемите, при които целевата функция е прекъсната, недиференцируема, стохастична или силно нелинейна.

ГА използва три основни правила при създаването на следващото поколение от настоящата популация:

- *Правила за селекция* при подбор на индивидите, наречени *родители*, които допринасят за популацията на следващото поколение;
- *Правила за кръстосване*, комбиниращи двамата родители при формирането на децата за следващото поколение;
- *Мутация* приемат случайни хромозоми на родителите при формирането на децата.

ГА е предложен през 1975г. от Холанд [4] и се основава на концепцията за имитация на естествената еволюция на популацията, като позволява решения за възпроизводството, създавайки нови решения, които след това се състезават за оцеляване в следващата итерация. Качеството на популацията нараства по време на генерациите и накрая се получава най- доброто решение. Началната популация $P(0)$ се кодира случайно чрез стрингове. Във всяка генерация се избрат елементите с най- добро качество като база за продължаване на рода, след което се обработват чрез три генетични оператора: репродукция, кръстосване и мутация, за да генерират новото поколение. Въз основа на принципа на оцеляване на по-силния се получава най- добрата хромозома на кандидата. Псевдо кодът на ГА илюстрира изчислителната процедура както следва:

Процедура ГА

Begin

$t=0$
инициализирай $P(t)$
изчисли $P(t)$

While изпълнение на условието за стоп

Begin

$t=t+1$
избери $P(t)$ от $P(t-1)$
промени $P(t)$
изчисли $P(t)$

End

End

Техниките на генетичния алгоритъм (ГА) се прилагат ефективно за оценяване на параметрите на модела. ГА едновременно оценява много точки в пространството на параметрите и се приближава към глобалното решение. Той не изисква пространството да е диференцируемо или непрекъснато [10,12]. Много изследователи прилагат ГА техниките за идентификация на линейни и нелинейни системи.

3.2 Концепция на PSO подхода

Съществуват множество изчислителни техники вдъхновени от биологични системи, например изкуствените невронни мрежи са

опростен модел на човешкото мислене; ГА е вдъхновен от човешката еволюция. Тук се дискутира друг тип биологична система – социална система и по - специално колективно поведение на отделните индивиди при взаимодействието им с обкръжението и с другите индивиди. Някои го наричат интелект на ятото. Всички симулации използват локални процеси, като например тези моделиращи клетъчните автомати и могат да лежат в основата на непредсказуема групова динамика на социалното поведение. При тези симулации се извършва интерпретация на движението на организмите в ято птици или рибен пасаж. Те обикновено се използват в компютърната анимация или автоматизираното проектиране. В областта на изчислителния интелект съществуват два популярни метода, вдъхновени от поведението на ятото: Ant colony optimization (ACO) – оптимизация тип колония от мравки и particle swarm optimization (PSO) – оптимизация фрагмент от ято. ACO е вдъхновен от поведението на мравките и намира много успешни приложения в дискретните оптимизационни проблеми. PSO концепцията произтича от симулацията на опростени социални системи. Първоначално намерението е било да се симулира хореографията на птица в ято или на риба в пасаж, обаче е установено, че PSO моделът може да се използва като оптимизатор [11].

PSO е популационно базирана стохастична оптимизационна техника [11], разработена от Еберхард и Кенеди през 1995, вдъхновена от социалното поведение на птиците в полет и рибите в пасаж. PSO има много белези с техниките за еволюционно изчисление като например ГА. Системата се инициализира с популация от случайни решения и търси оптимума чрез осъвременяване на генерациите. Обаче за разликата от ГА, PSO не притежава еволюционни оператори като кръстосване и мутация. В PSO възможните решения, наричани частици летят в пространството на проблема, следвайки текущите най-добри частици. В сравнение с ГА предимствата на PSO са простотата на приложение и малкия брой параметри за настройка, PSO е успешно приложен в много области: функционална оптимизация, трениране на изкуствени невронни мрежи, управление на размити системи и други сфери, където и ГА може да бъде приложен.

PSO симулира поведението на леляща птица. Предполага се следния сценарий: група птици случайно търси храна в определено пространство. Има само едно парче храна в

пространството за търсене, никоя птица не знае къде е храната. Те обаче знаят колко далече е храната при всяка итерация. Коя е най-добрата стратегия за намиране на храна? Една от добрите е да се следва птицата, която е най-близо до храната

PSO е базиран на този сценарий и го използва за решаване на оптимизационни проблеми. В PSO всяко едно решение е "птица" в пространството за търсене на място. Тя се нарича "particle". Всички частици имат стойности на качеството, което се изчислява от функцията на качеството подлежаща на оптимизация и притежават скорости и посоки на полетата на частиците. Те летят през пространството на проблема, следвайки текущите оптимални частици.

Процедурата PSO се инициализира с група от случайни частици (решения), след което търси оптимума чрез обновяване на генерациите. При всяка итерация всяка частица се обновява чрез следните две най-добри стойности. Първата е най-доброто решение (качество), което се приема да е твърде далече. (Стойността на качеството също се запомня.) Тази стойност се нарича pbest. Другата най-добра стойност, която се проследява от PSO е най-добрата стойност постигната от някоя частица в популацията. Тази стойност е глобално най-добрата и се нарича gbest. Когато частицата взема участие в част от популацията като неин съсед по топология, най-добрата стойност е локално най-добрата и се нарича lbest.

След намирането на двете най-добри стойности частиците обновяват скоростите и позициите си, използвайки следните уравнения:

$$v[] = v[] + c1 * rand() * (pbest[] - present[]) + c2 * rand() * (gbest[] - present[]) \quad (14)$$

$$present[] = persent[] + v[] \quad (15)$$

$v[]$ е скорост на частицата, $persent[]$ текуща частица (решение). $pbest[]$ и $gbest[]$ са различни, както бе казано преди това. $rand()$ е случайно число между $(0,1)$. $c1$, $c2$ са фактори на обучението. Обикновено $c1 = c2 = 2$.

Псевдокодът на процедурата е следния:

```

For всяка частица
    Инициализация на частицата
End
Do
    For всяка частица
        Изчисляване на стойността на качеството
        If стойността на качеството е по-добра от най-добрата предишна стойност (pBest)
            запомни текущата стойност като нова pBest
        End
        Избери частицата с хай-добра стойността на
    
```

качеството като gBest

For всяка частица

Изчисли скоростта и по уравнение (a)

Обнови позицията и по уравнение (b)

End

While достигане на критерия за спиране (максимален брой итерации или минимална грешка)

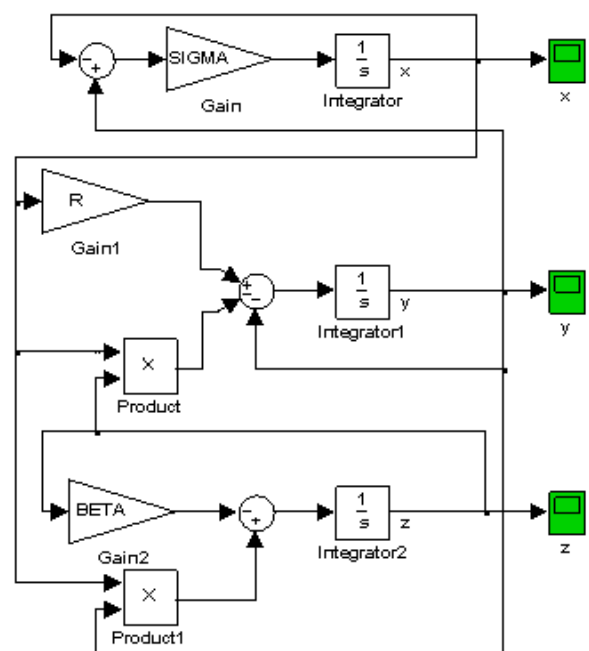
Скоростите на частиците по всяка координата се фиксират (ограничават) до максималната скорост V_{max} , в случай, че сумата от ускоренията би предизвикала превишаването на скоростта над V_{max} , което е параметър, задаван от потребителя.

4. Числени експерименти

Изпълняват се алгоритми за оценяване, базирани на ГА и PSO, за да се намерят стойностите на параметрите на нелинейна хаотична система. Чрез промяна на факторите степен на мутация (в ГА) и скорост на частиците (в PSO), се сравнява точността и ефективността на алгоритмите на оценяване. Ще изпълним експеримента по 90 пъти, използвайки Монте Карло симулация и после ще използваме средната стойност за оценка на точността. Ще се изпълни и анализ на значимостта на факторите (F-тест). Степента на ефективност ще се определи чрез измерване на времето за изпълнение на теста.

Избираме класическия модел на Лоренц за хаотична система, за да изследваме как алгоритмите ГА и PSO ще идентифицират параметрите (началните условия) на системата.

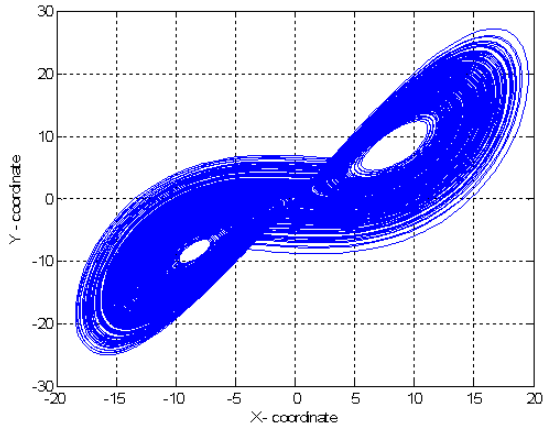
Моделът на Лоренц на хаотична ситема е съставен в средата на Simulink и е показан на Фиг. 1.



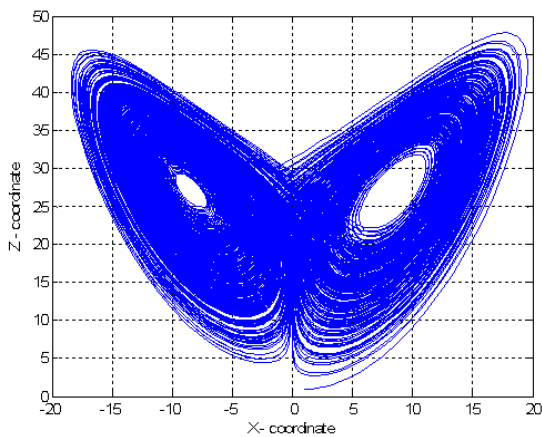
Фиг. 1. Simulink модел на хаотична система на Лоренц

Параметрите на системата SIGMA, BETA, R и началните условия x_0 , y_0 , и z_0 са външни за модела. Те се задават като глобални променливи на работното пространство на Matlab.

Резултатите от симулацията на хаотична система на Лоренц ако началните условия са : $x_0 = 0$, $y_0 = 1$ и $z_0 = 0$, са показани на Фиг. 2 в $x - y$ траектория и на Фиг. 3 в $x - z$ траектория.



Фиг. 2. Графика на X-Y фазова траектория



Фиг. 3. Графика на X-Z фазова траектория

Моделът в Simulink връща симулираните стойности на координатите x , y и z в променливите $x(:,2)$, $y(:,2)$ и $z(:,2)$. Първият ред от тази променливи е времето на симулация. Процедурата на изследване, базирана на генетичния алгоритъм е записана като функция в Matlab използваща следния синтаксис:

[A B AvSAE] = ga_proc(err, popsize, mutation_r, n_generations),

където:

- A** е вектор, съдържащ оценените 'a' параметри;
- B** е вектор, съдържащ оценените 'b' параметри;
- AvSAE** е вектор на средноаритметичното на абсолютната грешка на модела за всички минали поколения;
- err** е допуск на грешката;

- popsize** е размера на популацията;
- mutation_r** е скорост на мутацията;
- n_generations** е броят на поколенията.

Синтаксисът на Matlab функцията, реализираща алгоритъма за оценяване, базиран на PSO е:

[A B AvSAE] = pso_proc(swarm_size, correction_factor, inertia, iterations, err),

- където **A**, **B**, **AvSAE** и **err** имат същия смисъл като във функцията **ga_proc**, а освен това:
- swarm_size** е размер на рояка;
- correction_factor** е скорост (степен) на мутация;
- inertia** е коефициент на инерцията;
- iterations** е броя на итерациите.

5. Резултати

Резултатите от идентификацията на параметрите на хаотична система чрез използване на ГА и PSO са показани съответно в Таблица 1 и Таблица 2. Тук са дадени само първите 15 резултата от общо 90 на брой проведени теста.

Таблица 1. Резултати от теста Monte Carlo за за оценяване на параметрите на хаотична ситема чрез използване на ГА

Run No	Cross-over p	Mutation_r	AvSAE_fin value	x0	y0	z0
1	0,6	0,5	0,098505	1,542	-0,98537	-0,052285
2	0,2	0,275	0,1749	2,556	-2,3089	-0,0072939
3	0,6	0,5	0,075074	-0,24461	1,3216	0,057095
4	1	0,275	0,60238	3,4545	-3,4781	-0,16737
5	1	0,5	0,066335	0,19064	0,77132	0,015057
6	1	0,275	0,22434	-0,24986	1,2679	-0,05732
7	0,6	0,05	1,4379	6,4319	-7,0432	0,52591
8	1	0,275	0,06122	0,31831	0,57865	-0,018397
9	1	0,5	0,75645	-4,0031	5,9658	0,62677
10	0,6	0,5	0,023505	-0,994	2,2728	0,0692
11	1	0,05	0,18054	0,86819	-0,12454	0,050029
12	0,6	0,275	0,20538	-3,3922	5,3283	0,39746
13	1	0,05	0,85293	-1,5019	2,7675	-0,29197
14	0,2	0,5	0,058228	0,63646	0,18519	-0,041768
15	1	0,275	0,33681	6,1416	-6,7674	0,82218

Таблица 2. Monte Carlo тест за оценяване на параметрите на хаотична система, използващ PSO

Run No	Correction factor	Inertia	AvSAE_fin value	x0	y0	z0
1	2	0,4	0,26994	1,5792	-6,9554	3,3031
2	2,4	0,4	0,60053	4,2597	-7,0387	-9,2593
3	2,4	0,4	0,5462	1,9256	-7,4193	10
4	2	0,8	0,060609	0,42487	-1,184	1,145
5	2	0,8	0,11038	3,2454	5,3091	1,2815
6	1,6	0,4	0,021016	0,13416	0,29541	0,1432
7	2,4	0,8	0,12584	2,269	9,7227	-2,5956
8	2,4	0,6	0,57805	-1,1474	7,2752	10
9	1,6	0,4	0,39141	-1,7529	9,6667	6,0285
10	1,6	0,6	0,042522	0,24392	-0,27394	0,37148
11	1,6	0,8	0,6092	2,059	-8,2115	10
12	2	0,6	0,11712	0,50805	-1,5928	1,5421
13	2	0,4	0,011935	-0,19543	2,079	-0,37443
14	1,6	0,4	5,0224	5,5716	-10	-1,1942
15	2,4	0,4	0,021206	0,20992	-0,19342	2,1618

Средните стойности на параметрите изчислени от ГА и PSO алгоритмите са показани в следващата Таблица 3. Може да се отбележи, че в този случай PSO дава по-точни резултати.

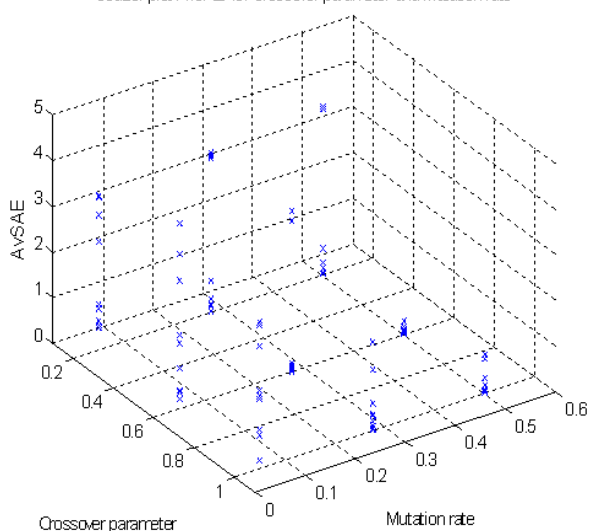
Таблица 3. Средни стойности на оценките на параметрите x_0 , y_0 , z_0 и AvSAE

Алгоритъм	Средно AvSAE	Средно x_0	Средно y_0	Средно z_0
ГА	0.9713	1.3636	0.5796	0.2570
PSO	0.5827	0.6974	0.3582	2.5293
Оригинал		0.0000	1.0000	0.0000

Ефективността на ГА е малко по-добра от тази на PSO.

Също се извършва анализ на значимост за различни параметри за ГА и PSO, показан на Фиг.4 и Фиг.5 съответно. Най-добрите стойности за параметъра кръстосване и степента мутация са 0,2 и 0,5. Най-добрите стойности за коефициента на корекция и инерцията са 2,4 и 0,6.

Scatter plot AvSAE vs. Crossover parameter and Mutation rate



Фиг. 4 Тримерна диаграма на разсейване на AvSAE в зависимост от факторите на кръстосване и мутация при ГА

При тест на нулева хипотеза F-теста, за всеки от тестваните алгоритми има резултат, както е посочен по-долу:

ГА: $F > P$ за всички фактори

Факторът вероятност за кръстосване е значим $F = 0.5818$; $P = 0.1764$
 Факторът степен на мутацията е значим $F = 9.4417$; $P = 0.1764$

PSO: $F > P$ за всички фактори

Факторът корекция е значим $F = 0.8905$; $P = 0.1764$
 Факторът инерция е значим $F = 1.6092$; $P = 0.1764$

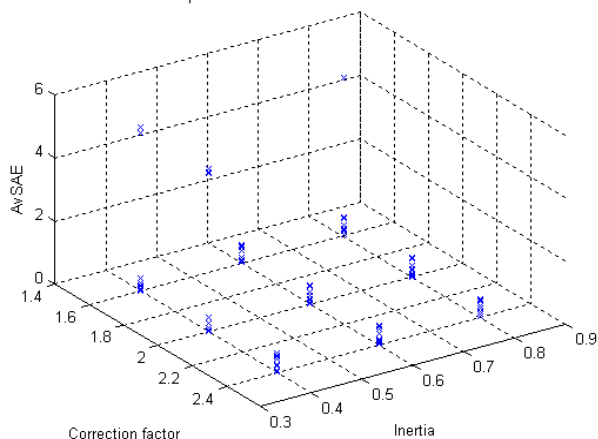
Продължителността на изпитването за всички 90 оценки за всеки случай (ГА и PSO) се

измерва, за да се провери ефективността на алгоритмите. Отчетените резултати са:

Продължителност на теста за ГА: 1h 28min 23.5630s.

Продължителност на теста за PSO: 1h 34min 11.1400s

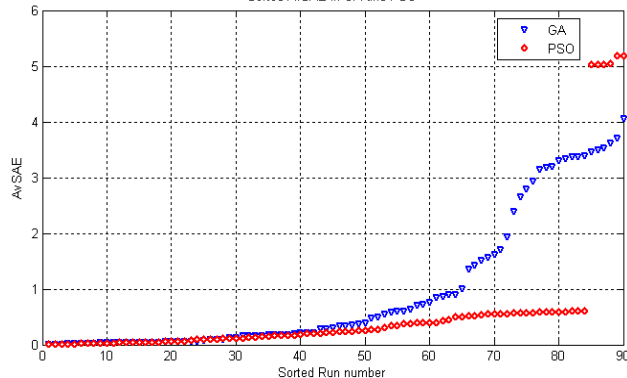
Scatter plot AvSAE vs. Correction factor and Inertia



Фиг. 5 Тримерна диаграма на разсейване на AvSAE в зависимост от коефициента на корекция и инерцията при PSO

Следващата Фиг.6 показва сортираните стойности на AvSAE за двата алгоритъма PSO (в червено) и ГА (в синьо). От тук се вижда, че процедурата по PSO дава по-точни стойности на параметрите на системата.

Sorted AvSAE in GA and PSO



Фиг. 6 Сортирани стойности на грешката за двата алгоритъма: PSO-в червено и ГА-в синьо

6. Изводи

1. И двата алгоритъма ГА и PSO са подходящи за използване в процеса на оценка на параметрите на нелинейни хаотични системи от класа на Лоренц.
2. Таблица 3 и фиг.6 показват, че PSO алгоритъма дава значително по-точна оценка.
3. Най-добра стойност на фактора вероятност за кръстосване в ГА е 0,2. За степента на мутация тази стойност е 0,5.
4. Най-добри показатели (минимална грешка) при прилагане на PSO се демонстрират при

коэффициент на корекция 2.4. За инерцията тази стойност е 0,6.

5. ГА отчита малко по-добра ефективност (производителност), но разликата в продължителността на теста, е много малка.

6. При оценката на началните условия в хаотични системи с помощта на ГА и PSO за постигането на задоволителна точност са достатъчни 30 поколения (итерации). Постигането на по-висока точност е възможно чрез увеличаване на броя на итерациите за сметка на влошената производителност на методите.

ЛИТЕРАТУРА

1. **A. Vanecek, S. Celikovsky.** Control systems: From linear analysis to synthesis of chaos; London: Prentice-Hall, 1996.
2. **E.N. Lorenz.** "Deterministic nonperiodic flow." J. Atmos. Sci., Vol. 20, pp. 130–141, 1963.
3. **G. Chen, T. Ueta.** "Yet another chaotic attractor." Int. J. Bifurcation and Chaos, Vol. 9, pp. 1465-1466, 1999.
4. **Holland J. H.** Adaptation in natural and artificial system, Ann Arbor, The University of Michigan Press, 1975.
5. **J. L" u, G. Chen, D. Cheng, S. Celikovsky.** "Bridge the gap between the Lorenz system and the Chen system." Int. J. Bifurcation and Chaos, Vol. 12, No. 12, pp. 2917-2926, 2002.
6. **J. L" u, G. Chen, D. Cheng.** "A new chaotic system and beyond: The generalized Lorenz-like system." Int. J. Bifurcation and Chaos, Vol. 14, No. 5, pp. 1507-1537, 2004.
7. **J. L" u, G. Chen.** "A new chaotic attractor coined." Int. J. Bifurcation and Chaos, Vol. 12, No. 3, pp. 659-661, 2002.
8. **J. L" u, T. Zhou, G. Chen, S. Zhang.** "The compound structure of Chen's attractor." Int. J. Bifurcation and Chaos, Vol. 12, No. 4, pp. 855-858, 2002.
9. **J.C. Sprott.** "Some simple chaotic flows." Phys. Rev. E, Vol. 50, pp. R647-R650, 1994.
10. **Kargupta H., Smith R. E.,** System identification with evolving polynomial networks, Proceeding of the 4th International Conference on Genetic Algorithm, University of California, San Diego, USA, 1991, pp 370-376.
11. **Kennedy J., Eberhart R.** (1995). "Particle Swarm Optimization". Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks IV. pp. 1942–1948.
12. **Kristinsson K., Dumont G.,** System identification and control using Genetic Algorithms, Ieee Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1992 22 (5), pp, 1033–1046.
13. **S. Celikovsky, G. Chen.** "On a generalized Lorenz canonical form of chaotic systems." Int. J. Bifurcation and Chaos, Vol. 12, pp. 1789-1812, 2002.
14. **S.Yu,J.L" u, W. Tang, G. Chen.** "A general multiscroll Lorenz system family and its realization via digital signal processors." Chaos, Vol. 16, 033126, 2006.
15. **T. Ueta, G. Chen.** "Bifurcation analysis of Chen's attractor." Int. J. Bifurcation and Chaos, Vol 10, No. 8, pp. 1917-1931, 2000.

Department of Electrical Engineering
Technical University–Sofia, Branch Plovdiv
25 Tsanko Dystabanov St.
4000 Plovdiv
BULGARIA
E-mail: rum_pop@yahoo.com;
E-mail: rrrrosi@abv.bg



СТРУКТУРНА ИДЕНТИФИКАЦИЯ НА СИСТЕМИ С ИЗПОЛЗВАНЕ НА АЛГОРИТМИ НА ИЗКУСТВЕНИЯ ИНТЕЛЕКТ

РОСИЦА КАЗАКОВА, РУМЕН ПОПОВ

Резюме: Изследва се възможността за прилагане на стохастични алгоритми за идентификация на структурата на линейни системи. Използвани са генетичен алгоритъм (ГА) и оптимизация чрез интелекта на ятото (Particle Swarm Optimization – PSO), за да бъде оценен реда на разширен авторегресионен (ARX) модел. Извършени са Монте Карло симулации и резултатите от оценяването са сравнени и анализирани.

Ключови думи: структурна идентификация, генетичен алгоритъм, оптимизация, интелект на ятото, ARX модел.

STRUCTURAL SYSTEM IDENTIFICATION USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE ALGORITHMS

ROSITSA KAZAKOVA, RUMEN POPOV

Abstract: The possibility to apply stochastic algorithms for structure estimation of the linear systems is investigated. The Genetic Algorithm (GA) and Particle Swarm Optimization – (PSO) are approved to estimate order of the Autoregressive exogenous (ARX) model. The Monte Carlo simulations are performed and the results are analysed.

Key words: structure identification, genetic algorithm, particle swarm optimization, ARX model

1. Въведение

Структурната идентификация представлява избор на структурата на математични модели, описващи процесите в изследваните обекти. До момента не съществуват изчерпателно разработени формализирани процедури за избор на структура на модел. Това се обяснява с факта, че [5]:

- 1) в системите за управление се използват математични модели, които отразяват най-важните параметри на протичащите процеси. Затова при идентификацията се използва принципа на „черната кутия“;
- 2) опитът да се използват физични закони за описание на природни процеси може съществено да усложни процедурата по получаване на математичния модел, затова не е

необходимо да се описват процеси, които нямат връзка с физически закони или имат сложно математично представяне.

- 3) идентификацията на нови (недостатъчно изучени) обекти се базира само на принципа на „черната кутия“, а това винаги води до поява на неопределености, които е необходимо да се преодоляват;

- 4) всеки реален обект винаги е свързан с външната среда и затова на етап избор на структура на модела е необходимо да се отчитат реалните ограничения. Това съществено влияе на самия подход за получаване на математичното описание. Математичния модел трябва да се конкретизира до такова ниво, до каквото допуска информацията за системата.

Така например, в [7] се отбелязва, че "в момента не съществува общоприета методика за структурна идентификация. Причината е в това, че сред специалистите съществуват два различни образа на структурна идентификация. На концептуално ниво всички специалисти са съгласни, че интуицията и жизнения опит играят съществена роля. На ниво конкретно теоретично изследване усилията са насочени към структуриране и абсолютна формализация на даден процес".

Доминираща роля в теорията на идентификацията заемат статистическите методи. С помощта на тези методи [8,9,13] могат да се решат задачи от структурната идентификация, като избор на най-важни променливи, оценка на степента на нелинейност и други, които позволяват обосновано да се подходи при избора на структура на моделите.

В [1] се предлага теоретико-емпиричен подход за избор на структура на модела. Отначало, въз основа на предварителна информация за изучавания процес или обект, се формира предполагаема структура на модела. След това на основа на експериментални данни се изпълнява проверка за адекватност на модела и в случай на неудовлетворителни резултати се правят структурни изменения или се изпълнява адаптация на параметрите. Това е общоприет подход за избор на структура на модела. След това се прави параметризация на модела, която за класа на линейните модели се свежда до задаване на множество предавателни функции и модел на шума.

В [13] се предлага процедура, която детайлизира подхода, предложен в [1], с отчитане на допълнителна априорна информация за системата "обект-среда". Процедурата включва избор на типа модел (линеен, нелинеен и др.), определяне на реда на модела. Тъй като всички формализирани процедури се прилагат много трудно, поради споменатите по-горе причини, то за получаване на структура на модели обикновено се прилагат итеративни методи за зададен априори клас модели. Този подход е доминиращ и е в основата на метода за групово отчитане на аргументи [3]. Използвайки такава итеративна процедура трябва да се вземе решение за спиране на процедурата по структурната идентификация. Най-разработените методи на структурна идентификация са по параметри на модела. Избора на критерий зависи от типа смущения, въздействащи върху обекта и целите които се поставят при идентификацията. Най-често се използват следните критерии, отчитащи адекватност и ред на модела.

Информационен критерий Акаике (AIC) [13]

$$AIC(k) = -\frac{1}{N} L_N(e, X, A^\wedge) \quad (1),$$

където k – ред на модела; $L_N(e, X, A^\wedge)$ – логаритмична функция на вероятността, зависеща от грешката от предсказване на изхода на системата с помощта на модела e , $X \in R^m$ – вектор на обобщения вход, $A^\wedge \in R^k$ – вектор на параметрите на модела.

Този критерий съществено ограничава ръста на сложност, поради присъствие на адитивен член k/N . Проблемът при използването на този критерий AIC е в това, че в практическите задачи функцията на разпределение на смущенията е неизвестна, ако функцията на разпределение на смущенията има нормално разпределение, то от 1, получаваме критерия на Маллоуза [13]:

$$AIC(k) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \ln 2\pi + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1}{N} \sum_1^N e_n^2(A^\wedge) \right) + \frac{k}{N} \quad (2),$$

където $e_n \in R$ – грешка от предсказване на изхода на системата, n – брой измервания, N – дължина на извадката от експериментални данни.

Критерий Байес-Шварц (BSC) [2]:

$$BSC = k \frac{\ln N}{2} + \frac{1}{2} \ln e^2(A^\wedge) \quad (3)$$

Използва се при голяма извадка от експериментални данни.

Критерий ентропия на модела [11]:

$$BSC = k + \ln e^2(A^\wedge) \quad (4)$$

Критерий остатъчна сума от квадрата на грешките на модела (RSS) [13]:

$$RSS = \sum_1^N e_n^2 = \sum_1^N (y_n - \hat{y}_n)^2 \quad (5),$$

където \hat{y}_n – изход на модела.

Величината RSS може да служи за критерий за избор на структура само при липса на смущения. При наличие на смущения се използват производни на този критерий. В частност, ако смущението има нормално разпределение, то може да се използва коригиран RSS критерий и статистика на Фишер.

Въз основа на критерия остатъчна сума от квадрата на грешките на модела (RSS) е създаден критерий - крайна прогнозна грешка [13]:

$$FRE(k) = \frac{N+k}{N-k} RSS(k) \quad (6)$$

Този критерий за разлика от предишните не се нуждае от допълнителна информация за свойствата на смущенията.

