



3

2011

VIZNOSTEHNİČKI

NAUČNI ČASOPIS MINISTARSTVA ODBRANE REPUBLIKE SRBIJE

glasnik



ISSN 0042-8469
COBISS.SR-ID 4423938

VOJNOTEHNIČKI
glasnik
NAUČNI ČASOPIS
MINISTARSTVA ODBRANE
REPUBLIKE SRBIJE

www.vtg.mod.gov.rs

3

UDC 623 + 355/359

GODINA LIX JUL-SEPTEMBAR 2011.

ISSN 0042-8469
COBISS.SR-ID 4423938

MILITARY TECHNICAL

Courier

SCIENTIFIC PERIODICAL
OF THE MINISTRY OF DEFENCE
OF THE REPUBLIC OF SERBIA

www.vtg.mod.gov.rs

3

UDC 623 + 355/359

VOLUME LIX JULY-SEPTEMBER 2011.

MINISTARSTVO ODBRANE REPUBLIKE SRBIJE

MEDIJA CENTAR „ODBRANA“

DIREKTOR

Slavoljub M. Marković, potpukovnik

ODSEK ZA IZDAVAČKU DELATNOST

GLAVNI UREDNIK

Dragana Marković

ODGOVORNI UREDNIK

mr *Nebojša Gaćeša*, potpukovnik

e-mail: nebojsa.gacesa@mod.gov.rs, tel.: 011/3349-497, 064/80-80-118

UREĐIVAČKI ODBOR

- brigadni general prof. dr Bojan Zmić, načelnik Uprave za odbrambene tehnologije Sektora za materijalne resurse Ministarstva odbrane Republike Srbije, predsednik Uređivačkog odbora,
- brigadni general doc. dr Danko Jovanović, načelnik Uprave za logistiku (J-4) Generalštaba Vojske Srbije, zamenik predsednika uređivačkog odbora,
- dr Stevan M. Berber, The University of Auckland, Department of Electrical and Computer Engineering, Auckland, New Zealand,
- pukovnik doc. dr Mirko Borisov, načelnik Vojnogeografskog instituta, Beograd,
- prof. dr Dragoljub Vujić, Vojnotehnički institut, Beograd,
- brigadni general prof. dr Mladen Vuruna, načelnik Vojne akademije, Beograd,
- pukovnik doc. dr Goran Dikić, prorektor Univerziteta odbrane, Beograd,
- prof. dr Željko Đurović, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu,
- prof. dr Željko Žilić, McGill University, Department of Electrical and Computer Engineering, Montreal, Canada,
- prof. dr Aleksa Zejak, Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu,
- prof. dr Slobodan Jaramaz, šef Katedre za vojno mašinstvo Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu,
- general-major prof. dr Miodrag Jevtić, rektor Univerziteta odbrane, Beograd,
- doc. dr Vukica M. Jovanović, Trine University, Allen School of Engineering and Technology, Department of Engineering Technology, Angola, Indiana, USA,
- prof. dr Branko Kovačević, rektor Univerziteta u Beogradu,
- prof. dr Mirko Komatina, šef Katedre za termomehaniku Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu,
- naučni savetnik dr Ana Kostov, Institut za rudarstvo i metalurgiju, Bor,
- dr Vasilije M. Manović, CanmetENERGY, Natural Resources Canada, Ottawa, Canada,
- prof. dr Gradimir V. Milovanović, dopisni član Srpske akademije nauka i umetnosti, Megatrend univerzitet, Beograd,
- naučni savetnik dr Predrag Petrović, Izvršni direktor za naučno-istraživački rad i radiokomunikacije Instituta za telekomunikacije i elektroniku IRITEL AD, Beograd,
- pukovnik doc. dr Zoran Rajić, direktor Vojnotehničkog instituta, Beograd,
- naučni savetnik dr Aleksandar Rodić, rukovodilac Centra za robotiku Instituta „Mihajlo Pupin“, Beograd,
- naučni savetnik dr Srećko S. Stopić, RWTH Aachen University, Faculty for Georesourcen and Materials Engineering, IME Process Metallurgy and Metal Recycling, Aachen, Deutschland,
- prof. dr Miroslav Trajanović, šef Katedre za proizvodno-informacione tehnologije i menadžment Mašinskog fakulteta Univerziteta u Nišu,
- pukovnik naučni saradnik dr Obrad Čabarkapa, načelnik odeljenja za naučnu i inventivnu delatnost, Uprava za strategijsko planiranje Sektora za politiku odbrane Ministarstva odbrane Republike Srbije,
- potpukovnik mr Nebojša Gaćeša, odgovorni urednik Vojnotehničkog glasnika, sekretar Uređivačkog odbora.

Adresa redakcije:

VOJNOTEHNIČKI GLASNIK,

Braće Jugovića 19, Beograd

<http://www.vtg.mod.gov.rs>

<http://scindeks.nb.rs/journaldetails.aspx?issn=0042-8469>

e-mail: vojnotehnicki.glasnik@mod.gov.rs

Pretplata: e-mail: pretplata@odbrana.mod.gov.rs; tel.-fax: 011/3241-009; tekući račun: 840-312849-56

Rukopisi se ne vraćaju

Časopis izlazi tromesečno

Prvi štampani broj Vojnotehničkog glasnika objavljen je 1. 1. 1953. godine

Prvo elektronsko izdanje Vojnotehničkog glasnika na internetu objavljeno je 1. 1. 2011. godine

Štampa: Vojna štamparija – Beograd, Resavska 40b, e-mail: vojsta@sezampro.rs

MINISTRY OF DEFENCE OF THE REPUBLIC OF SERBIA

ODBRANA MEDIA CENTRE

DIRECTOR

Lt Col *Slavoljub* M. Marković

PUBLISHING DEPARTMENT

EDITOR-IN-CHIEF

Dragana Marković

MANAGING EDITOR

Lt Col *Nebojša* Gaćeša MSc

e-mail: nebojsa.gacesa@mod.gov.rs, tel: +381 11 33 49 497, +381 64 80 80 118

EDITORIAL BOARD

- Brigadier General Bojan Zrnić, PhD, Professor, Head of the Department for Defence Technologies, Material Resources Sector, Ministry of Defence, (Head of the Editorial Board)
- Brigadier General Danko Jovanović, PhD, Assistant Professor, Director of Logistics Directorate (J-4) at the General Staff of the Armed Forces of Serbia (Deputy Head of the Editorial Board)
- Stevan M. Berber, PhD, The University of Auckland, Department of Electrical and Computer Engineering, Auckland, New Zealand
- Colonel Mirko Borisov, PhD, Assistant Professor, Head of the Military Geographical Institute, Belgrade
- Professor Dragoljub Vujić, PhD, Military Technical Institute, Belgrade
- Brigadier General Mladen Vuruna, PhD, Professor, Head of the Military Academy, Belgrade
- Colonel Goran Dikić, PhD, Assistant Professor, Prorector of the University of Defence, Belgrade
- Professor Željko Đurović, PhD, Faculty of Electrical Engineering, Belgrade
- Professor Željko Žilić, PhD, McGill University, Department of Electrical and Computer Engineering, Montreal, Canada
- Professor Aleksa Zejak, PhD, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad
- Professor Slobodan Jaramaz, PhD, Head of the Department of Military Mechanical Engineering at the Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade
- Major General Miodrag Jevtić, PhD, Professor, Rector of the University of Defence, Belgrade
- Vukica M. Jovanović, PhD, Trine University, Allen School of Engineering and Technology, Department of Engineering Technology, Angola, Indiana, USA
- Professor Branko Kovačević, PhD, Rector of the University of Belgrade
- Professor Mirko Komatina, PhD, Head of the Department for Thermomechanics at the Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade
- Scientific Advisor Ana Kostov, PhD, Institute of Mining and Metallurgy, Bor, Serbia
- Vasilije M. Manović, PhD, CanmetENERGY, Natural Resources Canada, Ottawa, Canada
- Professor Gradimir V. Milovanović, PhD, Corresponding member of the Serbian Academy of Sciences and Arts, Megatrend University, Belgrade
- Scientific Advisor Predrag Petrović, PhD, Executive Director for R&D and Radio Communications, Institute of telecommunications and electronics IRITEL AD, Belgrade
- Colonel Zoran Rajić, PhD, Assistant Professor, Director of the Military Technical Institute, Belgrade
- Scientific Advisor Aleksandar Rodić, PhD, Head of the Robotics Laboratory at the Mihajlo Pupin Institute, Belgrade
- Scientific Advisor Srećko S. Stopić, PhD, RWTH Aachen University, Faculty for Georesources and Materials Engineering, IME Process Metallurgy and Metal Recycling, Aachen, Germany
- Professor Miroslav Trajanović, PhD, Head of the Department for Production IT and Management at the Faculty of Mechanical Engineering, University of Niš
- Colonel Obrad Čabarkapa, PhD, Scientific Advisor, Head of the Section for Scientific and Inventive Activities, Strategic Planning Department, Defence Policy Sector, Ministry of Defence of the Republic of Serbia
- Lt Colonel Nebojša Gaćeša, MSc, Managing Editor of the Military Courier, (Secretary of the Editorial Board)

Address:

MILITARY TECHNICAL COURIER

Braće Jugovića 19, 11000 Beograd, Serbia

<http://www.vtg.mod.gov.rs>

<http://scindeks.nb.rs/journaldetails.aspx?issn=0042-8469>

e-mail: vojnotehnicki.glasnik@mod.gov.rs

Subscription: e-mail: pretplata@odbrana.mod.gov.rs; Tel.-fax: +381 11 32 41 009; account: 840-312849-56

Manuscripts are not returned

The journal is published quarterly

The first printed issue of the Military Technical Courier appeared on 1st January 1953.

The first electronic edition of the Military Technical Courier on the Internet appeared on 1st January 2011.

Printed by Vojna štamparija – Beograd, Resavska 40b, e-mail: vojsta@sezampro.rs

SADRŽAJ

NAUČNI ČLANCI

Čuk V. <i>Danilo</i> Mandić D. <i>Slobodan</i> Poređenje različitih autopilota za upravljanje normalnim ubrzanjem rakete zemlja-zemlja	7–28
Stopić R. <i>Srećko</i> Friedrich G. <i>Bernd</i> Hidrometalurgija pri visokim pritiscima, nova šansa za procese koji ne zagađuju životnu sredinu	29–44
Hribšek F. <i>Marija</i> Ristić S. <i>Slavica</i> Radojković Ž. <i>Bojana</i> Filipović Lj. <i>Zoran</i> Modelovanje i projektovanje filtera sa površinskim talasima i njihova primena u vojne svrhe	45–70
Kokelj R. <i>Tugomir</i> Milinović P. <i>Momčilo</i> Jeremić M. <i>Olivera</i> Uticaj aerodinamičkih kočnica na rentabilnost gađanja površinskih ciljeva samohodnim višecevnim lanserom raketa	71–90
Tadić M. <i>Marin</i> Čitaković M. <i>Nada</i> Mehanohemijaska sinteza i magnetne osobine nanočestičnog maghemita	91–105
Biočanin LJ. <i>Stojko</i> Pavlović R. <i>Milan</i> Određivanje optimalne periodičnosti preventivnog održavanja motora V46–6	106–130

STRUČNI ČLANCI

Stanković R. <i>Momir</i> Manojlović M. <i>Stojadin</i> Primena akvizicione kartice u identifikaciji pozicionog servosistema	131–145
Samčović B. <i>Andreja</i> Tehnološke karakteristike digitalnog standarda DVB-H za difuzni video-prenos kod prenosivih uređaja	146–160
Devetak M. <i>Saša</i> Terzić R. <i>Miroslav</i> Primena metode analitičkih hijerarhijskih procesa u izboru optimalnog taktičkog radio sistema	161–176
Bakrač T. <i>Saša</i> Korišćenje geotopografskih materijala u zaštiti životne sredine	177–185
SAVREMENO NAORUŽANJE I VOJNA OPREMA	186–193
POZIV I UPUTSTVO AUTORIMA	194–204

CONTENTS

SCIENTIFIC PAPERS

Ćuk V. <i>Danilo</i> Mandić D. <i>Slobodan</i> Comparison of different lateral acceleration autopilots for a surface-to-surface missile	7–28
Stopić R. <i>Srećko</i> Friedrich G. <i>Bernd</i> Pressure hydrometallurgy - a new chance to non-polluting processes	29–44
Hribšek F. <i>Marija</i> Ristić S. <i>Slavica</i> Radojković Ž. <i>Bojana</i> Filipović Lj. <i>Zoran</i> Modeling and design of surface acoustic wave filters and their military applications	45–70
Kokelj R. <i>Tugomir</i> Milinović P. <i>Momčilo</i> Jeremić M. <i>Olivera</i> Cost-effectiveness criterion for optimal firing at surface targets by MLRS unguided rockets with ballistic aerodynamic brakes	71–90
Tadić M. <i>Marin</i> Čitaković M. <i>Nada</i> Mechanochemical synthesis and magnetic properties of maghemite	91–105
Biočanin LJ. <i>Stojko</i> Pavlović R. <i>Milan</i> Determining the optimal periodicity of the V46-6 engine preventive maintenance	106–130

PROFESSIONAL PAPERS

Stanković R. <i>Momir</i> Manojlović M. <i>Stojadin</i> Application of the acquisition card in the identification of position servo systems	131–145
Samčović B. <i>Andreja</i> Technological characteristics of digital video broadcasting – handheld standard DVB-H	146–160
Devetak M. <i>Saša</i> Terzić R. <i>Miroslav</i> Application of the analytic hierarchy process method in the selection of optimal tactical radio communication systems	161–176
Bakrač T. <i>Saša</i> Using geo-topographic materials for environmental protection	177–185
MODERN WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT	186–193
CALL FOR PAPERS AND INSTRUCTIONS FOR AUTHORS	194–204

COMPARISON OF DIFFERENT LATERAL ACCELERATION AUTOPILOTS FOR A SURFACE-TO-SURFACE MISSILE

Ćuk V. *Danilo*, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Department for Weapon Systems, Belgrade,
Mandić D. *Slobodan*, Ministry of Defence of the Republic of Serbia, Military Technical Institute, Division for Rocket Dynamics, Belgrade

UDC: 623.462.2 ; 629.7.051.5

FIELD: Mechanical engineering (Rocket technique)

Summary:

This paper presents a comparison of three lateral acceleration autopilots for a surface-to-surface missile: three-loop conventional acceleration autopilot, and gamma-dot and three-loop acceleration autopilot based upon the inverse-dynamic control. The surface-to-surface missile motion is described by nonlinear differential equations whose parameters change rapidly over a very wide range due to variable velocity and altitude. The requirement for the accurate controlling of the missile in such an environment represents a challenge for the autopilot designer. The brief review of the calculation of the autopilot gains is given using the concept of the "point" stability for the linear time-varying system with "frozen" dynamic coefficients. The method of the inverse-dynamic control is presented in the next section for two types of the autopilots: gamma-dot and acceleration autopilot. Both of them require the design of the estimators for the variables used as inputs to the control law. Finally, six-degree-of-freedom simulation results of the missile response to the demanded command on the typical ballistic trajectory are presented. The comparison of three autopilots considers the steady state errors and the sensitivity of the response to the highly variable environment. It was shown that the inverse-dynamic control can be very effective in the controlling of the surface-to-surface missile.

Key words: *Autopilot, lateral Acceleration Autopilot, Gamma-dot Autopilot, Inverse-Dynamic Control, Guided Surface-to-Surface Missile, "Six-Degree-Of-Freedom" Model.*

Introduction

The aim of this paper is to present the main results of the comparison of different autopilot designs for a surface-to-surface missile (SSM). The free flight rocket designed to achieve the range about 50 km was modified to a guided weapon with reduced dispersion. The missile carries the flight computer, inertial measurement unit (IMU) with three rate gyros and three accelerometers, autopilot, and control section. The free flight rolling rocket was redesigned to canard a configuration whose control and guidance sections were stabilized against the rolling motion due to the application of the IMU and the strapdown navigation algorithm.

The purpose of the autopilot is to control the modified SSM during the whole flight, i.e., at low-, medium- and high altitude flight conditions. This is a difficult problem because the aerodynamic controls are very sensitive to the high variation of the air density, Mach number, angle of attack, and other missile dynamic properties needed for the autopilot design.

Typically, the design of the autopilot for the missile is based on the concept of the point stability technique. Most of the autopilots have a fixed structure whose gains are scheduled upon flight conditions such as dynamic pressure and the angle of attack. Therefore, tedious process of generating numerous aerodynamic transfer functions is required. After this step, the "frozen-point" stability is done to develop autopilot gains for the purpose of gain scheduling. This method of the autopilot design was described in many references such as Refs. [1], [2] and [3]. The authors of this paper have developed the computer codes for the complete numerical linearization of six-degree-of-freedom (6-DOF) model [4] and the autopilot design [5]. Different reference trajectories (ballistic, constant manoeuvre, straight line) were employed to generate aerodynamic transfer functions. One of the approaches in preparing the linear missile model based upon 6-DOF concept is shown in Ref. [6].

Many modern control methods with the application to the autopilot designs were published in papers, Refs. [7] – [10]. The method of the robust nonlinear inverse-dynamic control, or feedback linearization, [11] solves the problem of the synthesis of the autopilot for the missile having a highly varying nature. In addition to large variations in aerodynamics, mass, and inertia properties of a SSM, which occur during the boost phase, several constraints were faced by the autopilot designers. The problem of a small manoeuvre capability at high altitudes can be solved partially by allowance of small static instability (the centre of mass is behind

the centre of pressure). The Mach number is changed during the boost phase from the zero value to that greater than 3, when the static instability appears. The dynamic instability and dispersion for a free-flight rocket with extended range was analyzed in details in Ref. [12]. The robust control using the inverse-dynamic method can be applied to the SSM independently of the time instant on the trajectory even in the case of the dynamic instability [13].

In this paper, the results of different autopilot designs are discussed. The three-loop conventional acceleration autopilot is studied first. Using the concept of point stability, all necessary expressions for the autopilot's gains are rewritten from the published papers. The next section includes the method of the inverse-dynamic control and its application to two types of autopilots: gamma-dot and three-loop lateral acceleration autopilots. The numerical simulation results using a 6-DOF model will be presented to compare the SSM responses to the given commands on the trajectory for all three autopilot designs. Finally, some conclusions are given at the end of this paper.

The autopilot designs, presented in this paper, can be applied to both the missiles with Lambert guidance [14] and those without a thrust terminating mechanism [15].

Three-loop Conventional Acceleration Autopilot

Classical control techniques have dominated missile autopilot designs over the past several decades. Most missile autopilots employ acceleration and rate feedback with the proportional and integral control to stabilize the statically unstable missile and to track the guidance commands (Fig. 1).

The aerodynamic transfer functions of the pitch rate and normal acceleration to the controls deflections in Fig. 1 are, respectively

$$\frac{\Delta q}{\Delta \eta}(s) = \frac{K_q (T_q s + 1)}{T_n^2 s^2 + 2\zeta_n T_n s + 1} \quad (1)$$

$$\frac{\Delta a_z}{\Delta q}(s) = -U_k \frac{T_\gamma^2 s^2 + 2\zeta_\gamma T_\gamma s + 1}{T_q s + 1} \quad (2)$$

where

$$\begin{aligned} T_n^2 &= \frac{1}{\omega_n^2} = \frac{1}{-(m_w U_k - z_w m_q)} \\ 2\zeta_n T_n &= \frac{m_q + z_w}{m_w U_k - z_w m_q} \end{aligned} \quad (3)$$

$$K_q = \frac{z_\eta m_w - z_w m_\eta}{m_q z_w - m_w U_k} \quad (4)$$

$$T_\gamma^2 = -\frac{z_\eta}{U_k (z_\eta m_w - z_w m_\eta)} \quad (5)$$

$$2\zeta_\gamma T_\gamma = \frac{m_q z_\eta}{U_k (z_\eta m_w - z_w m_\eta)}$$

$U_k \approx V$ – missile velocity, z_w , – derivatives of linear acceleration with respect to the parameter in the subscript, m_w , m_q , m_η – derivatives of angular acceleration with respect to the parameter in the subscript, Ref. [16]. If the reference trajectory is ballistic, $\Delta q = q$, $\Delta a_z = a_z$, $\Delta \eta = \eta$.

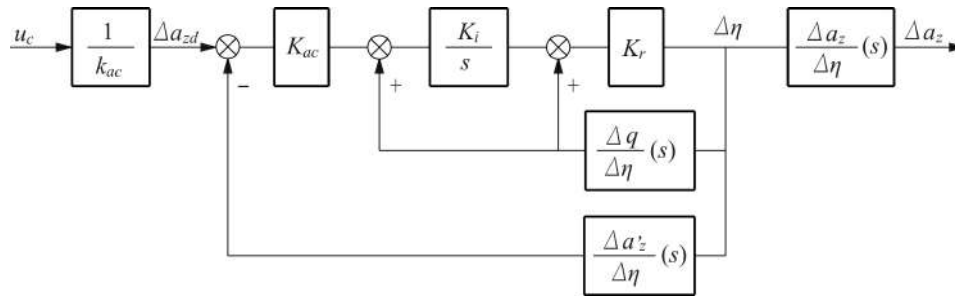


Figure 1 – Three-loop conventional acceleration autopilot

It is assumed that the acceleration is at the mass centre (CM), $\Delta a'_z = \Delta a_z$. If the accelerometer is away from the CM, the transfer function $\Delta a_z / \Delta q(s)$ has the same form, but the parameters T_γ^2 and $2\zeta_\gamma T_\gamma$ should be modified as it was shown in [1] and [3]. From Fig. 1, the overall transfer function of the lateral acceleration to demanded acceleration can be developed as:

$$\frac{\Delta a_z}{\Delta a_{zd}}(s) = K \frac{T_\gamma^2 s^2 + 2\zeta_\gamma T_\gamma s + 1}{\frac{T_n^2}{K_0} s^3 + \left(\frac{2\zeta_n T_n}{K_0} + T_0^2 \right) s^2 + \left(\frac{1}{K_0} + 2\zeta_0 T_0 \right) s + 1} \quad (7)$$

where

$$K_0 = -K_r K_i K_q (1 + K_{ac} U_k) \quad (8)$$

$$T_0^2 = \frac{T_\gamma^2 + \frac{T_q}{K_{ac}U_k K_i}}{1 + \frac{1}{K_{ac}U_k}} \quad (9)$$

$$2\zeta_0 T_0 = \frac{2T_\gamma \zeta_\gamma + \frac{T_q + \frac{1}{K_i}}{K_{ac}U_k}}{1 + \frac{1}{K_{ac}U_k}} \quad (10)$$

$$K = \frac{1}{1 + \frac{1}{K_{ac}U_k}} \quad (11)$$

The gains of the autopilot K_{ac}, K_r, K_i , should be chosen in such a way to provide the desired parameters of the closed loop $\tau_e, \omega_e, \zeta_e$:

$$\frac{\Delta a_z}{\Delta a_{zd}}(s) = K \frac{T_\gamma^2 s^2 + 2\zeta_\gamma T_\gamma s + 1}{(\tau_e s + 1) \left(\frac{s^2}{\omega_e^2} + \frac{2\zeta_e}{\omega_e} s + 1 \right)} \quad (12)$$

Instead of the required value for ω_e , we usually define the open-loop cross-over frequency $\omega_c \approx (2-3)\omega_n$ where $\omega_n = 1/T_n$ is the missile natural frequency.

Equating the corresponding coefficients in the denominators of Eqs. (12) and (7) gives the following expressions for the autopilot gains:

$$K_i = \frac{T_0^2 - T_\gamma^2 - T_q(2\zeta_0 T_0 - 2T_\gamma \zeta_\gamma)}{(2\zeta_0 T_0 - T_q)(T_0^2 - T_\gamma^2) - T_0^2(2\zeta_0 T_0 - 2T_\gamma \zeta_\gamma)} \quad (13)$$

$$K_{ac} = \frac{1}{U_k} \frac{T_0^2 - \frac{T_q}{K_i}}{T_\gamma^2 - T_0^2} \quad (14)$$

$$K_r = \frac{K_0}{-K_q K_i (1 + K_{ac} U_k)} \quad (15)$$

In a general case, the steady state gain $\neq 1$. Therefore, the pre-gain $k_{ac} = K$ may be required to achieve the demanded acceleration.

Autopilot Design Using Inverse-Dynamic Control

Theoretical Background

This section follows the description of the inverse-dynamic control given in Ref. [13]. The missile's nonlinear equations of motion can be separated into a nonlinear homogeneous term plus the term which is the linear function of the control vector

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{G}(\mathbf{x})\mathbf{u} \quad (16)$$

where $\mathbf{x}$ is a $n \times 1$ state vector and $\mathbf{u}$ is the control vector of the dimension $m \times 1$; $\mathbf{G}(\mathbf{x})$ is $n \times m$ matrix of control sensitivity. We assume that the $m \times 1$ output vector $\mathbf{y}$ is a linear function of the state vector

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} \quad (17)$$

The matrix $\mathbf{H}$ is selected by the designer. The derivative of the chosen output vector is:

$$\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{H}\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{H}[\mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{G}(\mathbf{x})\mathbf{u}] \equiv \mathbf{f}^*(\mathbf{x}) + \mathbf{G}^*(\mathbf{x})\mathbf{u} \quad (18)$$

where $\mathbf{f}^*(\mathbf{x})$ and $\mathbf{G}^*(\mathbf{x})$ have dimensions $m \times 1$ and $m \times m$, respectively. Denoting the derivative of $\mathbf{y}$ as $\mathbf{v}$

$$\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{v} \quad (19)$$

the inverting control law is obtained

$$\mathbf{u} = \mathbf{G}^{*-1}(\mathbf{x})[\mathbf{v} - \mathbf{f}^*(\mathbf{x})] \quad (20)$$

The control law includes a model of missile's homogeneous dynamics in the feedback loop and the inverse of its control effects in the forward loop (Fig. 2). The final step is to design a controller for the system described by Eq. (19).

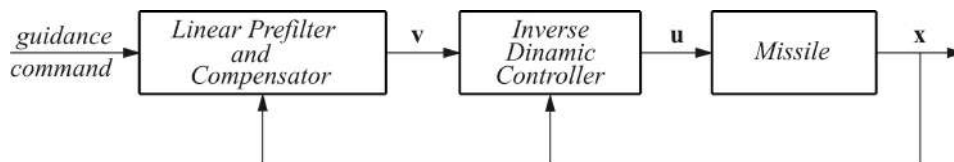


Figure 2 – Inverse dynamic control

The matrix $\mathbf{G}^*(\mathbf{x}) = \mathbf{H}\mathbf{G}(\mathbf{x})$ is often not invertible because some elements of $\mathbf{y}$ are not linear functions of $\mathbf{u}$. The repeated differentiation eventually reveals a linear relationship. Suppose that this can be applied to the first element of $\mathbf{y}$, i.e., y_1

$$\dot{y}_1 = \mathbf{h}_1 \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (21)$$

where $\mathbf{h}_1$ is the first row of $\mathbf{H}$. The second derivative of y_1 is

$$\ddot{y}_1 = \mathbf{h}_1 \dot{\mathbf{f}}(\mathbf{x}) = \mathbf{h}_1 \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} [\mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{G}(\mathbf{x})\mathbf{u}] \quad (22)$$

If the necessary linear relationship between $\mathbf{u}$ and $\ddot{y}_1$ is established, the first rows of $\mathbf{f}^*(\mathbf{x})$ and $\mathbf{G}^*(\mathbf{x})$ are redefined as $\mathbf{h}_1 \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{f}(\mathbf{x})$ and $\mathbf{h}_1 \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{G}(\mathbf{x})$, respectively.

The second element of $\mathbf{y}$ is checked then. If Eq. (22) does not produce a linear relationship, the next derivative of y_1 is generated. We denote the vector of suitable derivatives of $\mathbf{y}$ by $\mathbf{y}^{(d)}$, and $\mathbf{f}^*(\mathbf{x})$ and $\mathbf{G}^*(\mathbf{x})$ are defined row by row. Hence,

$$\mathbf{y}^{(d)} = \mathbf{f}^*(\mathbf{x}) + \mathbf{G}^*(\mathbf{x})\mathbf{u} \quad (23)$$

where $\mathbf{G}^*(\mathbf{x})$ is invertible for linearly independent controls. If $\mathbf{v}$ represents the desired values of $\mathbf{y}^{(d)}$, the inverting control is described by Eq. (20). The application of the inverse control can be complex because the evaluation of $\mathbf{f}^*(\mathbf{x})$ and $\mathbf{G}^*(\mathbf{x})$ requires that a full, d – differentiable model of the missile be included in the control system. It is worth to say that the inverse-dynamic control can be applied to both nonlinear and linear time-varying systems.

Gamma – Dot Autopilot

The gamma-dot autopilot is used to control the velocity vector turn rate, $\dot{\gamma}$. It is useful in the case of SSM with proportional navigation because it provides explicit control of the missile velocity vector turn rate required by the guidance law. If the missile has the pitch and yaw rate gyros for measuring body rates, an estimator is implemented to reconstruct the missile gamma-dots. The error in estimating the gamma-dots depends on the errors in estimating missile's aerodynamic characteristics. In the ca-

se of full strapdown navigation systems, the gamma-dots and all the other parameters required by the autopilot are generated using a navigation algorithm. Since the pitch and yaw channels are identical, only the former will be described.

Using notations in Fig. 3, we can develop a simplified model for missile's motion. The velocity vector turn rate is given by

$$\dot{\gamma} = -\frac{(Z + Z_c)\cos\alpha}{mV} + \frac{F_x - X}{mV}\sin\alpha \quad (24)$$

where Z, Z_c, F_x, X, m are normal force due to angle-of-attack and controls deflection, thrust, aerodynamic axial force, and missile mass, respectively.

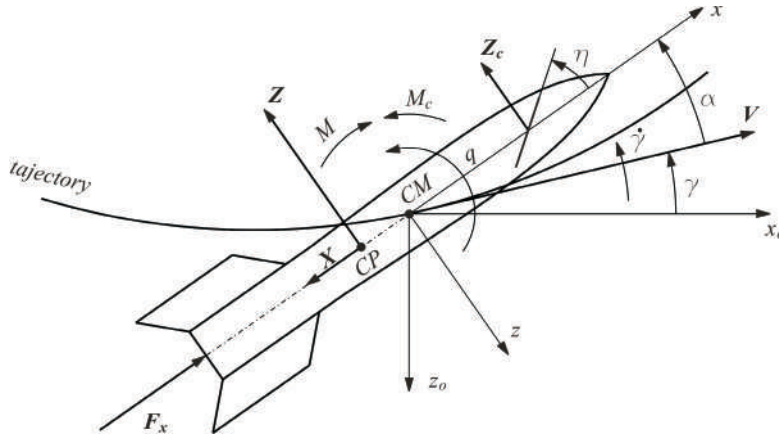


Figure 3 – Forces and moments acting on the missile

Substituting the following approximations

$$\begin{aligned} Z &= Z_\alpha \alpha, \quad Z_c = Z_\eta \eta, \quad M = M_\alpha \alpha, \quad M_c = M_\eta \eta, \\ a_x &= \frac{F_x - X}{m}, \quad \sin\alpha \approx \alpha, \quad \cos\alpha \approx 1, \quad \eta = -\frac{m_\alpha}{m_\eta} \alpha \end{aligned} \quad (25)$$

into Eq. (24), we get

$$\dot{\gamma} = f_\alpha \alpha \quad (26)$$

where

$$f_\alpha = \frac{\partial \dot{\gamma}}{\partial \alpha} = -\frac{1}{V} \left(z_\alpha - z_\eta \frac{m_\alpha}{m_\eta} \right) + \frac{a_x}{V} \quad (27)$$

$$z_\alpha = \frac{Z_\alpha}{m} = Vz_w, \quad z_\eta = \frac{Z_\eta}{m}, \quad m_\alpha = \frac{M_\alpha}{I_y} = Vm_w, \quad m_\eta = \frac{M_\eta}{I_y}, \quad (28)$$

We select the following state variables:

$$x_1 = \dot{\gamma} \quad (29)$$

$$x_2 = q \quad (30)$$

Using the kinematical relationship

$$\dot{\alpha} = q - \dot{\gamma} \quad (31)$$

after differentiating Eqs. (29) and (30), we get

$$\dot{x}_1 = f_\alpha(q - f_\alpha\alpha) + \dot{f}_\alpha\alpha \quad (32)$$

$$\dot{x}_2 = m_\alpha\alpha + m_\eta\eta \quad (33)$$

Now, we can implement the method of the inverse-dynamic control. The estimated quantity $\dot{\gamma}$ will be a controlled variable. After an additional differentiating step in Eq. (32) and introducing the new state variables

$$y_1 = x_1 = \dot{\gamma} \quad (34)$$

$$y_2 = \dot{x}_1 \quad (35)$$

we get the transformed system of differential equations

$$\dot{y}_1 = y_2 \quad (36)$$

$$\dot{y}_2 = v \quad (37)$$

where

$$v = f_\alpha[m_\alpha\alpha + m_\eta\eta - f_\alpha(q - f_\alpha\alpha) - \dot{f}_\alpha\alpha] + 2\dot{f}_\alpha(q - f_\alpha\alpha) + \ddot{f}_\alpha\alpha \quad (38)$$

The new system described by Eqs. (36) and (37) is a linear, time-invariant system with a new control input v . The deflection of control surfaces may be easily determined from Eq. (38) in terms of the new control input v and the parameters of missile motion.

The control law for the new time-invariant system can be defined to satisfy some design requirements

$$v = C_0 \left[\tau(\dot{\gamma}_c - y_1) + \int (\dot{\gamma}_c - y_1) dt \right] - C_2 y_2 - C_1 y_1 \quad (39)$$

where $\dot{\gamma}_c$ is the demanded value of the velocity vector turn rate and $y_1 = \dot{\gamma}$. The coefficients C_0, C_1, C_2 and the time constant τ may be

defined through the synthesis of the autopilot. The application of Laplace transformation in Eqs. (36), (37) and (39) and solving for $y_1 = \dot{\gamma}$ in terms of demanded input $\dot{\gamma}_c$ gives the transfer function of the overall time-invariant system

$$\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c}(s) = \frac{C_0(\tau s + 1)}{s^3 + C_2 s^2 + (C_1 + \tau C_0)s + C_0} = \frac{C_0(\tau s + 1)}{s^3 + C_2 s^2 + C_1' s + C_0} \quad (40)$$

Equation (38) can be solved for the deflection of controls as

$$\eta = K_\gamma [\tau(\dot{\gamma}_c - \dot{\gamma}) + \int (\dot{\gamma}_c - \dot{\gamma}) dt - K_r q - K_\alpha \alpha + \eta_{cor}(t)] \quad (41)$$

where

$$K_\gamma = \frac{C_0}{f_\alpha m_\eta} \quad (42)$$

$$K_r = \frac{C_2 - f_\alpha}{m_\eta} \quad (43)$$

$$K_\alpha = \frac{1}{m_\eta} (C_1' + m_\alpha - K_r f_\alpha m_\eta - K_\gamma \tau f_\alpha m_\eta) \quad (44)$$

$$\eta_{cor}(t) = -\frac{1}{f_\alpha m_\eta} [\ddot{f}_\alpha - \dot{f}_\alpha (-C_2 + 3f_\alpha)] \alpha - \frac{2\dot{f}_\alpha}{f_\alpha m_\eta} q \quad (45)$$

The block-diagram of the gamma-dot autopilot is shown in Fig. 4. The deflection of controls depends on the measured value of the pitch rate q , estimated values of $\hat{\gamma}, \hat{\alpha}$, and the additional correction $\eta_{cor}(t)$ which is the consequence of the variable velocity vector turn rate derivative $\dot{f}_\alpha(t)$. If $\dot{f}_\alpha = \ddot{f}_\alpha = 0$, the correction to the deflection of controls is equal to zero.

The coefficients C_0, C_1', C_2 are defined by the placement of the closed-loop poles, while the time constant τ is selected to compensate for the aperiodic time lag in the autopilot loop.

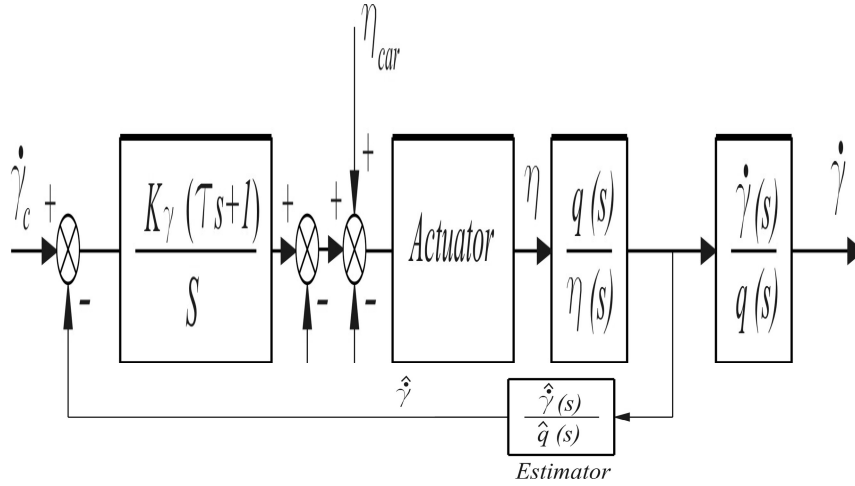


Figure 4 – Gamma-dot autopilot

Three-Loop Acceleration Autopilot

The inverse-dynamic control will be applied to the three-loop acceleration autopilot as well. Instead of using the velocity turn rate $\dot{\gamma}$ as a state variable, the normal acceleration is introduced

$$a_n = -V\dot{\gamma} = -Vf_\alpha \alpha = g_\alpha \alpha \cong x_1 \quad (46)$$

Since the second state variable remains the pitch rate ($x_2 = q$), the simplified state space model takes the following form:

$$\dot{x}_1 = \dot{g}_\alpha \alpha + g_\alpha \dot{\alpha} \quad (47)$$

$$\dot{x}_2 = m_\alpha \alpha + m_\eta \eta \quad (48)$$

$$\dot{\alpha} = q - \dot{\gamma} = q + \frac{a_n}{V} \quad (49)$$

The controlled variable is normal acceleration, $y_1 = a_n$. Taking two differentiations on the normal acceleration and defining new variables in the transformed system, $y_1 = a_n, y_2 = \dot{a}_n$, we get again:

$$\dot{y}_1 = y_2 \quad (50)$$

$$\dot{y}_2 = v \quad (51)$$

where

$$v = 2\dot{g}_\alpha \left(q + \frac{a_n}{V} \right) + \ddot{g}_\alpha \alpha + g_\alpha \left[m_\alpha \alpha + m_\eta \eta - g_\alpha \left(q + \frac{a_n}{V} \right) - g_\alpha \alpha \right] \quad (52)$$

Hence, we get the time-invariant system and the design of the optimal autopilot can be done easily. Again, after two differentiations the linear function with respect to the deflection of controls in the expression for a new control input v , Eq. (52), is obtained.

The integral control law was applied

$$v = C_0 \int (a_{nc} - y_1) dt - C_2 y_2 - C_1 y_1 \quad (53)$$

The transfer function of the normal acceleration $y_1 = a_n$ to the demanded value of the normal acceleration a_{nc} follows from Eqs. (50), (51) and (53):

$$\frac{a_n}{a_{nc}}(s) = \frac{C_0}{s^3 + C_2 s^2 + C_1 s + C_0} \quad (54)$$

The D.C. gain is equal to unity, and the zero steady-state error occurs. From Eqs. (50) and (51), with the new controlled variable given by Eq. (53), the solution of Eq. (52) for the controls deflection η gives:

$$\eta = K_{ac} \int (a_{nc} - a_n) dt - K_r q - K_\alpha \alpha + \eta_{cor}(t) \quad (55)$$

where

$$K_{ac} = \frac{C_0}{V f_\alpha m_\eta} \quad (56)$$

$$K_r = \frac{1}{m_\eta} (C_2 - f_\alpha) \quad (57)$$

$$K_\alpha = \frac{1}{m_\eta} (C_1 + m_\alpha - K_r f_\alpha m_\eta) \quad (58)$$

$$\eta_{cor}(t) = -\frac{1}{g_\alpha m_\eta} \left[\ddot{g}_\alpha + \dot{g}_\alpha (K_r m_\eta - f_\alpha) - g_\alpha \dot{f}_\alpha \right] \alpha - \frac{2\dot{g}_\alpha}{g_\alpha m_\eta} q \quad (59)$$

The control law of the three-loop acceleration autopilot generated by the inverse-dynamic control is similar to that of the gamma-dot autopilot. In order to obtain a linear time-invariant system, instead of the pitch angle feedback as in the case of the conventional acceleration autopilot, we need the angle-of-attack feedback [see Eq. (55)]. The autopilot is designed

ned by using the estimator for the angle-of-attack. The compensation of the rapid changes in g_α is introduced via the corrected value of the control deflection $\eta_{cor}(t)$, Eq. (59).

Numerical Examples and Simulation

To determine the response of the missile having different autopilot designs, the six-degree-of-freedom model and numerical simulation were applied. The missile configuration used in the simulation study is an artillery rocket of the range about 50 km. The aspect ratio of the body is $l/d = 17,8$. The canard section is built into the nose section inside the diameter of the cylindrical body at the distance of $l/d = 1,55$ from the missile tip. The fin-stabilized configuration has four pop-out fins without cant for generating the rolling motion. The roll autopilot is used to stabilize the canard section with the IMU against the rolling motion. The rocket motor having the total impulse of 33500 dNs imparts the velocity over Mach 3 to the missile to achieve the range over 50 km. The motor has two levels of the thrust 27800/8000 dN with burn times of 0.17/3.80 sec. The missile weight, the mass centre location from the missile tip, the roll and the transverse inertia radius before and after burn is 390/225 kg, 2.65/2.47 m, 0.094/0.098 and 1.2/1.4 m, respectively. The elevation angle of 54.19 deg was chosen to achieve the range of 50 km. The apogee of the trajectory is 19600 m. The aerodynamic data for the 6-DOF model were generated by numerical simulation and wind tunnel tests.

The missile configuration is statically unstable in the time interval $t \in (3,9;5,1)$ s when a high value of the Mach number is achieved. Two control points were selected for the autopilot design: $t = 10$ s (after the burn out time when the missile becomes statically stable again), and $t = 60$ s (near to the apogee of the trajectory).

Using the “frozen” aerodynamic transfer functions parameters for $t = 10$ s and the desired autopilot’s dynamics given by

$$\omega_c = 3\omega_n = 3 \times 5,35 \approx 15 \text{ rad/s}, \zeta_e = 0,6, \tau_e = 0,1 \text{ s} \quad (60)$$

the gains of the three-loop conventional autopilot were calculated by Eqs. (11) - (15):

$$K_{ac} = 0,012 \text{ s/m}, K_i = 3,58 \text{ 1/s}, K_r = 0,647 \text{ s}, k_{ac} = 0,91 \quad (61)$$

The responses of the autopilot to the demanded unit step input for $t = 3,5,10$, and 15 s are shown in Fig. 5. The time varying transfer functions parameters have important effects on the autopilot’s responses

which are characterized by an increased dynamic errors if the time is different from the point selected for the design.

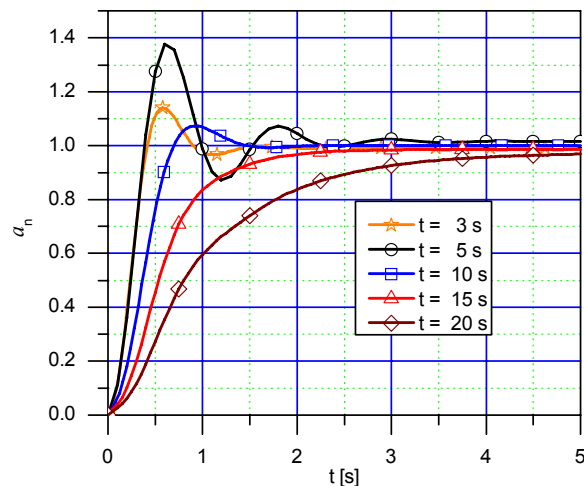


Figure 5 – Responses of a conventional autopilot designed for $t=10$ s

The response of the missile to the given command of ± 1 g by using the 6-DOF model for the gains in Eq. (61) is shown in Figs. 6 and 7 for the normal acceleration and the deflection of controls and angle-of-attack, respectively. A more realistic numerical simulation by the 6-DOF model shows that the satisfactory autopilot response was not obtained even in the vicinity of the chosen control point, $t = 10$ s. The additional adjustment of the autopilot is required. The change of the gain K_{ac} to the value of $K_{ac} = 0.02$ gives the response with the reduced steady state error, but with the increased overshoot, as shown in Fig. 8. The concept of the „frozen“ point stability in the design of the three-loop conventional acceleration autopilot cannot give good results for the wide interval of the missile flight.

The identical procedure was repeated for the control point near to the apogee of the trajectory, $t = 60$ s. Since the natural frequency of the missile is reduced to $\omega_n = 2$ rad/s, the desired values of the autopilot dynamics were chosen to be $\omega_c = 6$ rad/s, $\tau_e = 0.5$ s, $\zeta_e = 0.6$. The new values of the autopilot gains were obtained as $K_{ac} = 0.057$ s/m, $K_i = 2.49$ 1/s, $K_r = 2.93$ s, $k_{ac} = 0.96$. The results of the numerical – simulation by the 6-DOF model in Fig. 9 show again that the additional

adjustments of the gains are useful. Since the manoeuvre capability of the SSM is highly reduced at the apogee, the demanded acceleration was $\pm 0.1 \text{ g}$.

The gamma-dot autopilot was designed using the inverse dynamic control for the same desired dynamic characteristics as those for a conventional autopilot at $t=10 \text{ s}$, Eq. (60). Based on these values, the coefficients in the transfer function Eq. (40) were calculated as $\tau = \tau_e = 0.1 \text{ s}$, $C_0 = 260$, $C'_1 = 87$, $C_2 = 16$. Eqs. (42) – (45) were used for the calculation of the autopilot gains and the correction of the controls deflection due to time varying dynamics needed for the control law, defined by Eq. (41). Fig. 10 illustrates the autopilot response to a step command $\pm 1 \text{ deg/s}$.

In comparison to the conventional autopilot, the gamma-dot autopilot shows better performances because the desired dynamics was achieved without steady state errors. For the same desired dynamics as in the case of the conventional autopilot at $t=60 \text{ s}$, the response to the demanded value of the velocity vector turn rate of $\pm 0.1 \text{ deg/s}$ is shown in Fig. 11. The comparison of the diagrams in Figs. 9 and 11 proves some advantages of the gamma-dot over the conventional autopilot: faster response and lower values of dynamic errors in tracking the demanded velocity vector turn rate.

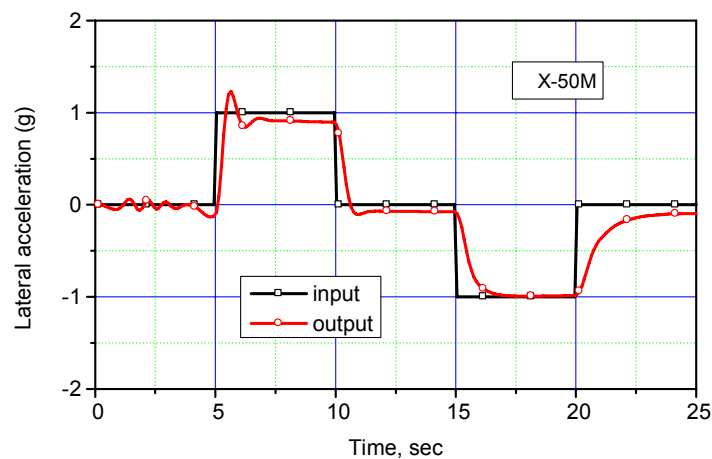


Figure 6 – Three-loop conventional acceleration autopilot
($t = 10 \text{ s}$, $K_{ac} = 0.012$)

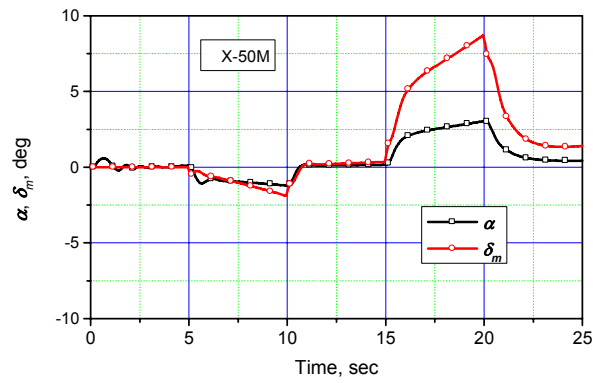


Figure 7 – Three-loop conventional acceleration autopilot
($t = 10$ s, $K_{ac} = 0.012$ s/m, $\delta_m \cong \eta$)

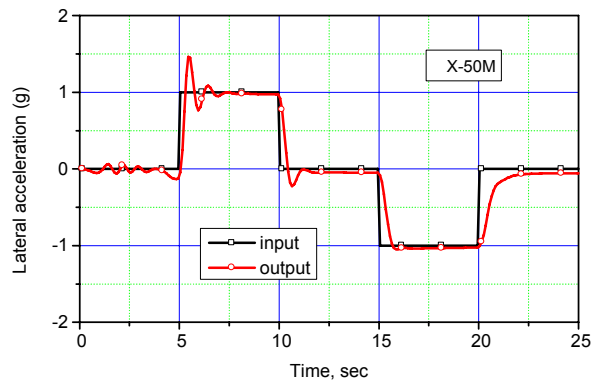


Figure 8 – Three-loop conventional acceleration autopilot
($t = 10$ s, $K_{ac} = 0.02$ s/m)

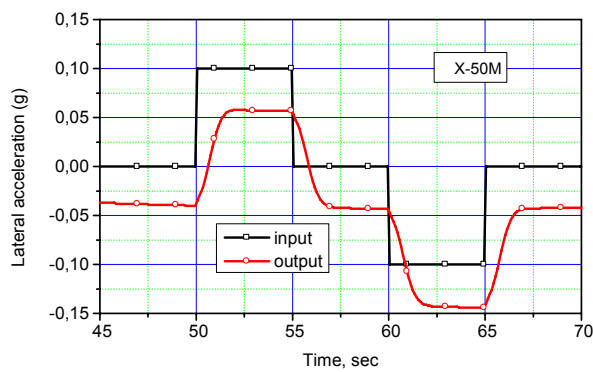


Figure 9 – Three-loop conventional acceleration autopilot
($t = 60$ s, $K_{ac} = 0.057$ s/m)

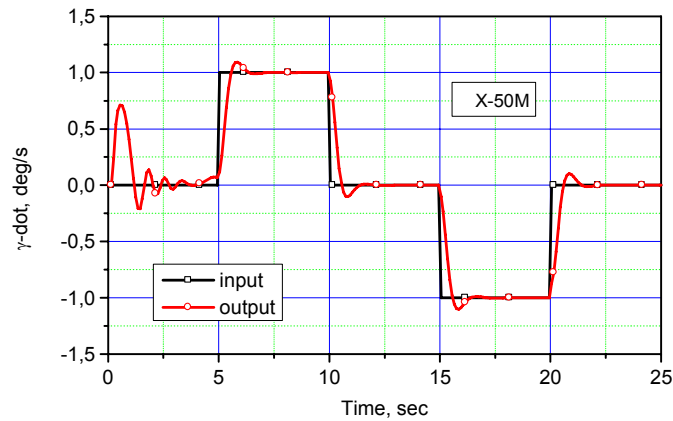


Figure 10 – Gamma-dot autopilot (design point $t = 10$ s)

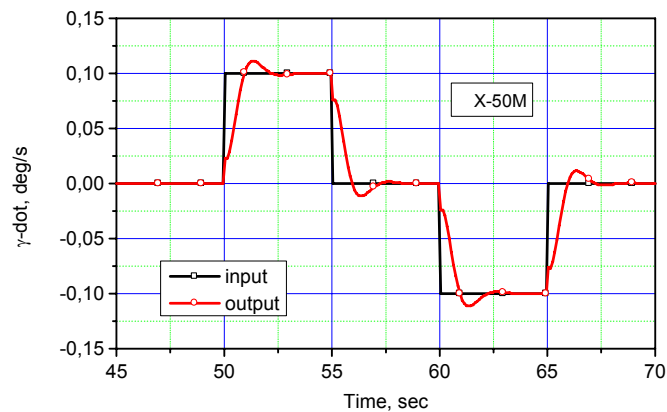


Figure 11 – Gamma-dot autopilot (design point $t = 60$ s)

The design of the three-loop acceleration autopilot was done using the inverse-dynamic control and having the identical requirements at the control points $t = 10$ s and $t = 60$ s as in the examples of the conventional and gamma-dot autopilot. The corresponding responses in Figs. 12 and 13 show that good performances can be achieved with this autopilot. The slower responses were obtained in the comparison with the gamma-dot autopilot because the control law Eq. (55) has only integral of the difference between the demanded signal and the output signal. In spite of time varying missile dynamics, the quality of the transient response does not change with the flight time.

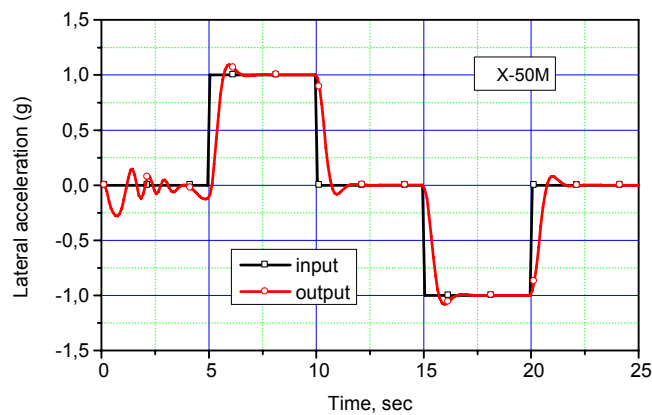


Figure 12 – Three-loop acceleration autopilot designed by the inverse-dynamic control ($t = 10$ s)

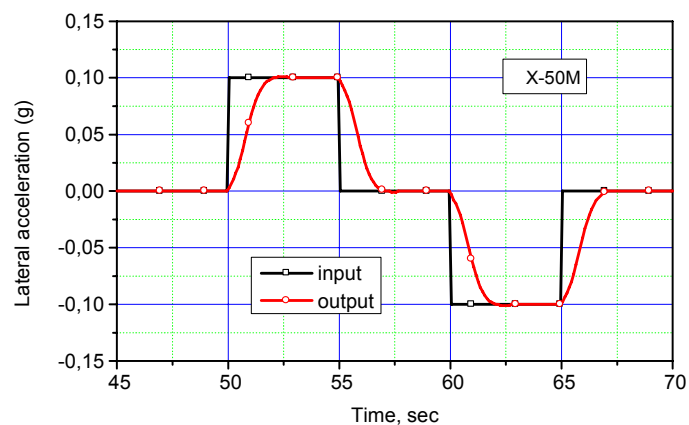


Figure 13 – Three-loop acceleration autopilot designed by the inverse-dynamic control ($t = 60$ s)

Conclusion

Three types of lateral acceleration autopilots for a surface-to-surface missile were analyzed: three-loop conventional acceleration autopilot, and gamma-dot and three-loop acceleration autopilot based upon the application of the inverse-dynamic control. The design of the first one employs the concept of the point stability for the system with “frozen” aerodynamic transfer functions. After the calculation of the autopilot gains for the full envelope of the missile flight, the additional adjustment of the gains should be done to compensate for the time varying dynamics of

the SSM. Contrary to this method, the inverse-dynamic control is well suited for the controlling of a missile with the rapidly time-varying dynamics as in the case of a surface-to-surface missile. However, its application requires the design of the estimators for the velocity vector turn rate and the angle-of-attack. The synthesis of such an autopilot begins with the choice of the pre-filter and the compensator for the linear time-invariant system. After this step, the calculation of the controls deflection in terms of the defined new control input and the missile measured or estimated parameters of motion should be done. The gamma-dot and three-loop acceleration autopilot, designed by the inverse-dynamic control, demonstrate excellent performances – fast response and zero steady state errors in a rapidly time varying environment of the SSM. This was proved by the numerical simulation results using a 6-DOF model for the missile flight to the range of 50 km.

There are still some questions to be investigated and solved. It is recommended that research be continued by the design of the required estimators, including the study of the influence of the missile dynamics uncertainties on the autopilot response.

References

- [1] Nesline, F.W., Nesline, M.L., *How Autopilot Requirements Constrain the Aerodynamic Design of Homing Missiles*, AIAA Guidance and Control Conference, TA7, 1983, pp. 716-730.
- [2] Gazzina, A., *How to Control Missile Airframes: Methodology and Limitation*, AGARD-CP-451, Stability and Control of Tactical Missile Systems, 1989, pp. 13.1–13.8.
- [3] Ćuk, D., Mandić, S., *Pitch Autopilot Design for a Missile with Highly Non-Stationary Dynamical Parameters*, Scientific Technical Review, Military Technical Institute, Belgrade, 3/2000.
- [4] Ćuk, D., Ćurčin, M., Mandić, S., *GMTC_3D: Guided Missile Trajectory Calculation – Three Degree of Freedom Motion Model, Theoretical Manual*, Military Technical Institute, Belgrade, 2002.
- [5] Ćuk, D., Ćurčin, M., Mandić, S., *Autopilot Design, Theoretical Manual*, Military Technical Institute, Belgrade, 2004.
- [6] Bar-on, J. R., Adams, R. J., *Linearization of a Six-Degree-of-Freedom Missile for Autopilot Analysis*, J. Guidance, 1/1998, pp. 184–187.
- [7] Arrow, A., Williams, D. E., *Comparison of Classical and Modern Autopilot Design and Analysis Techniques*, J. Guidance, 2/1989, pp. 220–227.
- [8] Puri, N. N., *Design of an Optimal-Adaptive Digital Autopilot*, J. Spacecraft, 7/1970, pp. 1172–1176.
- [9] Buschek, H., *Full Envelope Missile Autopilot Design Using Gain Scheduled Robust Control*, Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1/1999, pp. 115–128.

- [10] Zhu, J. J., Mickle, M. C., *Missile Autopilot Design using a New Linear Time-Varying Control Technique*, Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1/1997, pp. 150–157.
- [11] Gratt, H. J., McCowan, W. L., *Feedback Linearization Autopilot Design for the Advanced Kinetic Energy Missile Boost Phase*, Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 5/1995, pp. 945–950.
- [12] Ćuk, D., *Influence of Range Extension on Dynamic Stability for Artillery Rockets with Wrap Around Fins*, Military Technical Courier (Vojnotehnički glasnik), Ministry of Defence of the Republic of Serbia, vol. 55, No. 3, pp. 296–307, ISSN 0042-8469, UDC 623+355/359, Beograd 2007.
- [13] Stengel, R. F., *Flight Dynamics*, Princeton University Press, 2004.
- [14] Ćuk, D., *Choice of the Rotational Factor of the Thrust Vector for the Ballistic Missile with Lambert Guidance*, Military Technical Courier (Vojnotehnički glasnik), Ministry of Defence of the Republic of Serbia, vol. 56, No. 2, pp. 133–146, ISSN 0042-8469, UDC 623+355/359, Beograd 2008.
- [15] Gregoriou, G., *CEP Calculation for a Rocket with Different Control System*, J. Guidance, 3/1988, pp. 193–198.
- [16] Gamel, P., *Guided Weapon Systems*, Pergamon Press, New York, 1980.