За идентификация на реда на динамичните системи, освен описаните по-горе подходи

и критерии могат да се използват методи, основани на анализа на автоко-релационни функции [1,8], информационни матрици [12], на статистически методи и процедури по параметрично оценяване [6,13]. Това са така наречените неявни методи за определяне на реда. В [4] е предложен явен метод за намиране на реда на динамичната система като решение на определено неравенство, получено въз основа на съотношения ранг на матрица и състояние на система.

Въз основа на обзора за структурната идентификация следва, че най-подробно са разработени методи за класа регресионни модели. В основата на всички процедури и методи, избора на структура се базира на статистическите хипотези и използване на различни статистически критерии.

2. Използвани методи

В задачата за идентификация на структурата на ARX (авторегресионен външен модел), чрез използване на функцията **selstruc.m** се избира структурата (реда) на модела на базата на информацията, съдържаща се в матрицата V , получена като изход на Матлаб функциите **arxstruc** или **ivstruc**.

Синтаксисът на командата е следния:

$$[NN, Vm] = selstruc(V, c)$$

Тук c е параметър за избор на критерий. Стойността по подразбиране на c е **'plot'** (графика). Графиката показва процентите на вариациите на изхода, които не се обосновават от модела, като функция на броя на използваните параметри. Всяка стойност дава най-добрата настройка на модела при съответния брой параметри. Чрез кликане върху графиката (Фиг.1), може да се провери реда на структурите, които ни интересуват. Чрез кликане върху **Select**, променливата nn се експортира в работното пространство на Матлаб **workspace** като оптимална структура на модела с избран брой параметри. Може да се направят няколко избора. Тази настройка (по подразбиране) предполага ръчен режим на избор на оптималната структура. За да се автоматизира процеса на структурна идентификация се задават други стойности на параметъра c - **'aic'**, **'mdl'** и **n**. В този случай, с цел ускоряване на изчислителния процес, графика не се извежда.

$c = 'aic'$ не ни дава графика, а връща в nn структурата, която минимизира информационния критерий на Акаике (Akaike) (AIC).

$$V_{mod} = V \left(1 + \frac{2d}{N} \right) \quad (7),$$

където V е функция на загубите, d е общият брой параметри във въпросната структура и N е броят на точките от данните, използвани за оценяването.

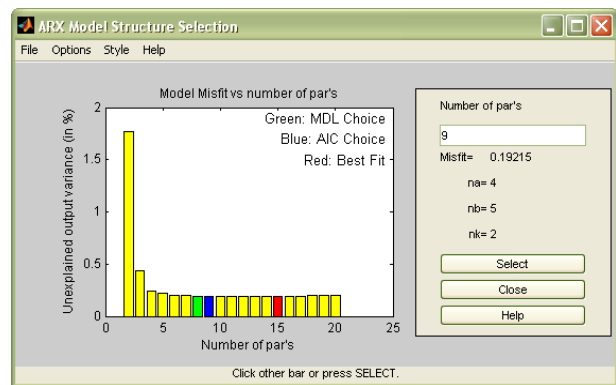
При $c = 'mdl'$ се връща структурата, която минимизира критерия на минималната дължина на описанието на Rissanen (Minimum Description Length - MDL) [10].

$$V_{mod} = V \left(1 + \frac{d \log(N)}{N} \right) \quad (8)$$

Когато на c се зададе числена стойност, структурата се избира чрез минимизацията на:

$$V_{mod} = V \left(1 + \frac{cd}{N} \right) \quad (9)$$

Изходящият аргумент V_{mod} има същия формат като V , но съдържа логаритъма на съответния модифициран критерий.



Фиг. 1. AIC избор за структурата на ARX – модела чрез използване на функцията в Matlab **selstruc**

Най-напред се избират входните фактори, които ще бъдат вариран при различните реализации на тестовете. В GA те са:

- **Crossover_p** – параметър на вероятността на кръстоска;
- **Mutation_r** – скорост (степен) на мутация. За PSO тестовете тези фактори са:
- **Inertia** – инерция;
- **correction_factor** – корекция (фактор на обучение).

При следващата стъпка се съставя централно композиран план на експеримента. Използва се само една централна точка за получаване на симетрично разпределение на еднакво отдалечени стойности в пространството на параметрите. За целта се прилага Матлаб функцията **ccdesign**. Резултатите от планирането при ГА са показани на Фиг.2. За изобразяването им се използва функцията **plot-GaSim.m**

DOE Test Matrix	
Crossover_p	Mutation_r
-1	-1
-1	1
1	-1
1	1
-1	-0
1	0
-0	-1
0	1
0	0

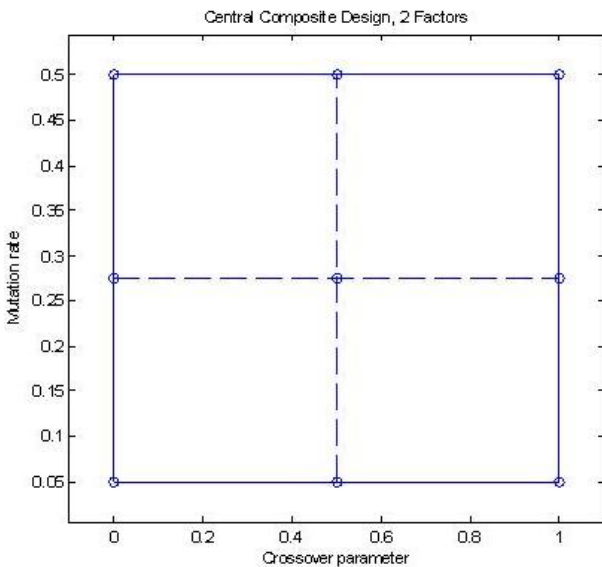
Фиг.2 Тестова матрица за двуфакторен централно композиран план на експеримента.

След това се задават рамките на изменение на факторите:

- Вероятност за кръстосване- **Crossover_p** = 0 ... 1;
- Мутация- **Mutation_r** = 0.05 ... 0.5.

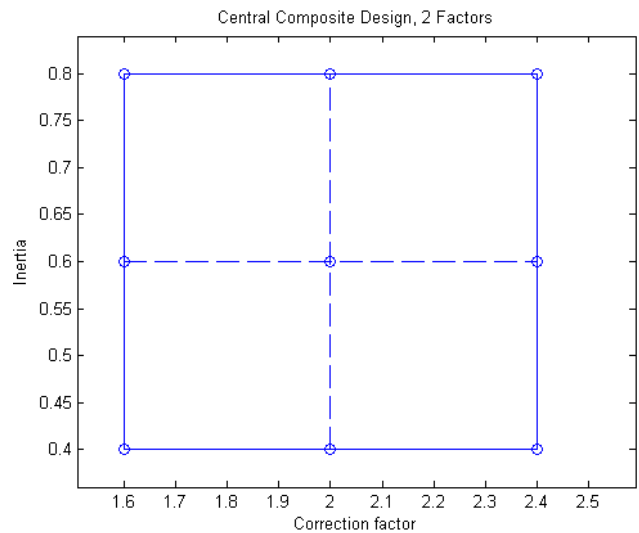
Таблицата с матрицата се умножава с коефициент $n=10$ за да се изпълнят не 9, а 90 теста, защото изходящата стойност AvSAE () е статистически зависима от това. След това параметрите се композират и нормират към границите в пространството на параметрите, чрез използване на функцията **coded2real**.

Позицията на факторите в пространството на параметрите при ГА е показана на Фиг.3.



Фиг.3 Позицията на факторите в пространството на параметрите при ГА-тестовите.

Аналогично се композират и факторите при PSO тестовите. Позицията на факторите в пространството на параметрите при PSO е показана на Фиг.4.



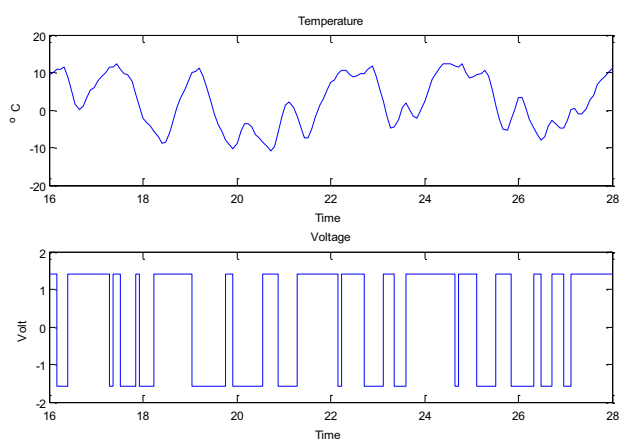
Фиг.4 Позиция на факторите в пространството на параметрите при PSO тестовите

В следващата стъпка стойностите на **correction_factor**, **inertia**, **mutation_r** и **crossover_p** се разбъркват случайно. Тестът се изпълнява по 90 пъти и за двата алгоритъма. Крайната стойност на променливата **AvSAE** е изходен параметър. Това е средната стойност (средноаритметично) на сумата на абсолютните грешки – разлики между данните и изходите на модела в края на процеса на оценяване. Ако в генетичния алгоритъм са осъществени 50 поколения, тогава ще се използва последната колона в променливата **AvSAE (50)**.

Системното време се засича преди стартиране на симулацията, която се повтаря 90 пъти с разбърканите стойности на вариациите на факторите. След симулацията се засича и времето за спиране. В края на процеса на тестване матрицата AA съдържа стойностите n_a , n_b и n_k на оптималния ред (степен) на ARX модела на изследвания процес за всички проведени тестове.

3. Резултати

В това изследване, в качеството на входни се използват данните, снети от лабораторен експериментален макет PT326 на фирмата Feedback [14]. Процесът представлява въздушен поток, продухван от вентилатор през тръба с нагревател. Въздухът се нагрява във вътрешността на тръбата. Входна величина е напрежението на нагревателя, а изходна – температурата на въздуха на изхода на тръбата. Данните от реалния обект се предават към задачата за идентификация на структурата чрез зареждане на файла **dry2.mat**. Входните и изходни данни са представени графично на Фиг.5.



Фиг.5 Входни и изходни данни от обекта

Индексите за реда в модела се ограничават в диапазона [1 ... 10].

5.1 Идентификация на структурата на ARX-модел чрез използване на GA

Резултатите за първите 20 (от общо 90) теста, получени чрез използване на GA са показани в Таблица 1.

Таблица 1. Резултати от идентификацията на структурата на на линеен ARX – модел, получени чрез използване на GA.

Run No	Crossover_p	Mutation_r	AvSAE_fin_value	na	nb	nk
1	0,2	0,5	-2,0641	5	4	2
2	0,6	0,05	-2,0641	5	4	2
3	0,2	0,5	-2,0646	4	5	2
4	1	0,5	-2,0621	3	6	2
5	1	0,275	-2,0588	5	5	2
6	1	0,05	-2,0452	7	6	1
7	0,2	0,05	-2,0636	3	5	2
8	1	0,275	-2,0641	5	4	2
9	1	0,275	-2,0641	5	4	2
10	0,6	0,275	-2,0646	4	5	2
11	0,2	0,5	-2,0641	5	4	2
12	0,2	0,05	-2,0233	5	3	3
13	0,6	0,05	-2,0646	4	5	2
14	1	0,05	-2,0556	9	4	2
15	1	0,275	-2,0641	5	4	2
16	0,6	0,05	-2,0597	10	4	2
17	0,2	0,275	-2,0646	4	5	2
18	0,6	0,275	-2,0646	4	5	2
19	0,2	0,5	-2,0641	5	4	2
20	1	0,05	-2,0537	3	7	1

В повечето случаи процедурата, прилагаща генетичния алгоритъм (GA), връща стойностите: na = 4, nb = 5, nk = 2.

5.2 Идентификация на структурата на ARX-модела чрез използване на PSO

Резултатите от оценяването на структурата на линеен ARX – модел (първите 20 от общо 90 теста), получени чрез използване на PSO са показани на Табл. 2.

Таблица 2. Резултати от идентификацията на структурата на линеен ARX – модел, получени чрез използване на PSO

Run No	Correction_factor	Inertia	AvSAE_fin_value	na	nb	nk
1	2,4	0,6	0,10694	3	10	10
2	2	0,4	0,10694	3	10	10
3	2,4	0,4	0,10694	3	10	10
4	2,4	0,8	0,10694	3	10	10
5	1,6	0,4	0,10694	3	10	10
6	2	0,8	0,10694	3	10	10
7	2	0,8	0,10694	3	10	10
8	1,6	0,8	0,10694	3	10	10
9	2,4	0,6	0,10694	3	10	10
10	1,6	0,4	0,10694	3	10	10
11	2	0,6	0,10694	3	10	10
12	2,4	0,6	0,10694	3	10	10
13	2,4	0,6	0,10694	3	10	10
14	2	0,8	0,10694	3	10	10
15	2	0,6	0,10694	3	10	10
16	1,6	0,4	0,10694	3	10	10
17	2,4	0,6	0,10694	3	10	10
18	2,4	0,4	0,10694	3	10	10
19	1,6	0,4	0,10694	3	10	10
20	1,6	0,6	0,10694	3	10	10

Процедурата PSO връща всеки път еднакви погрешни стойности на структурните индекси на ARX-модела.

Сравнението на алгоритмите за търсене в този случай показва, че GA работи сравнително добре в тази задача:

na = 4, nb = 5, nk = 2 – същият резултат като функцията в Matlab function, m (виж Фиг.1). Алгоритъмът PSO не работи добре в тази задача.

4. Изводи

1. Структурата на ARX модела е подходяща за оценяване на структурата на реални обекти, чрез използване на обичайни или еволюционни алгоритми;
2. Размер на популацията от 30 индивида е достатъчен за процедура на оценяване на параметрите на ARX модел от нисък ред чрез използване на подход, базиран на генетичния алгоритъм;
3. В задачата за идентификация на структурата на ARX модел не е подходящ подходът, базиран на PSO. В този случай GA работи добре и дава сравнително точна идентификация на структурата;
4. В конкретния случай структурата на ARX модела не съответства на тази на модел, съставен на базата на математичното описание на реалните физични процеси в разглеждания обект. Характерна разлика е наличието на чисто закъснение, дължащо се на необходимото време за транспортиране на въздуха през тръбата на сушоара. Дори при такава ситуация процесът на идентификация на структурата дава задоволителни резултати;

5. Добре би било да се направят аналогични изследвания, базирани на използването на нелинеен ARX – модел и да се сравнят резултатите с тези, получени в настоящата статия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бокс Д., Дженкинс Г. Анализ временных рядов, прогноз и управление. Вып. 1. – М.: Мир, 1974. – 406 с.

2. Вучков И., Бояджиева Л., Солаков Е. Прикладной регрессионный анализ / Пер. с болг. – М.: Финансы и статистика, 1987., – 239с.

3. Ивахненко А. Г., Мюллер И. А. Самоорганизация прогнозирующих моделей. – Киев: Техника, 1984., – 350 с.

4. Карабутов Н. Н. Определение порядка линейной динамической системы // Автоматика и телемеханика. 1991. № 4. – с. 180-183.

5. Карабутов Н.Н. Адаптивная идентификация систем: информационный синтез. – М.: УРПС, 2006. – 384 с.

6. Пасаран М., Слейтер Л. Динамическая регрессия: Теория алгоритма. – М.: Финансы и статистика, 1984. – 310 с.

7. Прангишвили И. В., Лотоцкий В. А., Гинсберг К. С., Смолянинов В. В. Идентификация систем и задачи управления: на пути к современным системным технологиям // Проблемы управления. 2004. № 4. – с. 2-16.

8. Райбман Н.С., Чадеев В.М. Построение моделей процессов производства. – М.: Энергия, 1975. – 376 с.

9. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управление – М.: Мир, 1975. – 648 с.

10. Barron, A. R., J. Rissanen, and B. Yu (1998). The Minimum Description Length Principle in coding and modeling. IEEE Transactions on Information Theory 44 (6), October 1998., pp. 2743 – 2760.

11. Crutchfield J.P., McNamara B.S. Equations of motion from a data series // Complex Systems, 1987. V. 1. – pp. 417 – 452.

12. Desrochers A., Mohseni S. On determining the structure of non-linear systems // Int. J. Control. 1984. V. 40. N 5. – P. 923 – 938.

13. Ljung L. System Identification – Theory for the User. Prentice Hall, Upper Saddle River, N. J. 2nd edition, 1999. P. – 499.

14.

<http://www.aero.iitb.ac.in/aero/facilities/PT326.pdf>

Department of Electrical Engineering
Technical University–Sofia, Branch Plovdiv
25 Tsanko Dystabanov St.

4000 Plovdiv

BULGARIA

E-mail: rrrrosi@abv.bg

E-mail: rum_pop@yahoo.com;



ИНВАРИАНТИ ЗА ЕНЕРГОИКОНОМИЧНО УПРАВЛЕНИЕ НА ЕЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

ИВАН КОСТОВ, ВАСИЛ СПАСОВ, ГЕОРГИ ИВАНОВ

Резюме: *Получени са и са систематизирани математични модели на енергийни инварианти в основните видове електрически машини за целите на тяхното управление в относителни и абсолютни единици. Представени са резултати от изчислителни процедури за количествена оценка на инвариантната мощност на загубите в относителни единици. Процедурите са осъществени чрез математични модели на примера на машина за постоянен ток. Достоверността на получените резултати е потвърдена чрез сравнителен анализ с неоптималната мощност на загубите при постоянен момент в първа зона и при постоянна мощност/момент във втора зона. Крайните резултати са представени в графичен вид. Дадени са насоки на бъдещи изследвания.*

Ключови думи: *двигател за постоянен ток, асинхронен двигател, синхронен двигател, енергийна инварианта, управление, мощност на загубите.*

INVARIANTS OF ELECTRICAL MOTORS POWER SAVING CONTROL LAWS

IVAN KOSTOV, VASIL SPASOV, GEORGI IVANOV

Abstract: *Mathematical models of energy invariants in the main types of electric machines have been obtained and summarized for their control in relative and absolute terms. Results are presented of the computational procedures for quantitative evaluation of the invariant power loss in relative units. The procedures are performed by mathematical models following the example of DC machine. The validity of the results is confirmed by comparative analysis with inefficient power loss at a constant torque in the first zone and at constant power/torque in the second zone. The final results are presented in graphical form. Guidance is given for future research.*

Key words: *DC motor, induction motor, synchronous motor, energy invariant, control, power losses.*

1. Въведение

Технологичният скок, извършен през последните две столетия, се характеризира преди всичко с това, че на основата на фундаментални научни открития бяха намерени механизми за използване на природния енергиен потенциал. Въпреки че тези механизми постоянно се усъвършенстват и намират своето

въплъщение във вид на конкретни технически решения, енергийното бъдеще не е сигурно, а сигналите за бъдеща енергийна криза вече се проявяват. Основната част от използваната в момента енергия е резултат от изгаряне и преработка на природни ресурси, запасите на които непрекъснато намаляват. Самите процеси на производство и потребление на енергия

оказват негативно и засега необратимо влияние върху екологичната ситуация, значението на която вече започна да се признава. Възможно е в близко бъдеще да бъдат открити принципно нови технологии и механизми за получаване на енергия, лишени от отрицателно въздействие върху околната среда, и тогава ще се осъществи т.нар. енергиен пробив. Засега обаче цената на добиваната енергия постепенно нараства и особена актуалност придобива проблемът за максимално ефективното и разумното ѝ използване. Напоследък значителна част от усилията на научно-техническата общност - учени, конструктори и разработчици на технически системи - е насочена към търсене на пътища за икономия на енергия и към развитие на енергоикономични технологии, при това още на стадия конструиране на техническите обекти (използване на по-малко енергопоглъщащи материали, усъвършенстване на конструкции и т.н.), на стадия проектиране на техническите системи (например, избор на оптимална от енергийна гледна точка структура на системата) и на стадия експлоатация (адекватно натоварване на технологичното оборудване и използване енергоикономични способи и алгоритми за управление).

Основен потребител на електрическа енергия са електромеханичните системи (ЕМС) - електрозадвижвания, работещи в състава на различни промишлени, транспортни и битови механизми и агрегати. Затова проблемът за осигуряване на максимална ефективност на процесите на преобразуване на енергията в електрозадвижванията (ЕЗ) е твърде актуален, а неговото решаване има несъмнена практическа стойност.

Асинхронният двигател е предпочитан за използване в различни технологични установки и агрегати поради простотата на конструкцията си, високата надеждност, добрите масогабаритни и ценови показатели в сравнение с двигателя за постоянен ток, и по всичко личи, че в бъдеще ще стане основен електромеханичен преобразувател. Във връзка с това, задачата за осигуряване на максимално ефективно електромеханично преобразуване на енергията в асинхронното електрозадвижване (АЕЗ) е особено актуална. За същественото разширение на областите на приложение на АЕЗ на първо място способства техническата реализация на идеите на честотното регулиране, разработката на евтини електронни силови преобразуватели, а на второ място - използването на математическия апарат на координатните преобразувания на променливите на обобщената електрическа машина.

Координатните преобразувания на променливите служат не само като ефективен инструмент за анализ на процесите в електрическите машини за променлив ток - както асинхронни, така и синхронни, - уеднаквявайки ги с тези на машините за постоянен ток, но и значително опростяват задачата за синтез на оптимални регулатори за управление.

Известно е, че всяка оптимална система се изгражда, изхождайки от достигането на екстремални стойности на определена оценка, характеризираща качеството на нейната работа. Изборът на оценка за качеството на електрозадвижването се обуславя от режимите му на работа и условията на експлоатация. Във връзка с това електрозадвижванията се разделят на две съществено различни групи. Към първата се отнасят електрозадвижванията, работещи в динамични режими, свързани с отработката на бързо изменящи се управляващи и смущаващи въздействия. Към втората група се отнасят електрозадвижванията, работещи основно в статични режими с постоянен или бавно изменящ се съпротивителен момент. Двете групи се различават съществено по свойства, техническа реализация и цена, като цената на първите е с един порядък по-висока от тази на вторите.

За електрозадвижванията от втората група съществуват две формулировки на задачата за оптимизация. Първата е свързана с избора на управляващи въздействия (напрежение, честота), осигуряващи необходимите за технологичния процес скорост и момент и оценката на тези въздействия с помощта на съвкупност от показатели на качеството на управление (загуби на мощност, електрически загуби в статора, електрически загуби в машината, фактор на мощността $\cos\phi$, коефициент на полезно действие и др.). Втората формулировка е свързана със задачата за най-пълно използване на енергийните ресурси на АД при претоварване на задвижването - осигуряване на максимална мощност при наличие на ограничения (максимално-допустима стойност на статорния ток, на статорното напрежение, на загубите в двигателя и др.). Осигуряването на максимална механична мощност при зададена скорост води до получаване на максимален момент, а при зададен момент води до получаване на максимална скорост, а следователно и до максимална производителност на механизма.

В статията е поставен и решен проблемът за намиране на обобщени критерии за определяне на инварианти на управлението, приложими за проектиране на оптимални

електрозадвигвания с двигатели за постоянен и променлив ток.

Таблица 1
Типични инварианти в ЕМС

Таблица 1.	
Решаване на задача	Инварианти
	<i>Електромагнитни инварианти</i>
$\Psi_s = \text{const}$	Поддържане на постоянно потокосцепление на статора.
$\Psi_r = \text{const}$	Поддържане на постоянно потокосцепление на ротора.
$\Phi = \text{const}$	Поддържане на постоянен магнитен поток.
	<i>Енергийни инварианти</i>
$\Phi = \Phi_{\text{opt}}$	Поддържане на оптимален магнитен поток.
$s = s_{\text{opt}}$	Поддържане на оптимално хлъзгане.
	<i>Технологични инварианти</i>
$\omega = \omega_0$	Поддържане на зададена честота на въртене.
$\theta = \theta_0$	Позициониране на зададен ъгъл на завъртане.
$\Delta\theta = \Delta\theta_0$	Завъртане на вала на зададен ъгъл.
$M = M_0$	Поддържане на зададен момент на вала.
$P = P_0$	Поддържане на зададена мощност.
$\omega = f_1(t)$ $\theta = f_2(t)$ $M = f_3(t)$ $P = f_3(t)$	Изменение на честотата на въртене, ъгъла на завъртане, въртящия момент или мощността по зададен закон във времето.

2. Математичен модел на мощността на загубите и енергийни инварианти в електромеханичните системи (ЕМС)

2.1. Модел на загубите

В теорията на управлението критериите на управлението и целите на проектантите е прието да се изразяват във вид на съответна система инварианти, а инвариантите, свързани с оптимизацията на енергийните режими, се наричат енергийни [5,6].

Най-ефективният от енергийна гледна точка е режимът на ЕМС, при който загубата на енергия в нейните силови канали е минимална. Затова допълнително под енергийни инварианти на ЕМС се разбира свързването на физически променливи в съотношения по определен начин, характеризиращи режима на минимална загуба на енергия.

Както е известно, енергията, подавана към ЕМС и в крайна сметка използвана за извършване на механична работа, преминава в нейния силов канал етапи на електрическо, електромеханично и механично преобразуване. При това част от енергията неизбежно се губи, отделена под формата на топлина. Но ако загубите в електрическите (токоизправители, преобразуватели, инвертори и т.н.) и механични преобразуватели се определят основно от

конструктивните им особености, то в електромеханичните преобразуватели (електрическите двигатели) съществува възможност да се променя в известна степен нивото на загубите, без да се променя конструкцията или режима на работа. Потенциалната възможност за оптимизация на енергийните режими е отбелязана в редица документи [2,3] чрез анализ на изменението на съставлящите загуби в зависимост от режима на работа.

Загубите на енергия в електрическата машина са сложна нелинейна функция на електрически, магнитни и механични величини. В общия случай загубите на енергия могат да бъдат представени като сума на постоянните загуби, независими от натоварването и на променливите загуби, зависими от натоварването [4]. Постоянните загуби включват магнитните загуби (загуби в стоманата от хистерезис и вихрови токове), механичните загуби и загубите във възбудителната верига (електрически от възбудителния/намагнитващия ток). Променливите загуби зависят от натоварването на вала на двигателя и са електрически загуби в медта на намотките от котвения/статорния и роторния ток. В последващите разсъждения се приема, че връзката между магнитен поток и възбудителен ток е линейна и че в общия случай не се налага ограничение върху големината на координатите скорост, магнитен поток и мощност. Така общите загуби ΔP_{Σ} могат да бъдат записани както следва [5]:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_e + \Delta P_{Cu}, \quad (1)$$

където ΔP_{Fe} , ΔP_{mech} , ΔP_e , ΔP_{Cu} са съответно загубите в стоманата, в механичните части на двигателя, във възбудителната верига и в медта.

Загубите в стоманата, включващи загуби от хистерезис и вихрови токове, зависят от марката/типа на използваната стомана и от амплитудата и честотата на изменение на магнитния поток:

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Fe_{nom}} \left(\frac{f}{f_{nom}} \right)^{\beta} \left(\frac{\Phi}{\Phi_{nom}} \right)^2, \quad (2)$$

където $\Delta P_{Fe_{nom}}$ са номиналните загуби в стоманата, Φ - пълният магнитен поток, f - честотата на пренамагнитването, Φ_{nom} и f_{nom} - номиналните им стойности, а β е коефициент, зависим от марката/типа използвана стомана.

Механичните загуби се състоят от загуби в лагерите, загуби от триене в четките и вентилационни загуби. Те се определят от честотата на въртене:

$$\Delta P_{\text{mech}} = \Delta P_{\text{mech nom}} \left(\frac{\omega_{\text{mech}}}{\omega_{\text{mech nom}}} \right)^n, \quad (3)$$

където ω_{mech} е честотата на въртене, n – степенен показател, зависим от механичните свойства на двигателите (от инерционния момент на котвата, типа на лагерите, начините на охлаждане и др.), $n = 1 \div 1.5$, а $\Delta P_{\text{mech nom}}$ са номиналните механични загуби.

Загубите във възбудителните вериги характеризират разсейването на енергията в намотките, които формират пълния магнитен поток на машината и се определят от

$$\Delta P_e = I_e^2 r_e \quad (4)$$

$$\Delta P_e = I_0^2 r_e, \quad (5)$$

където r_e е активното съпротивление на еквивалентната възбудителна намотка; $I_e(I_0)$ – възбудителен ток (реактивната съставлява на статорния ток).

Загубите в медта на котвената (роторната) намотка в областта на малките хлъзгания са

$$\Delta P_{\text{Cu}} = I_a^2 r_a \quad (6)$$

$$\Delta P_{\text{Cu}} = 3I_2'^2 (r_1 + r_2'). \quad (7)$$

В (6) и (7) I_a и r_a са ток и съпротивление на котвата; $I_2'^2$ и r_2' – приведени към статорната намотка ток и съпротивление на котвената верига, а r_1 е съпротивление на статорната намотка.

От (1) – (7) като се премине към относителни единици могат да се запишат сумарните загуби на мощност във вида:

$$\Delta p_{\Sigma} = k_{Fe} f_{\text{rel}}^{\beta} \phi_{\text{rel}}^2 + k_{\text{mech}} \omega_{\text{rel}}^n + k_e i_{e \text{ rel}}^2 + k_{\text{Cu}} i_{a \text{ rel}}^2, \quad (8)$$

където с x_{rel} са означени съответно относителните стойности на честотата на пренамагнитване $f_{\text{rel}} = f f_{\text{nom}}^{-1}$, пълния магнитен поток $\phi_{\text{rel}} = \Phi \Phi_{\text{nom}}^{-1}$, честотата на въртене $\omega_{\text{rel}} = \omega_{\text{mech}} \omega_{\text{mech nom}}^{-1}$, тока на възбудяването

$i_{e \text{ rel}} = i_e i_{e \text{ nom}}^{-1}$ и тока на котвата (ротора)

$i_{a \text{ rel}} = i_a i_{a \text{ nom}}^{-1}$, а с k_{xx} – относителните съставлящи на загубите за номиналния режим на работа; $k_{xx} = \frac{\Delta P_{xx \text{ nom}}}{\Delta P_{\Sigma \text{ nom}}}$.

Вижда се, че сумарните загуби в електрическата машина са нелинейна функция на четири променливи. Като се използват уравненията на връзките от теорията на електрическите машини и се отчетат известните

допускания на теорията, може да бъде намален броят на променливите в (8).

Връзката между тока в котвената намотка и електромагнитния момент за постояннооточовите машини е $M = c I_a \Phi$, а за асинхронните двигатели - $M = c I_2' \Phi \sin \varphi_2$. Тук c е константа, свързана с конструкцията на намотките, а φ_2 – ъгълът между векторите I_2' и Φ .

За работния участък на характеристиките се приема $\varphi_2 = \frac{\pi}{2}$. Тогава

връзката между момента, потока и тока на ротора (котвата) в относителни единици за двата типа машини се записва с един израз:

$$m_{\text{rel}} = i_{\text{rel}} \phi_{\text{rel}}; \quad m = i \phi. \quad (9)$$

В машините за постоянен ток и в асинхронните машини относителната честота на пренамагнитване на стоманата на статора е равна на относителната честота на въртене на ротора:

$$f_{\text{rel}} = \omega_{\text{rel}}; \quad f = \omega. \quad (10)$$

Като се приема магнитната система на машините за ненаситена ($i = \phi$), с помощта на (9) и (10), (8) се записва:

$$\Delta p_{\Sigma} = k_{Fe} \omega_{\text{rel}}^{\beta} \phi_{\text{rel}}^2 + k_{\text{mech}} \omega_{\text{rel}}^n + k_e \phi_{\text{rel}}^2 + k_{\text{Cu}} \frac{m_{\text{rel}}^2}{\phi_{\text{rel}}^2}, \quad (11)$$

$$\Delta p_{\Sigma} = \Delta p_{\phi} + k_{\text{mech}} \omega_{\text{rel}}^n. \quad (11a)$$

Механичната енергия, генерирана от машината, се определя от момента и честотата на въртене, които от своя страна зависят от типа на задвижвания механизъм и от характера на обслужвания технологичен процес. Следователно моментът и честотата на въртене представляват величини, технологично налагани на двигателя и управлението на магнитния поток остава единствен реален път за оптимизация на енергийните режими в силовите канали на електрозадвижването.

Оптималният от енергийна точка израз за магнитния поток при зададен момент и честота на въртене може да се определи като се

определи производната $\frac{\partial \Delta p_{\Sigma}}{\partial \phi}$ на (11) и се

намери нейният екстремум от уравнението $\frac{\partial \Delta p_{\Sigma}}{\partial \phi} = 0$.

След елементарни математически преобразувания се получава израз за енергийния инвариант на ЕМС в общия случай:

$$\frac{\partial \Delta p_{\Sigma}}{\partial \phi} = 2k_{Fe}\omega^{\beta}\phi + 2k_e\phi - 2k_{Cu}\frac{m^2}{\phi^3}, \quad (12a)$$

$$0 = k_{Fe}\omega^{\beta} + 2k_e - 2k_{Cu}\frac{m^2}{\phi^4}, \quad (12b)$$

$$\phi_{opt}^2 = m\sqrt{\frac{k_{Cu}}{k_e + k_{Fe}\omega^{\beta}}}, \quad (12c)$$

$$\phi_{opt} = m^{0.5}\left(\frac{k_{Cu}}{k_e + k_{Fe}\omega^{\beta}}\right)^{0.25}, \quad (12d)$$

$$i_{opt} = m^{0.5}\left(\frac{k_{Cu}}{k_e + k_{Fe}\omega^{\beta}}\right)^{-0.25}. \quad (12e)$$

Изразите (12d,e) дават статичната връзка между магнитния поток, честотата на въртене, момента на вала на двигателя и тока в котвата/ротора, която трябва да се поддържа в процеса на работа за осигуряване на енергоикономично управление на електромеханичните процеси при спазване на технологичните изисквания.

От (12a) се намира втората производна на (11):

$$\frac{\partial^2 \Delta p_{\Sigma}}{\partial \phi^2} = 2k_{Fe}\omega^{\beta} + 2k_e + 6k_{Cu}\frac{m^2}{\phi^4} > 0, \quad (12d)$$

която е положителна и следователно оптималният магнитен поток по (12d) определя стойност на относителните загуби на мощност $\Delta p_{\phi} = \Delta p_{\phi min}$, зависими от ϕ .

Замествайки (12c) в (11) се получава израз за $\Delta p_{\phi min}$:

$$\Delta p_{\phi min} = 2m\sqrt{k_{Cu}(k_e + k_{Fe}\omega^{\beta})}. \quad (13)$$

Следователно за коефициента на полезно действие η може да се напише

$$\eta = \frac{m\omega}{m\omega + \left(\eta_{nom}^{-1} - 1\right)\left(k_{Fe}\omega^{\beta}\phi^2 + k_e\phi^2 + k_{Cu}\frac{m^2}{\phi^2}\right)}, \quad (14)$$

а за максималния η_{max}

$$\eta_{max} = \frac{m\omega}{m\omega + 2m\left(\eta_{nom}^{-1} - 1\right)\sqrt{k_{Cu}(k_{Fe}\omega^{\beta} + k_e)}}, \quad (15a)$$

или

$$\eta_{max} = \frac{\omega}{\omega + 2\left(\eta_{nom}^{-1} - 1\right)\sqrt{k_{Cu}(k_{Fe}\omega^{\beta} + k_e)}}. \quad (15b)$$

2.2. Модел на енергийната инварианта

Електромагнитните и механичните променливи на ЕМС си взаимодействат във времето според добре известни физични закони

и се намират в известни отношения със статичните режими, изразени в подходящи математически модели. Някои от тези променливи са управляващи и трябва целенасочено да се променят в съответствие със спецификата и целта на функционирането на цялата система. Генерирането на необходимото механично движение е свързано с управление на променливи, характеризиращи това движение - позиция, скорост, въртящ момент. Механичните променливи се управляват в съответствие с изискванията на процеса, което се осигурява от технологични инварианти. Следователно, оптимизируемите променливи трябва да се избират от групата на електромагнитните променливи. Също така е очевидно, че управлението на такава променлива трябва да е физически реализуемо, и че трябва да се синтезира независим контур за нейното управление.

За установения режим на електрозадвижването може да се запише $M = M_L$.

$$(16)$$

Като се имат предвид (9) и (12) за оптималния магнитен поток на ДПТ в абсолютни единици може да се запише

$$\Phi_{opt} = \Phi_{nom}M_{nom}^{-0.5}M_L^{0.5}\left(\frac{k_{Cu}}{k_e + k_{Fe}\omega^{\beta}}\right)^{0.25}, \text{ или}$$

$$\Phi_{opt} = k_I M_L^{0.5}\left(\frac{k_{Cu}}{k_e + k_{Fe}\omega^{\beta}}\right)^{0.25}. \quad (17)$$

За оптималния котвен ток се получава

$$I_{opt} = \frac{M_L}{c_I \Phi_{opt}} = \frac{M_L^{0.5}}{c_I k_I}\left(\frac{k_{Cu}}{k_e + k_{Fe}\omega^{\beta}}\right)^{-0.25}. \quad (18)$$

Този подход позволява да се получи система от енергийни инварианти за основните видове електрозадвижвания с двигатели за постоянен и променлив ток, а крайният резултат е обобщен в табл. 2.

Коефициентите k и c зависят от електромагнитните параметри и мощността на електрическата машина, M_L е натоварването на вала на двигателя, ω е ъгловата скорост на ротора/котвата, z_p са чифтовете полюси, а L_m , L_{md} и L_r са взаимната и собствените индуктивности на намотките.

3. Графично представяне на резултатите.

На фиг. 1 са показани резултати от зависимостта на загубите на мощност от скоростта за асинхронен двигател. На фиг. 1а е показано изменението на сумарната мощност на

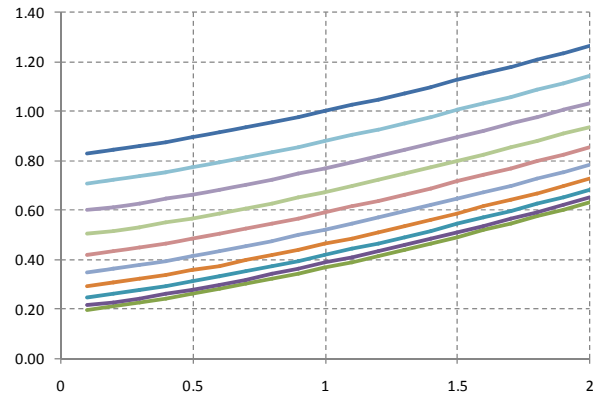
постоянните и променливите загуби при двузонно регулиране с постоянен момент в първа зона и с постоянна мощност във втора зона. На фиг. 1б е дадена мощността на променливите загуби, а на фиг. 1в – мощността на постоянните загуби. Двигателят е тип АО90L-4D с параметри $k_{Cu}=0.64$, $k_{Fe}=k_e=0.18$, $\beta=1.3$ и $\eta_{nom}=75\%$.

Таблица 2

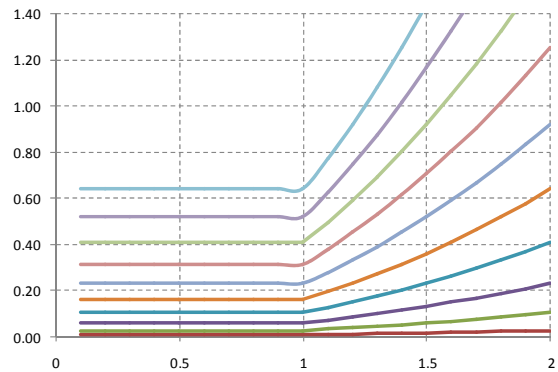
Енергийни инварианти в ЕМС

Оптимална променлива	Енергийна инварианта
	<i>Постояннотокова машина</i>
Магнитен поток	$\Phi_{opt} = k_1 M_L^{0.5} \left(\frac{k_{Cu}}{k_e + k_{Fe} \omega^\beta} \right)^{0.25}$
Ток на възбудителната намотка	$I_{e opt} = k_\phi k_1 M_L^{0.5} \left(\frac{k_{Cu}}{k_e + k_{Fe} \omega^\beta} \right)^{0.25}$
Котвен ток	$I_{opt} = \frac{M_L^{0.5}}{c_1 k_1} \left(\frac{k_{Cu}}{k_e + k_{Fe} \omega^\beta} \right)^{-0.25}$
Уравнения на връзките	$k_1 = \Phi_{nom} M_{nom}^{-0.5}$, $k_\phi = \Phi_{nom}^{-1} I_{e nom}$, $c_1 = z_p N (2\pi a)^{-1}$
	<i>Асинхронна машина</i>
Роторно потокоцепление	$\Psi_{r opt} = k_2 M_L^{0.5} \left(\frac{k_{Cu}}{k_e + k_{Fe} \omega^\beta} \right)^{0.25}$
X компонента на статорния ток	$I_{sx opt} = k_{\psi x} k_2 M_L^{0.5} \left(\frac{k_{Cu}}{k_e + k_{Fe} \omega^\beta} \right)^{0.25}$
Y компонента на статорния ток	$I_{sy opt} = \frac{M_L^{0.5}}{c_2 k_2} \left(\frac{k_{Cu}}{k_e + k_{Fe} \omega^\beta} \right)^{-0.25}$
Уравнения на връзките	$k_2 = \Psi_{r nom} M_{nom}^{-0.5} = L_m I_{sx nom} M_{nom}^{-0.5}$, $k_{\psi x} = \Psi_{r nom}^{-1} I_{sx nom} = L_m^{-1}$, $c_2 = 3z_p L_m (2L_r)^{-1}$
	<i>Синхронна машина</i>
Роторно потокоцепление	$\Psi_{r opt} = k_3 M_L^{0.5} \left(\frac{k_{Cu}}{k_e + k_{Fe} \omega^\beta} \right)^{0.25}$
Ток на възбудителната намотка	$I_r opt = k_{\psi d} k_3 M_L^{0.5} \left(\frac{k_{Cu}}{k_e + k_{Fe} \omega^\beta} \right)^{0.25}$
q компонента на статорния ток	$I_{sq opt} = \frac{M_L^{0.5}}{c_3 k_3} \left(\frac{k_{Cu}}{k_e + k_{Fe} \omega^\beta} \right)^{-0.25}$
Уравнения на връзките	$k_3 = \Psi_{r nom} M_{nom}^{-0.5} = L_{md} I_{sx nom} M_{nom}^{-0.5}$, $k_{\psi d} = \Psi_{r nom}^{-1} I_{sx nom} = L_{md}^{-1}$, $c_3 = 3z_p 2^{-1}$

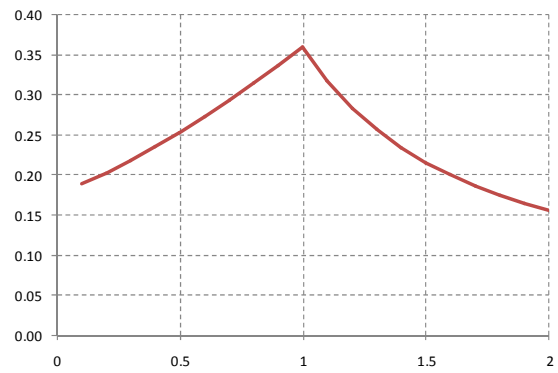
Параметър на изследването е моментът на двигателя. Вижда се, че сумарните загуби не превишават номиналните за моменти до около 60% от номиналния.



а



б



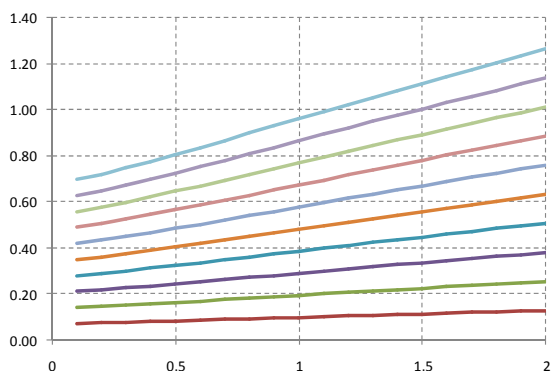
в

Фиг.1. Зависимост на относителната мощност на загубите Δp_ϕ от скоростта ω .

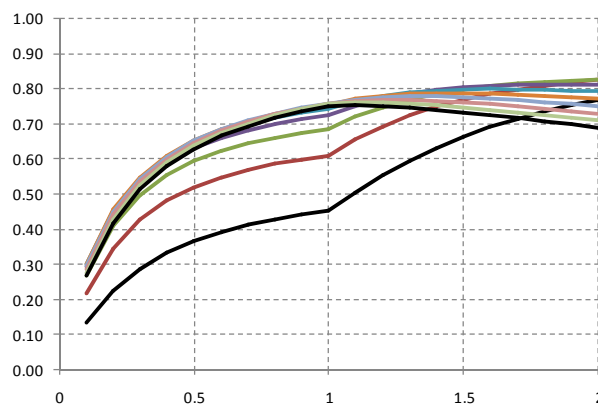
а- Δp_ϕ , б- Δp_{Cu} , в- ($\Delta p_{Fe} + \Delta p_e$).

$\phi=1, \omega \leq 1; \phi = \omega^{-1}, \omega > 1; 0 < m \leq 1$.

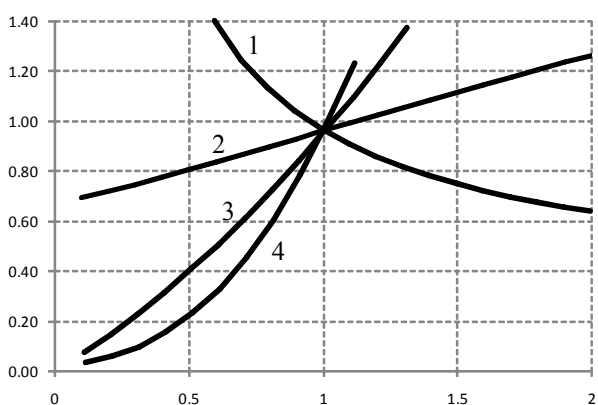
На фиг. 2 е показано изменението на относителната минимална мощност на загубите $\Delta p_{\phi min}$ от скоростта $\Delta p_{\phi min} = f(\omega)$ за различни натоварвания между празен ход и номинално натоварване в съответствие с (13).



Фиг. 2. Зависимост на относителната мощност на загубите $\Delta p_{\phi \min}$ от скоростта ω . $0 < m \leq 1$.

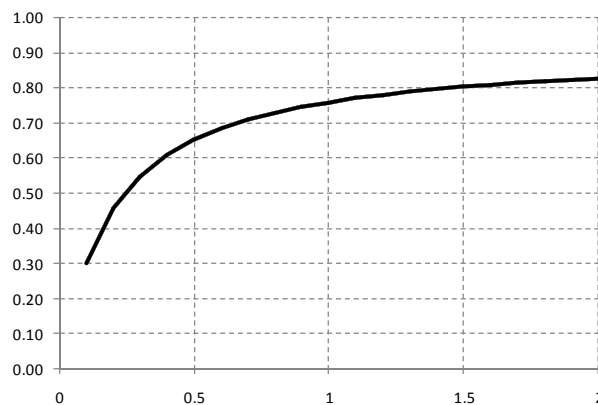


Фиг. 5. Зависимост на η от скоростта ω . $\phi = 1, \omega \leq 1; \phi = \omega^{-1}, \omega > 1; 0 < m \leq 1$.



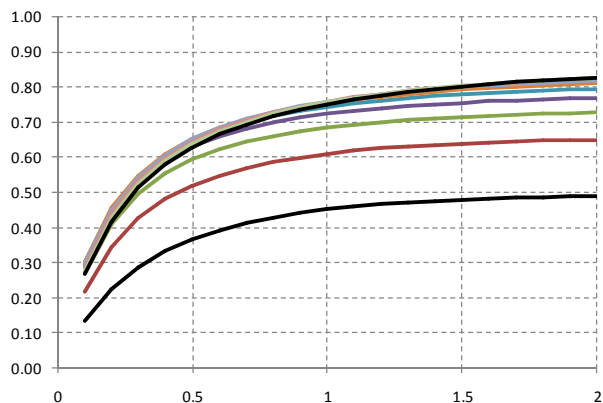
Фиг. 3. Зависимост на относителната мощност на загубите $\Delta p_{\phi \min}$ от скоростта ω . $m = \omega^n, n = -1, 0, 1, 2$.

На фиг. 3. е показана зависимост на относителната мощност на загубите $\Delta p_{\phi \min}$ от скоростта за електрозадвигвания на механизми с различен характер на съпротивителния момент в зависимост от скоростта – хиперболичесен (1), постоянен (2), линеен (3) и квадратичен (4).

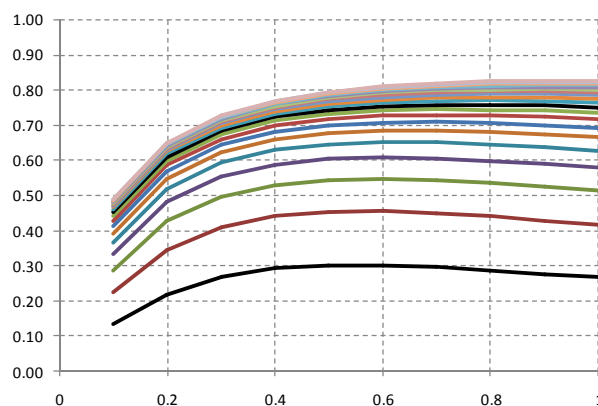


Фиг. 6. Зависимост на η_{\max} от скоростта ω .

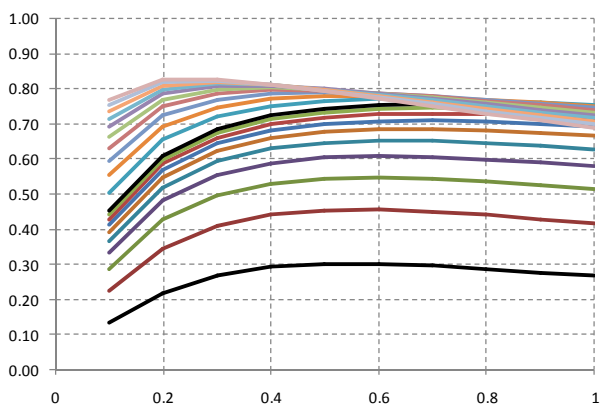
Показани са зависимостите на коефициента на полезно действие от скоростта за случаите на постоянен магнитен поток (фиг. 4) в двете зони на управление на скоростта; на постоянна мощност (фиг. 5) във втора зона и на максималния коефициент на полезно действие (фиг. 6). По-големи възможности за икономия на енергия има при по-ниски скорости и съпротивителни моменти и по-малко – при номиналните стойности.



Фиг. 4. Зависимост на η от скоростта ω . $\phi = 1; 0 < m \leq 1$.

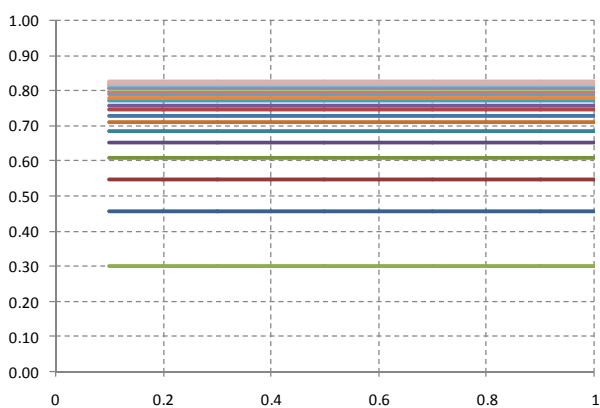


Фиг. 7. Зависимост на η от момента m . $\phi = 1; 0 < \omega \leq 2$.



Фиг. 8. Зависимост на η от момента m .

$$\phi = 1, \omega \leq 1; \phi = \omega^{-1}, \omega > 1; 0 < \omega \leq 2.$$



Фиг. 9. Зависимост на η_{\max} от момента m .

$$\phi = 1; 0.1 < \omega \leq 2.$$

Показани са зависимостите на коефициента на полезно действие от момента за случаите на постоянен магнитен поток (фиг. 7) в двете зони на управление на скоростта, на постоянна мощност (фиг. 8) във втора зона и на максималния коефициент на полезно действие (фиг. 9). Фигурите са аналогични на 4, 5 и 6, но с разменени места на аргумента и параметъра. При малки натоварвания във втора зона и постоянна мощност на вала има възможност КПД да се увеличи над номиналната стойност.

3. Заключение

Претенции за научни и научно-приложни приноси

Разработени са математически модели на енергийни инварианти в относителни и абсолютни единици. Разработените модели са приложени към асинхронен двигател тип АО90L-4D. Проведени са изчислителни експерименти в относителни единици с моделите и са получени графични резултати. Направени са изводи за зависимостта на сумарните загуби от момента на двигателя.

Построени са зависимостите на относителната мощност на загубите от скоростта при различни натоварвания и различен характер на съпротивителния момент. Изследвана е зависимостта на коефициента на полезно действие от скоростта и са направени изводи относно възможностите за енергоикономично управление на асинхронни двигатели. Сравнителният анализ с неоптимална мощност на загубите при постоянен момент в първа зона и при постоянна мощност/момент във втора зона доказва валидността и практическата полза на разработените модели.

Насоки на бъдещи изследвания

Получените инварианти могат да се използват за синтез на енергоикономично управление на статичните режими в съвременни електрозадвижвания с векторно управление на принципа на подчиненото регулиране.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Владимиров П.**, Определяне на съставките на загубите в асинхронна машина при честотно управление, *Научни трудове на Русенския Университет - 2008*, том 47, серия 3.1, стр.33-39.
2. **И.Я.Браславский, З.Ш.Ишматов, В. Н.Поляков**, Энергосберегающий Асинхронный Электропривод, *Москва, Academia 2004*, 202 стр.
3. **Ильинский В., В.Москаленко**, Электропривод. Энерго- и Ресурсосбережение, *Москва, Academia 2008*, 105 стр.
4. **Riccardo Marino, Patrizio Tomei, Cristiano M. Verrelli**, Induction Motor Control Design, *Springer-Verlag London Limited, 2010*, ISBN 978-1-84996-283-4, e-ISBN 978-1-84996-284-1, 371 стр.
5. **Kostov I., Rumen Mishkov**, Optimal control of a two-input nonlinear system, *Journal of the Technical University at Plovdiv, 2008*, vol.13 pp. 5-16, ISSN 1310-8271.
6. **Цонев, С., В.Витлиемов, П.Коев**. Методи за оптимизация. (Библиотека за докторанта), 2. изд., Русенски университет, Русе, 2004, ISBN 954-712-229-0, 248 стр.

Control Systems Department
 Electrical Engineering Department*
 Technical University–Sofia, Branch Plovdiv
 25 Tsanko Dyustabanov St.
 4000 Plovdiv, BULGARIA
 E-mail: ijk@tu-plovdiv.bg
 E-mail: vasilspasov@yahoo.com*
 E-mail: georgi.iwanow@gmail.com



ПРЕДИМСТВА НА НОВИ СИСТЕМИ ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА СЪОТНОШЕНИЕ „ВЪЗДУХ-ГОРИВО”

ЗАХАРИ КАВРОШИЛОВ

Резюме: В статията се представят свойства на нови системи за управление на оптимално съотношение „въздух – гориво”, които допълват предимствата им спрямо съществуващи подобни. Анализират се случаи на комбинирани смущения по задание и приведени към обекта смущения. Дават се подходи и решения, свързани с практически аспекти на използването им.

Ключови думи: управление на съотношение въздух-гориво,, управление на котли

ADVANTAGES OF USING NEW CONTROL SYSTEMS OF RATIO „AIR-FUEL”

ZACHARY KAVROSHILOV

Abstract: The article presents properties of new systems for control an optimal ratio "air-fuel" that complement their advantages compared to existing ones. Analyzed cases of combined interference task and brought to site disturbance. New approaches and solutions related to the practical aspects are discussed.

Key words: ratio air-fuel control, boiler control

1. Въведение

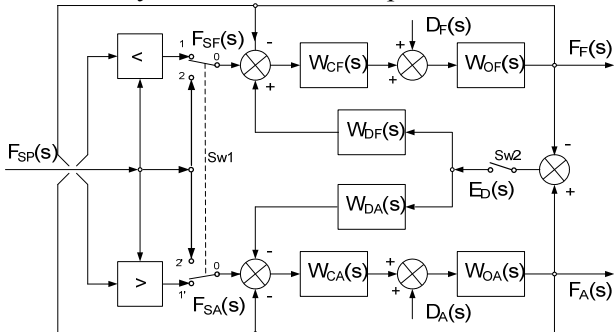
Управлението на оптимално съотношение „Въздух- гориво” е основен фактор за ефективната работа на широк клас топлогенератори (парни и водогрейни котли), използващи течни или газообразни горива. В поредица публикации [1,2,3] са обосновани, синтезирани и изследвани нови системи за управление, сравнени с традиционно-прилагани подобни. В [4] е създадена детайлна методика за синтез и оптимална настройка на контурите и разработените системи. Настоящата публикация допълва предимствата на тези системи спрямо традиционните.

2. Постановка

Разглеждат се предложени нови схеми за управление – селекторна с допълнителни обратни връзки (Selector with Additional Feed Back - SAFB) и компенсационна, без селекторни блокове –AFB които са анализирани и сравнени с така наречената селекторна, при

която се използва кръстосано ограничаващо управление (Cross Limited Control - CLC) [5] или “Lead-Lag”. При последната заданието за всеки от разходите се определя или от натоварването F_{sp} или от стойността на алтернативния разход чрез включване в структурата на селектори за ниско и високо ниво („<”, „>”). Принципната схема на фиг.1. реализира изследваните системи, които се получават като варианти от състоянията на ключовете Sw1 и Sw2. Разсъгласуването E_D между нормираните разходи служи за формиране на подходящи корекционни въздействия едновременно в двата основни контура за управление. Основната функционална задача се свежда до това, че нормираните преходни процеси на двата разхода трябва максимално да се доближават, или изменението на отклонението на динамичната грешка E_D да бъде тъждествено равно на нула при всички смущения, отнасящи се до заданието

или приложени към обекта. При провеждане на изследванията се правят различни комбинации от смущенията $F_{sp}(s)$, $D_A(s)$, $D_F(s)$. Освен това в правите вериги на двата канала са добавени функционални елементи, отнесени към $W_{OA}(s)$ и $W_{OF}(s)$, отразяващи свойствата на съответстващи технически средства.



Фиг.1. Принципно схемата на изследваните системи

За целта при провеждане на симулации се използват модели, съответстващи на динамичните характеристики на промишлен парогенератор ДЕ 25 т/час - гориво газ, а част от задачите са в резултат от анализа при експлоатацията на реални обекти от този клас. Предавателните функции по двата канала са

$$W_{OA}(s) = \frac{0.35}{(40s + 1)(25s + 1)(10s + 1)} e^{-5s}$$

$$W_{OF}(s) = \frac{1.2}{(10s + 1)}$$

Изборът на компенсатори, настройка на регулаторите и динамичните звена се прави с използване на методиката от[4], или

$$PID_{(AIR)}: K_p=3.9; T_i=70; T_d=17.4; T_f=100$$

$$PI_{(FUEL)}: K_p=0.04; T_i=3.03; T_f=100$$

$$W_{KA}(s) = 1; K_{ED}=200.$$

$$W_{KF}(s) = 0.01(4s + 1)/(0.1s + 1)$$

3. Резултати

Удовлетворяването на основната функционална задача на управлението (минимизация на динамичното отклонение E_D между двата нормирани разхода) е изследвано по отношение на смущения в нормални режими на работа [3], като се използва оценката

$$I_j = \int_{t_1}^{t_2} [E_d^{opt}(t)]^2 dt \quad (1)$$

Предложените схеми проявяват най-значимо предимствата си при работа на съоръженията при променлив товар, тоест при изменение на

заданието от главен регулатор $F_{sp}(t)$. Количествено оценките (1) за предложените схеми се отличават съществено от тези за традиционната и са в диапазони

$$(I_{SAFB} < (10^{-3} - 10^{-4}) I_{CLC}) \text{ и } I_{AFB} < (10^{-3} - 10^{-4}) I_{CLC}$$

Ефективността на работа на предложените схеми се запазва и при работа при смущения върху обектите, като при това се наблюдават свойства, отличаващи се с допълнителни предимства, които разпространените структури не притежават. Освен това разглежданите системи бяха изследвани по отношение на параметрична нечувствителност (грубост) чрез промяна на коефициентите на усилване и времеконстантите на моделите на обектите.

Проведените изследвания отразяват поведението на разглежданите системи при промяна на параметрите K_p и T_i в диапазон от $\pm(20 - 50) \%$ от настройчните стойности. При схема (CLC) неблагоприятните ефекти се усилват при увеличаване на отклоненията на K_p и T_i (оценка 1), като при това се появяват области, съответстващи на недостиг на въздух ($E_D < 0$), което намалява ефекта на едно от нейните основни предимства. Робастността на новосъздадените системи остава висока, като с повишаване на отклоненията единствено се променя характера на преходните процеси, при практически непроменящо се оптимално съотношение E_D .