POREĐENJE RAZLIČITIH AUTOPILOTA ZA UPRAVLJANJE NORMALNIM UBRZANJEM RAKETE ZEMLJA–ZEMLJA

OBLAST: Mašinstvo (Raketna tehnika)

Sažetak

Ovaj rad prikazuje poređenje tri autopilota za upravljanje normalnim ubrzanjem rakete zemlja–zemlja: konvencionalnog autopilota sa tri povratne sprege, i autopilota za upravljanje ugaonom brzinom vektora brzine i normalnim ubrzanjem koji su zasnovani na primeni inverznog dinamičkog upravljanja. Kretanje rakete zemlja–zemlja opisuje se nelinearnim diferencijalnim jednačinama čiji se parametri menjaju u širokom opsegu zbog promene brzine i visine leta. Zahtev za tačnim upravljanjem rakete u takvom okruženju predstavlja izazov za konstruktora autopilota. Dat je sažet pregled proračuna faktora pojačanja konvencionalnog autopilota primenom metode lokalne stabilnosti za linearni nestacionarni sistem sa „zamrznutim“ dinamičkim koeficijentima. Metoda inverznog dinamičkog upravljanja prikazana je u narednom odeljku za dva tipa autopilota: za upravljanje ugaonom brzinom vektora brzine i normalnim ubrzanjem. Oba zahtevaju sintezu estimatora za veličine koje se koriste kao ulazne za zakon upravljanja raketom. Na kraju, pomoću modela „6-stepeni slobode kretanja“ daju se rezultati simulacije odgovora rakete na zahtevanu komandu pri letu po tipičnoj balističkoj putanji. Poređenjem tri autopilota razmatraju se greške u stacionarnom stanju i osetljivost odgovora na izrazito promenljivo okruženje. Pokazano je da inverzno dinamičko upravljanje može da bude veoma efikasno u upravljanju raketom zemlja–zemlja.

Uvod

Nevođena raketa, koja je projektovana za domet od oko 50 km, modifikovana je u vođenu sa smanjenim rasturanjem. Za tako modifikovanu raketu neophodna je primena autopilota za upravljanje normalnim ubrzanjem kako bi se dobio zadovoljavajući odgovor rakete na svim visinama leta. Posle pregleda publikovanih radova iz oblasti raketne tehnike, daje se predmet ovog rada koji obuhvata analizu rezultata odgovora tri tipa autopilota rakete zemlja–zemlja: konvencionalnog autopilota ubrzanja sa tri povratne sprege i dva autopilota koji se zasnivaju na primeni inverznog dinamičkog upravljanja.

Konvencionalni autopilot ubrzanja sa tri povratne sprege

Data je sažeta sinteza autopilota ubrzanja sa tri povratne sprege za statički nestabilnu raketu. Primenom kvazistacionarne metode, sračunavaju se faktori pojačanja autopilota u zavisnosti od dinamičkih parametara leta rakete.

Sinteza autopilota primenom inverznog dinamičkog upravljanja

Posle opisa metode inverznog dinamičkog upravljanja, razmatrana su dva tipa autopilota: autopilot za upravljanje ugaonom brzinom vektora brzine i autopilot za upravljanje normalnim ubrzanjem pakete. Određena je struktura zakona upravljanja i uvedeni određeni estimatori veličina stanja. Izvedeni su svi potrebni izrazi za proračun faktora pojačanja i korekciju komande zbog nestacionarnosti parametara leta rakete.

Numerički primeri i simulacija

Verifikacija odabranih autopilota izvršena je numeričkom simulacijom odgovora rakete na datu komandu pomoću modela „6 stepeni slobode kretanja“. Pokazano je da primena konvencionalnog autopilota ubrzanja ne daje zadovoljavajuće rezultate zbog povećane statičke greške i prebačaja koji su funkcije parametara leta rakete. Suprotno tome, autopiloti koji su zasnovani na inverznom dinamičkom upravljanju daju željene odgovore nezavisno od promenljivih parametara leta rakete.

Zaključak

Sumirane su dinamičke osobine tri tipa autopilota: konvencionalnog autopilota ubrzanja sa tri povratne sprege, autopilota za upravljanje ugaonom brzinom tangente na putanju i autopilota za upravljanje normalnim ubrzanjem rakete. Poslednja dva zasnivaju se na primeni savremene metode upravljanja poznate kao inverzno dinamičko upravljanje. Faktori pojačanja konvencionalnog autopilota dodatno se podešavaju i verifikuju pomoću modela „6 stepeni slobode kretanja“. Suprotno tome, metoda inverznog dinamičkog upravljanja veoma je pogodna za dinamičke objekte sa jako promenljivim parametrima kakva je i raketa zemlja–zemlja. Zakon

upravljanja određuje se u prvom koraku za linearan stacionaran sistem, da bi se u drugom prolazu odredio otklon upravljačkih krila u zavisnosti od novog upravljačkog vektora i promenljivih dinamičkih parametara leta rakete. Primena inverznog dinamičkog upravljanja zahteva sintezu određenih estimatora veličina stanja rakete, koji bi bili predmet budućih istraživanja autopilota za rakete zemlja–zemlja.

Ključne reči: autopilot, autopilot normalnog ubrzanja, autopilot ugaone brzine vektorom brzine, inverzno dinamičko upravljanje, vođena raketa zemlja–zemlja, model „6 stepeni slobode kretanja“.

Datum prijema članka: 26. 01. 2011.

Datum dostavljanja ispravki rukopisa: 10. 02. 2011.

Datum konačnog prihvatanja članka za objavljivanje: 12. 02. 2011.

PRESSURE HYDROMETALLURGY – – A NEW CHANCE TO NON-POLLUTING PROCESSES

Stopić R. Srećko, Friedrich G. Bernd
IME Process Metallurgy and Metal Recycling,
RWTH aachen University, Aachen, Germany

UDC: 669.053.4

FIELD: Chemical Technology

Abstract:

A wide spectrum of hydrometallurgical processes offers many promising approaches for industrial application in order to improve the environmental impact of conventional metals productions, or for replacing pyrometallurgical processes whose gas emissions and a high content of formed metals (As, Cr, Pb) are becoming increasingly unacceptable. The main advantages of pressure hydrometallurgy are fast kinetics, enhanced selectivity over iron and other dissolved species. The pioneer work on hydrometallurgical operation (dissolution, precipitation, metal winning) was performed in Russia at the beginning of the previous century, mainly by Ipatieff and Bayer, each working independently in Saint Petersburg. Gradually, industrial application took place firstly in aluminium and later in nickel production. Today, in addition to nickel and aluminium, the pressure hydrometallurgy is well established in a wide spectrum of industrial applications for production of different metals (gold, zinc, molybdenum, titanium, germanium) from ore deposits and secondary materials. High pressure leaching in combination with other metallurgical operations (cementation, precipitation, solvent extraction, and electrowinning) provides an adequate technology to reintroduce lost metals into the industrial cycle, thereby saving resources and energy, while keeping the environment cleaner. It seems that pressure hydrometallurgy might be a very important key to better and nonpolluting processes in production of metals.

Key words: High Pressure, hydrometallurgy, metal, environmental protection.

Introduction

Hydrometallurgical extraction of metals represents an important, widely applied technology in the metallurgical industry for treating both primary and secondary resources of valuable metals [1, 2]. Suc-

Successful hydrometallurgical approaches to metal extraction require a full understanding of a wide spectrum of scientific and engineering principles in many disciplines. These include solution chemistry, electrochemistry, thermodynamics, kinetics, and transport processes. In this study, present relationships among various disciplines influencing hydrometallurgical extraction are reviewed and analyzed with different examples from literature [1–3]. The contribution of pressure hydrometallurgy to technological advancement of metal extraction is undeniable [1].

The first information regarding a reaction under high pressure is reported by Vladimir Nikolayevich Ipatieff (1900). The precipitation processes, however, were performed by Nikolai Beketoff in 1859 and metal dissolution by Karl Bayer in 1892. Although initially autoclaves were used for leaching bauxites for more than 100 years, pressure hydrometallurgy has progressed extensively since the middle of 1980's when it was applied for zinc sulfide concentrates and refractory sulfide gold bearing ores. The application of pressure and high temperature leaching in autoclaves is definitely one way of overcoming the slow kinetics of hydrometallurgical processes. In the early seventies Habashi [3] reported that pressure hydrometallurgy is the best option for better and non-polluting leaching processes. In his paper [4] Habashi thoroughly discussed how pressure hydrometallurgy is applied for the leaching of nickel oxide, sulphide and arsenide, highlighting the importance of the pressures reactors, i.e., autoclaves. Nowadays, laboratory autoclaves for hydrometallurgical investigations are available in different sizes, models and materials [4]. The maximum pressure and temperature at which the autoclaves can be used depend upon the design of the vessel and the materials used in its construction (rotary autoclave, horizontal and column autoclave system). Titanium is an excellent material for use with oxidizing agents, such as nitric acid, aqua medium and other mixed salts. Prospective users must remember that titanium will burn vigorously in the presence of oxygen at elevated temperatures and pressures. While there have been many successful applications where oxygen and sulphuric acid are handled in titanium equipment, the danger of ignition is always present and must be prevented.

The high pressure acid leaching HPAL is the current widely accepted process for greenfields nickel laterite projects. The extension of the process from tropical limonites to Western Australian laterites is a new approach, and as such the behaviour of the different minerals in tropical and arid laterites during leaching is widely examined.

Tindall and Muir [5] conducted fundamental investigation of the HPAL technique using synthetic goethite as a model ore. It was found that goethite transforms to hematite by dissolution and the re-precipitation mechanism. The leaching rate depended on the acid concentration,

the slurry oxidation potential, and the type of cations in the solution. It was also confirmed that the nontronite (the silicate ore) reacted more promptly than iron oxides.

Rubisov and Papangelakis [6] have developed a comprehensive model including the kinetics of Co, Fe, Al, Mn and Ni dissolution in the temperature range from 230°C to 270°C. The resulting model is capable of predicting the Ni extraction and the concentration of major impurities during autoclave operation for a variety of process conditions and feed compositions. The model was validated with data from a continuous mini plant provided by the INCO Technical Services during its process development campaigns.

Canterford [7] reported sulphatisation studies for oxidized nickel ore under high pressure conditions. He mentioned that the sulphation studies for nickel oxidized ore have been restricted to only one or two samples. Since each process is not uniformly applicable to each ore, the optimization studies and models from the literature will not allow ready determination of the appropriate processing conditions for other untested ores.

Arroyo et al. [8] proposed an improved method to predict leaching of the nickel from the high-magnesium fraction by processing the limonite fraction of the ore. The pressure leach slurry, or solution, is then contacted with the magnesium fraction of the ore to dissolve most of the nickel contained in the high-magnesium ore fraction while dissolving only a small portion of iron.

In hydrometallurgical processes the design of the reactor is of critical importance for an improved metal extraction [9]. After determining a chemical hydrometallurgical reaction with certain kinetics and reaction mechanisms, the best choice of a reactor design determines operating costs, environmental and operating problems, as well as the product quality. The kinetics of hydrometallurgical processes is made more complex by the existence of a very complex system since all three phases: gas, liquid and solid, are often present at the same time in a closed system.

The maximum pressure and reaction temperature at which any pressure vessel can be used depend upon the design of the vessel and the materials used in its construction. Since all materials lose strength at elevated temperatures, any pressure rating must be stated in terms of the temperature at which it is applied. The choice of material of construction of an autoclave (titanium, stainless steel) depends on the operating medium whether or alkaline, the temperature range, and the presence or absence of oxidizing atmosphere. A rupture disc is installed in a safety head. To prevent the action of corroding vapour, the discs can be coated on one or both sides with teflon. Such coating and lining increase the minimum rupture ratings available in a given disc.

As a result of the permanent increase of nickel production costs associated with traditional pyrometallurgical techniques (flash smelting) and the depletion of high-grade sulfide ores, a renewed interest has developed concerning the production of nickel and cobalt by high pressure sulphuric acid leaching of nickel laterite (oxidic ore) [10]. The residence time is limited to some economical maximum volume controlled by the cost of an autoclave in relationship to the project cost. As a consequence of the need to minimize operating costs in the Chemical industry, EKATO Ruhr und Mischtechnik GmbH developed an impeller system to increase the mass transfer rate and optimise gas utilisation in autoclaves [11].

Because of high production costs the usage of equilibrium software is a new, easy way to solve reaction problems on personal computers. The HSC Chemistry, developed by Outokumpu, Finland, has a wide range of application possibilities in metallurgical industry, research and education [12]. The HSC Chemistry helps to avoid trial-and-error chemistry, allowing chemists or engineers to set up optimum reaction conditions for their experimental investigation.

FactSage™, was developed during 20 years of collaborative efforts between the Thermfact/CRCT (Montreal, Canada) and the GTT-Technologies (Aachen, Germany) showing the largest fully integrated database computing systems in chemical thermodynamics in the world. It was introduced in 2001 and is the fusion of the FACT-Win/F*A*C*T and ChemSage/SOLGASMIX thermochemical packages [13]. The usage of Factsage is of big importance for calculating the stabilities of ionic and non ionic-species in water solutions. The information regarding corrosion, dissolution, leaching and selective precipitation is presented in the constructed diagrams: E (potential) – pH (the negative decimal logarithm of the hydrogen ion). In chemistry, pH is a measure of the acidity of an aqueous solution. In order to perform selective leaching of based metals from complex ores with different reagents (sulphuric acid, sodium hydroxide) the construction of E-pH (Pourbaix diagrams) is required. As shown in Fig. 1, a selective leaching of zinc might be performed in an acidic medium (pH=2, E=0.4) in order to remove present iron in the form of Fe_2O_3 . A further increase of the pH- value from 2 to 4 leads to the formation Fe_2ZnO_4 , which is not desirable.

Generally, the main advantages of pressure hydrometallurgy are fast kinetics, enhanced selectivity over iron and other dissolved species, enhanced solubilities of reagent gases, and more stable residues as compared to atmospheric processes. The drop in the dielectric constant of water with temperature and the associated enhancement in metal-anion bonding offer new possibilities to explore in terms of metal extraction selectivity.

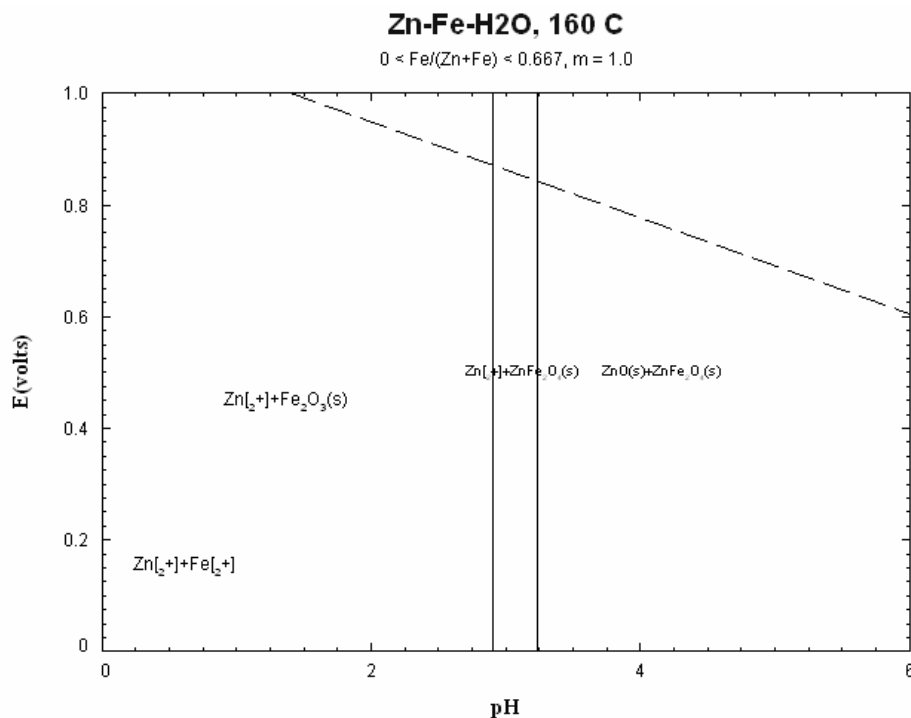


Figure 1 – E-pH diagram in the Zn-Fe-H₂O system at 160°C (approx. P = 0.5 MPa)
 Slika 1 – E-dijagram u sistemu Zn-Fe-H₂O na 160°C (približno P = 0,5 MPa)

General principles of pressure hydrometallurgy

Pressure hydrometallurgy is based on the following:

1. classical hydrometallurgy principles (theory, structure of technological schemes, apparatus implementation)
2. mechanism of heat-mass exchange in the systems liquid-solid, liquid-gas-solid, liquid-gas
3. the theory for hydrothermal processes of mineral generation

High attention and quick commercial development of autoclave processes (Fig. 2) are stipulated by a series of its benefits:

- essential intensity of a process due to the application of high temperatures and pressures for reaction gases
- ecologically consistent production
- capability of operating mechanization and automation
- complete extraction of valuable components
- synthesis of new materials with unique features

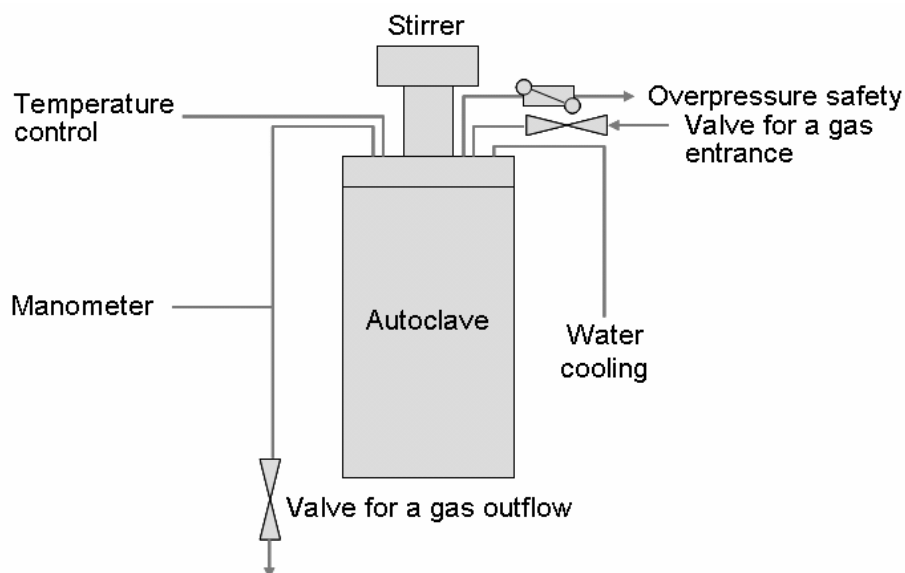


Figure 2 – Scheme of an autoclave
Slika 2 – Šematski prikaz autoklava

The material base for dynamical development of autoclave processes will be the following:

- effectiveness of chemical engineering, which created efficient devices made of corrosion-resistant materials
- development of perfect sensors and safety systems for sampling and sulphuric acid injection under high pressure
- synthesis of new reagents and creation of productive technologies for reaction gases generation (oxygen, hydrogen, hydrogen sulphide)
- good power equipment of the branch, satisfying enterprise's needs in electric power, high parameters, and the utilization of mechanisms for wastewater treatment

As a typical hydrometallurgy scheme of polymetallic raw materials, processing includes three main parts of the technological process:

- lixiviation of the extracted metal
- purification of the received solution from dirt
- precipitation of the extracted metal in the elemental form or as a compound as an end-product

State-of-the-art pressure hydrometallurgy

Different smelters in metallurgical industry have been operating for hundreds of years emitting millions of tons of SO₂ in the environment. As a result of the ever increasing costs of metal production associated with traditional smelting techniques, the decrease of high-grade sulfide ores, and especially higher metal prices, a renewed interest has developed concerning the production of nickel and cobalt from lateritic deposits using pressure hydrometallurgy [14, 15]. Laterites are oxide ores, rich in iron and aluminum hydrous oxides containing extractable nickel and cobalt values [16]. Laterite deposits are numerous throughout the world and can be estimated at 22 billion tons. Oxide ore deposits worldwide are in New Caledonia, Indonesia, Philippines, Australia, Russia, Brazil, Guatemala, Columbia, USA and in South-East Europe (Greece – Larymna with 120 million tons, Serbia with four regions: a) West Morava: 35 million tons, b) Zlatibor: 150 million tons, c) Sumadija: 11 million tons and d) Kosovo: 10 million tons; Macedonia Rzanovo: 100 million tons and Albania: 10 million tons).

Lateritic deposits constitute from 70 to 80 percent of the world-known nickel resources [17–20]. The two well-known types of nickel deposits are: limonitic type, as a nickel-ferrous iron ore, and silicate type. The silicate of nickel deposit, often called a serpentine ore, represents a more complete separation of nickel from iron and nickel is present as a constituent of silicate minerals formed during the laterization process. In more basic, especially dunitic differentiation minerals, nickel may partly replace magnesium in their lattice, and especially in olivine. The olivine decomposes magnesium, iron and nickel go into solution, and silicon tends to form a colloidal suspension of submicroscopic particles of silica. Then under laterite weathering conditions this low nickel content is available to form nickel-magnesium silicates and could finally concentrate resulting in economically interesting deposits.

Because of the large presence of Nickel Oxide Ores in South-East Europe and a small number of plants for nickel production there is a high request for studies of pressure hydrometallurgy. Treating oxidized nickel ores with sulfuric acid at elevated temperatures between 250 and 280°C and pressures of 4.5 and 6.0 MPa results in selective dissolution of nickel and cobalt as sulfates since ferric sulfate is unstable under the leaching conditions [21]. The ferric sulfate hydrolyzes to hematite and sulfuric acid. Thus the acid consumption is reduced while iron free pregnant liquor is produced. The HPAL offers at present the most promising prospect because it requires the smallest amount of energy input from fossil fuels, and because it is capable of high nickel and cobalt extraction from a wide variety of types of oxides [22–25].

The HPAL is the preferred process to recover nickel and cobalt from limonitic laterites, due to their low magnesia content and consequently low acid consumption [26]. One of the operating problems that must be addressed in design of pressure leaching systems is scaling of reactor surfaces [27]. The economic feasibility of the HPAL route for the extraction of nickel and cobalt values from silicate ores is highly dependent upon the behavior of aqueous aluminum. This is primarily due to its precipitation as hydronium alunite $((\text{H}_3\text{O})\text{Al}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6)$, which is one of the major scale-forming compounds found in autoclaves used for pressure leaching [28]. Less recognized is the potential for formation of $\text{MgSO}_4 \cdot X \text{H}_2\text{O}$ and silica scale.

The leach residues encountered in the hydrometallurgical processing of the nickel oxidic ore are often in the colloidal or near-colloidal particle size range [29]. The direct dewatering of such finely divided leach suspension by conventional sedimentation is difficult and physical-chemical characteristics of the slurries must be changed in order to achieve higher settling velocities. In practice, this needed modification of the leach residues involves the addition of destabilizing agents, i. e. and organic polymer, to flocculate the particle and to produce settleable aggregates [30, 31].

Slurry rheology plays a vital role in pipeline transport, classification, heating and processing of laterite ores [32–34]. This is especially true in sulfuric acid leaching processes as slurry with no thermal treatment. The complex rheology of laterite slurries can be generally attributed to the presence of goethite (needle-shaped crystals) and various clays (plate structure). It is expected, regardless of the mechanisms involved in flow behavior, that the measurements of bulk properties of slurries will provide the necessary parameters for the design of processing facilities. The most effective method for modifying the flow properties of suspension is to change the surface chemistry of the suspended particles using tenside, i. e., the surface charge density and ionic strength, which is accomplished by changing the pH and the electrolyte concentration of the suspension [34].

Optimizing gas mass transfer in autoclave

In pressure hydrometallurgy, pure gases like oxygen and hydrogen are used for oxidation and reduction. The gases are expensive and therefore should be used efficiently. The EKATO Gassing Impeller offers a new technology for hydrometallurgical processes to increase gas mass transfer rates (as shown in Fig. 3). Better gas utilization can be achieved by the replacement of impeller systems or by upgrading impeller systems to use the installed power better [11].

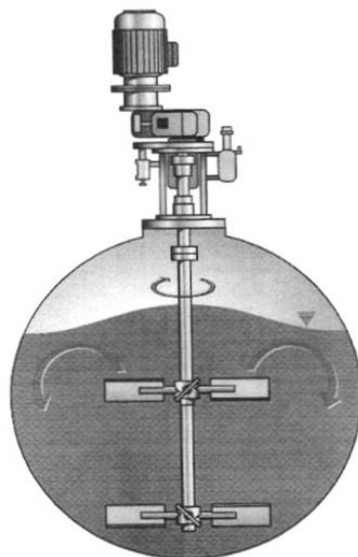


Figure 3 – Surface gassing impeller [11]
Slika 3 – Pokretač uvođenja gasa

The most efficient means of gas mass transfer into liquid is called “Surface gassing”. Gas enters the headspace of the autoclave. The elemental gas partial pressure or concentration is low due to dilution with water vapor or other by-product gases. The interfacial area is a multiple of the surface area of the liquid-gas interface. An impeller pumping liquid upwards to the pulp-gas interface creates a multiple of the surface area. A head differential is created continuously replenishing the liquid at the interface with unsaturated liquid to create the greatest concentration gradient of the element in the gas and in solution. The consequence is a mass transfer coefficient greater than the one created by vortex gassing. The EKATO gassing impeller not only adds to the overall mass transfer, but also it can contribute to a prolonged period of time between maintenance activities.

The oxygen mass transfer rate in various aqueous applications was measured by the EKATO with a relatively high degree of accuracy typically by oxidizing a sodium sulphite solution under similar or simulated conditions as to real operations [11]. Besides the extent of mixing, the oxygen mass transfer coefficient depends on temperature and reaction kinetics. The normal trend is when temperature rises over 100°C under higher pressure or when reactions involving dissolved oxygen accelerate the value of the oxygen mass coefficient.

Tube reactor

In most cases the bauxite used as main raw material for metallurgical grade alumina is diaspore bauxite. Its difficult extraction behavior and its high silica content cause pyrogenic processes coexisting with the Bayer process. Many efforts were made to shorten the extraction time with intensification of leaching in the autoclave caused Bayer process to be developed more efficiently. Tube digestors have the potential use for decomposition of bauxites.

Based on data in references, a laboratory tube reactor for bauxite leaching was constructed and operated by Rajko Vracar and Slobodanka Markovic (now Vukcevic) [35, 36]. The characteristics of this reactor were:

- temperature leaching up to 300°C,
- pulp flow rate from 0.35 to 1.21 m s⁻¹,
- residence time of suspension in working space from 56.3 to 194.8 s, residence time in direct heating zone from 18.6 to 64.5 s and
- flow rate of pulp of 76.3 to 260.4 dm³ h⁻¹.

The results of leaching of bauxite with the following composition (%): 51.22 Al₂O₃; 22.80 Fe₂O₃; 2.01 SiO₂; 2.90 TiO₂; 0.57 CaO and 20.5 loss after calcination, using a solution of 120 g Na₂O/l depending on the pulp flow rate and the temperature in the zone of direct heating are showed in Table 1 and Table 2. The obtained results confirmed:

1. Under a specific moving regime of pulp in the tube digester a leaching process is very fast ensuring the high degree of dissolution (85 to 94%) e.g. maximum degree of dissolution at the temperature of 245°C for 72 s. Under similar conditions for a battery of autoclaves a necessary time is 2 to 400 s. At the same time the leaching time represents the time for heating up to the working temperature. Under laboratory conditions (a rate pulp flow from 0.35 to 0.96 m·s⁻¹ and the flow rate from 76 to 205 m³·h⁻¹) the above mentioned time amounts from 72 to 195 s. In other words, the necessary residence time for bauxite leaching can be reduced by using a tube digester approx. to 1/10 of the value typical for processing in autoclaves.
2. The desirable degree of leaching can be realized using a solution of low NaOH concentration (120 g Na₂O per dm³).

Table 1 – Dissolution of Al₂O₃ depending on the pulp flow rate at 228°C in the zone of direct heating

Tabela 1 – Rastvaranje aluminijum oksida u zavisnosti od protoka pulpe na 228°C u zoni direktnog zagrevanja

Pulp flow rate (m s ⁻¹)	Heating time (s)	Degree of dissolution of Al ₂ O ₃ (%)
0.35	194.8	85.65
0.64	106.0	86.00
0.79	85.8	83.85
0.96	71.8	84.21

Table 2 – Dissolution of Al_2O_3 depending on the temperature in the zone of direct heating at a pulp flow rate of $0.79 \cdot \text{m s}^{-1}$ and a heating time of 85.8 s

Tabela 2 – Rastvaranje Al_2O_3 u zavisnosti od temperature u zoni direktnog zagrevanja pulpe za protok $0,79 \cdot \text{m s}^{-1}$ i vreme zagrevanja 85,8 s

Temperature (°C)	Degree of dissolution of Al_2O_3 (%)
160	85.65
200	86.00
230	83.85
250	84.21
270	85.65

Bagaev [37] confirmed that the use of the tube digester rather than autoclaves in alumina production would make it possible to increase alumina extraction and reduce equipment costs. As the particle diameter is reduced, it becomes necessary to reduce the diameter of the subsequent reactor stages to maintain the specific rate of processes involving diffusion or mixed kinetics. For the same constant value of suspension flow rate in the tube digester – $dV/dt = 0.0011 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, the reactor diameter was changed in experiments ($D = 0.4$; 0.277 and 0.071 m). and the degree of conversion was increased from $X = 0.34$ to 0.73 in the temperature range from 240 to 270°C . The residence time was decreased from 40 to 10 min at the above mentioned conditions.

Table 3 – Conditions and results of bauxite dissolution in the tube digester [38] (flow rate $dV/dt = 0.0011 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$)

Tabela 3 – Uslovi i rezultati rastvaranja boksita u cevnom reaktoru [38] (protok $dV/dt = 0,0011 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$)

Composition of bauxite (%)				$d \cdot 10^6$ (m)	t (min)	T (°C)	X
Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	loss of calc.				
52.15	4.66	22.28	14.9	93	40.0	271	34.0
53.97	3.97	22.00	2.2	49	15.0	273	55.0
51.87	4.75	13.5	13.2	4.5	10.0	261	73.0

Longitudinal mass diffusion in the free granule volume was analyzed by Abramov and Terekhin in relation to the problem related to leaching of finely dispersed aluminate sinter [38]. Experimental data on counter leaching of $-1.0 + 0.5 \text{ mm}$ white electrocorundum with $5\% \text{ NaOH}$ at 20°C in 1000 mm high and 60 mm diameter tube reactor indicate a significant deviation from the ideal displacement regime. Experimental values of the longitudinal mixing coefficient were higher than expected.

Slurry bubble column reactor

Gas-liquid bubble columns and three-phase fluidization systems are widely used in industry, particularly chemical and petrochemical industries. Three-phase fluidization describes a gas-liquid-solid flow system in which particles are in motion induced by gas and/or liquid phases. High pressure operations are common in industrial applications of slurry bubble columns for reactions, such as residue hydrotreating, Fischer-Tropsch synthesis and methanol synthesis. The design and scale-up of slurry bubble column reactors require knowledge of the hydrodynamics and heat transfer characteristics. Studies reported in the literature for such characteristics have been limited to ambient conditions. Some details have been reported for high-pressure conditions. The studies conducted under this program by the "Air Products and Chemicals, Inc.", USA examine the effects of pressures and temperatures on some areas pertaining to fundamental hydrodynamics in slurry bubble columns [39]. These areas include single bubble formation in liquid-solid suspensions, gas holdup and maximum bubble size, pressure effect on the flow fields and Reynolds stresses, axial liquid mixing, and heat transfer behavior. Bubble formation from a single nozzle is investigated analytically and experimentally in non-aqueous liquid and liquid-solid suspensions at pressures up to 17.3 MPa.

Pressure hydrometallurgy in environmental protection

Environmental hydrometallurgy refers to both hydrometallurgical waste treatments and hydrometallurgical processes that can replace existing with attendant environmental benefits [40]. In contrast to pyrometallurgical processes the comparatively low temperatures were sometimes equated to low energy demands and lower pollution. The development of TiO_2 or ZrO_2 -supported noble metal nanoparticle catalysts receives considerable attention since many high pressure aqueous-phase catalytic reactions ($>150^\circ\text{C}$, up to 15 MPa) are performed in the presence of such catalysts. The hydrothermal processing was used to treat wastewaters by oxidizing the organic contaminants or ammonia to harmless gases or to convert biomass-derivatives to value-added products [41, 42]. Identified catalysts are based on refractory oxide supports (TiO_2 , ZrO_2) on which the active metallic phase is deposited (e.g. Pd, Pt, Ru, Pd-Re).

Regarding leaching under atmospheric and high pressure, the IME Process Metallurgy and Metal Recycling of the RWTH Aachen University has focused research activities on the treatment of nickel laterite, manganese sulfidic ore in order to obtain nonferrous metals [43–45].

Conclusion

The main advantages of pressure hydrometallurgy are fast kinetics, enhanced selectivity over iron and other dissolved species, enhanced solubilities of reagent gases, and more stable residues as compared to atmospheric processes. New special alloys must be developed to reduce maintenance time of high pressure reactors (autoclave, tube reactor). High pressure leaching as an important part of environmental hydrometallurgy offers a more flexible route in order to recover lost metals from secondary materials, saving resources and energy and especially keeping the environment cleaner. Optimizing gas mass transfer in autoclaves using EKATO Gassing Impeller increases gas mass transfer rates and makes gas utilization better. The use of the tube digester increases alumina extraction and reduces the equipment costs. Although slurry bubble columns are applied in different industrial processing (methanol synthesis) the design and scale-up of slurry bubble column reactors require knowledge of the hydrodynamics and heat transfer characteristics. Because of high production costs the using of equilibrium software (HSC; FactSage) is a new promising way to solve reaction problem on personal computers regarding the hydrometallurgical process. In the future, the planned using of the Artificial Neural Network (ANN) approach in pressure metallurgy will be investigated in order to reduce operational costs, give better modeling accuracy and provide a more successful process optimization

Acknowledgment

Concerning my first steps in pressure hydrometallurgy at the Faculty of Technology and Metallurgy of the University in Belgrade I would like to thank: Profs. D. Vucurovic, R. Vracar, I. Ilic, D. Sinadinovic, Z. Kamberovic and K. Cerovic. For the continuous support in my experimental work in pressure hydrometallurgy my thanks go to Dr. N. Anastasijevic, Outotec, Frankfurt/Main, Germany.

References

- [1] Han, K.N (2003): The Interdisciplinary Nature of Hydrometallurgy, *Metallurgical and Materials Transaction* 34B; 12, 757–767.
- [2] Vracar, R (2010): *Theory and Practice in Production of Nonferrous Metals*, Publisher: Serbian Association of Metallurgical Engineers. Belgrade 2010, 560 (in Serbian language).
- [3] Habashi, F (1971): Pressure Hydrometallurgy: Key to Better and Non-polluting Processes, *Engineering and Mining Journal* 2, 88–95.
- [4] Habashi, F, (2000): *Laboratory Autoclaves for Hydrometallurgical Research*, Extraction & Processing Division, P.R. Taylor, Ed. TMS Nashville, Tennessee, USA, 411–419.

- [5] Tindall, G.P, Muir, D.M (1998): Effect of E_h on the Rate and Mechanism of the Transformation of Goethite into Hematite in a High Temperature Acid Leach Process, *Hydrometallurgy* 47, 377–381.
- [6] Rubisov, D.H, Papangelakis, V.G (2000): Sulphuric Acid Pressure Leaching of Laterites: A Comprehensive Model of a Continuous Autoclave, *Hydrometallurgy* 58, 89–101.
- [7] Canterford, J.H (1979): The Sulphation of Oxidized Nickel Ores”, *International Laterite Symposium*, eds. D.J.I. Evans, R.S. Shoemaker and H.Veltman, SME of AIME, New York, USA, 636–677.
- [8] Arroyo, J.C, Gillespie, J.D, Neudorf, D.A., Weenink, E.M (2002): Method for Leaching Nickeliferous Laterite”, *United States Patent*, No. 6,379,636.
- [9] Papangelakis, V.G, Berk, D, Demopoulos, G.P. (1986): Modelling and Simulation of a Batch Reactor for an Oxygen Pressure Leaching System, *The Metallurgical Society, in Hydrometallurgical Reactor Design and Kinetics*, Bautista, R.G, Wesely, R.J, Warren, G.W, eds., 209–226.
- [10] Tindall, G.P (1998): High Temperature Acid Leaching of Western Australian Laterites, *Doctoral Thesis*, Murdoch University, 1998, pp. 214.
- [11] Klepper, R. (2000): Optimizing Gas Mass Transfer in Autoclaves, *EPD Congress 2000*, Ed. P. R.Taylor, TMS, 549–559.
- [12] <http://www.eibis.com/eibis/eibiswww/eibisdoc/4219de.htm> (2011)
- [13] <http://gttserv.lth.rwth-aachen.de/~cg/Software/FactSage/IndexFrame.htm> (2011)
- [14] Boldt, J.R. (1967): *The Winning of Nickel*, Longmans Canada Limited, Toronto, 10–15.
- [15] Roorda, H.J, Hermans J.M (1981): Energy Constraints in the Extraction of Nickel from Oxide ores (I), *Erzmetall* 34, 82–88
- [16] Baldessari, B.M (1982): Nickel Resource Analysis, *Mining Magazine* 1, 61–66.
- [17] Kar, R.N, Sukla L.B, Swamy K.M, Pachanadikar V.V, and Narayana, K.L (1996): Bioleaching of Lateritic Ore by Ultrasound, *Metallurgical and Materials transactions* 27 B, 351–354.
- [18] Baghalha, M, and Papangelakis, V.G (1998): Pressure Acid Leaching of Laterites at 250 °C: A Solution Chemical Model and its Application, *Metallurgical and Materials Transaction* 29 B, 10, 945–951.
- [19] Habashi, F. (1998): Pressure Hydrometallurgy: Past, Present, and Future. *Proceedings of the 3rd international conference of hydrometallurgy at Kunming, China*, November 1998, 27–34.
- [20] Vracar, R, Stopic, S, Kamberovic, Z. (2001): Processes and Methods in Hydrometallurgy under High Pressures- Achievements and Perspectives, *Journal of Metallurgy* 7, 1, 27–35.
- [21] Dasher, J. (1976): The Energy Picture in Nickel Production, *Mining magazine* 5, 379–389.
- [22] Roorda, H.J, Hermans J.M (1981): Energy Constraints in the Extraction of Nickel from Oxide Ores (II), *Erzmetall* 34, 186–190.

- [23] Jiang, K, Wang, H (2005): Application of Pressure Hydrometallurgy in Nonferrous Metal Industry, EMC 2005, Dresden, 581–589.
- [24] King, M, Schonewille, R (2005): A Mid-Term Report on Falconbridge's 15 Year Technology Plan for Nickel, EMC 2005, Dresden, 935–954.
- [25] Georgiou D., Papangelakis V.G (1998): Sulphuric Acid Pressure Leaching of a Limonitic Laterite: Chemistry and Kinetics, *Hydrometallurgy* 49, 23–46.
- [26] Sobol, S. (1972): Secondary Losses of Nickel and Cobalt during Autoclave Leaching of oxidized Nickel Ore, *Tsvetnye Metally* 45, 28–30.
- [27] Queneau, P.B, Doane, R.E, Cooperrider, M.W, Berggren, M.H, Rey, P. (1984): Control of Autoclave Scaling during Acid Pressure Leaching of Nickel-ferrous Laterite ore, *Metallurgical Transaction* 15 B, 433–440.
- [28] Briceno, A, Ossep-Asare K. (1995): Particulates in Hydrometallurgy: Part I. Characterization of Laterite Acid Leach Residues, *Metallurgical and Materials Transactions* 26 B, 1123–1131.
- [29] Briceno, A and Ossep-Asare, K. (1995): Particulates in Hydrometallurgy: Part II. Dewatering Behavior of Unflocculated Laterite Acid Leach Residues, *Metallurgical and Materials Transactions* 26 B, 1133–1138.
- [30] Briceno, A and Ossep-Asare K. (1995): Particulates in Hydrometallurgy: Part III. Dewatering Behavior of Flocculated Laterite Acid Leach Residues, *Metallurgical and Materials Transactions* 26 B, 1139–1145.
- [31] Avotins V, Ahlschlager S, and Wicker, R. (1979): The Rheology and Handling of Laterite Slurries, Eds: Evans, D., Shoemaker, R., Veltman, H. (New Orleans: Kingsport Press, Kingsport, Tennessee), 611–635.
- [32] Shi, F.N, and Napier-Munn, T.J, (1996): Measuring the Rheology of Slurries using an online Viscosimeter, *International Journal of Mineral Processing* 47, 3–4, 153–176.
- [33] Bhattacharya, I.N, Panda, D, Bandopadhyay, P, (1998): Rheological Behavior of Nickel Laterite Suspensions, *International Journal of Mineral Processing* 53, 4, 251–263.
- [34] Cerpa, A., Garcia-Gonzalez, M.T, Tartaj, P., Requena, J, Garcell, L, Serna, C.J. (1999): Mineral-Content and Particle-size Effects on the Colloidal Properties of Concentrated Lateritic Suspensions, *Clays and Clay Minerals* 47, 4, 515–521.
- [35] Vracar, R, Markovic, S. (1972), Production of Alumina by Bayer Leaching Process of Bauxite under High Temperatures-Characteristics of Leaching Process in Tubular Digestor, *Mining, Geology and Metallurgy* 4, 96.a – 96.d, in Serbian.
- [36] Vracar, R. (1981): Research Projects in the Extractive Metallurgy of Aluminium at TMF Belgrade, *Mining/Metallurgy Quarterly* 28, 239–256.
- [37] Bagaev, S., (1982): The Role of Suspension Mixing in Mass Transfer, *Izv. V.U.Z. Tsvetnye Metall* 2, 75–77.
- [38] Abramov, V., Terekhin, L (1984): Mass Transfer Characteristics during Leaching of Finely Dispersed Aluminate Sinter in a Dense Layer, *Tsvetnye Metall* 12, 36–38.
- [39] Toseland, B, Kornosky, R (2002): Engineering Development of Slurry Bubble Column Reactor Technology, Final Technical Report, 136.
- [40] Doyle, F (2004): Teaching and learning environmental hydrometallurgy, *Hydrometallurgy*, 79, 1–2, 1–14.

[41] Nedyalkova, R., Descorme, C., Besson, M (2010): Catalytic wet air oxidation of succinic acid over monometallic and bimetallic Au based catalysts: influence of the preparation method, *Stud.Surf.Sci.Cat.* 175, 177.

[42] Minh, D., Gallezot, P., Besson, M. (2007): Degradation of olive oil mill effluents by catalytic wet air oxidation: 2- Oxidation of p-hydroxybenzoic and p-hydroxyphenylacetic acids over Pt and Ru supported catalysts, *Appl. Catal. B, Env.*, 73, 236.

[43] Stopić, S, Friedrich, B, Anastasijević, N. (2004): Kinetics of high pressure leaching of the nickel lateritic ore, *Pressure Hydrometallurgy*, Eds. M.J.Collins and V.G.Papangelakis, 2004, 247–258.

[44] Havlik, T., Friedrich, B, Stopić S, (2004): Pressure leaching of EAF dust with sulphuric acid, *Erzmetall*, 57, 2, 113–120.

[45] Havlik, T, Turzakova, M, Friedrich, B., Stopic, S. (2005): Atmospheric leaching of EAF dust with diluted sulphuric acid, *Hydrometallurgy* 77, 41–50.

HIDROMETALURGIJA PRI VISOKIM PRITISCIMA, NOVA ŠANSA ZA PROCESE KOJI NE ZAGAĐUJU ŽIVOTNU SREDINU

OBLAST: Hemijske tehnologije

Sažetak:

Širok spektar hidrometalurških procesa obećava različite mogućnosti industrijske primene u nameri da poboljša zaštitu životne sredine u tradicionalnoj proizvodnji metala ili da zameni pirometalurške procese, kod kojih su emisije gasova i visok sadržaj formiranih metala (As, Cr, Pb) postale nedopustive. Glavna prednost hidrometalurgije pri visokim pritiscima je kinetika procesa, brzo rastvaranje metala i povećana selektivnost prevođenja osnovnih metala u rastvor u odnosu na železo i druge prateće metale. Početkom prošlog veka, nezavisno jedan od drugog, Ipatieff i Bayer u Sankt Peterburgu izvodili su početne aktivnosti vezane za hidrometalurške operacije (rastvaranje, precipitacija, dobijanje metala). Postepeno industrijska primena započela je vezano za metalurgiju aluminijuma i nikla. Dodatno za nikel i aluminijum, luženje pri visokim pritiscima iz ruda i sekundarnih sirovina je uspostavljeno za širok spektar drugih metala (zlato, cink, molibden, germanijum). Luženje pri visokim pritiscima u kombinaciji sa drugim metalurškim operacijama (cementacija, precipitacija, solvent ekstrakcija i dobijanje metala elektrolizom) obezbeđuje odgovarajuću tehnologiju vraćanja metala u industrijski proces, čuvajući energiju i resurse, i čineći životnu sredinu još čistijom. Čini se da bi u budućnosti hidrometalurgija pri visokim pritiscima mogla biti veoma važan ključ za bolje i čistije procese u proizvodnji metala.

Ključne reči: visok pritisak, hidrometalurgija, metal, zaštita životne sredine

Datum prijema članka: 05. 05. 2011.

Datum dostavljanja ispravki rukopisa: 15. 05. 2011.

Datum konačnog prihvatanja članka za objavljivanje: 17. 05. 2011.

MODELOVANJE I PROJEKTOVANJE FILTARA SA POVRŠINSKIM TALASIMA I NJIHOVA PRIMENA U VOJNE SVRHE

Hribšek F. Marija, Ristić S. Slavica, Radojković Ž. Bojana,
Filipović Lj. Zoran, Institut Goša, Beograd

UDC: 621.372.852.1

OBLAST: Elektronika

Sažetak:

U radu su dati osnovni principi rada PAT filtara, materijali i tehnologije primenjeni u njihovoj proizvodnji. Posebna pažnja posvećena je širokoj i raznovrsnoj primeni filtara s površinskim akustičkim talasom u procesiranju signala, telekomunikacijama i u oblasti hemijskih senzora, sa naglaskom na primene u vojne svrhe. Prikazan je originalni metod koji su autori razvili za modeliranje i predikciju karakteristika PAT filtara. Mogućnosti ovog metoda su ilustrovane na primeru hemijskih senzora za detekciju bojnih otrova. Projektovan je i izrađen PAT filter PAT-FPO, koji je osnova za hemijski senzor specijalne namene.

Ključne reči: površinski akustički talas, PAT filter, PAT senzor, projektovanje, modeliranje.

Uvod

Filtri sa površinskim akustičkim talasom – PAT (surface acoustic wave – SAW) imaju važnu ulogu u modernim elektronskim i telekomunikacionim sistemima zbog specifičnih performansi i kompatibilnosti sa ostalim plenarnim tehnologijama [1–29].

Poslednjih tridesetak godina ovi filtri dostigli su visok stepen razvoja i značajne civilne i vojne primene. Prvi PAT filtri našli su primene u radarima, a zatim u telekomunikacionim uređajima, sistemima za procesiranje signala, te u mobilnim radio i telefonskim sistemima [5–9]. Poslednjih decenija prošlog veka PAT filtri su počeli da se primenjuju kao senzori. Danas se već prave PAT senzori visokog kvaliteta za merenje temperature, pritiska, mehaničkog napona, prisustva hemijskih i bioagenasa [10–29]. Među njima značajno mesto zauzimaju senzori prisustva supstanci kao što su bojni, a naročito nervni otrovi, te senzori bioloških agenasa kao što su antraks, i drugi bacili [13, 16, 21, 22].

Napomena: Ovaj rad je finansijski podržan od Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije u okviru projekta TR 11026.

Prednosti PAT filtara nad klasičnim LC filtrima, koji obavljaju istu funkciju, jesu u tome što su mnogo manjih dimenzija (deset i više puta), veoma su pouzdani i imuni na zračenja, pasivni i bežično povezani. PAT elementi rade u frekventnom području od 10 MHz do oko 5 GHz kao filtri propusnici opsega, linije za kašnjenje sa konstantnim i disperzivnim kašnjenjem, prilagođeni filtri, kompresori, ekspanzori, korelatori i konvolveri [6, 7, 8].

Pobuđivanje površinskog akustičkog talasa električnim signalom u piezoelektričnoj podlozi pomoću tzv. interdigitalnih pretvarača otkrili su White i Voltmer 1965. godine [2]. Osnovni PAT element sastoji se od dva interdigitalna pretvarača (IDP) postavljena na podlogu od piezoelektričnog materijala, kao što je npr. kristal kvarca ili litijum niobata -LiNbO₃. Interdigitalni pretvarač sastoji se od dva niza učešljanih metalnih elektroda i služi za pretvaranje električnog signala u akustički talas i obrnuto. Geometrija i broj elektroda određuju centralnu učestanost PAT filtra. Tehnologija PAT elemenata obuhvata izradu tankih filmova i proces fotolitografije koji je potpuno podudaran proizvodnji integriranih kola što olakšava celokupan način proizvodnje ovih filtara.

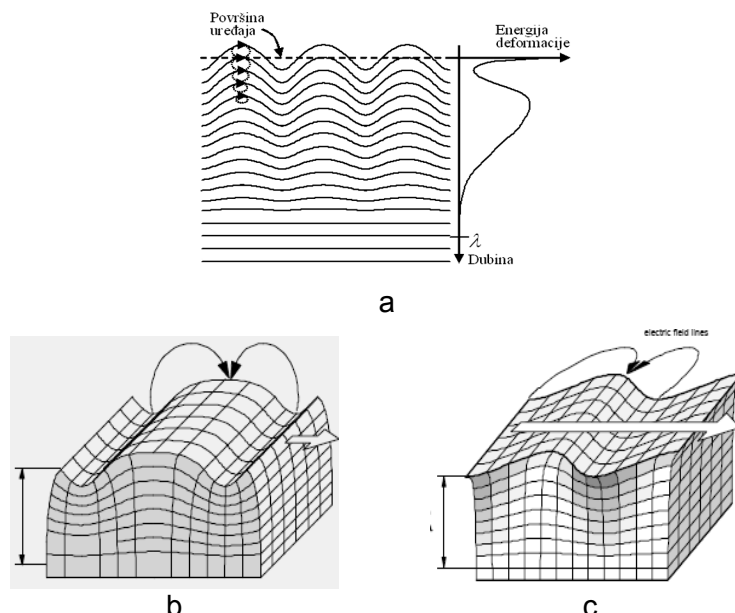
U radu su, pored uvodnih napomena, dati i osnovni principi rada PAT filtara, materijali i tehnologije primenjeni u njihovoj proizvodnji. Posebna pažnja posvećena je širokoj i raznovrsnoj primeni filtara s površinskim akustičkim talasom u procesiranju signala, telekomunikacijama i u oblasti hemijskih senzora. Prikazan je originalni metod koji su autori razvili za modeliranje i predikciju karakteristika PAT filtara. Mogućnosti ovog metoda ilustrovani su na primeru hemijskih senzora za detekciju bojnih otrova. Projektovan je i izrađen PAT filter PAT-FPO, koji je osnova za hemijski senzor specijalne namene.

Površinski akustički talasi i piezoelektrični materijali

Kretanje površinskog akustičkog talasa, koje je otkrio lord Rejli i opisao njegova svojstva i ponašanje, ilustrovano je na slici 1.

Ova vrsta talasa je i dobila ime po njemu – Rejljevi talasi. Oni, poput talasa na površini vode i seizmičkih talasa, imaju i longitudinalnu i transversalnu komponentu, što znači da čestice materijala imaju eliptične putanje (sl. 1).

Osim klasičnih Rejljevih talasa, mogu se javiti i neke druge vrste površinskih talasa, zavisno od materijala, načina njegovog sečenja i graničnih uslova. Transverzalni ili smičući talasi mogu da budu polarisani tako da se čestice podloge pomeraju normalno na podlogu kao kod Rejljevog talasa (sl. 1b) (vertikalni talas). Transverzalni talas može da bude polarisan i tako da se čestice kreću paralelno sa podlogom (horizontalni talas – shear horizontal SH-SAW). Sreću se i tzv. cureći PAT (leaky – LSAW) i Love talasi, koji su naročito pogodni za primenu u oblasti biosenzora [4, 16, 21, 22].



Slika 1 – a) Ilustracija promene amplitude kod PAT elemenata, b) Rayleigh talasi, c) smičući vertikalni talas
 Figure 1 – a) Illustration of the amplitudes of SAW, b) Rayleigh waves, c) shear waves

Brzina prostiranja površinskih talasa je od 3.000 do 5.000 m/s, pet redova veličine manja od brzine elektromagnetnih talasa i oni spadaju u najsporije talase u čvrstim telima. Zbog toga pomoću njih mogu da se dobiju linije za kašnjenje reda mikrosekundi vrlo malih dimenzija, u odnosu na linije za kašnjenje elektromagnetskih talasa. Sva energija talasa (95%) praktično je vezana za površinski sloj materijala debljine do jedne talasne dužine. Amplituda ovih talasa je reda nanometra, a talasne dužine su im u opsegu od $1 \cdot 10^{-6}$ m do $1 \cdot 10^{-4}$ m. Tipični PAT filtri rade na frekvencijama od $10 \cdot 10^6$ Hz do oko $5 \cdot 10^9$ Hz.

Piezoelektrični materijali se najčešće koriste kao podloge za izradu PAT filtra. Piezoelektrični efekat je karakterističan za ove materijale i predstavlja pojavu naelektrisanja na površini materijala kada je on izložen dejstvu mehaničkog naprezanja. Taj proces je reverzibilan: primenom određenog električnog polja na piezoelektrični materijal stvara se mehaničko naprezanje. Kod piezoelektričnih PAT elemenata primenjuje se promenljivo (oscilujuće) električno polje da bi se proizveo mehanički talas koji se prostire kroz piezoelektričnu podlogu, a zatim se on ponovo prevodi u električni signal koji se registruje.

Pri izboru materijala za PAT filtre važno je da materijal ima veliki koeficijent elektromehaničke sprege, značajnu faznu brzinu površinskog ta-

lasa i nizak temperaturski koeficijent [1–3, 10, 12, 15, 20, 28, 29]. U tu svrhu najčešće se koristi kvarc (SiO_2), koji je temperaturno stabilan. Zatim se koriste: litijum-niobat (LiNbO_3) i litijum-tantalat (LiTaO_3), galijum-arzenid (GaAs) i galijum-fosfat (GaPO_4 – primenljiv čak do 1000°C), silicijum-karbid (SiC), langasit (LGS – $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$, takođe pogodan za visoke temperature), cink-oksidi (ZnO), aluminijum-nitrid (AlN) i aluminijum-fosfat (AlPO_4), litijum-tetraborat ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$), olovo-cirkonijum-titanat (PZT) i poliviniliden-fluorid (PvDF).

Frekvencija na kojoj rade PAT filtri na klasičnoj piezoelektričnoj podlozi je oko 1 GHz, a ograničenja su najčešće uslovljena tehnologijom izrade interdigitalnih pretvarača. Povećanje radne frekvencije dobija se korišćenjem drugih materijala za podlogu kao što su: silicijum, safir, SiC ili dijamant. Dijamant ima najveću brzinu prostiranja akustičkih talasa ($V_L=17,52\cdot 10^3$ m/s i $V_T=12,82\cdot 10^3$ m/s, nije piezoelektričan ali se koristi u kombinaciji sa tankim filmom od piezoelektričnog materijala. AlN ima brzinu prostiranja $V_L=11,37\cdot 10^3$ m/s i $V_T=6,09\cdot 10^3$ m/s, dok kvarc ima $V_L=5,96\cdot 10^3$ m/s i $V_T=3,31\cdot 10^3$ m/s.

PAT filtri imaju relativno nisku cenu zato što se za njihovu proizvodnju koriste tehnološki postupci već dobro razvijeni u izradi integrisanih kola: fotolitografija i metalizacija. Proizvodnja počinje čišćenjem i glačanjem piezoelektrične podloge, na koju se zatim ravnomerno nanese sloj metala (obično aluminijuma), a potom i sloj fotorezista sa kojim se peče da bi fotorezist očvrstnuo. Posle toga se površina prekrije maskom kod koje neprovidni delovi predstavljaju mesta na kojima treba da ostane metal (metalne elektrode) i izlaže se ultraljubičastom zračenju. Ozračeni deo površine se hemijski promeni tako da on može da se ukloni pomoću razvijaača, a zatim da se ukloni metal koji je bio ispod njega. Na kraju se ukloni i preostali fotorezist.

Za izradu elektroda obično se koristi aluminijum, ali ako je za PAT filter bitno da je otporan na koroziju onda se koristi zlato. U tom slučaju se, zbog dobrog prijanjanja na podlogu prvo nanosi hrom ili titanijum [15].

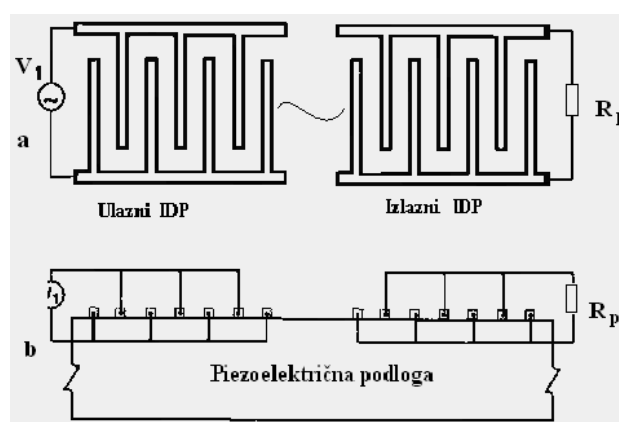
Princip rada PAT filtera

Tipični PAT filter sadrži jedan ili više pretvarača električne u mehaničku energiju i obrnuto. Ti pretvarači se izrađuju u vidu dva niza metalnih elektroda u obliku češlja čiji su zupci-elektrode međusobno uvučeni jedni u druge (sl. 2a i 2b). Širine elektroda su reda veličine od dela mikrometra do nekoliko mikrometara. Period elektroda (rastojanje između dve susedne elektrode) je konstantan i definiše talasnu dužinu PAT. Ovo rastojanje je jednako polovini talasne dužine površinskog akustičkog talasa. Najčešće je širina elektroda jednaka njihovom međusobnom rastojanju, jer je tada koeficijent pretvaranja električne energije u mehaničku najveći.