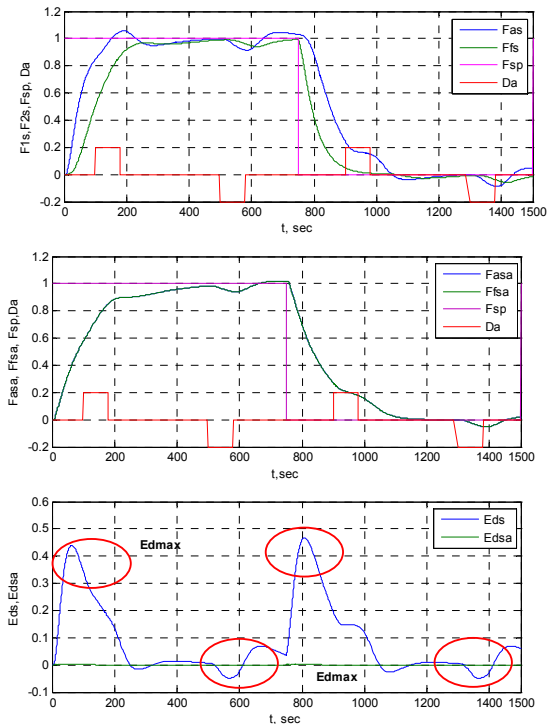
3.1. Едновременно въздействие на смущения по задание и приведени към обекта по един от двата канала на разходите.

Съществуващите схеми обработват с различен успех тези смущения, като общ недостатък се явяват възникналите динамични отклонения E_D и произтичащите от това нежелани ефекти. За изследване са използвани телеграфни сигнали $D_A(t)$, $D_F(t)$, с амплитуда $(0.2 * 1(t))$, продължителност и период, които смущават контурите и в двете посоки, с което става възможно да се направят коректни сравнения със селекторните схеми. Като примери за такива смущения – по канала на горивото – колебания в захранващи магистрали; по канала на основен въздух-смущения на подаващи въздуховоди.

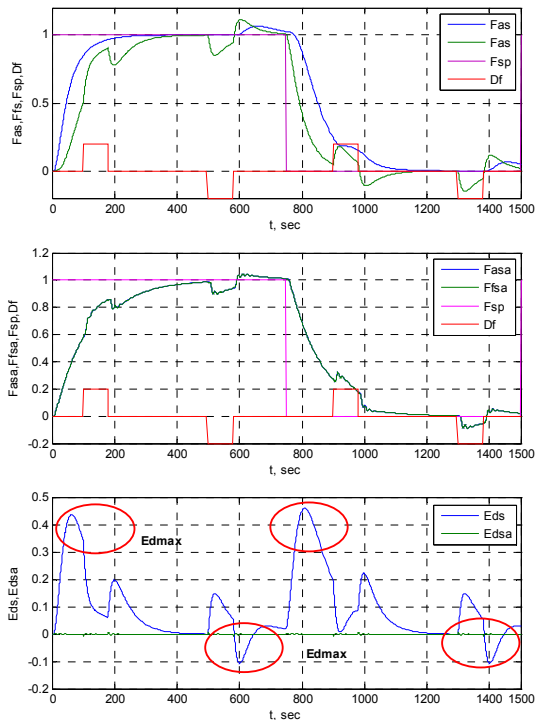
Резултатите от фиг.2 и фиг.3 показват практически припокриване на преходните характеристики независимо от това в кой от каналите действат смущенията за схемите (SAFB -SA) и значителните стойности на разсъгласуването E_D за традиционната схема (CLC -S). По такъв начин при новосъздадените системи практически се реализира пълна

инвариантност на оптималното разсъгласуване по отношение на смущенията върху обекта.

3.2. Работа при ситуации, предизвикани от смущения от тип „ограничени технологични ресурси“.



Фиг.2. Преходни процеси при селекторна "S" (а) селекторна с компенсация „SA" (б) схеми и динамика на Ed (в) при смущения по задание и въздух



Фиг.3. Преходни процеси при селекторна "S" (а) селекторна с компенсация „SA" (б) схеми и динамика на Ed (в) при смущения по задание и гориво

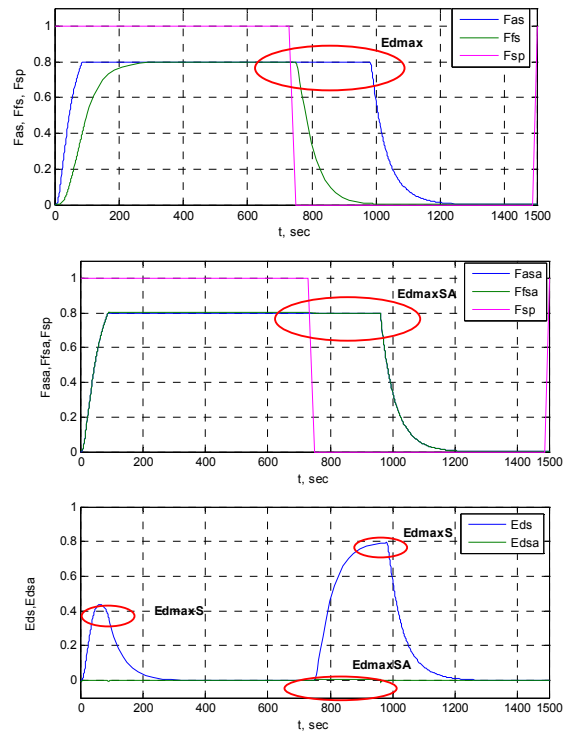
Работоспособността на сравняваните схеми се оценява в случаи, когато в единия от двата канала не се достигат желаните стойности на управляемите променливи в целия работен интервал на изменение. Най често това се наблюдава в зони в горната част на диапазоните, като тези ефекти се класифицират като такива, породени от „ограничени технологични ресурси“. Причините за това могат да бъдат технически, технологични, системни, субективни и др., а проявленията им могат да имат, случаен или епизодичен характер, а също и с относително продължителен период. Тези случаи достатъчно точно се представят чрез елементи от тип „насищане“, като нивата на насищане предварително не са известни.

Примери:

а) по канала на основен въздух – значимо нерегламентирано изтичане на въздух вследствие неизправен въздуховод, неефективна работа на въздушни филтри; намален КПД на вентилатори с ремъчни трансмисии, неизправни дроселиращи елементи и др.

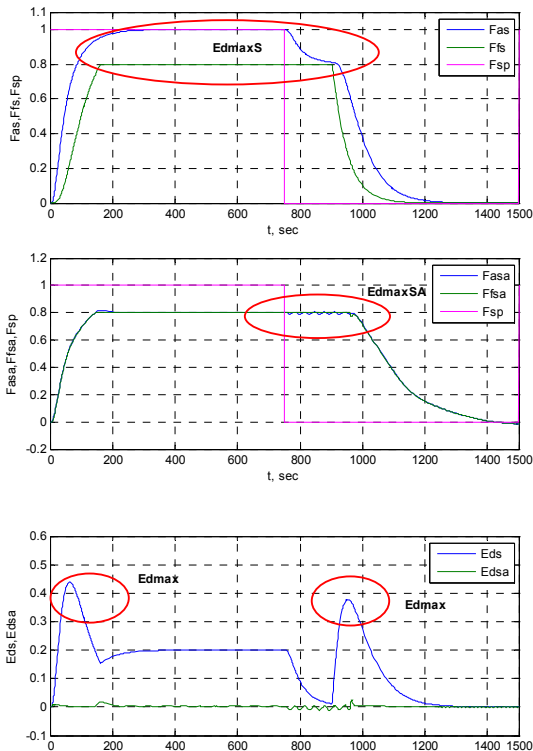
б) по канала на горивото – намаляване на налягането в захранващи магистрали (неизправни филтри, спомагателна и основна арматура, влияние на други потребители на гориво при общи захранващи магистрали) и др.

Тези ситуации са особено значими, когато стойностите на корелираните с основните управляеми променливи технологични величини



Фиг.4. Преходни процеси при селекторна "S" (а) селекторна с компенсация „SA" (б) схеми и динамика на Ed (в) при смущения по задание и наличие на насищане в канал въздух

(например налягания в захранващи магистрали и линии) са извън диапазона на сработване на защиты и блокировки в алгоритмите за програмно - логическо управление. Следователно съоръженията са в статус на нормална работа



Фиг.5. Преходни процеси при селекторна "S" (а) селекторна с компенсация „SA" (б) схеми и динамика на Ed (в) при смущения по задание и наличие на насищане в канал гориво

Изследванията са направени при смущение по задание и въвеждане на елемент на насищане с горен праг 80% от диапазона на управляемите променливи $F_A(t)$ и $F_F(t)$. Наличието на насищане в канала на основен въздух при стандартната структурна схема CLC предизвиква драстично увеличаване на оптималното за режима съотношение (разсъгласуването E_D) в посока излишък на въздух. То се проявява при намаляване на товара ($dF_{sp}(t)/dt < 0$), поради действието на интегралната компонента в регулатора, а прилагането на „anti-Windup" опция е затруднително поради предварително неизвестната стойност на прага на насищане (фиг.4а,в). При наличие на насищане в канала на горивото също се наблюдава рязко повишаване на излишъка от въздух, което се дължи на липса на ограничение на заданието в контура за управление на въздух при увеличаване на товара ($dF_{sp}(t)/dt > 0$) и невъзможността да се намали рязко разхода при намаляване на товара (фиг.5а,в). В крайна сметка и в двата случая ще

се получи значително намаляване на КПД и увеличаване емисиите на азотни окиси. Освен това горивните процеси се извършват с нарушаване на оптималните условия, появяват се пулсации, възможна е промяна геометрията на пламъка със съпътстващи вибрации на основна и спомагателна апаратура. Реални стават условията за откъсване на факела и аварийно спиране на топлогенератора. В предлаганите схеми (в случая SAFB) тези недостатъци практически се елиминират (фиг.4б,в,фиг.5б,в). С това предимство предложените схеми отговарят на изискванията за толерантни към грешки системи (Fault Tolerance Systems) с превантивно действащи функции [6,7].

3.3. Структурна и режимна мобилност

Предложените схеми са синтезирани и от гледна точка на тяхното коректно, удобно и универсално приложение с използване на широк клас универсални информационно-управляващи комплекси (DCS, PLC). Разглежданите системи имат базов характер и могат да се прилагат с корекции по съдържание на O_2 , с ръчна или автоматична промяна стойностите на съотношението „въздух-гориво" в зависимост от натоварването на топлогенератора, както и с въвеждане на други надграждания, според преценка за конкретните реализации. Това се постига чрез:

1. Избягване на „структурни връзвания" в базови схеми (напр. CLC), с което се запазва възможността за преминаване към класически или други типови решения.

2. Изпълняват се дефинираните правила в [7] при реализация на системи със сложни структури, в частност: "...съблюдаване на принципа за йерархичност на режимите на работа на конфигурираните контури по възходящ ред – дистанционен от щит (D), локално ръчен (резервирани регулатори за ръчно управление, които автоматично поемат управлението на основни контури при отпадане на базов контролер) (LM), ръчен (MAN), автоматичен (AUTO), каскаден (CAS), а също ръчен и автоматичен от управляващи програми, изпълнявани в самия контролер, съответно (SMA, SAU). Преходите от един режим към друг трябва да стават синхронизирано, безударно, без конфликти и ако даден случай не може да се реши в базовите блокове се решават с другите налични средства на контролерите".

3. Предложените схеми са подходящи и за реализиране на безконфликтното и подлежащо на управление преминаване към различни структури и в хоризонтално направление, което не налага особени усилия при реализацията им.

4. Не се налага създаването на програмни фрагменти и опции, които биха затруднили крайните потребители.

5. Използват се сравнително неголям брой стандартни библиотечни блокове, с което се намалява риска от появата на системни грешки.

4. Заключение

Показаните допълнителни предимства на разработените схеми илюстрират тяхната ефективност при прилагането им за разглеждания клас обекти. Те бяха успешно апробирани с използване на разпределена система МИК 5000Се.

ЛИТЕРАТУРА

1. **З. Каврошилов, Ал. Вучев.** Ефективност при управление на съотношение "Гориво-Въздух". *Научна конференция с международно участие "Хранителна наука, техника и технологии – 2004", УХТ – Пловдив, 27–29.10.2004 г, Научни трудове*, т. LI, св. 4, 203-208 стр.
2. **Ал. Вучев, З. Каврошилов.** Подобряване на динамични показатели при управление на съотношение на разходи и флуиди. *Научна конференция с международно участие "Хранителна наука, техника и технологии – 2004", УХТ – Пловдив, 27–29.10.2004 г, Научни трудове*, т. LI, св. 4, 209-214 стр.
3. **З. Каврошилов,** *Ефективно управление на горивни процеси, прилагани в хранително-вкусовата промишленост*, Хранително-вкусова промишленост, Година LV, София, брой 8, 2006, стр.14-19.

4. Кавроширов Захари, Система за оптимално управление на съотношение „въздух-гориво”, *Годишник на ТУ – София*, том 63, книга 1, 2013, стр. 307-316.

5. **David C. Farthing.** Combustion Control Strategies for Single and Dual Element Power Burners, *Steam Digest* 2002, pp. 29-34

6. **З. Каврошилов.** Толерантни към неизправности системи за управление. *Научна конференция с международно участие "Хранителна наука, техника и технологии 2006, Университет по хранителни технологии, Пловдив – 27 – 28.10.2006 г, Научни трудове УХТ, 2006*

7. **З. Каврошилов.** *Управление на абнормални режими в хранително-вкусовата промишленост*, Хранително-вкусова промишленост, Година LVI, София, брой 2, 2007, стр. 40-46.

Department of Control Systems
Technical University–Sofia, Branch Plovdiv
25 Tsanko Dystabanov St.
4000 Plovdiv
BULGARIA
E-mail: protexpd@yahoo.com



КОНФИГУРИРАНЕ НА СИСТЕМА ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА РОБОТИЗИРАНА БЕЗЖИЧНА СЕНЗОРНА МРЕЖА

СЕВИЛ АХМЕД

Резюме: *Развитието на безжичните комуникации в последните години бележи значителен ръст. Редица системи вече използват безжични комуникационни модули в ролята на приемно-предавателни елементи, мобилни изчислителни устройства и сензори. На базата на безжичната комуникация е възможно обединяването на тези модули в т.нар. безжични сензорни мрежи. Настоящата статия е част от разработка, целяща осигуряване на алгоритми за управление на роботизирани възли в безжични сензорни мрежи и представя началното изграждане и конфигуриране на разпределена структура от такъв тип. Акцентирано е върху особеностите при хардуерното и софтуерното конфигуриране на компонентите в мрежата. Изграден е прототип на взаимодействие между централния (стационарен – host) и периферните (мобилните/роботизирани – target) възли.*

Ключови думи: *роботизирани сензори, безжични сензорни мрежи, разпределени системи*

CONTROL SYSTEM CONFIGURATION OF A ROBOTIZED WIRELESS SENSOR NETWORK

SEVIL AHMED

Abstract: *Wireless communications in recent years mark a significant growth. Number of applications already use wireless communication modules in the meaning of transmission elements, mobile computing devices and sensors. On the basis of the wireless communication is possible unification of these modules in the so-called Wireless Sensor Networks (WSNs). A basic designing and configuration of a robotized WSN control system is presented in this article. This is the necessary step of developing adaptive control algorithms for the robotized nodes in modern WSNs. A prototype of robotized WSNs is present, where the central node (host) is a PC while the peripheral nodes (targets) consist of mobile robots.*

Key words: *robotized sensors, wireless sensor networks, distributed systems*

1. Въведение

Развитието на безжичните комуникации в последните години бележи значителен ръст. Възможностите, които предлага този вид комуникация се увеличават – редица приложения вече използват безжични комуникационни модули в лицето на приемно-предавателни елементи, мобилни изчислителни устройства и сензори. На базата на безжичната

комуникация е възможно обединяването на тези модули в т.нар. безжични сензорни мрежи.

По-голяма част от известните изследвания в областта на безжичните сензорни мрежи третират статични сензори обединени в обща топология [1,2]. Днешните вградени микропроцесорни системи позволяват възлите на мрежата да бъдат мобилни. Възможността за тази реализация се състои в разполагането на

сензорите върху роботизирани мобилни платформи (наземни и въздушни роботи). Големият брой теоретични и практически предизвикателства, свързани с приложните им възможности провокира интереса на специалисти от различни области.

Предимството на мобилността не може да бъде използвано в пълната си сила, ако системата разчита на първоначално разположение, твърди връзки между възлите или неконтролирана промяна на позицията им. Настоящата статия е част от разработка, целяща осигуряване на алгоритми за управление на роботизирани възли в безжични сензорни мрежи и представя началното изграждане и конфигуриране на разпределена структура от такъв тип. Цялостната концепция на предложения подход обхваща както изграждането на мрежата от роботизирани сензори така и осигуряването на адаптивни алгоритми за разпределено управление на възлите при изпълнение на обща задача (мисия).

Много от проблемите причинени от твърдо заложената топология при безжичните сензорни мрежи могат да бъдат преодоляни именно чрез прилагането на интелигентни алгоритми за управление, които да осигурят динамика както на цялостната топология така и на отделни нейни възли [3]. С управлението на мобилните възли мрежата се превръща в адаптивна сензорна система с интелигентно поведение. Взаимодействието между отделните мобилни възли осигурява необходимите данни, на базата на които алгоритъмът за управление генерира оптимална конфигурация на елементите от топологията чрез адаптивно разпределение на подзадачите. По този начин безжичната сензорна мрежа ще изпълнява основната си функционалност, пестейки време и енергия. А ресурсите време и енергия винаги са на дневен ред, особено когато се говори за мобилни роботи, разчитащи на батерии и имащи ограничено време за работа.

Описаният подход и в частност структура могат да се причислят към системите с колективно поведение. Разработките в областта на осигуряване на колективно поведение на автономните мобилни роботи генерират няколко големи проекта като: COGX, ROBOTCUB, PACO-PLUS, които се концентрират върху самообучаващите способности на отделните агенти (роботи) [4]. Други като SPARK, IWARD, ROBOSWARM и SENSOPAC изучават колективното поведение на мобилните роботи с акцент приложението му в безжичните сензори мрежи с мобилни елементи. Повече от десет проекта в рамките на ERA (European Research

Area) третират проблемите за управление на автономни мобилни роботи, които имат строго определена задача и/или работна среда: летящи (sFLY и COMETS), подводни (MORPH, Co3 AUVs, CoCoRo и NOPTILUS), сензорни мрежи в употреба на задачи за транспортиране, почистване площ, строителство или патрулиране (ARCAS, MARTHA, IWARD, DustBot и ROBOSWARM). Само два от тях (URUS и GUARDIANS) са концентрирани върху разположението и адаптирането на възлите от сензори [4].

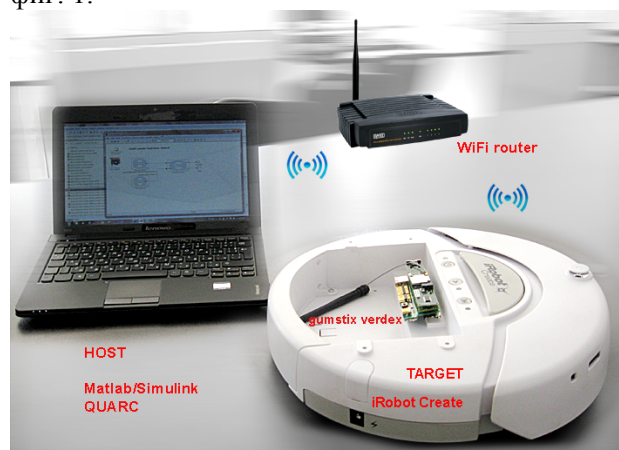
Изграждането на система за управление на роботизирана безжична сензорна мрежа е представено в няколко етапа. Акцентирано е върху особеностите при хардуерното и софтуерното конфигуриране на компонентите в мрежата. Изграден е прототип на взаимодействие между централния (стационарен - host) и периферните (мобилните/роботизирани - target) възли.

2. Хардуерна конфигурация на система за управление на роботизирани безжични сензорни мрежи

Хардуерната конфигурация на изградената с изследователски цели роботизирана безжична сензорна мрежа включва:

- Персонален компютър (host);
- Мобилен робот (iRobot Create);
- Вградена микропроцесорна система verdex pro™ XL6P Gumstix Computer-On-Module (COM) (target), включваща надграждащи модули за конзолен достъп и захранващо напрежение, сериен порт, ШИМ и аналогово-цифрови преобразуватели), модул за Ethernet и WiFi комуникация;
- Сензори.

Обобщена структура на системата за управление на мобилния робот е показана на фиг. 1.



Фиг. 1. Обобщена структура на системата за управление на мобилния робот iRobot Create

2.1. Мобилен робот iRobot Create

Нехолономният колесен мобилен робот iRobot Create, (фиг. 2), представлява програмируем вариант на известните прахосмукачки iRobot Roomba на фирмата iRobot, при който са свалени компонентите за прахоулавяне. Той е предназначен за обучение в областта на роботиката и за провеждане на научни изследвания.

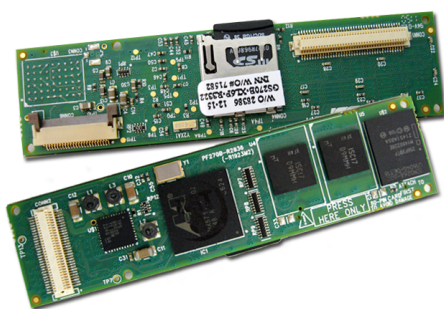


Фиг. 2. Двуколесен нехолономен програмируем мобилен робот iRobot Create

Поради ограничените възможности на управляващата микропроцесорна система на iRobot Create за целите на тази разработка е предвидена допълнителна бордова управляваща система, базирана на вграден микропроцесор gumstix, работещ с операционна система Embedded Linux.

2.2. Вградена микропроцесорна система verdex pro™ XL6P COM

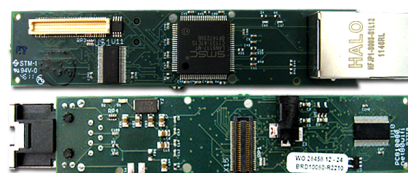
Избрана е вградена микропроцесорна система от типа gumstix verdex pro XL6P с процесор Marwell PXA270 XScale с тактова честота 600 MHz. Системата има 128 MB RAM и 32 MB флаш памет (фиг. 3).



Фиг. 3. Вградена микропроцесорна система gumstix verdex pro XL6P

За осигуряване на входно-изходен интерфейс на мобилния робот и безжична интернет връзка с управляващия компютър се използват няколко специализирани разширителни модули, както следва:

1) модул *netpro-vx* за проводна и безпроводна Ethernet мрежова комуникация (фиг. 4).



Фиг. 4. Разширителен модул *netpro-vx*

2) модул *FCC wifi* за безжична интернет връзка (фиг. 5).



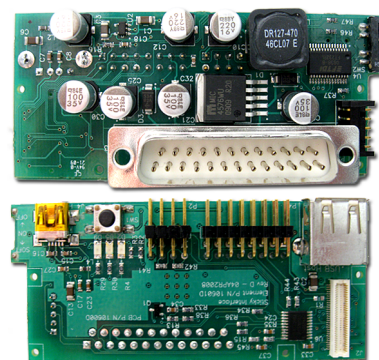
Фиг. 5. Разширителен модул *FCC wifi*.

3) модул *console-vx* (фиг. 6) за обмен на данни по сериен интерфейс с персонален компютър за целите на крос-компиляцията и прехвърляне на управляващата програма в бордовата управляваща система.



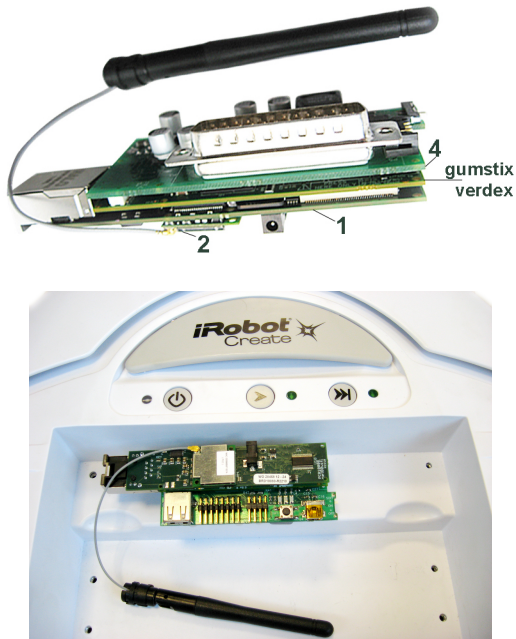
Фиг. 6. Разширителен модул *console-vx*

4) модул *Sticky Interface* (фиг. 7) реализиращ интерфейсна връзка с iRobot Create през неговия конектор DB-25 (Cargo Bay Connector)



Фиг. 7. Разширителен модул *Sticky interface*.

Свързването на модулите 1, 2 и 4 в стек („сандвич“) и монтирането им на мобилния робот iRobot Create е показано на фиг. 8.



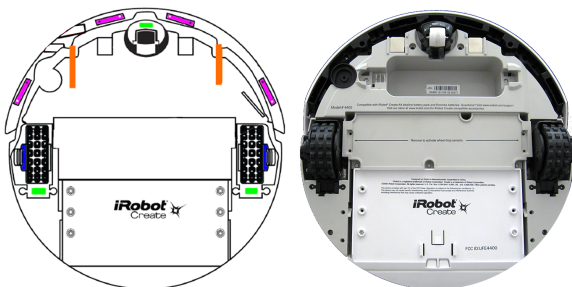
Фиг. 8. Свързване на разширителните модули при бордовата управляваща система gumstix verdex pro XL6P.

2.3. Сензори

Мобилният робот iRobot Create разполага с пакет от вградени сензори, което в конкретната конфигурация позволява третиането на робота като мобилен (роботизиран) сензорен възел в структурата на безжичната сензорна мрежа.

Бордовите сензори са представени от [6]:

- Сензор за пропадане – в зелено: цифрови входове (Caster, left, and right wheel drop sensors);
- Сензор за сблъсък – в оранжево: цифрови входове (Left and right bumper);
- Инфрочервен сензор за наличие на денивелация – в розово: аналогов вход (Left, front left, front right and right cliff sensors);
- Многопосочен инфрочервен приемник (Omnidirectional IR receiver).



Фиг. 9. Разположение на сензорите на робота

Отворената платформа на iRobot Create позволява добавянето на допълнителни сензори съобразени с конкретната задача на мобилния възел.

3. Софтуерна конфигурация на система за управление на роботизирани безжични сензорни мрежи

След допълнително инсталиране на “target” компонента на софтуер QuaRC на фирма Quanser Consulting Inc., роботът може да се управлява чрез безжична интернет връзка от персонален компютър посредством управляващи програми, разработени и компилирани в Matlab/Simulink среда с инсталиран „host“ компонент на софтуера QuaRC. Изпълнимият код на управляващите програми ще може да се прехвърля и изпълнява в бордовата управляваща система на робота.

3.1. Конфигуриране и особености на QuaRC при работа в режим „host-target“

Програмите за управление на iRobot Create ще се създават на персонален компютър с инсталирана Matlab/Simulink среда и софтуер за работа в реално време QuaRC. Както бе споменато QuaRC има два компонента: QuaRC host и QuaRC target.

QuaRC target е компонент на QuaRC за работа в реално време, който изпълнява код генериран от Simulink модел със зададена стъпка на дискретизация. По-конкретно QuaRC target може да изпълнява следните задачи:

- Приемане на изпълнимия код на програмата от QuaRC host компонента.
- Стартиране на програмата за работа в реално време.
- Поддържане на комуникация със свързаните QuaRC host компоненти.
- Трансфер на данни в реално време при заявка от QuaRC host компонента.
- Задаване на времеви праг от потребителя за контролиране на максималното процесорно време, отделено за изпълнението на кода при работа в реално време.

QuaRC host е вторият софтуерен компонент, който изпълнява следните функции:

- Конвертиране на Simulink модел към C сорс код чрез използване на софтуера на MathWorks - Real-Time Workshop (RTW).
- Комуникация със Simulink за изпълнение на въведени промени в параметрите на програмата по време на работа ѝ в реално време.
- Свързване на генерирания програмен код и компилацията му чрез Microsoft Visual C++ с цел създаване на изпълнима библиотека за работа в реално време за съответна микропроцесорна система (*.wcl).

- Импортиране на готова за изпълнение библиотека за работа в реално време (*.wcl) към QuaRC target.

- Промяна на параметрите на програмата чрез използване на дефиниран от потребителя контролен панел.

- Стартиране и спиране на програмния код за работа в реално време върху даден QuaRC target компонент.

- Поддържане на TCP/IP комуникация със свързаните QuaRC target компоненти.

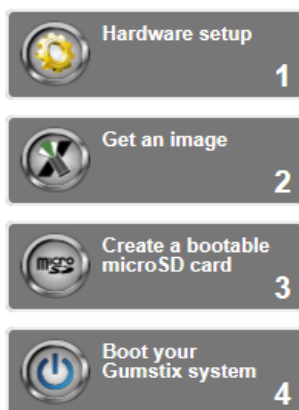
- Съхранение на данни от работата на контролера в реално време в твърд диск или в работното пространство на MATLAB.

- Изчертаване и визуализация на предадени от QuaRC target данни.

QuaRC host компонентът се инсталира винаги в управляващия компютър, докато QuaRC target компонентите могат да бъдат инсталирани както в управляващия компютър така и (в случай на разпределена конфигурация) в друг персонален компютър или пък вградена микропроцесорна система (в случая gumstix verdex pro XL6P за управление на iRobot Create).

3.2. Конфигуриране на gumstix verdex pro XL6P COM (target)

Съвместима операционна система за gumstix verdex pro XL6P е *Ångström Linux* дистрибуцията. Тя е резултат от съвместната работа на няколко екипа от разработчици (в рамките на проектите OpenZaurus, OpenEmbedded, OpenSIMpad) и е приложима за широка гама вградени системи. Инсталацията на вградената операционна система се осъществява на microSD карта и е разделена на няколко основни стъпки (фиг. 10), описани детайлно на интернет страницата на платформата - <http://www.gumstix.org/getting-started-guide.html>



Фиг. 10. Етапи на инсталацията на Ångström Linux за gumstix verdex (1-Конфигуриране на хардуера; 2-Изтегляне на имидж; 3-Инсталиране на ОС на microSD карта; 4-Стартиране на системата)

След инсталацията на вградената операционна система е възможно конфигурирането на микропроцесорната система gumstix verdex XL6P COM като **QuaRC target**. За целта предоставените от QUARC лиценз (your_quarc_license_name.qlic) и инсталационен пакет (quarc_2.3.0-r1_armv5te.ipk) трябва да се копират на вградената микропроцесорна система (например в директория /home/root). Инсталацията се стартира чрез командата:

```
root@quarc-gumstix:~$ ipkg install
quarc_2.3.0-r1_armv5te.ipk
```

и продължава в няколко стъпки:

```
Installing quarc (2.3.0-r1) to root...
```

Точната последователност и особеностите при инсталацията са описани в секцията *Single-User Linux Verdex Setup: QUARC Installation and License Configuration* на [7].

3.3. Конфигуриране на мрежата

За правилното функциониране на изградената топология тип „звезда“ е необходимо да се направят няколко настройки на мрежата. Конфигурирането на параметрите на безжичната комуникация с управляващия модул за мобилния робот може да се обобщи в няколко стъпки:

- Задаване на статичен IP адрес на управляващата система gumstix verdex (робота);
- Задаване на настройки за безжичната мрежа от страна на gumstix verdex.

За конкретната реализация, в която участва безжичен рутер Sweex LW050V2, eXtended Range™ 54Mbps Wireless Router, за target системата е зададен статичен IP адрес 192.168.50.199. А интерфейсният и конфигурационния файлове за gumstix verdex са редактирани в долната последователност, с цел задаване на параметрите на безжичната мрежа:

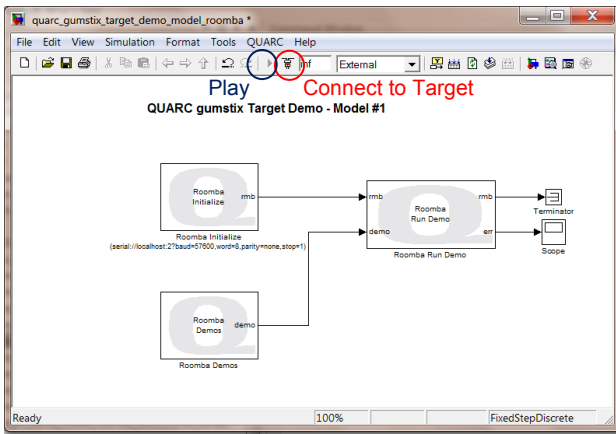
```
root@gumstix-custom-verdex:~$ vi
/etc/interfaces
auto wlan0
iface wlan0 inet dhcp
        wireless_mode managed
        wireless_essid any
pre-up wpa_supplicant -Dmarvell -iwlan0 -
c/etc/wpa_supplicant.conf -Bw down killall
wpa_supplicant
```

```
root@gumstix-custom-verdex:~$ vi
/etc/wpa_supplicant.conf
network={
        ssid="Breeze"
        psk="Breeze_password"
}
```

Мрежата се достъпва чрез SSID-то си, което в случая е Breeze и съответстващата му парола (psk). Коректното функциониране на мрежата е от изключителна важност, поради постоянния обмен на данни между възлите ѝ.

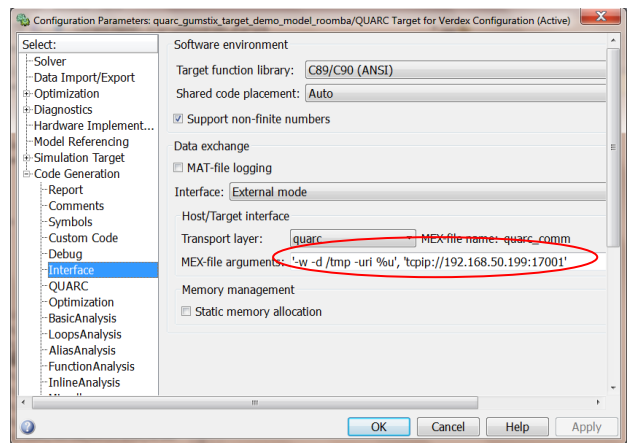
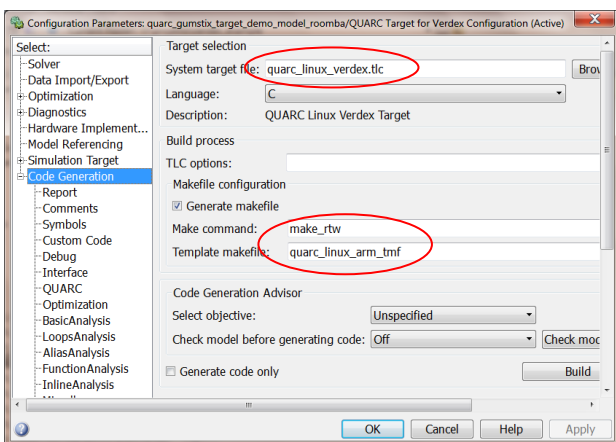
4. Експериментална постановка

Както бе описано по-горе, базовата конфигурация на предложената система за управление на роботизирани безжични сензорни мрежи се състои от централен (управляващ) host компонент и роботизиран сензорен възел в лицето на мобилния робот iRobot Create (target). Функционирането на така проектираната топология е изследвана експериментално чрез поредица от прости задачи, задавани от Matlab/Simulink чрез библиотеката QuaRC. За целта е създадена Simulink диаграма (фиг. 11)



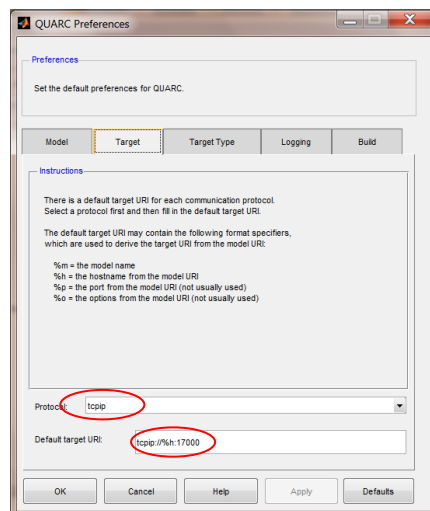
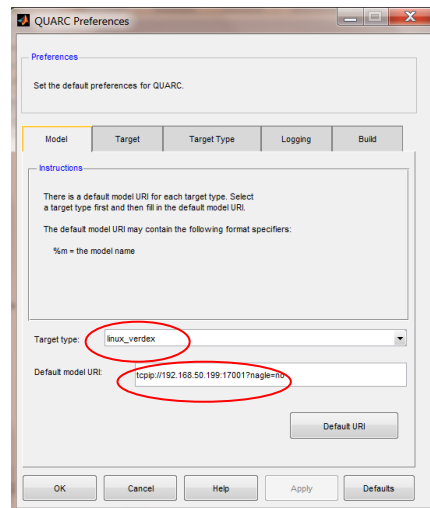
Фиг. 11. Simulink диаграма на експерименталната постановка

Параметрите на изпълнение за създадения модел следват изискванията за работа в реално време, а именно: режимът на изпълнение е External с фиксираната стъпка (фиг. 11); посочени са target файла (quarc_linux_verdex.tlc) и параметрите за компилатора, съответстващи на избраната target система (gumstix verdex), посочен е и интерфейса за обмена на данни (фиг. 12).



Фиг. 12. Конфигуриране на модела за работа в реално време

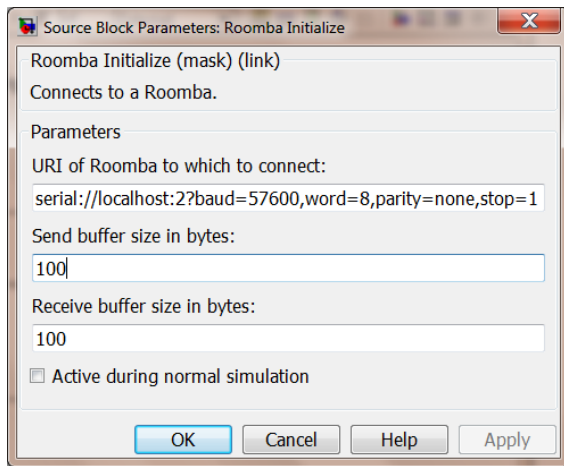
Освен параметрите на Simulink диаграмата, трябва да се конфигурират и тези на библиотеката QuaRC (презменното QUARC/Preferences) (фиг. 13). В секциите Model и Target се задават URI (Uniform Resource Identifier, Унифициран Идентификатор на Ресурса) на съответните компоненти.



Фиг. 13. Конфигуриране на системата „host-target”

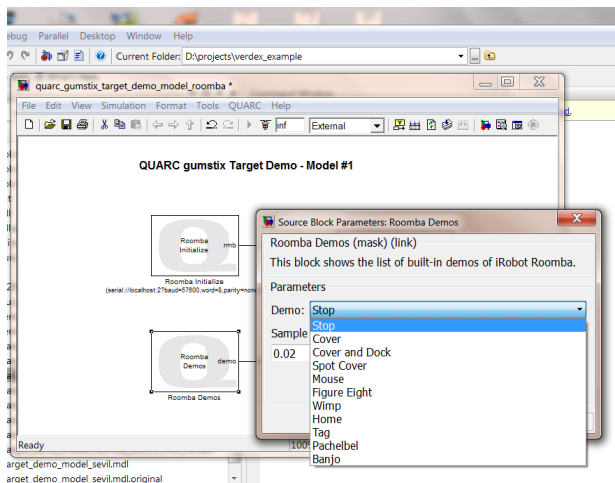
При конфигуриране на системата “host-target” се използва IP адреса на робота за задаване на URI (фиг. 13). При повече елементи в мрежата (периферни възли в топологията „звезда“) всеки възел се идентифицира със собствен URI.

Мобилният възел в мрежата е представен от блока Roomba Run Demo (фиг. 11). Инициализирането на конфигурираната с робота връзка се осъществява чрез блока Roomba Initialize (фиг. 14).



Фиг. 14. Simulink диаграма на експерименталната постановка

Задачите към робота се задават посредством блока Roomba Demos (фиг. 15).



Фиг. 15. Simulink диаграма на експерименталната постановка

След успешно компилиране, моделът се изпраща към gumstix verdex. Съобщението в командния прозорец на Matlab за успешна компилация и прехвърляне на модела към управляващата платка има следния вид:

```
### Created executable
quarc_gumstix_target_demo_model_roomba.
rt-linux_verdex

### Downloading
quarc_gumstix_target_demo_model_roomba
to target
'tcpip://192.168.50.199:17000' ...

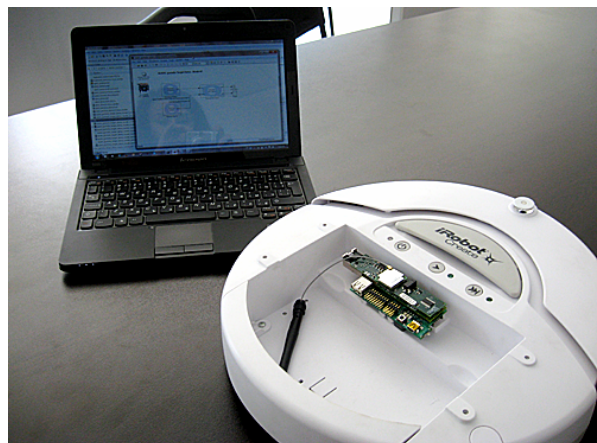
### Model
quarc_gumstix_target_demo_model_roomba
has been downloaded to target
'tcpip://192.168.50.199:17000' (110551
bytes)
```

Работата на системата започва след зареждането на модела и по-следващото му стартиране. Зареждането и стартирането се осъществяват автоматично съответно в момента на свързването към target-а и стартирането на модела от контролите на Simulink (фиг. 15).

Важен етап в конфигурирането на мрежата е стартирането предварително инсталираните на gumstix verdex (секция 3.2) приложения от библиотеката на QuaRC, които управляват лиценза и target-а:

```
root@gumstix-custom-verdex:/etc/init.d$
./quanser_license_manager start
Starting the Quanser License Manager...
Quanser License Manager[997]: The Quanser
License Manager service is listening on
localhost port 16999
The Quanser License Manager has been
started with PID = 997.
```

```
root@gumstix-custom-verdex:/etc/init.d$
./quarc_target_manager start
Starting the QUARC Target Manager...
QUARC Target Manager[1010]: The QUARC
Target Manager service is listening on
tcpip://localhost:17000
The QUARC Target Manager has been started
with PID = 1010.
```



Фиг. 16. Снимка на конфигурираната система за управление на роботизирани възли

Информацията след изпълнение на стартирането е полезна за дефинирането на URI в стъпките за настройка описани по-горе. Проверката за състоянието на тези управляващи приложения е препоръчителна при всяко захранване на компонентите на мрежата.

Експерименталната постановка доказва работоспособността на конфигурираната безжична сензорна мрежа с роботизирани елементи. Мобилният робот, в ролята на мобилен сензорен възел, изпълнява подадените команди и изпраща към host компонента изисканите данни от бордовите сензори.

5. Заключение и насоки за бъдеща работа

Проведените експерименти доказват работоспособността на конфигурираната система за управление на безжични сензорни мрежи. Създадената конфигурация е нужната основа за по-нататъшни разработки, които включват интелигентни (адаптивни) алгоритми за управление на роботизирани възли в структурата на безжични сензорни мрежи. Използването на микропроцесорна система с вградена операционна система позволява надграждане не само на изчислителните възможности на мобилния възел (робот), но и на неговия хардуер. Така например в конкретната реализация с бордовата управляваща система gumstix verdex про лесно може да се добави камера в качеството на визуален сензор, който би могъл да се използва в задачи за избягване на препятствия или разпознаване на обекти.

Възможността за осъществяване на по-сложни изчислителни операции от самия роботизиран възел и добавянето на сензори в зависимост от конкретната задача, която безжичната сензорна мрежа трябва да реши, позволява проектирането на нови – адаптивни – алгоритми за управление. Най-близката цел е да се проектират алгоритми за траекторно следене и избягване на препятствия на възлите, формиращи роботизирани безжични сензорни мрежи. По-нататъшните очаквания са свързани с алгоритми за управление на роботизирани безжични сензорни мрежи в областта на колективното поведение, многоагентните системи и поведението на рояка. Задачите, при които алгоритми от този вид биха имали значителен успех могат да бъдат категоризирани в три групи [4,5]:

- Формация от безжични роботи – мрежа от мобилни роботи, изпълняващи колективно задача (мисия);

- Безжични сензорни мрежи обслужвани от мобилни роботи – мобилните роботи са в обслужваща роля на вече изградена и позиционирана безжична сензорна мрежа;

- Безжични мрежи от роботи и сензори – при тях възли в мрежата са роботите и сензорите. Те осъществяват взаимодействие на едно и също ниво като се отчитат разнообразни особености с цел да се подобри ефективността на работа.

Благодарност

Изследванията са извършени с финансово подпомагане в рамките на вътрешен проект към НИС ТУ-София - № 141ПР0012-19.

Литература

1. **Anna Hac** (2003) *Wireless Sensor Network Designs*, John Wiley & Sons Ltd, ISBN 0-470-86736-1
2. **Lewis F. L.** (2004) *Wireless Sensor Networks*, in *Smart Environments: Technologies, Protocols, and Applications*, Ed. *D.J. Cook and S.K. Das*, John Wiley, New York
3. **Yick J., Mukherjee B., Ghosal D.** (2008) *Wireless sensor network survey*, *Elsevier, Computer Networks* 52, 2292–2330
4. *Wireless Sensor and Robot Networks From Topology Control to Communication Aspects* (2014) Ed. *Nathalie Mitton, David Simplot-Ryl*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., ISBN 978-981-4551-33-5
5. **Chella A., L. R. Giuseppe, Macaluso I., Ortolani M., Peri D.** (2007) *Multi-robot Interacting Through Wireless Sensor Networks*, *Artificial Intelligence and Human-Oriented Computing Book*, 10th Congress of the Italian Association for Artificial Intelligence, Rome, Italy, September 10-13, 2007, pp 789-796, DOI 10.1007/978-3-540-74782-6_70, ISBN 978-3-540-74781-9, Online ISBN 978-3-540-74782-6
6. *iRobot Create Owner's Guide* (2013)
7. *QUARC v2.3.0 Installation Guide* (2013)

Department of Control Systems
Technical University–Sofia,
Branch Plovdiv
25 Tsanko Dystabanov St.
4000 Plovdiv
BULGARIA
E-mail: sevil.ahmed@tu-plovdiv.bg



КИНЕМАТИКА НА ДВУОСЕН АВТОМОБИЛ С ВИСОКА ПРОХОДИМОСТ

ВАЛЕНТИН БАЧЕВ

Резюме: Всяко транспортно средство представлява сложна механична система. Тя е съставена от звена, свързани помежду си с кинематични двоици, с еластични и с еластично–демпфиращи елементи. Вибрационното изследване на транспортно средство включва изследване на свободните незатихващи и затихващи трептения и на принудените трептения. Последните са следствие от работата на двигателя с вътрешно горене и от кинематичните смущения, породени от движението на транспортното средство по пътната повърхност. За различните видове трептения се създават различни динамични модели. Целта на настоящата работа е да бъде изследвана кинематиката на двуосен автомобил с висока проходимост. За създадения кинематичен модел са изведени уравненията на ъгловите скорости на звената му и на линейните скорости на центровете на тежестта на звената. Получените уравнения се използват за изследване на свободните и на принудените трептения на двуосния автомобил с висока проходимост.

Ключови думи: Кинематичен модел, линейна скорост, ъглова скорост, автомобил

KINEMATICS OF A TWO-AXIS OFF-ROAD VEHICLE

VALENTIN BACHEV

Abstract: Any vehicle is a complex mechanical system. It is composed of units, interconnected with kinematic pairs, elastic and elastic-damping elements. Vibration study of a vehicle includes a study of the free non-subsiding oscillations, subsiding oscillations and forced oscillations. The forced oscillations are a consequence of the internal combustion engine operation and of the kinematic disturbances, caused by the vehicle movement on the roadway surface. Different dynamic models are created for the different types of oscillations. The goal of the work presented is the investigation of the kinematics of a two-axis off-road vehicle. For the created kinematic model, the equations of the angular velocities of the units have been derived, as well as the equations of the linear velocity rates of the gravity centres of the units. The derived equations are used for research into the free and the forced vibrations of the two-axis off-road vehicle.

Key words: Kinematic model, linear speed, angular speed, off-road vehicle

В статията са използвани следните

Съкращения:

- ДВГ - двигател с вътрешно горене;
- ЛКС - локална координатна система;
- КС - координатна система;
- МС - механична система;
- ОКС - отправна координатна система.

Символи:

- **A** - трансформационна матрица;
- **C** - център на тежест;
- **l** - дължина;
- **O** - център на КС;
- **Oxyz** - правоъгълна координатна система;
- **r** - радиус-вектор в ЛКС;
- **R** - радиус-вектор в ОКС;
- **V** - вектор на линейна скорост;
- θ - малка ъглова ротация;
- Ω - вектор на ъглова скорост;
- **x, y, z** - оси на правоъгълна КС,
- **x, y, z** - постъпателно преместване.

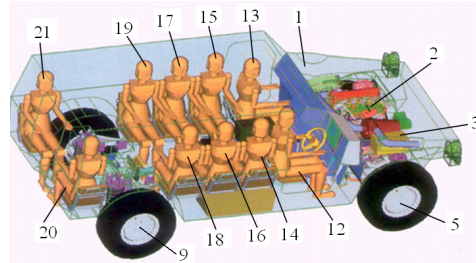
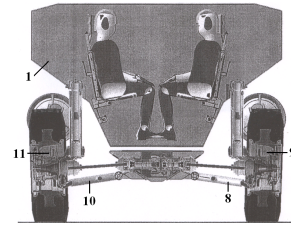
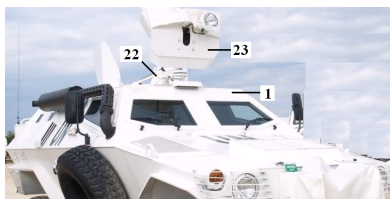
Индекси:

- **i** - номер на тяло от механичната система;
- **t** - транслация;
- **u** - ротация;
- **T** - транспонирана матрица;
- **Долен** - обект, който се разглежда;
- **Горен** - координатна система, в която се проектира разглежданият обект.

1. Кинематичен модел

За да се изследват трептенията на автомобила, последният се замества с кинематичен модел [1, 2, 3, 4]. В кинематичния модел са включени следните тела на автомобила (фиг. 1): корпус 1; силов агрегат с ДВГ 2; радиатор с охлаждаща течност и с вентилатор 3; рамена на окачване на колелата - предните: 4 – дясно и 6 – ляво, и задните: 8 – дясно и 10 – ляво; шенкел с джанта и гума на предните колела ляво 5 и дясно 7 и на задните колела ляво 9 и дясно 11; водач на автомобила 12 и пътници в автомобила 13, 14, ..., 21, платформа 22, работен орган 23. Прави се допускането, че тези тела са идеално твърди. Наложените връзки на телата на механичната система са холономни и стационарни. Така дефинираната МС е с 52 степени на свобода. Векторът на обобщените координати на МС е от вида:

$$\mathbf{q} = [q_1 \quad q_2 \quad \dots \quad q_{23}]_{52 \times 1}^T \quad (1)$$



Фиг. 1 Схема на възлите на автомобила [5]

Неподвижно към всяко тяло на механичната система е присъединена правоъгълна Декартова КС. Тя се движи в пространството заедно с тялото и се нарича локална координатна система. Всяка ЛКС се номерира с номера на тялото. Центърът на всяка ЛКС е разположен, както следва:

- в центъра на тежестта на тялото, за телата 1, 2, 3, 12, 13, ..., 21;
- на оста на симетрия на цилиндричната двоица, за ротационно движещите се тела 4, 6, 8, 9, 10, 11, 22, 23;
- в центъра на сферичната двоица, за телата 5 и 7.

С номер 0 е номерирана ОКС, която е неподвижна.

Телата 1, 2 и 3 са монтирани върху еластично-демпфиращи елементи. Всяко от тези три тела извършва три транслации по дължината на координатните оси на съответната ЛКС и три ротации около тях [1, 4]. Векторите на обобщените им координати са от вида:

$$\mathbf{q}_i = [x_i \quad y_i \quad z_i \quad \theta_{x_i} \quad \theta_{y_i} \quad \theta_{z_i}]_{6 \times 1}^T, \quad (2)$$

$$i = 1, 2, 3$$

Телата 4, 6, 8, 9, 10, 11 заедно с корпуса на автомобила образуват въртящи двоици. Всяка от тях притежава една степен на свобода – ротация около ос Ox на съответната ЛКС. Векторите на обобщените им координати имат вида:

$$\mathbf{q}_i = [\theta_{x_i}] \quad i = 4, 6, 8, 9, 10, 11 \quad (3)$$

Телата 5 и 7 заедно с телата 4 и 6 образуват сферични двоици. Векторите на обобщените им координати са от вида:

$$\mathbf{q}_i = [\theta_{x_i} \quad \theta_{y_i} \quad \theta_{z_i}]^T, i=5, 7 \quad (4)$$

Телата с номера от 12 до 21 са с една степен на свобода. Векторите на обобщените им координати са от вида:

$$\mathbf{q}_i = [z_i], i=12, 13, \dots, 21 \quad (5)$$

Тяло 22 образува с тяло 1 цилиндрична двоица. Тяло 22 е с една степен на свобода. Векторът на обобщената координата е от вида:

$$\mathbf{q}_{22} = [\theta_{z_{22}}] \quad (6)$$

Тяло 23 образува с тяло 22 цилиндрична двоица. Тяло 23 е с една степен на свобода. Векторът на обобщената координата е от вида:

$$\mathbf{q}_{23} = [\theta_{y_{23}}] \quad (7)$$

2. Трансформационни матрици

Трансформационната матрицата на центъра O_i на i -тата ЛКС, който се проектира в ОКС, на тела, последователно свързани в кинематична верига, е от вида:

$$\mathbf{A}_i^0 = \mathbf{A}_1^0 \cdot \mathbf{A}_2^1 \cdot \mathbf{A}_3^2 \dots \mathbf{A}_i^{i-1}, \quad (8)$$

където:

$$\mathbf{A}_i^{i-1} = \mathbf{A} t_i^{i-1} \cdot \mathbf{A} u_i^i, \quad (9)$$

$$\mathbf{A} t_i^{i-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_{O_{X_i}}^{i-1} \\ 0 & 1 & 0 & l_{O_{Y_i}}^{i-1} \\ 0 & 0 & 1 & l_{O_{Z_i}}^{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\mathbf{A} u_i^i = \mathbf{A} u_{x_i} \cdot \mathbf{A} u_{y_i} \cdot \mathbf{A} u_{z_i}, \quad (11)$$

$$\mathbf{A} u_{x_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{x_i} & -\sin\theta_{x_i} & 0 \\ 0 & \sin\theta_{x_i} & \cos\theta_{x_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

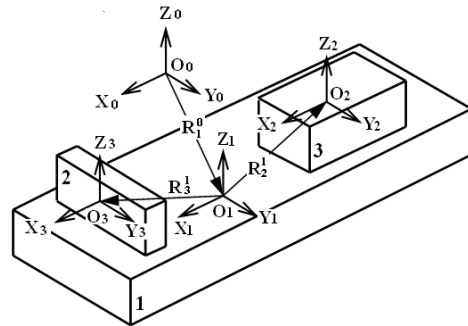
$$\mathbf{A} u_{y_i} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{y_i} & 0 & \sin\theta_{y_i} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta_{y_i} & 0 & \cos\theta_{y_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$\mathbf{A} u_{z_i} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{z_i} & -\sin\theta_{z_i} & 0 & 0 \\ \sin\theta_{z_i} & \cos\theta_{z_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Трансформационните матрици на проектирания в ОКС център O_i ($i=1, 2, \dots, 23$) на ЛКС на всяко тяло от МС, са следните:

2.1 Тяло 1

Схемата на разположението на ЛКС₁, ЛКС₂, ЛКС₃ и ОКС е представена на фиг. 2.



Фиг.2 Схема на положението на ЛКС₁, ЛКС₂ и ЛКС₃ в ОКС

Трансформационната матрицата на точка O_1 , проектирана в ОКС, е от вида:

$$\mathbf{A}_1^0 = \mathbf{A} t_1^0 \cdot \mathbf{A} u_1^1, \quad (15)$$

където:

$$\mathbf{A} u_1^1 = \mathbf{A} u_{x_1} \cdot \mathbf{A} u_{y_1} \cdot \mathbf{A} u_{z_1} \quad (16)$$

2.2 Тела 2 и 3

Трансформационните матрици на точките O_2 и O_3 , проектирани в ОКС, са от вида:

$$\mathbf{A}_i^0 = \mathbf{A}_1^0 \cdot \mathbf{A}_i^1, \quad i=2, 3, \quad (17)$$

където:

$$\mathbf{A}_i^1 = \mathbf{A} t_i^1 \cdot \mathbf{A} u_i^i, \quad i=2, 3 \quad (18)$$

$$\mathbf{A} u_i^i = \mathbf{A} u_{x_i} \cdot \mathbf{A} u_{y_i} \cdot \mathbf{A} u_{z_i} \quad (19)$$

2.3 Тела 4, 6, 8 и 10

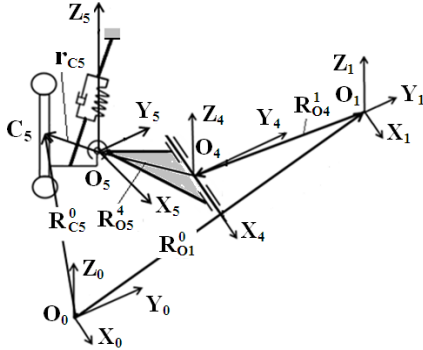
Схема на разположението на ЛКС₁, ЛКС₄ и ОКС е представена на фиг. 3. Трансформационните матрици на точките O_i ($i=4, 6, 8, 10$), проектирани в ОКС, са от вида:

$$\mathbf{A}_i^0 = \mathbf{A}_1^0 \cdot \mathbf{A}_i^1, \quad i=4, 6, 8, 10., \quad (20)$$

където:

$$A_i^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_{O_{Xi}}^1 \\ 0 & \cos\theta_{Xi} & -\sin\theta_{Xi} & l_{O_{Yi}}^1 \\ 0 & \sin\theta_{Xi} & \cos\theta_{Xi} & l_{O_{Zi}}^1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (21)$$

$i = 4, 6, 8, 10$



Фиг. 3 Схема на положението на ЛКС₁, ЛКС₄, ЛКС₅ и ОКС

2.4 Тела 5 и 7

Схемата на разположението на ЛКС₅, ЛКС₄, ЛКС₁ и ОКС е представена на фиг. 3. Трансформационните матрици на точките O₅ и O₇, проектирани в ОКС, са от вида:

$$A_i^0 = A_1^0 \cdot A_{i-1}^1 \cdot A_i^{i-1}, \quad i = 5, 7 \quad (22)$$

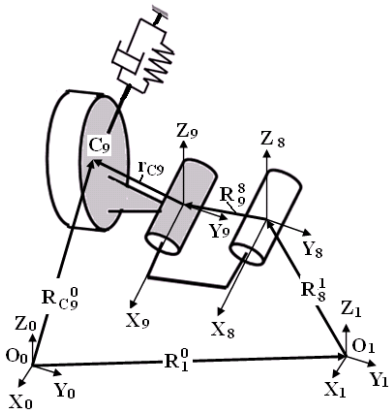
където:

$$A_i^{i-1} = At_i^{i-1} \cdot Au_i^i, \quad i = 5, 7 \quad (23)$$

$$Au_i^i = Au_{Xi} \cdot Au_{Yi} \cdot Au_{Zi}, \quad i = 5, 7. \quad (24)$$

2.5 Тела 9 и 11

Схемата на разположението на ЛКС₁, ЛКС₈, ЛКС₉ и ОКС е представена на фиг. 4.