Pomoću interdigitalnih pretvarača se prave različiti PAT filteri koji mogu da se svrstaju u dve grupe:

1. transversalni PAT filteri sa progresivnim talasom – To su linije za kašnjenje. Kod njih se kao izlazna veličina očitava vreme kašnjenja (propagacije) ili faza izlaznog napona;

2. PAT filteri sa stojećim talasima kod kojih se kao izlazna veličina očitava sopstvena frekvencija, odnosno frekvencija stojećeg talasa koji se formirao. To su filteri rezonantnog tipa.



Slika 2 – Šematski prikaz transversalnog PAT filtra tipa linije za kašnjenje

Figure 2 – Schematic presentation of the transversal SAW filter, delay line type

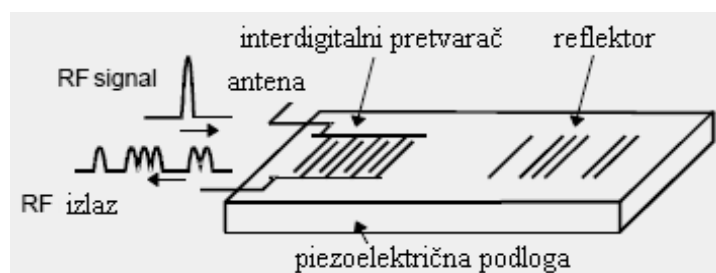
Mehanizam funkcionisanja IDP-a može se objasniti na sledeći način. Prostoperiodični napon V_1 učestanosti f priključen na elektrode ulaznog pretvarača stvara električno polje koje, zbog piezoelektričnih osobina podloge, izaziva u podlozi mehanički napon usled čega se javlja talasno kretanje čestica duž površine podloge u oba smera od pretvarača. Ovaj mehanički (akustički) talas kada stigne do izlaznog pretvarača svojim mehaničkim naponom izaziva odgovarajuće električno polje koje stvara odgovarajući napon na potrošaču R_p (sl. 2).

Amplituda napona na potrošaču zavisi pre svega od odnosa talasne dužine pobudnog napona i rastojanja centara susednih elektroda d . Signal čija je talasna dužina $2d$ imaće najveću amplitudu dok će amplitude ostalih biti utoliko manje ukoliko su po učestanosti više udaljene od signala najveće amplitude. To znači da se PAT element u suštini ponaša kao filter propusnik opsega učestanosti.

Kod ovih elemenata od uniformnosti rastojanja između elektroda zavisi oblik fazne karakteristike, a od broja i dužine preklapanja elektroda oblik amplitudske karakteristike elementa. Ako pretvarači imaju mali broj

uniformno raspoređenih elektroda PAT element će biti širokopojasna linija za kašnjenje sa konstantnim kašnjenjem. Veličina kašnjenja određena je rastojanjem prvih elektroda pretvarača. Disperzivna linija za kašnjenje dobija se ako je jedan pretvarač uniforman sa malim brojem elektroda, a drugi sa elektrodama čije rastojanje linearno opada ili raste.

Druga vrsta PAT elemenata koristi takođe interdigitalne pretvarače, ali oni služe samo kao pretvarači za pobuđivanje i ekstrakciju signala, dok se željeni oblik karakteristike prenosa postiže na drugi način. Kod ovih elemenata, pored prostiranja, koristi se i refleksija talasa od malih prepreka na površini podloge (sl. 3). Prepreke se mogu praviti ili nanošenjem tankog sloja provodnog ili neprovodnog materijala na površnu podloge ili ukopavanjem plitkih žlebova u podlogu. Koeficijent refleksije, tj. pretvaranje pobudne snage površinskog talasa u reflektovani, zavisi od odnosa visine prepreke i talasne dužine. Rasipanje i konverzija u zapreminske (parazitne) talase su veći ako je refleksija jača. Zato se potpuna refleksija površinskih talasa može ostvariti samo sabiranjem fazno sinhronizovanih slabih refleksija od većeg broja malih prepreka. Na ovom principu rade PAT rezonatori i RAC filtri.



Slika 3 – Šematski prikaz refleksionog PAT filtra
Figure 3 – Schematic presentation of the reflection SAW filter

Pat filtri u obradi signala i telekomunikacijama

Linearni i nelinearni PAT elementi koriste se za realizaciju mnogih korisnih funkcija u procesiranju signala kao što su konvolucija, korelacija, kompresija i ekspanzija signala, te prilagođeno filtriranje.

Implementacijom Furijeove transformacije PAT kolima i kombinacijom više Furijeovih PAT procesora omogućeno je dobijanje vrlo složenih analognih signal procesora. Pokazano je da se njihovom primenom mogu realizovati vrlo sofisticirane funkcije u obradi signala, kao što su spektralna analiza, spektralna analiza, promenljivo kašnjenje, te da su našli značajnu primenu u oblastima kao što su radari s kompresijom impulsa (Doplerovi procesori itd.) ili komunikacije u proširenom spektru (disperzivne linije za kašnjenje).

Razvijeni su mnogi PAT filtri za primene u radarima za kompresiju impulsa, oscilatorima, televizijskim aparatima za sva tri tipa prenosa i radio-sistemima. Osamdesetih godina prošlog veka PAT filtri su našli ogromnu primenu u mobilnim radio-sistemima i mobilnoj telefoniji. Sada se godišnje proizvodi preko tri milijarde komada različitih vrsta ovih filtara. Zbog PAT elemenata koji se koriste u savremenim telekomunikacijama, ova oblast je i dalje u intenzivnom razvoju zahvaljujući njihovim dobrim osobinama. Posebno veliko interesovanje vlada za primenu ovih komponenata u savremenim vojnim telekomunikacijama.

Kod radio-senzora koriste se i transverzalni i rezonatorski PAT elementi, ali se u oba slučaja praktično koristi refleksija. Ovde se koriste širokopojasne linije za kašnjenje, disperzivne linije za kašnjenje i PAT rezonatori. PAT element može ujedno da baš bude i senzor ili može samo da služi za prenošenje informacije koja je dobijena od samog senzora.

Postoji više različitih tipova transformacije signala, kao što su Hadamardova ili Fresnelova, koje se mogu implementirati PAT elementima ali su za primenu u tehničkim sistemima najinteresantniji procesori za analognu Furijeovu transformaciju. Furijeovi PAT procesori zasnivaju se na upotrebi ekspandora i kompresora (čirp filtri) koji dekomponuje Furijeovu transformaciju u tri računске operacije. Glavni značaj ovako primenjenog algoritma je što omogućuje da se zahtevana konvolucija može efikasno izvoditi PAT disperzivnim linijama za kašnjenje – čirp filtrima. PAT komponente su komercijalno raspoložive i omogućuju realizaciju PAT procesora sa propusnim opsegom većim od $125 \cdot 10^6$ Hz i više od 1024 transformacionih tačaka [1, 7, 23]. U poređenju sa digitalnim FFT procesorima, analogni PAT procesori nude širokopojasni rad u realnom vremenu, malu potrošnju i imaju male dimenzije.

Analogni procesori signala sa PAT komponentama nalaze značajnu primenu u vojnim telekomunikacijama. Pre svega, primenjuju se u radarima i sonarima, potom za spektralnu i mrežnu analizu, te za sintezu različitih signala [6–9, 13]. Sinteza signala otvara mogućnost primene u sistemima širokopojasnih komunikacija sa proširenim spektrom.

Pored primene za izračunavanje tzv. vremenske Furijeove transformacije, PAT procesori mogu se upotrebiti i za prostornu Furijeovu transformaciju kao kod sonara, npr. za uobličavanje snopa i kompresiju impulsa u pasivnim prislušnim sistemima, te za dobijanje slike morskog dna. Hibridni PAT, digitalni procesori omogućuju obradu signala frekventnog opsega do $1 \cdot 10^8$ Hz i trajanja $100\text{--}200 \cdot 10^{-6}$ s [8]. U takvim hibridnim sistemima do 100 snopova može biti upotrebljeno u slušnom opsegu od 10 Hz do $2 \cdot 10^3$ Hz. Upotrebom PAT čirp filtara sa propusnim opsegom $B = 40 \cdot 10^6$ Hz i $T = 1 \cdot 10^{-4}$ s može se ostvariti rezolucija od 2 Hz na 1000 tačaka.

PAT procesorska tehnika može se korisno upotrebiti za dvodimenziono snimanje terena radarom. Primena radara uključuje elektronski podrža-

no merenje za brzu spektralnu analizu dolaznih signala. Upotrebom kombinacije više PAT Furijeovih procesora sa drugim elementima kola moguće je realizovati sofisticirane funkcije u obradi signala kao što su npr. kepsstralna analiza, programabilna korelacija ili filtriranje propusnikom opsega s promenljivim opsegom, koje imaju značajne vojne primene.

Sposobnost filtriranja ovakvom strukturom PAT procesora realnog vremena u vojnim sistemima komunikacije s proširenim spektrom može se porediti sa onom koja se ostvaruje sa prijemnicima direktne sekvence (DS) bez filtera za prigušenje. Tako, konvencionalni DS prijemnik zahteva pojačanje u opsegu 255–511, za istu verovatnoću greške, kao PAT procesor sa procesnim pojačanjem 31[8]. PAT procesori u sistemima zaštite od ometanja mogu zahtevati dinamički opseg od 80 dB za opsluživanje varijacija u nivou ulazne snage.

Veoma značajno mesto u obradi signala u komunikacionim sistemima imaju fazno kodirani PAT filteri. Oni služe za generisanje i obradu kodiranih signala u vremenskom domenu. Najpoznatiji i najčešće korišćen ovakav signal je binarni PSK (fazno kodirani – phase shift keyed) signal. Zahvaljujući fleksibilnosti izrade PAT pretvarača može se ostvariti kodiranje sa proizvoljnim vrednostima faze.

U PAT tehnologiji mogu se napraviti i složena kola sa više ulaza i izlaza pogodna za izvođenje kompleksnih operacija sa više ulaznih i izlaznih promenljivih, kao što je linearna transformacija matrica. Primer takvog složenog kola je u procesiranju slike u tzv. Hadamardovom transformatoru video signala čiji je rad definisan zadatom matričnom jednačinom [Hen73].

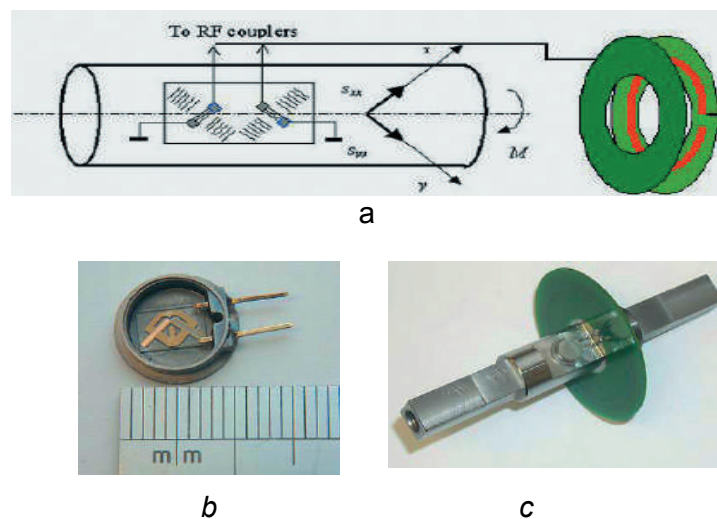
Pat filteri u senzorima različitih fizičkih veličina

Senzori različitih fizičkih i hemijskih veličina razvijaju se za potrebe industrije, poljoprivrede, ekologije, medicine, za mirnodopske i vojne svrhe. PAT filteri su najznačajnija komponenta posebnih tipova senzora za merenje različitih neelektričnih fizičkih veličina. Princip rada PAT senzora se zasniva na činjenici da merena veličina (temperatura, pritisak) utiče na prostiranje talasa tako što manje ili njegovo slabljenje ili kašnjenje. Ako se senzor zagreva, isteže ili opterećuje, menjaju se dužina podloge i njene elastične konstante. Ove promene izazivaju promene faze i brzine kretanja talasa, koje pak izazivaju odgovarajuće promene centralne učestanosti, slabljenja i kašnjenja.

Prvi PAT senzori su napravljeni za merenje pritiska. Razvoj i primena PAT senzora u medicini i zaštiti životne sredine naročito je porasla početkom 21. veka. Među njima značajno mesto zauzimaju senzori prisustva hemijskih supstanci kao što su bojni, a naročito nervni otrovi, i senzori bioloških agenasa. Posebna pogodnost PAT senzora je mogućnost

bežičnog pristupa (radio senzori), pa se mogu koristiti za daljinski monitoring i merenja, posebno na nepristupačnim mestima. PAT senzori se koriste za bežično merenje temperature, pritiska, mehaničkih napona, uvijanja, ubrzanja, trenja između gume i puta i vlažnosti. PAT senzori koji se nazivaju identifikacioni markeri (ID marker) koriste se za identifikaciju pokretnih objekata i delova. Ovi senzori rade i na visokim temperaturama i u okruženjima opasnim po čoveka. PAT senzori imaju kompaktnu strukturu, malu težinu i zapreminu, izvrsnu stabilnost, veliku osetljivost, nisku cenu izrade u velikim serijama, veoma kratko vreme odziva. Zahvaljujući načinu proizvodnje koji je kompatibilan sa CMOS i MEMS tehnologijom, mogu se ugraditi u kompleksne sisteme merenja i monitoringa. Interesantno je da se u sistemima kontrole zagađenja isparljivim organskim materijalima u prostorijama gde se prave satelitske i vasijske letilice u SAD, NASA, koriste senzorski sistemi bazirani na PAT sensorima.

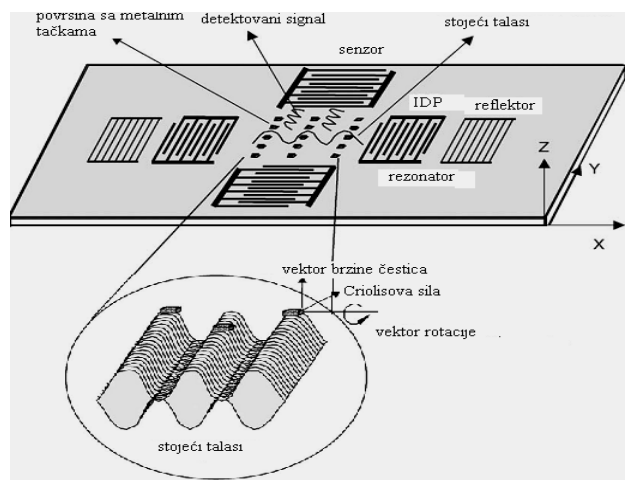
Do sada je instalirano više PAT identifikacionih sistema u industriji vozila, kontroli saobraćaja, za praćenje kontejnera za prevoz robe i za pakovanje proizvoda. U automobilima i kamionima koristi se do sedam bežičnih sistema i 15 PAT senzora po vozilu za merenje uvijanja, pritiska i temperature: tzv. EPAS senzor uvijanja, senzori uvijanja svih osovina (menjača, osovina točkova itd.), sistem za monitoring pritiska u gumama (TPMS) i trenja između gume i kolovoza. Na slici 4 prikazan je PAT senzor za merenje torzije, koji se može instalirati na sva bojna vozila, transportere, tenkove ...



Slika 4 – Šematski prikaz (a) i fotografije PAT senzora (b) i (c) za merenje torzije
Figure 4 – Schematic presentation (a) and photos of SAW sensors (b) and (c) for torsion measurements

Mehanička naprezanja se mere na taj način što se komplet od tri PAT senzora postavlja tako da su dva na delovima koji trpe naprezanja, na primer osovine, a jedan na referentnom položaju. Deformacije koje prate podlogu prenose se na senzore, koji se sa jedne strane šire, a sa druge komprimuju. Zbog toga se menja srednja frekvencija izlaznog signala. Signal se prenosi bežično. Obrada se vrši kompariranjem srednjih frekvencija i amplituda signala. Monitoring trenja između gume i kolovoza je ključan za stabilizaciju vozila u kritičnim situacijama. Pored toga, radio PAT senzori koriste se i za identifikaciju vozila, praćenje temperature izduvnog lonca i detekciju izduvnih gasova. PAT senzori koriste se za merenje temperature kočnica šinskih vozila, visokonaponskih vodova i rotora asinhronih motora velike snage. Za merenje temperature u visokim pećima koriste se radio PAT senzori na langasitu sa zlatnim elektrodama.

PAT senzori su našli brojne različite primene u industriji kao delovi složenih sistema za bežično, beskontaktno i nedestruktivno merenje i monitoring. Interesantna je primena [31] PAT filtara u žiroskopima, koji imaju i vojnu i civilnu primenu. Pat žiro senzori se prave na 128° Y-sečenog LiNbO_3 (sl. 5). Koriolisove sile generišu sekundarne površinske akustičke talase koji su ortogonalni sa primarnim talasima.



Slika 5 – Žiroskopski PAT senzor
Figure 5 – SAW gyroscope sensor

Hemijski PAT senzori

Hemijski senzori na bazi PAT elemenata predstavljaju jednu veliku grupu senzora koja se može razvrstati prema tome da li se koriste za detekciju gasovitih ili tečnih reagenasa, na kojoj podlozi su rađeni [4, 10, 11, 18–25, 28, 29].

Rad gasnog transversalnog PAT senzora (sl. 6) zasniva se na reverzibilnoj apsorpciji gasa u naneti osetljivi materijal, najčešće polimer. Osetljivost ovih senzora je velika jer registruju promene mase na površini reda $1 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m}^2$.

Električni signal priključen na ulazni IDP prouzrokuje pojavu površinskog akustičkog talasa koji se kreće u oba smera od pretvarača po površini podloge. Zbog toga se na ivice podloge nanosi materijal koji apsorbira akustički talas, koji ide prema ivici i koji bi mogao od nje da se odbije i prouzrokuje smetnje. Amplituda talasa opada sa dubinom po eksponencijalnom zakonu (sl. 1), tako da je praktično cela energija talasa sadržana u gornjem sloju podloge debljine jedne talasne dužine pobudnog signala.



Slika 6 – Hemijski PAT senzor
Figure 6 – Chemical SAW sensor

Izlazni signal je napon na opterećenju izlaznog IDP-a. Masa i viskoznost tankog sloja utiču na promenu brzine i slabljenja akustičkog talasa. Tanki sloj polimera apsorbira gas tako da će se srazmerno količini apsorbovanog gasa dodatno promeniti brzina i faza akustičkog signala. Interdigitalni pretvarači su sa uniformno raspoređenim elektrodama istih dužina. Rastojanje između elektroda je jednako širini elektroda. Broj elektroda i njihova dužina određuju ulaznu otpornost IDP-a, a samim tim i parametre mreže za prilagođenje na ulaznim i izlaznim električnim priključcima. Prilagođenje na otpornost opterećenja odnosno generatora projektuje se na centralnoj učestanosti filtra f_0 . Minimalno slabljenje jednog IDP-a u uslovima prilagođenja iznosi 6 dB. Talasna dužina koja odgovara centralnoj učestanosti je jednaka rastojanju centara elektroda istog polariteta. Centralna frekvencija i propusni opseg su određeni geometrijom IDP-a i osobinama piezoelektrične podloge [23, 26, 28].

Piezoelektrična podloga je najčešće kvarc. Hemijski senzori rade na centralnoj frekvenciji oko $1 \cdot 10^8 \text{ Hz}$. Brzina prostiranja i slabljenje površinskih akustičkih talasa zavisi od viskoznih i elastičnih osobina osetljivog sloja na površini podloge, kao i od njegove mase. Ove osobine se menjaju sa količinom apsorbovane supstance koja je u kontaktu sa osetljivom površinom. Osetljivost senzora je srazmerna kvadratu centralne frekvencije.

Senzori obično imaju ugrađene grejne elemente uz pomoć kojih se vrši desorpcija.

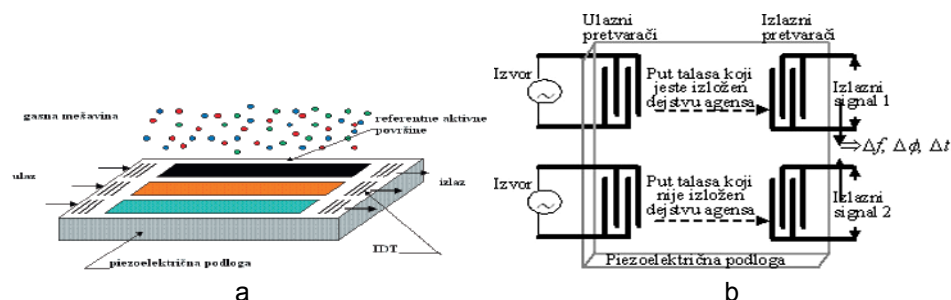
Proizvođači hemijskih senzora za specijalne namene koriste umesto kvarca podloge od GaAs, LiNbO₃, LiTaO₃, i GaP. Izrađuju se senzori koji rade pri veoma visokim temperaturama i preko 1000°C. Uređaji su prenosivi i opremljeni softverom za dobijanje podataka u realnom vremenu. Hemijski osetljivi sloj se obično izrađuje od čistih ili pomešanih plemenitih metala, različitih polimera, u veoma tankom filmu sa debljinom reda nekoliko nm.

Selektivnost senzora zavisi od izbora polimera. Izbor optimalnog polimera za odgovarajući gas je jedan od osnovnih zadataka proizvođača hemijskih PAT senzora.

Rezonatorski tip senzora je novijeg datuma u odnosu na transversalni koji se češće primenjuje. Prednosti rezonantnih PAT senzora u odnosu na one sa linijom za kašnjenje je to što je kod njih bolji faktor dobrote Q, slabije prigušenje, niži šum, manja zapremina i cena.

Problem kod PAT senzora oba tipa je što su podložni uticaju mnogih faktora sredine, kao što su promene spoljašnje temperature i vlažnosti, oksidacija, električni i mehanički šum. Zbog toga se često koristi diferencijalni način merenja sa referentnim senzorom u istim ostalim uslovima, ali na koji ne utiče merena veličina. Kao izlazni podatak koristi se razlika frekvencija električnih signala sa izlaznih pretvarača mernog i referentnog senzora, ili razlika njihovih faza, ili razlika vremena propagacije ova dva signala. Na taj način povećava se osetljivost senzora i eliminiše dejstvo nekih neželjenih faktora (npr. fluktuacije temperature). Na slici 7 prikazana je šema principa rada transversalnog, diferencijalnog PAT senzora za a) istovremenu detekciju tri različita gasa i b) PAT senzor sa dve linije za kašnjenje.

Ulazni, odnosno izlazni pretvarač kod bilo kog od ova dva tipa senzora, ne mora da bude direktno vezan za izvor, već se može napajati preko antene sa udaljenog izvora. Na taj način dobijaju se radio PAT senzori pogodni za daljinska merenja, što je naročito pogodno kada treba postaviti senzor na mesto koje je teško pristupačno ili u surove uslove okoline (visoka temperatura, otrovna sredina).



Slika 7 – Transverzalni PAT senzor diferencijalnog tipa
Figure 7 – Differential type transversal SAW sensor

Prvi hemijski senzor napravljen je 1979. godine. Kao primer dokle se stiglo sa razvojem hemijskih senzora na bazi PAT elemenata, navodi se deo proizvodnog programa Sandia National Laboratories, koji su još pre desetak godina razvili senzore za detekciju i identifikaciju preko 14 organskih komponenti sa sigurnošću od 98% i tačnošću od 96%, za više od 21 smeše sa po sedam komponentenata [18].

Savremeni trend razvoja hemijskih senzora uključuje korišćenje nanotehnologija. Na primer, na podlogu od kvarca nanosi se sloj SiO_2 , za izolaciju elektrode od sloja ugljeničnih nanocevi koji je aktivan senzorski sloj. Sloj od fullerena koristi se za detekciju organskih isparenja. Nanotehnologije su primenjene i pri izradi senzora za vodonik koji imaju osetljivi sloj sačinjen od amornog TiO_2 dopiranog koloidnim zlatom, sol-gel tehnologijom na podlozi $64^\circ \text{YX LiNbO}_3$ [25].

U novije vreme razvijaju se višeslojni hemijski senzori koji imaju veću osetljivost i mogućnost istovremene detekcije različitih reagenasa i istovremenu upotrebu u gasnim i tečnim sredinama.

U prenosivim uređajima za detekciju hemijskih reagenasa obično ima više senzora sa različitim aktivnim premazima, koji istovremeno mogu da detektuju različite supstance (sl. 7a). Osim identifikacije, oni pokazuju i koncentraciju. Pored industrijske i vojne primene, ovi senzori su nezamenljivi u ekološkom monitoringu. Na slici 8 dati su primeri komercijalnih senzora na bazi PAT elemenata [16, 18, 25].

PAT senzori bojnih otrova

Hemijski bojni otrovi su snažno oružje i najčešće ne mogu biti detektovani golim okom kao klasično oružje. Zbog toga je veoma bitno koristiti senzore koji mogu da ih detektuju pre nego što živa sila oseti delovanje otrova.

PAT senzori su našli široku primenu u detektorima za brzo i precizno otkrivanje i identifikaciju hemijskih bojnih otrova [1, 11, 16, 18–24, 28, 29]. Performanse detektora na bazi PAT senzora razlikuju se od proizvođača. Dinamički opseg tipičnih PAT detektora kreće se približno od 1 pikogram do 1 mikrogram hemijskog agensa, u kontrolisanom temperaturnom opsegu, jer za temperature izvan radnog režima dolazi do promene fiziko-hemijskih osobina polimernog sloja PAT senzora.

Firma Microsensor Systems Inc. proizvodi detektore bojnih otrova na bazi PAT tehnologije. Primer HAZMATCAD Plus™ (slika 8a) je senzor koji otkriva plikavce, nervne i krvne bojne otrove. Nervne otrove identifikuje u koncentracijama od 0.04 do 0.14 ppm za 20 s, kada radi u brzom režimu, ili u koncentracijama od 0.01 do 0.03 ppm za 120 s kada je izabrana opcija povećane osetljivosti [25].

SAW MiniCAD mk II Detector (slika 8d) je savremen detektor nervnih bojnih otrova i plikavaca za personalnu primenu. Izrađuje ga firma MSA Safety company. Lak je za upotrebu sa veoma sofisticiranim sistemom za pouzdan rad. Za manje od 60 s detektuju se i identifikuju sledeći bojni otrovi u navedenim koncentracijama: GA $0.2 \cdot 10^{-6}$ kg/m³, GB $0.5 \cdot 10^{-6}$ kg/m³, GD $0.1 \cdot 10^{-6}$ kg/m³, HD $1.0 \cdot 10^{-6}$ kg/m³.



Slika 8 – Komercijalni hemijski senzori na bazi PAT filtera
Figure 8 – Commercial chemical SAW sensor devices

U svetu se sprovode intenzivna istraživanja orijentisana ka poboljšanju selektivnosti i povećanju osetljivosti PAT senzora. Za detekciju hemijskih bojnih otrova na bazi PAT tehnologije koriste se senzori u kojima je osetljivi sloj najčešće polimer (primer polydimethylsiloxane). Takođe, koriste se polimeri na bazi fenola (phenol, BSP3) kada se traži povećana selektivnost za sarin [18].

PAT detektori rezonatorskog tipa su veoma perspektivni za vojne primene što pokazuju najnovija istraživanja. U radu [12] je prikazano da je povećana osetljivost detekcije gasnih hemijskih bojnih otrova, kada se kao osetljivi sloj koriste: polyepichlorohydrin (PECH), Silicone (SE-30), Hexafluoro-2-propanol bisphenol-substituted siloxane polymer (BSP3) i fluorinated polymethyldrosiloxane (PTFP).

Tehnologija izrade savremenih senzora prati razvoj novih toksičnih materija koji se koriste kao oružje ili su neželjeni produkti u hemijskoj industriji. Zavisnost od uvoznih tehnologija u oblasti detekcije i zaštiti od toksičnih materija nije dobra za bezbednost ljudi u slučaju akcidenata ili oružanih sukoba. Imajući ovo u vidu, kod nas se u okviru materijalnih i kadrovskih mogućnosti sprovode istraživanja u oblasti PAT senzora i njihova primena u detekciji hemijskih toksičnih materija.

Projektovanje PAT filtara za primene u telekomunikacijama i u hemijskim senzorima

Projektovanje se sastoji od nekoliko koraka: izbor materijala podloge, izbor konfiguracije pretvarača, određivanje impulsnog odziva pretvarača, izračunavanje geometrije pretvarača, određivanje geometrije maske. Postupak projektovanja filtara počinje izborom materijala podloge, izborom konfiguracije pretvarača, proračunom impulsnog odziva pretvarača ... Ključnu ulogu u ostvarenju zahtevane PAT frekvencijske karakteristike ima određivanje odgovarajućeg razmeštaja i dužine elektroda IDP-a. S obzirom na to da se svaki IDP može tretirati kao struktura za uzorkovanje u vremenskom domenu analogna digitalnom FIR filtru, to se za projektovanje IDP-a mogu upotrebiti metode projektovanja ovih filtara [25–27]. Postupak sadrži više koraka:

- na osnovu zadatih specifikacija biraju se podloga i konfiguracija pretvarača;
- određuje se impulsni odziv pretvarača.
- iz impulsnog odziva izračunava se raspored elektroda i relativna funkcija preklapanja elektroda tj. apodizacija;
- određuje se geometrija IDP-a i PAT filtra u celini;
- određuju se elementi kola za spregu i apertura pretvarača;
- izračunavaju se karakteristični parametri filtra uzimajući u obzir da IDP-i nisu idealni transversalni filtri.

Kao podlogu najčešće se koriste litijum-niobat i ST kvarc. Karakteristični parametri upotrebljenog materijala koji utiču na performanse projektovanog elementa su: koeficijent piezoelektrične sprege, brzina površinskih talasa, temperaturni koeficijent brzine i kašnjenja, parametar anizotropije, gubici usled propagacije... Ova svojstva materijala moraju se razmatrati u kontekstu izabranog tipa pretvarača i upotrebljenog prilagođenja.

Na izbor tipa piezoelektrične podloge utiče više parametara, a najvažniji je temperaturna osetljivost. Naime, poznato je da ST kvarc ima mnogo manji temperaturni koeficijent ($^{\circ}0$) od litijum-niobata ($-90 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$) tako da za filtre propusnike opsega sa veoma malom relativnom širinom opsega (ispod 5) mora se koristiti ST kvarc. Međutim, filtri načinjeni na podlozi od ST kvarca imaju veliko uneseno slabljenje što je posledica malog koeficijenta sprege. Uzevši u obzir i druge sekundarne efekte (brzina prostiranja, difrakcija, veličina podloge, ...), proizilazi da ST kvarc ima prednost uvek kada je relativna širina opsega ispod 10 ili ako su potrebna veća kašnjenja na višim učestanostima.

Konvencionalni pristup u izboru konfiguracije pretvarača umnogome zavisi od izbora podloge. Ako se koristi podloga od ST kvarca onda se ne može koristiti višeelektrodni sprežnik MSC, zbog malog koeficijenta piezoelektrične sprege, pa se izbor svodi na dve mogućnosti:

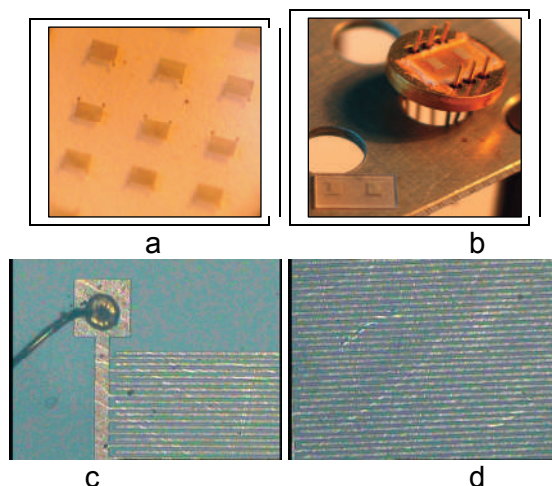
- jedan apodizovani IDP i jedan ponderisan uklanjanjem elektroda
- jedan apodizovani i jedan uniformni pretvarač sa malim brojem elektroda.

S obzirom na tehnološke mogućnosti izrade PAT filtera u našoj zemlji, projektovan je jednostavan višenamenski PAT filter propusnik opsega učestanosti koji se može koristiti u obradi signala i telekomunikacionim sistemima kao međufrekventni filter ili kao linija za kašnjenje u kolu oscilatora. Pored toga, sa određenim dodacima može se koristiti i kao senzor različitih namena. Projektovan je filter za centralnu učestanost od $71,72 \cdot 10^6$ Hz sa identičnim pretvaračima sa uniformno raspoređenim elektrodama istih dužina na podlozi od kvarca. Broj elektroda odabran je tako da se dobije minimalno slabljenje u propusnom opsegu filtera. Laboratorijski prototip PAT FPO je prikazan na slici 10.

Rastojanje između centara susednih elektroda iznosi $22 \cdot 10^{-6}$ m, a rastojanje između pretvarača $2,2 \cdot 10^{-3}$ m. Na ivice podloge nanet je apsorber kojim se eliminišu smetnje usled refleksije talasa. Priključci su spojeni sa krajevima interdigitalnih pretvarača termokompresionim bondovanjem zlatnom žicom debljine $25 \cdot 10^{-6}$ m. Podloga od ST kvarca je zalepljena silikonskim gitom na pozlaćene donje delove kućišta.

Izrada PAT filtra počinje izradom maske direktnim laserskim osvetljavanjem na hromnoj fotoploči na uređaju LW405. Na kvarcnu pločicu od 0,0762 m firme SAWER nanosio se aluminijum debljine $0,5 \cdot 10^{-6}$ m u uređaju za spaterovanje Perkin Elmer.

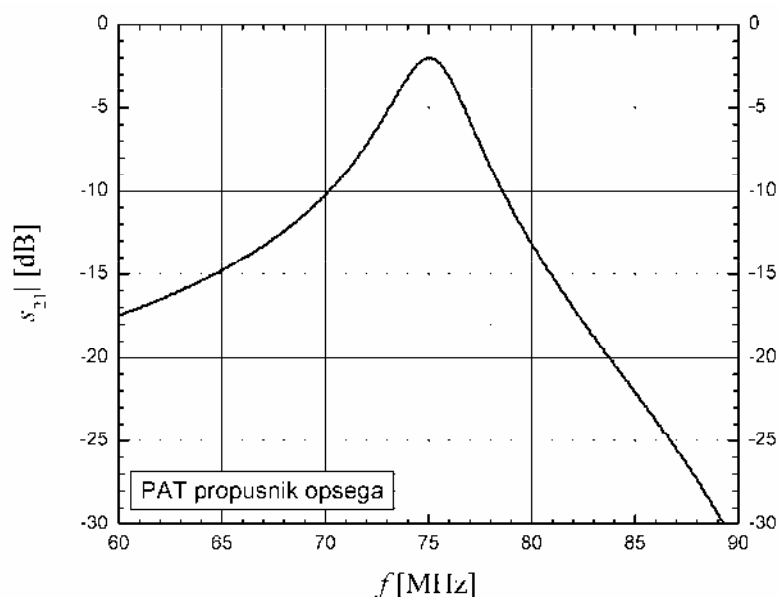
Na pločicu sa aluminijumom nanesen je negativan rezist N1410 i izvršen je fotopostupak korišćenjem maske, na uređaju sa dvostranim podešavanjem EVG 620. Pločica je sečena na uređaju Cambridge Microslice 4. Dobijeni PAT filteri postavljeni su i zalepljeni silikonskim gitom na pozlaćena kućišta sa šest priključaka – pinova. Ulazni i izlazni krajevi filtera spojeni su na četiri spoljašnja pina termokompresionim bondovanjem zlatnom žicom debljine 25 μ m. Kućišta su zatvorena kasicama od poliamida.



Slika 10 – Fotografije prototipa PAT-FPO; a) PAT filteri na pločici, b) PAT filter na pozlaćenom kućištu, c) i d) segmenti interdigitalnih pretvarača filtera PAT_FPO [6]

Figure 10 – Photographs of the **PAT-FPO** laboratory prototype

Merenja koja su izvršena na gotovom prototipu (analizatorom mreža Agilent ENA-L E5062A) pokazuju da je centar propusnog opsega **PAT-FPO** na učestanosti $75 \cdot 10^6$ Hz, propusni opseg je $2 \cdot 10^6$ Hz. Izmerena ulazna/ izlazna impedansa je 65Ω .



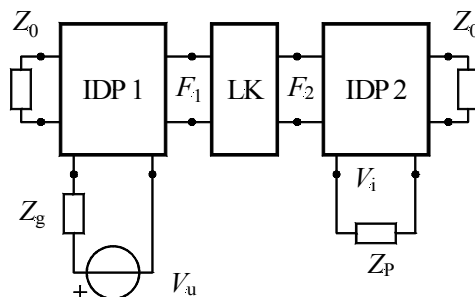
Slika 11 – Izmereni parametar S_{21} laboratorijskog prototipa **PAT-FPO**
 Figure 11 – Measured parameter S_{21} of the **PAT-FPO** laboratory prototype

Modelovanje PAT senzora za bojne otrove

Modeliranje PAT senzora je neophodni deo projektovanja koji ubrzava i pojeftinjuje ceo postupak. U okviru istraživanja PAT filtara, razvijen je originalni metod modeliranja, koji se zasniva na ekvivalentnom električnom kolu PAT senzora. Mogućnosti koje ovaj metod pruža biće prikazani kroz modelovanje PAT senzora za bojne otrove.

U teoretskim istraživanjima za predikciju detektovane koncentracije i identifikaciju bojnih otrova potrebno je napraviti model PAT senzora koji omogućava brzo, precizno i efikasno određivanje zahtevanih parametara.

Na slici 10 je šematski prikazano ekvivalentno električno kolo senzora namenjenog detekciji gasova koji simuliraju bojne otrove [22–29].



Slika 12 – Ekvivalentna šema PAT senzora
Figure 12 – Equivalent circuit of the SAW sensor

Konfiguracija prikazana na slici 6. može se predstaviti ekvivalentnom šemom sa slike 12, gde su interdigitalni pretvarači predstavljeni mrežom sa tri para krajeva, a linija za kašnjenje mrežom LK sa dva para krajeva. Karakteristična akustička impedansa neopterećene podloge je označena sa Z_0 .

Promena izlaznog napona na opterećenju V_i je proporcionalna masi kojom je opterećen senzorski deo, tj. linija za kašnjenje. Prvo se određuje izlazni napon kada je linija za kašnjenje opterećena samo polimernim filmom koji apsorbira odgovarajući gas. Ovaj napon će biti referenca V_b . Razlika između ovog napona i izlaznog napona koji se dobija u prisustvu gasa biće proporcionalna koncentraciji gasa u okruženju (vazduhu). U nekim slučajevima ovaj napon direktno se meri, ali je češće senzor deo složenog mernog sistema. U tom slučaju prave se dva identična senzora od kojih se samo jedan izlaže uticaju gasa, a drugi služi kao referenca. Najčešće se svaki od ova dva senzora uključuje u kolo oscilatora. Razlika učestanosti oscilovanja ova dva oscilatora je srazmerna koncentraciji gasa. Prema slici 7 električna funkcija prenosa može se izraziti formulom:

$$|T(f)| = \left| \frac{V_i}{V_u} \right| = |T_1(f)|^2 \left| \frac{F_2}{F_1} \right| \quad (1)$$

$T_1(f)$ je prenosna funkcija jednog pretvarača. Pošto senzor radi u okolini centralne učestanosti, $T_1(f)$ je konstanta koja zavisi od geometrije pretvarača.

Električne veličine su dobijene na osnovu analogije sa mehaničkim veličinama (brzina prostiranja akustičkog talasa v i sila F) koje su promeњive veličine. Brzina prostiranja talasa direktno zavisi od tipa osetljivog sloja i količine apsorbovanog agensa. Kao rezultat analize dobijaju se formule koje daju promenu izlaznog napona (2) ili učestanosti (3) u funkciji koncentracije gasa.

$$\frac{\Delta V_{\text{vap}}}{V_b} = \frac{\rho_{\text{vap}}}{\rho_p} \frac{\Delta V_i}{V_0} \quad (2)$$

$$\frac{\Delta f_{\text{vap}}}{f_0} = \frac{\rho_{\text{vap}}}{\rho_p} \frac{\Delta f}{f_0} \quad (3)$$

gde je:

ΔV_{vap} je promena izlaznog napon izazvana apsorbovanim agensom, ΔV_i je promena izlaznog napona koju izaziva sloj polimera u odnosu na izlazni napon bez prisustva polimera, ρ_{vap} je gustina gasa, a ρ_p je gustina polimera. Učestanost f_0 je radna učestanost senzora određena geometrijom pretvarača, Δf_{vap} je promena učestanosti koju izaziva prisustvo gasa, Δf je promena koju izaziva polimer.

Iz navedenih formula može da se izvede izraz za određivanje koncentracije detektovanog gasa C_v :

$$C_v = \frac{\Delta f_{\text{vap}}}{\Delta f K} \rho_p = \frac{\Delta V_{\text{vap}}}{\Delta V_i K} \rho_p \quad (4)$$

U formuli (4) koeficijent K predstavlja odnos koncentracije apsorbovanog gasa u polimeru i koncentracije istog u okruženju. K zavisi od tipa polimera i vrste gasa koji se detektuje. Iznos koeficijenta K zavisi od jedinica kojima se izražavaju koncentracije. Faktor K se bira tako da se dobije maksimalna osetljivost senzora za detektovani gas.

Predloženi metod analize je primenjen na senzor centralne učestanosti 99 MHz za predikciju koncentracije gasova koji simuliraju bojne otrove. Podloga je kvarc. Rastojanje između pretvarača 1.500 μm je sa aperturom od 1.800 μm . Polimer je poliepihlorohidrin (PECH), a gas dihlorometan (CH_2Cl_2 , DCM). Podaci koji su korišćeni u izračunavanjima su: $\rho_s=2620 \text{ kg/m}^3$, $v=3158 \text{ m/s}$, $k^2=0,0014$, $C_s=50,3385 \cdot 10^{-7} \text{ F/m}$, $N_p=100$, $\rho_p=1360 \text{ kg/m}^3$, $h_p=0,34 \cdot 10^{-6} \text{ m}$, $V=24,461/\text{mol}$, $MW=85 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$, $K=10^{2,0743}$.

Za koncentraciju od 5 ppm DCM-a, izračunati pomeraj učestanosti je 584 Hz. Za istu koncentraciju istog gasa na polimeru PIB izračunata vrednost pomeraja je približno 200 Hz.

Predloženi metod predikcije koncentracije gasa verifikovan je eksperimentalnim rezultatima iz [20]. Eksperimenti su rađeni bez ikakvog prethodnog proračuna sa senzorima na kvarcu sa centralnim učestanostima od 39,6, 99, 132, 198, i $264 \cdot 10^6 \text{ Hz}$, raznim polimerima i za tri gasa koji

simuliraju bojne otrove. Polimeri poliizobutilen (PIB), poliepihlorohidrin (PECH), i polidimetilsiloksan (PDMS) su ravnomerno naneti na celu površinu linije za kašnjenje. Rastojanje između pretvarača je $1,5 \cdot 10^{-3}$ m sa aperturom od $1,8 \cdot 10^{-3}$ m. Karakteristike su merene direktno mrežnim analizatorom E-5061A.

Za koncentraciju od 5 ppm DCM-a izmerena vrednost pomeraja učestanosti je 574 Hz [30]. Za istu koncentraciju istog gasa na polimeru PIB nije bilo moguće izmeriti odgovarajući pomeraj [29]. To se može objasniti činjenicom što je konstanta K u ovom slučaju oko tri puta manja, pa je prema tome i detektovani signal tri puta manji, što je verovatno ispod granice osetljivosti analizatora.

Za detekciju štetnih gasova kao što su CO, NO₂ i COCl₂, u PAT senzorima se kao osetljivi slojevi koriste sa velikim uspehom tanki filmovi nanokompozitnog materijala na bazi provodnog polianilina [4, 5]. Bezbedna, dozvoljena koncentracija fozgena za žive organizme je 0,1 ppm. Nemoifikovan polianilin ne može da ga detektuje na toj koncentraciji. Istraživanja su pokazala da kompozitni materijali polianilinskih nanovlakana sa aminima daju dobar odgovor za detekciju fozgena pri koncentraciji manjoj od 0,01 ppm. Odgovor ka fozgenu se puno razlikuje između korišćenih amina i njihovih soli.

Na bazi razvijene metode modeliranja napravljeni su i konkretni proračuni za gasove za koje postoje eksperimentalni podaci u literaturi [29, 30]. Za sloj polianilin/In₂O₃ debljine $0,4 \cdot 10^{-6}$ m na LiNbO₃ kod PAT senzora učestanosti $107,2 \cdot 10^6$ Hz, promena učestanosti izazvana koncentracijom CO od 500 ppm, izračunata korišćenjem jed. (1), iznosi $2,016 \cdot 10^3$ Hz. Za isti senzor za koncentraciju NO₂ od 2,12 ppm promena učestanosti iznosi $2,28 \cdot 10^3$ Hz.

Za sloj polianilin/In₂O₃ debljine $0,4 \cdot 10^{-6}$ m na kvarcu PAT senzora učestanosti $107,2 \cdot 10^6$ Hz promena učestanosti izazvana koncentracijom CO od 500 ppm, iznosi $3,58 \cdot 10^3$ Hz. Za isti senzor za koncentraciju NO₂ od 2,12 ppm promena učestanosti iznosi $4,05 \cdot 10^3$ Hz. U [30] prikazani su eksperimentalni rezultati za CO i NO₂ PAT senzore SH tipa učestanosti $107,2 \cdot 10^6$ Hz, sa slojem polianilin/In₂O₃ na LiNbO₃. Autori navode da: promena učestanosti izazvana koncentracijom CO od 500 ppm iznosi $2 \cdot 10^3$ Hz i promena učestanosti izazvana koncentracijom NO₂ od 2,12 ppm, iznosi $2,5 \cdot 10^3$ Hz.

Numeričke vrednosti dobijene na osnovu prikazanog modela PAT senzora veoma se malo razlikuju od eksperimentalnih rezultata, jer model daje relativno uprošćenu sliku PAT senzora i ne uzima u obzir slučajne uticaje i greške tokom izrade senzora i tokom merenja.

Mnogo je jeftinije i brže modelovati prema željenim karakteristikama senzora, a onda ga napraviti i testirati. Imajući ovo u vidu senzori se sve više prvo modeluju, pa se onda projektuju, proizvode i testiraju.

Zaključak

U radu su prikazani osnovni principi na kojima se zasniva funkcionisanje elektronskih komponenata na bazi PAT tehnologije. Pregled PAT elemenata, sa posebnim osvrtom na njihovu primenu obuhvata samo jedan deo koji zadnjih godina ima najveću ekspanziju, a to su PAT filtri u telekomunikacijama i senzori.

Poznavanje njihovih karakteristika otvara nove mogućnosti primene ovih elemenata u svim sistemima za dijagnostiku, u uređajima široke potrošnje, kao što su TV aparati, bežični telefoni, mobilni telefoni, alarmni kućni sistemi, zatim u GPS sistemima, digitalnoj kablovskoj televiziji, u radarskim sistemima, satelitskim telekomunikacijama i u obradi signala u realnom vremenu. Posebno se danas širi i razvija njihova primena u senzorima.

Prikazan je deo originalnih rezultata modelovanja PAT senzora koji su namenjeni detekciji pomenutih gasova. Rezultati dobijeni na bazi sopstvenog modela poređeni su sa rezultatima iz literature. Pokazano je da se ovim načinom modelovanja može uspešno odrediti koncentracija bojnih otrova i drugih štetnih gasova u okruženju.

Literatura

- [1] Matthews, H., *Surface Wave Filters*, John Wiley, New York, 1977.
- [2] White, R. M., Voltmer, F.W., *Direct piezoelectric coupling to surface elastic waves*, Appl. Phys. Lett., 7/1965, str. 314–316.
- [3] Hribšek, M., *Kola sa površinskim talasima – SAW*, Nauka, Tehnika, Bezbednost, 2/1995. , str. 3–13.
- [4] Bhide, T. M., Yamarthy, C. S., Ellis, C. D., and Cernosek, R. W., *Shear Horizontal Surface Acoustic Wave Sensor Platform Development For Chemical And Biological Detection*, ICCES'07 Miami, USA, 2007.
- [5] Hribšek, M., Tošić, D., *An Improved Algorithm for Analysis of Uniform SAW Transducers*, in Proc. 26th Midwest Symposium On Circuits and Systems, INAOE, Puebla, Mexico, pp. 243–246, 1983.
- [6] Feldman, M., Henaff, J., *Surface Acoustic Waves for Signal Processing*, Artech House, London, 1989.
- [7] Jack, M. A., Grant, P. M., *The Theory, Design, Applications of SAW Fourier-Transform Processors*, Proc. IEEE, 68/1980, str. 229–247.
- [8] Campbell, C. K., *Surface Acoustic Wave Devices, Their Signal Processing Applications*; Academic Press: San Diego, USA. 1989, pp. 238–315.
- [9] Živković, Z., Hribšek, M., *PAT procesori u komunikacijama*, Zbornik Odbrambene tehnologije OTEH 2009, 8–9 oktobar 2009, Beograd, str. 636–639.
- [10] Mortet, V., Williams O. A. and Haenen K., *Diamond: a material for acoustic devices*, Phys. Stat. Sol. (a) 205, 5/2008, str. 1009–1020.

- [11] Hribšek, M., Tošić, D., Živković, Z., *Hemijski gasni senzori sa površinskim akustičkim talasom*, Tehnika, Elektrotehnika, vol. LXIV, no. 2, pp. 7–12, 2009.
- [12] Pohl, A. A, IEEE Trans. on Ultrasonics, *Ferroelectrics, and Frequency Control*, 47, 317–332, 2000.
- [13] Hribšek, M., *Surface acoustic wave devices in communications*, Scientific Technical Review, Vol. LVIII, 2/2008, pp. 44–50.
- [14] Golio, M., *The RF and Microwave Handbook, Second Edition*, CRC Press LLC: Boca Raton, USA. 200, p. I.6.1-I.6.15.
- [15] Jaehwan, K., Park, J. H., *Saw Sensor for Train Wheel Monitoring*, Engineering Materials, 270–273/ 2004, str. 921–926.
- [16] Rapp, K., Länge, L., Carneiro, M., Rapp, *Surface Acoustic Wave (SAW) biosensor with fully automated microfluidic Flow Injection Analysis (FIA) system for biomedical applications*, B. E. Sensors, 9/2009, 980–994.
- [17] Hribšek, M., *Elementi sa površinskim akustičkim talasima u radiosenzorima*, Telfor, 2008, OS 5.13, str. 424–427. ISBN: 978–86–7466–337–0.
- [18] Clifford K. Ho, Michael T. Itamura, Michael Kelley, and Robert C. Hughes, *Review of Chemical Sensors for In-Situ Monitoring of Volatile Contaminants*, SANDIA REPORT, SAND2001–0643, Unlimited Release, Printed March, 2001.
- [19] Wen Wang et al, *A novel wireless, passive CO2 sensor incorporating a surface acoustic wave reflective delay line*, Smart Mater. Struct. 16/2007, 1382–1389,
- [20] Sadek, Z. A., Buso, D., Martucci, A., Mulvaney, P., Wlodarski, W., and Kallantar-Zadeh, K., *Titanium Dioxide-Based 64° YX LiNbO3 Surface Acoustic Wave Hydrogen Gas Sensors*, Journal of Sensors, Article ID 254283, 5 pages, 2008.
- [21] <http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0010/Ivanov/Ivanov>, Advanced Sensors for Multifunctional Applications.
- [22] Hribšek, M., Ristić, S., Živković, Z., *Modelling of saw biosensors*, Proceed. of Biodevices, Barcelona 14–17. jan. 2009., str. 376–379.
- [23] Živković, Z., Hribšek, M. and Tošić, D., *Modeling of surface acoustic wave chemical vapor sensors*, Informacije MIDEM, Journal of Microelectronics, Electronic Components and Materials, vol. 39, 2/2009, str. 111–117., ISSN 0352–9045.
- [24] Hribšek, M., Ristić, S., Radojković, B., *Diamond in Surface acoustic wave sensors*, Acta Physica Polonica, 17, 5/ 2010, 0587–4246, 1794–1798.
- [25] Hribšek, M., *Filtari sa sa površinskim akustičkim talasom*, Institut Goša, Beograd, 2009. ISBN 978–86–86917–06–5.
- [26] Živković, Z., Hribšek, M., *Univerzalni softver za projektovanje nedisperzivnih PAT filtera*, Institut Goša, MNTR RS, 2010.
- [27] Hribšek, M., *Novi softver: Softver za projektovanje maske interdigitalnih pretvarača PAT filtera propusnika opsega sa minimalnim slabljenjem*, Institut Goša, MNTR RS 2010.
- [28] Radojković, B. M., Hribšek, M. F., Ristić, S., *Polyaniline thin films in sensors for detection of toxic welding vapors*, Hemijska industrija, 2010 OnLine-First (00):27–27, Details Full text (427 KB) DOI:10.2298/HEMIND091221027R.

[29] Hribšek, M., Tošić D., *Analysis and Modeling of Surface Acoustic Wave Chemical Vapor Sensors*, Acoustic waves, D. Dissanayake. ed., Sciyo, Rijeka, 2010, str. 359–376.

[30] GOSA44A. Z. Sadek, W. Wlodarski, K. Shin, R. Kaner, B. Richard, and K. Kalantar-Zadeh, *A layered surface acoustic wave gas sensor based on a polyaniline/In₂O₃ nanofibre composite*, Nanotechnology 17/2006.

[31] Rakonjac, V., Filipović, Z., *Merenje vibracija i relevantnih parametara leta transportnog helikoptera Mi-8 sa revitalizovanim lopaticama nosećeg rotora*, Vojnotehnički glasnik (Military Technical Courier), vol. 52, broj 6, pp. 611–621, ISSN 0042-8469, UDC 623+355/359, Beograd 2004.

MODELING AND DESIGN OF SURFACE ACOUSTIC WAVE FILTERS AND THEIR MILITARY APPLICATIONS

FIELD: Electronics

Summary:

The operation principles of surface acoustic wave filters (SAW) and materials and technology of their fabrication are presented. A special attention is paid to wide and diverse applications of SAW filters in signal processing, communications and chemical sensors, stressing their military applications. An original method, developed by the authors, for the modeling and prediction of SAW filter characteristics is presented. The abilities of the method are illustrated by the examples of chemical SAW sensors for the detection of warfare chemical agents. The designed and fabricated SAW filter PAT-FPO is the base for the special purpose chemical sensors.

modeling

Introduction

Surface acoustic wave (SAW) filters have an important role in modern electronic and communication systems due to their specific performance and compatibility with other modern planar technologies.

Excitation of a surface acoustic wave in piezoelectric materials by an electrical signal using interdigital transducers was discovered in 1965 by White and Voltmer [Whi85].

Surface acoustic waves and piezoelectric materials

Surface acoustic waves, discovered and described by Lord Rayleigh, are illustrated in Figure 1.

Velocity of SAW is 3000 do 5000m/s – five orders lower than the velocity of electromagnetic waves. SAW filters work in the frequency range of 10MHz to 5GHz.

The commonly used piezoelectric materials are crystals of quartz (SiO₂) and lithium niobate (LiNbO₃). The technology of SAW filters fabrication is compatible with the integrated circuit technology.

Operating principles of SAW filters

A typical SAW filter has two or more interdigital transducers (IDT) which convert electrical to mechanical energy and vice versa. The IDT consists of two sets of interleaved electrodes (Figure 2a i 2b).

SAW filters in signal processing and communications

SAW filters are used in signal processing for convolution, correlation, compression, expansion and matched filtering of signals.

In communications SAW filters are used in TV sets and systems, both analog and digital, in radars and sonars, in spread spectrum communications and for monitoring of moving objects.

SAW filters in sensors of different physical quantities

The operation of SAW sensors is based on the fact that the physical quantity (temperature, pressure, strain, chemical vapor, etc.) affects the propagation of the SAW in the sensor in attenuation and delay, respectively. If the sensor is heated, stretched or compressed or if it is mass loaded, the substrate's length and its elasticity constants are changed. These changes cause velocity and phase delay variations, which then proportionally change the center frequency, attenuation and time delay of the device. The first reported use of SAW technology for a sensor application was in 1975 for pressure sensing.

The main advantage of all SAW sensors is their ability to be accessed wirelessly (radio sensors). It is achieved simply by connecting an antenna to the input transducer. In cars and trucks up to seven wireless systems are used and 15 SAW sensors per vehicle.

Chemical SAW sensors

The basic principle of the chemical vapor SAW sensor (Fig. 6) is the reversible sorption of chemical vapors by a solvent coating, placed between the IDTs. The sensitivity of the sensors is high, and a mass of 100 pg/cm^2 can be detected.

SAW sensors for warfare agents

Chemical warfare gases are the most dangerous weapon. The dynamic range of typical SAW detectors is in the range of 1 picogram to 1 microgram of chemical agents, in a controlled temperature range.

Design of SAW filters in communications and chemical sensor applications

The design consists of several steps: choice of the substrate material, choice of the IDTs configuration, determination of the impulse response of the transducer, calculation of the IDT geometry, determination of the mask layout.

A filter with the center frequency of 71.72MHz and the identical uniform transducers on quartz were designed and fabricated, Figs. 10 and 11.

Modeling of warfare gases SAW sensors

Modeling of SAW sensors is an inevitable part of the design which makes it cheaper and more effective. The original modeling method based on the electromechanical equivalent circuit of the SAW sensor was developed. The closed form expressions for vapor concentration estimations were obtained. The simulation results were compared to the experimental data.

Key words: surface acoustic wave, SAW filter, SAW sensor, design.

Datum prijema članka: 01. 11. 2010.

Datum dostavljanja ispravki rukopisa: 10. 11. 2010.

Datum konačnog prihvatanja članka za objavljivanje: 12. 11. 2010.

UTICAJ AERODINAMIČKIH KOČNICA NA RENTABILNOST GAĐANJA POVRŠINSKIH CILJEVA SAMOHODNIM VIŠECEVNIM LANSEROM RAKETA

Kokelj R. *Tugomir*, Vojna akademija, Beograd,
Milinović P. *Momčilo*, Jeremić M. *Olivera*,
Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu

UDC: 623.419.01

OBLAST: Mašinstvo, Matematika

Sažetak:

Problem uticaja aerodinamičkih kočnica (AKR) na rentabilnost gađanja artiljerijskih površinskih ciljeva samohodnim višecevnim lanserom raketa (SVLR), iako odavno prisutan, nije do sada eksplicite razmatran. S ciljem rešavanja tog problema razmatrani su međusobni uticaji zakona rasturanja, zakona uništenja ciljeva, njihovih prosečnih dimenzija, dimenzija rentabilnog cilja za gađanje jednim oruđem, broja ispaljenih projektila po oruđu, rasporeda njihove vatre po cilju i cene koštanja. U radu, ovaj problem razmatran je za Samohodni Višecrevni Lanser Raketa (LRSV) 128 mm M77, poznatiji pod nazivom „OGANJ“, pri gađanju laganorotirajućom krilno stabilisanom, nevođenom raketom sa aerodinamičkim kočionim deflektorima na različitim dometima.