Фиг.4 Схема на положението на ЛКС₁, ЛКС₈, ЛКС₉ и ОКС

Трансформационните матрици на точките O₉ и O₁₁, проектирани в ОКС, са от вида:

$$A_i^0 = A_1^0 \cdot A_{i-1}^1 \cdot A_i^{i-1}, \quad i = 9, 11 \quad (25)$$

където:

$$A_i^{i-1} = At_i^{i-1} \cdot Au_i^i, \quad i = 9, 11 \quad (26)$$

$$Au_i^i = Au_{Xi}, \quad i = 9, 11. \quad (27)$$

2.6 Тела 12, 13, ..., 21

Трансформационните матрици на точките O_i (i=12, 13, ..., 21), проектирани в ОКС, са от вида:

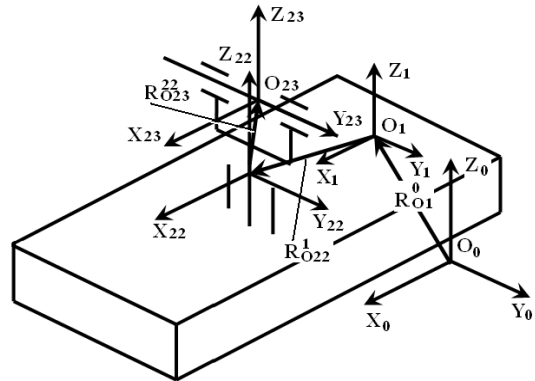
$$A_i^0 = A_1^0 \cdot A_i^1, \quad i = 12, 13, \dots, 21 \quad (28)$$

където:

$$A_i^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_{O_{Xi}}^1 \\ 0 & 1 & 0 & l_{O_{Yi}}^1 \\ 0 & 0 & 1 & z_i + l_{O_{Zi}}^1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad i = 12, 13, \dots, 21 \quad (29)$$

2.7 Тяло 22

Схемата на разположението на ЛКС₂₂, ЛКС₂₃, ЛКС₁ и ОКС е представена на фиг. 5.



Фиг. 5 Схема на положението на ЛКС₁, ЛКС₂₂, ЛКС₂₃, ОКС

Трансформационната матрицата на точка O₂₂, проектирана в ОКС, е от вида:

$$A_{22}^0 = A_1^0 \cdot A_{22}^1, \quad (30)$$

където:

$$A_{22}^1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_{Z22} & -\sin\theta_{Z22} & 0 & l_{O_{X22}}^1 \\ \sin\theta_{Z22} & \cos\theta_{Z22} & 0 & l_{O_{Y22}}^1 \\ 0 & 0 & 1 & l_{O_{Z22}}^1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (31)$$

2.8 Тяло 23

Трансформационната матрицата на точка O₂₃, проектирана в ОКС, е от вида:

$$\mathbf{A}_{23}^0 = \mathbf{A}_1^0 \cdot \mathbf{A}_{22}^1 \cdot \mathbf{A}_{23}^{22}, \quad (32)$$

където:

$$\mathbf{A}_{23}^{22} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{Y23} & 0 & \sin\theta_{Y23} & 1_{OX23}^{20} \\ 0 & 1 & 0 & 1_{OY23}^{20} \\ -\sin\theta_{Y23} & 0 & \cos\theta_{Y23} & 1_{OZ23}^{20} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (33)$$

3. Радиус-вектор на центъра на тежестта на тяло от механичната система, проектиран в ОКС

Радиус-векторът \mathbf{R}_{Ci}^0 , $i=1, 2, \dots, 23$ на центъра на тежестта C_i , проектиран в ОКС, е равен на:

$$\mathbf{R}_{Ci}^0 = \mathbf{A}_i^0 \cdot \mathbf{r}_{Ci}^i, \quad i=1, 2, \dots, 23, \quad (34)$$

където:

$$\mathbf{r}_{Ci}^i = [l_{CiXi}^i, l_{CiYi}^i, l_{CiZi}^i, 1]^T, \quad i=1, 2, \dots, 23 \quad (35)$$

е радиус-векторът на точка C_i , проектиран в i -тата ЛКС.

4. Вектор на абсолютната ъглова скорост на тяло от механичната система, проектиран в ЛКС

Векторът на абсолютната ъглова скорост Ω_i^i на i -тото тяло, проектиран върху осите на i -тата ЛКС, $O_i X_i Y_i Z_i$, $i=1, 2, \dots, 23$ се изчислява с уравнението:

$$\Omega_i^i = \Omega_{zi}^i + \mathbf{A}_{zi}^T \cdot \Omega_{yi}^i + \mathbf{A}_{zi}^T \cdot \mathbf{A}_{yi}^T \cdot \Omega_{xi}^i \quad (36)$$

Всички тела на механичната система, освен тяло 1, са свързани в кинематични вериги от последователно свързани тела. Векторът на абсолютната ъглова скорост Ω_i^i на i -тото тяло от последователно свързаните тела на механичната система се записва с израза:

$$\begin{aligned} \Omega_i^i &= \Omega_{zi}^i + \mathbf{A}_{zi}^T \cdot \Omega_{yi}^i + \mathbf{A}_{zi}^T \cdot \mathbf{A}_{yi}^T \cdot \Omega_{xi}^i + \\ &+ \mathbf{A}_{zi}^T \cdot \mathbf{A}_{yi}^T \cdot \mathbf{A}_{xi}^T \cdot \Omega_{i-1}^{i-1} + \\ &+ \mathbf{A}_{zi}^T \cdot \mathbf{A}_{yi}^T \cdot \mathbf{A}_{xi}^T \cdot \\ &\cdot \mathbf{A}_{zi-1}^T \cdot \mathbf{A}_{yi-1}^T \cdot \mathbf{A}_{xi-1}^T \cdot \Omega_{i-2}^{i-2} + \dots \end{aligned} \quad (37)$$

За телата на механичната система уравненията на ъгловите скорости са от вида:

4.1 Тела 1, 2, 3

$$\begin{aligned} \Omega_i^i &= \mathbf{A}_{zi}^T \cdot \mathbf{A}_{yi}^T \cdot \mathbf{A}_{xi}^T \cdot \Omega_1^1 + \\ &+ \mathbf{A}_{zi}^T \cdot \mathbf{A}_{yi}^T \cdot \Omega_{xi}^i + \mathbf{A}_{zi}^T \cdot \Omega_{yi}^i + \Omega_{zi}^i, \quad (38) \\ &i=1, 2, 3 \end{aligned}$$

4.2 Тела 4, 6, 8, 10

$$\Omega_i^i = \mathbf{A}_{xi}^T \cdot \Omega_1^1 + \Omega_{xi}^i, \quad i=4, 6, 8, 10 \quad (39)$$

4.3 Тела 5 и 7

$$\begin{aligned} \Omega_i^i &= \mathbf{A}_{zi}^T \cdot \mathbf{A}_{yi}^T \cdot \mathbf{A}_{xi}^T \cdot \mathbf{A}_{xi-1}^T \cdot \Omega_1^1 + \\ &+ \mathbf{A}_{zi}^T \cdot \mathbf{A}_{yi}^T \cdot \mathbf{A}_{xi}^T \cdot \Omega_{i-1}^{i-1} + \\ &+ \mathbf{A}_{zi}^T \cdot \mathbf{A}_{yi}^T \cdot \Omega_{xi}^i + \mathbf{A}_{zi}^T \cdot \Omega_{yi}^i + \Omega_{zi}^i, \quad (40) \\ &i=5, 7 \end{aligned}$$

4.5 Тела 9 и 11

$$\begin{aligned} \Omega_i^i &= \mathbf{A}_{zi}^T \cdot \mathbf{A}_{yi}^T \cdot \mathbf{A}_{xi}^T \cdot \mathbf{A}_{xi-1}^T \cdot \Omega_1^1 + \\ &+ \mathbf{A}_{zi}^T \cdot \mathbf{A}_{yi}^T \cdot \mathbf{A}_{xi}^T \cdot \Omega_{i-1}^{i-1} + \\ &+ \mathbf{A}_{zi}^T \cdot \mathbf{A}_{yi}^T \cdot \Omega_{xi}^i + \mathbf{A}_{zi}^T \cdot \Omega_{yi}^i + \Omega_{zi}^i, \quad (41) \\ &i=9, 11 \end{aligned}$$

4.7 Тела 12, 13, ..., 21

$$\Omega_i^i = \Omega_1^1, \quad i=12, 13, \dots, 21 \quad (42)$$

4.8 Тяло 22

$$\Omega_{22}^{22} = \mathbf{A}_{Z22}^T \cdot \Omega_1^1 + \Omega_{Z22}^{22} \quad (43)$$

4.9 Тяло 23

$$\Omega_{23}^{23} = \mathbf{A}_{Y23}^T \cdot \mathbf{A}_{Z22}^T \cdot \Omega_1^1 + \mathbf{A}_{Y23}^T \cdot \Omega_{Z22}^{22} + \Omega_{Y23}^{23} \quad (44)$$

5. Вектор на абсолютната линейна скорост на центъра на тежестта на тяло от механичната система, проектиран в ОКС

Векторът на абсолютната линейна скорост \mathbf{V}_{Ci}^0 на центъра на тежестта C_i на i -то тяло от механичната система се получава, като се диференцира векторът \mathbf{R}_{Ci}^0 с уравнението:

$$\mathbf{V}_{Ci}^0 = \frac{d\mathbf{R}_{Ci}^0}{dt} = \left[\sum_{k=1}^6 \left(\frac{\partial \mathbf{A}_1^0}{\partial q_k} \right) \cdot \dot{q}_k \right] \cdot \mathbf{r}_{Ci} \quad (45)$$

За всяко тяло на МС векторът на абсолютната линейна скорост V_{Ci}^0 на центъра на тежестта C_i е от вида:

5.1 Тела 1, 2, 3

$$V_{Ci}^0 = \frac{\partial R_{Ci}^0}{\partial x_i} V_{xi} + \frac{\partial R_{Ci}^0}{\partial y_i} V_{yi} + \frac{\partial R_{Ci}^0}{\partial z_i} V_{zi} + \frac{\partial R_{Ci}^0}{\partial \theta_{xi}} \dot{\theta}_{xi} + \frac{\partial R_{Ci}^0}{\partial \theta_{yi}} \dot{\theta}_{yi} + \frac{\partial R_{Ci}^0}{\partial \theta_{zi}} \dot{\theta}_{zi}, \quad (46)$$

$i = 1, 2, 3$

5.2 Тела 4, 6, 8, 10

$$V_{Ci}^0 = \frac{\partial R_{Ci}^0}{\partial x_1} V_{x1} + \frac{\partial R_{Ci}^0}{\partial y_1} V_{y1} + \frac{\partial R_{Ci}^0}{\partial z_1} V_{z1} + \frac{\partial R_{Ci}^0}{\partial \theta_{x1}} \dot{\theta}_{x1} + \frac{\partial R_{Ci}^0}{\partial \theta_{y1}} \dot{\theta}_{y1} + \frac{\partial R_{Ci}^0}{\partial \theta_{z1}} \dot{\theta}_{z1} + \frac{\partial R_{Ci}^0}{\partial \theta_{xi}} \dot{\theta}_{xi}, \quad (47)$$

$i = 4, 6, 8, 10$

5.3 Тела 5 и 7

$$V_{Ci}^0 = \frac{\partial R_{Ci}^0}{\partial x_1} V_{x1} + \frac{\partial R_{Ci}^0}{\partial y_1} V_{y1} + \frac{\partial R_{Ci}^0}{\partial z_1} V_{z1} + \frac{\partial R_{Ci}^0}{\partial \theta_{x1}} \dot{\theta}_{x1} + \frac{\partial R_{Ci}^0}{\partial \theta_{y1}} \dot{\theta}_{y1} + \frac{\partial R_{Ci}^0}{\partial \theta_{z1}} \dot{\theta}_{z1} + \frac{\partial R_{Ci}^0}{\partial \theta_{xi-1}} \dot{\theta}_{xi-1} + \frac{\partial R_{Ci}^0}{\partial \theta_{xi}} \dot{\theta}_{xi} + \frac{\partial R_{Ci}^0}{\partial \theta_{yi}} \dot{\theta}_{yi} + \frac{\partial R_{Ci}^0}{\partial \theta_{zi}} \dot{\theta}_{zi} \quad (48)$$

$i = 5, 7$

5.5 Тела 12, 13, ..., 21

$$V_{Ci}^0 = \frac{\partial R_{Ci}^0}{\partial x_1} V_{x1} + \frac{\partial R_{Ci}^0}{\partial y_1} V_{y1} + \frac{\partial R_{Ci}^0}{\partial z_1} V_{z1} + \frac{\partial R_{Ci}^0}{\partial \theta_{x1}} \dot{\theta}_{x1} + \frac{\partial R_{Ci}^0}{\partial \theta_{y1}} \dot{\theta}_{y1} + \frac{\partial R_{Ci}^0}{\partial \theta_{z1}} \dot{\theta}_{z1} + \frac{\partial R_{Ci}^0}{\partial z_i} V_{zi}, \quad (49)$$

$i = 12, 13, \dots, 21$

5.6 Тяло 22

$$V_{C20}^0 = \frac{\partial R_{C22}^0}{\partial x_1} V_{x1} + \frac{\partial R_{C22}^0}{\partial y_1} V_{y1} + \frac{\partial R_{C22}^0}{\partial z_1} V_{z1} + \frac{\partial R_{C22}^0}{\partial \theta_{x1}} \dot{\theta}_{x1} + \frac{\partial R_{C22}^0}{\partial \theta_{y1}} \dot{\theta}_{y1} + \frac{\partial R_{C22}^0}{\partial \theta_{z1}} \dot{\theta}_{z1} + \frac{\partial R_{C22}^0}{\partial \theta_{z20}} \dot{\theta}_{z20} \quad (50)$$

5.7 Тяло 23

$$V_{C23}^0 = \frac{\partial R_{C23}^0}{\partial x_1} V_{x1} + \frac{\partial R_{C23}^0}{\partial y_1} V_{y1} + \frac{\partial R_{C23}^0}{\partial z_1} V_{z1} + \frac{\partial R_{C23}^0}{\partial \theta_{x1}} \dot{\theta}_{x1} + \frac{\partial R_{C23}^0}{\partial \theta_{y1}} \dot{\theta}_{y1} + \frac{\partial R_{C23}^0}{\partial \theta_{z1}} \dot{\theta}_{z1} + \frac{\partial R_{C23}^0}{\partial \theta_{z22}} \dot{\theta}_{z22} + \frac{\partial R_{C23}^0}{\partial \theta_{y23}} \dot{\theta}_{y23} \quad (51)$$

6. Заключение

Създаден е кинематичен модел на двуосен автомобил с висока проходимост, дефиниран като механична система, съставена от 23 идеално твърди тела, с 52 степени на свобода. За всяко тяло на механичната система са изведени:

- матрицата на трансформация на центъра на ЛКС, проектиран в ОКС,
- проектираният в ОКС радиус-вектор на центъра на тежестта,
- векторът на абсолютната ъглова скорост, проектиран в ЛКС,
- векторът на абсолютната линейна скорост на центъра на тежестта, проектиран в ОКС.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ангелов Ил.** Матрично моделиране в 3D пространството на кинематиката, динамиката и трептенията на механични модули и масови системи. Дисертация за присъждане на научна степен „Доктор на техническите науки“. София, Технически Университет, 2001.
2. **Славов В.** Кинематика в 3D пространството на механичен модул с цилиндрична и сферична става. Българско списание за инженерно проектиране, ISSN 1313-7530, брой 17, януари 2013, стр. 21-24.
3. **Славов В.** Механика в 3D пространството на транспортно-манипулационна вибрационна машина. Докторска дисертация. ХТМУ-София, 2008.
4. **Славов В., Ил. Ангелов, Д. Кожухаров, Ст. Читаков** Кинематика в 3D пространството на съчленено транспортно средство с едноосно

ремарке, списание "Механика на машините"
ISSN 0861-9727, № 63, 2005, стр. 13-16.

6. Angelov П., V. Slavov, K. Kabdyrakhim, D. Karaivanov Kinematics of Haylage Bale in 3D Space as a Body of One Fix Point and Two Rotations. Meccanica DOI 10.1007/s11012-013-9823-7. An International Journal of Theoretical and Applied Mechanics AIMETA, Volume 48, Number 8, 2013, ISSN 0025-6455.

7. Nikolov V. A simulation study of the controllability of a car under the influence of a sudden gust of crosswind. International virtual journal "Machines, Technologies and Materials", Sofia, Bulgaria, 2013, Year 7, Issue 7, pp. 55-59, ISSN 1313-0226.

8. www.military-today.com/apc/cobra.htm

Department of Mechanical Engineering
Technical University-Sofia, Branch Plovdiv,
25 Tsanko Dyustabanov St.
4000 Plovdiv
BULGARIA
e-mail: abc4@abv.bg



АВТОМАТИЧНА МАШИНА С МЕХАНИЗЪМ ЗА ЗАРЕЖДАНЕ, ЗАДВИЖВАН С ДВА ГАЗОВИ ДВИГАТЕЛЯ

ВАЛЕНТИН БАЧЕВ

Резюме: За тренировъчна стрелба с пистолет и с пушка, в спортните дисциплини „Биатлон“ и „Спортна стрелба“, се използват патрони с оловни куриуми, които не рикошират при среща с преграда. За дисциплината „Бърза стрелба с пистолет“ се използват пистолети с автоматично зареждане на патрон в цевта. Конструкциите на тези пистолети са различни. Автоматиката им за зареждане е с инерционен затвор. Последният се задвижва от двигателя, който ускорява куриума. На базата на автоматичната машина АК-74, за тренировъчна стрелба е създаден автомат, за работа с патрони с оловни куриуми. Автоматиката му е с инерционен затвор. Автоматичната машина АК-74 има газоотводен механизъм за зареждане на патрон в цевта. Основното звено на автоматиката се задвижва от страничен двигател. Автоматичната машина АК-74 работи с патрони, куриумите на които рикошират, в зависимост както от ъгъла на допир с препятствие, така и от механичните свойства на последното. Друга особеност на тези куриуми е голямото разстояние на поразяващото им действие. Поради изброените особености, тези патрони са негодни за тренировъчна работа в условия, имитиращи градска среда. Целта на настоящата статия е да се изследва кинематична схема на автоматична машина с механизъм за зареждане, задвижван от два газови двигателя.

Ключови думи: Механизъм за зареждане, инерционен затвор, тренировъчна стрелба

AN AUTOMATIC MACHINE WITH A RECHARGE MECHANISM DRIVEN BY TWO GAS ENGINES

VALENTIN BACHEV

Abstract: For shooting practice with a pistol and a rifle, as well as in the shooting sports and biathlon, rimfire cartridges are used. Fired, their bullets do not ricochet, when meeting a barrier. For practical shooting with a pistol, self-charging pistols are used. They have different constructions. Their automaticity of recharge involves a blowback system. The latter is driven by a ballistic motor which accelerates the bullet. Based on the automatic machine AK -74, a machine pistol has been created for shooting practice, for work with rimfire cartridges. Its automaticity of recharge involves a blowback system. The automatic machine AK -74 has a gas-offset recharge mechanism. The automaticity basic unit is driven by a side engine. The automatic machine AK-74 works with cartridges, whose bullets ricochet, depending both on the angle of touch with a barrier and on the mechanical properties of the latter. Another feature of these bullets is the big distance of their striking effect. Because of the listed features, these cartridges are unsuitable for training in conditions simulating urban environment. The purpose of this article is the examination of the kinematic scheme of an automatic machine with a recharge mechanism, driven by two engines.

Key words: Blowback system, automatic firearm operation.

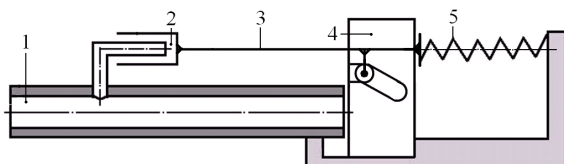
1. Увод

Автоматичната машина (АМ) автомат “Калашников” (АК) безспорно е най-съвършеното термогазомеханично изделие на нашето съвремие. Модификацията му АК-74 работи с патрони, калибър 5,45x39 мм. Механизмът за зареждане се задвижва от страничен газов двигател (фиг. 1). Работното тяло влиза в обема на последния през отвор в стената на двигателя, ускоряващ куршума. Този двигател е основен за автоматичната машина. За тази модификация е разработена тренировъчна АМ [3], за работа с патрони с оловни куршуми. Те са с калибър 5,6x16 мм. Механизмът за зареждане е инерционен и се задвижва от основния двигател (фиг. 2). Страничният двигател е изолиран от основния двигател. При изстрел в него не постъпва газ.

Практиката на употреба на автоматичните машини показва, че индивидуалните биологични особености на оператора на АМ диктуват индивидуалността на настройките за работа с нея. Поради това, за повишаване качеството на подготовка на оператора, е необходимо да се използва една автоматична машина, както за основна, така и за тренировъчна работа. Конструктивно тази идея може да бъде осъществена, като от автоматиката на базовата машина се демонтират детайли и се заменят с други детайли, проектирани за работа с нерикоширащи патрони. Предлага се кинематична схема на АМ с инерционен механизъм за зареждане, задвижван от основния и от страничния двигател.

2. Кинематични схеми на автоматични машини

Кинематичната схема на автоматична машина АК-74 е представена на фиг. 1. Тя е съставена от основен двигател 1, в който се ускорява куршумът. Страничният двигател 2 задвижва механизма за зареждане на машината с патрон за следващ изстрел.

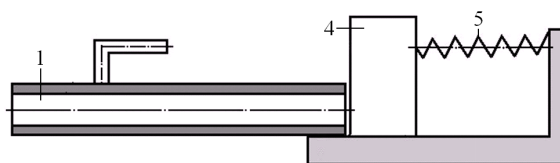


Фиг. 1 Схема на автоматика със страничен газов двигател

Автоматиката е съставена от бутало 3, което кинематично е свързано със затворния механизъм 4 и с пружината 5. Тази автоматика не може да работи с патрони с калибър 5,6x16

мм, поради по-малкото количество барут в тях, в сравнение с патроните с калибър 5,45x39 мм.

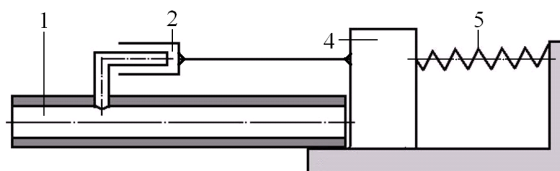
На фиг. 2 е представена кинематична схема на АМ, разработена въз основа на базовия модел АК-74. Тя е с инерционен механизъм за зареждане и работи с нерикоширащи патрони. Автоматиката е съставена от основен балистичен двигател 1, инерционен механизъм за зареждане 4 и пружина 5. Тази автоматика не може да работи с патрони с калибър 5,45x39 мм.



Фиг. 2 Схема на автоматика с инерционен затвор с един газов двигател

Принципната кинематична схема на АМ с инерционен механизъм за зареждане, задвижван от два двигателя, е представена на фиг. 3. Автоматиката се състои от основен балистичен двигател 1, страничен балистичен двигател 2, бутало със затворен механизъм 4 и пружина 5.

В работата на предложената автоматика може да се разгледат два периода. През първия от тях, движещата сила на механизма за зареждане се създава от работата на работното тяло, през втория – от работата на пружината. За да се оцени работоспособността на предложената автоматика, е достатъчно да се оцени работата ѝ през първия период.



Фиг. 3 Схема на автоматика с инерционен затвор с два газови двигатели

3. Скорост на основното звено на АМ с инерционен механизъм за зареждане, задвижван от един двигател

Скоростта $\dot{X}_{\text{ПС}}$ на основното звено на механизма за зареждане за пореден изстрел с АМ през пиростатичния период на изстрела се изчислява с уравнението [1]:

$$\dot{X}_{\text{ПС}} = \frac{J_{\text{ПС}}}{\Phi_3 \cdot m_{\text{(ПР)}}}, \quad (1)$$

където:

$$J_{\text{ПС}} = \frac{P_0 \cdot S_{\text{кн}}}{a}, \quad (2)$$

$$a = \frac{f_{\omega} \cdot \Delta}{J_k \cdot \left(1 - \frac{\Delta}{\delta}\right)}, \quad (3)$$

φ_3 е коефициент на фиктивна маса на основното звено на механизма за зареждане,
 $m_{1(пр)}$ – еквивалентна маса на основното звено на механизма за зареждане,
 P_0 – налягане на форсиране на куршума [2],

$S_{кн}$ – площ на светлия отвор на канала на цевта,

f_{ω} – сила на барута,

Δ – плътност на зареждане на барута,

J_k – импулс на барута,

δ – плътност на барута.

Преместването на основното звено на механизма за зареждане през пиростатичния период на изстрела се изчислява с уравнението:

$$X_{ипс} = \dot{X}_{ипс} \cdot t_{ипс}, \quad (4)$$

където:

$$t_{ипс} = \frac{1}{a} \cdot \ln \frac{P_0}{P_b}, \quad (5)$$

P_b – барометрично налягане.

Скоростта на основното звено на механизма за зареждане $\dot{X}_{1д}$ в дулния момента на изстрела се изчислява с уравнението:

$$\dot{X}_{1д} = \dot{X}_{ипс} + \frac{(\varphi \cdot m_q + 0,5 \cdot m_{\omega})}{\varphi_3 \cdot m_{1(пр)}} \cdot V_d, \quad (6)$$

където:

m_q – маса на куршума,

V_d – дулна скорост на куршума [5].

Преместването на основното звено в дулния момент на изстрела се изчислява с уравнението:

$$X_{1д} = X_{ипс} + \frac{(\varphi \cdot m_q + 0,5 \cdot m_{\omega})}{\varphi_3 \cdot m_{1(пр)}} \cdot l_d, \quad (7)$$

където:

φ – коефициент на фиктивна маса на куршума,

l_d – път на куршума в цевта.

Скоростта на основното звено на механизма за зареждане $\dot{X}_{1м}$ в края на периода на остатъчно действие на барутния газ при изстрел се изчислява с уравнението:

$$\dot{X}_{1м} = \dot{X}_{1д} + \frac{(\beta - 0,5) \cdot m_{\omega}}{\varphi_3 \cdot m_{1(пр)}} \cdot V_0, \quad (8)$$

където:

$$\beta = \frac{1300}{V_0}, \quad (9)$$

V_0 – начална скорост на куршума.

Преместването на основното звено на механизма за зареждане $X_{1м}$ в края на периода на остатъчно действие на барутния газ при изстрел се изчислява с уравнението:

$$X_{1м} = X_{1д} + \left[\dot{X}_{1д} + \frac{(\beta - 0,5) \cdot m_{\omega}}{\varphi_3 \cdot m_{1(пр)}} \cdot \left(1 - \frac{1}{b \cdot t_3}\right) \right] \cdot t_3, \quad (10)$$

където:

$$b = \frac{P_d \cdot S_{кн}}{(\beta - 0,5) \cdot m_{\omega} \cdot V_0} \quad (11)$$

Времетраенето на периода на остатъчно действие на барутния газ при изстрел се изчислява с уравнението:

$$t_3 = \frac{1}{b} \ln \frac{P_d}{P_A} \quad (12)$$

4. Скорост на основното звено на АМ с инерционен механизъм за зареждане, задвижван с два двигателя

Скоростта и преместването на основното звено на АМ до момента на включване на страничния балистичен двигател се изчисляват с уравненията:

$$\dot{X}_{1сбд} = \dot{X}_{ипс} + \frac{(\varphi \cdot m_q + 0,5 \cdot m_{\omega})}{\varphi_3 \cdot m_{1(пр)}} \cdot V_{сбд}, \quad (13)$$

$$X_{1сбд} = X_{ипс} + \frac{(\varphi \cdot m_q + 0,5 \cdot m_{\omega})}{\varphi_3 \cdot m_{1(пр)}} \cdot l_{сбд}, \quad (14)$$

където $l_{сбд}$ и $V_{сбд}$ са съответно скорост и път на куршума в сечението на страничния отвор в стената на цевта.

Скоростта на основното звено на механизма за зареждане, задвижвано от работата на страничния газов двигател, се изчислява с уравнението:

$$\dot{X}_{IC} = \frac{I_k}{m_{1(PP)}} [1 - e^{-Zc}(1 + Zc)], \quad (15)$$

където:

$$Z_c = \frac{m_{1(PP)} \cdot X_{IC}}{I_k \cdot t_m}, \quad (16)$$

$$t_c = Z_c \cdot t_m, \quad (17)$$

Времето за достигане на максимално налягане на барутния газ в страничния газов двигател е равно на:

$$t_m = \frac{t}{8,5} \quad (18)$$

Времето за работа на страничния газов двигател е равно на:

$$t = 1,1 \cdot (t_{од} + t_3), \quad (19)$$

където $t_{од}$ е времето за движение на куршума от сечението на страничния канал в стената на цевта до дулното сечение на последната:

$$I_k = i_k \cdot S_6, \quad (20)$$

$$i_k = \eta_k \cdot i_\Gamma, \quad (21)$$

$$i_\Gamma = \frac{(P_{ГО} + P_{ГД})}{2} \cdot t_{од} + \frac{P_{ДГ}}{b}, \quad (22)$$

$$\eta_k = \eta_{k0} \cdot \eta_0 \cdot \eta_m \cdot \eta_{m0}. \quad (23)$$

Стойностите на коефициентите η_{k0} ; η_0 ; η_m ; η_{m0} се избират от таблици, според стойностите на параметрите [4]:

$$\sigma_6 = \frac{S_6}{S_0}; \quad \sigma_\Delta = \frac{\Delta S_6}{S_0}; \quad \sigma_0 = \frac{W_{0K}}{S_0}; \quad \sigma_m = \frac{m_1}{S_6}$$

където:

S_6 - площ на буталото,

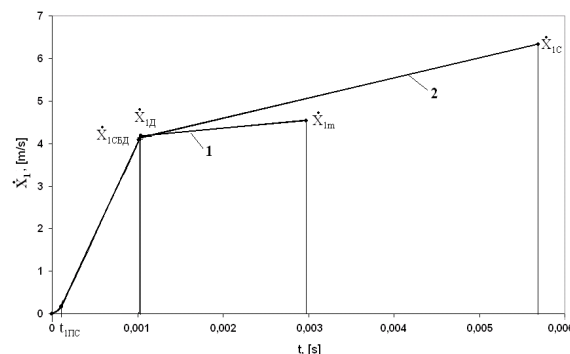
S_0 - минимална площ на светлия отвор на газовия канал,

W_{0K} - начален обем на страничния балистичен двигател.

5. Примерни изчисления

За разгледаните два типа инерционни механизми за зареждане на АМ са направени изчисления на скоростта на основното звено на механизмите за зареждане. В изчисленията са използвани параметрите на стандартен патрон с

калибър 5,6x16 мм [6]. Резултатите от изчисленията са представени в графичен вид на фиг. 4.