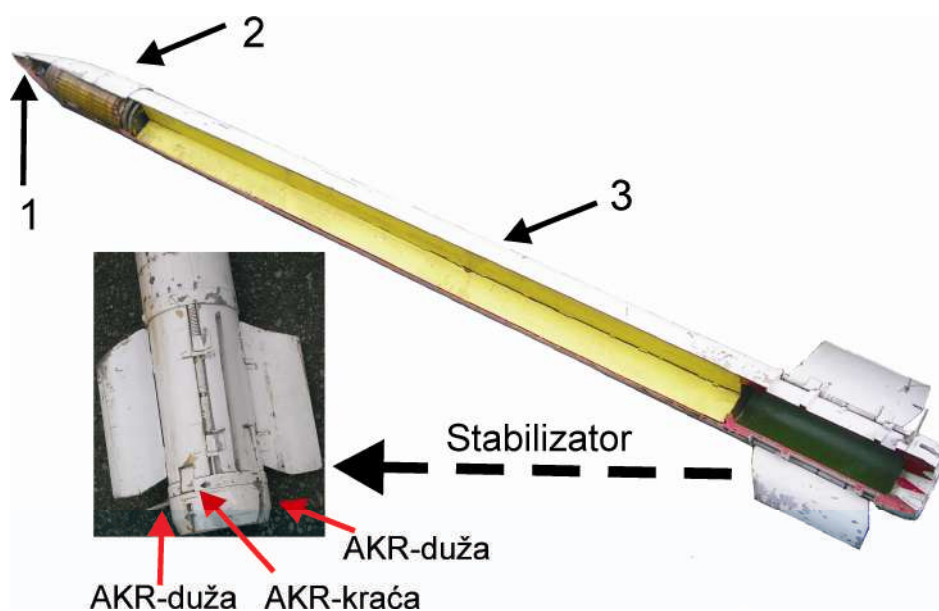
Ključne reči: nevođena raketa, artiljerija, aerodinamičke kočnice, bacači raketa, gađanje greške pogodaka, rentabilni površinski cilj.

Uvod

Danas se samohodni višecrevni lanseri raketa (LRSV), poznatiji kao MLRS, nalaze u naoružanju svih savremenih armija i predstavljaju važno sredstvo u podršci jedinica kopnene vojske. Namenjeni su za nanošenje snažnih vatrenih udara iznenadnom i kratkotrajnom vatrom po ciljevima (objektima dejstva), raspoređenim na većoj površini i dubini borbenog rasporeda. S ciljem dostizanja što veće efektivnosti LRSV, efikasnosti i povećanja preciznosti svake pojedine rakete, u zavisnosti od zemlje proizvođača, konstruktori su primenjivali različita rešenja.

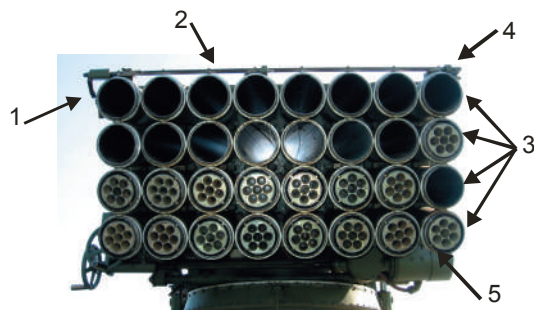
Napomena: Rad je nastao u okviru naučnog projekta „Rentabilni izbor novih tehnologija i koncepcija odbrane kroz društvene promene i strateške orijentacije Srbije“ (III 47029), koji finansira Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.

U Vojski Srbije danas se u operativnoj upotrebi nalazi LRSV 128 mm M77 [1], poznatiji pod nazivom „OGANJ“, koji za izvršavanje namenskih zadataka koristi trenutno-fugasnu raketu 128 mm M77, sa posebnim karakteristikama, u odnosu na slična rešenja u stranim armijama. Kako bi se povećala preciznost ove rakete, konstruktori su u sklopu mlaznika, na prstenu stabilizatora ugradili aerodinamičke kočnice rakete (slika 1), koje se sastoje od dva duža i dva kraća deflektora, poznata kao aerodinamičke kočnice (AKR). Aerodinamičke kočnice se otvaraju u parovima, dve kraće 2KK, dve duže 2KD, ili sve četiri istovremeno 4K. Otvaraju se nakon izlaska rakete iz lansirne cevi, tako što se mehanizam za njihovo oslobađanje, prethodno tempira, odnosno bira unapred, njihovu kombinaciju.



Slika 1 – Trenutno-fugasna raketa 128 mm M77 sa upaljačem UTU M77:
1. upaljač, 2. bojna glava, 3. raketni motor

Mehanizam za tempiranje u sklopu pripreme, (biranja), kombinacije parova, aerodinamičkih kočnica rakete (slika 2), nalazi se na lansirnoj kutiji i njime se upravlja iz kabine lansirnog vozila. Koristi se za gađanje na dometima manjim od maksimalnog (slika 3), ili za bilo koje željene domete ako se priprema vrši sa različitim tabličnim uglovima (slika 4). Osnovni položaj mehanizma za otvaranje AKR-a je položaj „N“, čijim izborom kočnice ostaju zatvorene u toku leta rakete. Tada raketa ima režim leta isti kao i bez kočnica.



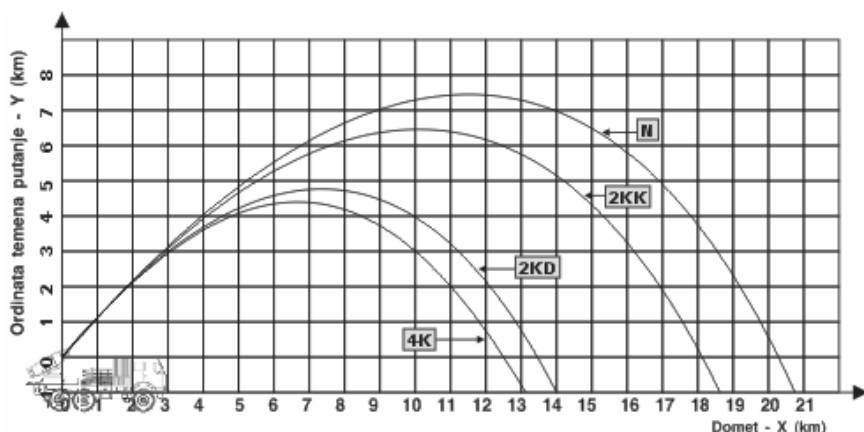
Slika 2 – Mehanizam AKR-a:

1. pogonska ručica, 2. zupčasta letva, 3. zakretni prsten, 4. mikroprekidač, 5. radijalne vođice

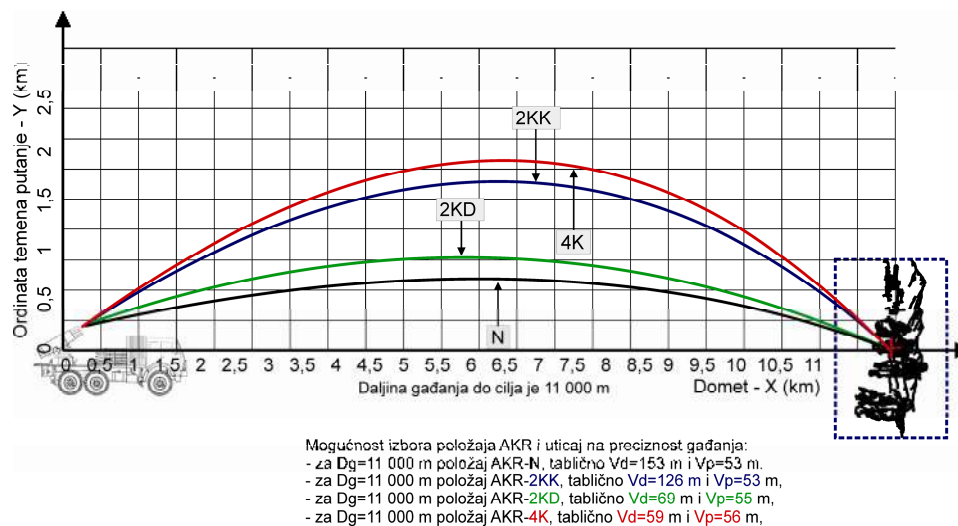
Zauzimanje položaja AKR-a ima „sličnu artiljerijsku ulogu“ pri gađanju kao i promena barutnog punjenja kod klasične artiljerije, ali se njihovo dejstvo ispoljava tokom cele trajektorije, a ne samo na uspostavljanju početne brzine, kao kod promene barutnih punjenja u klasičnoj artiljeriji. Upotrebom mehanizma za otvaranje aerodinamičkih kočnica (AKR) kod nevođenih raketa, mogu se realizovati različiti dometi ali i različite visine balističkih putanja [2] (slika 3 i 4).

Moguće su sledeće varijante upotrebe:

- a) sa otvorene četiri aerodinamičke kočnice rakete (AKR u položaju 4K) dejstvuje se na dometima od 2.000 do 13.015 m
- b) sa otvorene dve duže aerodinamičke kočnice rakete (AKR u položaju 2KD) dejstvuje se na dometima od 3.000 do 13.911 m
- c) sa otvorene dve kraće aerodinamičke kočnice rakete (AKR u položaju 2KK) dejstvuje se na dometima od 4.000 do 18.644 m
- d) sa zatvorenim aerodinamičkim kočnicama rakete (AKR u položaju N) dejstvuje se na svim raspoloživim dometima od 5.000 do 20.652 m



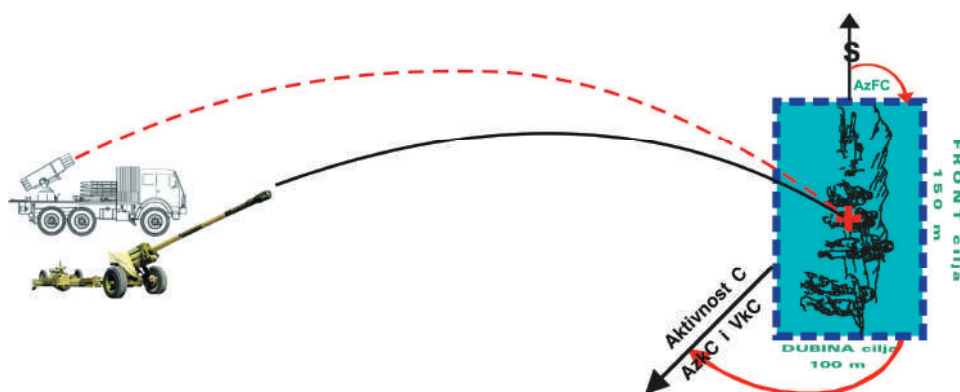
Slika 3 – Grafikon za izbor aerodinamičkih kočnica (AKR) pri gađanju LRSV 128 mm M77 sa trenutno-fugasnom raketom 128 mm M77



Slika 4 – Mogućnost izbora položaja AKR i uticaj tablične slike rasturanja na preciznost pri gađanju cilja na istoj daljini gađanja

Metode izbora rentabilnog površinskog cilja

Artiljerijski cilj [3] jeste svaki element borbenog rasporeda neprijatelja (objekat), koji je celishodno i rentabilno gađati artiljerijom. Pod ciljem (slika 5) se podrazumeva zemljišna ili vodena površina pravougaonog oblika na kojoj su raspoređeni elementarni ciljevi. Centar pravougaonika je centar površinskog cilja, kraća stranica je dubina, a duža širina.



Slika 5 – Artiljerijski cilj

Cilj se sme gađati ako se nalazi u granicama dometa oruđa i u granicama zone sigurnosti. Određen je ako su o njemu poznate: koordinate, dimenzije i pravac prostiranja na zemljištu (vodi), zatim, vrsta, njegova aktivnost i stepen utvrđenosti, te njegov centar, koji se u skladu sa navedenim faktorima bira radi optimalnog gađanja. Svrha artiljerijskog gađanja jeste da se na cilju dobije potreban broj pogodaka, dovoljan da se po elementima cilja ostvare željeni materijalni i drugi efekti.

Veza između broja ispaljenih projektila i rasporeda njihovih padnih tačaka podleže zakonima verovatnoće. Celishodno je, dakle, veličine cilja podesiti tim zakonima koji diktiraju mogućnost i rentabilnost upotrebe artiljerijske vatre.

Broj projektila koji se lansira i broj projektila koji padnu na odabrani cilj nije isti i zavisi od toga kako se međusobno odnose sam cilj i slika rasturanja, kao verovatna površina u koju upadaju pogoci, a čije su koordinate padnih tačaka (pogodaka) slučajna promenljiva u teoriji verovatnoće. Takođe, zavisi od toga da li srednji pogodak (centar svih padnih tačaka) prolazi kroz centar cilja. Uobičajena slika padnih tačaka koja podleže statističkim zakonima raspodele slučajnih veličina, ima oblik elipse i normirana je po Gaussovom zakonu, na osam verovatnih skretanja oko srednjeg pogotka u dva pravca, koji naravno ne moraju biti ista i gde se smatra da je smešteno 99,7 posto svih slučajnih događaja tj. veličina koje se mere, lit. [8]. Srednji pogodak oko koga se grupišu padne tačke pri gađanju i željena tačka oko koje se deluje na cilj, ne moraju, takođe, da se poklapaju. Odavde slede poznati pojmovi tačnosti i preciznosti gađanja.

U artiljerijskoj praksi postoje brojni postupci pripreme početnih elemenata i korekture srednjeg pogotka, koji omogućavaju da se on dovede i održava na centru cilja. Ti postupci predstavljaju popravku integrisanog uticaja tačnosti i preciznosti u greškama, koje su se javile kao odstupanja od centra cilja i ne razmatraju detaljno uzroke odstupanja po njihovom poreklu.

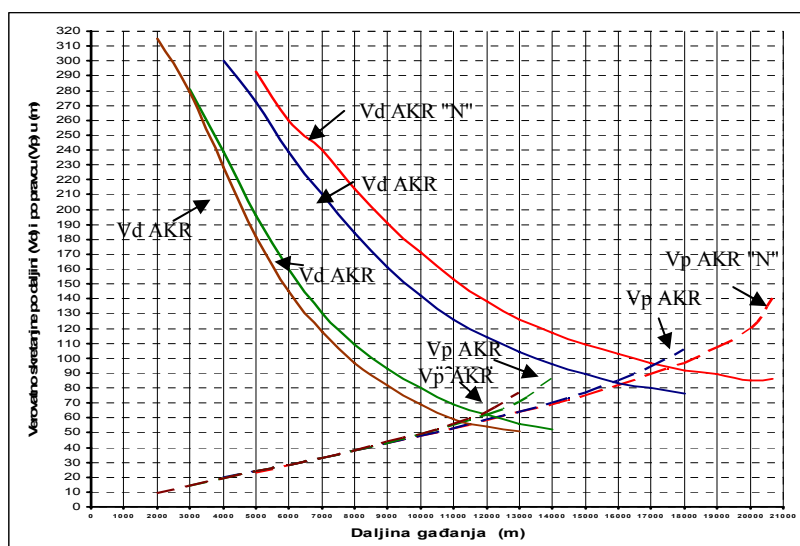
Ako se postavi pitanje šta je rentabilan cilj, onda bi on mogao da bude svaki koji bi bio jednak ukupnoj slici rasturanja oruđa i raketa LRSV. Zapravo, svi lansirani projektili trebalo bi da padnu po celoj površini cilja. To bi značilo da se slika zakona rasturanja po veličini poklopi sa slikom cilja. Zakon rasturanja i zakon uništenja cilja međusobno su povezani efikasnošću bojne glave i drugim faktorima, koji znatno usložnjavaju ovu jednostavnu i poželjnu hipotezu za izbor rentabilnog cilja. Moglo bi se takođe hipotetički usvojiti da se centar cilja poklapa sa srednjim pogotkom svih ispaljenih raketa, što znači da se prekrivenost površinskog cilja realizuje rasturanjem projektila koje podleže poznatom, već pomenutom, Gaussovom zakonu procentualne raspodele broja pogodaka, merenom u dva pravca [8].

Rasturanja putanja projektila ima brojne uzroke, pa se samim tim i greške, prema poreklu, mogu grupisati u meteorološke, balističke i siste-

matske [8]. Njihov krajnji efekat direktno se manifestuje na preciznost artiljerijske vatre (gađanja),¹ dok će tačnost zavisiti od posluge i oruđa.

Vrednosti rasturanja raketa [2] znatno su veće od rasturanja prilikom gađanja klasičnom artiljerijom [4], i uzroci rasturanja nisu isti na aktivnom i pasivnom delu putanje leta rakete [2]. Osnovni uzroci povećanog rasturanja raketa [5, 6] su u jačini i pravcu (ekscentricitetu) dejstva sile potiska, razlici u obliku i masi rakete, odstupanju totalnog impulsa raketnog motora, dinamičkoj ekscentričnosti, vibracijama i trzanjima lansirnog oruđa, u promenama u meteorološkim uslovima, posebno u aktivnoj fazi, [8]. Greške pripreme početnih elemenata gađanja poseban su faktor koji utiče na tačnost, iako elementi lansiranja pomenuti u prethodnom tekstu pored uticaja na preciznost, takođe imaju uticaja i na tačnost.

Međusobni odnos verovatnih skretanja po daljini (V_d) i po pravcu (V_p), kao statističke konačne ocene za gađanje za TF raketu 128 mm M77 u zavisnosti od daljine gađanja i položaja AKR, prikazan je na slici 6. To su dakle funkcije daljine i za svaku se moraju precizno odrediti unapred.



Slika 6 – Međusobni odnos verovatnih skretanja po daljini (V_d) i po pravcu (V_p) za TF raketu 128 mm M77 u zavisnosti od daljine gađanja i položaja AKR

¹ **Tačnost artiljerijske vatre** podrazumeva da udaljenje srednjeg pogodaka od centra cilja (tačke za koju su određeni početni elementi) ne sme biti veće od $1V_d \times 1V_p$ tablične slike rasturanja koja odgovara daljini za koju su sračunati početni elementi.

Preciznost artiljerijske vatre podrazumeva da najmanje 75% pogodaka treba da padne u prostoriju dimenzija $2V_d \times 2V_p$ tablične slike rasturanja koja odgovara daljini za koju su sračunati početni elementi čiji se centar poklapa sa centrom cilja (tačkom za koju su određeni početni elementi).

Iz navedenih definicija zaključuje se da su osnovni kriterijumi koji definišu preciznost i tačnost artiljerijske vatre:

- Preciznost – odstupanje pojedinih pogodaka od srednjeg pogodaka;
- Tačnost – odstupanje srednjeg pogodaka od određene tačke na cilju (centra cilja).

Upoređivanjem slika rasturanja dobijenih analizom podataka (slika 6), [2] i [3], pri gađanju sa LRSV, na različitim daljinama, dolazi se do poznatih zaključaka karakterističnih za nevođenu raketnu artiljeriju [8], koji se mogu dati sledećim stavovima.

– Na manjim daljinama gađanja (D_g) znatno je veće verovatno skretanje po daljini (V_d) u odnosu na skretanje po pravcu (V_p), ukoliko nema upotrebe pomenutih AKR.

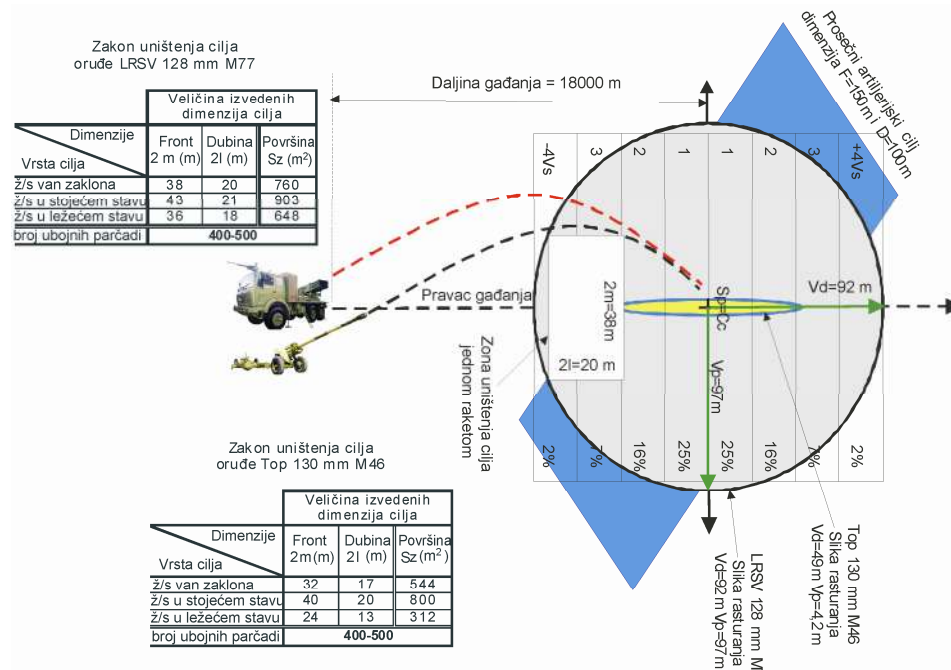
– Odnos verovatnog skretanja po daljini i po pravcu nije postojan, već se menja sa promenom daljine D_g i to na sledeći način:

– verovatno skretanje po daljini (V_d) sa povećanjem daljine D_g se postepeno smanjuje;

– verovatno skretanje po pravcu (V_p) sa povećavanjem daljine D_g se postepeno povećava i na određenoj, najčešće maksimalnoj, D_g , izjednačava se sa V_d ($V_d=V_p$).

– Slika rasturanja oblika elipse, koju definišu verovatna skretanja po pravcu i daljini u skladu sa Gausovim zakonom, s obzirom na navedeno ponašanje u funkciji daljine, različitog je oblika na pojedinim daljinama D_g . Zbog takvog promenljivog oblika i dimenzija slike rasturanja, izbor rentabilnog cilja za gađanje oruđem LRSV složen je analitički zadatak.

Upotreba AKR obezbeđuje da i na manjim dometima slika rasturanja bude proporcionalnija po pravcu i dometu, što znači da postoje dometi, (daljine gađanja), kod kojih je verovatno skretanje po pravcu i daljini približno isto.



Slika 7 – Zakoni rasturanja i uništenja za za top i raketni lanser

Na slici 7 prikazan je uporedni odnos zakona rasturanja i uništenja cilja gađanog na istom dometu od 18 km, sa topom 130 mm M46 projektilom TF-M79 i sa oruđem LRSV 128 mm M77, raketom TF 128 mm M77 i na isti cilj pravougaonog oblika dimenzija 150 x 100 m. Ovo, naravno, nije opravdano sa aspekta rentabilnosti, ali služi za poređenje razmatranih veličina.

Sa slike se vidi koliko je puta na datoj daljini gađanja veća i drugačija slika ukupnog rasturanja za klasično i raketno artiljerijsko oruđe.

Izbor rentabilnog cilja za gađanje jednim raketnim oruđem LRSV 128 mm M77 [6] razmatran je za dejstvo po cilju trenutno-fugasnom raketom 128 mm M77 sa upaljačem UTU M77, bez upotrebe AKR. Ovde će biti predstavljen jedan od praktičnih i krajnje pojednostavljen, idealizovan model provere, šta je rentabilan artiljerijski cilj, onako kako se koristi za analizu u realnim rodovskim uslovima upotrebe. Model podrazumeva upotrebu tabličnih, artiljerijskih podataka, a ne precizne konstruktorske podatke, niti detaljne, matematičke, verovatne interpretacije. Dakle, neće se razmatrati elipsa pogodaka, već pravougaonici koji je opisuju kao verovatni ciljevi na površini gađanja. Takođe, neće se razmatrati složene integralne interpretacije odstupanja, odnosno verovatnih skretanja, već jedinične elementarne površine sa konstantnim verovatnoćama usrednjanim po Gausovom zakonu, u skladu sa njihovim rasporedom na uobičajenoj slici pogodaka. Pošto je dejstvo po cilju svrha gađanja, mora se poći od praktičnih zahteva koji proizilaze iz zakona uništenja cilja, bez analize efikasnog radijusa dejstva bojeve glave, niti pak efekta preklapanja radijusa njenog efikasnog delovanja. Iz tabličnih kriterijuma efikasno prekrivene površine bojnim efektom, upotrebom navedenog broja raketnih projektila palih na cilj, potrebno je približno proračunati kako zakoni rasturanja pogodaka omogućavaju da se odredi najrentabilniji cilj. Zatim će se približno oceniti i uporediti da li je utrošak raketa veći sa upotrebom AKR ili bez upotrebe ovog mehanizma.

Prema teoriji gađanja [9], zakonom uništenja cilja za LRSV M77 bez AKR predviđeno je da na svakih 38 m širine i 20 m dubine cilja treba da padne po jedna raketa da bi cilj bio efikasno pokriven. Kada se uporede veličine skretanja koje opisuju rasturanje raketa po daljini sa veličinom elementarnog cilja u koji treba da upadne bar jedna raketa, duž daljine gađanja (*slika 7*) iz praktične artiljerijske statističke analize zaključuje se da bi u jednu dužinu rasturanja, 1Vd, površinskog cilja, trebalo da padne 4 do 15 pogodaka, zavisno od dometa, radi efikasnog prekrivanja bojnim dejstvom. Uočava se da su karakteristike rasturanja po daljini takve da je potreban veći utrošak raketa za ovakvu prekrivenost na manjim, nego na većim daljinama gađanja, pre svega zbog izdužene slike pogodaka, tj. nepovoljnog odnosa Vd i Vp. Iz toga se može zaključiti da je *LRSV M77 rentabilnije, koristiti na maksimalnom dometu*, gde će zbog navedenog svojstva i utrošak municije biti manji.

Kada se uporede veličine rasturanja sa širinom elementarnog cilja (slika 7), i primeni princip jedne rakete na 38 metara širine skretanja, zaključuje se da bi u jedan pojas slike rasturanja po pravcu širine 1Vp trebalo da padne jedan do tri pogodaka, u skladu sa veličinama tabličnog Vp na tim dometima. Sintezom gornja dva stava dolazi se do zaključka da je na daljinama gađanja preko dve trećine dometa *potrebno da u svakom deo slike rasturanja veličine 1Vd x 1Vp treba da padnu bar po četiri pogodaka da bi se uslov efikasnosti ispunio na celoj slici rasturanja.*

Ako se kao jedinični cilj usvoji element slike 1Vd x 1Vp, sa najmanjom mogućom verovatnoćom broja padnih tačaka od 2%, pretpostaviće se da će za takav jedinični cilj biti potrebne bar četiri rakete da bi bio efikasno prekriven bojnim dejstvom, s obzirom na njegovu tabličnu veličinu za domete koji će se razmatrati. Dakle, suma svih ispaljenih raketa moraće da zadovolji broj svih elementarnih ciljeva, po Gausovom zakonu raspodele verovatnoće. Mereno duž dometa, postoje četiri pojasa ispred i četiri pojasa iza cilja. Dakle, četvrtom pojasu širine koji ima osam elementarnih ciljeva verovatnoće pogodaka 2%, potrebne su 32 rakete, što je samo 2% od ukupnog broja svih raketa upalih na cilj veličine 8Vd x 8Vp. Pošto je verovatnoća ove širine 2% da bi se u njoj obezbedio pad od 32 pogodaka, potrebno je realizovati Bp pogodaka, gde je: $Bp = 32 / 0,02 = 1600$. Tada mora biti ispaljeno Np raketa, gde je: $Np = Bp / 0,997$, tj., $Np = 1600 / 0,997 = 1605$, u skladu sa verovatnoćom ukupne Gausove raspodele. Iz pristupa problemu postavlja se pitanje: Da li je rentabilan cilj za oruđe LRSV M77 jednak slici rasturanja pogodaka? Ovakva hipoteza nije uobičajena pri razmatranju efikasnosti artiljerijske vatre. Takvo gađanje je vrlo nerentabilno, pošto daje ogromnu gustinu vatre oko centra pogodaka.

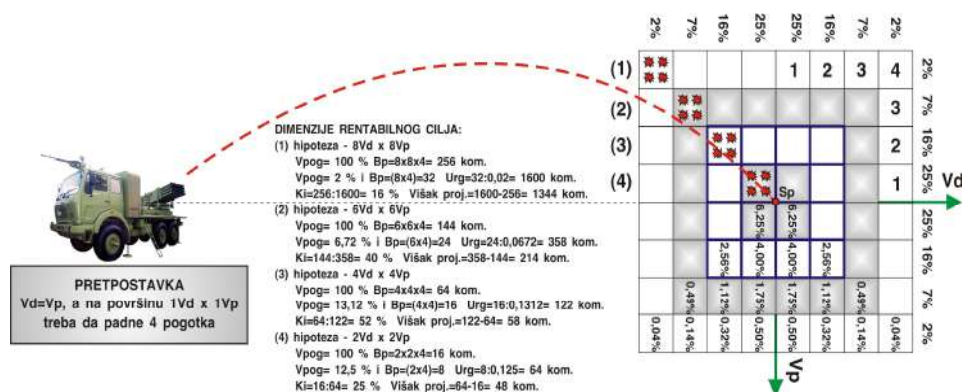
Ipak, ona ima teorijski značaj kada se ispituju karakteristike raketa, tj. njihovo rasturanje uz hipotezu da je sumarna greška pripreme početnih elemenata (po pravcu i daljini) jednaka nuli. Kao što se vidi iz primera, slika rasturanja tretiraće se uprošćeno kao pravougaonik, a ne kao elipsa, odnosno biće podeljena po principu mreže pravougaonika veličine 8Vd x 8Vp (slika 8) ili manjih. Postavljaju se hipoteze da rentabilni cilj ima dimenzije:

- (1) 8Vd x 8Vp,
- (2) 6Vd x 6Vp,
- (3) 4Vd x 4Vp i
- (4) 2Vd x 2Vp

i ispituje po kojoj je od ovih hipoteza najpovoljniji koeficijent iskorišćenja (K_i) raketa koji predstavlja odnos između utroška raketa za gađanje (U_{rg}) i potrebnog broja pogodaka (B_p), kada bi se usvojila ravnomerna prekrivenost pogodaka po cilju navedena u prethodnom primeru.

U skladu sa normalnim Gausovim zakonom raspodele pogodaka po daljini i pravcu, za svaku od hipoteza o veličini cilja biće usvojena kao

drugačija a takođe i odgovarajuća verovatnoća njegovog pogađanja (slika 8 – veličina V_{pog}). Za svaku mrežnu dužinu (pojas širine po dometu), za 8Vd, 6Vd, 4Vd i 2Vd, broj raketa koje treba da upadnu u tu traku, naveden po prethodnom modelu, deli se sa odgovarajućom verovatnoćom pogađanja koju Gausov zakon dodeljuje toj širini. Na taj način izračunato je koliko projektila treba da upadne u površine različitih veličina, usvojene kao rentabilno gađani ciljevi (tabela 1).



Slika 8 – Rentabilan cilj za oruđe LRSV M77

Rezultati proračuna po navedenim hipotezama prikazani su u tabeli 1.

Tabela 1

Hipoteze za odabir rentabilnog cilja za oruđe LRSV M77

Broj hipoteze	Utrošak raketa	Površina rentabilnog cilja Vd x Vp	Broj raketa po elementarnom cilju (Vd x Vp) dobijen po hipotezi		
			(2)	(3)	(4)
(1)	1600	8 x 8 = 64	(1600 : 358) x 36 = 161	(1600 : 122) x 16 = 210	(1600 : 64) x 4 = 100
(2)	358	6 x 6 = 36	(358 : 358) x 36 = 36	(358 : 122) x 16 = 47	(358 : 64) x 4 = 22
(3)	122	4 x 4 = 16		(122 : 122) x 16 = 16	122 : 64) x 4 = 7.6
(4)	64	2 x 2 = 4			(64 : 64) x 4 = 4

Na osnovu podataka iz tabele može se zaključiti da se po trećoj hipotezi, kada je cilj veličine 4Vp x 4Vd, postiže najveći koeficijent iskorišćenja gađanja. To znači da ova hipoteza ima najveću rentabilnost, pa se može reći da je rentabilni cilj za oruđe LRSV M77 dimenzija 4Vd x 4Vp, a za dejstvo po njemu treba da se lansira 122 rakete, pri čemu je verovatnoća pogađanja takvog cilja je 67,24%. To znači da će u cilj upasti 82 od 122 ispaljene rakete zadovoljavajući uslov da u jedinične površine najmanje verovatnoće upadnu bar četiri rakete.

Oruđe LRSV 128 mm M77 ima tehničku karakteristiku da može za vrlo kratko vreme da lansira 64 rakete po jednom cilju. Kako su za rentabilni cilj potrebne 122 rakete, jedno oruđe neće moći jednovremeno da ostvari vatru po rentabilnom cilju, jer će morati da utroši drugo dopunsko vreme da još jednom napuni i lansira dopunskih 58 raketa do 122 rentabilne. Zato je korisno utvrditi kolike su dimenzije rentabilnog cilja ako se lansiraju samo 64 rakete koje se nalaze na lanseru, a pri tom se koriste AKR. Iz sprovedenog razmatranja (tabela 1) vidi se da bi rentabilni cilj za utrošak od 64 rakete, sa koliko raspolaže lanser, imao dimenzije $2V_d \times 2V_p$, jer bi se rentabilnost realizovala sa brojem raketa sa kojima lanser raspolaže. Ova hipoteza izvedena je uz idealne pretpostavke o gađanju celokupne površine rasturanja i izvedenog jediničnog cilja na rentabilnom dometu, koji iznosi dve trećine od maksimuma.

Konstruktivno rešenje oruđu LRSV M77 obezbeđuje dva punjenja (jedno u lanseru a drugo u punjaču), a postojeća automatizacija omogućava mu lansiranje raketa (po 32 komada iz svakog punjenja) sa istog vatrenog položaja za samo šest i po minuta. Navedeno konstruktivno rešenje u suprotnosti je sa zahtevima izvođenja savremenih borbenih dejstava, jer se oruđe (jedinica LRSV) nakon ispoljenog dejstva veoma lako otkriva i postaje ranjivo na kontrabatiranje. Navedeni nedostatak delimično se može prevazići upotrebom AKR kojima se obezbeđuje rentabilno gađanje na različitim daljinama bez dopunske pripreme.

Uticaj izbora AKR na rentabilnost gađanja

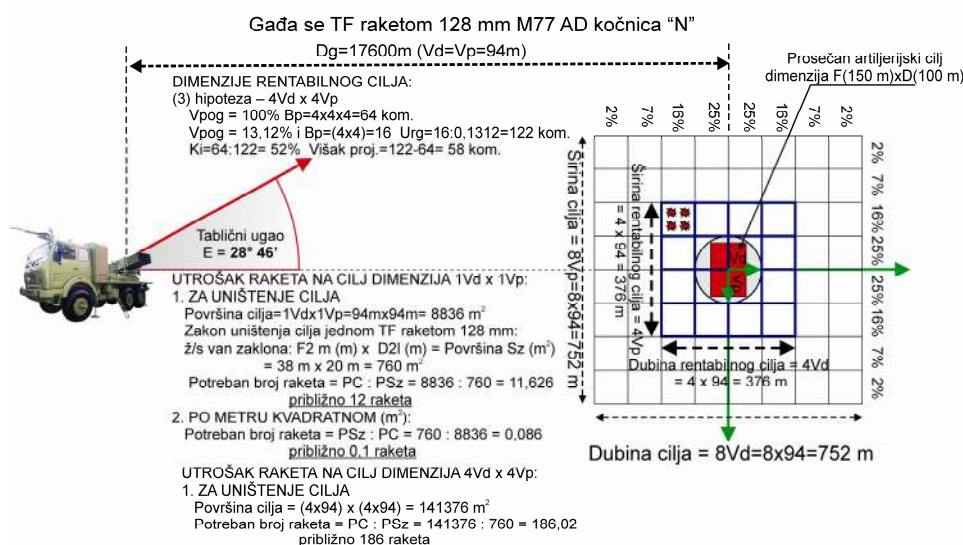
Specifičnost LRSV, tj. njegove rakete M77, kada gađa ciljeve na različitim dometima sa kombinacijom AKR znatno menja zaključke o kvalitetu artiljerijske raketne vatre, pošto je slika rasturanja znatno drugačija nego pri gađanju bez AKR sa istim raketnim oruđem. Radi sagledavanja uticaja izbora aerodinamičkih kočnica na rentabilnost gađanja razmatraće se međusobni uticaji između zakona rasturanja, zakona uništenja cilja, dimenzija rentabilnog cilja, broja ispaljenih projektila i raspored vatre po cilju. Sa aspekta borbene upotrebe, kao dopunski uticaji (slika 8) razmatrani su međusobni odnosi površina (dimenzija) prosečnog artiljerijskog cilja i rentabilnog cilja za gađanje oruđem LRSV, odnosi površina (dimenzija) prosečnog artiljerijskog cilja i veličina tabličnih slika rasturanja pri gađanju oruđem LRSV, i utrošak raketa za uništenje cilja po metru kvadratnom [11].

Navedeno razmatranje predstavlja osnovu za dalju analizu uticaja izbora aerodinamičkih kočnica na rentabilnost gađanja. Razmatrane su dve varijante, i to:

Prva – kada se sa istog vatrenog položaja iz istog oruđa (pod istim uslovima) gađa cilj sa različitim tabličnim uglom (elevacijom) na istoj daljini gađanja, a te trajektorije su posledica izbora kombinacija AKR (slika 4 i slika 10).

Druga – kada se sa istog vatrenog položaja iz istog oruđa (pod istim uslovima) gađa cilj sa istim tabličnim uglom (elevacijom) na različitim daljinama gađanja, a te daljine su posledica izbora kombinacija AKR (slika 3 i slika 11).

Na osnovu brojnih grafičkih podataka i podataka iz Tablica gađanja oruđa [2] (slika 4 i tabela 2) zaključuje se da je na određenim daljinama gađanja moguće sa istog vatrenog položaja istim oruđem (pod istim uslovima) gađati cilj sa različitim tabličnim uglom (elevacijom) na istoj daljini gađanja, uz slobodu izbora položaja AKR. Naravno, uslovi gađanja sa AKR nemaju na ekvivalentnim dometima ista verovatna skretanja po pravcu i daljini, kao i gađanja bez upotrebe AKR [2]. Bez obzira na to što se radi o istom dometu, jedinični cilj veličine $1Vd \times 1Vp$ za različite kombinacije AKR-a i bez AKR-a neće biti isti.



Slika 9 – Rentabilan cilj za oruđe LRSV M77 i utrošak raketa

To znači da minimalni broj raketa koji treba da upadne u najnepovoljniju zonu veličine $1Vd \times 1Vp$, čija je verovatnoća samo 2%, može biti veći ili manji od četiri rakete. Ovo zavisi od toga koliko je za svaku kombinaciju AKR jedinična površina veća ili manja od razmatrane. Karakteristično je da na rentabilnom dometu koji iznosi dve trećine od maksimu-

ma, upotreba AKR-a uvek smanjuje jedinično verovatno skretanje po pravcu Vp i daljini Vd. U daljem postupku biće razmatrana količina ispaljenih raketa, bez uzimanja u obzir njihovog potrebnog broja u odnosu na navedeno smanjenje. Čak i u ovakvim uslovima pokazaće se veća rentabilnost upotrebe AKR-a, zbog smanjenja ukupne veličine cilja.

Tabela 2

Uticaj položaja AKR na odabir rentabilnog cilja na istoj daljini gađanja i različitim tabličnim uglovima za oruđe LRSV M77

Daljina gađanja (m)	zatvorene AD-kočnice			otvorene dve kraće AD-kočnice			otvorene dve duže AD-kočnice			otvorene četiri AD-kočnice		
	položaj "N"			položaj "2KK"			položaj "2KD"			položaj "4K"		
	Jedno Vs			Jedno Vs			Jedno Vs			Jedno Vs		
	Tablični ugao (°)	po daljini Vd (m)	po pravcu Vp (m)	Tablični ugao (°)	po daljini Vd (m)	po pravcu Vp (m)	Tablični ugao (°)	po daljini Vd (m)	po pravcu Vp (m)	Tablični ugao (°)	po daljini Vd (m)	po pravcu Vp (m)
10000	11 27	171	48	12 24	142	48	17 06	80	49	18 38	69	49
11000	12 58	153	53	14 15	126	53	20 43	69	55	23 05	59	56
12000	14 40	138	58	16 21	114	59	25 14	62	62	29 08	54	64

Stvaran uticaj položaja AKR, sa aspekta borbene upotrebe, direktno se odražava na dimenzije rentabilnog cilja za oruđe LRSV (slika 10). Potreban broj projektila (N) za izvršenje zadatka [7], pri istoj (željenoj) verovatnoći po-gađanja ($V_{pog}=67,24\%$) rentabilnog cilja dimenzija $4V_d \times 4V_p$, a u zavisnosti od tablične slike rasturanja (položaja AKR) izračunava se po formuli

$$N = \frac{4V_d \times 4V_p}{V_{pog} \times 10^3} \quad (1)$$

uz pretpostavku da se gađa najpovoljniji položaj cija na zemljišnoj površini kada se dejstvom jedne bojne glave može prebrisati površina od približno 1000 m^2 .

Pri gađanju na istoj daljini gađanja i različitim tabličnim uglovima, u zavisnosti od položaja aerodinamičkih kočnica raketa (AKR), potreban broj projektila (N) za izvršenje zadatka je:

e) sa otvorene četiri aerodinamičke kočnice rakete (AKR u položaju 4K)

$$N = \frac{4V_d \times 4V_p}{V_{pog}} = \frac{4 \times 59 \times 4 \times 56}{672,4} = 78,619 \cong 79 \text{ raketa}$$

f) sa otvorene dve duže aerodinamičke kočnice rakete (AKR u položaju 2KD)

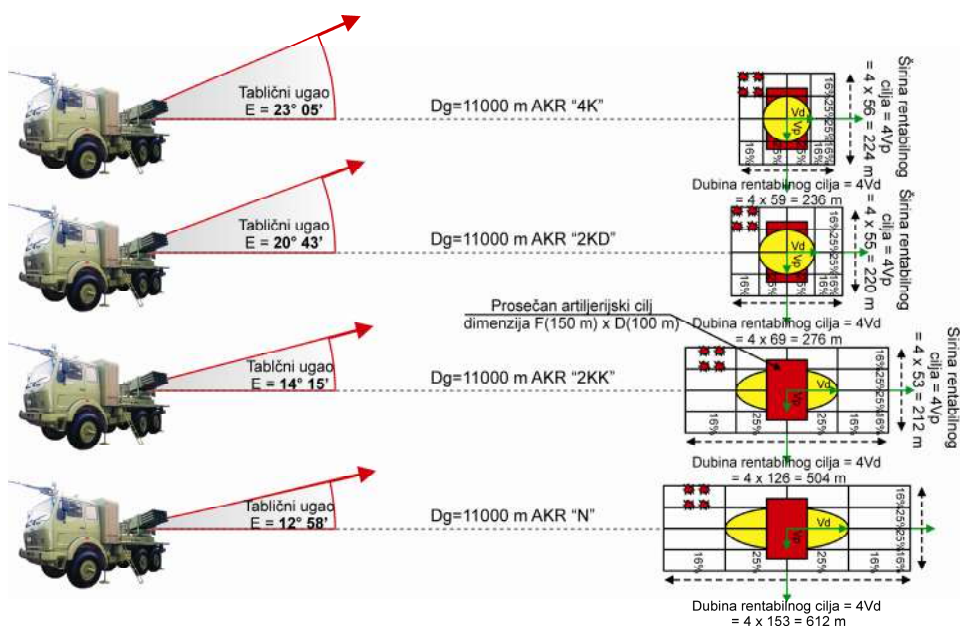
$$N = \frac{4V_d \times 4V_p}{V_{pog}} = \frac{4 \times 69 \times 4 \times 55}{672,4} = 90,303 \cong 90 \text{ raketa}$$

g) sa otvorene dve kraće aerodinamičke kočnice rakete (AKR u položaju 2KK)

$$N = \frac{4Vd \times 4Vp}{V_{pog}} = \frac{4 \times 126 \times 4 \times 53}{672,4} = 158,905 \cong 159 \text{ raketa}$$

h) sa zatvorenim aerodinamičkim kočnicama rakete (AKR u položaju N)

$$N = \frac{4Vd \times 4Vp}{V_{pog}} = \frac{4 \times 153 \times 4 \times 53}{672,4} = 192,956 \cong 193 \text{ rakete}$$



Slika 10 – Dimenzije rentabilnog cilja za oruđe LRSV M77 u zavisnosti od položaja AKR na istoj daljini gađanja i različitim tabličnim uglovima

Sa slike 10 i na osnovu proračuna vidi se da prilikom gađanja na istoj daljini koja je omogućena izborom bilo koje kombinacije AKR, pri istoj verovatnoći pogađanja, slika rasturanja se drastično smanjuje u korist položaja AKR „4K“. Takođe, potreban broj projektila (N_p) za izvršenje zadatka je samo 79 raketa u odnosu na položaj AKR „N“ (193 rakete). Odnos površina rentabilnog cilja dimenzija $4Vd \times 4Vp$ za AKR „N“ koji je $P_C = 129744 \text{ m}^2$ i AKR „4K“ koji je $P_C = 52864 \text{ m}^2$, dakle 2,45 puta je manji pri gađanju sa sve četiri aerodinamičke kočnice.

To je približno jednako odnosu potrebnog broja projektila za izvršenje vatrenog zadatka pri gađanju bez AKR „N“. Tada je potrebno $N_p = 193$ ra-

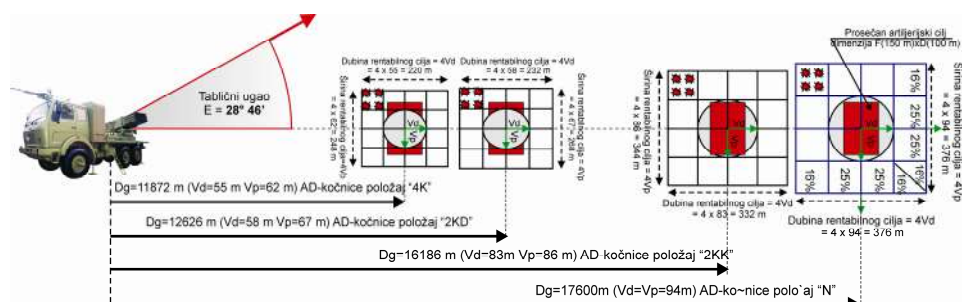
kete u odnosu na gađanje sa maksimalno otvorenim AKR „4K“, gde je $N_p = 79$ raketa. Dakle, odnos je isti i iznosi 2,45 puta manje raketa. Zaključuje se da, u skladu sa borbenim mogućnostima, treba koristiti položaj AKR „4K“, na ispaljenim raketama kao rentabilnu meru gađanja.

Važno je uočiti i sledeće efekte koji nisu detaljnije razmatrani. Ukupni cilj koji je rentabilan za gađanje je oko 2,45 puta manji pri upotrebi AKR, ali je za njega potrebna i manja gustina vatre od četiri rakete po najnepovoljnijoj jediničnoj površini. To znači da pored korelacije ukupnog broja raketa prema ukupnoj površini cilja, treba izmeniti i početne hipoteze o tome koliko raketa treba da prekrije jediničnu površinu, $1V_d \times 1V_p$. Pošto je i ova veličina u korelaciji 2,45, to će se za istu gustinu vatre još jednom prepoloviti potreban broj raketa. Ako se umesto četiri rakete po jediničnoj površini sada usvoji 2,45 puta manji broj raketa tj., 1,63 rakete, odnosno približno dve rakete, novi broj raketa za svaku od napred razmatranih opcija biće duplo manji. Dakle, upotrebom AKR-a rentabilnost se povećava po dva osnova, a samo zbog smanjenja verovatnog skretanja po pravcu V_p i po dometu V_d . Prvi osnov je, zbog smanjenja dimenzija površinskog cilja, a drugi, zbog smanjenja gustine vatre po jediničnoj površini.

Tabela 3

Uticaj položaja AKR na različitim daljinama gađanja i istom tabličnim uglovima na odabir rentabilnog cilja za oruđe LRSV M77

Tablični ugao ($^\circ$, ')	Daljina u 0-00 164-00	zatvorene AD-kočnice položaj "N"			otvorene dve kraće AD-kočnice položaj "2KK"			otvorene dve duže AD-kočnice položaj "2KD"			otvorene četiri AD-kočnice položaj "4K"		
		Jedno V_s		Daljina gađanja (m)	Jedno V_s		Daljina gađanja (m)	Jedno V_s		Daljina gađanja (m)	Jedno V_s		Daljina gađanja (m)
		po daljini V_d (m)	po pravcu V_p (m)		po daljini V_d (m)	po pravcu V_p (m)		po daljini V_d (m)	po pravcu V_p (m)		po daljini V_d (m)	po pravcu V_p (m)	
28 46 512		17000	97	89	16000	83	85	12000	62	62	11000	59	56
		17600	94	94	16186	83	86	12626	58	67	11872	55	62
		18000	92	97	17000	80	94	13000	56	71	12000	54	64



Slika 11 – Dimenzije rentabilnog cilja za oruđe LRSV M77 u zavisnosti od položaja AKR na različitim daljinama gađanja pod istom tabličnim uglom

Primenom izraza (1), pri gađanju na različitim daljinama gađanja ali pri istom tabličnom uglu, pri istoj verovatnoći pogađanja, u zavisnosti od položaja aerodinamičkih kočnica raketa (AKR), potreban broj projektila (N) za izvršenje zadatka je:

a) sa otvorene četiri aerodinamičke kočnice rakete (AKR u položaju 4K)

$$N = \frac{4Vd \times 4Vp}{V_{pog}} = \frac{4 \times 55 \times 4 \times 62}{672,4} = 81,142 \cong 81 \text{ raketa}$$

b) sa otvorene dve duže aerodinamičke kočnice rakete (AKR u položaju 2KD)

$$N = \frac{4Vd \times 4Vp}{V_{pog}} = \frac{4 \times 58 \times 4 \times 55}{672,4} = 90,468 \cong 92 \text{ rakete}$$

c) sa otvorene dve kraće aerodinamičke kočnice rakete (AKR u položaju 2KK)

$$N = \frac{4Vd \times 4Vp}{V_{pog}} = \frac{4 \times 83 \times 4 \times 86}{672,4} = 169,851 \cong 170 \text{ raketa}$$

d) sa zatvorenim aerodinamičkim kočnicama rakete (AKR u položaju N)

$$N = \frac{4Vd \times 4Vp}{V_{pog}} = \frac{4 \times 94 \times 4 \times 94}{672,4} = 210,255 \cong 210 \text{ raketa}$$

Kao i u prethodnim slučajevima i ovde je usvojena ista gustina vatre, tj. četiri rakete. Ukupan broj ispaljenih raketa biće još manji od navedenog pod a) do d), proporcionalno smanjenju površine jediničnog cilja $1Vd \times 1Vp$ u korelaciji sa normativom efikasne površine za dejstvo jednom raketom [9], [10], [12], [13]. Taj broj nije razmatran u ovom delu rada, ali se lako može odrediti ako se na svakom dometu izračuna jedinični cilj i njegova površina kada se gađa bez kočnica, i uporedi sa repnim brojem raketa od (4) pa zatim uporedi sa referentnom površinom pri gađanju sa kočnicama AKR, na tom istom dometu. Takva studija pokazala bi veoma povoljne rezultate u smislu još većeg smanjenja broja raketa i doprinosa rentabilnom gađanju upotrebom AKR.

Zaključak

Na osnovu izvršene analize i proračuna uticaja izbora aerodinamičkih kočnica (AKR) na rentabilnost gađanja artiljerijskih površinskih ciljeva samohodnim višecevnim lanserom raketa (LRSV), dolazi se do sledećih zaključaka u vezi sa činjenicama o borbenoj efikasnosti i rentabilnosti potrošnje raketa.

– Brzina reagovanja na različitim dometima za tzv. gađanje po dubini istim rafalom moguće je upotrebom AKR-a sa minimalnom potrošnjom municije, ali samo na određenim daljinama gađanja.

– Pri gađanjima na istom dometu upotreba AKR-a obezbeđuje rafalu minimalnu potrošnju raketa izborom optimalnih trajektorija po maksimalnoj visini leta, što obezbeđuje prelet preko prepreka različitih visina. Ovo je posebno važno, uz činjenicu da je potrošnja raketa i do dva i po puta manja na istoj daljini. Ako gustina vatre po površinskom cilju ne zahteva potpuni rafal, smanjiće se broj rakete upotrebom AKR-a i vreme izvršenja zadatka, što je posebno važno za dužinu boravka oruđa na vatrenom položaju.

– Uticaj položaja AKR na odabir rentabilnog cilja za oruđe LRSV M77 je veoma velik. Pri dejstvu na istoj daljini gađanja različitim tabličnim uglovima poželjno je koristiti položaj AKR „4K“.

– Pri dejstvu na različitim daljinama gađanja pod istom tabličnim uglom neophodno je pronaći optimalno rešenje između dimenzija rentabilnog cilja, položaja AKR i daljine gađanja.

– Oruđem LRSV M77 (u zavisnosti od položaja AKR) nije rentabilno gađati ciljeve koji se nalaze na daljinama manjim od dve trećine dometa.

– Nezavisno od uticaja izbora AKR, vatrene mogućnosti oruđa zavise od tablične preciznosti (rasturanja), tačnosti pripreme početnih elemenata za gađanje, oblika i karakteristika cilja i efekta neutralisanja koji se želi postići određenim dejstvom bojne glave.

Literatura

[1] *Pravilo Lanser raketa samohodni višecvni 128 mm M77*, Uprava artiljerije, VIZ, BG, 1998.

[2] *Privremene tablice gađanja za LRSV-128 mm M77*, UA-193, Beograd, 1989.

[3] *Artiljerijsko pravilo gađanja*, Uprava artiljerije, Vojna štamparija, Beograd, 1991.

[4] *Tablice gađanja za Top 130 mm M46*, Uprava artiljerije, VIZ, 1984.

[5] Kokelj, T., *Priprema i izvršenje artiljerijskih bojnih gađanja sa višecvnim bacačem raketa 128 mm M-63 'PLAMEN' – skripta*, Vojna štamparija, Kruševac, 1997.

[6] Kokelj, T., *Priprema i gađanje samohodnim višecvnim lanserom raketa 128 mm M77 'OGANj' – skripta* MO VA, Vojna štamparija, Beograd, 2009.

[7] Kokelj, T., *Zbirka rešenih zadataka iz Teorije artiljerijskog gađanja*, UA-225, Vojna knjiga 1160, VIZ, Beograd, Ševac, 1999.

[8] Milinović, M., *Osnovi projektovanja raketa i lansera*, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd 2002.

[9] Živanov, Ž., *Teorija gađanja*, udžbenik za vojne škole i artiljerijske jedinice, UA-216, VIZ Beograd, 1979.

[10] Sekulović, J. D., Đurković P. V., Milošević B. M., *Pozicioniranje, orijentisanje i određivanje daljine do cilja na samohodnom višecvnom raketnom lan-*

sirom sistemu korišćenjem GPS i elektronskih karata, *Vojnotehnički glasnik*, vol. 58, broj 3, pp. 32-46, ISSN 0042-8469, UDC 623+355/359, Beograd 2010.

[11] Ćuk, V. D., Korekcija putanje žiroskopski stabilisanog projektila primenom proporcionalne navigacije, *Vojnotehnički glasnik (Military Technical Courier)*, vol. 58, broj 1, pp. 5-12, ISSN 0042-8469, UDC 623+355/359, Beograd 2010.

[12] Holclajtner, S. M., Jeremić, M. O., Milinović P. M., Simulacija rafala višestruke bacača raketa, *Vojnotehnički glasnik (Military Technical Courier)*, vol. 58, broj 2, pp. 5-25, ISSN 0042-8469, UDC 623+355/359, Beograd 2010.

[13] Kokelj, T., Regodić, D., Tačnost potpune pripreme početnih elemenata posrednog gađanja, *Vojnotehnički glasnik (Military Technical Courier)*, vol. 53, broj 2, pp. 140-156, ISSN 0042-8469, UDC 623+355/359, Beograd 2005.

COST-EFFECTIVENESS CRITERION FOR OPTIMAL FIRING AT SURFACE TARGETS BY MLRS UNGUIDED ROCKETS WITH BALLISTIC AERODYNAMIC BRAKES

FIELD: Mechanical engineering, Mathematics

Summary:

A problem of selecting an artillery target while firing from a multiple launch rocket system (MLRS) is not considered frequently in literature. A solution to that problem involves a good agreement among many elements such as shooting dispersion law of distribution, destruction target laws, dimensions of target, and the rate of fire. In this paper, the problem is discussed only for a 128 mm multiple launch rocket system (MLRS) M77, known as "OGANJ", with an unguided wrap around low-spin stabilized rockets with deflectors - aerodynamic brakes for ballistic trajectory control. The paper considered the advantages and disadvantages of the brakes in live fire using the proximity artillery service methodology.

Introduction

For the realization of artillery support tasks, the MLRS OGANJ M77 uses a special HEF, 128 mm unguided rocket, model M77, designed with properties not similar to ammunition solutions in former Eastern Armies of the GRAD type MLRS. In order to deliver fast and effective ripple fire to different ranges from the same mounting and to same ranges but along different trajectories, system designers have used ballistic aerodynamic brakes, integrated on the supporting ring of the rocket fins, in a form of programmable air interceptors. The system consists of two short and two long interceptors, i.e. air obstacles, used in pairs when opened, at the beginning and during the rocket flight. The mission is possible by using two short or two long or four short and long interceptors, for a group of rockets in the ripple. During the unguided rocket flight, there are different ballistic trajectories for a group of fired rockets. The interceptor combination is activated from the cabin of

the self-propelled launching vehicle by a special mechanism for mechanical brakes, by a remote control. The interceptors take position after the rocket leaves the launching tube. Before firing, the brake setting is done based on the given range, the battlefield terrain shape and the firing tables for indirect fire. Ballistic aerodynamic brakes have a similar function in the rocket artillery as powder charges have in the classic artillery when gun –howitzers are used. The difference is that aerodynamic brakes perform their function along the whole trajectory while powder charges effect is constrained only to initial velocity. This mechanism in low-spin stabilized unguided rockets enables different trajectories by height and by range from the same launching position.