Фиг. 4 Скорост на основното звено на автоматиката

Максималната скорост на основното звено на инерционния механизъм за зареждане, задвижвано от един балистичен двигател (крива 1), е 4,53 m/s, а на основното звено, задвижвано с два балистични двигателя, е 6,33 m/s (крива 2).

6. Заключение

Предложена е кинематична схема на автоматика с инерционен механизъм за зареждане, задвижван от два двигателя. Максималната скорост на основното звено на механизма за зареждане, задвижван с два балистични двигателя, е с 28,44 % по-висока от скоростта на основното звено, задвижвано с един балистичен двигател.

Предложеният тип автоматика може да се разработи конструктивно, да се произведе и да се използва в процеса на обучение за работа с базовата машина.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бачев В.** Конструирание и проектиране на стрелково оръжие. Пловдив, 2000, 216 с. ISBN 954-9752-07-0.
2. **Бачев В., Д. Джумаков** Изчисляване на налягането на форсиране във функция на свойствата на материала на проектила и геометрията на балистичния двигател. Научна конференция „Смолян - 2001“ 23-24 юни 2001г., стр.118-124, ISBN 954-91073-3-7.
3. **Бачев В. и др.** Механизъм на противоотскок в автоматично оръжие с инерционен затвор. Военно-научен форум, 2004, Сборник научни трудове, том 3, стр. 21-24, ISBN 954-753-033-X
4. **Мамонтов М. А.** Некоторые случаи течения газа. М., Оборонгиз, 1951. – 490 с.

5. **Мамонтов М. А.** Теория тепловых двигателей. Динамический анализ, Тульский политехнический институт, 1987 г.
6. **Николов В.** Механо-математичен модел на помпен агрегат със свободно-цилиндров Стирлингов двигател. Българско списание за инженерно проектиране, ТУ-София, брой 20, октомври 2013, стр. 59-63, ISSN 1313-7530.
7. **Николов В., Д. Малинов, С. Пенчев, К. Амбарев** Газодинамично изчисляване на турбореактивни двигатели с интерактивна програмна система. Научна конференция "Космос, екология, нанотехнологии, сигурност", 27-29.06.2007, Варна, Сборник доклади, стр. 446-451.
8. **Таблицы внутренней баллистики ГАУ.** ч. 1-4. М., Воениздат, 1956.
9. **Nikolov V.** A simulation study of the influence of the gas exchange on the working cycle of four stroke single cylinder diesel engine. International virtual journal "Machines, Technologies and Materials", Sofia, Bulgaria, 2013, Year 7, Issue 8, pp. 59-62, ISSN 1313-0226.

Department of Mechanical Engineering
Technical University-Sofia, Branch Plovdiv,
25 Tsanko Dyustabanov St.
4000 Plovdiv
BULGARIA
e-mail: abc4@abv.bg



МЕХАНО-МАТЕМАТИЧЕН МОДЕЛ НА СТИРЛИНГОВ ДВИГАТЕЛ С РОМБИЧЕН МЕХАНИЗЪМ

ВЪЛЪО НИКОЛОВ

Резюме: В настоящата статия е описан създаденият механо-математичен модел на Стирлингов двигател с ромбичен механизъм, с който могат да се изследват различни динамични процеси на съществуващи и нови двигатели от този тип. След дефиниране на необходимите физични и геометрични параметри на Стирлинговия двигател и електрическия генератор, са определени аналитични зависимости за кинематичните и силови параметри на двигателя. Съставено е диференциалното уравнение на ротационното движение на колянвия вал на двигателя с приведения променлив масов инерционен момент на агрегата, зависещ от положението на вала. Определена е функцията на ъгловото ускорение, с която чрез двукратно последователно числено интегриране се определят ъгловата скорост и ъгъла на завъртане на колянвите валове.

Ключови думи: Стирлингови двигатели, ромбичен механизъм, математично моделиране.

MECHANICAL-MATHEMATICAL MODEL OF STIRLING ENGINE WITH RHOMBIC DRIVE MECHANISM

VALYO NIKOLOV

Abstract: This article describes the mechanic-mathematical model of β -type Stirling engine with rhombic drive mechanism that can explore different dynamic processes of existing and new engines of this type. After determining of the necessary physical and geometrical parameters of the Stirling engine and the electric generator, the analytical relationships of their kinematics and power parameters are obtained. Taking into account the variation of the reduced mass inertial moment of the system to the crankshaft, a differential equation of rotary motion is obtained, depending on the position of the shaft. The function of the angular acceleration is determined, which successively, by double numerical integration, determines the angular velocity and the angle of rotation of the crankshafts.

Key words: Stirling engines, rhombic drive mechanism, mathematical modeling.

1. Въведение

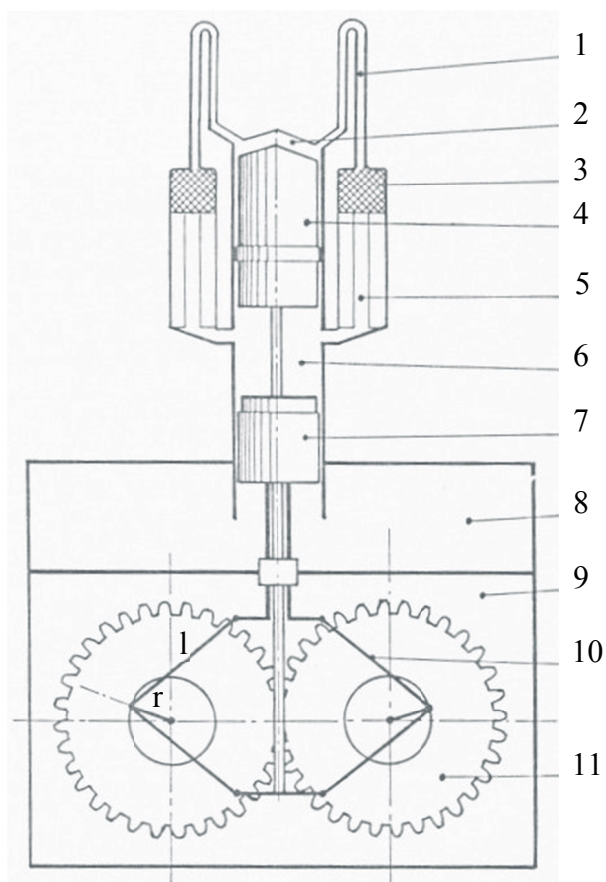
Ромбичният механизъм, преобразуващ възвратно-постъпателните движения на буталата във въртеливи на колянвите валове, намират приложение в едноцилиндровите Стирлингови двигатели от β -тип [3, 6, 7, 8].

При изграждане на настоящия механо-математичен модел на Стирлинговия двигател не се налага тривиалното допускане, че ъгловата скорост ω на въртене на колянвия вал е постоянна, т. е. ъгълът на завъртане на

коляновия вал φ е някаква неизвестна функция на времето t , подлежаща на определяне [2].

2. Кинематика на Стирлингов двигател с ромбичен механизъм

Ромбичният механизъм, свързващ работното бутало и преместващото бутало с коляновия вал, е съставен от два еднакви несъосни (дезаксиални) коляно - мотовилкови механизма, разположени огледално спрямо оста на цилиндъра, със значително изместване на осите на синхронно въртящите се в противоположна посока колянови валове. Той има равни дължини на мотовилките l и радиуси на колената r (фиг. 1) [3, 6].



Фиг. 1. Схема на Стирлингов двигател с ромбичен механизъм [3]

1 – нагревател, 2 – разширителна камера, 3 – регенератор, 4 – преместващо бутало, 5 – охладител, 6 – съгъстителна камера, 7 – работно бутало, 8 – буферна камера, 9 – картер, 10 – ромбичен механизъм, 11 – синхронизираща предавка.

Тъй като разглежданият механизъм е с една степен на свобода, за независима променлива на системата във времето се приема ъгълът на завъртане на коляновия вал $\varphi = \varphi(t)$, [rad], който подлежи на определяне заедно с неговите

първа и втора производни спрямо времето, които са съответно ъгловата скорост

$$\omega(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt}, [\text{rad} / \text{s}] \text{ и ъгловото ускорение}$$

$$\varepsilon(t) = \frac{d\omega(t)}{dt}, [\text{rad} / \text{s}^2].$$

Между ъглите на отклонение на мотовилките и ъгъла на завъртане на коляновите валове са установени зависимостите

$$\sin \beta = k - \lambda \sin \varphi; \quad (1)$$

$$\cos \beta = \sqrt{1 - (k - \lambda \sin \varphi)^2}. \quad (2)$$

За пътя, изминат от работното бутало, с начало в горна мъртва точка и посока към оста на вала, се получава

$$x_p(t) = r \left[\sqrt{\left(\frac{1}{\lambda} + 1\right)^2 - k^2} - \cos \varphi - \frac{1}{\lambda} \cos \beta \right] = \quad (3)$$

$$= r \left[\sqrt{\left(\frac{1}{\lambda} + 1\right)^2 - k^2} - \cos \varphi - \frac{1}{\lambda} \sqrt{1 - (k - \lambda \sin \varphi)^2} \right],$$

където r , [m] е радиус на коляното; $\lambda = r/l$ - относителен радиус на коляното спрямо дължината на мотовилките l , [m]; a , [m] - изместване на осите на коляновите валове; $k = a/r$ - относително изместване (дезаксиал).

Аналогично на (1), за пътя на преместващото бутало се получава

$$x_d(t) = r \left[-\sqrt{\left(\frac{1}{\lambda} - 1\right)^2 - k^2} - \cos \varphi + \frac{1}{\lambda} \cos \beta \right] = \quad (4)$$

$$= r \left[-\sqrt{\left(\frac{1}{\lambda} - 1\right)^2 - k^2} - \cos \varphi + \frac{1}{\lambda} \sqrt{1 - (k - \lambda \sin \varphi)^2} \right].$$

След диференциране на (3) и (4), за скоростите на работното бутало и преместващото бутало се получава

$$v_p(t) = \frac{dx_p(t)}{dt} = r \left[\sin \varphi \dot{\varphi} + \frac{1}{\lambda} \sin \beta \dot{\beta} \right] = \quad (5)$$

$$= r \dot{\varphi} \left[\sin \varphi - \frac{(k - \lambda \sin \varphi) \cos \varphi}{\sqrt{1 - (k - \lambda \sin \varphi)^2}} \right];$$

$$v_d(t) = \frac{dx_d(t)}{dt} = r \left[\sin \varphi \dot{\varphi} - \frac{1}{\lambda} \sin \beta \dot{\beta} \right] =$$

$$= r \dot{\varphi} \left[\sin \varphi + \frac{(k - \lambda \sin \varphi) \cos \varphi}{\sqrt{1 - (k - \lambda \sin \varphi)^2}} \right]. \quad (6)$$

След диференциране на (5) и (6), за ускоренията на работното бутало и преместващото бутало се получават изразите

$$a_p(t) = \frac{dv_p(t)}{dt} = r \left[\cos \varphi \dot{\varphi}^2 + \sin \varphi \ddot{\varphi} + \frac{1}{\lambda} (\cos \beta \dot{\beta}^2 + \sin \beta \ddot{\beta}) \right] = r \left[\left(\cos \varphi + \frac{\lambda \cos^2 \varphi + \sin \varphi \sin \beta}{\cos \beta} + \frac{\lambda \cos^2 \varphi \sin^2 \beta}{\cos^3 \beta} \right) \dot{\varphi}^2 + \left(\sin \varphi - \frac{\cos \varphi \sin \beta}{\cos \beta} \right) \ddot{\varphi} \right]; \quad (7)$$

$$a_d(t) = \frac{dv_d(t)}{dt} = r \left[\cos \varphi \dot{\varphi}^2 + \sin \varphi \ddot{\varphi} - \frac{1}{\lambda} (\cos \beta \dot{\beta}^2 + \sin \beta \ddot{\beta}) \right] = r \left[\left(\cos \varphi - \frac{\lambda \cos^2 \varphi + \sin \varphi \sin \beta}{\cos \beta} - \frac{\lambda \cos^2 \varphi \sin^2 \beta}{\cos^3 \beta} \right) \dot{\varphi}^2 + \left(\sin \varphi + \frac{\cos \varphi \sin \beta}{\cos \beta} \right) \ddot{\varphi} \right]. \quad (8)$$

След диференциране на (1) спрямо времето и изразяване на ъгловата скорост на мотовилките се получава

$$\omega_m(t) = \dot{\beta}(t) = -\frac{\lambda \cos \varphi}{\cos \beta} \dot{\varphi}, \quad (9)$$

След диференциране на (9) спрямо времето, за ъгловото ускорение на мотовилките се получава

$$\varepsilon_m(t) = \ddot{\beta}(t) = \left(\frac{\lambda \sin \varphi}{\cos \beta} + \frac{\lambda^2 \cos^2 \varphi \sin \beta}{\cos^3 \beta} \right) \dot{\varphi} - \frac{\lambda \cos \varphi}{\cos \beta} \ddot{\varphi} \quad (10)$$

3. Сили и моменти, действащи в Стирлинговия двигател с ромбичен механизъм

За практическата реализация на цикъла на Стирлинг е необходимо всеки Стирлингов двигател да има основните елементи, показани на фиг. 1.

Имайки предвид основните допускания, въз основа на които се изгражда приетият изотермичен модел и получените зависимости при неговия анализ [1], за налягането в работните пространства може да се запише

$$p(t) = \frac{mRT_k}{\tau [V_h + V_e(t)] + \frac{2\tau}{1+\tau} V_r + V_k + V_c(t)}, \quad (11)$$

В (11) участват функциите на обеите на разширителната и сгъстителната камери, за които съответно са получени изразите:

$$V_e(t) = S_d [L_e + x_d(t)]; \quad (12)$$

$$V_c(t) = (S_p - S_r) [L_c + x_p(t) - x_d(t)].$$

Тъй като обеят на картерното пространство е многократно по-голям от сумарния обем на работните пространства, налягането в картера се приема за постоянно и равно на магистралното налягане, т. е. $p_b = const$.

За резултатните сили от наляганята на газовете върху работното бутало и преместващото бутало по направление на цилиндровата ос, може да се запише

$$P_{pg}(t) = (S_p - S_r) p(t) - S_p p_b; \quad (13)$$

$$P_{dg}(t) = S_r [p(t) - p_b]. \quad (14)$$

Инерционните сили от възвратно-постъпателно движещите се приведени маси, съответно към работното бутало и преместващото бутало, могат да се определят по формулите

$$P_{pj}(t) = -m_p a_p(t); \quad (15)$$

$$P_{dj}(t) = -m_d a_d(t). \quad (16)$$

Сумарните сили, представляващи векторни суми от съответните газова и инерционна сили, след тяхната редукция към оста на коляновия вал, формират моменти, за които се получават изразите

$$M_p(t) = P_p(t) \cdot r \frac{\sin(\varphi - \beta)}{\cos \beta}; \quad (17)$$

$$M_d(t) = P_d(t) \cdot r \frac{\sin(\varphi + \beta)}{\cos \beta}. \quad (18)$$

4. Диференциално уравнение на ротационното движение

Основното уравнение на динамиката за механични системи, съдържащи механизми с

променливо предавателно отношение като ромбичния [4], може да се запише във вида

$$J_{red} \varepsilon + \frac{\partial J_{red}}{\partial \varphi} \frac{\omega^2}{2} = M_{\Sigma red}, \quad (19)$$

откъдето за ускорението на колянвия вал, спрямо който е редуцирана системата, се получава

$$\varepsilon(t) = \frac{M_{\Sigma red} - \frac{\partial J_{red}}{\partial \varphi} \frac{\omega^2}{2}}{J_{red}}. \quad (20)$$

Приведеният масов инерционен момент към оста на колянвия вал, формиран както от ротационно движещите се маси, така и от възвратно постъпателно движещите се маси, може да се представи със сумата

$$J_{red} = J_{red}(\varphi) = J_0 + J_p(\varphi) + J_d(\varphi). \quad (21)$$

За променящите се масови инерционни моменти J_p и J_d , зависещи от съответните съсредоточени възвратно-постъпателно движещи се маси и техните кинематични предавателни функции, се получават изразите

$$J_p(\varphi) = m_p \left(\frac{v_p}{\omega} \right)^2; \quad (22)$$

$$J_d(\varphi) = m_d \left(\frac{v_d}{\omega} \right)^2. \quad (23)$$

За частната производна на приведения масов инерционен момент, след заместване на (22) и (23) в (21) и диференциране на (21) спрямо ъгъла на завъртане на колянвия вал φ , се получава

$$\frac{\partial J_{red}(\varphi)}{\partial \varphi} = \frac{\partial J_p(\varphi)}{\partial \varphi} + \frac{\partial J_d(\varphi)}{\partial \varphi}. \quad (24)$$

Сумарният приведен момент към колянвия вал може да се представи с израза

$$M_{\Sigma red}(t) = M_p(t) + M_d(t) - M_f(t) - M_{el}(t), \quad (25)$$

където с M_f е означен сумарният съпротивителен момент за преодоляване на механичните, хидравличните и газовите съпротивления, и с M_{el} – момента на вала на електрическия генератор.

4. Заключение

Създаденият механо-математичен модел на Стирлингов двигател от β -тип с ромбичен механизъм, след създаване с него на компютърен симулационен модел, може да се използва за изследване на динамични процеси, както на съществуващи, така и на нови двигатели от този тип.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Николов В.** Изотермичен анализ на цикъла на Стирлинг по теорията на Шмид. Международна конференция "МОТАУТО'98", 14-16.10.1998 г., София, Сборник доклади, том III, стр. 15-19.
- 2. Николов В.** Динамика на Стирлингов двигател от β -тип с коляно-мотовилков механизъм. Докторска дисертация, ТУ-София, филиал Пловдив, 2001.
- 3. Под ред. В. М. Бродянского,** Двигатели Стирлинга. Сборник статей, Мир, Москва, 1975.
- 4. Под ред. Г. В. Крейнина,** Кинематика, динамика и точност механизмов. Машиностроение, Москва, 1984.
- 5. Севастакиев В. С., В. С. Живков и Е. И. Маринов,** Динамика и трептения на ДВГ. Техника, София, 1986.
- 6. Meijer R. J.** The Philips Stirling Engine. De ingenieur, No 19, pp. 81-93, 1969.
- 7. Urieli I. and D. Berchowitz,** Stirling Cycle Engine Analysis. Adam Hilger Ltd, Bristol, 1984.
- 8. Walker G.,** Stirling Engines, Oxford University Press, Oxford, 1980.

Department of Transport and Aviation
Equipment and Technologies
Technical University–Sofia, Branch Plovdiv
25 Tsanko Dystabanov St.
4000 Plovdiv
BULGARIA
E-mail: vnikolov@tu-plovdiv.bg



ПРЕДИМСТВА НА ГЕРОЛКОВАТА БЕЗСЕПАТОРНА КОНСТРУКЦИЯ ПРЕД ТАКИВА САМО С ЦИКЛОИДНИ ПРОФИЛИ

НИКОЛА НАЧЕВ

Резюме: В настоящата публикация са разгледани предимствата на геролковата безсепараторна конструкция за хидравлични помпи пред тази само с циклоидни профили на двата ротора от гледна точка на якостната теория за контактните напрежения.

Ключови думи: контактни напрежения, геротор помпа, геролкова безсепараторна конструкция, предимства

ADVANTAGES OF THE GEROLLER NON- SEPARATOR CONSTRUCTION OVER THE ONE ONLY WITH CYCLOID PROFILES

NIKOLA NACHEV

Abstract: In the present publication are examined the advantages of the geroller non-separator construction of hydraulic pumps over the one only with cycloid profiles of the two rotors, through the aspect of the rigidity theory for contact stress.

Key words: contact stress, gerotor pump, geroller non-separator construction, advantages

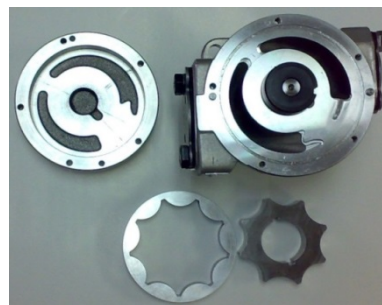
1. Въведение.

Класическата конструкция за геротор (двуроторни) помпи е съставена от два ротора – вътрешно и външно зъбно колело, като и двете колела са с циклоиден профил на зъбите. При новата конструкция се запазва вътрешното колело, а външното се видоизменя в цилиндрични ролки. Ролките са така подбрани, че се допират една до друга и в същото време от вътре по вътрешното колело, а отвън по външната гривна.

Основна цел на настоящата статия е да бъдат разгледани предимствата на новата геролкова безсепараторна конструкция пред тази само с циклоидни профили от гледна точка на якостната теория за контактните напрежения.

2. Предимства.

За да се посочат предимствата на новата конструкция е необходимо да се разгледа известна съществуваща конструкция на геротор (двуроторна) помпа. На фиг. 1 е показана такава произвеждана от Фирма Bosch.



Фиг. 1.



а)



б)

Фиг. 2.

От фиг. 2 се вижда, че помпата е еднопосочен механизъм.

Предлаганата нова конструкция е показана на фиг. 3.



Фиг. 3.

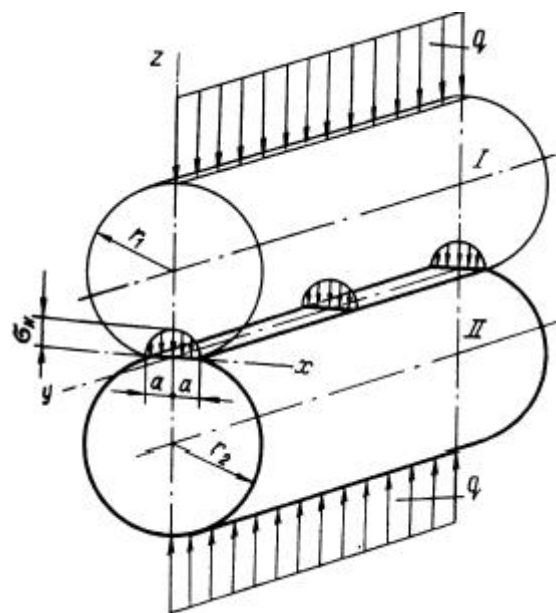
От фигурата се вижда, че вътрешното колело се запазва, сравнявайки с известната конструкция, а външното се видоизменя в цилиндрични ролки. Те са така подбрани, че се допират една до друга и в същото време от вътре по вътрешното колело, а отвън по външната гривна. По този начин всяка ролка се допира в четири точки (чисто теоретично, ако няма хлабини) и не е нужен сепаратор, който да ги държи. По време на работа ролките се превъртат, което води до следните предимства:

- Заменя се триенето при плъзгане с такова при търкаляне
- Контактът се разпределя по цялата периферия на ролката, а не само в определено петно

- Между външната гривна и ролките се образуват маслени джобове, които при високи скорости повдигат ролките на маслени възглавници
- За намаляване на страничното (челно) триене на ролките са изработени и челни маслени цилиндрични джобове (ролките са освободени в центъра).
- Не на последно място е технологичността на конструкцията, защото е лесна изработката на цилиндрична повърхнина.

3. Якоствна теория на контактните напрежения.

Нека разгледаме предимствата от гледна точка на якостната теория на контактните напрежения.



Фиг. 4.

Под равномерен товар q , от теорията за допир на цилиндрични тела с успоредни оси възникват напрежения в малки площадки, които се определят с формулата [1]:

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{q}{\rho_{np}} \pi \frac{E_1 E_2}{E_1(1-\mu_2^2) + E_2(1-\mu_1^2)}} \quad (1)$$

Без съществени грешки приемайки коефициента на Пуасон $\mu = 0,25 \dots 0,35$ се получават уравнения (2):

$$\begin{aligned} \sigma_H &= 0.418 \sqrt{\frac{q E_{np}}{\rho_{np}}}, \\ E_{np} &= \frac{2E_1 E_2}{(E_1 + E_2)}, \\ \frac{1}{\rho_{np}} &= \frac{1}{r_1} \pm \frac{1}{r_2} \end{aligned} \quad (2)$$

Където:

E_{np} е приведен модул на еластичност;

ρ_{np} – приведен радиус на кривина;

r_1 и r_2 – радиусите на кривина в точката на контакт. При контакт с плоскост $r_2 = \infty$;

знака “минус“ е за вътрешно допиране на цилиндрите.

На фиг. 5 са показани два варианта със съществуваща конструкция на зъбната двойка (лявата фигура) и новата с търкалящи се ролки (дясната фигура). Размерите са напълно еднакви (т. е. и помпите са еднакви) за двете фигури, за да се направи разликата. Ако се приеме посока на въртене както е посочено на лявата фигура се вижда, че контакта се осъществява в отбелязаните с кръстче точки. Линията на контакта за външното колело е изобразена подебела. В горната част колелата не са в контакт заради хлабината в двойката аналогично на външното зацепване зъба допира само с атакуващата си част, а другата не допира заради хлабината. От изнесените под лявата и дясна фигура схеми се вижда, че само малка част (~10 пъти) от профила при въртене ще изпитва циклични натоварвания. Много важно е да се отбележи, че триенето във втората двойка е при търкаляне, а не при плъзгане. Чисто теоретично би следвало трайността на втората двойка да е поне 10 (десет) пъти по-голяма.

Да сравним контактните напрежения на вътрешното зъбно колело с ролката и на ролката с външната гривна.

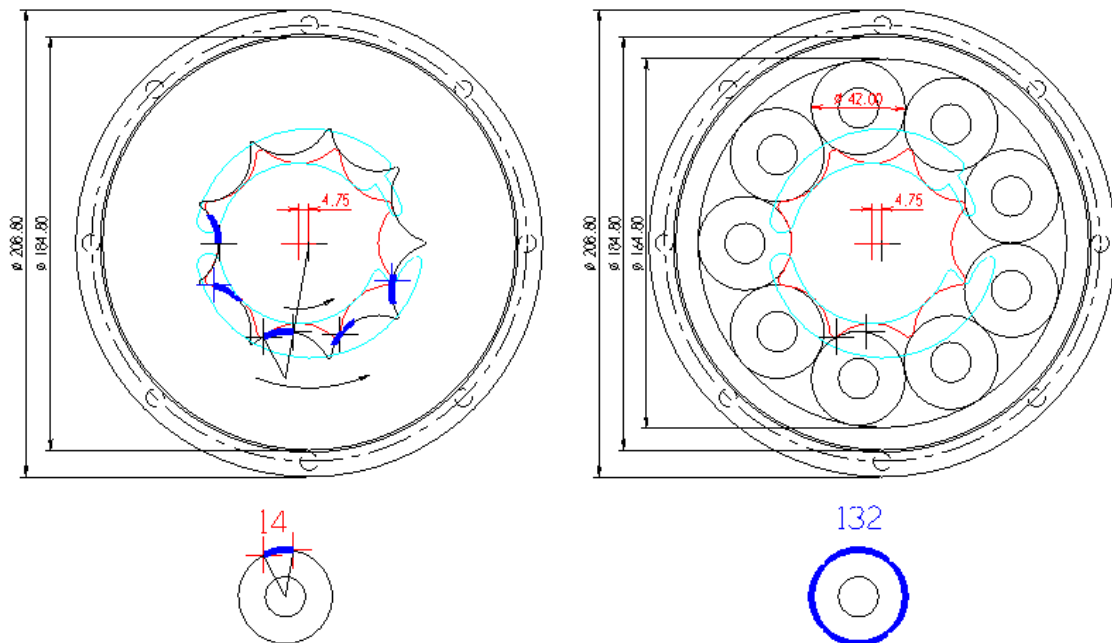
За конкретния случай изобразен на фиг. 5 е известно:

- $r_1 = 42/2 = 21$ mm;

- $r_2 = 0,5$ mm – най-малкия радиус

на кривина на вътрешното колело, когато то допира в ролката, отбелязано е на дясната схема с кръстче;

- $r_2 = 164,8/2 = 82,4$ mm.



Фиг. 5.

Използвайки последното от уравнения (2) се получава [1]:

$$\frac{1}{r_{np}} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} = \frac{1}{21} + \frac{1}{0,5} = \frac{0,5 + 21}{21 * 0,5} = \frac{21,5}{10,5} = 2,05 \text{ mm}^{-1} \quad (3)$$

$$\frac{1}{r_{np}} = \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} = \frac{1}{21} - \frac{1}{82,4} = \frac{82,4 - 21}{21 * 84} = \frac{61,4}{1730} = 0,035 \text{ mm}^{-1} \quad (4)$$

Контактните напрежения σ_{H1} на вътрешното зъбно колело с ролката се определят от:

$$\sigma_{H1} = 0,418 \sqrt{2,05} \sqrt{q E_{np}} = 0,5981 \sqrt{q E_{np}} \quad (5)$$

Контактните напрежения σ_{H2} на ролката с външната гривна се определят от:

$$\sigma_{H2} = 0,418 \sqrt{0,035} \sqrt{q E_{np}} = 0,00052 \sqrt{q E_{np}} \quad (6)$$

При еднакви материали за вътрешното колело, ролката и външната гривна $\sqrt{q E_{np}}$ е с еднаква стойност и в двете уравнения (5) и (6). Ако се раздели $\sigma_{H1} / \sigma_{H2}$ се получава:

$$K = \sigma_{H1} / \sigma_{H2} = 1152,19 \quad (7)$$

4. Изводи

От уравнение (7) се вижда, че контактните напрежения на ролката с външната гривна са ~1000 (хиляда) пъти по-малки отколкото контактните напрежения на вътрешното зъбно колело с ролката.