Methodology of the cost-effectiveness criterion for firing at surface targets

Surface target dimensions should be related to dispersion probability and rocket accuracy in the MLRS ripple fire. This is the initial condition for the cost-effectiveness criterion evaluations for artillery fire with rockets designed with aerodynamic brakes. The ratio between the dispersion probability by range and the dispersion probability by direction is the function of range, and for this type of rockets it is also the function of types and a number of aerodynamic brakes during flight. Using air brakes, it is possible to achieve approximately the same dispersion probability in two directions around the target point, by range and by direction. This means a circular shape of dispersion, which is very important for firing efficiency at small ranges. The paper presents one complete simplified proximity model for efficient consumption of ammunition used for surface targets. The efficient consumption of rockets in ripple fire is compared for ranges where rockets have optimal performances, and where they can be used with and without aerodynamic brakes. The model takes data from artillery firing tables, without using detailed manufacturers data and without the theory of accuracy probability estimations and calculations. This model is the basis for further detailed analyses of aerodynamic effects of brakes of the interceptor type on artillery firing errors, as well as for the cost-effectiveness criterion in artillery rocket ripple fire. The paper considered the practical use of two models of aerodynamic brakes in MLRS live fire.

Effects of aerodynamic brakes on the cost-effectiveness criterion

In the first case, a fixed mounting position and fixed target horizontal ranges are used, realized by a combination of various elevation range angles, and aerodynamic brakes during a rocket flight. This case achieves different trajectories for the same ranges. This case is applied for surmounting different heights of obstacles on the terrain and also for confusing enemy radars. This method provides the OTOT (on time on target) method of firing by using the battery organization of ripple fire from different launchers with an appropriate fire control system.

In the second case, the same mounting position and the same elevation angle are used, but surface targets are distributed at different ranges, from the minimum to the maximum range, in four groups. The ranges are chosen by using aerodynamic brakes, arming their interceptors before fire.

Conclusions

Based on the previous analysis of air brakes efficiency, applied on unguided rockets, the following conclusions can be derived.

Fast live ripple fire at different ranges with the same ripple charge of a launcher is possible by using aerodynamic brakes with the minimum consumption of rockets while firing at surface targets. That is possible only at the given ranges optimally chosen from the firing tables. This case is not recommended for the optimum usage of aerodynamic brakes combination, because it is necessary to find out an optimum solution between target dimensions, dispersion and ranges, for an optimum arming of interceptors - air brakes on the rocket.

Firing at same ranges with variable trajectories and their optimum heights provides 2.5 times less consumption of rocket ammunition for the same range than firing with rockets without breaks. This procedure needs additional time for launcher elevation changes. The best position of aerodynamic brakes for this case is 4k, which means four interceptors opened during flight. It is not recommended, from the cost-effectiveness criterion, to fire at targets at the ranges shorter than 2/3 of the maximum range. All applications of aerodynamic brakes promise new research into the old idea of how to improve ripple fire of unguided MLRS, dictated on the battlefield by firing time conditions expressed in the attitude: fire as fast as possible. Important possibilities in further research have to be considered in the light of new fire control achievements, that is what we can get if the method OTOT can be applicable in the sequence ripple fire by using aerodynamic brakes and the automatic elevation changes concept. Further research will give the answers.

Key words: unguided rocket, artillery, aerodynamic brakes, MLRS, firing, firing errors, surface target

Datum prijema članka: 12. 05. 2009.

Datum dostavljanja ispravki rukopisa: 06. 10. 2010.

Datum konačnog prihvatanja članka za objavljivanje: 08. 10. 2010.

MEHANOHEMIJSKA SINTEZA I MAGNETNE OSOBINE NANOČESTIČNOG MAGHEMITA

Tadić M. *Marin*, Institut za nuklearne nauke „Vinča“,
Laboratorija za teorijsku fiziku i fiziku
kondenzovane materije, Beograd,
Čitaković M. *Nada*, Vojna akademija, Katedra
prirodno-matematičkih nauka, Beograd

UDC: 553.31 ; 622.7.017

OBLAST: Materijali (Nanomaterijali)

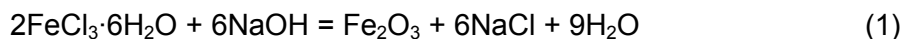
Sažetak:

U radu je dato istraživanje magnetnih karakteristika nanočestičnog ferioksida, γ -Fe₂O₃ (maghemita), koji ispoljava superparamagnetno ponašanje tj. superparamagnetizam. Uzorci nanočestičnog maghemita dobijeni su mehanohemijskom metodom. Kristalna struktura uzoraka ispitana je pomoću difrakcije elektrona i x-zraka i pokazano je da se radi o monofaznim uzorcima maghemita. Na osnovu TEM snimaka utvrđena je veličine čestica. Kod uzoraka nanočestičnog maghemita jasno se vide promene magnetnih osobina sa promenom veličine čestica što nam ukazuje na velike mogućnosti menjanja magnetnih osobina kod istog materijala sa promenom veličine čestica.

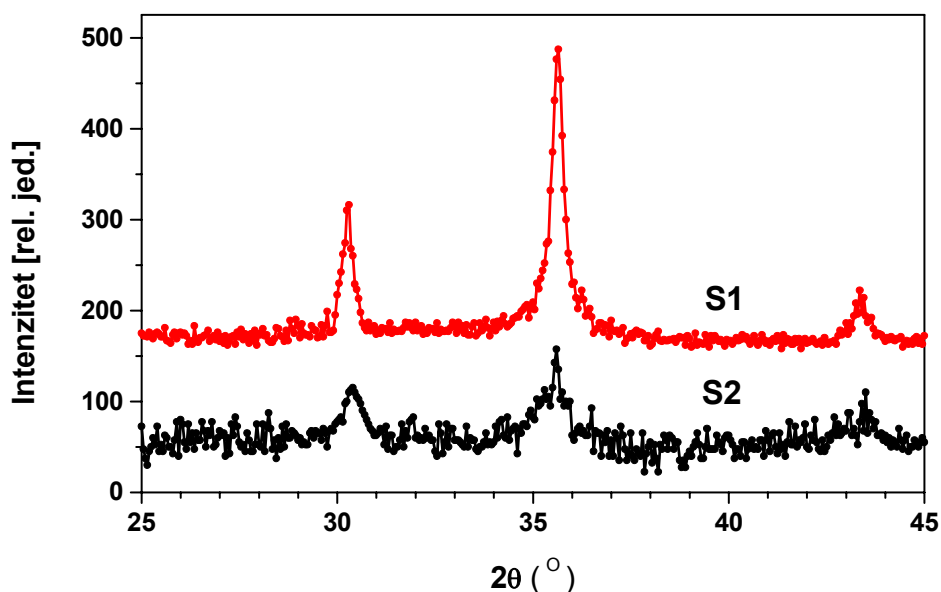
Ključne reči: nanostrukturisani materijali, magnetizacija, magnetna merenja, mehanohemijska metoda, transmisiona elektronska mikroskopija – TEM, superparamagnetizam.

Sinteza, difrakcioni eksperimenti i transmisiona elektronska mikroskopija

Nanočestični maghemit sintetisan je mehanohemijskim postupkom na sobnoj temperaturi koristeći kao polazne komponente gvožđe hlorid FeCl₃·6H₂O i natrijum hidroksid NaOH. Hemijska reakcija između polaznih komponenti može se predstaviti na sledeći način:



Mase polaznih komponenti izabrane su da zadovoljavaju prethodnu jednačinu. Posle sušenja na temperaturi 60°C prah je stavljen u mlin (Pulverisette 9, Fritsch), gde je izvršeno mlevenje. Vreme mlevenja prvog uzorka (S_1) bilo je pet minuta, dok je za drugi uzorak (S_2) mleven četiri sata. Ovako dobijeni uzorci su izmereni.



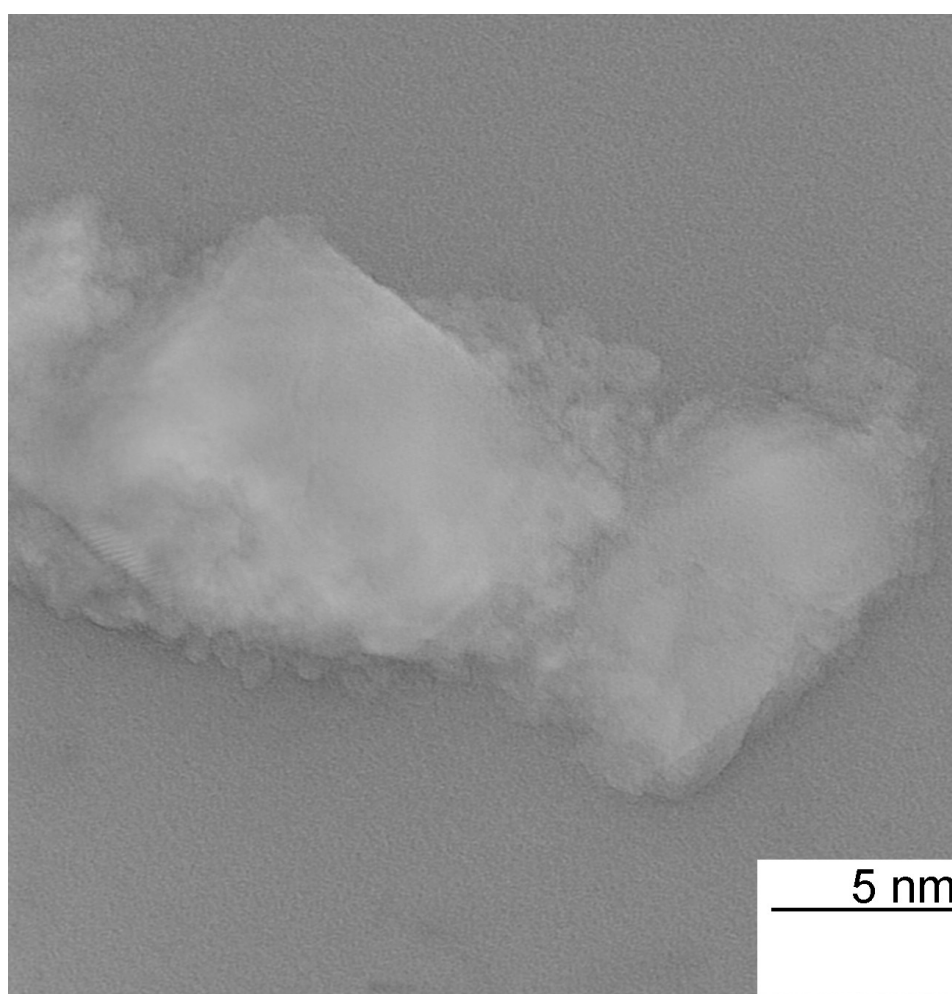
Slika 1 – Difraktogram nanočestičnih uzoraka $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, dobijen rasejanjem x-zraka
Figure 1 – X-ray powder diffraction patterns of the nanocomposite $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$

Difraktogrami su snimljeni na sobnoj temperaturi na difraktometru za prah Brucker D8. Kao izvor x-zraka korišćeno je zračenje bakarne antikatode. Snimano je u intervalu $20^\circ \leq 2\theta \leq 50^\circ$, sa korakom $0,02^\circ$ i ekspozicijom 4 s po koraku. Na difraktogramu (slika 1) se mogu videti široki maksimumi za koje je nakon analize utvrđeno da odgovaraju fazi maghemita [1]. Srednja vrednost veličine kristalita određena je pomoću Scherrer-ove jednačine

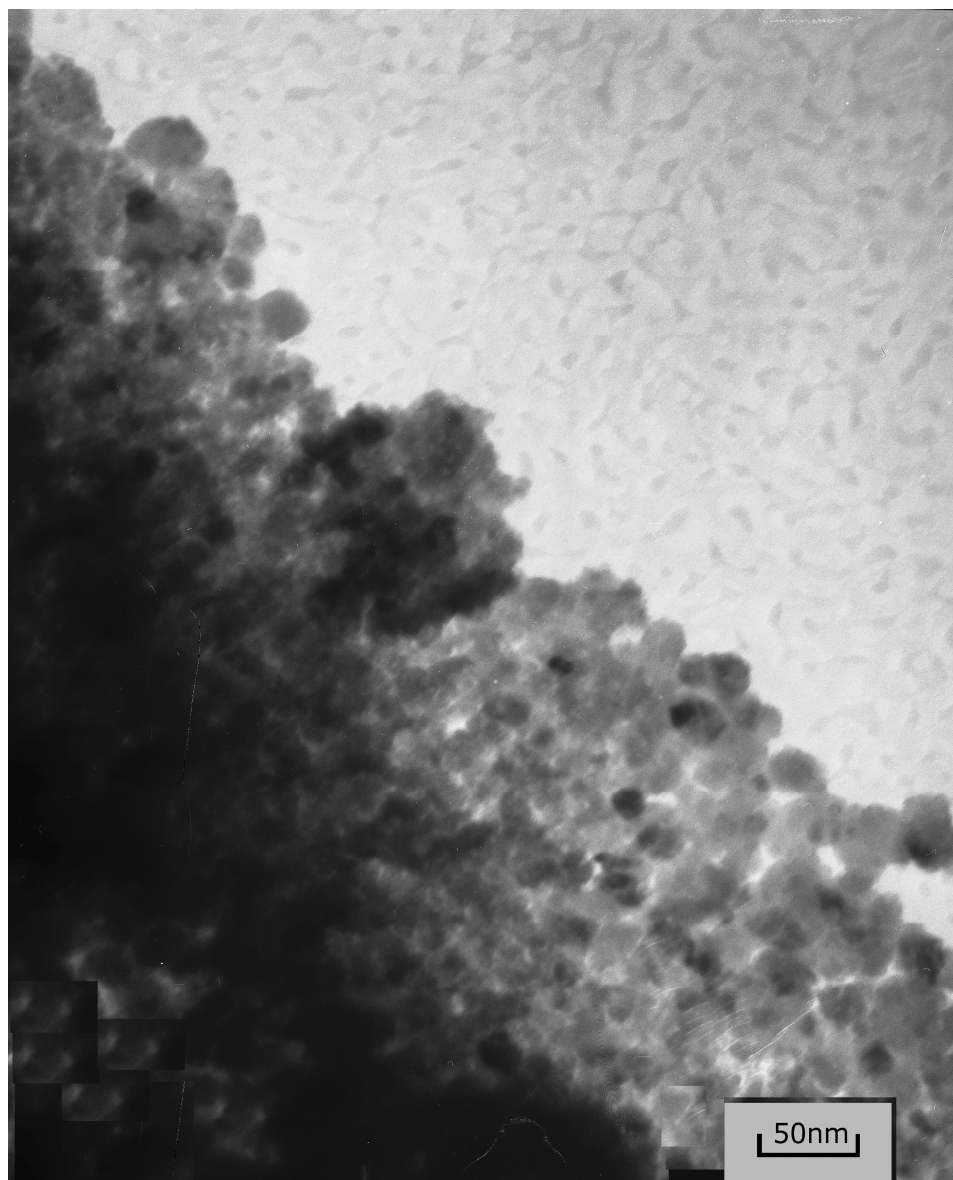
$$D_{hkl} = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (2)$$

i dobijene su vrednosti 13 nm za S_1 i 11 nm za S_2 , što pokazuje da vremenski interval mlevenja utiče na veličinu kristalita tj. uređenog jezgra nanočestice (duži period mlevenja manji kristaliti).

Veličina čestica određena je i pomoću TEM-a. Sa TEM snimka za uzorak S_1 (slika 2) vidimo čestice prosečne veličine oko 15 nm, što se slaže sa difrakcijom x-zraka. TEM snimak za uzorak S_2 (slika 3) pokazuje široku distribuciju čestica po veličini (10–40 nm) i čestice su znatno veće od dobijenih vrednosti iz difrakcije x-zraka, što ukazuje na neuređenu strukturu površinskog sloja (kore) i defekte u nanočesticama.



Slika 2 – Fotografija dobijena pomoću TEM-a za uzorak S_1 nanočestičnog $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$
Figure 2 – Transmission electron micrograph for the S_1 sample of the nanoparticle $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$

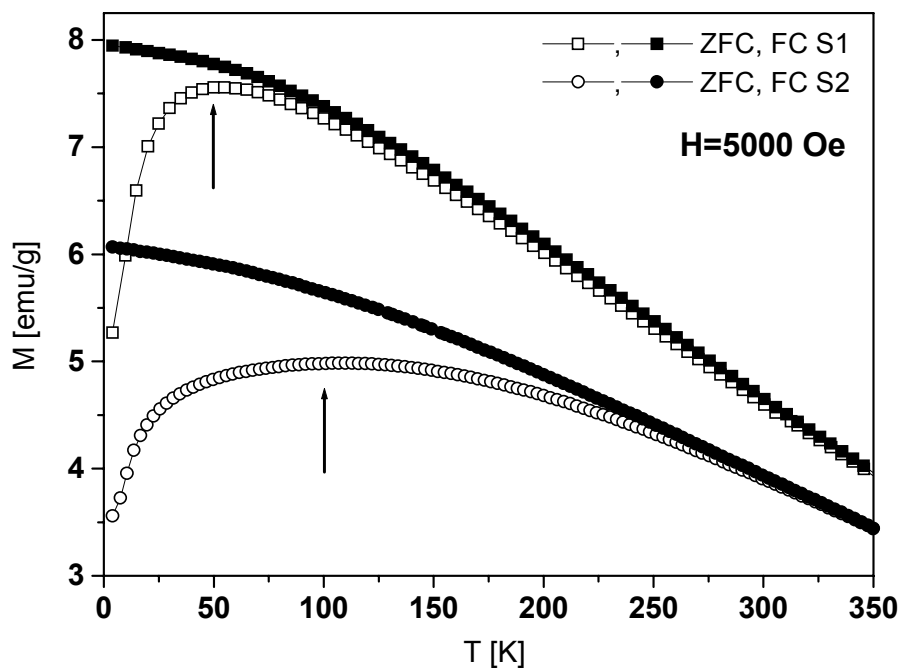


*Slika 3 – Fotografija dobijena pomoću TEM-a za uzorak S₂
nanočestičnog γ -Fe₂O₃*
*Figure3 – Transmission electron micrograph for the S₂ sample
of the nanoparticle γ -Fe₂O₃*

Superparamagnetizam kod nanočestičnog maghemita

Magnetna merenja su urađena u Laboratoriji za fiziku kondenzovane materije INN „Vinča“ pomoću SQUID magnetometra. Merena je zavisnost magnetizacije uzoraka, nanočestičnog $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, od temperature T pri konstantnom magnetnom polju. Merenja su izvršena u magnetnom polju jačine $H=5000$ Oe, u temperaturnom intervalu 2–350 K. Dobijena zavisnost magnetizacije od temperature pri konstantnom magnetnom polju u ZFC i FC režimu za uzorke S_1 i S_2 prikazana je na slici 4. Na slici se može zapaziti ponašanje karakteristično za nanočestične materijale koje se može opisati na sledeći način:

1. razdvajanje ZFC i FC krive, temperature ireverzibilnosti (temperature na kojima dolazi do razdvajanja između ZFC i FC krive) su $T_{\text{irr}}=240$ K za uzorak S_1 i $T_{\text{irr}}=280$ K za uzorak S_2 .



Slika 4 – Zavisnost magnetizacije od temperature za uzorke nanočestičnog maghemita (ZFC i FC merenja) u magnetnom polju jačine 5000 Oe

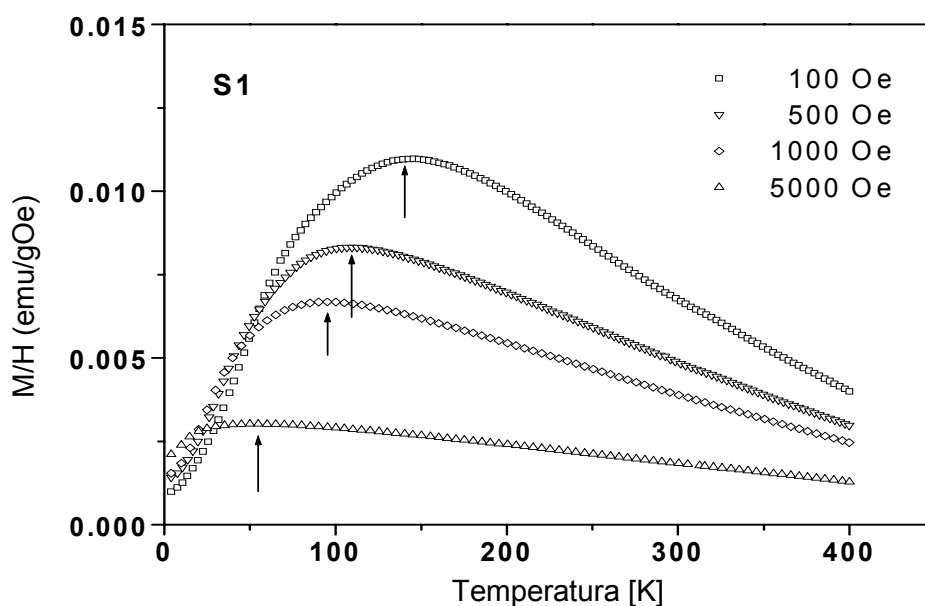
Figure 4 – Temperature dependence of the zero-field-cooled (ZFC, open symbols) and field-cooled (FC, solid symbols) magnetization of the nanoparticle $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ measured in a field of 5000 Oe

2. ZFC krive pokazuju široke maksimume koji odgovaraju temperaturama blokiranja (T_B). Za uzorak S_1 $T_B=50$ K, dok je za uzorak S_2 $T_B=100$ K.

3. ZFC magnetizacione krive opadaju ispod T_B , dok FC krive nastavljaju da rastu.

Ovde ćemo napomenuti da široki maksimumi oko T_B i velika razlika između T_{irr} i T_B ukazuju na veoma široku distribuciju čestica po veličinama u oba uzorka. Viša temperatura blokiranja i širi maksimum u uzorku S_2 u poređenju sa uzorkom S_1 ukazuje na veću prosečnu veličinu čestica u uzorku S_2 i na drugačiju distribuciju čestica po veličini.

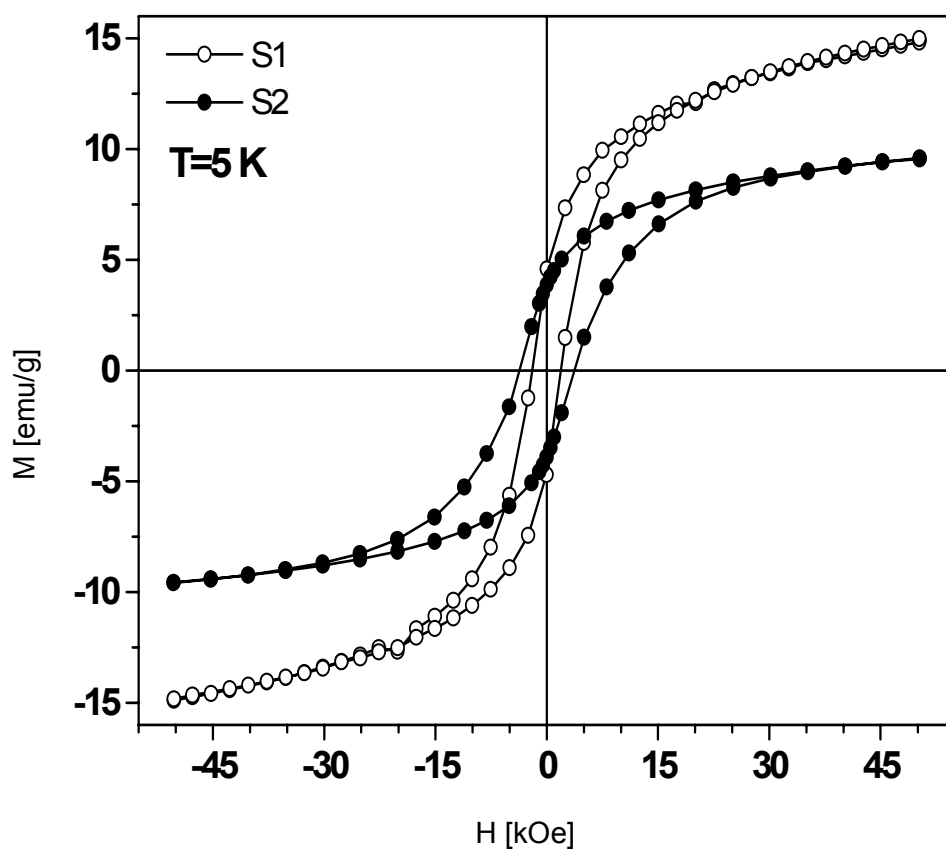
Jedno od svojstava superparamagnetnih čestica je promena vrednosti temperature blokiranja sa promenom jačine spoljašnjeg magnetnog polja. Zavisnost T_B od jačine spoljašnjeg magnetnog polja za uzorak S_1 prikazana je na slici 5. Očigledno je da temperatura blokiranja opada sa porastom magnetnog polja, što se i očekuje za superparamagnetni uzorak [1, 10].



Slika 5 – Zavisnost temperature blokiranja od jačine magnetnog polja nanočestični maghemit (uzorak S_1)

Figure 5 – Nanoparticle $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ blocking temperature vs. the magnetic field dependence for the S_1 sample

Zavisnost magnetizacije od spoljašnjeg magnetnog polja na temperaturi 5 K za oba uzorka prikazana je na slici 6. Sa slike su određene vrednosti koercitativnih polja H_C i ona iznose 1.800 i 3.500 Oe za uzorke S_1 i S_2 . Ove vrednosti su među najvećim koje su zabeležene za nanočestični maghemit.



Slika 6 – Histerezisne petlje merene na temperaturi od 5 K za nanočestične uzorke $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$

Figure 6 – Magnetization vs. field dependence recorded at 5K for the nanoparticle $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$

Magnetizacija nije postigla saturaciju u poljima od 5 T, pa je saturaciona magnetizacija određena ekstrapolacijom zavisnosti M od $1/H$. Dobijene vrednosti su za uzorak S_1 $M_s=17,1$ emu/g i za uzorak S_2 $M_s=11,3$ emu/g. Dobijene vrednosti za saturacionu magnetizaciju su značajno manje od vrednosti za maghemit visokog kristaliniteta, koja iznosi $M_s=80$ emu/g [5]. Glavni razlog ovog smanjenja su površinski efekti, odnosno neuređenost spinskih magnetnih momenata na površini čestica. Moraju se uzeti u obzir i defekti u unutrašnjosti čestica koji takođe utiču na smanjenje saturacione magnetizacije [4, 6, 7]. Debljina ovog površinskog neuređenog sloja (kore) može se proceniti pomoću izraza [8]:

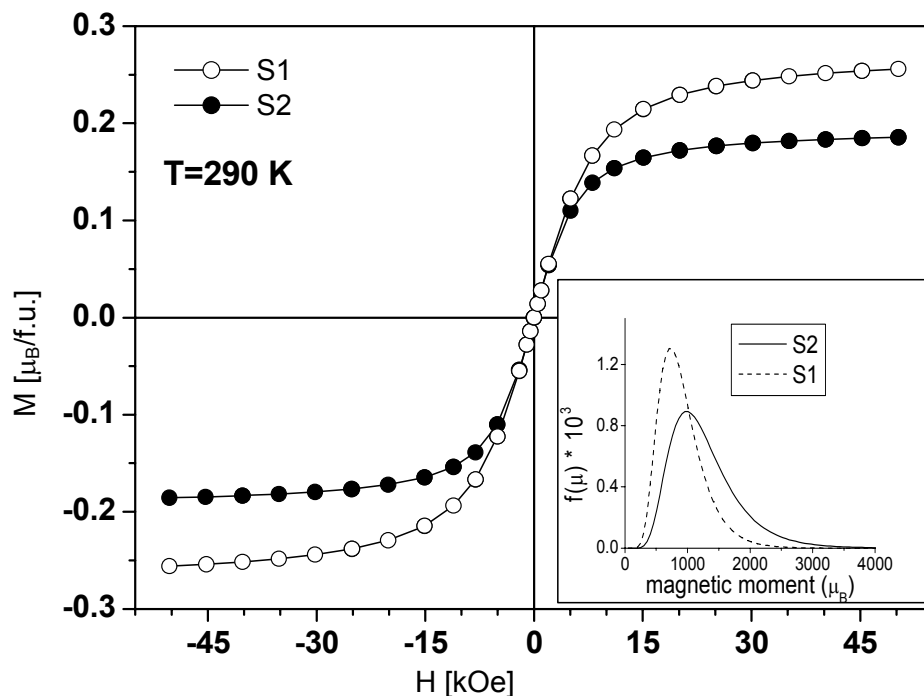
$$M_s(d) = M_s(bulk) \left(1 - \frac{6t}{d} \right) \quad (3)$$

gde $M_s(d)$ i $M_s(bulk)$ predstavljaju saturacione magnetizacije nanočestica prečnika d i balka, d -prečnik čestica i t -debljina kore. Koristeći vrednosti saturacione magnetizacije za balk i za nanočestične uzorke (S_1 i S_2) dobili smo debljinu kore (površinskog neuređenog sloja) za nanočestične uzorke i ona iznosi za uzorak S_1 $t_1=1,2$ nm, a za uzorak S_2 $t_2=2,8$ nm. Iz ovih vrednosti vidimo da uzorak S_2 ima znatno deblju neuređenu koru, što je i očekivano na osnovu prethodnih rezultata. Odnos između remanentne i saturacione magnetizacije u slučaju neinteragujućih ferimagnetnih čestica iznosi $M_R/M_s=0,5$, u našem slučaju je niži i iznosi 0,3 i 0,4 za uzorke S_1 i S_2 , što ukazuje na postojanje interakcija između čestica [9], [10].

Zavisnost magnetizacije od magnetnog polja na temperaturi $T=290$ K za oba uzorka prikazana je na slici 7. Ova zavisnost pokazuje da su oba uzorka na ovoj temperaturi u superparamagnetnom stanju ($H_c=0$ Oe, $M_R=0$ emu/g). Podešavana je *Lagevin*-ova funkcija

$$M = N\mu L(x) \quad (4)$$

(jednačina koja pretpostavlja da su svi magnetni momenti u uzorku jednaki) na eksperimentalne podatke.



Slika 7 – Zavisnost magnetizacije od magnetnog polja na temperaturi 290 K. Punom linijom su prikazane modificovane Langevin-ove krive dobijene podešavanjem izraza (5) na eksperimentalne vrednosti za uzorke S₁ i S₂

Figure 7 – $M(H)$ behavior of the samples S1 and S2 at the temperature $T = 290\text{ K}$: experimental data (dots) and weighted Langevin function fit (full lines). Inset: log-normal distribution functions $f(\mu)$ of the particle magnetic moments μ for both samples

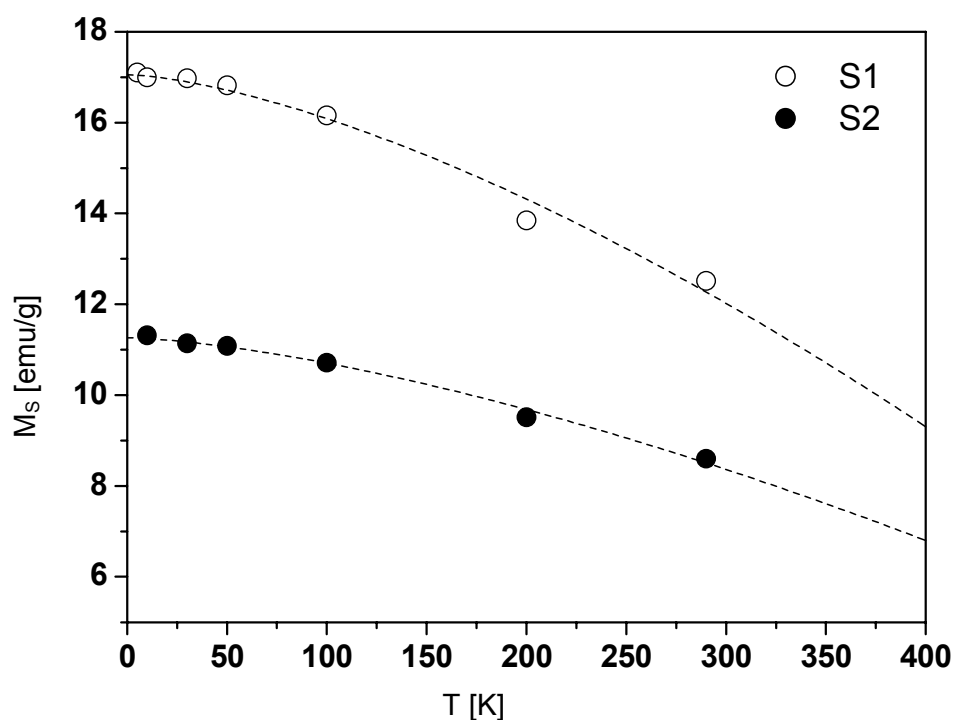
Uočeno je slabo slaganje, što je i očekivano, zbog velike distribucije čestica po veličini (ne ispunjava pretpostavke iz *Langevin*-ove teorije). Zbog toga smo izvršili podešavanje modificovane *Langevin*-ove funkcije

$$M = \int_0^{\infty} L(x) f(\mu) d\mu \quad (5)$$

(jednačina koja pretpostavlja distribuciju čestica odnosno magnetnih momenata) na eksperimentalne podatke (puna linija) i dobijeno je odlično slaganje. Dobijene su vrednosti za magnetne momente čestica i oni iznose $848\ \mu_B$ i $1033\ \mu_B$ za uzorke S₁ i S₂. Vrednosti za magnetne momente čestica opadaju sa porastom veličine čestica (TEM merenja), što ukazuje na povećanje debljine neuređene kore i povećanje defekata unutar čestice. Na slici 7 (umetak) predstavljena je distribucija magnetnih momenata

nanočestica koja pokazuje široku distribuciju, što je u skladu sa prethodnim merenjima (TEM i magnetna merenja).

Da bismo pokazali temperaturnu zavisnost saturacione magnetizacije, za oba uzorka, izvršena su merenja magnetnog dipolnog momenta u zavisnosti od magnetnog polja na različitim temperaturama ($T=5-290$ K). Saturaciona magnetizacija je određena ekstrapolacijom zavisnosti M od $1/H$. Temperaturnu zavisnost saturacione magnetizacije možemo opisati pomoću *Bloch*-ovog zakona [2]:



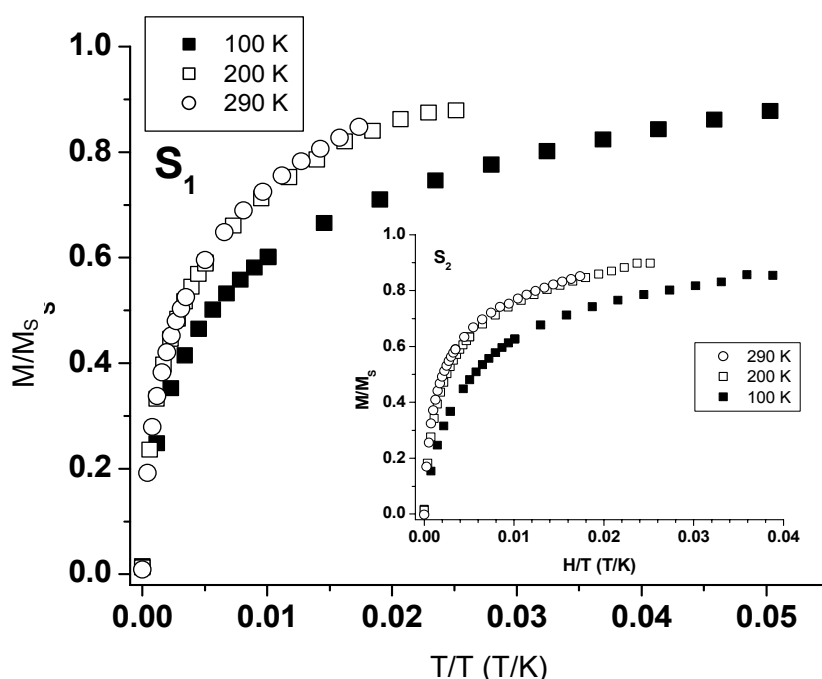
Slika 8 – Zavisnost saturacione magnetizacije od temperature. Isprekidanom linijom su prikazane krive dobijene podešavanjem izraza (6) na eksperimentalne vrednosti za uzorke S_1 i S_2

Figure 8 – Saturation magnetizations dependence on the temperature. Dashed lines show curves fitted to the expression (6) for the experimental values for the samples S_1 and S_2

$$M_s = M_0 \left(1 - BT^{\frac{3}{2}} \right) \quad (6)$$

gde je M_0 saturaciona magnetizacija za temperaturu $T=0$ K, B -spinsko talasna konstanta.

Podešavajući jednačinu (6) na eksperimentalne podatke (slika 8) dobijene su za uzorak S_1 vrednosti saturacione magnetizacije na 0 K $M_0=17,1$ emu/g, dok je za uzorak S_2 dobijeno $M_0=11,31$ emu/g. Iz M_0 vrednosti izračunat je magnetni moment po formulskoj jedinici i dobijene su vrednosti za uzorke S_1 i S_2 0,68 i 0,18 $\mu_B/f.$ j. Poredeći ove vrednosti sa vrednostima iz literature za nanočestični maghemit, pronađeno je zadovoljavajuće slaganje sa vrednostima u literaturi koje se kreću između 0,14 μ_B [4] do 2,2 μ_B [3] po formulskoj jedinici. Ovakav veliki raspon posledica je različitih veličina čestica, defekata unutar nanočestica i različite debljine neuređene kore.



Slika 9 – Zavisnost M/M_s od H/T za uzorke nanočestičnog maghemita

Figure 9 – Dependence M/M_s on the H/T for the nanoparticle $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$

Kao što je već rečeno, za sistem u superparamagnetnom stanju zavisnosti magnetizacije M od H/T treba da se poklope na jednu krivu [2], to je i pokazano za temperature 200 i 290 K. Možemo videti da podaci za 100 K odstupaju, jer postoji veliki broj čestica koje su u blokiranom stanju tj. nisu u superparamagnetnom stanju (slika 9).

Zaključak

Nanočestični maghemit predstavlja jedan od najinteresantnijih magnetnih materijala zbog svojih potencijalnih primena, među kojima su najzanimljivije u kompjuterskoj tehnici, medicini, magneto-optičkim uređajima, ferrofluidima. Magnetne osobine nanočestičnih $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ istražuju se intenzivno i uzorci se sintetišu različitim metodama. Pokazano je da se magnetne osobine maghemita znatno razlikuju u zavisnosti od metoda sinteze. Pretpostavlja se da različite metode sinteze utiču na različitu strukturnu neuređenost koja se javlja u površinskom sloju i u unutrašnjosti čestica, prouzrokujući velike razlike u magnetnim osobinama. Neke od karakteristika nanočestičnog maghemita su smanjenje saturacione magnetizacije i povećanje koercitativnog polja u poređenju sa dobro iskristalisanim maghemitom.

Cilj rada bio je istraživanje magnetnih karakteristika nanočestičnih ferioksida, $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (maghemita), koji ispoljava superparamagnetno ponašanje tj. superparamagnetizam.

Uzorci nanočestičnog maghemita dobijeni su mehanohemijskom metodom. Kristalna struktura uzoraka je ispitana pomoću difrakcije elektrona i x-zraka i pokazano je da se radi o monofaznim uzorcima maghemita. Na osnovu TEM snimaka utvrđena su veličine čestica, koje za nanočestični maghemit iznose oko 15 i 25 nm za uzorke S_1 i S_2 (široka distribucija po veličini čestica).

Ispitivanja magnetnih osobina uzoraka su obuhvatila merenja DC magnetizacije i AC susceptibilnosti u opsegu temperatura od 2 K do 300 K i magnetnih polja od -5 T do 5 T. Merenja su urađena na SQUID magnetometru. Cilj je bio pokazati nanočestično ponašanje uzoraka, uporediti karakteristike nanočestičnog materijala sa materijalom visokog kristaliniteta i pokazati uticaj veličine nanočestica na magnetne karakteristike.

Kao kod svih superparamagnetnih materijala, nanočestični maghemit pokazuje da magnetizacija uzoraka zavisi od magnetne istorije, tj. merenja temperature zavisnosti magnetnog dipolnog momenta pri nekom konstantnom magnetnom polju daju različite rezultate za uzorak ohlađen bez polja (ZFC merenja) i za uzorak ohlađen u magnetnom polju (FC merenja). Uočeno je pojavljivanje maksimuma u ZFC krivoj kod svih nanočestičnih uzoraka, koji odgovara temperaturi blokiranja. Ona iznosi 50 K i 100 K (široki maksimumi odgovaraju širokim distribucijama po veličini) za uzorke nanočestičnog maghemita S_1 i S_2 . Ovo se potpuno slaže sa rezultatima dobijenim pomoću TEM merenja (veličine čestica i distribucije po veličinama čestica). Takođe, pokazano je postojanje histerezisne petlje ispod temperature blokiranja- T_B , kao i njeno odsustvo iznad

temperature ireverzibilnosti- T_{irr} , što je karakteristika superparamagnetnih materijala. Zavisnost magnetizacije od H/T iznad temperature ireverzibilnosti T_{irr} poklapa se kod svih uzoraka, što je karakteristika superparamagnetnih materijala. Na osnovu ovih rezultata možemo zaključiti da uzorci nanočestičnog maghemita imaju karakteristike nanočestičnih magnetnih materijala (superparamagnetizam).

Kod uzoraka nanočestičnog maghemita jasno se vide promene magnetnih osobina sa promenom veličine čestica (temperatura blokiranja, saturaciona magnetizacija, koercitivno polje, magnetni moment čestice), što nam ukazuje na velike mogućnosti menjanja magnetnih osobina kod istog materijala sa promenom veličine čestica. Vrednosti koje su dobijene za koercitivno polje su među najvećim vrednostima dobijenim za nanočestični maghemit (veoma bitna karakteristika za primenu maghemita u kompjuterskoj tehnici), što je posledica velike debljine neuređene kore i defekata kod čestica.

Veličinu, oblik, distribuciju i magnetne karakteristike nanočestica ferioksida možemo kontrolisati načinom sinteze. Na osnovu rezultata (TEM, magnetna merenja) se jasno uočava da uzorak nanočestičnog maghemita dobijenog mehanohemijskom metodom ima širu distribuciju čestica po veličini. Aglomeracija u uzorcima dobijenim mehanohemijskom metodom je izražena. Međutim, sinteza mehanohemijskom metodom je jednostavna i mnogo brža (za nekoliko minuta se dobija gotov uzorak).

Literatura

- [1] Dutta, P., Manivannan, A., Seehra, M. S., Phys. Rev. B 70 (2004) 174428–1.
- [2] Sorensen, C. M., u: K. J. Klabunde (ed), Nanoscale Materials in Chemistry, Wiley-Interscience, New York, (2001).
- [3] Mukadam, M. D., Yusuf, S. M., Sharma, P., Kulshreshtha, S. K., J. Magn. Magn. Mater. 272 (2004) 1401.
- [4] Martinez, B., Obradors, X., Balcells, L., Rouanet, A., Monty, C., Phys. Rev. Lett. 80 (1998) 181.
- [5] Coey, J. M. D., Phys. Rev. Lett. 27 (1971) 1140.
- [6] Caizer, C., Physica B 327 (2003) 27.
- [7] Morales, M. P., Serena, C. J., Bodker, F., Morup, S., J. Phys. Condens. Matter. 9 (1997) 5461.
- [8] Chen, J. P., Sorensen, C. M., Klabunde, K. J., Hadjipanayis, G. C., Devlin, E., Kostikas, A., Phys. Rev. B 54 (1996) 9288.
- [9] Stoner, E. C., Wohlfart, E. P., Philos. Trans. R. Soc. London A 240 (1948) 599.
- [10] Tadić, M., Čitaković, N., Sol-gel sinteza i magnetne osobine nanočestičnog hematita, *Vojnotehnički glasnik (Military Technical Courier)*, vol. 58, broj 3, pp. 47–64, ISSN 0042-8469, UDC 623+355/359, Beograd 2010.

MECHANOCHEMICAL SYNTHESIS AND MAGNETIC PROPERTIES OF MAGHEMITE

FIELD: Materials (Nanomaterials)

Summary:

This work presents the results of an investigation on maghemite (γ -Fe₂O₃) nanoparticles magnetic properties, which show superparamagnetic behavior i.e. superparamagnetism. Nanoscale maghemite samples were obtained by the mechanochemical method. The crystal structure of the samples was analyzed by the electron diffraction and the X-ray powder diffraction. The formation of monophase maghemite was shown. The particle size was determined by the transmission electron microscopy (TEM). The shift of the blockage temperature T_B towards lower values with increasing field strength is significant, which is the indication of the superparamagnetism in the system under consideration.

1. Synthesis, diffraction experiments and the transmission electron microscopy (TEM)

The synthesis of nanometric Fe₂O₃ powder was performed by a mechanochemically activated solid-state displacement process. The samples so obtained were analyzed by the X-ray powder diffraction. The particle size and morphology were determined by the TEM. The particles were spherical in shape, with an average size of 15 nm for the sample S₁ and 25 nm for the sample S₂.

2. Nanosized γ -Fe₂O₃ superparamagnetism

The shift of the blocking temperature towards lower values with increasing field strength is significant, which is the indication of the superparamagnetism in the system under consideration. The absence of both coercivity and remanence points to the superparamagnetic behavior at the temperature $T=300$ K for both samples.

Conclusion

The nanoparticle maghemite samples were synthesized by the mechanochemically activated solidstate displacement reaction. The influence of the milling time duration (30 min for the S₁ sample and 4 h for the S₂ sample) on the structural and magnetic properties has been investigated. The complementary results obtained by the TEM analysis and magnetic measurements showed that the mean particle size range was 15–25 nm with the large size distribution. The prolonged milling time resulted in particle growth accompanied by an increase in lattice disorder. The blocking temperature T_B is shifted towards a considerably

higher value for the S_2 sample, while both S_1 and S_2 are superparamagnets at the room temperature. The decrease in the saturation magnetization M_S with a simultaneous increase in both the anisotropy constant K and the coercive field H_c for the S_2 sample points to the high importance of the lattice disorder in the particle core on the magnetic properties of the nanosized maghemite. The obtained value of $H_c \approx 3300$ Oe for the S_2 sample is among the highest cited so far in the literature concerning nanoparticle maghemite systems.

Key words: nanostructured materials, magnetization, magnetic measurements, mechanochemical processes, transmission electron microscopy-TEM, superparamagnetism

Datum prijema članka: 04. 01. 2011.

Datum dostavljanja ispravki rukopisa: 22. 01. 2011.

Datum konačnog prihvatanja članka za objavljivanje: 24. 01. 2011.

ODREĐIVANJE OPTIMALNE PERIODIČNOSTI PREVENTIVNOG ODRŽAVANJA MOTORA V46-6

Biočanin LJ. Stojko, Pavlović R. Milan,
Tehnički remontni zavod „Čačak“, Čačak

UDC: 621.43.018

OBLAST: Mašinstvo

Sažetak:

Obezbeđivanju zahtevanog nivoa gotovosti složenih tehničkih sistema koji se koriste u organizacijama specijalne namene znatno doprinosi primena modela preventivnog održavanja. Osnovni zahtev kod primene ovog modela održavanja je određivanje optimalne periodičnosti koja treba da zadovolji određene, međusobno suprotstavljene kriterijume. U radu je prikazana metodologija određivanja periodičnosti preventivnog održavanja motora V46-6 na bazi prikupljanja i statističke obrade podataka o njihovim otkazima. Ovakav problem moguće je rešiti ako su određeni svi važni zahtevi i ograničenja. Osnovu izložene metodologije čine parametri pouzdanosti analiziranog motora, dobijeni na osnovu praćenja ponašanja motora, sa aspekta pojave otkaza u realnim uslovima eksploatacije, kao i troškovi njegovog održavanja.

Ključne reči: motor, održavanje, optimizacija, gotovost, pouzdanost, troškovi.

Uvod

Primenom modela preventivnog održavanja, optimizacija sistema održavanja svodi se na traženje odgovora na pitanje da li je korisno primeniti preventivno održavanje kao model održavanja, i ako jeste, odrediti posle koliko vremena rada treba primeniti postupke preventivnog održavanja.

Za dati motor i date uslove korišćenja i održavanja koji omogućavaju da preferencije budu unapred poznate, samo jedno rešenje strategije održavanja je optimalno. U ovom slučaju postižu se najpovoljnije vrednosti pouzdanosti, gotovosti, troškova korišćenja i održavanja i smanjuju ukupni troškovi životnog ciklusa. Zadatak optimizacije sistema održavanja motora je iznalaženje tog optimuma.

Određivanje zakona raspodele vremena rada do otkaza motora V46–6

Pronalaženje adekvatnog matematičkog modela kojim se može predstaviti zakonitost ponašanja motora, sa aspekta pojave neispravnosti, jedan je od osnovnih elemenata za optimizaciju njegovog održavanja. S obzirom na to da od pravilnosti određivanja modela raspodele pouzdanosti zavise svi dalji zaključci i odluke vezane za preduzimanje odgovarajućih mera s ciljem održavanja zahtevanog nivoa pouzdanosti motora, ovoj fazi analize treba posvetiti posebnu pažnju. Na konkretnom primeru izabranog borbenog sredstva prikazana je metodologija određivanja najprihvatljivijeg modela održavanja njegovog motora.

Objekt istraživanja je dvanaestocilindrični četvorotaktni dizel motor snage 735 kW oznake V46–6.

Postupak za određivanje zakona raspodele vremena rada do otkaza, na osnovu empirijskih podataka, sprovodi se u tri koraka. U prvom koraku, procenjuju se pokazatelji pouzdanosti, odnosno određuju karakteristike statističkog skupa, i procenjuju vrednosti potpunih karakteristika slučajne promenljive. U drugom koraku, na osnovu vrednosti dobijenih u prvom koraku, određuju se teorijski model raspodele koji bi mogao da se koristi za aproksimaciju empirijske raspodele. Potvrda saglasnosti usvojenog teorijskog modela raspodele sa empirijskom raspodelom je u trećem koraku [1].

Procena pokazatelja pouzdanosti

Podaci o vremenu rada motora V46–6 do otkaza iskazani u motočakovima (mč), do kojih se došlo praćenjem u eksploataciji, poređani u neopadajući niz, prikazani su u tabeli 1.

Vremena rada do otkaza motora V46–6 preuzeta su iz tehničkih knjižica za motore tehničkih sredstava dostavljanih na remont u TRZ „Čačak“ i iz tehničkih knjižica sredstava na upotrebi u jedinicama Vojske Srbije. Podaci su registrovani samo za motore koji su imali otkaz. Prikazana su 92 vremena rada do otkaza motora V46–6, što je više nego dovoljan statistički skup u odnosu na optimalni plan skraćenih ispitivanja za ocenu pouzdanosti (sa usvojenim koeficijentom varijacije od 0,5, apriornom relativnom greškom ocene pokazatelja pouzdanosti rada od 0,05 i početnim brojem potrebnih podataka od 40) [1].

Na osnovu podataka iz tabele 1 određuje se zakon raspodele pouzdanosti.

Tabela 1

Podaci o vremenu rada do otkaza motora V46–6

Redni broj otkaza	Vreme rada do otkaza [mč]	Redni broj otkaza	Vreme rada do otkaza [mč]	Redni broj otkaza	Vreme rada do otkaza [mč]	Redni broj otkaza	Vreme rada do otkaza [mč]
1	51	24	275	47	386	70	548
2	77	25	276	48	389	71	548
3	98	26	276	49	394	72	556
4	105	27	277	50	396	73	562
5	111	28	278	51	399	74	579
6	147	29	284	52	400	75	590
7	152	30	284	53	403	76	593
8	187	31	300	54	408	77	604
9	197	32	301	55	413	78	618
10	199	33	316	56	415	79	619
11	201	34	318	57	428	80	628
12	201	35	329	58	435	81	634
13	203	36	330	59	475	82	639
14	204	37	333	60	475	83	662
15	206	38	338	61	475	84	699
16	233	39	339	62	475	85	702
17	238	40	342	63	476	86	735
18	240	41	345	64	478	87	754
19	240	42	348	65	481	88	762
20	243	43	355	66	488	89	763
21	246	44	362	67	512	90	847
22	251	45	368	68	532	91	905
23	272	46	379	69	544	92	948

Iz tabele 1 vidi se da je:

- ukupan broj podataka (veličina uzorka): $n=92$,
- minimalno vreme rada do otkaza: $t_{\min}=51$ mč,
- maksimalno vreme rada do otkaza: $t_{\max}=948$ mč.

Iz podataka datih u tabeli 1 izračunavaju se statističke mere:

- srednja vrednost vremena rada do otkaza: $t_{sr}=406,8152$ mč,
- standardna devijacija vremena rada do otkaza: $SD=193,3807$ mč,
- medijana vremena rada do otkaza: $mediana=382,5$ mč,
- rang (raspon) vremena rada do otkaza: $rang=897$ mč.

Na osnovu izračunatih statističkih mera, izračunava se vrednost koeficijenta varijacije:

$\nu = SD / t_{sr} = 0,475$. Kako je izračunata vrednost koeficijenta varijacije manja od usvojene ($\nu=0,5$), može se pristupiti obradi podataka s ciljem određivanja zakona raspodele vremena rada do otkaza motora V46–6.

Broj intervala za vremena rada do otkaza određuje se prema formuli [2]:

$$z=1+3,3 \cdot \log_{10}(n) \text{ i iznosi } z=7,48.$$

Usvaja se broj intervala: $z = 7$.
Rezultati grupisanja broja otkaza, po intervalima vremena rada do otkaza, prikazani su u tabeli 2.

Tabela 2

Rezultati grupisanja otkaza po intervalima vremena rada do otkaza

Redni broj intervala	i	1	2	3	4	5	6	7
Donja granica intervala [mč]	i_d	51,0	179,1	307,3	435,4	563,6	691,7	819,9
Gornja granica intervala [mč]	i_g	179,1	307,3	435,4	563,6	691,7	819,9	948,0
Srednja vrednost intervala [mč]	sv_{interv}	115,1	243,2	371,4	499,5	627,6	755,8	883,9
Broj otkaza u intervalu	n_i	7	25	26	15	10	6	3

Procenjene vrednosti pokazatelja pouzdanosti date su u tabeli 3.

Tabela 3

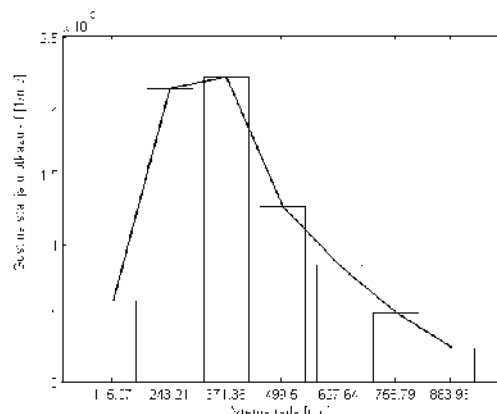
Procenjene vrednosti pokazatelja pouzdanosti

i	n_i	sv_{interv}	$cn_i s$	$f [m\check{c}^{-1}]$	F	R	$h [m\check{c}^{-1}]$
1	7	115,1	3,5	5,9377E-04	0,0380	0,9620	6,1725E-04
2	25	243,2	19,5	2,1206E-03	0,2120	0,7880	2,6910E-03
3	26	371,4	45,0	2,2054E-03	0,4891	0,5109	4,3170E-03
4	15	499,5	65,5	1,2724E-03	0,7120	0,2880	4,4172E-03
5	10	627,6	78,0	8,4824E-04	0,8478	0,1522	5,5741E-03
6	6	755,8	86,0	5,0894E-04	0,9348	0,0652	7,8038E-03
7	3	883,9	90,5	2,5447E-04	0,9837	0,0163	1,5608E-02

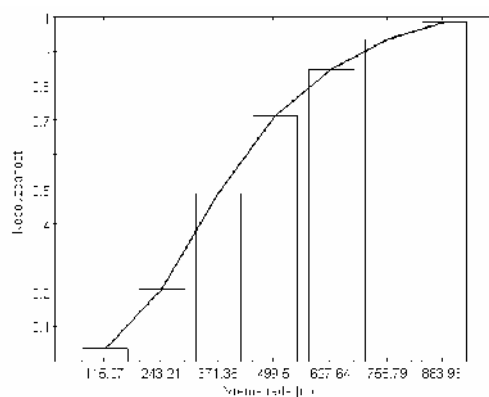
Oznake korišćene u tabeli 3 imaju sledeće značenje:

- i – redni broj intervala,
- n_i – broj otkaza u intervalu,
- sv_{interv} – srednja vrednost intervala (mč),
- $cn_i s$ – procenjena vrednost broja otkaza na sredini intervala (računa se kao aritmetička sredina brojeva otkaza na početku i na kraju intervala),
- $f [m\check{c}^{-1}] = n_i / (n \cdot \Delta t)$ – funkcija učestalosti (gustine) stanja u otkazu, $n = 92$
- veličina uzorka, $\Delta t = rang/z$,
- $F = cn_i s / n$ – funkcija kumulativne raspodele verovatnoće (funkcija nepouzdanosti),
- $R = (n - cn_i s) / n = 1 - F$ – funkcija pouzdanosti,
- $h [m\check{c}^{-1}] = f / R$ – funkcija intenziteta otkaza.

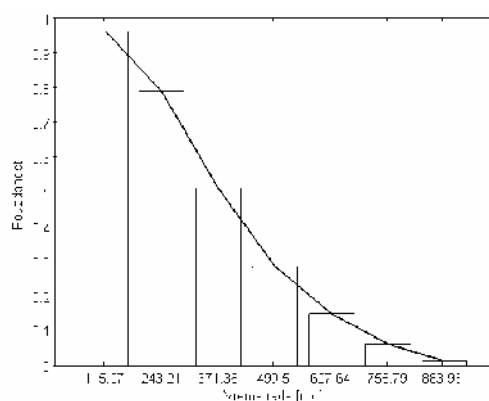
Na slikama od 1 do 4 dati su grafički prikazi procenjenih pokazatelja pouzdanosti.



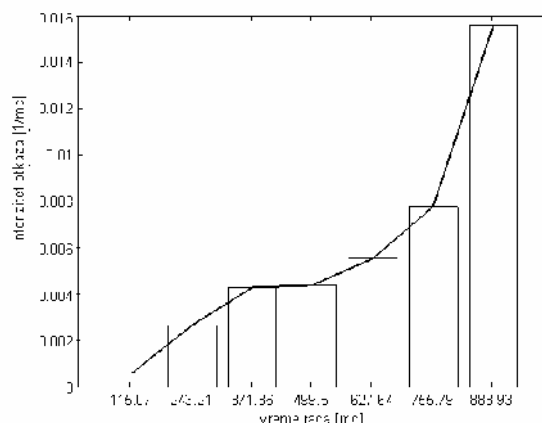
Slika 1 – Grafički prikaz procenjene vrednosti gustine stanja u otkazu



Slika 2 – Grafički prikaz procenjene vrednosti funkcije nepouzdanosti



Slika 3 – Grafički prikaz procenjene vrednosti funkcije pouzdanosti



Slika 4 – Grafički prikaz procenjene vrednosti funkcije intenziteta otkaza

Određivanje modela raspodele i parametara sa ocenom saglasnosti

S ciljem određivanja teorijskog modela raspodele koji bi mogao da se koristi za aproksimaciju empirijske raspodele vrši se aproksimacija empirijske raspodele sa teorijskom Vejbulovom (Weibull), eksponencijalnom, Rejljevom (Rayleigh) i normalnom raspodelom. Ocena saglasnosti empirijske i teorijskih raspodela vrši se testom Kolmogorov–Smirnova, Pirsonovim testom i testom Romanovskog.

Za statističku obradu podataka korišćen je *Statistics Toolbox for use with MATLAB* [3], a u tekstu se daju samo rezultati obrade.

Aproksimacija empirijske raspodele teorijskom Vejbulovom raspodelom

Iz podataka datih u tabeli 1 izračunavaju se parametri razmere i oblika Vejbulove raspodele:

– $\eta_w = 459,8652$ – parametar razmere i

– $\beta_w = 2,2461$ – parametar oblika.

Sa poznatim vrednostima parametara razmere i oblika izračunavaju se vrednosti aproksimativne teorijske Vejbulove raspodele:

$F_{tw} = [0,0435 \ 0,2127 \ 0,4614 \ 0,7000 \ 0,8661 \ 0,9528 \ 0,9870]$.

S ciljem testiranja hipoteze o aproksimaciji empirijske raspodele teorijskom Vejbulovom raspodelom oformljena je tabela 4. Testiranje hipoteze se vrši testovima Kolmogorov–Smirnova, Pirsona (χ^2 – „hi-kvadrat“) i Romanovskog.

Tabela 4

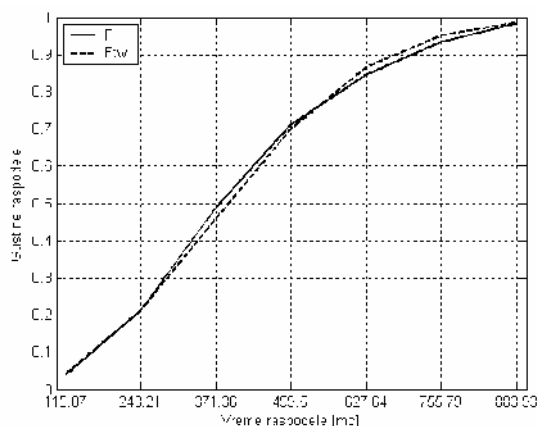
Izračunate vrednosti veličina za testiranje Vejbulove raspodele

i	sv _{interv}	F	F _{tw}	ΔF _{tw}	χ ²
1	115,1	0,0380	0,0436	0,0055	0,0007
2	243,2	0,2120	0,2127	0,0007	0,0000
3	371,4	0,4891	0,4614	0,0278	0,0017
4	499,5	0,7120	0,7000	0,0119	0,0002
5	627,6	0,8478	0,8661	0,0183	0,0004
6	755,8	0,9348	0,9528	0,0180	0,0003
7	883,9	0,9837	0,9870	0,0032	0,0000
				Max(ΔF_{tw}):	0,0278
				Suma(χ²):	0,0033
				Step. slobode-k:	4
				Krit. Roman.-Ro:	1,4130

Oznake korišćene u tabeli 4 imaju sledeće značenje:

- i – redni broj intervala,
- sv_{interv} – srednja vrednost intervala (mč),
- F – funkcija kumulativne raspodele verovatnoće (funkcija nepouzdanosti),
- F_{tw} – aproksimativna Vejbulova (teorijska) funkcija kumulativne raspodele verovatnoće,
- ΔF_{tw} = |F - F_{tw}| – apsolutna vrednost razlike empirijske i teorijske kumulativne raspodele,
- χ² = $\frac{|F - F_{tw}|^2}{F_{tw}}$ – hi-kvadrat vrednost za jedan interval i,
- k = z-r-1 – broj stepeni slobode; z – broj intervala; r – broj parametara teorijske raspodele,
- Ro = $\frac{|Suma(\chi^2) - k|}{\sqrt{2k}}$ – uporedna vrednost za test Romanovskog.

Na slici 5 dat je grafički prikaz odstupanja Vejbulove aproksimativne raspodele od empirijske raspodele.



Slika 5 – Grafički prikaz odstupanja Vejbulove aproksimativne raspodele od empirijske raspodele

Test Kolmogorov–Smirnova. Za usvojeni nivo rizika $\alpha = 0,2$ i veličinu uzorka $N = n = 92$ tablična vrednost za $d_\alpha = D_{\text{doz}} = \frac{1,07}{\sqrt{N}} = 0,1116$.

Prema tabeli 5 najveća razlika između teorijske raspodele (F_{tw}) i procenjenih vrednosti (F) iznosi $\text{Max}(\Delta F_{\text{tw}}) = D_n = 0,0278$.

Kako je $D_n < D_{\text{doz}}$, aproksimativna teorijska Vejbulova raspodela zadovoljava test Kolmogorov–Smirnova.

Test Pirsona. Za usvojeni nivo značajnosti $\alpha = 0,05$ i broj stepeni slobode $k = 4$, tablična vrednost za $\text{Suma}(\chi^2)$ je 9,488. Prema tabeli 4 izračunata vrednost za $\text{Suma}(\chi^2)$ je 0,0033.

Kako je izračunata vrednost za $\text{Suma}(\chi^2) = 0,0033$ manja od tablične vrednosti za $\text{Suma}(\chi^2) = 9,488$, aproksimativna teorijska Vejbulova raspodela zadovoljava test Pirsona.

Test Romanovskog. Kako je izračunata vrednost za test Romanovskog $R_o = 1,4130$ manja od 3, aproksimativna teorijska Vejbulova raspodela zadovoljava test Romanovskog.

Aproksimacija empirijske raspodele teorijskom eksponencijalnom raspodelom

Iz podataka datih u tabeli 1 izračunava se parametar eksponencijalne raspodele: $\lambda_e = 0,0025$.

Sa poznatom vrednošću parametra λ_e izračunavaju se vrednosti aproksimativne teorijske eksponencijalne raspodele:

$$F_{\text{te}} = [0,2464 \ 0,4500 \ 0,5986 \ 0,7071 \ 0,7862 \ 0,8440 \ 0,8861].$$

S ciljem testiranja hipoteze o aproksimaciji empirijske raspodele teorijskom eksponencijalnom raspodelom oformljena je tabela 5. Testiranje hipoteze vrši se testovima Kolmogorov–Smirnova, Pirsona (χ^2 – „hi-kvadrat“) i Romanovskog.

Tabela 5

Izračunate vrednosti veličina za testiranje eksponencijalne raspodele

i	SV _{interv}	F	F _{te}	ΔF_{te}	χ^2
1	115,1	0,0380	0,2464	0,2083	0,1762
2	243,2	0,2120	0,4500	0,2381	0,1259
3	371,4	0,4891	0,5986	0,1095	0,0200
4	499,5	0,7120	0,7071	0,0049	0,0000
5	627,6	0,8478	0,7862	0,0616	0,0048
6	755,8	0,9348	0,8440	0,0908	0,0098
7	883,9	0,9837	0,8861	0,0976	0,0107
				Max(ΔF_{te}):	0,2381
				Suma (χ^2):	0,3475
				Step. slobode – k:	5
				Krit. Roman. – Ro:	1,4713

Oznake korišćene u tabeli 5 imaju sledeće značenje:

– F_{te} – aproksimativna eksponencijalna (teorijska) funkcija kumulativne raspodele verovatnoće,

– $\Delta F_{te} = |F - F_{te}|$ – apsolutna vrednost razlike empirijske i teorijske kumulativne raspodele,

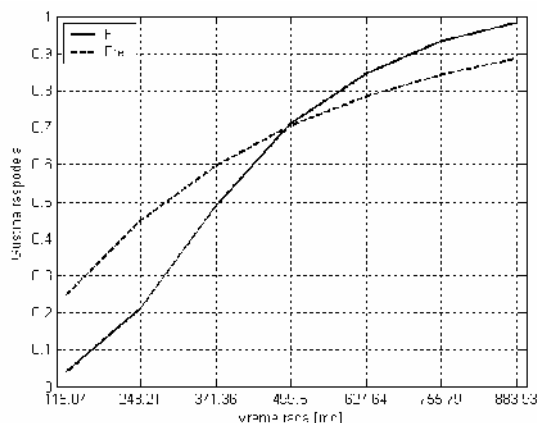
– $\chi^2 = \frac{|F - F_{te}|^2}{F_{te}}$ – hi-kvadrat vrednost za jedan interval i,

– k = z-r-1 – broj stepeni slobode; z – broj intervala; r – broj parametara teorijske raspodele,

– $Ro = \frac{|Suma(\chi^2) - k|}{\sqrt{2k}}$ – uporedna vrednost za test Romanovskog,

– ostale oznake imaju isto značenje kao u tabeli 4.

Na slici 6 dat je grafički prikaz odstupanja eksponencijalne aproksimativne raspodele od empirijske raspodele.



Slika 6 – Grafički prikaz odstupanja eksponencijalne aproksimativne raspodele od empirijske raspodele

Test Kolmogorov–Smirnova. Za usvojeni nivo rizika $\alpha = 0,2$ i veličinu uzorka $N = n = 92$ tablična vrednost za $d_\alpha = D_{\text{doz}} = \frac{1,07}{\sqrt{N}} = 0,1116$.

Prema tabeli 6 najveća razlika između teorijske raspodele (F_{te}) i procenjenih vrednosti (F) iznosi $\text{Max}(\Delta F_{\text{te}}) = D_n = 0,2381$.

Kako je $D_n > D_{\text{doz}}$, aproksimativna teorijska eksponencijalna raspodela NE ZADOVOLJAVA test Kolmogorov–Smirnova, odnosno empirijska raspodela se prema ovom testu ne može aproksimirati sa eksponencijalnom raspodelom.

Test Pirsona. Za usvojeni nivo značajnosti $\alpha = 0,05$ i broj stepeni slobode $k = 5$, tablična vrednost za *Suma* (χ^2) je 11,070. Prema tabeli 5 izračunata vrednost za *Suma* (χ^2) je 0,3475. Kako je izračunata vrednost za *Suma* (χ^2) = 0,3475 manja od tablične vrednosti za *Suma* (χ^2) = 11,070, aproksimativna eksponencijalna teorijska raspodela zadovoljava test Pirsona.

Test Romanovskog. Kako je izračunata vrednost za test Romanovskog $R_0 = 1,4713$ manja od 3, aproksimativna teorijska eksponencijalna raspodela zadovoljava test Romanovskog.

Aproksimacija empirijske raspodele teorijskom Rejljevom raspodelom

Iz podataka datih u tabeli 1 izračunava se parametar Rejljeve raspodele: $\sigma_r = 318,1888$.

Sa poznatom vrednošću parametra σ_r izračunavaju se vrednosti aproksimativne teorijske Rejljeve raspodele:

$$F_{\text{tr}} = [0,0633 \ 0,2533 \ 0,4939 \ 0,7083 \ 0,8571 \ 0,9405 \ 0,9789].$$

S ciljem testiranja hipoteze o aproksimaciji empirijske raspodele Rejljevom raspodelom oformljena je tabela 6. Testiranje hipoteze vrši se testovima Kolmogorov–Smirnova, Pirsona (χ^2 – „hi-kvadrat“) i Romanovskog.

Tabela 6

Izračunate vrednosti veličina za testiranje Rejljeve raspodele

i	SV _{interv}	F	F _{tr}	ΔF_{tr}	χ^2
1	115,1	0,0380	0,0633	0,0253	0,0101
2	243,2	0,2120	0,2533	0,0414	0,0068
3	371,4	0,4891	0,4939	0,0048	0,0000
4	499,5	0,7120	0,7083	0,0036	0,0000
5	627,6	0,8478	0,8571	0,0092	0,0001
6	755,8	0,9348	0,9405	0,0057	0,0000
7	883,9	0,9837	0,9789	0,0048	0,0000
				Max (ΔF_{tr}):	0,0414
				Suma (χ^2):	0,0171
				Step. slobode-k:	5
				Krit. Roman.-Ro:	1,5757

Oznake korišćene u tabeli 6 imaju sledeće značenje:

– F_{tr} – aproksimativna Rejljeva (teorijska) funkcija kumulativne raspodele verovatnoće,

– $\Delta F_{tr} = |F - F_{tr}|$ – apsolutna vrednost razlike empirijske i teorijske kumulativne raspodele,

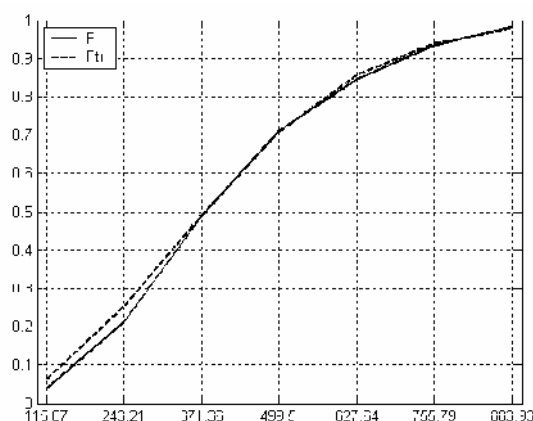
– $\chi^2 = \frac{|F - F_{tr}|^2}{F_{tr}}$ – hi-kvadrat vrednost za jedan interval i,

– k = z-r-1 – broj stepeni slobode; z – broj intervala; r – broj parametara teorijske raspodele,

– Ro = $\frac{|Suma(\chi^2) - k|}{\sqrt{2k}}$ – uporedna vrednost za test Romanovskog,

– ostale oznake imaju isto značenje kao u tabeli 4.

Na slici 7 je dat grafički prikaz odstupanja Rejljeve aproksimativne raspodele od empirijske raspodele.



Slika 7 – Grafički prikaz odstupanja Rejljeve aproksimativne raspodele od empirijske raspodele

Test Kolmogorov–Smirnova. Za usvojeni nivo rizika $\alpha = 0,2$ i veličinu uzorka $N = n = 92$ tablična vrednost za $d_{\alpha} = D_{\text{doz}} = \frac{1,07}{\sqrt{N}} = 0,1116$. Prema ta-

beli 6 najveća razlika između teorijske raspodele (F_{tr}) i procenjenih vrednosti (F) iznosi $\text{Max}(\Delta F_{tr}) = D_n = 0,0414$. Kako je $D_n < D_{\text{doz}}$, aproksimativna teorijska Rejljeva raspodela zadovoljava test Kolmogorov–Smirnova.

Test Pirsona. Za usvojeni nivo značajnosti $\alpha = 0,05$ i broj stepeni slobode $k = 5$, tablična vrednost za Suma (χ^2) je 11,070. Prema tabeli 6 izračunata vrednost za Suma (χ^2) je 0,0171. Kako je izračunata vrednost za Suma (χ^2) = 0,0171 manja od tablične vrednosti za Suma (χ^2) = 11,070, aproksimativna teorijska Rejljeva raspodela zadovoljava test Pirsona.

Test Romanovskog. Kako je izračunata vrednost za test Romanovskog $R_0 = 1,5757$ manja od 3, aproksimativna teorijska Rejljeva raspodela zadovoljava test Romanovskog.

Aproksimacija empirijske raspodele teorijskom normalnom raspodelom

Iz podataka datih u tabeli 1 izračunavaju se parametri matematičkog očekivanja (μ_n) i standardnog odstupanja (σ_n) normalne raspodele: $\mu_n = 406,8152$; $\sigma_n = 193,3807$.

Sa poznatim vrednostima parametara matematičkog očekivanja (μ_n) i standardnog odstupanja (σ_n) izračunavaju se vrednosti aproksimativne teorijske normalne raspodele:

$$F_{tn} = [0,0657 \ 0,1988 \ 0,4273 \ 0,6841 \ 0,8733 \ 0,9644 \ 0,9932].$$

S ciljem testiranja hipoteze o aproksimaciji empirijske raspodele teorijskom normalnom raspodelom oformljena je tabela 7. Testiranje hipoteze vrši se testovima Kolmogorov–Smirnova, Pirsona (χ^2 – „hi-kvadrat“) i Romanovskog.

Tabela 7

Izračunate vrednosti veličina za testiranje normalne raspodele

i	SV _{interv}	F	F _{tn}	ΔF_{tn}	χ^2
1	115,1	0,0380	0,0657	0,0277	0,0116
2	243,2	0,2120	0,1988	0,0132	0,0009
3	371,4	0,4891	0,4273	0,0619	0,0090
4	499,5	0,7120	0,6841	0,0278	0,0011
5	627,6	0,8478	0,8733	0,0254	0,0007
6	755,8	0,9348	0,9644	0,0297	0,0009
7	883,9	0,9837	0,9932	0,0095	0,0001
				Max(ΔF_{tn}):	0,0619
				Suma(χ^2):	0,0243
				Step. slobode-k:	4
				Krit. Roman.-Ro:	1,4056

Oznake korišćene u tabeli 7 imaju sledeće značenje:

– F_{tn} – aproksimativna normalna (teorijska) funkcija kumulativne raspodele verovatnoće,

– $\Delta F_{tn} = |F - F_{tn}|$ – apsolutna vrednost razlike empirijske i teorijske kumulativne raspodele,

– $\chi^2 = \frac{|F - F_{tn}|^2}{F_{tn}}$ – hi-kvadrat vrednost za jedan interval i,

– k = z-r-1 – broj stepeni slobode; z – broj intervala; r – broj parametara teorijske raspodele,

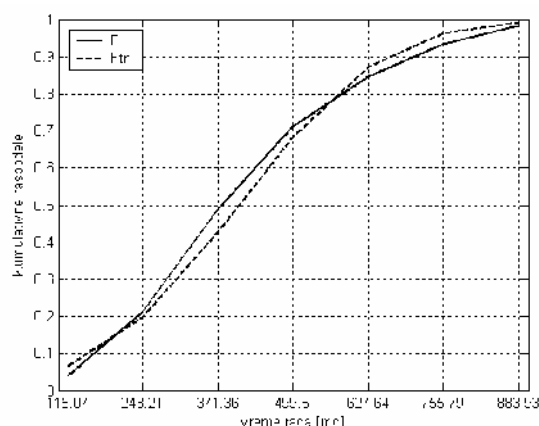
– Ro = $\frac{|Suma(\chi^2) - k|}{\sqrt{2k}}$ – uporedna vrednost za test Romanovskog,

– i – redni broj intervala,

– sv_{interv} – srednja vrednost intervala (mč),

– F – funkcija kumulativne raspodele verovatnoće (funkcija nepouzdanosti),

Na slici 8 dat je grafički prikaz odstupanja normalne aproksimativne raspodele od empirijske raspodele.



Slika 8 – Grafički prikaz odstupanja normalne aproksimativne raspodele od empirijske raspodele

Test Kolmogorov–Smirnova. Za usvojeni nivo rizika $\alpha = 0,2$ i veličinu uzorka $N = n = 92$ tablična vrednost za $d_{\alpha} = D_{doz} = \frac{1,07}{\sqrt{N}} = 0,1116$.

Prema tabeli 7 najveća razlika između teorijske raspodele (F_{tn}) i procenjenih vrednosti (F) iznosi $\text{Max}(\Delta F_{tn}) = D_n = 0,0619$. Kako je $D_n < D_{doz}$, aproksimativna teorijska normalna raspodela zadovoljava test Kolmogorov–Smirnova, odnosno empirijska raspodela se prema ovom testu se može aproksimirati sa normalnom raspodelom.

Test Pirsona. Za usvojeni nivo značajnosti $\alpha = 0,05$ i broj stepeni slobode $k = 4$, tablična vrednost za

Suma (χ^2) je 9,488. Prema tabeli 7 izračunata vrednost za Suma (χ^2) je 0,0243. Kako je izračunata vrednost za Suma (χ^2) = 0,0243 manja od tablične vrednosti za Suma (χ^2) = 9,488, aproksimativna teorijska normalna raspodela zadovoljava test Pirsona.

Test Romanovskog. Kako je izračunata vrednost za test Romanovskog $R_o = 1,4056$ manja od 3, aproksimativna teorijska normalna raspodela zadovoljava test Romanovskog.

Komentari dobijenih rezultata i izbor modela pouzdanosti

Pri neparametarskom testiranju hipotetičkih modela raspodela dobijaju se kvantitativni pokazatelji odstupanja teorijskih modela od empirijske raspodele. Prema literaturi [1], izračunata odstupanja mogu se iskori-

stiti ne samo za potvrdu da li teorijski model zadovoljava određeni test za usvojeni nivo značajnosti, već i da se usvoji onaj teorijski model kod koga su sva ili većina odstupanja najmanja. U tabeli 8 dat je uporedni prikaz karakterističnih veličina za testove Kolmogorov–Smirnova, Pirsona i Romanovskog za sva četiri korišćena teorijska aproksimativna modela pouzdanosti motora V46–6.

Tabela 8

Uporedni prikaz kvantitativnih pokazatelja odstupanja teorijskih modela raspodela od empirijske raspodele motora V46–6

Raspodela \ Test	Test Kolmogorov–Smirnova: D_n	Test Pirsona: χ^2	Test Romanovskog: R_o
Vejbulova	0,0278	0,0033	1,4130
eksponencijalna	0,2381	0,3475	1,4713
Rejljeva	0,0414	0,0171	1,5757
normalna	0,0619	0,0243	1,4056

Pri testiranju eksponencijalne raspodele testom Kolmogorov–Smirnova zaključeno je da ova raspodela ne zadovoljava navedeni test, pa će se shodno tome isključiti kao kandidat za aproksimativni model.

Iz tabele 8 se vidi da su odstupanja D_n prema testu Kolmogorov–Smirnova i vrednost veličine χ^2 za test Pirsona ubedljivo najmanji za Vejbulovu raspodelu. Uporedna vrednost za test Romanovskog R_o neznatno je niža za normalnu raspodelu u odnosu na Vejbulovu.

Kako su kvantitativni pokazatelji odstupanja D_n i χ^2 za dva od ukupno tri primenjena testa ubedljivo najmanji za Vejbulovu raspodelu, za aproksimativni model pouzdanosti motora V46–6 usvojena je Vejbulova dvoparametarska raspodela sa parametrom razmere $\eta_w = 459,8652$ i parametrom oblika $\beta_w = 2,2461$, pa je izraz za funkciju pouzdanosti motora V46–6:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta_w}\right)^{\beta_w}} = e^{-\left(\frac{t}{459,8652}\right)^{2,2461}}.$$

Pri izračunavanju funkcije pouzdanosti prema navedenom izrazu, promenljiva t se izražava u motočasovima rada.

Određivanje periodičnosti održavanja motora V46–6 prema kriterijumu maksimalne gotovosti

Za vozila specijalne namene najprikladnija je primena kriterijuma optimizacije po modelu maksimalne gotovosti [4].

Za primenu modela održavanja na bazi gotovosti potrebno je poznavanje zakona raspodele pouzdanosti i vremena u radu i otkazu.

Vrednost eksploatacione gotovosti može se odrediti korišćenjem izraza [5]:

$$G(t) = \frac{t_r + t_{cr}}{t_r + t_{cr} + t_p + \frac{F(t)}{R(t)} \cdot t_k}$$

gde su:

- t_r – vreme u radu,
- t_{cr} – vreme čekanja na rad u ispravnom stanju,
- t_p – vreme preventivnog održavanja,
- t_k – vreme korektivnog održavanja,
- $R(t)$ – funkcija pouzdanosti,
- $F(t)$ – funkcija nepouzdanosti.

Variranjem periodičnosti vremena između preventivnih održavanja dobija se funkcionalna zavisnost gotovosti od periodičnosti održavanja, na osnovu koje se može odrediti periodičnost održavanja koja daje maksimalnu gotovost. Rezultati određivanja gotovosti, za različite periodičnosti održavanja, date su u tabeli 9.

Tabela 9

Rezultati određivanja gotovosti za različite periodičnosti održavanja motora V46–6

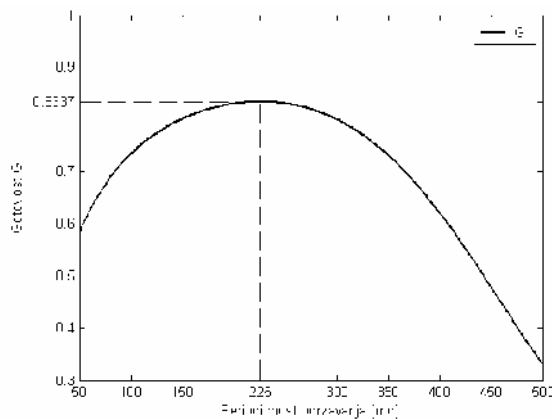
Periodičnost održavanja [mč]	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Vreme rada t_r [mč]	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Vreme preventivnog održavanja t_p [mč]	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
Funkcija nepouzdanosti $F(t)$	0,0068	0,0320	0,0776	0,1428	0,2246	0,3183	0,4182	0,5186	0,6142	0,7008
Funkcija pouzdanosti $R(t)$	0,9932	0,9680	0,9224	0,8572	0,7754	0,6817	0,5818	0,4814	0,3858	0,2992

Broj korektivnih održavanja između dva preventivna n_k	0,0069	0,0330	0,0841	0,1666	0,2897	0,4668	0,7188	1,0773	1,5921	2,3426
Vreme korektivnog održavanja t_k [mč]	6,184	29,715	75,697	149,949	260,693	420,160	646,914	969,552	1.432,867	2.108,383
Vreme čekanja na rad u ispravnom stanju t_{cr} [mč]	200	400	600	800	1.000	1.200	1.400	1.600	1.800	2.000
Gotovost $G(t)$	0,5813	0,7342	0,8010	0,8299	0,8303	0,7995	0,7307	0,6203	0,4776	0,3281

Iz tabele 9 se vidi da je maksimalna gotovost za t_r u intervalu od 200 do 300 mč.

Diskretizacijom intervala periodičnosti održavanja (vremena rada t_r) od 50 do 500 mč sa korakom 1, izračunava se maksimalna vrednost gotovosti i periodičnost održavanja za maksimalnu gotovost.

Na slici 9 je dat grafički prikaz zavisnosti gotovosti od periodičnosti preventivnog održavanja motora V46–6.



Slika 9 – Grafički prikaz zavisnosti gotovosti od periodičnosti preventivnog održavanja motora V-46–6

Kao rezultat diskretizacije i na osnovu slike 9 može se zaključiti da se maksimalna gotovost motora ($G_{\max}=0,8337$) dobija za periodičnost održavanja $t_r = 226$ mč, jer za tu periodičnost održavanja funkcija $G(t_r)$ dostiže svoj maksimum, pa se može smatrati da je to optimalna periodičnost održavanja motora za kriterijum maksimalne gotovosti.

Određivanje periodičnosti održavanja motora V46–6 prema kriterijumu minimalnih troškova

Optimizacija sistema održavanja može se vršiti i na osnovu modela koji kao kriterijum optimizacije koristi minimalne troškove održavanja. Za primenu ovog modela potrebno je poznavati osnovne pokazatelje pouzdanosti sistema održavanja. Ovim modelom se određuje optimalni interval periodičnosti sprovođenja postupaka preventivnog održavanja motora V46–6 koji daje najmanje troškove uz obezbeđenje zahtevane pouzdanosti i gotovosti motora.

Strategija preventivnog održavanja i preventivnih zamena se primenjuje kada je intenzitet otkaza rastuća funkcija u vremenu i kada su troškovi korektivnog održavanja veći od troškova preventivnog održavanja. Tada je moguće odrediti optimalnu periodičnost preventivnog održavanja.

Troškovi održavanja mogu se izraziti u obliku [5]:

$$C(t) = \frac{C_k - (C_k - C_p) \cdot R(t)}{\int_0^T R(t) dt},$$

gde su:

- $C(t)$ – ukupni specifični troškovi održavanja,
- C_k – troškovi korektivnog održavanja,
- C_p – troškovi preventivnog održavanja,
- $R(t)$ – funkcija pouzdanosti,
- T – vreme rada motora V46–6 do otkaza.

Primenom navedenog izraza za troškove održavanja, za različite periode preventivnog održavanja motora V46–6, dobijene su vrednosti troškova održavanja, koje su prikazane u tabeli 10.

Tabela 10

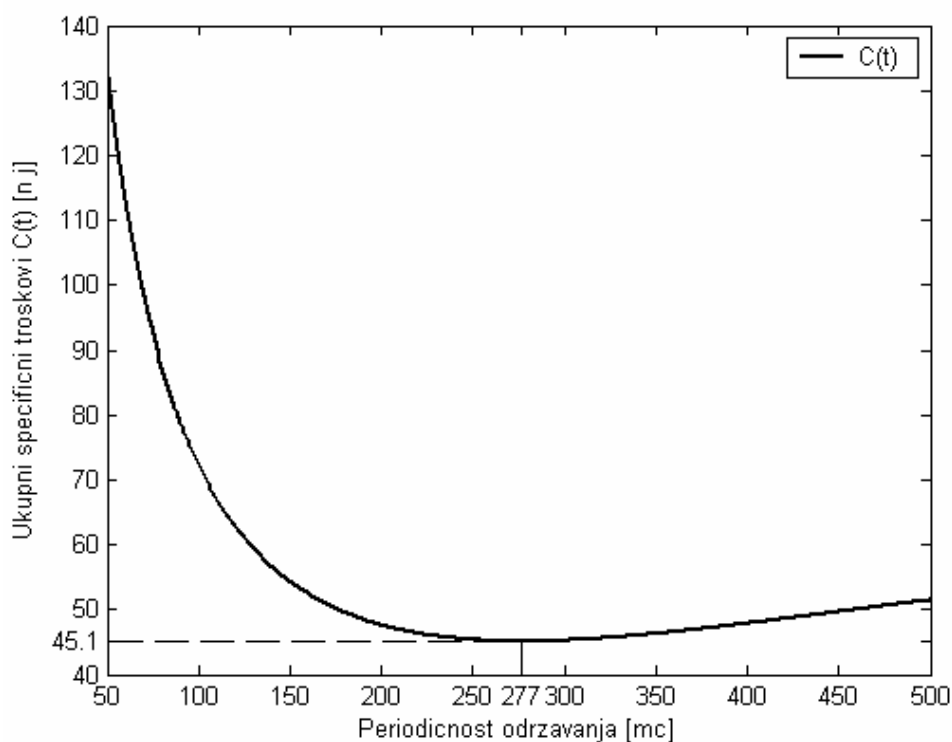
Rezultati određivanja troškova održavanja za različite periodičnosti održavanja motora V46–6

Periodičnost održavanja [mč]	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Troškovi korektivnog održavanja C_k [n.]	24.000	24.000	24.000	24.000	24.000	24.000	24.000	24.000	24.000	24.000
Troškovi preventivnog održavanja C_p [n.]	6.600	6.600	6.600	6.600	6.600	6.600	6.600	6.600	6.600	6.600
Funkcija pouzdanosti $R(t)$	0,9932	0,9680	0,9224	0,8572	0,7754	0,6817	0,5818	0,4814	0,3858	0,2992
$\int_0^T R(t) dt$	49,89	99,01	146,36	190,92	231,80	268,26	299,87	326,44	348,09	365,17
Ukupni specifični troškovi $C(t)$ [n.]	134,658	72,278	54,319	47,585	45,333	45,246	46,276	47,861	49,664	51,468

Napomena: oznaka „n j“ u tabeli 10 ima značenje „novčana jedinica“. Iz tabele 10 vidi se da se minimalni troškovi održavanja postižu za periodičnost održavanja od 250 do 350 mč.

Diskretizacijom intervala periodičnosti održavanja od 50 do 500 sa korakom 1, izračunavaju se minimalni ukupni specifični troškovi i periodičnost održavanja za minimalne ukupne specifične troškove.

Na slici 10 je dat grafički prikaz zavisnosti ukupnih specifičnih troškova od periodičnosti preventivnog održavanja motora V46–6.



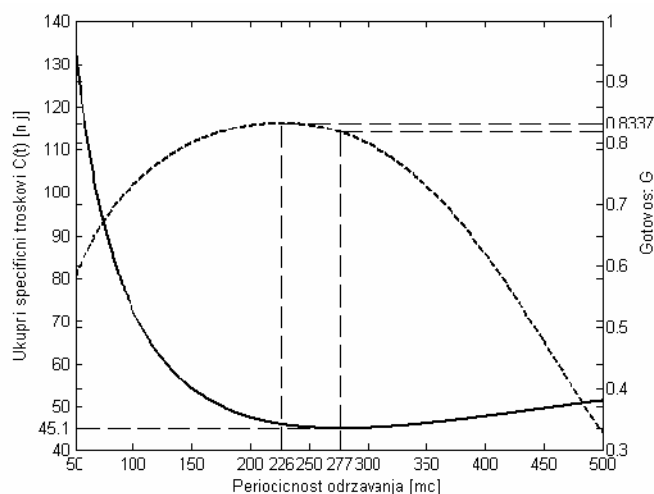
Slika 10 – Grafički prikaz zavisnosti ukupnih specifičnih troškova od periodičnosti preventivnog održavanja motora V46–6

Kao rezultat diskretizacije i na osnovu slike 10 može se zaključiti da se najmanji troškovi ($C_{\min} = 45,0999$ [n j]) dobijaju za periodičnost održavanja od $t_r = 277$ mč, jer za tu periodičnost održavanja funkcija $C(t_r)$ dostiže svoj minimum, pa se može smatrati da je to optimalna periodičnost održavanja motora za kriterijum minimalnih troškova.

Kompromisno rešenje sistema održavanja između maksimalne gotovosti i minimalnih troškova održavanja

Ne postoji matematički model koji povezuje kriterijum gotovosti i kriterijum troškova održavanja pomoću kojeg bi se odredilo kompromisno rešenje. Kompromisno rešenje se usvaja na osnovu datih kriterijuma i ograničenja o kojima se mora voditi računa prilikom usvajanja optimalnog rešenja.

Na slici 11 dat je grafički prikaz iznalaženja kompromisnog rešenja između maksimalne gotovosti i minimalnih troškova.



Slika 11 – Grafički prikaz iznalaženja kompromisnog rešenja između maksimalne gotovosti i minimalnih troškova

Sa slike 11 se vidi da se optimalni interval periodičnosti održavanja motora V46–6 sa aspekta maksimalne gotovosti i minimalnih troškova održavanja nalazi između 226 i 277 mč rada.

Određivanje optimalnog perioda preventivnog održavanja motora V46–6 primenom višekriterijumske optimizacije

Kako se optimalna periodičnost sprovođenja postupka preventivnog održavanja određena prema kriterijumu maksimalne gotovosti i prema kriterijumu minimalnih troškova održavanja razlikuju, neophodno je primeniti višekriterijumsku analizu i odrediti vrednost tražene optimalne peri-

odličnosti sprovođenja postupaka preventivnog održavanja, uzimajući u obzir i jedan i drugi kriterijum optimalnosti. Za rešavanje ovog zadatka primeniće se metoda težinskih koeficijenata [6].

Priroda kriterijuma optimalnosti može da bude benefitna i troškovna.

Skup alternativa i predstavlja se skupom indeksa alternativa. Problem se predstavlja matricom: $L = [l_{ik}]$. Sa l_{ik} je označena vrednost kriterijuma optimalnosti k za alternativu i :

- $l_{i1} = G_i$ – vrednost kriterijuma optimalnosti gotovosti za alternativu i ,
- $l_{i2} = C(t_i)$ – vrednost kriterijuma optimalnosti troškova za alternativu i .

Kao i ranije, razmatraćemo period vremena rada t_r od 50 do 500 [mč] u kojem oba kriterijuma dostižu lokalne ekstreme.

Za određivanje optimalnog perioda preventivnog održavanja, s obzirom na kriterijum maksimalne gotovosti (G) i minimalnih troškova održavanja ($C(t)$), interval od 50 do 500 [mč] diskretizovaćemo sa korakom 1.

U opštem slučaju, kriterijumi optimalnosti su različite prirode, imaju različite vrednosti i različite jedinice mere. To znači da vrednosti kriterijuma optimalnosti, za jednu alternativu i nisu uporedivi. Iz tog razloga potrebno je sprovesti proceduru normalizacije kojom se sve vrednosti l_{ik} preslikavaju u interval $[0, 1]$.

Pri korišćenju vektorske normalizacije problem odlučivanja može se predstaviti matricom: $L = [l_{ikn}]$, gde je l_{ikn} – normalizovana vrednost kriterijuma optimalnosti k za alternativu i .

$$l_{i1n} = \frac{l_{i1}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{451} (l_{i1})^2}} - \text{normalizovana vrednost kriterijuma optimalnosti}$$

gotovosti za alternativu i (normalizacija je izvršena korišćenjem izraza za vektorsku normalizaciju i uz primenu benefitnog kriterijuma optimalnosti),

$$l_{i2n} = \frac{\frac{1}{l_{i2}}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{451} \left(\frac{1}{l_{i2}}\right)^2}} - \text{normalizovana vrednost kriterijuma optimalnosti}$$

troškova za alternativu i (normalizacija je izvršena korišćenjem izraza za vektorsku normalizaciju i uz primenu troškovnog kriterijuma optimalnosti).

Radi izbora najbolje, svakoj razmatranoj alternativu pridružuje se određena vrednost:

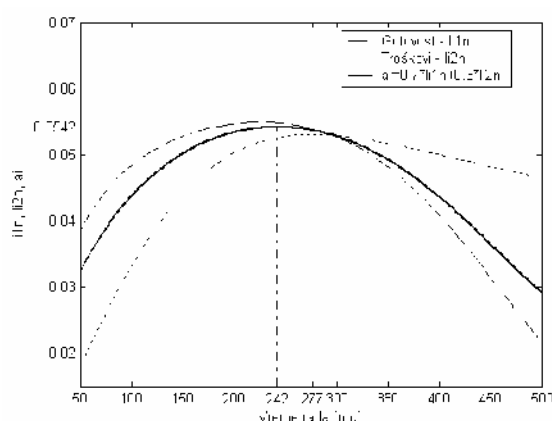
$$a_i = \frac{\sum_{k=1}^2 w_k \cdot l_{ikn}}{\sum_{k=1}^2 w_k}, \text{ gde su } w_k - \text{težinski koeficijenti [6, 7, 8].}$$

S obzirom na namenu motora V46–6, može se smatrati da je kriterijum optimalnosti gotovosti važniji od kriterijuma optimalnosti troškova i shodno tome usvojiti $w_1 = 0,7$ i $w_2 = 0,3$.

Najbolja alternativa i je ona za koju a_i ima najveću vrednost.

Na slici 12 je dat grafički prikaz iznalaženja najbolje alternative.

Kao rezultat diskretizacije i na osnovu slike 12 zaključuje se da se maksimalna vrednost $a_{imax} = 0,0542$ dobija za vreme preventivnog održavanja (vreme u radu) $t_r = 242$ mč.



Slika 12 – Grafički prikaz iznalaženja najbolje alternative

Optimalni period preventivnog održavanja motora V46–6, s obzirom na kriterijum maksimalne gotovosti (kao važniji, sa težinskim koeficijentom 0,7) i kriterijum minimalnih troškova održavanja (kao manje važan, sa težinskim koeficijentom 0,3) je 242 mč.

Zaključak

Optimalna periodičnost sprovođenja postupaka preventivnog održavanja, određena prema kriterijumu maksimalne gotovosti i prema kriterijumu minimalnih troškova održavanja se razlikuju. Zato je neophodno primeniti metode višekriterijumske analize i odrediti vrednost tražene optimalne periodičnosti sprovođenja postupaka preventivnog održavanja, uzimajući u obzir oba kriterijuma optimizacije.

Vrednost optimalne periodičnosti sprovođenja postupaka preventivnog održavanja motora određena prema kriterijumu maksimalne gotovosti vozila je 226 mč, a prema kriterijumu minimalnih troškova održavanja 277 mč. Primenom višekriterijumske analize dobijena je vrednost tražene optimalne periodičnosti sprovođenja postupaka preventivnog održavanja, uzimajući u obzir i jedan i drugi kriterijum optimizacije, i iznosi 242 mč rada.

Prikazana metodologija višekriterijumskog odlučivanja može se primeniti za dobijanje pouzdane vrednosti periodičnosti sprovođenja postupaka preventivnog održavanja motora borbenog sredstva, ali i za druge njegove delove. Pri tome, potrebno je raspolagati podacima, do kojih se dolazi praćenjem motora tokom njegove eksploatacije, na osnovu kojih se mogu odrediti pokazatelji njegove pouzdanosti i karakteristike sistema njegovog održavanja.

Literatura

- [1] Ćatić, D., *Razvoj i primena metoda teorije pouzdanosti*, Mašinski fakultet, Kragujevac, 2005.
- [2] Ivanović, G., Stanivuković, D., *Pouzdanost – analiza i projektovanje*, Tehnička uprava SSNO, 1988.
- [3] „Statistics Toolbox For Use With MATLAB“, The MathWorks, 1993–2002.
- [4] Minić, S., Arsenić, Ž., *Modeli održavanja tehničkih sistema*, Vojnoizdavački zavod, Beograd, 1998.
- [5] Krstić, B., *Eksploatacija motornih vozila i motora*, Mašinski fakultet, Kragujevac, 1997.
- [6] Opcirović, S., *Višekriterijumska optimizacija*, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Naučna knjiga, Beograd, 1986.
- [7] Perić, R. S., Monitoring stanja kroz testove analize ulja, *Vojnotehnički glasnik*, vol. 58, broj 4, pp. 102-133, ISSN 0042-8469, UDC 623+355/359, Beograd 2010.
- [8] Guberinić, R., Milojević, I., Određivanje funkcije pouzdanosti motornih vozila kao složenog tehničkog sistema, *Vojnotehnički glasnik (Military Technical Courier)*, vol. 57, broj 2, pp. 31-45, ISSN 0042-8469, UDC 623+355/359, Beograd 2009.

DETERMINING THE OPTIMAL PERIODICITY OF THE V46-6 ENGINE PREVENTIVE MAINTENANCE

FIELD: Mechanical engineering

Summary:

The application of preventive maintenance contributes significantly to providing the required level of readiness of complex technical systems used in organizations of special purpose. The basic requirement in applying this model of maintenance is to determine the optimal periodicity that should satisfy some mutually conflicting criteria. This paper presents a methodology for determining the periodicity of the preventive maintenance of V46-6 engines on the basis of collecting and processing statistical data about their malfunctions. This problem can be solved if all important requests and limitations are determined. The basis of the presented methodology is the reliability parameters of the analyzed engine, obtained by observing the engine behavior, from the aspect of occurrence of failure in real service conditions, and also its maintenance costs.

Introduction

By applying a preventive maintenance model, the optimization of the maintenance system is reduced to finding the answer to the question whether it is useful to apply preventive maintenance as a maintenance model and, if it is, to determine after how long operation time the procedures of preventive maintenance should be applied.

For a given engine and given service conditions and maintenance that allow preferences to be known in advance, only one solution of maintenance strategy is optimal. In that case, the most favorable values of reliability, readiness, costs of service and maintenance are achieved and the total costs of life cycle are reduced. The task of the engine maintenance system optimization is to find that optimum.

Determining the law of distribution of operation time until the V46-6 engine failure

The procedure for determining the law of distribution of operation time until failure, on the basis of empirical data, is executed in three steps. The first step is to estimate the indicators of reliability, i.e. to determine the characteristics of the statistic set and to evaluate the complete characteristics of the random variable. The second step, on the basis of the values obtained in the first step, is to determine a theoretical model of distribution which could be used to approximate the empiric distribution. The third step is to confirm the accordance of the adopted theoretical model of distribution with the empiric distribution.

Determining the periodicity of the V46-6 engine maintenance according to the criterion of maximum readiness

For special purpose vehicles, the most suitable is to apply the optimization criterion according to the model of maximum readiness.

To apply the maintenance model based on readiness, it is necessary to know the law of distribution of reliability, as well as of operation and failure time.

By varying the periodicity of time intervals between preventive maintenances, a functional dependence of the readiness on the maintenance periodicity can be obtained and, on this basis, the maintenance periodicity that gives the maximum readiness could be determined.

Determining the periodicity of the V46-6 engine maintenance according to the criterion of minimum costs

The maintenance system optimization can be done also on the basis of a model using minimum maintenance costs as an optimization criterion.

To apply this model, it is necessary to know the basic indicators of the maintenance system reliability. This model determines the optimal periodicity interval for executing the procedures of the V46-6 engine preventive maintenance, which gives its minimum costs, along with the requested engine reliability and readiness.

The strategy of preventive maintenance and preventive replacements is used when the failure intensity represents an increasing function of time and when the corrective maintenance costs are higher than the preventive maintenance costs. Then it is possible to determine the optimal periodicity of preventive maintenance.

Compromise solution of the maintenance system between the maximum readiness and the minimum maintenance costs

There is no mathematical model which connects the readiness criterion and the maintenance costs criterion and which could be used to find the compromise solution. The compromise solution is adopted on the basis of given criteria and limitations that must be taken in account when adopting the optimal solution.

Determining the optimal period of the V46-6 engine preventive maintenance using multicriteria optimization

Since the optimal periodicity of the preventive maintenance procedures based on the maximum readiness criterion differs from the one based on the criterion of minimal maintenance costs, it is necessary to apply the multicriteria analysis and to calculate the value of the requested optimal periodicity of preventive maintenance procedures, taking in account both optimization criteria.

Conclusion

The value of optimal periodicity of engine preventive maintenance procedures is 226 mh, calculated using the criterion of the vehicle maximum readiness, and 277 mh calculated using the criterion of minimum maintenance costs. By applying the multicriteria analysis, the value of the requested optimal periodicity of preventive maintenance procedures is calculated, taking in account both optimization criteria, to 242 mh of operation.

The presented methodology of the multicriteria decision could be used to get a reliable value of preventive maintenance procedures periodicity for the combat vehicle engine, but also for its other parts. For this purpose, it is necessary to have available data, obtained by analyzing the engine during its service, which could be used to determine the indicators of its reliability, as well the characteristics of its maintenance system.

Key words: engine, maintenance, optimization, availability, reliability, costs.

Datum prijema članka: 12. 10. 2010.

Datum dostavljanja ispravki rukopisa: 17. 12. 2010.

Datum konačnog prihvatanja članka za objavljivanje: 19. 12. 2010.

PRIMENA AKVIZICIONE KARTICE U IDENTIFIKACIJI POZICIONOG SERVOSISTEMA

Stanković R. *Momir*, Centralna logistička baza, Odeljenje
za logističku podršku B-4, Beograd
Manojlović M. *Stojadin*, Vojna akademija, Katedra vojnih
elektronskih sistema, Beograd

UDC: 004.9:621.31

OBLAST: Elektrotehnika (Automatika i upravljanje)

Sažetak:

U radu je opisan postupak identifikacije funkcija prenosa pojedinih komponenti i kompletnog pozicionog servosistema primenom akvizicione kartice DT9812. Servosistem je realizovan u laboratorijskim uslovima a pomoću akvizicione kartice snimljeni su odgovarajući step odzivi. Obradom dobijenih rezultata u programskom paketu MATLAB dobijene su funkcije prenosa pojedinih komponenti, na osnovu kojih su određene funkcije povratnog i spregnutog prenosa celokupnog sistema, koje su od suštinskog značaja za ocenu kvaliteta sistema. Verifikacija dobijenog modela izvršena je uporednom analizom rezultata dobijenih laboratorijskim ispitivanjem i na osnovu simulacija na računaru.

Ključne reči: pozicioni servosistem, akviziciona kartica, identifikacija, funkcija prenosa.

Uvod

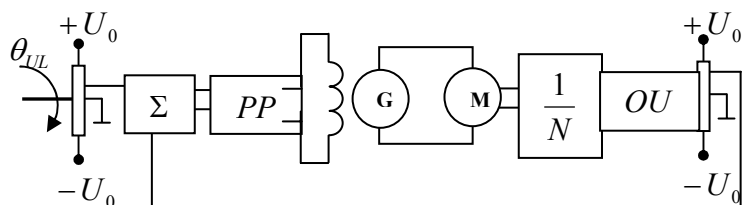
U opštem slučaju, sistem automatskog upravljanja predstavlja aktivnu mrežu sačinjenu od električnih, elektromehaničkih, mehaničkih, hidrauličnih, pneumatskih i drugih komponenti strukturno povezanih tako da ostvaruju unapred definisane zahteve. Od sistema upravljanja zahteva se što kvalitetnije upravljanje procesima različite prirode i namene u pri-

sustvu raznih poremećaja. Analiza i sinteza ovih sistema podrazumeva postojanje modela procesa kojim se upravlja u odgovarajućoj formi, kao što je npr. funkcija prenosa. Kvalitet analize i sinteze u velikoj meri zavisi od kvaliteta identifikacije odgovarajućih funkcija prenosa. Jedan od načina identifikacije jeste snimanje odziva sistema na odskočni (step) signal. Primena akvizicione kartice omogućava snimanje realnih signala i njihovu obradu u pogodnom softverskom okruženju kao što je MATLAB s ciljem dobijanja što preciznijeg modela. Posebnu vrstu sistema automatskog upravljanja predstavljaju servosistemi koji su našli široku primenu u raznim oblastima. Zadatak servosistema je da izlazna (upravljana) veličina sa zadovoljavajućom tačnošću prati promenljivi ulazni (referentni, upravljački) signal. U zavisnosti da li je upravljana veličina ugaona pozicija ili ugaona brzina obrtanja izlazne osovine, servosistemi se dele na pozicione i brzinske.

Realizacija pozicionog servosistema

U laboratorijskim uslovima realizovan je pozicioni servosistem čija je principna šema prikazana na slici 1. Upravljana veličina je ugaona pozicija osovine jednosmernog motora (M) koji je u spoju sa jednosmernim generatorom (G) (Vard–Leonardova grupa). Izlaz generatora povezan je na armaturni namotaj motora, i u zavisnosti od napona generatora menja se brzina obrtanja rotora motora. Pobuda motora je nezavisna (iz posebnog izvora jednosmerne struje). Referentni ugao se zadaje pomoću ulaznog potencijometra. Ugaona pozicija osovine motora meri se izlaznim potencijometrom, čiji je klizač preko reduktora ($1/N$) spojen sa osovinom motora na kojoj se nalazi objekat upravljanja (OU). U sumatoru (Σ) se formira signal greške koji se preko pretpojačavača (PP), u vidu pobude, šalje na generator. Promenom pojačanja pretpojačavača (pojačanja u direktnoj grani) mogu se menjati dinamičke karakteristike servosistema.

Problem određivanja funkcija povratnog i spregnutog prenosa servosistema svodi se na identifikaciju funkcija prenosa svih njegovih komponenti. Najsloženiji zadatak je identifikacija motora i generatora, s obzirom na to da su ostale komponente jednostavnije konstrukcije i sa poznatim parametrima.



Slika 1 – Principna šema potencijometarskog pozicionog servosistema

Figure 1 – Principle chart of a potentiometric position servo system

Sistem za akviziciju

Sistem za akviziciju predstavlja odgovarajuće alate i resurse za merenje i analizu fizičkih fenomena i procesa. To je kolekcija softvera i hardvera koji nas povezuju sa fizičkim svetom.

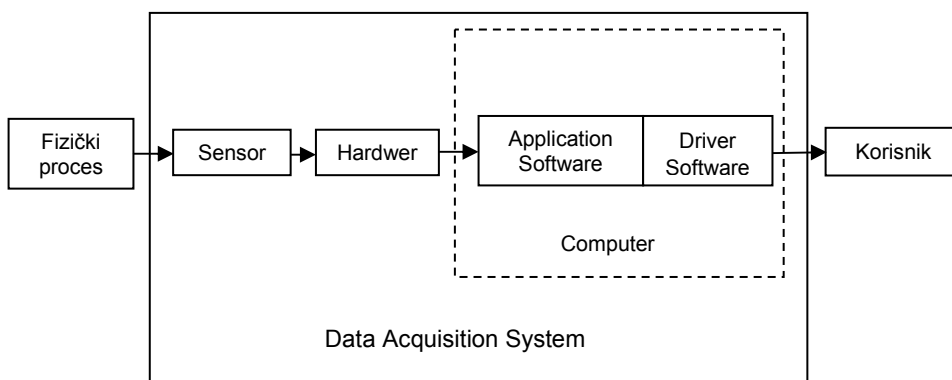
Hardver za akviziciju koji omogućuje konverziju analognih signala u digitalne, ali i za konverziju digitalnih signala u analogne može biti interni ili eksterni. Sastoji se iz više podsistema za izvršenje specijalizovanih zadataka, kao što su:

- analogni ulaz,
- analogni izlaz,
- digitalni ulaz/izlaz,
- brojač/tajmer.

Analogni ulaz konvertuje analogni ulazni signal dobijen od senzora u digitalni kod koji može biti korišćen na računaru. To su obično višekanalni uređaji koji daju 12 do 16 bita rezolucije po signalu. Analogni izlaz konvertuje digitalni signal sa 12 bita rezolucije u analogni signal. Obično ima dva kanala, ali može biti i višekanalni.

Softver omogućava razmenu informacija između računara i hardvera. Postoje dva tipa softvera: drajveri i aplikacije. Drajveri (*Driver Software*) omogućavaju kontrolu i upravljanje hardverom, dovođenje podataka sa ploče, kontrolu brzine rada, usklađivanje brzina rada hardvera i računara (naročito sa *DMA*), pristup sa više podsistema jednoj ploči i pristup većem broju ploča. Aplikacije (*Application Software*) prilagođavaju mogućnosti drajvera korisniku. One omogućavaju korisniku dobijanje svih relevantnih podataka (npr. o broju odbiraka), pokretanje događaja, rad sa snimljenim podacima, prikaz signala i dr. Aplikativni softver omogućava i određenu analizu podataka [3].

Sistem za akviziciju podataka (*Data Acquisition System*) prikazan je na slici 2. Na slici se vidi put informacija od realnog fizičkog procesa do korisnika.



Slika 2 – Sistem za akviziciju podataka
Figure 2 – Data acquisition system

Hardver za akviziciju podataka – akviziciona kartica DT9812

Modul (hardver) za akviziciju podataka DT9812 sadrži sledeće elemente: osam analognih ulaza, digitalni ulaz/izlaz (osam ulaza i osam izlaza), dva analogna izlaza (preko dvanestobitnog D/A konvertora), davač takta, napajanje, bafer i priključke za eksterni takt i eksterni triger. Rezolucija ulaza koji nam omogućava ovaj modul je 12 bita i ne može se menjati. Sa svojih osam analognih ulaznih kanala DT9812 može prikupljati podatke sa jednog kanala ili sa grupe kanala [3].

Softverska podrška akviziciji signala

Softverski alat za akviziciju signala predstavlja kolekciju funkcija u programskom paketu MATLAB. Glavne mogućnosti koje nam pruža su:

- snimanje realnih signala, preko hardvera za akviziciju,
- podrška analognih ulaza, analognih izlaza, i digitalnih ulaz/izlaz podsistema, uključujući i analognu ulaz/izlaz konverziju.

Postavljanje sistema za rad obuhvata instalaciju odgovarajućih hardvera i softvera. Hardverske instalacije podrazumevaju priključenje odgovarajućih ploča – akvizicijskih kartica (u ovom slučaju kartice DT9812) u slotove računara ili instalaciju odgovarajućih modula za eksterne uređaje. Instalacija softvera podrazumeva učitavanje drajvera i aplikativnih softvera na računar. Kao aplikativni softver koristi se programski paket MATLAB (*Data Acquisition Toolbox*). Senzori se priključuju tek posle instalacije kompletnog hardvera i softvera [4].

Identifikacija komponenti pozicionog servosistema pomoću akvizicione kartice DT9812

Identifikacija funkcije prenosa generatora jednosmernog napona

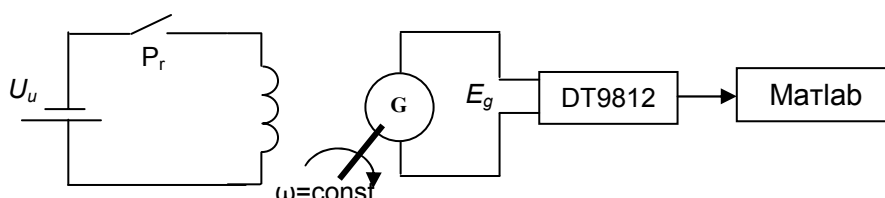
Generator jednosmernog napona („Rade Končar“) sa sledećim nominalnim vrednostima:

- | | |
|--|-------------------------|
| – napon pobude: 60 V | – napon armature: 170 V |
| – struja pobude: 1.8 A | – struja rotora: 3.5 A |
| – brzina obrtanja: 720 min ⁻¹ | – snaga: 0.35 kW |

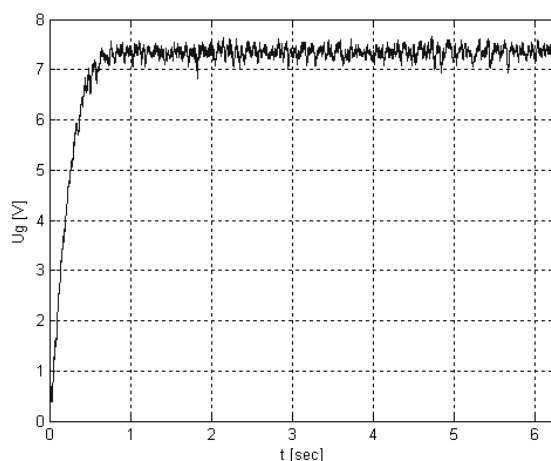
aproksimativno se predstavlja funkcijom prenosa prvog reda:

$$G_g(s) = \frac{E_g(s)}{U_u(s)} = \frac{k_g}{T_g s + 1}, \quad (1)$$

Za eksperimentalno određivanje funkcije prenosa sistem je povezan prema slici 3. Ulaz je napon pobude generatora a izlaz je napon koji daje generator. Rotor generatora se okreće konstantnom ugaonom brzinom, što je omogućeno posebnim motorom. Pomoću prekidača P_r dovodi se ulazni step signal na pobudu generatora. Odziv generatora snimljen je akvizicionom karticom i prikazan je na slici 4.