ЛИТЕРАТУРА

1. K. L. Johnson, Contact mechanics. Cambridge University Press, 6. Nachdruck der 1. Auflage, 2001.

Technical University of Sofia,
branch Plovdiv
Faculty of Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering and
Technologies
25 "Tsanko Dyustabanov"
Plovdiv
4000
Bulgaria

Nikola Vladimirov Nachev
Engineer, Doctoral student
e-mail: eng.nachev@gmail.com



СТУДЕНТСКИТЕ СТАЖОВЕ И ПРАКТИЧЕСКОТО ОБУЧЕНИЕ НА СТУДЕНТИТЕ

ХРИСТИНА ДАЙЛЯНОВА, ИВАНКА ДЕКОВА

Резюме: *Анализират се мненията на 50 студента и техните ментори за опыта им от стажантската програма на МОН. Търсят се предимства и възможни недостатъци при пребиваването на студентите в реална бизнес среда. Разглежда се също и степента на постигане на поставените цели за придобиване на практически опит и усъвършенстване на практическите умения на студентите в съответствие с пазара на труда.*

Ключови думи: *обучение, практическо обучение, практическите умения, реална бизнес среда.*

INTERNSHIPS AND PRACTICAL TRAINING OF STUDENTS

HRISTINA DAYLYANOVA, IVANKA DEKOVA

Abstract: *The opinions of 50 students and their mentors about their experience with the internship program of the Ministry of Education have been analyzed. Advantages and possible drawbacks of placing students in a real business environment have been sought for. The achievement of the goals for acquiring practical experience and mastering the students' practical skills in accordance with the labor market has also been considered.*

Key words: *training, practical training, practical skills, real business environment.*

1. Въведение

Последните 20 години непрекъснато се дискутира темата за изоставане на образованието от нуждите на бизнеса и проблемите в това отношение.[1] В същото време традициите и изискванията към практическото обучение на студентите все по-трудно се спазват дори и във висшите учебни заведения, където то е задължително. Опит за преодоляване на това изоставане е програмата за студентските и ученически стажове на МОН. Какви ще са изводите и резултатите след приключването на програмата, очакваме всички с голям интерес. Настоящата статия е скромнен опит за обобщение на мненията на 50 студенти от специалностите „Индустириален

мениджмънт”, „Индустириално инженерство” и „Полиграфия” от ТУ-София, Филиал Пловдив и техните ментори, за периода от стартирането на програмата до 31 май 2014 година.

2. Изложение

Българската образователна система премина през различни опити да осигури подготовка на завършващите средно и висше образование за успешна професионална реализация. Въпреки това, последните години все по-често срещаме публикации за разминаването между очакванията на бизнеса и това, което показват дипломираните специалисти.[2] Според проучване на Българската търговско-промишлена палата, едва

8% от мениджърите и собствениците на фирмите, членуващи в нея са доволни във висока степен от университетското образование на младите си служители. В преобладаващата част от компаниите (77%) са на мнение, че знанията, придобивани в български университети не са достатъчни за трудовата реализация. [3] Пак според същото изследване, 80% от предприемачите виждат най-големи пропуските именно в професионалните умения. Интересно е, че повече от половината – 56% посочват и липса на предприемаческо мислене. Прави впечатление, че няма работодател, който да е заявил, че ще са му необходими ниско квалифицирани работници в следващите 5-10 години. Най-търсени ще бъдат специалистите с техническо образование, следвани от завършилите икономически профил. Препоръките на работодателите към образованието, отправени в анкетата са за повече практическа насоченост на обучението и за реална връзка между потребностите на бизнеса и приема в университетите по специалности.

Изводите от ежегодната анкета сред германските инвеститори в Централна, Източна и Югоизточна Европа потвърждават тази тенденция.[4] Наред с други фактори, които поставят страната ни на последните места в региона по политическа, социална и правна сигурност, лошата оценка, която германските инвеститори дават на българското професионално и академично образование поставят България на последно и съответно на предпоследно място в региона. На категоричното последно място - по показателя „наличие на специализирана работна ръка”. Томаш Индра, изпълнителен директор на Witte България (германски производител на авточасти, инвестиращ в България) оценява недобре образователната ни система с думите че „много от завършилите нямат необходимите умения и само малка част си струва да бъдат взети на работа”. [5] Според някои други автори [6], огромният разрыв между търсенето и предлагането на работа е проблем не само за България, но и за целия Европейския съюз. Според него това е знак, че вътрешният пазар на труда в общността не функционира правилно. Налице са два модела за преодоляване на възникналата пропаст, а именно – по-голяма инициатива на правителството (Сингапур) или по-голяма инициатива на частния сектор (Индия).

Какво се прави в България за решаване на този сериозен за образованието и бизнеса проблем?

През 2013 година стартира проект на МОН „Студентски практики” (има и такъв „Ученически практики”), финансиран от Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”, съфинансирана от Европейския социален фонд.[7] Целите, които си поставя програмата са насочени към „подобряване на качеството на образованието, чрез предоставяне на възможности за придобиване на практически опит и усъвършенстване на практическите умения на студентите...в съответствие с потребностите на пазара на труда; улесняване на прехода от образователните институции към работното място и повишаване на успешната реализация на младите хора на трудовия пазар; подпомагане и насърчаване изграждането на стабилни партньорства между образователните институции и бизнеса; увеличаване на стимулите на студентите за участие в допълнително практическо обучение в реална работна среда; стимулиране нарастването на броя на студентите, които си намират работа непосредствено след дипломирането; осигуряване на предпоставки за осъвременяване както на учебните планове като цяло, така и на преподаваните дисциплини, курсове и теми според нуждите на пазара на труда; подпомагане създаването на устойчиви механизми и възможности на работодателите за подбор на студенти, доказали умения в реална работна среда, и за непосредственото им включване на пазара на труда”.

В задължителните анкети, които са условие за успешното приключване на практиката, студентите и менторите оценяват резултатите по различни критерии, групирани в следните области от тяхното трудово представяне: изпълнение и резултат; планиране на задачите, управление на времето и дисциплина; умения за работа в екип; професионални знания; мотивация; ментор и създадени условия за практикуване.

Като цяло, както самооценките на студентите, така и оценките на техните ментори са предимно в положителната част от скалата за отговори. Всичките 50 студенти отговарят с „категорично да” (80%) и „по-скоро да” (20%) на въпроса дали са постигнати очаквани резултати по време на практиката. Оценките на менторите са в малка степен по-умерени, но също така положителни (72% - категорично да и 28% - по-скоро да).

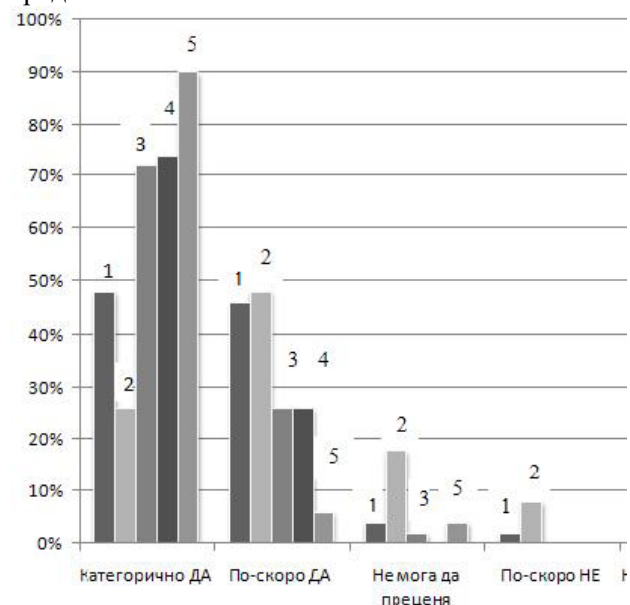
Като цел на програмата е очакването студентите да усвоят нови практически знания, умения и да развият качества, необходими за бъдещата им реализация в реална работна среда. Доколко е постигната тази цел? На въпроса дали

са усвоили нови знания и умения и доколко бързо са навлезли в естеството на практиката, разминаването между оценките на студентите и менторите е почти незначителна. С „категорично да” отговарят 76% от студентите и 74% от менторите, а с „по-скоро да” – съответно 22% от студентите и 28% от менторите. Само един студент се колебае и посочва отговор „не мога да преценя”. Дори и да има значителна доза субективизъм при тези оценки, все пак може да се счита, че ефектът от пребиваването в реална работна среда е важен и полезен за практикантите. Надграждането над теоретичните знания, придобити във висшето училище е вярната посока за преодоляване на посоченото по-горе разминаване между очакваното от бизнеса и това, което им се предлага от висшето образование.

За съответствието между във висшето училище и изискванията на реалната работна среда може да се съди по отговорите на няколко въпроса. Преобладава мнението, че придобитите знания по специалността помагат при изпълнение на възложените задачи по време на практическото обучение в реална работна среда (48% - „категорично да” и 46% - „по-скоро да”). Двама от студентите се затрудняват да дадат точна преценка, а един отговаря отрицателно („по-скоро не”). По-малко са тези, които преценяват, че знанията от висшето училище по специалността са им били достатъчни за провеждане на практиката в реална работна среда (26% - „категорично да”; 48% - „по-скоро да”). Увеличава се относителният дял на тези, които се затрудняват да дадат точна преценка (18%), както и на тези, които смятат, че придобитите знания не са достатъчни („по-скоро не” – 8%). За разлика от студентите, менторите смятат, че добрата теоретична подготовка и знанията по специалността са помогнали за изпълнение на възложените задачи (липсват оценки в отрицателната част от скалата). Само 2% от тях оценяват като недостатъчни за провеждане на практиката придобитите знания от ВУЗ по специалността. И това се отнася предимно за студенти от първи или втори курс на следването, където в съответствие с учебните планове преобладават общообразователните учебни дисциплини. Всеки студент има право на стаж по този проект два пъти за срока на обучението си: веднъж в бакалавърската си програма и веднъж в магистърската. Няма регламент, който да изисква това да става след завършена втора година от следването например. Но според менторите, студентите от по-горните курсове

имат по-добра подготовка и имат по-добро практическо представяне.

Както се вижда и от фигура №1, единодушно положителни са оценките за придобитите нови практически знания и умения, свързани с обучението на практикантите по техните университетски специалности и качествата и уменията, необходими за реализацията в конкретната реална работна среда.

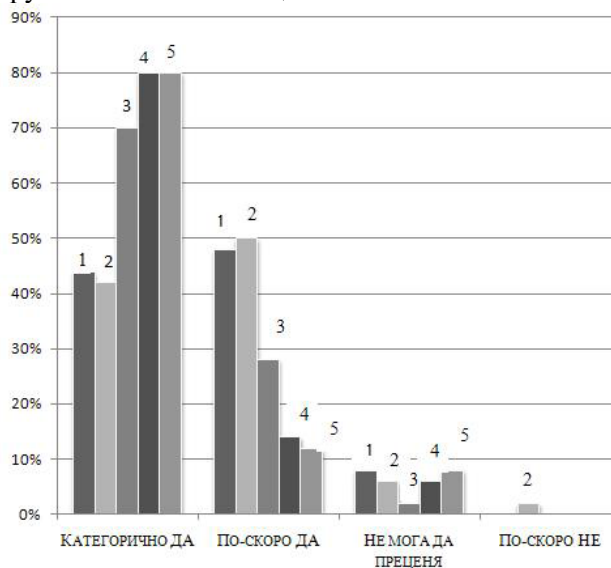


Фиг. 1. Професионални знания – оценка.

1. Придобитите знания по специалността помогнаха да изпълнявам възложените задачи по време на практическото обучение в реална работна среда
2. Знанията, които придобивам във висшето училище по специалността, са достатъчни за провеждане на практика в реална работна среда
3. По време на практиката придобих нови практически знания и умения, свързани с обучението ми по специалността
4. По време на практиката придобих и развих качества и умения, необходими за реализацията ми в конкретна реална работна среда
5. Стремя се към усвояване на нови знания и умения

Подготовката на студентите е едната страна в този процес. Другата страна са обучаващите организации. В анкетата се дава оценка и на това, доколко те са подхождали отговорно и професионално към участието си в програмата за студентските стажове. Трудно е да се прецени обективността и реалистичността на студентите по този показател. Но на въпросите дали менторът е проявял внимание и е създал възможност за придобиване на разнообразни професионални умения и дали е давал ясни инструкции за работа и е

осъществявал контрол, всички без изключение отговарят положително: „категорично да” – 90% и съответно 94% и „по-скоро да” – 10% и съответно 6%. За менторите и създадените условия за практикуване няма отрицателни оценки. Един студент отговаря с „не мога да преценя” на въпроси за това доколко менторът е осигурявал обратна връзка по изпълнение на задачите и доколко в обучаващата организация са били създадени условия за провеждането на практиката. Самооценката на менторите по тази група показатели е изцяло положителна.



Фиг. 2. Ментор и създадени условия за практикуване.

1. Практикантът беше подготвен теоретично и придобитите знания по специалността помогнаха за изпълнението на възложените задачи по време на практическото обучение в реалната работна среда

2. Придобитите във висшето училище знания, са достатъчни за провеждане на практика в реална работна среда

3. По време на практиката практикантът придоби нови практически знания и умения, свързани с обучението му по специалността

4. По време на практиката практикантът придоби и разви качества и умения, необходими за реализацията му в конкретна реална работна среда

5. Практикантът се стремеше се към усвояване на нови знания и умения

Много важни са поставените в проекта цели за увеличаване на стимулите на студентите за участие в допълнително практическо обучение и създаване на механизми на подбор и непосредствено включване в пазара на труда. Резултатите от обобщената оценка за участие в

практическото обучение са обнадеждаващи като начало. Едва 6% от студентите не биха искали да продължат да работят в организацията работодател. На 14% от тях е предложена такава възможност, а на 4% е предложено и допълнително заплащане по време на практиката. Самите ментори пък отговарят, че ако зависеше от тях, биха предложили работа на практикантите си след завършване на тяхното образование (94%).

Друг стимул е заплащането, което студентите получават след приключването на стажа. Повечето смятат, че размерът на стипендията е съобразен с продължителността (240 часа) и вида на практическото обучение (70%), но останалите 30% намират, че стипендията трябва да бъде по-голяма. Подобно е мнението и на наставниците („достатъчно” – 80%; „стипендията трябва да е по-голяма” – 20%).

Когато се дискутира времетраенето на практиката, преобладаващата част от менторите (82%) намират, че предвидените за това часове в проекта са напълно достатъчни. Но една не малка част от студентите (26%) смятат, че би било добре, ако часовете са повече.

Все пак като цяло заявената удовлетвореност на студентите от участието в студентските практики е 100% и те биха препоръчали на свои познати и състуденти такова участие. Независимо от това един студент все пак изказва критично мнение, че практиката не е отговорила на очакванията му. Аналогични са отговорите на менторите: всички биха предложили на свои познати да участват като ментори или като студенти при възможност в проекта. Все пак един от менторите заявява, че участието му като ментор не е отговорило на предварителните му очаквания.

За да се обсъжда доколко и как е възможно постигането на целите на проекта, свързани с изграждането на партньорство между образованието и бизнеса, включително и осъвременяването на учебните планове, смятаме, че е възможно след анализ на оценките и анкетите, които попълват академичните наставници при приключване на практическото обучение. Опитът на единия от авторите на статията като академичен наставник на посочените 50 студента е недостатъчен за обобщение. Въпреки това може да се изкаже мнение, че при наличие на повече часове за тази дейност, ще е възможно да се посещават всички организации и да се обсъждат заедно с менторите и представителите на обучителните организации възможностите за осъвременяване на учебните планова в зависимост от актуалните

потребности на бизнеса. В проекта е предвидено програмата за практическо обучение на студента да бъде подготвяна и/или съгласувана от наставника, съвместно с ментора или представител на обучаващата организация. Това е задължително условие, за да стартира всяка една студентска практика Съобразено с изискването практическото обучение да е различно от предвидената по учебен план за съответната специалност и образователно-квалификационна степен практика. Да надгражда, а не да дублира обучението във висшето училище. Но осъвременяване на учебните планове може да бъде само пожелателно като дейност или резултат и то само като следствие от изградено партньорство между образователната и обучителната организации. Началото на такова партньорство вече е поставено между катедра „Индустиален мениджмънт” и обучаващите организации: „Би Кей Комерс Пловдив” ООД, чийто предмет на дейност е консултиране и подпомагане на работодателите при изпълнение на задълженията им по осигуряване на безопасни и здравословни условия на труд; „Информационно обслужване” АД клон Пловдив и МБАЛ „ТРИМОНЦИУМ” ООД.

Едно от малкото конкретни предложения, формулирано от представител на обучаващата организация „Зетсофтком” ЕООД касае именно учебните планове: „Да се даде приоритет на обучението по безопасност и здраве при работа за конкретната специалност в университета”.

3. Заключение

Проектът „Студентски практики” на МОН е добро начало за преодоляване на тази част от проблемите във висшето образование, отнасящи се до практическата подготовка на студентите и възможностите им за реализация в реална работна среда след завършване на висшето училище. Доколко ще бъдат постигнати целите на проекта, очакваме да прочетем в анализите след неговото приключване. Това, което зависи от висшите учебни заведения е осигуряване на качествена учебна подготовка на студентите; изграждане на партньорство с бизнеса; завишаване на контрола върху провеждане на практиките; отговорност при осъществяване на поетите ангажименти от страна на академичните наставници. Основно задължение на висшите училища за практическото обучение на студентите все пак са учебните, учебно-производствените и специализиращите практики, които са част от учебните планове на различните специалности.

Поради различни причини тяхното пълноценно провеждане понякога е под въпрос. За съжаление университетите не разполагат с ресурсите за създаване на материална заинтересованост у бизнес организациите да подпомогнат или да участват в практическото обучение на студентите отговорно и като равноправни партньори. Докато бизнесът не стане партньор на висшето училище, недоволството от практическите умения на младите хора с дипломи за висше образование ще продължава.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.trud.bg/Article.asp?ArticleId=236571>
2. http://frognews.bg/news_58384/
3. <http://enterprise.bg/-онлайн>
4. <http://www.pariteni.bg/index.phtml?tid=40&oid=111121>
5. <http://www.vesti.bg/pari/biznes/rojters-za-proizvodstvoto-na-avtochasti-v-bylgariia-6011453>
6. <http://smartmoney.bg/kak-da-se-preodolee-propastta-mejdu-obrazovatelната-sistema-i-nujdite-na-biznesa/>
7. <http://praktiki.mon.bg/sp/>

Department of Electrical Engineering
Technical University–Sofia, Branch Plovdiv
25 Tsanko Dystabanov St.
4000 Plovdiv
BULGARIA
E-mail: dailianova@abv.bg
E-mail: dekova_58@abv.bg



ПУБЛИЧНО-ЧАСТНО ПАРТНЬОРСТВО В БЪЛГАРИЯ

ТОНИ МИХОВА

Резюме: В статията авторът е посочил различни разбирания относно значението на термина публично-частно партньорство. Акцентът в статията са трудностите по пътя към осъществяване на успешно публично-частно партньорство. За целта е направено изследване с представители на частния бизнес и публичната власт и са представени резултатите от него.

Ключови думи: *законова рамка, инвестиционен инструмент, инфраструктурен проект*

PUBLIC-PRIVATE PARTNERSHIPS IN BULGARIA

TONI MIHOVA

Abstract: *The author presents in this paper different existing views regarding the meaning of the term public-private partnership. The paper is focused on the difficulties that are encountered on the way to carrying a successful public-private partnership. To this end, a survey with representatives of the private business and of public authorities has been carried and its results are presented.*

Keywords: *legal framework, investment instrument, infrastructure project*

1. Въведение

Публично-частното партньорство (ПЧП) е водещ инструмент за реализацията на инфраструктурни проекти в цял свят. Необходимостта от развита публична инфраструктура, като двигател на икономическото развитие на страната, и ограничените бюджетни средства за нейното изграждане и поддържане, са основните предпоставки за възникването и разпространението на тази форма на сътрудничество между публичните органи и частния сектор.

Целта на статията е да посочи трудностите по пътя на реализиране на успешно публично-частно партньорство. За реализирането ѝ, авторът използва резултатите от собствено изследване с участници в

създаването на ПЧП – представители на частния бизнес и публичната власт.

2. Същност на публично-частното партньорство

В България има редица изследвания и публикации, посветени на темата за публично-частното партньорство. Сериозен принос има Евгений Кънев с книгата „Публично-частно партньорство: принципи, модели и политики за частно предлагане на публични услуги” [1].

Съществуват различни разбирания относно значението на термина публично-частно партньорство. Ще посочим някои от тях [2].

- форми на сътрудничество между публичните власти (public authorities) и частния партньор (the world of business), които имат за цел

осигуряване на капитала/финансирането, строителството, ремонта (renovation), управлението и поддръжката на инфраструктурата или доставянето на услуги.

- партньорство между публичния и частния сектор за целите на предоставяне на продукт или услуга, които традиционно са били предоставяни от публичния сектор. ПЧП се реализира под различна форма, но в сърцевината на всеки успешен проект лежи концепцията, че по-добрата стойност срещу пари може да се постигне чрез експлоатиране на компетентността на частния сектор и насочването на риска към страната, която най-добре може да го управлява – дефиниция на Министерство на околната среда и местното управление, Ирландия;

- договорно споразумение между публична агенция (щатска, местна, федерална) и фирма от частния сектор. Чрез това споразумение се извършва поделяне на уменията и активите на всеки сектор (публичен, частен) при предоставянето на услуга или съоръжение за използването им от обществото. Освен поделянето на ресурси, всяка страна поделя потенциалните рискове и възнаграждения при предоставяне на услугата и/или съоръжението – дефиниция на Национален съвет за публични-частни партньорства на САЩ.

- форма на сътрудничество между публичната власт и светът на бизнеса, чиято цел е да осигури финансиране, построяване, възстановяване, управление или поддръжка на инфраструктура или предоставяни услуги – дефиниция от Зеления документ на ЕС

- дългосрочно договорно отношение между лица от частния и публичния сектор за финансиране, построяване, реконструкция, управление или поддръжка на инфраструктура с оглед постигане на по-добро ниво на услугите, където частният партньор поема строителния риск, и поне един от двата риска – за наличност на предоставяната услуга или за нейното търсене - дефиниция на Министерството на финансите на Р.България

- дългосрочно договорно отношение между лица от частния и публичния сектор за осъществяването на проект или предоставяне на услуга от публичния сектор и / или от публичен интерес, като си поделят разходите, печалбата и риска – дефиниция на Министерството на икономиката и енергетиката на Р. България.

На сайта на Министерството на финансите са систематизирани основните характеристики и предимства на публично-частното партньорство по следния начин:

- дългосрочен договор между публичен и частен партньор за предоставяне на услуги от

обществен интерес, базиран на нови или подобрени активи;

- частният партньор участва във всички етапи на реализацията на проекта - проектиране, строителство, финансиране, поддръжане и/или експлоатацията на обекта;

- публичният орган дефинира целите, определя изискванията за качество и количество и контролира изпълнението;

- частният партньор финансира изцяло и по-голяма част от реализацията на проекта;

- справедливо разпределение на рисковете между партньорите на база на това кой може по-добре да се справи с тях;

- механизмът на плащане от публичния сектор се обвързва с изпълнението;

- подобряване на управлението на обекта и повишаване качеството на услугите;

- по-добра стойност на вложените средства [3].

Анализът на същността на тези дефиниции ни дава възможност да формулираме следните изводи за тълкуванията на ПЧП:

1. В по-широк смисъл, ПЧП често се тълкува като покриване на цялата гама на сътрудничество между публичния сектор и частните партньори, което в много случаи води до създаване на смесени предприятия.

2. В един по-тесен смисъл ПЧП следва да се разглежда като публично-частно сътрудничество, целящо съвместно разработване и изпълнение на специфични проекти. Това проектно-ориентирано сътрудничество може, но не е задължително, да води до създаване на смесени публично-частни предприятия.

Разглеждайки изследваната проблематика, следва да посочим също принципите и задълженията на публичния партньор, които са прокламирани в Зелената книга за ПЧП и общностното право за договорите за обществени поръчки и концесии [4]:

1. Прозрачност
2. Публичност
3. Липса на дискриминация
4. Широка конкуренция
5. Безпристрастност на тръжната процедура

Задълженията на публичния партньор са:

1. Фиксиране на приложими правила за избор на частен партньор;
2. Даване на адекватно обявление за намерението за тръжна процедура и правилата за избор;
3. Мониторинг за безпристрастност по време на цялата процедура;
4. Формиране на реална конкуренция между операторите, които имат интерес и могат да гарантират справяне с поставените задачи;

5. Спазване на принципа за равнопоставеност на всички участници през цялата процедура;

6. Избор на база на обективни и недискриминационни критерии.

След принципите, отговорностите и характеристиките на ПЧП ще маркираме и развитието на нормативната база на ПЧП.

През м.юни 2012 г. Народното събрание на Република България приема Закон за публично-частното партньорство (обн., дв, бр.45 от 2012 г., в сила от 01.01.2013 г.). Основните цели на закона са:

- да се осигури развитие на висококачествени и достъпни услуги от обществен интерес чрез постигане на по-добра стойност на вложените публични средства;

- да се даде възможност за насърчаване на частните инвестиции в строителството, поддържането и управлението на обекти на техническата и социалната инфраструктура и в извършването на дейности от обществен интерес;

- да създаде гаранции за защита на публичните активи и за ефективното управление на публичните средства при осъществяването на ПЧП.

Разработена и приета е и подзаконовата нормативна уредба към закона за публично-частното партньорство [3].

През май 2014 г. започва обсъждане в Народното събрание на предложението на Министерския съвет за отмяна на Закона за публично-частно партньорство. В мотивите на вносителите е записано, че е необходимо законът да се отмени, защото „има проблемни моменти в практическото прилагане на публично-частното партньорство и заради необходимостта от оптимизиране на националния режим" [5].

3. Резултати от изследването

В статията нямаме за цел да анализираме практиката в България по отношение на ПЧП, тъй като това е правено многократно, без особено голяма полза, тъй като всеки път изводите са противоречиви, отразяващи различни интереси, но не и тези на обществото. Освен това, ПЧП се превърна в една от най-дискутираните теми по семинари и конференции, появиха се множество „консултанти” и са реализирани голям брой сделки за хотелски комплекси, СПА центрове, голф игрища, бизнес сгради и др., окачествени като „ПЧП”. Подобен род партньорство би могло да се нарече съвместна инвестиция, инвестиционна възможност, инвестиционно намерение, но не и ПЧП [6]. Изразяваме пълно

съгласие с мнението на горесцитираният Любомир Филипов в „Криворазбраното ПЧП”, че ПЧП не трябва да се класифицира, каквото и да е бизнес отношение между държавата и частния сектор, а само това, което засяга обществото като цяло.

В тази връзка е и проведеното изследване със 100 представители на частния бизнес и 100 – на публичната власт, участвали в създаване на публично-частно партньорство. В проведените интервюта, те посочват, кое точно им е създавало трудности по сложния път на установяване на партньорството.

Почти всички участници – 95% от участниците в интервюта изразяват мнение, че един от основните проблеми е нестабилната законова уредба на публично-частното партньорство. Като аргументи в подкрепа на това твърдение, те посочват, че години наред те са работили за създаване на партньорски отношения, очаквайки приемането на Закона за ПЧП, който влиза в сила от 01.01.2013 г. Година по-късно има предложение за неговата отмяна. Липсата на ясни правила и адекватно законодателство се отразяват изключително негативно върху реализацията на публично-частното партньорство.

Следващата значима трудност по пътя на реализация на ПЧП е посочена от 90% от представителите на частния бизнес и само от 10% от тези на публичната власт. Тя произтича от слабия административен капацитет и липсата на зрялост в управлението на публичния сектор. Интервюираните посочват следните аргументи за тази теза: изключително слаба подготовка на публичната администрация и липса на визия в управлението на дългосрочни обществени процеси. Като резултат, имаме недобре функционираща система на обществените поръчки, чрез която се реализира и избора на частния партньор в ПЧП.

На трето място, 85% от участниците посочват като съществен проблем недостатъчно коректното отношение на двете страни, породено според тях от различните интереси. Коментарите по отношение на тази трудност са свързани с липсата на организационна култура, обучение, нагласи за реализация на успешно ПЧП. Интересът би трябвало да бъде само един – този на обществото като цяло.

Накратко, това са основните трудности, посочени от голямата част участници в изследването, които систематизирано, изглеждат по този начин:

1. Липса на адекватно законодателство и ясни правила за привличане на инвеститори.
2. Слаб административен капацитет.

3. Недостатъчно добри организационна култура, обучение и нагласи за реализация на ефективно ПЧП.

Това са резултатите от проведеното изследване. Ще ви запознаем и с констатации по темата на представители на публичната власт и частния бизнес, пряко участвали в проекти по публично-частното партньорство и познаващи редица добри практики [7]. В синтезиран вид те са:

1. Частният капитал идва там, където има строг регламент – Евгений Кънев, управляващ съдружник на инвестиционно-финансова консултантска компания;

2. Ключовият критерий за решение за прилагане на ПЧП следва да бъде ценовата ефективност – инж. Иван Бойков, изпълнителен директор на Камарата на строителите в България;

3. Успешното публично-частно партньорство зависи от коректността на двете страни и от взаимната полза – Димитър Николов, кмет на Бургас.

В голяма степен резултатите от изследването се припокриват с мненията, изразени в рубриката „Те говорят“, публикувани в списание „Икономика“. Същественият извод е, че в България има добра практика по създаване на публично-частно партньорство, но все още не са създадени адекватните условия за неговата реализация. Ето защо, според нас беше важно да посочим трудностите и проблемите по сложния път на публично-частното партньорство.

4. Заключение

В статията разгледахме основните пречки, които трябва да се преодолеят, за да можем да използваме необятните възможности на ПЧП, доказани от добрата практика във Великобритания, Ирландия, Германия, Испания, Полша и редица други страни.

Публично-частното партньорство може да се използва във всяка обществена сфера, където има нужда от по-добра инфраструктура, по-добър мениджмънт, по-добро качество на публичната услуга или има недостиг от финансиране [1]. Безспорно, то е модерна форма, която съчетава ресурсите и компетентността на частния сектор с нуждите на обществото. Интерес от него имат всички страни, участващи в процеса на реализацията му – държавата, общините, частните партньори и гражданите или обществото като цяло.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кънев, Е., Публично-частно партньорство: принципи, модели и политики за частно предлагане на публични услуги”, „Изток-Запад“, София, 2011

2. Комисия на европейските общности, Публично-частното партньорство – въпроси и отговори, Брюксел, 2008

3. Министерство на финансите, Публично-частно партньорство, <http://www.minfin.bg/>

4. Комисия на европейските общности, ЗЕЛЕНА КНИГА за публично - частните партньорства и правото на Общността за договорите за обществени поръчки и концесиите, Брюксел, 2004

5. Депутатите обсъждат отмяна на Закона за ПЧП, <http://www.cross.bg/>

6. Любомир Филипов, Криворазбраното публично-частно партньорство, <http://www.partnerships.bg/>

7. Сбогом на публично-частното партньорство. списание Икономика, бр.36, април 2014

Department of Industrial Management
Technical University–Sofia, Branch Plovdiv
25 Tsanko Dystabanov St.
4000 Plovdiv
BULGARIA
E-mail: mihova@tu-plovdiv.bg