Slika 3 – Principalska šema za identifikaciju jednosmernog generatora
Figure 3 – Principle chart for the identification of DC generators



Slika 4 – Odziv jednosmernog generatora na step pobudu
Figure 4 – Step response of the DC generator

Sa slike 4 vidi se da generator ima aperiodičan odziv, što se poklapa sa teorijskom pretpostavkom, tako da se njegova funkcija prenosa može predstaviti funkcijom prenosa prvog reda (izraz 1). Generator je pobuđen naponom $U_u = 30$ V. Izlazni napon se vodi na razdelnik napona radi slabljenja jer

je ulazni napon na kartici DT9812 ograničen na $\pm 10V$. Uzimajući u obzir pridodati naponski razdelnik (smanjuje napon jedanaest puta), odredili smo statičko pojačanje generatora kao odnos izlaznog napona u stacionarnom stanju i napona pobude generatora: $k_g = 2,2$. Vremenska konstanta generatora T_g je vreme za koje odziv generatora dostigne 66% svoje stacionarne vrednosti. Očitavanjem odbiraka snimljenog signala dobija se $T_g = 0.35$ s. Na osnovu toga, za konačnu funkciju prenosa generatora dobijamo:

$$G_g(s) = \frac{2,2}{0,35s + 1}. \quad (2)$$

Identifikacija funkcije prenosa motora jednosmerne struje

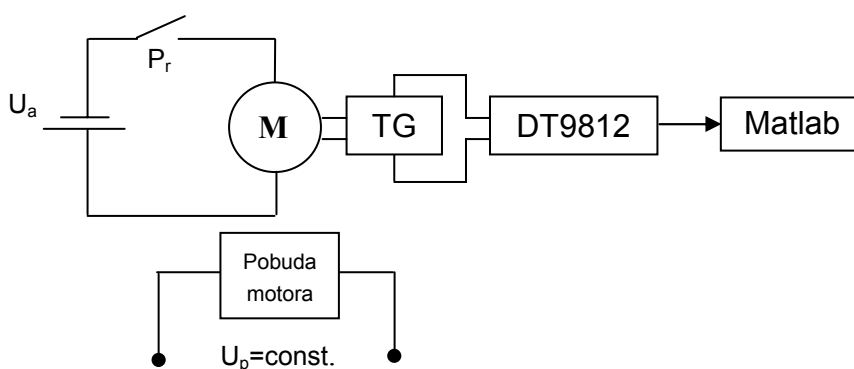
Motor jednosmerne struje („Rade Končar“) je izvršni element servosistema, sa sledećim vrednostima nominalnih veličina:

- napon pobude: 60 V
- struja pobude: 2 A
- brzina obrtanja: 720 min⁻¹
- napon armature: 170 V
- struja rotora: 2 A
- snaga: 0.34 kW

Teoretski, jednosmerni motor se predstavlja funkcijom prenosa drugog reda:

$$G_m(s) = \frac{\Omega(s)}{U_a(s)} = \frac{k_m}{T_m^2 s^2 + 2\zeta T_m s + 1}. \quad (3)$$

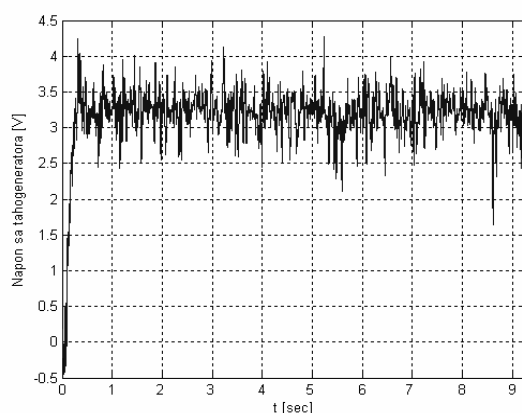
Za eksperimentalno određivanje funkcije prenosa jednosmernog motora korišćena je šema data na slici 5.



Slika 5 – Principalska šema za identifikaciju jednosmernog motora

Figure 5 – Principle chart for the identification of DC motors

Pomoću prekidača P_r dovodi se armaturni napon U_a u vidu step pobude. Osovina motora je spojena sa tahogeneratorom, čiji je izlaz povezan sa akvizicionom karticom. Odziv motora se snima i obrađuje u MATLAB-u. Pobuda motora je nezavisna i konstantna ($U_p = const$). Pri akviziciji signala tahogenerator unosi šum merenja koji „maskira“ koristan signal. Filtriranje signala pomoću analognih filtera, koji su postavljani posle tahogeneratore, nije dalo željene rezultate pa je primenjena softverska filtracija pomoću MATLAB-a tako što je vršeno usrednjavanje snimljenog signala. Odziv motora prikazan je na slici 6.



Slika 6 – Odziv motora na step pobudu posle usrednjavanja signala
Figure 6 – Step response of the DC motor after signal averaging

Kao što se vidi, i posle usrednjavanja odziv sa tahogeneratorsa poseduje relativno veliki nivo šuma. Sa slike se ipak može nagovestiti pseudo-periodičan odziv (uočava se mali preskok), što je u skladu sa teorijskom pretpostavkom funkcije prenosa motora. Odziv motora snimljen je i pomoću analognog pisača, koji je sam po sebi niskopropusni filter. Analizom signala sa analognog pisača i odziva dobijenog akvizicijom, dobijaju se potrebni parametri funkcije prenosa motora.

Ulazna veličina motora je napon armature U_a (100 V), a izlaz je ugaona brzina obrtanja osovine rotora. Koeficijent statičkog pojačanja motora (k_m) predstavlja odnos ugaone brzine rotora motora u stacionarnom stanju i napona pobude. Sa slike 6 vidi se da je vrednost napona tahogeneratorsa u stacionarnom stanju $U_{tgss} = 3.4$ V. Koeficijent prenosa tahogeneratorsa iznosi $k_{tg} = 11$ rad/(sV) pa se za koeficijent statičkog pojačanja motora dobija:

$$k_m = \frac{\Omega_{mss}}{U_a} = \frac{k_{tg} U_{tgss}}{U_a} = \frac{11 \frac{\text{rad}}{\text{Vs}} 3.4 \text{ V}}{100 \text{ V}} = 0.374 \frac{\text{rad}}{\text{sV}} \quad (4)$$

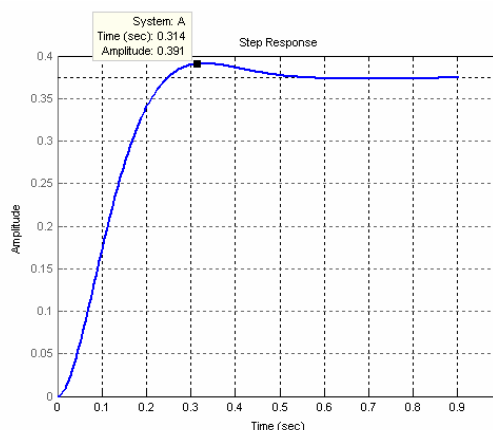
Koeficijent prigušenja ζ , izračunat na osnovu vrednosti preskoka, iznosi $\zeta = 0.85$.

Vremenska konstanta T_m ne može se precizno odrediti računskim putem kod funkcija prenosa drugog reda, pa je dobijena simulacijom raznih vrednosti u MATLAB-u, dok se odziv simulirane funkcije prenosa nije poklopio sa odzivima dobijenih eksperimentalnim putem. Kao karakteristične vrednosti koje su podešavane uzeti su vreme kad odziv dostigne 66% svoje stacionarne vrednosti i vreme preskoka. Tako je dobijeno da vremenska konstanta iznosi oko $T_m = 0.075$ s.

Konačno, uvrštavanjem dobijenih vrednosti u izraz 3 dobija se funkcija prenosa motora jednosmerne struje:

$$G_m(s) = \frac{0,374}{0,005625 \cdot s^2 + 0,105 \cdot s + 1} \quad (5)$$

Simulacija step odziva dobijene funkcije prenosa, prikazana na slici 7, pokazuje da se ona slaže sa odzivom dobijenim eksperimentalnim putem (slika 6). Vrednost preskoka i vreme smirenja približno su isti.



Slika 7 – Odziv motora dobijen simulacijom funkcije prenosa date izrazom (5)
Figure 7 – Response of the DC motor simulated with the transfer function given by eq. (5)

Identifikacija funkcija prenosa ostalih komponenti pozicionog servosistema

Potenciometarski davač (248A-1KΩ) ima sledeću funkciju prenosa:

$$G_{pd}(s) = \frac{U_{pd}(s)}{X(s)} = k_{pd} = \frac{U_0}{\alpha_{\max}} \quad (6)$$

Ulazna veličina je ugaoni pomeraj klizača potencijometarskog davača $X(s)$, koji je vezan za osovinu rotora, a izlazna veličina je napon U_{pd} . Funkcija prenosa je konstanta $K_{pd} = U_o/\alpha_{max}$, gde je U_o napon napajanja potencijometarskog davača a α_{max} maksimalni otklon potencijometra. Kod potencijometra korišćenog u ovoj vežbi $\alpha_{max} = \pm\pi \text{ rad}$, a $U_o = \pm 15 \text{ V}$, pa je $K_{pd} = 4.77 \text{ V/rad}$.

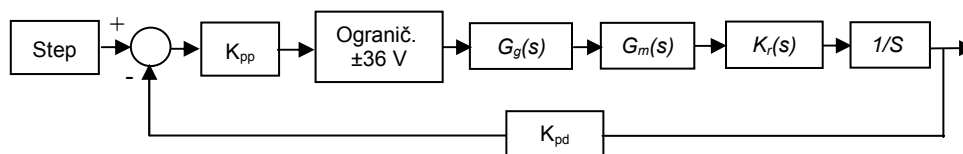
Reduktor redukuje ugaonu brzinu osovine motora šezdeset puta pa je njegova funkcija prenosa $K_r = 1/60 = 0.0166$.

Tahogenerator jednosmerne struje je uređaj koji ugaonu brzinu obrtanja osovine prevodi u proporcionalni jednosmerni napon. Njegova funkcija prenosa je $K_{tg} = 11 \text{ rad/(Vs)}$.

Pretpojačavač („KEPKO“, BIPOLAR OPERATIONAL POWER) pored promenljivog pojačanja K_{pp} ima i ulogu pojačavača snage, jer signal koji se dobija sa sabirača nije dovoljno velike snage za direktnu pobudu generatora. Maksimalni izlazni napon pretpojačavača je $\pm 36 \text{ V}$. Pri velikom pojačanju K_{pp} on ulazi u zasićenje, što se dešava na početku pozicioniranja, kada je signal greške (ulaz u predpojačavač) najveći.

Određivanje funkcija prenosa kompletnog servosistema

Identifikacijom funkcija prenosa svih komponenti i usvajanjem određenih aproksimacija, a na osnovu principске šeme sistema (slika 1), dobijamo strukturni dijagram pozicionog servosistema [5], [6].



Slika 8 – Strukturni dijagram pozicionog servosistema
Figure 8 – Structural diagram of the position servo system

Ograničavač koji se nalazi iza pretpojačavača praktično ne postoji kao posebna komponenta, već samo opisuje nelinearnost pretpojačavača tipa zasićenja. Integrator na izlazu pretvara ugaonu brzinu obrtanja u ugao jer je kod pozicionog servosistema potrebna negativna povratna sprega po uglu.

Na osnovu strukturne šeme mogu se odrediti funkcije povratnog i spregnutog prenosa pozicionog servosistema. Funkcija povratnog prenosa data je izrazom:

$$W(s) = G_g(s)G_m(s)k_{pd}k_rk_{pp}\frac{1}{s}, \quad (7)$$

koja, nakon uvrštavanja dobijenih parametara, postaje:

$$W(s) = \frac{k_{pp} 0,0652}{(0,35s+1)(0,005625s^2+0,105s+1)}, \quad (8)$$

gde je K_{pp} promenljivo pojačanje pretpojačavača.

Funkcija spregnutog prenosa dobija se na osnovu izraza:

$$F(s) = \frac{W(s)}{1+W(s)}. \quad (9)$$

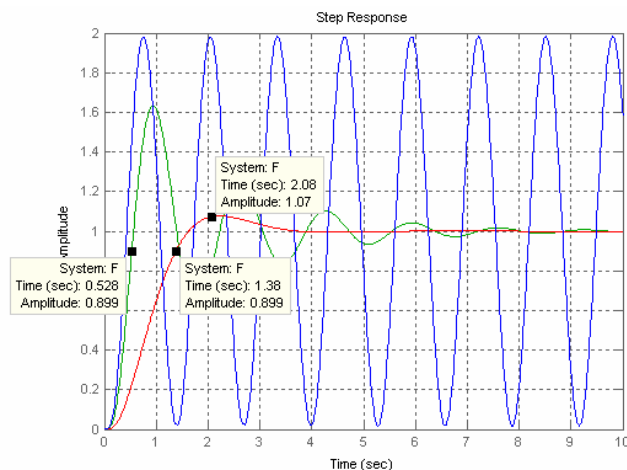
Nakon identifikacije komponenti sistema i određivanja funkcija povratnog $W(s)$ i spregnutog prenosa $F(s)$, moguće je izvršiti analizu sistema u frekventnom i vremenskom domenu, koja je značajna zbog ocene kvaliteta ponašanja sistema, odnosno određivanja performansi sistema.

Analiza sistema u vremenskom domenu

Analiza sistema u vremenskom domenu vršena je uporedno laboratorijskim ispitivanjem i simulacijom na računaru eksperimentalno dobijenih funkcija prenosa. Odzivi sistema na step pobudu u laboratoriji su snimani pomoću akvizicione kartice na koju je doveden signal sa izlaza potencijometarskog davača. Prednost ovakve analize je što se lako može uočiti do koje vrednosti pojačanja pretpojačavača sistem ostaje u granicama stabilnosti. Step pobuda koja je dovođena predstavljala je zadavanje određene pozicije, s tim što se moralo voditi računa da ne bude prevelika kako predpojačavač ne bi ušao u zasićenje.

Odziv snimljen akvizicionom karticom *DT9812* kao i u prethodnim slučajevima je imao visokofrekventni šum koji je „maskirao“ koristan signal, tako da se moralo vršiti filtriranje signala.

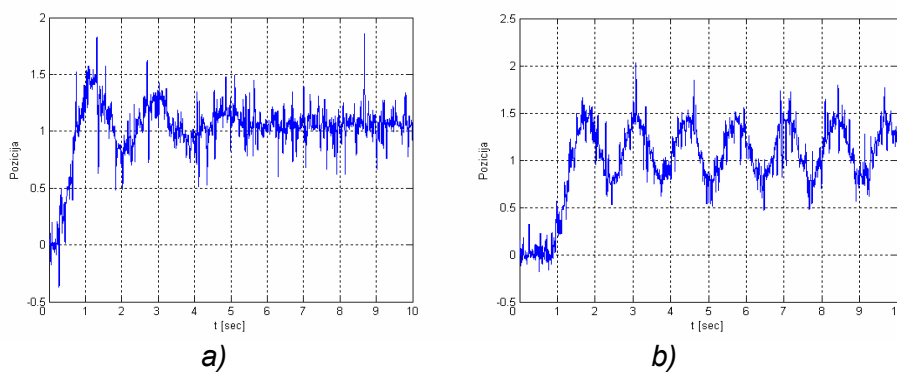
U zavisnosti od pojačanja pretpojačavača K_{pp} odziv servosistema se menjao, tako da se povećanjem vrednosti K_{pp} smanjuju vremenske konstante, sistem postaje brži, što je dobra osobina. Međutim, povećanjem vrednosti K_{pp} dolazi i do povećanja vrednosti preskoka i sistem postaje nestabilniji. Odzivi sistema simulirani u *MATLAB*-u za različite vrednosti K_{pp} dati su na slici 9.



Slika 9 – Odzivi servosistema na jediničnu step pobudu dobijeni simulacijom za različite vrednosti K_{pp} ($K_{pp}=20$, $K_{pp}=85.5$ i $K_{pp}=148$)

Figure 9 – Step responses of the servo system obtained by the simulation for different values of K_{pp} ($K_{pp}=20$, $K_{pp}=85.5$ i $K_{pp}=148$)

Odzivi realnog servosistema za različite vrednosti step pobude i različite vrednosti K_{pp} , snimani pomoću akvizicione kartice *DT9812*, prikazani su na sledećim slikama.



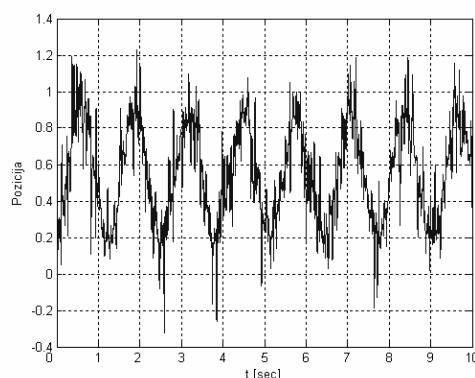
Slika 10 – Odzivi servosistema na jediničnu step pobudu pri a) $K_{pp} = 85,5$ i b) $K_{pp} = 148$, snimljeni akvizicionom karticom

Figure 10 – Step responses of the servo system recorded with the acquisition card for a) $K_{pp} = 85,5$ and b) $K_{pp} = 148$

Zbog velikog šuma koji se javljao pri snimanju akvizicionom karticom, karakteristične vrednosti odziva u vremenskom domenu lakše se mogu uočiti sa slika dobijenih simulacijom eksperimentalno određenih

funkcija prenosa (slika 9), dok su odzivi snimljeni karticom poslužili kao provera da li su funkcije prenosa korektno određene (slika 10).

Na slici 10.b prikazan je odziv sistema na granici stabilnosti pri $K_{pp} = 148$. Primećuje se da odziv nije identičan odzivu dobijenom simulacijom za $K_{pp} = 148$. To je posledica činjenice da pri tom pojačanju, predpojačavač ulazi u zasićenje. Smanjivanjem vrednosti step signala na ulazu pozicionog servosistema sa 1 V na 0.5 V izbegava se ulazak prepojačavača u zasićenje. Odziv sistema u tom slučaju prikazan je na slici 11.



Slika 11 – Odziv servosistema na step pobudu od 0.5V, pri $K_{pp} = 148$ snimljen akvizicionom karticom

Figure 11 – Step response of the servo system to the 0.5 V excitation, with $K_{pp} = 148$ recorded with the acquisition card

Povećanjem pojačanja K_{pp} do kritične vrednosti reakcija sistema se ubrzava ali on postaje nestabilan. Da bi postigli dobre dinamičke karakteristike servosistema uz istovremeno očuvanje stabilnosti, u sistem je neophodno uvesti odgovarajući kompenzator.

Zaključak

U analizi i sintezi sistema automatskog upravljanja prvi korak predstavlja modeliranje procesa ili objekta upravljanja. Od kvaliteta dobijenog modela u velikoj meri zavisi i kvalitet celokupne analize i sinteze. Funkcija prenosa predstavlja pogodan oblik matematičkog modela linearnih sistema. Jedan od načina identifikacije sistema bazira se na odzivu sistema u vremenskom domenu na standardan test signal, kao što je na primer odskočni (step) signal.

U radu su pokazane mogućnosti korišćenja akvizicione kartice za identifikaciju komponenti pozicionog servosistema snimanjem odziva pojedinih komponenti. Date su opšte karakteristike servosistema, a zatim je detaljno

opisan pozicioni servosistem koji je realizovan u laboratorijskim uslovima. Na osnovu empirijski dobijenih podataka iz step odziva, identifikovane su funkcije prenosa svih komponenti, a zatim su određene karakteristične funkcije prenosa celokupnog servosistema. Odzivi su snimani akvizicionom karticom DT9812 pri čemu su senzori, sa kojih su dobijani signali (tahogenerator i potencijometrijski davač) unosili određeni nivo šuma, tako da je bilo potrebno dodatno filtriranje. Akvizicija karticom omogućava da se signali, preko instaliranih drajvera i aplikativnih softvera, obrade u programskom paketu MATLAB. Radi verifikacije rezultata izvršeno je poređenje realnih signala i signala dobijenih na osnovu simulacionih modela. Uporedna analiza je pokazala da se odzivi u velikoj meri poklapaju, što znači da su funkcije prenosa korektno određene. Kao još jedan pokazatelj kvaliteta identifikacije uzeto je kritično pojačanje servosistema pri kojem sistem dolazi na granicu stabilnosti. Kritično pojačanje dobijeno u laboratoriji se u potpunosti poklapa sa kritičnim pojačanjem koje je dobijeno simulacijom modelovanog sistema.

Literatura

- [1] Milić, S., *Kontinualni sistemi automatskog upravljanja*, Naučna knjiga, Beograd, 1985.
- [2] Đurović, Ž., Kovačević B., *Sistemi automatskog upravljanja*, Akadem-ska misao, Beograd, 2006.
- [3] *Data Translation, DT9812, DT9813, and DT9814 User's Manual*, USA, 2006.
- [4] Gene, F., Franklin, J., Powell, D., Abbas, E., *Feeedback Control of Dynamic System*, Pearson Education, USA, 2002.
- [5] Đurović, Ž., Kovačević, B., *Digitalni signali i sistemi*, Akademska mi-sao, Beograd, 2000.
- [6] Petrović, T., Rakić, A., *Signali i sistemi*, "DEXIN", Beograd, 2005.

APPLICATION OF THE ACQUISITION CARD IN THE IDENTIFICATION OF POSITION SERVO SYSTEMS

FIELD: Electrical engineering and Electronics (Automation and Control)

Summary:

The application of the acquisition card in the identification of the transfer functions of complete position servo systems and their components is described in this paper. A servo system was realized in the laboratory and the acquisition card was used for recording appropriate step responses. The results were processed in the programme package MATLAB in order to get the transfer functions of the components. The open loop and closed loop transfer functions, which are of the crucial importance in the qualitative analysis of control systems, were derived. The verification of the model was done with a comparative analysis of the results from the laboratory and from computer simulations.

Introduction

Servo systems are a particular class of control systems the output of which should follow the reference input with a minimum error. There are speed servo systems (the controlled variable is angular velocity) and position servo systems (the controlled variable is the angular position of the motor shaft). One method for the identification of characteristic transfer functions of the system is based on step responses of its components which can be recorded with the acquisition card and processed in the programme package MATLAB.

Realization of the position servo system

A position servo system, with a DC motor and a DC generator, connected as a "Ward-Leonard group", was realized in the laboratory. Dynamic characteristics of complete servo systems can be changed with a variable gain of the preamplifier. The identification of the DC generator and DC motor transfer functions is the most complicated task, because the other components of servo systems have simpler construction and known parameters.

Acquisition system

An acquisition system represents appropriate software and hardware tools for the measurement and analysis of physical processes. Hardware enables the AD and DA signal conversion and other functions necessary for accommodation of real signals to a computer. There are two main types of software: drivers (they control communication between the hardware and the computer) and applications (they enable users to exploit capabilities of acquisition systems in an easy way).

Data acquisition hardware – acquisition card DT9812

The DT9812 has 8 analog inputs, 2 analog outputs, 8 digital inputs and outputs with a maximum sampling speed of 50 kb/s. The input signal resolution is 12 bits and cannot be changed.

Data acquisition software

The MATLAB collection of functions represents the main acquisition software. There is the Data Acquisition Toolbox specialized for acquisition purposes. This software enables a variety of data measurement and processing functions.

Identification of position servo system components with the acquisition card DT9812.

Identification of the DC generator transfer function

Theoretically, a DC generator is described with the first order transfer function. Its input (stator voltage) is given as step excitation of an appropriate value. By measuring its output (rotor voltage) with the acquisition card and processing it in MATLAB, it is possible to determine the necessary parameters (time constant and DC gain) very precisely.

Identification of the DC motor transfer function

A DC motor is described with the second order transfer function and its parameters (DC gain, natural frequency and damping factor) are determined in a similar way as for a DC generator. In this case the input is rotor voltage and the angular velocity of the rotor shaft is the output registered by the DC tachometer.

In both cases measuring data were corrupted by noise filtered by software.

Identification of the transfer functions of other components

The other components of position servo systems (potentiometers, reduction gears, DC tachometers and preamplifiers) have nominal values of parameters given by manufacturers. The preamplifier has variable gain and a nonlinear static characteristic (output voltage saturation ± 36 V).

Transfer functions of the complete system

With the given transfer functions of all components and the structural diagram of the complete system, the open and closed loop transfer functions were derived.

Time domain analysis

In order to verify the derived transfer functions, the responses of the real system and the simulated model were compared. The critical gain of the system (the gain when the system becomes unstable) was used as an indicator of correct identification. It was first derived by simulation and then the real system was tuned (the preamplifier gain was set on the derived value). The results show that both the real system and the simulated model have identical responses in all cases, which confirms that the identification was done correctly.

Conclusion

The quality of the control system analysis and design depends on a model of the system. In order to derive a model as precise as possible, a combination of the acquisition card and the programme package MATLAB was used. The performances of the acquisition card DT9812 are suitable for measuring in control applications and they enable analyses and designs in specialized software such as MATLAB. The results presented in this paper show that the identification of the characteristic functions of position servo systems can be performed with necessary accuracy.

Key words: *position servo system, acquisition card, identification, transfer function.*

Datum prijema članka: 21. 05. 2011.

Datum dostavljanja ispravki rukopisa: 03. 06. 2011.

Datum konačnog prihvatanja članka za objavljivanje: 05. 06. 2011.

TEHNOLOŠKE KARAKTERISTIKE DIGITALNOG STANDARDA DVB-H ZA DIFUZNI VIDEO-PRENOS KOD PRENOSIVIH UREĐAJA

Samčović B. *Andreja*,
Saobraćajni fakultet Univerziteta u Beogradu

UDC: 621.397.3

OBLAST: Telekomunikacije

Sažetak:

U radu je dat pregled standarda za digitalni difuzni video-prenos kod prenosivih uređaja DVB-H (Digital Video Broadcasting – Handheld), kao dela DVB projekta. Ovaj standard je zasnovan na prethodnom standardu DVB-T, koji je bio razvijen za potrebe zemaljske digitalne televizije. Opisani su načini DVB-H prenosa signala. Razvoj tehnologije omogućio je digitalni difuzni video prenos kod prenosivih i mobilnih terminala. Ovaj rad razmatra ključne tehnološke karakteristike DVB-H standarda, kao što su: time slicing, korekcija greške unapred, 4K režim i in-depth interliveri.

Ključne reči: DVB-H, DVB projekat, digitalni video, prenosivi uređaji, standard, time slicing.

Uvod

Uпотреба multimedijalnih servisa beleži izuzetan rast u proteklih desetak godina zahvaljujući napretku digitalnih tehnologija. Personalni video-rekorderi, video na zahtev, interaktivnost, mobilna telefonija i video-streaming omogućili su svojim korisnicima da personalizuju sadržaj po svom ukusu i potrebama, i da te potrebe iskažu svojim provajderima. Potrošači su upotrebom 3G servisa pokazali interes za TV servise preko prenosivih uređaja. Korisnici sada mogu da gledaju televiziju kod kuće ili u prevozu, upotrebljavajući različite vrste prenosivih terminala, uključujući mobilne telefone, *notebook* računare ...

DVB *Project* bavi se razvojem specifikacija za sisteme digitalne televizije koje su uvrštene u standarde internacionalnih tela kao što su ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) i CENELEC (*European Committee for Electrotechnical Standardization*) [1]. DVB je konzorcijum koji se sastoji od preko 300 kompanija koje se bave difuznim (*broa-*

dcast) komunikacijama. Kooperativni rad ovih kompanija ima za cilj uspostavljanje međunarodnih standarda za digitalnu difuziju. Standardi iz grupe DVB su postali vodeći međunarodni standardi, i predstavljaju prihvatljiv izbor za tehnologije koje omogućavaju efikasnu, kvalitetnu, po ceni prihvatljivu, interoperabilnu digitalnu difuziju. DVB standardi za digitalnu televiziju su prihvaćeni u celoj Evropi, na Bliskom Istoku, u Severnoj Americi i Australiji.

DVB-H (*Digital Video Broadcasting – Handheld*) je tehnički projekat koji je razvila organizacija DVB Project (DVB200701) i koji je standardizovan od strane DVB i ETSI pod brojem EN 302 304 u novembru 2004. godine [2]. Projekat se odnosi na prenosive (*handheld*) uređaje koji se napajaju baterijom, kao što su mobilni telefoni, PDA (*Personal Digital Assistant*) uređaji i slično. DVB-H je razvijen da zadovolji potrebe za pouzdanim, brzim prijemom, i da omogući sistem koji može da obezbedi velike brzine prenosa podataka, a sve s ciljem da se obezbede neophodni uslovi za mnoge mobilne aplikacije, uključujući video u realnom vremenu. DVB-H budi značajno interesovanje u difuznim telekomunikacijama i telekomunikacijama uopšte.

DVB-H se bazira na DVB-T, standardu za digitalnu televiziju koji se odnosi na zemaljske (*terrestrial*) TV signale [3]. Kada je prvi put predstavljen 1997. godine, DVB-T nije bio projektovan za mobilne prijemnike, iako su DVB-T mobilni servisi bili pušteni u rad u mnogim zemljama. Dolaskom prijemnika sa diversiti antenama, servisi koji su bili predviđeni za fiksni prijem sada se mogu isto tako dobro primati na mobilnim stanicama.

Širom sveta, digitalna televizija se rapidno uvodi i u hodu zamenjuje analogni zemaljski prenos. U toku tog procesa, spektar se oslobađa, jer jedan DVB-T multipleks može poneti šest do osam kanala, od kojih je ranije svaki zauzimao jedan frekvencijski slot. Iz tog razloga je proširenje ovih servisa na mobilne uređaje smatrano najizvodljivijom opcijom i zbog toga DVB-H u osnovi predstavlja samo modifikaciju DVB-T preporuke [4].

DVB-T servisi nisu odmah bili prilagođeni mobilnim uređajima, pošto se standardi za DVB-T odnose na fiksne prijemnike sa relativno velikim krovrim antenama i bez limitiranog napajanja što dozvoljava jak prijem DVB-T signala, dok mobilno okruženje karakteriše mnogo slabiji signali, mobilnost, fading i otežani uslovi prijema. DVB-H standard, koji uzima u obzir te faktore, postaje idealan medijum za mobilnu televiziju.

Ostali faktori koji idu u korist DVB-H su to što su UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) ili TV mobilni servisi, koji se baziraju na trećoj generaciji 3G, u prirodi unikastni, i nisu skalabilni za masovan prenos. Njihova ograničenja u pružanju servisa velikom broju pojedinačnih korisnika leže u ograničenjima u frekvencijskom spektru i mrežnim resursima za prenos višekanalnog difuzionog signala.

Zašto DVB-H?

Osnovni problem bilo kog ručnog uređaja je trajanje baterije. Trenutna i projektovana potrošnja je suviše visoka za ručne prijemnike, s obzirom na to da se očekuje da autonomija rada takvog uređaja bude nekoliko dana sa jednim punjenjem. Drugi bitan zahtev kada je DVB-H u pitanju je sposobnost realizacije brzine prijema od 15 Mb/s u kanalu širine propusnog opsega od 5 MHz i mogućnost rada u brzim jednofrekvencijskim SNF mrežama (*Single Frequency Network*). Ovi zahtevi su usaglašeni posle mnogo debata i sa posebnim akcentom ka rastućoj konvergenciji uređaja koji dopremaju video servise i ostale difuzne servise prenosa podataka ka uređajima 2G, 2,5G i 3G generacije [5]. Dalje, sve to mora biti omogućeno tako da se održi maksimalna kompatibilnost sa postojećim DVB-T sistemom i mrežom.

U nameri da se postignu ovi uslovi, najnovija DVB-H specifikacija obuhvata sledeće tehnološke mogućnosti: *time slicing*, 4K režim (*4K mode*) i MPE-FEC (*Multiprotocol Encapsulation – Forward Error Correction*). Tehnologija DVB-H je projektovana tako da za prenos multimedijalnih servisa do mobilnih korisnika koristi infrastrukturu digitalne zemaljske TV difuzije. DVB-H koristi isti deo spektra koji koristi digitalna TV. Prema tome, DVB tehnologija za ručne prenosive uređaje mora da ispuni sve zahteve prenošenja TV servisa do prenosivih uređaja, a to su:

- difuzni servisi potencijalno stižu do neograničenog broja korisnika;
 - emitovanje dovoljno velike prenosne snage tako da mobilni uređaji mogu primiti signal čak i u zgradama;
 - štednja baterije kojom se napaja mobilni uređaj;
 - korišćenje dela spektra koji koristi zemaljski difuzioni sistem;
 - robusno kodiranje i korekcija greške što može poslužiti u uslovima visoko promenljive jačine signala, sa kakvim se često suočavaju mobilni korisnici;
 - minimalna infrastruktura da bi se emitovali TV mobilni servisi.
- DVB-H može koristiti istu infrastrukturu koju koristi DVB-T.

Principi DVB-H sistema

Kako je DVB-H razvijen na principima DVB-T standarda i standarda digitalnog prenosa zvuka, potrebno je u novi standard uneti funkcionalne elemente neophodne za prijem signala na prenosivim uređajima. I DVB-H i DVB-T koriste isti fizički nivo, tako da je DVB-H unazad kompatibilan sa DVB-T. Kao i DVB-T, DVB-H za prenos koristi MPEG-2 (*Motion Picture Expert Group*) transportni strim i OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) modulatore za svoj signal. Predviđeno je da se do ruč-

nog uređaja prenosi između dvadeset i četrdeset televizijskih i radio programa u jednom multipleksu. U praksi, bitski protok za DVB-H multipleks je u opsegu od 5 do 21 Mb/s.

DVB-H pruža dodatnu podršku za prijem signala kod prenosivih uređaja. Ovo uključuje štednju baterije pomoću *time slicinga*, povećanje opšte robusnosti sistema, poboljšanja elastičnosti u odnosu na DVB-T korišćenjem multiprotokolarnе enkapsulacije sa korekcijom greške unapred (MPE-FEC). Dodatno, DVB-H difuzno emituje zvuk, sliku i podatke korišćenjem IPv4/IPv6 protokola, a takođe može koristiti i nedifuzne frekvencije. Osnovni atributi DVB-H sistema su [6]:

- dekodiranje audio i video sadržaja, podataka ili fajlova;
- korišćenje IP *datacastinga* za isporuku podataka do više prijemnika;
- organizacija podataka u grupe paketa za svaki kanal (*time slicing*);
- ubacivanje odgovarajuće signalizacije za prenos DVB-H strima;
- aplikacije za korekciju greške unapred i multiprotokolarna enkapsulacija;
- upotreba GPS (*Global Position System*) za vremensko poravnavanje u mrežama sa jednom frekvencijom;
- modulacije QPSK, 16QAM ili 64QAM i 4K (ili 8K) COFDM nosioci sa frekvencijskim interleavingom;

Time slicing, multiprotokolarna enkapsulacija sa korekcijom greške unapred (MPE-FEC), 4K mod, *in-depth* interliveri, DVB-H signalizacija (uključujući i obavezne identifikatore ćelija) i korišćenje širine propusnog opsega od 5 MHz predstavljaju osnovne elemente koji su uvedeni u DVB-H [7]. Svi ovi alati su locirani u fizičkom sloju i sloju veze DVB-H protokola. *Time slicing* je implementiran u sloju veze, dok je DVB-H signalizacija implementirana i u fizičkom sloju i sloju veze, tako da se ova dva alata direktno odnose na handover kod DVB-H.

Stek DVB-H protokola

Stek DVB-H protokola prikazan je na slici 1. Nova tehnička poboljšanja implementirana su u fizičkom sloju i sloju veze. Aplikacioni servisi mogu da se šalju preko RTP protokola (*Real Time Protocol*) za sadržaj koji zahteva prenos u realnom vremenu, kao što je TV program. Podaci koji ne zahtevaju prenos u realnom vremenu, kao što su *file downloading* servisi, mogu da se šalju preko FLUTE/ALC protokola (*File Over Unidirectional Transport / Asynchronous Layered Coding*). Elektronski servisni vodič ESG (*Electronic Service Guide*) takođe se emituje uz pomoć FLUTE/ALC protokola.

Aplikacioni sloj	Sadržaj u realnom vremenu	Sadržaj u obliku fajlova	ESG	
Prezentacioni sloj	Kodovanje izvora H.264 (MPEG-4)	Kodovanje izvora H.264 (MPEG-4)	Enkapsulacija izvora (XML)	
Sloj sesije	RTP	FLUTE/ALC		
Transportni sloj	UDP			
Sloj mreže	IP (IPv4/IPv6)			
Sloj veze	MPE (<i>Time slicing</i>)			PSI/SI
	MPEG-2 Transportni strim			
Fizicki sloj	TPS	DVB-T		

Slika 1 – DVB-H protokol stek

Time slicing

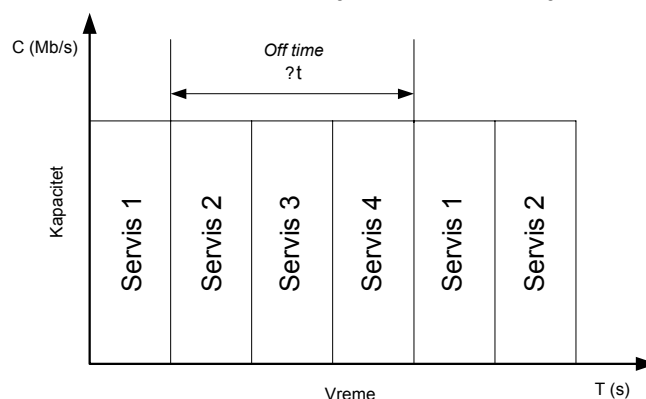
Jedna od karakteristika koja izdvaja DVB-H od DVB-T je *time slicing* kanala u kome se prenose podaci, u završnom multipleksu. Takođe, i kod DVB-T se više kanala zajedno multipleksira (npr. šest do osam servisa u multipleksu koji se prenosi kanalom širine propusnog opsega od 8 MHz) tako da se na multipleksnom nivou paketi različitih kanala prenose jedan za drugim, prateći red. Kao rezultat veoma velike brzine prenosa podataka i s obzirom na to da paketi kontinualno dolaze, potrebno je da prijemnik bude sve vreme aktivan za svaki kanal.

U DVB-H sistemu, *time slicing* koristi se za prenos podataka u periodičnim brstovima sa znatno višim iznenadnim bitskim protocima u odnosu na protoke koje se koriste kada se podaci kontinualno prenose, kao što je to slučaj u DVB-T sistemu. *Time slicing* je ilustrovan na slici 2.

Time slicing je sa jedne strane sličan TDMA (*Time Division Multiple Access*) tehnologiji koja se koristi u GSM (*Global System for Mobile Communications*) standardima. Razlika je u tome što kod TDMA u GSM svi vremenski slotovi imaju fiksno vreme trajanja, dok trajanje vremenskog slota kod *time slicinga* može da varira. Dalje, TDMA u GSM dodeljuje vremenske slotove različitim korisnicima dok su vremenski slotovi kod *time slicinga* dodeljeni različitim mobilnim servisima. Takođe, TDMA u GSM dodeljuje vremenske slotove i *downlink* i *uplink* kanalima, dok su vremenski slotovi kod *time slicinga* dodeljeni samo *downlink* kanalima.

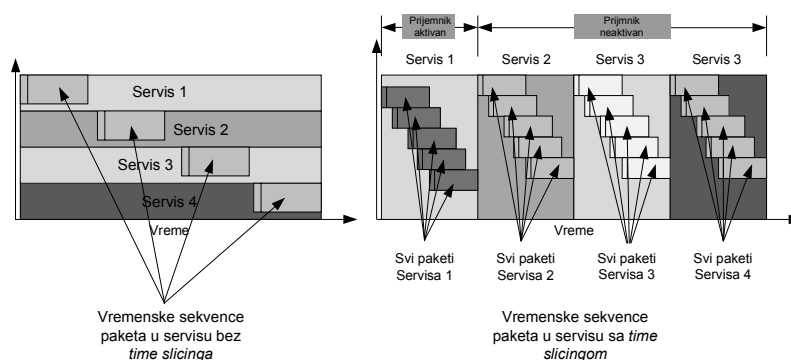
U *time slicingu* svi paketi dolaze u gomili, jedan za drugim u toku limitiranog vremenskog perioda. U isto vreme ne dolaze paketi iz drugih kanala. To dopušta prijemniku, ukoliko on zahteva samo jedan kanal, da bude aktivan samo tokom tog vremena kada su paketi u kanalu zajedno grupisani i stižu u velikom broju, što je prikazano na slici 3. U ostalom vremenu koje se

još naziva *off time*, prijemnik može biti ugašen, i on tada štedi energiju. Potrebno je da se aktivira samo malo ranije pre nego što otpočne prijem u njemu namenjenom kanalnom slotu (obično 200 ms je potrebno za sinhronizaciju). Dakle, *time slicing* omogućava da tjuner u DVB-H prijemniku ostane aktivan samo u deliću vremena kada prima brstove koji prenose traženi servis, što omogućava uštedu baterije. Tvrdi se da se može postići ušteda na bateriji do 95% (što zavisi od broja servisa u multipleksu) u odnosu na konvencionalni i kontinualni režim rada koji koriste DVB-T tjuneri.



Slika 2 – Time slicing

Signali sa velikim bitskim protokom baferuju se u prijemnu memoriju. Kada se posmatra vremenski domen, podacima koji dolaze u brstu je potrebno od 1 do 5 sekundi da „napune“ memoriju prijemnika. Ako je prenos podataka u jednom kanalu na primer 1 Mb/s, prijemnik treba da baferuje 5 Mb podataka za 5 sekundi neaktivnog vremena. Sa druge strane, za TV servis koji radi pri 25 f/s (kadrova po sekundi), prijemnik bi trebalo da baferuje 125 frejmova (kadrova) podataka. Ovi baferovani frejmovi (kadrovi) prikazuju se kontinualno, tako da korisnik nema osećaj da je prijemnik u neaktivnom stanju.



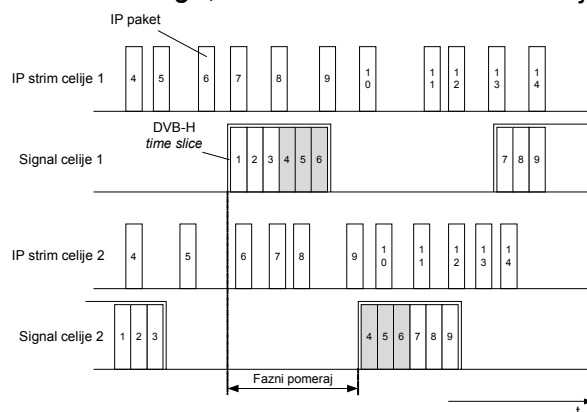
Slika 3 – Time slicing u DVB-H sistemu

Količina podataka koja je poslata u brstu jednaka je jednom FEC ramu. To može biti od 1 do 5 Mb. Kada prijemnik ne prima tražene podatke u brstu, tjuner koji se nalazi u ručnom uređaju je neaktivan i tada ne troši snagu.

Postoje, međutim, druge stvari koje prijemnik radi u neaktivnom periodu. Na primer, on može da meri jačinu prijemnog signala od susednih ripitera, odnosno da vrši hendover ka drugim predajnicima od kojih ima bolje prijemne uslove. *Time slicing* nudi jedan izrazit benefit, mogućnost da se koristi monitoring susednih ćelija, kako bi se omogućio hendover [8].

Tehnologija nazvana fazni pomeraj pokazuje kako se *off time* između prenosnih brstova koristi za realizaciju hendovera, kako oni moraju biti sinhronizovani i koji granični uslovi moraju postojati. Fazni pomeraj nudi statično fazno pomeranje koje postoji između dve susedne ćelije, kako je prikazano na slici 4. Ova slika nam pokazuje kako preklapanje IP paketa (jedan primer je označen sivom bojom na slici) osigurava hendover bez gubitaka. Glavna ideja faznog pomeranja je da fazni pomeraj između dve susedne ćelije bude makar maksimalno vreme *time slicea* plus vreme koje je potrebno terminalu za sinhronizaciju ka novom signalu u ćeliji ka kojoj se vrši hendover [9].

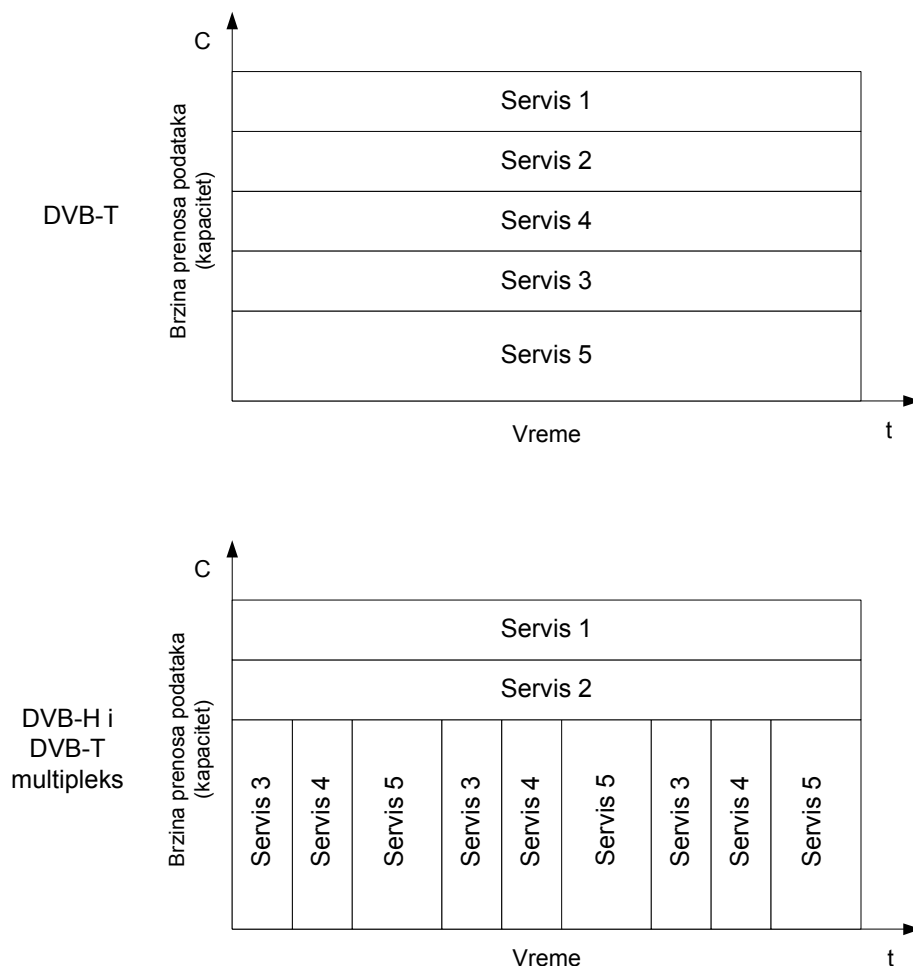
Na Slici 5 prikazano je poređenje DVB-T prenosa i DVB-T/H kombinovanog prenosa. Moguće je koristiti kombinaciju DVB-H (sa *time slicingom*) i DVB-T (bez *time slicinga*) servisa u jednom multipleksu, kako je i prikazano na slici 5. Ova vrsta kombinacije je neophodna da bi se DVB-H servisi pripojili u postojeću DVB-T infrastrukturu. Nivo uštede baterije u ovom slučaju je smanjen zbog manjeg bitskog protoka koji je dostupan za servise koji koriste *time slicing*. U DVB-T prenosu, kako je prikazano na slici 5, pet servisa se prenosi zajedno u transportnom strimu. U ovom slučaju, terminal je primio svih pet servisa pre nego ih je dekodirao željeni servis. U kombinovanom DVB-T/H prenosu, iako se DVB-T ponaša kao i pri čistom DVB-T prenosu, DVB-H terminalu je potrebno samo da dekodira ekvivalent od tri servisa kada koristi režim *time slicinga*. Na ovaj način, uz pomoć *time slicinga*, DVB-H terminal štedi bateriju.



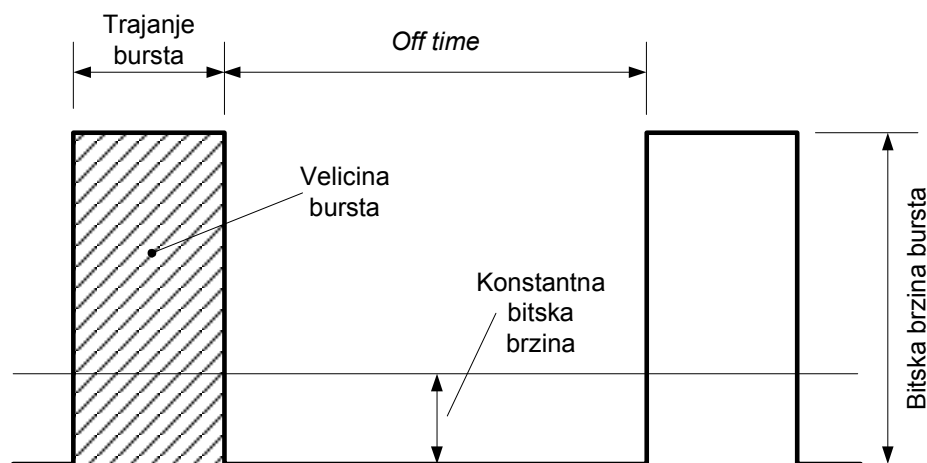
Slika 4 – Fazni pomeraj
Picture 4 – Phase shift

Drugi benefit *time slicinga* je taj da je to jedinstveno u domenu uštede baterije. To znači da količina uštede energije koja se dostiže u DVB-H neće biti dostignuta sa *time slicingom* ako se on koristi u DAB i DMB.

U zavisnosti od prenosne bitske brzine, veličine brsta i njegovog trajanja, *off time* Δt u prenosnom strimu može da varira. Brst parametri i formule koje računaju dužinu trajanja brsta, *off time* i postignuta ušteda energije su prikazani na slici 6. DVB-H prijemnik može koristiti ovaj *off time* da bi izvršio sinhronizaciju i otpočeo meki hendover ka drugoj ćeliji, što bi sve bilo nemoguće bez *time slicinga*.



Slika 5 – DVB-T signal i multipleks DVB-T i DVB-H signala



Slika 6 – Time slicing, parametri brsta

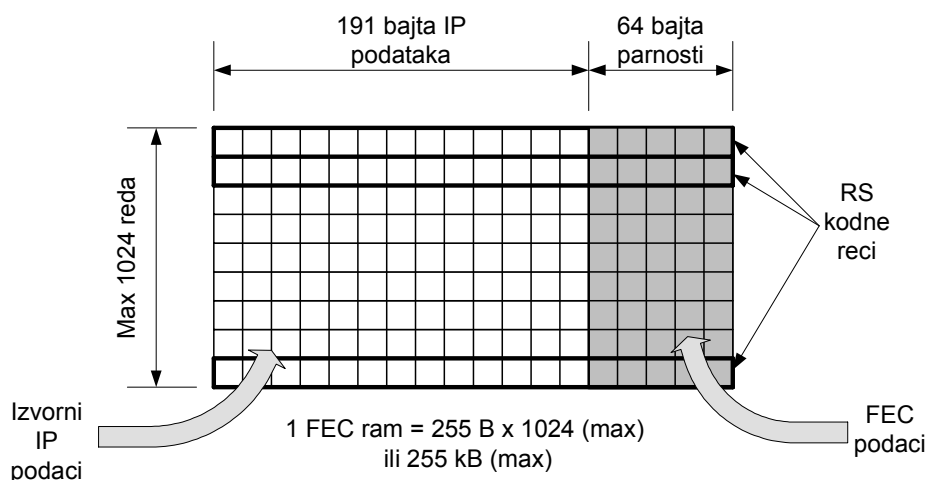
MPE-FEC

Prijem kod prenosivih uređaja je prilično drugačiji od prijema kod fiksnih zemaljskih antena. Prvo, antene su same po sebi prilično male i imaju mali dobitak. Drugo, prenosivi uređaji se najčešće nalaze u potpuno mobilnom okruženju. U takvim uslovima, prijem DVB-H signala na mobilnom uređaju karakterišu brze fluktuacije signala, višestruke putanje, Doplerov efekat, veliki propagacioni gubici (naročito kod *indoor* prijema), prijem bez linije optičke vidljivosti, kanalna smetnja od susednih TV i GSM kanala i razni faktori iz okruženja, kao što su atmosferske prilike i saobraćaj. DVB-H za difuzno emitovanje signala koristi frekvencijske bendove u opsegu veoma visokih frekvencija (VHF) i u opsegu ultravisokih frekvencija (UHF). Zbog toga je prijem *downstream* servisa visokih brzina na ručnom uređaju veoma zahtevan.

Multiprotokolarna enkapsulacija MPE (*Multiprotocol Encapsulation*) je metoda prenosa IP paketa preko DVB-H mreže. Ova metoda specifičira prenos IP paketa unutar MPEG *Private Data* sekcija. To znači da se video i audio podaci u DVB-H sistemu prenose preko IP *datacastinga* (IPDC). Ovaj proces obuhvata pakovanje digitalnog sadržaja u IP pakete i pouzdanu isporuku tih paketa. IP platforma nije restriktivna po pitanju tipa prenosnog sadržaja, te je IPDC pogodan za prenos video programa uživo, zatim preuzetog videa (*downloaded video*), muzičkih datoteka, audio i video strima (u strim formatu), Web stranica, igrice i ostalog sadržaja. U odnosu na IP *unicast* mreže, IPDC omogućava značajna poboljšanja tako da difuzna mreža može da opsluži milione korisnika sa inherentno visokom brzinom, koja je dostupna svim korisnicima.

Prednost korišćenja IP kao osnovne tehnologije je da se istim protokolom može zajedno sa podacima upravljati i korisnim sadržajem. Postoje dva tipa podataka koji se emituju: emitovani sadržaj i opisi servisa, kao što su PSI/SI podaci i elektronski servisni vodič. Takođe, podaci mogu da sadrže upravljačke informacije o autorskim pravima koje se koriste za pristup ili pretplatu sadržaja. IP sloj pruža posebne kanale kroz koje se prenose informacije o svakom tipu podataka.

Iako se podaci u DVB-H okruženju prenose preko IPDC, odnosno enkapsuliraju u IP zaglavlja i prenose na isti način kao što se IP podaci prenose internetom, radio medijum nije toliko pogodan kao internet, pa se javljaju greške zbog varijacije nivoa signala, interferencije i ostalih transmisionih efekata. Sve to zahteva da podaci koji se prenose budu na neki način zaštićeni. Zaštita podataka kod DVB-H sistema rešena je upotrebom korekcije greške unapred FEC (*Forward Error Correction*). Nakon kodiranja izvornog sadržaja, podaci se smeštaju u FEC ram (slika 7). Korišćenjem FEC smanjuje se potreban uslov za odnos signal/šum do 7 dB. To daje znatnu elastičnost prenosivim uređajima prilikom prijema DVB-H signala.



Slika 7 – Struktura MPE-FEC rama

Cilj MPE-FEC je da poboljša odnos nosilac/šum (C/N) i toleranciju na uticaj Doplera u mobilnim kanalima, kao i da poboljša toleranciju na impulsnu interferenciju. Međutim, MPE-FEC radi samo unutar jednog *time slicea* zato što veličina *time slicing* brsta upravo odgovara sadržaju jednog MPE-FEC rama. Ukoliko se pojavi i jedna jedina greška u prenosu, servis „ispada“ ne samo za trajanje brsta, već i tokom *off time*, odnosno dok ne dođe sledeći brst. Handover se obično dešava na krajevima ćelijske pokrivenosti gde je signal sa različitih predajnika veoma slab, pa je prijem osetljiv na impulsnu interferenciju.

4K režim i *in-depth* interliveri

Na fizički sloj DVB-H deluju 4K režim i *in-depth* interliveri. Njihovi ciljevi su da se poboljša planirana fleksibilnost SFN mreže i njena zaštita od kratkih impulsnih šumova nastalih interferencijom od različitih električnih uređaja. Na taj način oni deluju na prijem DVB-H signala. 4K zajedno sa 2K i 8K odnose se na broj podnosilaca koji se koriste u DVB-H OFDM prenosu. 2K mod koristi 1.705 individualnih nosilaca, 4K mod 3.409, dok 8K mod koristi 6.817 nosilaca. Parametri za različite DVB-H OFDM prenosa prikazani su u tabeli 1.

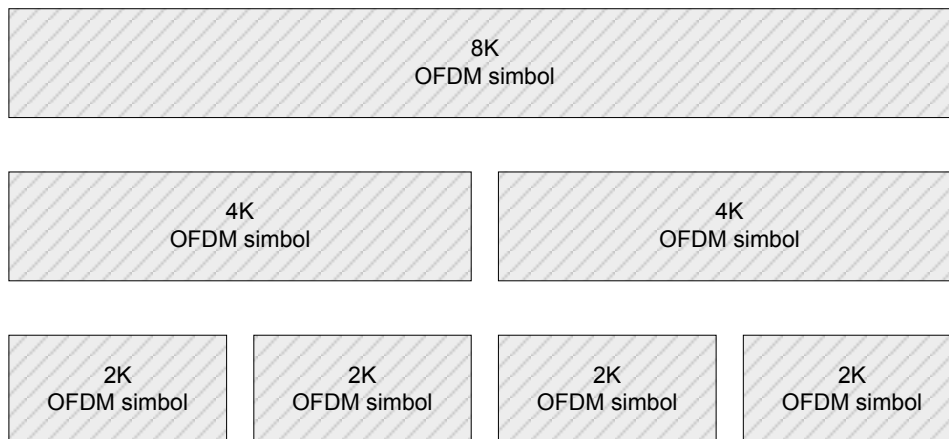
Parametri DVB-H OFDM prenosa

Tabela 1

OFDM parametar	Mod		
	2K	4K	8K
Ukupan broj nosilaca	2048	4096	8192
Modulisani nosioci	1705	3409	6817
Korisni nosioci	1512	3024	6048
Trajanje OFDM simbola (μs)	224	448	896
Trajanje zaštitnog intervala (μs)	7, 14, 28, 56	14, 28, 56, 112	28, 56, 112, 224
Razmak između nosilaca (kHz)	4464	2232	1116
Maksimalna razdaljina predajnika	17	33	67

Kada se planira mreža, 4K mod daje kompromisno rešenje između mobilnosti i veličine SFN mreže. Uvođenjem 4K moda, hendover postaje frekventniji nego kada se koristi 8K, zbog smanjenja veličine ćelije. Veličina ćelije ovde se odnosi na veličinu SFN. Veličina SFN zavisi od zaštitnog intervala trajanja OFDM prenosa, što je takođe dato u tabeli 1. Lako se može videti da je zaštitni interval trajanja 4K moda između onog u 2K i onog u 8K modu. Zbog toga, 4K pruža jednu vrstu kompromisa između 2K i 8K. DVB-T ne uključuje 4K mod, on je opcija samo u DVB-H mrežama.

In-depth interleaving je alternativni način korišćenja velike memorije, predviđene za 8K mod, čime se poboljšava robusnost mobilnog terminala. To znači da se 8K interliver bafer može koristiti i u 2K i u 4K modu, i to kao alternativni interliver. Korišćenje 8K interlivera pruža fleksibilnost biranja između 2K, 4K i 8K moda bez menjanja interlivera. Sklop *in-depth* interlivera prikazan je na Slici 8. *In-depth* interliver koristi dostupnu memoriju za 8K mod, i poboljšava performanse 2K i 4K moda.



Slika 8 – In-depth interleaving OFDM simbola

Inače, pod pojmom *interleaving* se podrazumeva način aranžiranja podataka u nekontinualnom načinu kako bi se povećale performanse. To se koristi u kod TDM (*Time Division Multiplexing*) postupka, računarskoj memoriji i disk memoriji. *Interleaving* se prevashodno koristi u telekomunikacijama, kada se prenose multimedijalni formati podataka kod radio prenosa.

Zaključak

DVB-H pruža dobre tehničke karakteristike i to je jedan od važnijih razloga zašto DVB-H sistem treba da bude izabran kao platforma, kada je mobilna difuzija u pitanju. Dodatno, DVB-H je prirodna nadogradnja DVB-T sistema, koji je u većini zemalja Evrope prisutan kao osnovni TV digitalni difuzioni sistem. Sa druge strane, veoma je bitno da prilikom usvajanja DVB-H standarda postoji i njegova opšta prihvaćenost u zemljama u regionu. To je važno kako zbog rominga, tako i zbog sveprisutnosti servisa, podrške industriji itd.

Jedan od razloga koji može usporiti rast DVB-H tržišta jeste cena. Kao i kod svih novih tehnologija, cene servisa i infrastrukture su u početnim fazama više. Dobra politika koja će podržati standard i omogućiti konkurentno liberalno tržište može znatno da utiče na penetraciju mobilnih TV servisa, a samim tim i široku upotrebu DVB-H standarda. Na osnovu svega opisanog u radu, može da se pretpostavi da bi DVB-H servis mogao da se koristi u muzejima, značajnim turističkim lokacijama i tržnim centrima kao sredstvo informisanja i saopštavanja raznih promocija. Sa druge strane, operatori bi trebalo da omoguće dostupnost svojih ser-

visa prvo na glavnim saobraćajnicama i frekventnim trgovima, a kasnije i na širem području grada.

Zaključak je da je DVB-H jedan savremeni standard, koji osim mobilnih TV servisa može da podrži širok spektar servisa i aplikacija korisnicima. Dodatno u prilog tome ide i to što je DVB-H standard otvoren u tehnološkom smislu. To je posebno bitno kada se uzmu u razmatranje DVB-SH (*Digital Video Broadcasting - Satellite services to Handhelds*) i DVB-H sistemi nove generacije (DVB-H2).

Literatura

- [1] <http://www.dvb-h.org/>, /14.09.2010./
- [2] Just, D., Pascal, G., *DVB-H – Digital Video Broadcast*, <http://www.dvb-h.org/>, May 2008.
- [3] Benoit, H., *Digital Television: Satellite, Cable, Terrestrial, IPTV, Mobile TV in the Framework*, Focal Press, 2006.
- [4] Coquil, D., Holbling, G., Koch, H., *Handbook of Mobile Broadcasting: DVB-H, DMB, ISDB-T and Mediaflo, Part I: STANDARDS, An Overview of the Emerging Digital Video Broadcasting-Handheld (DVB-H) Technology*, CRC Press, 2008.
- [5] Kumar, A., *Mobile TV: DVB-H, DMB, 3G Systems and Rich Media Applications*, Focal Press, 2007.
- [6] Minoli, D., *IP multicast with applications to IPTV and mobile DVB-H*, Wiley Interscience, 2008.
- [7] Faria G., Henriksson, J., Stare, E., Talmola, P., *DVB-H: Digital Broadcast Services to Handheld Devices*, Proceedings of the IEEE, Vol. 94, No. 1, pp 194–209, January 2006.
- [8] Yang X., *Handover in DVB-H: Investigations and Analysis*, Springer, 2008.
- [9] Vare, J., Hamara, A., Kallio, J., *Approach for Improving Receiver Performance in Loss-free Handovers in DVB-H Networks*, Globecom, 2004.

TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF DIGITAL VIDEO BROADCASTING – HANDHELD STANDARD DVB-H

FIELD: Telecommunications

Summary:

This paper gives an overview of the Digital Video Broadcasting - Handheld standard DVB-H, as a part of the DVB Project. This standard is based on the previous standard DVB-T, which was developed for the terrestrial digital television. The ways of DVB-H signal transmission are also described. Development of advanced technology enabled the digital video broadcasting over wireless portable terminals. This paper discusses the key technological features of the DVB-H standard, such as: time slicing, forward error correction, 4K mode and in-depth interleavers.

Introduction

DVB is a consortium consisting of over 300 companies involved in broadcasting communications. DVB Standards have become the leading international standards and represent an acceptable alternative to technologies that enable efficient, high-quality, affordable pricing, as well as interoperable digital broadcasting. DVB standards for digital television have been accepted throughout Europe, the Middle East, North America and Australia. Digital television is rapidly introduced and is replacing analogue terrestrial transmission. During this process, the spectrum is released as a DVB-T multiplex which could take six to eight channels, one of which previously occupied one frequency slot.

Principles of the DVB-H system

As the DVB-H was built on the principles of the DVB-T standard and digital transmission of sound, it is the new standard set of functional elements required to receive signals on portable devices. The DVB-H and DVB-T use the same physical level, so that the DVB-H backward is compatible with the DVB-T. As DVB-T, the DVB-H transmission uses the MPEG-2 transport stream and OFDM modulators for their signal.

Time slicing

One feature that stands out from the DVB-H is the time slicing. Similarly to the DVB-T, a channel multiplexes together six to eight services in the multiplex which is transmitted through the channel bandwidth of 8 MHz, so that the multiplexed level of different packages of channels is transmitted one after the other. As a result of a very high-speed data transfer, and the fact that packets arrive continuously, it is necessary that the receiver is active all the time for each channel.

MPE-FEC

Reception with portable devices is quite different from the reception with fixed terrestrial antennas. Firstly, the antennas themselves are quite small and have little gain. Secondly, portable devices are usually located in a completely mobile environment. In such conditions the reception of DVB-H signals of the mobile device is characterized by rapid fluctuations of signals, multiple paths, Doppler effect, large propagation losses (especially for indoor reception), not receiving line of sight, channel interference from adjacent TV channels and GSM and various factors in environment, such as atmospheric conditions and traffic.

4K mode and in-depth interleavers

4K mode and in-depth interleavers act on the physical layer of DVB-H. Their goals are to improve the flexibility of the planned SFN network and its protection from short impulse noise caused by interference of various electrical devices. In this way they act on the reception of DVB-H signals. 2K 4K and 8K modes are related to the number of applicants that are used in the OFDM DVB-H transmission.

Conclusion

DVB-H provides good technical features and it is one of the most important reasons why the DVB-H system should be chosen as a platform when it comes to mobile broadcasting. It is essential that the DVB-H standard be adopted in the countries in the region. This is important because of roaming, the ubiquity of services, support industries, etc.. One of the reasons that can slow the growth of the DVB-H market is its price. As with any new technology, the price of service and infrastructure in the early stages is high. A good policy that will support the standard and provide a competitive liberal market can significantly affect the penetration of mobile TV services, and consequently the widespread use of the DVB-H standard.

Key words: *DVB-H, DVB Project, digital video, handheld devices, standard, time slicing.*

Datum prijema članka: 14. 09. 2010.

Datum konačnog prihvatanja članka za objavljivanje: 16. 10. 2010.

PRIMENA METODE ANALITIČKIH HIJERARHIJSKIH PROCESA U IZBORU OPTIMALNOG TAKTIČKOG RADIO SISTEMA

Devetak M. Saša, Terzić R. Miroslav
Vojna akademija, Katedra vojnih elektronskih sistema,
Beograd

UDC: 621.391

OBLAST: Telekomunikacije, Matematika (Operaciona istraživanja)

Sažetak:

U radu je primenjena metoda analitičkih hijerarhijskih procesa u rešavanju problema izbora optimalnog taktičkog radio komunikacionog sistema. Definisan je problem, opisan je postupak primene AHP metode, kriterijumi za izbor i alternative radio komunikacionih sistema. Primenom matematičkog modela i prezentovanog programa rešen je definisani problem.

Ključne reči: višekriterijumska optimizacija, AHP metoda, taktički radio-komunikacioni sistem.

Uvod

Opremanje vojske savremenom telekomunikacionom, ali i drugom opremom, od velikog je značaja za njene operativne i funkcionalne sposobnosti. Pred donosioca odluke o nabavci i izboru optimalnog sredstva postavlja se kompleksan zahtev. Rad predstavlja prilog rešavanju problema nabavke radio komunikacione opreme. Funkcija cilja definisana je izborom optimalnog taktičkog radio komunikacionog sistema koji će obezbediti kvalitetno telekomunikaciono-informatičko obezbeđenje taktičkih jedinica u borbenim dejstvima. Radio-komunikacioni sistemi treba da rade u frekventnom opsegu vojnih taktičkih radio komunikacija (30–88 MHz), definisanih po međunarodnim standardima ITU-R. Od opštih zahteva, treba da omoguće visok nivo otpornosti na elektronska dejstva (TRANSEC – Transmission Security) i neprekidnost rada, kriptozastitu komunikacija i informacija (COMSEC – Communications Security), prenos govora i podataka, detekciju i korekciju grešaka, jednostavnost rukovanja i samostiranja, modularnost i zamenljivost blokova i modula, klimomehaničke

standarde u grupi K3, da su prenosni, odnosno mobilni. Značajni zahtevi vezani su i za nivo održavanja, garanciju i rezervne delove, obuku i izradu potrebne dokumentacije.

Uspešnost upravljanja organizacionim sistemima danas zasniva se na primeni efikasnih metoda i tehnika za podršku odlučivanju [1]. Donesene odluke skoro po pravilu imaju veći uticaj na stanje sistema u bližoj i daljoj budućnosti nego u sadašnjosti. Odluka se donosi da bi se ispunili određeni zahtevi – ciljevi koji su postavljeni u razmatranom problemu. Problem je često okarakterisan većim brojem kriterijuma (funkcija cilja, funkcija kriterijuma) za odlučivanje, više alternativa (rešenja) za izbor i procesom izbora jednog konačnog rešenja. U ovakvim slučajevima premena metoda operacionih istraživanja posebno dolazi do izražaja, jer višekriterijumski pristup predstavlja jedini način da se što realnije opiše svaki konkretni problem. Jedna od metoda višekriterijumske optimizacije je metoda analitičkih hijerarhijskih procesa (AHP metoda). Metodu je kreirao Tomas L. Saaty krajem sedamdesetih godina prošlog veka i predstavlja alat koji pruža pomoć donosiocima odluke u rešavanju kompleksnih problema odlučivanja u kojima učestvuje veći broj donosioca odluka, veći broj kriterijuma i u višestrukim vremenskim periodima [2]. Ona pripada metodama višeatributnog odlučivanja s obzirom na to da se primenjuje u rešavanju loše strukturiranih problema. U radu je primenjena AHP metoda za rešavanje problema izbora optimalnog taktičkog radio-komunikacionog sistema.

Metoda analitičkih hijerarhijskih procesa

Za rešavanje definisanog problema primenjena je metoda analitičkih hijerarhijskih procesa. Metodu je razvio Tomas L. Saaty 1980. godine i predstavlja jednu od metoda višeatributnog odlučivanja, pored metode Dominacije, metode sa aditivnim težinama, Electre (I-IV), Promethee (I-IV), Vikor i drugih. Validnost primene ove metode ogleda se u postojanju većeg broja kriterijuma za izbor adekvatnog taktičkog radio-komunikacionog sistema, većeg broja proizvođača ovakve opreme, odnosno alternativa, jednostavnosti i efikasnosti primene, kao i razvijenom originalnom softveru za podršku odlučivanju.

Primena metode odvija se u četiri faze [3]:

- 1) struktuiranje problema, gde je neophodno dekomponovati problem, definisati cilj, kriterijume, potkriterijume i alternative;
- 2) prikupljanje podataka i njihovo merenje, gde donosilac odluke dodeljuje relativne ocene kriterijumima poredeći ih po parovima koristeći

najpoznatiju skalu devet tačaka predstavljenu u tabeli 1. Po završetku ovog procesa dobija se odgovarajuća matrica procene kriterijuma;

Tabela 1
Table 1

Skala devet tačaka
Scale of nine dots

Skala	Objašnjenje – Rangiranje
9	Apsolutno najznačajnije
8	Veoma snažno ka apsolutno najznačajnijem
7	Veoma snažno ka veoma značajnom
6	Snažno ka veoma snažnom
5	Snažnije više značajno
4	Slabije ka više snažnijem
3	Slabije više značajno
2	Podjednako ka slabijem više
1	Podjednako značajno
0,50	Podjednako ka slabijem manjem
0,33	Slabije manje značajno
0,25	Slabije ka snažno manjem
0,20	Snažno manje značajno
0,17	Snažno ka veoma snažno
0,14	Izuzetno snažno manje značajno
0,13	Veoma snažno ka apsolutno manjem
0,11	Apsolutno najmanje značajno

3) procena relativnih težina je faza u kojoj će se matrica poređenja po parovima „prevesti“ u probleme određivanja sopstvenih vrednosti, radi dobijanja normalizovanih i jedinstvenih sopstvenih vektora, težina za sve kriterijume;

4) određivanje rešenja problema podrazumeva nalaženje tzv. kompozitnog normalizovanog vektora. Pošto se odredi vektor redosleda aktivnosti kriterijuma, potrebno je i odrediti u okviru svakog posmatranog kriterijuma redosled važnosti alternativa u modelu. Težina posmatrane alternative dobija se tako što se učešće alternative množi sa težinom posmatranog kriterijuma i potom se vrednosti saberu za svaku alternativu posebno. Upoređenjem težina svake alternative određuje se njihov poređak u modelu.

Rešavanje problema izbora optimalnog radio sistema

Funkcija cilja definisana je izborom optimalnog radio-komunikacionog sistema. Donosilac odluke je u situaciji da bira između tri proizvođača taktičkih radio-komunikacionih sistema:

A1 – Alternativa 1 (Proizvođač broj 1),

A2 – Alternativa 2 (Proizvođač broj 2),

A3 – Alternativa 3 (Proizvođač broj 3).

Izbor će se izvršiti na osnovu 4 kriterijuma:

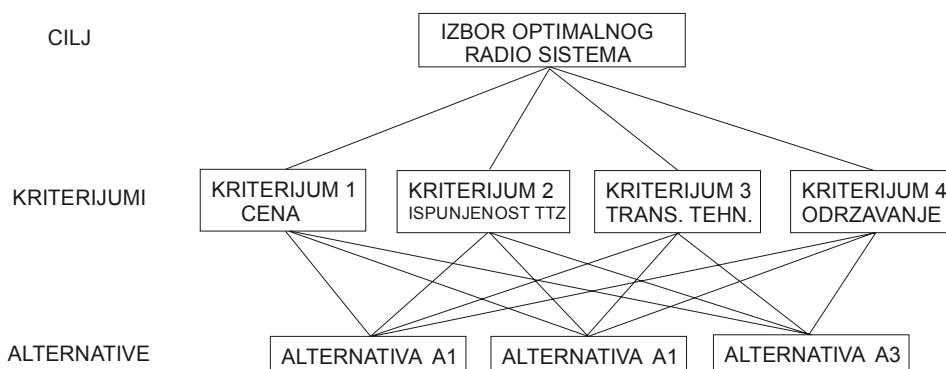
K1 – Kriterijum broj 1 (cena),

K2 – Kriterijum broj 2 (ispunjenost taktičko-tehničkih zahteva),

K3 – Kriterijum broj 3 (transfer tehnologije),

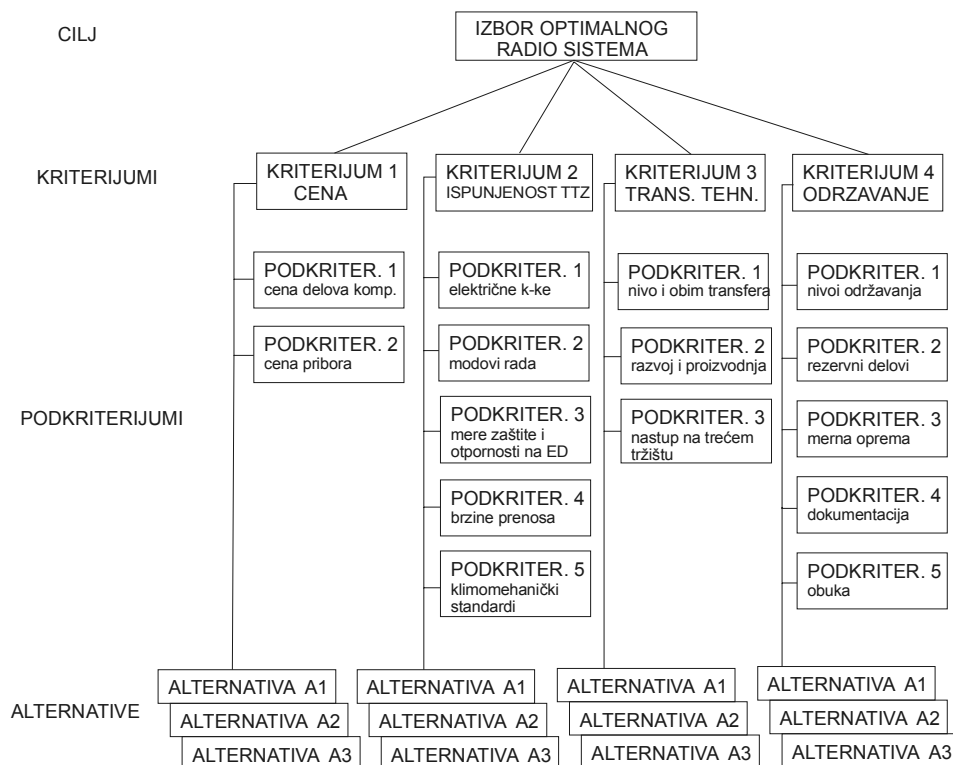
K4 – Kriterijum broj 4 (održavanje).

Ovako strukturiran problem predstavljen je na slici 1.



Slika 1 – Primer strukturiranja problema
Figure 1 – Example of problem structuring

Svaki od kriterijuma može se dodatno raščlaniti na potkriterijume. Na primer: cena kao suma cena svih delova kompleta i pomoćnog pribora, ispunjenost TTZ u svakom zahtevu (frekvencijske karakteristike, modove rada, snagu, domet, ECCM i kriptozastitu, brzine prenosa informacija, napajanje, autonomiju rada i drugo), transfer tehnologije kao nivo i obim transfera, modernizacija radio-sistema, razvoj i proizvodnja novih serija, nastup na trećem tržištu i održavanje kroz nivo održavanja, cenu rezervnih delova, mernu opremu, obuku i dokumentaciju [4]. Sa definisanim potkriterijumima stablo strukture problema izgledalo bi kao na slici 2.



Slika 2 – Stablo strukture problema sa podkriterijumima
Figure 2 – Tree of the problem structure with subcriteria

Matrica odlučivanja nakon kvantifikacije kvalitativnih kriterijuma po Saaty-jevoj skali predstavljena je tabelom 2. Matrica odlučivanja sastavljena je na osnovu pretpostavljene kvantifikacije kriterijuma različitih proizvođača (alternativa). Ova matrica se u praksi dobija ispitivanjem radio komunikacionih sistema različitih proizvođača po zadatim kriterijumima i potkriterijumima od strane stručnih lica, odnosno ustanova.

Tabela 2
Table 2

Matrica odlučivanja
Decision-making matrix

	K1	K2	K3	K4
A1	9	8	6	7
A2	7	9	8	8
A3	5	6	4	3

Odgovarajuća hijerarhijska struktura problema poređenja kriterijuma svakog sa svakim, predstavljena je tabelom 3. U nadležnosti je donosioca odluke da odredi važnost svakog kriterijuma u skupu kriterijuma. Takođe, veoma je bitno da donosilac odluke bude dosledan u proceni kriterijuma i alternativa, što se može proveriti izračunavanjem odnosa konzistentnosti (CR – Consistency Ratio) [5].

Tabela 3

Table 3

Matrica procene kriterijuma
Criteria estimation matrix

	K1	K2	K3	K4
K1	1	0,5	8	5
K2	2	1	6	4
K3	0,13	0,17	1	0,33
K4	0,20	0,25	3	1
Σ	3,33	1,92	18	10,33

Za dobijanje normalizovanih sopstvenih vektora koristi se aproksimativna procedura koja pored poređenja kriterijuma u parovima, po Saaty-jevoj tablici, obuhvata određivanje sume po kolonama, deljenje svakog elementa kolone sa sumom, sabiranje dobijenih vrednosti po redovima i određivanje srednje vrednosti reda (tabela 4).

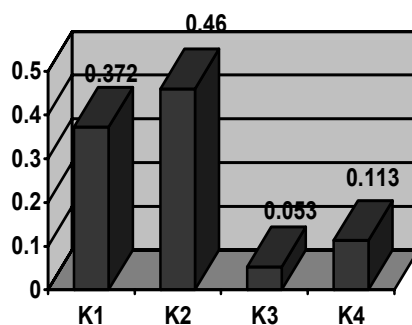
Tabela 4

Table 4

Matrica sopstvenih vektora kriterijuma
Criteria eigenvector matrix

	K1	K2	K3	K4	Σ	sr. vr.
K1	0,333	0,260	0,444	0,484	1,488	0,372
K2	0,600	0,520	0,333	0,387	1,840	0,460
K3	0,039	0,088	0,055	0,031	0,213	0,053
K4	0,060	0,130	0,166	0,096	0,452	0,113

Na osnovu aproksimativne metode upoređenja kriterijuma može se sagledati poredak kriterijuma u definisanom modelu (slika 3).

Slika 3 – Prikaz važnosti kriterijuma u modelu
Figure 3 – Criteria significance levels in a model

Po algoritmu dobijanja sopstvenog vektora kriterijuma određuju se sopstveni vektori alternativa, ali u odnosu na svaki kriterijum pojedinačno. U tabeli 5 upoređene su težine alternativa u parovima u odnosu na kriterijum 1 (cenu).

Tabela 5
Table 5

Matrica procene alternativa u odnosu na K1
Matrix for estimating alternatives in relation to the K1

	A1	A2	A3
A1	1	2	3
A2	0,5	1	2
A3	0,33	0,5	1
Σ	1,83	3,5	6

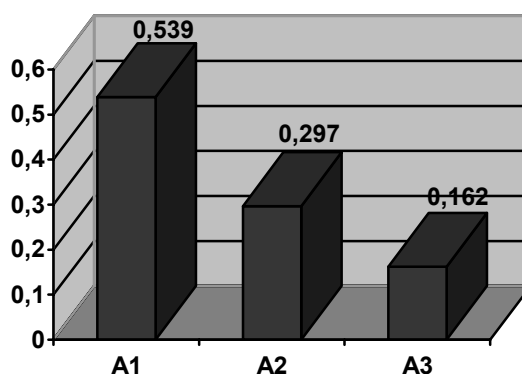
U tabeli 6 predstavljena je matrica sopstvenih vektora alternativa u odnosu na kriterijum K1 (cenu).

Tabela 6
Table 6

Matrica sopstvenih vektora alternativa za K1
Matrix of the eigenvectors of alternatives for the K1

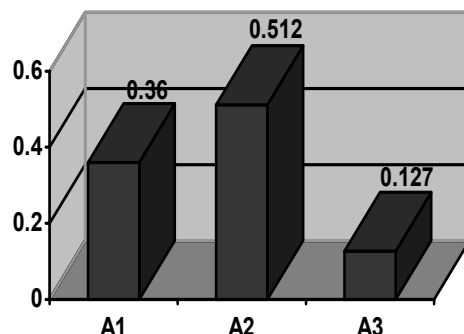
	A1	A2	A3	Σ	sr. vr.
A1	0.546	0.571	0.500	1.617	0.539
A2	0.273	0.285	0.333	0.891	0.297
A3	0.180	0.142	0.166	0.488	0.162

Poredak alternativa u odnosu na kriterijum K1 (cenu) predstavljen je na slici 4.

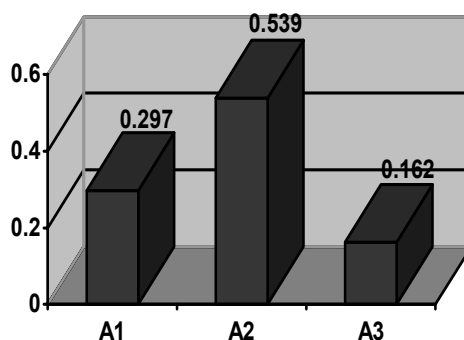


Slika 4 – Prikaz važnosti alternativa u odnosu na K1
Figure 4 – Significance of the alternatives in relation to the K1

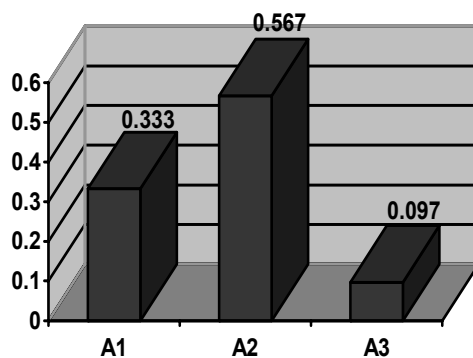
Primenom istog algoritma određene su vrednosti sopstvenih vektora alternativa u odnosu na kriterijume K2 (ispunjenost taktičko-tehničkih zahteva), K3 (transfer tehnologije) i K4 (održavanje). Poredak alternativa prikazan je na slikama 5, 6 i 7.



Slika 5 – Prikaz važnosti alternativa u odnosu na K2
Figure 5 – Significance of the alternatives in relation to the K2



Slika 6 – Prikaz važnosti alternativa u odnosu na K3
Figure 6 – Significance of the alternatives in relation to the K3



Slika 7 – Prikaz važnosti alternativa u odnosu na K4
Figure 7 – Significance of the alternatives in relation to the K4

Sveukupna sinteza problema izbora optimalnog radio komunikacionog sistema dobija se sabiranjem umnožaka sopstvenih vektora svake alternative i učešća (težine) u okviru posmatranog kriterijuma. Dve tabele u nastavku prikazuju ponovljene podatke i proračunate podatke.

Tabela 7
Table 7

Matrica sopstvenih vektora alternativa i težine
Matrix of the eigenvalues of alternatives and weight

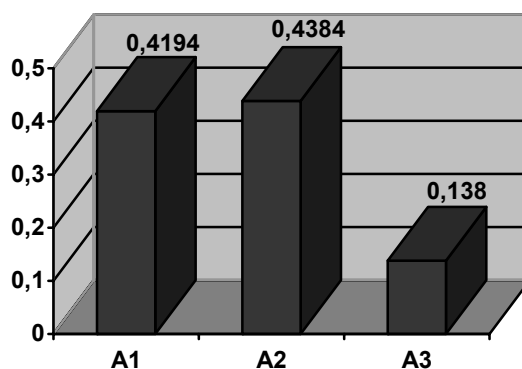
	K1	K2	K3	K4
A1	0,539	0,360	0,297	0,333
A2	0,297	0,512	0,539	0,567
A3	0,162	0,127	0,162	0,097
Težine	0,372	0,460	0,053	0,113

Tabela 8
Table 8

Konačna tabela rezultata
Final table

	K1	K2	K3	K4	Σ
A1	0,2005	0,1656	0,0157	0,0376	0,4194
A2	0,1104	0,2355	0,0285	0,0640	0,4384
A3	0,0602	0,0584	0,0085	0,0109	0,1380
Σ					≈ 1

Na slici 8 je predstavljen poredak alternativa, odnosno konačni rang.



Slika 8 – Konačni poredak alternativa po AHP metodi
Figure 8 – Final order of alternatives with the AHP method

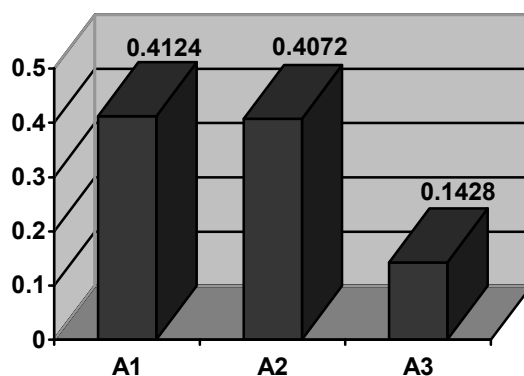
Radio-komunikacioni sistem alternative A2 (Proizvođača broj 2) predstavlja optimalan izbor za definisane kriterijume gde se pridaje važnost ispunjenju taktičko-tehničkih zahteva radio-komunikacionog sistema. Alternativa A3 (Proizvođač broj 3) ima lošiji radio komunikacioni sistem od druga dva proizvođača po svim kriterijumima ocene, što se moglo zaključiti i na osnovu matrice odlučivanja (tabela 2).

Pretpostavimo da će donosilac odluke pridati dominantnu važnost ceni u odnosu na ispunjenje taktičko-tehničkih zahteva (tabela 9). U tom slučaju, za nepromenjene ostale parametre u modelu, dolazi se do drugačijeg rešenja, odnosno optimalan izbor je radio komunikacioni sistem alternative A1 (Proizvođač broj 1) (slika 9). S obzirom na to da je razlika u vrednostima između alternative A1 i A2 veoma mala, što se vidi iz poretka alternativa za dominantnu važnost cene (slike 9), donosilac odluke može protežirati i dalje alternativu A2. Ovo je prihvatljivo jer alternative A2 ima dominaciju po svim ostalim kriterijumima. Primenjeni model namenjen je isključivo podršci odlučivanju, a na donosiocu odluke je da donese odluku o izboru optimalnog radio komunikacionog sistema.

Tabela 9
Table 9

Matrica izmenjene procene kriterijuma
Updated criteria estimation matrix

	K1	K2	K3	K4
K1	1	2	8	5
K2	0,5	1	6	4
K3	0,13	0,17	1	0,33
K4	0,20	0,25	3	1
Σ	1,83	3,42	18	10,33

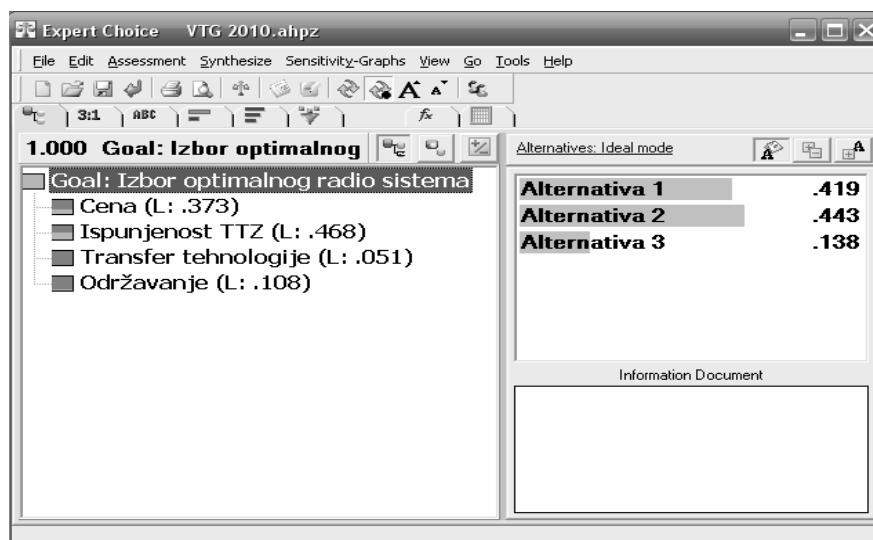


Slika 9 – Poredak alternativa za dominantnu važnost cene
Figure 9 – Order of alternatives for price as a dominant criterion

Može se zaključiti da je stručna procena kriterijuma za izbor optimalnog radio-sistema veoma značajna za poređenje različitih alternativa. Međutim, u navedenom primeru može se primetiti da donosilac odluke ima veoma značajnu ulogu upravo u dodeljivanju važnosti odnosno dominacije kriterijuma u odnosu na druge kriterijume. Drugim rečima, komparacija različitih alternativa za iste definisane kriterijume daje validne vrednosti u matrici odlučivanja, naročito ako procenu rade stručna lica. Međutim, s obzirom na to da kriterijumi najčešće nemaju isti stepen značajnosti, donosilac odluke najčešće subjektivno definiše njihovu važnost koristeći odgovarajuće težinske koeficijente (težine) ili tzv. pondere za kriterijume. Težinski koeficijenti u nekim metodama imaju odlučujući uticaj na rešenje, odnosno može se dogoditi da uvedene vrednosti za težine ne obezbeđuju „dobro rešenje“. Jedna od često korišćenih metoda za određivanje težina kriterijuma je metoda entropije, opširnije u literaturi [3] .

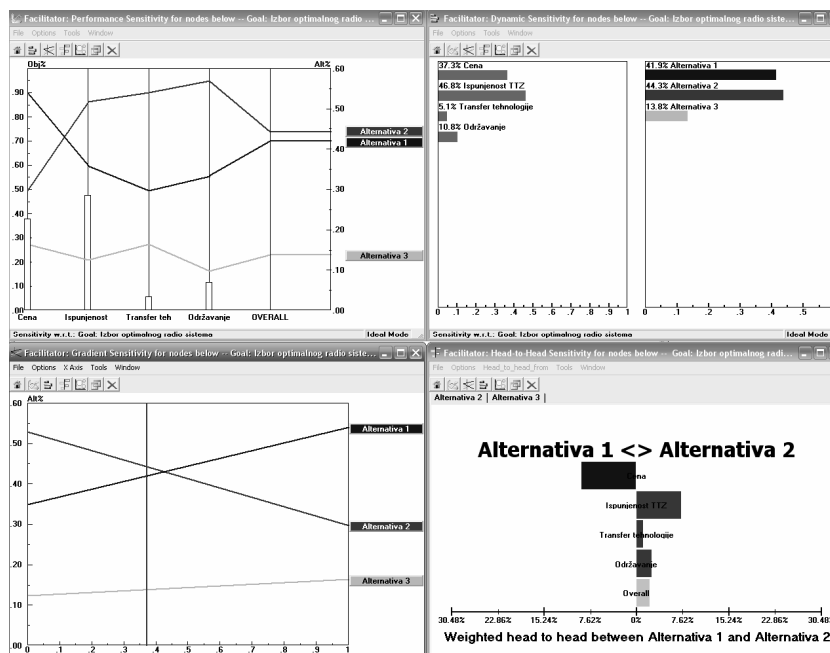
Programsko rešenje

Efikasnija primena AHP metode u konkretnim slučaju omogućena je korišćenjem razvijenog originalnog softvera Expert Choice iz klase sistema za podršku odlučivanju. Softver je dostupan u ograničenom vremenskom trajanju i veoma je jednostavan za korišćenje. Na slici 10 prikazane su vrednosti kriterijuma i alternativa nakon njihovog formiranja u programu Expert Choice 11.5 [6, 7, 8].



Slika 10 – Izgled ekrana Expert Choice 11.5
Figure 10 – Display screen of the Expert Choice 11.5

Slika 11 prikazuje konačno rešenje predstavljenog problema u različitim grafovima osetljivosti kriterijuma i alternativa.



Slika 11 – Grafovi analize osetljivosti

Figure 11 – Sensitivity analysis graphs

Na slici su (slevo u desno) prikazani grafovi performansi osetljivosti za alternative u odnosu na kriterijume, dinamičke osetljivosti sa vrednostima sopstvenih vektora kriterijuma i alternativa, gradijenta osetljivosti alternativa i graf težina alternativa A1 i A2 koje prednjače kao rešenja po zadatim kriterijumima.

Pored svoje jednostavnosti programsko rešenje je veoma praktično i efikasno pri promenama važnosti kriterijuma ili procene alternativa, odnosno analizi različitih varijanti pristupa rešavanju problema.

Zaključak

U radu je primenjena AHP metoda, kao jedna od metoda višekriterijumske optimizacije, u rešavanju problema izbora optimalnog taktičkog radio komunikacionog sistema. Pored definisanja problema, kriterijuma i alternativa radio komunikacionog sistema, opisan je postupak primene metode i kroz matematički model određen proizvođač koji za pomenute kriterijume

me predstavlja optimalno rešenje. Isti problem je rešavan i primenom programskog rešenja Expert Choice 11.5. Može se zaključiti da u konkretnom problemu posebno preferiraju dva kriterijuma, a to su cena i ispunjenost taktičko-tehničkih zahteva za radio sisteme. Ova dva kriterijuma su istovremeno međusobno suprotstavljena i iako alternativa A2 (Proizvođač broj 2) prednjači po svim kriterijumima, ako donosilac odluke odluči da cena ima dominantni značaj rešenje će biti alternativa A1 (Proizvođač broj 1). Programsko rešenje predstavlja veoma efikasno sredstvo za iznalaženje optimalnog rešenja i proveru dobijenih rezultata matematičkim putem i veoma praktično pri promenama važnosti kriterijuma ili proceni alternativa, odnosno analizi različitih varijanti pristupa rešavanju problema.

Literatura

- [1] Andrejić, M., Ljubojević, S., *Operaciona istraživanja u funkciji podrške odlučivanju*, Vojnotehnički glasnik (Military Technical Courier), vol. 57, broj 3, pp. 15-27, ISSN 0042-8469, UDC 623+355/359, Beograd 2009.
- [2] Čupić, M., Suković, M., *Višekriterijumsko odlučivanje – metode i primeri*, Univerzitet „Braća Karić“, Beograd, 1995.
- [3] Nikolić, I., Borović, S., *Višekriterijumska optimizacija – metode, primena u logistici, softver*, Centar vojnih škola VJ, Beograd, 1996.
- [4] *Taktička studija Integrirani sistem veza VS*, (izmene i dopune), UTI GŠ VS, Beograd, 2006.
- [5] Teknomo, K., *Analytic Hierarchy Process (AHP) Tutorial*, 2006. <http://people.revoledu.com/kardi/tutorial/ahp/>
- [6] www.expertchoice.com (11. 08. 2010).
- [7] Nikolić, V. N., *Kontrola tačnosti rezultata u simulacijama Monte Karlo*, Vojnotehnički glasnik (Military Technical Courier), vol. 58, broj 2, pp. 90-107, ISSN 0042-8469, UDC 623+355/359, Beograd 2010.
- [8] Nikolić, V. N., *Implementacija metode automatizovanih nezavisnih ponavljanja u simulaciji sistema masovnog opsluživanja*, Vojnotehnički glasnik (Military Technical Courier), vol. 58, broj 4, pp. 86-101, ISSN 0042-8469, UDC 623+355/359, Beograd 2010.

APPLICATION OF THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS METHOD IN THE SELECTION OF OPTIMAL TACTICAL RADIO COMMUNICATION SYSTEMS

FIELD: Telecommunications, Mathematics (Operations Research)

Summary:

This article deals with the analytic hierarchy process method in selecting an optimal tactic radio communication system. The problem has been defined, followed by the description of the AHP method procedure as well as the criteria and alternatives for radio communication systems. The problem was solved using the mathematical model and the presented software.

Introduction

A decision on the procurement and selection of optimal resources is a complex issue. This article is a contribution to solving the problems of procurement of radio communication equipment. The objective function is defined by the selection of an optimal tactical radio communication system that will provide a high-quality Communication Information System for tactical units in combat operations. Radio communication systems need to operate in the frequency range of military tactical radio communications (30-88 MHz), as defined by the international standards ITU-R. In addition, they need to meet general requirements (constraints) for providing high level resistance to electronic warfare, TRANSEC and COMSEC protection, voice and data transmission, error detection and correction, ease of handling and mobility as well as the standards of the climate mechanical group K3.

Organizational performance management systems today are based on the application of effective methods and techniques for decision-making support. The decision is made to meet the requirements - goals that were set in the discussed problem. The problem is often characterized by a greater number of criteria (objective function, the function of criteria) for decision-making, more alternatives (solutions) for the selection and a selection process for a final decision. In such cases, operational research methods are of significant importance since a multi-criteria approach is the only way to describe each specific problem as realistically as possible. One of the multi-criteria optimization methods is the method of analytical hierarchy process (AHP method), created by Thomas L. Saaty at the end of the seventies. This tool assists decision-makers in solving complex problems. The paper applied the AHP method for solving the problem of selecting an optimal tactical radio communication system.

Analytic Hierarchy Process Method

In order to solve a defined problem, the analytical hierarchy process method was applied. The validity of this method is reflected in the existence of a number of criteria for the selection of an appropriate tactical radio communication system and a larger number of manufacturers of such equipment (or alternatives) as well as in its simplicity and efficiency of implementation, together with the developed original software for decision-making support.

The method is implemented in four phases:

- 1) structuring the problem, where it is necessary to decompose the problem and define the goal, criteria and alternatives;*
- 2) collecting data and their measurement, where the decision-maker assigns relative scores in pairs of criteria using the best known scale of nine points presented in the table below. Upon completion of this process, a corresponding pair-comparison matrix is obtained.*
- 3) estimating the relative weight, where the pair-comparison matrix is "translated" into the problems of determining the eigenvalues in order to get normalized and unique eigenvectors, or the weights for all criteria;*

4) *determining the solution to the problem involves finding a so-called composite normalized vector. After the vector of sequence of activities set criteria is determined, it is necessary to determine the order of importance of alternatives in the model for each of the observed criteria. The weight of the observed alternatives is obtained by multiplying the share of alternatives to the weight of the observed criteria and then by summing up the values for each alternative separately. Comparing the weight of each alternative determines their order in the model.*

Selecting an optimal radio communication system

The AHP method algorithm has been applied for selecting an optimal radio communication system.

The decision-maker is in a position to choose between three manufacturers of tactical radio communications systems:

A1 - Alternative 1 (Manufacturer No. 1),

A2 - Alternative 2 (Manufacturer No. 2),

A3 - Alternative 3 (Manufacturer No. 3).

The selection will be performed on the basis of four criteria:

K1 - Criteria No. 1 (price)

K2 - Criteria No. 2 (the fulfillment of the tactical and technical requirements)

K3 - Criteria No. 3 (technology transfer)

K4 - Criteria No. 4 (maintenance).

Each of the criteria can be further divided into sub-criteria such as: cost as the sum of costs of all kit parts and extra accessories, the fulfillment of the TTR in each application (frequency characteristics, modes of work, power, range, ECCM and cryptography, information transfer speed, power, autonomy of work, etc.), technology transfer as a level and volume of transfers, radio system updating, development and production of new series, entering the third market and maintenance through the levels of maintenance, cost of spare parts, measuring equipment, training and documentation.

After the quantification of qualitative criteria by Saaty's scale, the decision-making matrix is created on the basis of the supposed criteria quantification of different manufacturers (alternatives). In practice, this matrix is obtained by examining radio communication systems from different manufacturers following the criteria given by experts or institutions.

The corresponding hierarchical structure of comparing each criterion with each other has been given in a table. It is the responsibility of the decision-maker to determine the importance of each criterion from a set of criteria.

Normalized eigenvectors are obtained by an approximation procedure which, in addition to comparing criteria in pairs according to Saaty's table, includes determining the sum by columns, dividing each element of the column by the sum as well as the value obtained by adding rows and determining the median line.

The eigenvectors of alternatives are determined by the algorithm for obtaining criteria eigenvectors for each criterion individually and the rank of each alternative is compared to each criterion.

The overall synthesis of the choice of an optimal radio communication system is obtained by adding the multiples of the eigenvectors of each alternative and the participation (weight) within the given criterion.

The radio communication system of alternative A2 (manufacturer No. 2) is the optimal choice for the defined criteria. Alternative A3 (Manufacturer No. 3) has a radio communication system which scored lower than the other two manufacturers by all criteria, which could have been concluded on the basis of the decision-making matrix.

If the decision-maker favours the price over the fulfillment of the tactical - the technical requirements, all other parameters being the same, the optimal selection of the radio communication system will be alternative A1 (Manufacturer 1).

It can be concluded that the expert evaluation of the criteria for selecting the optimum radio system is very important for the comparison of different alternatives. However, it can be noticed here that the decision-maker has a very important role in assigning the importance of certain criteria from a set of criteria.

Software solution

An efficient use of the AHP method in the particular case was enabled by the original software developed using the Expert Choice (Expert Choice 11.5) from the class of decision support systems. The software is available for a limited time period and is very easy to use. In addition, it is very practical and effective in the case of changes in the importance of criteria or evaluation of alternatives and in the analysis of different approaches to problem solving.

Conclusion

The AHP method was applied as one of the multi criteria optimization methods for selecting an optimal tactical radio communication system. The problem, criteria and alternatives of radio communication systems have been defined, the method application procedure described and the manufacturer selected as an optimal solution determined on the basis of selected criteria and the given mathematical model. The same problem has been solved using the software solution Expert Choice 11.5. It can be concluded that two criteria, price and the fulfillment of the TTR for radio systems, are of particular preference. These two criteria are also opposed to each other. Even though alternative A2 (Manufacturer No. 2) excels in all criteria, if the price is the dominant criterion, the solution will be alternative A1 (Manufacturer 1). This software is a very effective tool for finding the optimal solution and verifying the results mathematically. It is also very practical for changes in the criteria or evaluation of alternatives, and in the analysis of different combinations in problem solving.

Key words: Multi criteria optimization, Analytic Hierarchy Process method, tactical radio communication system

Datum prijema članka: 23. 08. 2010.

Datum dostavljanja ispravki rukopisa: 27. 09. 2010.

Datum konačnog prihvatanja članka za objavljivanje: 30. 09. 2010.

KORIŠĆENJE GEOTOPOGRAFSKIH MATERIJALA U ZAŠTITI ŽIVOTNE SREDINE

Bakrač T. Saša, Vojnogeografski institut, Beograd

OBLAST: Geonauke

UDK: 007:502.3

Sažetak:

U skladu sa zahtevima za zaštitom i unapređenjem stanja životne sredine, korišćenje podataka o prostoru predstavlja specifičnu potrebu za različitim vrstama geografsko-kartografskih informacija. Teorijsko i praktično razumevanje ovih zahteva, uz postojeća iskustva i primenu odgovarajućih standarda, pomaže u rešavanju konkretnih ekoloških problema.

Shodno tome, u ovom radu pokušaćemo da, analiziranjem i mogućim upoređenjem modela, ukažemo na značaj, potrebu i mogućnosti korišćenja postojećih geotopografskih materijala (GTM).

Ključne reči: zaštita životne sredine, analogne i digitalne karte, podaci o prostoru, GIS/EIS.

Uvod

Intenzivna industrijalizacija i ukupan privredni razvoj tokom prošlog veka doveli su do nekontrolisane potrošnje prirodnih resursa i negativnog uticaja i degradacije životne sredine. Uzroci pogoršanja nisu samo izvori u velikim industrijskim i energetske kompleksima, već i brojni difuzno raspoređeni izvori u urbanim sredinama, te linijski izvori degradacije i zagađenja životne sredine duž infrastrukturnih koridora. Zbog toga, u cvetu se pristupilo pravnom regulisanju u uvođenju standarda i sistema upravljanja zaštitom životne sredine.

Raubovanje resursa je najčešće nepovratan proces, pa je praćenje stanja vrlo važan faktor očuvanja i unapređenja životne sredine. Tako, podaci o prostoru u vidu raznovrsnih geotopografskih materijala (GTM), mogu biti od velike pomoći, pogotovu kada se radi o tzv. neobnovljivim prirodnim resursima kao što su poljoprivredno zemljište, šume, vodeni tokovi i slično [9].

Činjenica je da je sve veća potreba za korišćenjem satelitskih snimaka [8], aero-foto snimaka, planova, karata u različitim razmerama i oblicima. Na taj način planiranje, praćenje, procena i unapređenje stanja životne sredine na/o nekom prostoru, u velikoj meri biva ne samo lakše, već i efikasnije.

U tom smislu, osloncem na institucije koje se bave: prikupljanjem, obradom i predstavljanjem podataka o prostoru u našoj zemlji, postoje velike mogućnosti da se korišćenjem postojećih i stvaranjem novih geoprostornih podataka prati, planira i unapređuje stanje zaštite životne sredine.

Izvori podataka o prostoru

Da bi se uspešno upravljalo programima zaštite životne sredine na određenoj lokaciji, potrebno je raspolagati sa što više podataka o prostoru – geografskih/ekoloških podataka [10]. Da bi oni bili sakupljeni, potrebno je ispuniti dva koraka. Prvi korak jeste kreiranje jedinstvenih geografskih/ekoloških nivoa za svaku lokaciju, pri čemu je osnova konstrukcije neka od postojećih analognih ili digitalnih – baznih karta. Drugi korak jeste povezivanje podataka na nivoima, pri čemu svaki set podataka o životnoj sredini mora biti uvezan sa setom geografskih podataka.

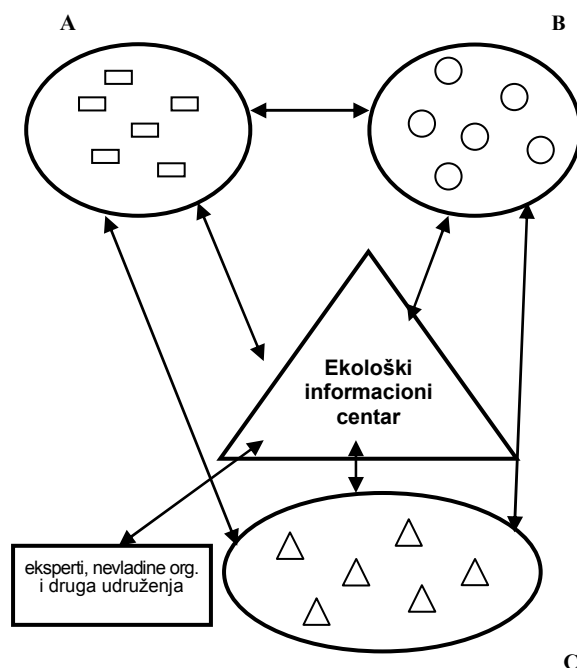
Geografski podaci o prostoru su informacije vezane za lokaciju na Zemlji, i u slučaju ekoloških potreba, najčešće se odnose na lokacije vezane za Zemljinu površ. Kartografsko-analitičke informacije o prostoru za ekološke potrebe najčešće se prikupljaju iz sledećih izvora.

Satelitski snimci – predstavljaju jedan od osnovnih izvora podataka o prostoru [6]. Pomoću njih može se dobiti detaljan izgled (opis) fizičko-geografskih karakteristika određenog prostora (slika 1). Posebna prednost korišćenja ovakvog načina prikupljanja podataka za potrebe životne sredine jeste u tome što se omogućava kontinuirano praćenje stanja promena koje se dešavaju u životnoj sredini, odnosno na posmatranom prostoru.



Slika 1 – Satelitski snimak
Figure 1 – Satellite photo

Geografski informacijski sistemi/Ekološki informacijski sistemi (GIS/EIS) – kao kompjuterski podržani sistemi koji procesuiraju geografske (ekološke) informacije u formi podataka kojima se može upravljati [3]. Za potrebe životne sredine bitno je što se takav podatak/podaci – informacije o prostoru mogu analizirati, prikazati i iskoristiti kao izvor novih informacija za matematičko-kartografsko modelovanje ili druge analize prostora i životne sredine [5] (slika 2).



Slika 2 – Hipotetički primer šeme ekološkog informacionog sistema.
Figure 2 – Hypothetical EIS schema [3]

(Grupu A, predstavljaju stručno specijalizovane institucije (instituti, zavodi, laboratorije) sa svojim informacionim sistemima i podacima; grupu B, predstavljaju državni organi (MUP, zdravstvo, sudstvo,...) sa svojim informacionim sistemima i podacima, i grupu C, predstavljaju inspeksijski organi sa svojim informacionim sistemima i podacima.)

Postojeći geotopografski materijali – proizvodi u analognom i digitalnom obliku – mogu da budu: karte različitih razmera i namena, topografski planovi, aero-foto snimci (slika 3) i drugi materijali. Ovi proizvodi mogu poslužiti kao kartografska podloga za izradu tematskih karata životne sredine, pogotovu za sakupljanje informacija o prostoru iz prethodnog perioda – praćenje istorijata pojave. Takođe, mogu poslužiti za kreiranje trendova i praćenje pojava u budućnosti.



Slika 3 – Aerofoto snimak
Figure 3 – Aerial photo

Fizička merenja – s obzirom na raznovrsnost potreba (ekološke, geodetske – slika 4, geografske, kartografske) na ovaj način dobijaju se podaci o prostoru putem neposrednih – direktnih fizičkih merenja. Ovaj izvor podataka najčešće se koristi za potrebe zaštite životne sredine.



Slika 4 – Prikupljanje prostornih podataka (geodetska merenja)
Figure 4 – Spatial data acquisition (survey)

Vrste karata koje se mogu koristiti za potrebe zaštite životne sredine

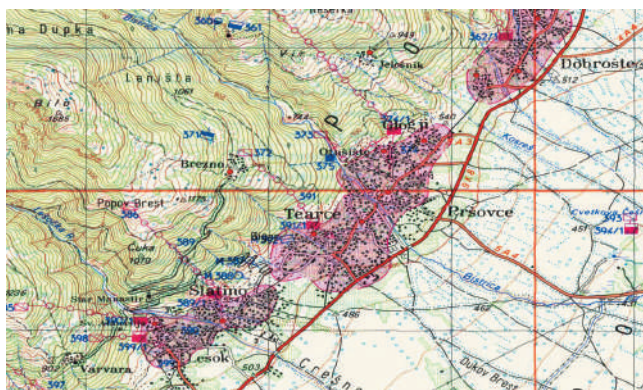
Po definiciji, kartom se može smatrati slika ili vizuelna prezentacija prostora kojom se prikazuju elementi prostora i simbolizuju njegove karakteristike [7]. Korišćenjem karata u analognom i digitalnom obliku, omogućuje se brzo i jednostavno razumevanje prostora ili konkretne lokacije – vrši se tzv. analiza prostora [4]. To je iz razloga što se vizuelna informacija prihvata i prima brže nego neka druga informacija.

Važno je naglasiti da nijedna karta ne može da pokaže sve informacije o datom prostoru, ali određena tematika – sadržaj u određenom vremenu, predstavlja važnu informaciju o konkretnoj pojavi. Tako, kada se posmatra karta, može se vrlo brzo identifikovati predmet našeg interesovanja, odnosno može se vrlo brzo dobiti uvid o uslovima određenog prostora u određenom vremenu, što je sa aspekta zaštite životne sredine vrlo korisno.

Upoređujući informacije sa dve ili više karata u određenim vremenima njihovog nastanka, korisnik može videti kada i kako se odslikavaju određene pojave u prostoru i vremenu. Uglavnom karte koje se koriste za odslikavanje životne sredine imaju osobinu da sadrže visoko promenjive karakteristike.

Bazne karte

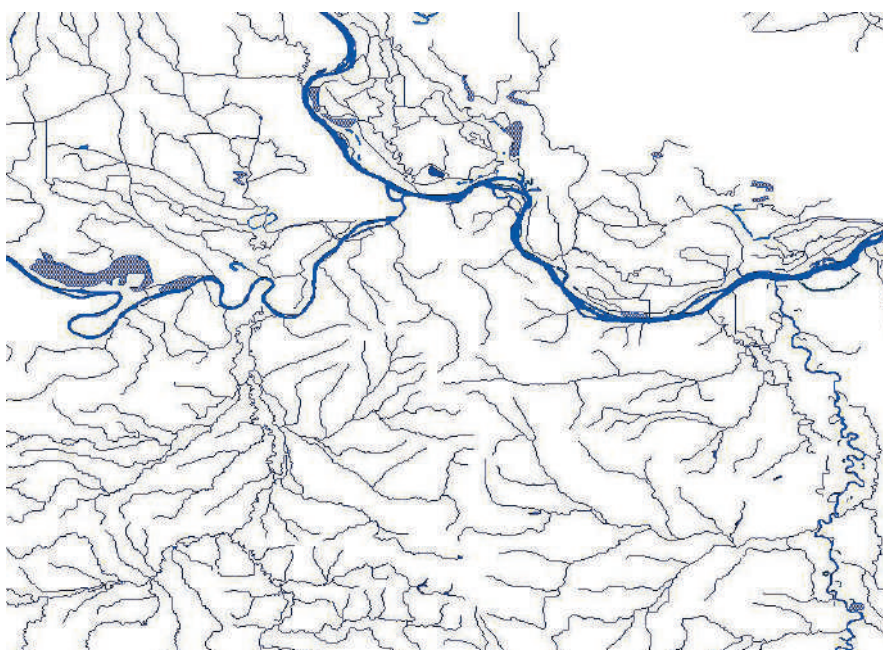
Karte koje se kod nas i u svetu koriste za potrebe vojske, a i u civilne svrhe, najčešće služe i za potrebe životne sredine kao karte sa tzv. baznom osnovom. Specifična vrsta baznih karata koje prikazuje 3D model terena, jer uglavnom koriste konturne linije – izohipse za prikaz elevacionog modela, jesu topografske karte razmera od 1:25 000 do 1:200 000 ili 1:250 000 (slika 5) [1].



Slika 5 – Topografska karta vodobjekata razmere 1: 50 000 (Izvor: Vojnogeografski institut)
Figure 5 – Topographic map of a scale of 1: 50 000 with water facilities
(Source: Military Geographic Institute)

Tematske karte

Tematskim kartama smatraju se karte specifične namene koje primarno prikazuju informacije na posebnim lokacijama i sa posebnim sadržajem [7]. One mogu da prikazuju raznovrsne kulturološke informacije kao što su: populacija, fizičke informacije, hidrografski objekti (slika 6) i slično. Tematska karta životne sredine najčešće sadrži generalizovane podatke, informacije koje pojednostavljaju pravljenje i čitanje tih karata.



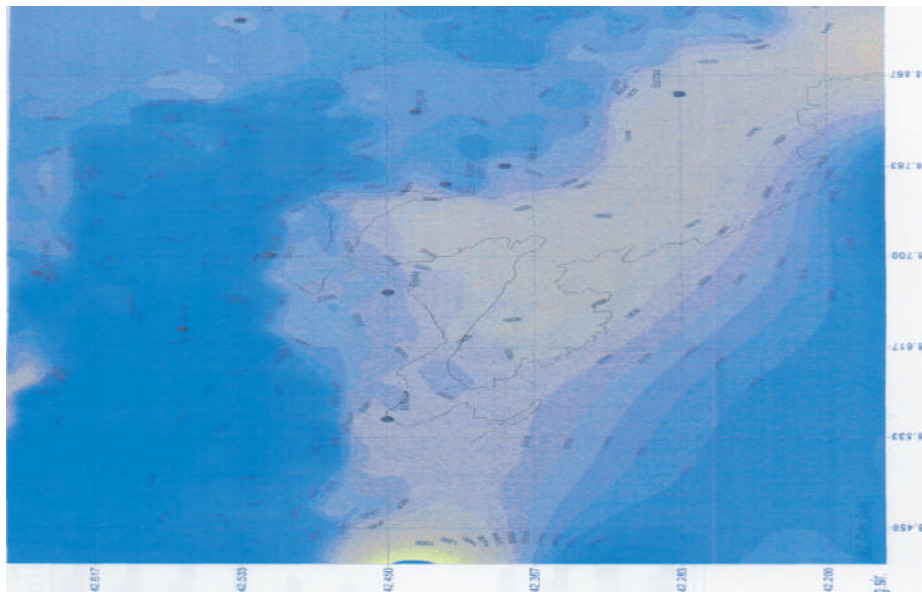
Slika 6 – Tematska karta – prikaz hidrografije (Izvor: Vojnogeografski institut)
Figure 6 – Thematic map – hydrography (Source: Military Geographic Institute)

Kombinovane karte

Mnoge specifične vrste karata su ustvari kombinacija baznih i tematskih karata, kao što su:

- političke – pokazuju kulturne karakteristike kao što su granice kontinenata, država, opština;
- fizičke karte – prikazuju prirodne karakteristike reka, jezera, obalne linije;
- putne karte – prikazuju glavne i sporedne puteve, mesta i gradove često sa kampovima, parkovima i drugim turističkim objektima i

– vremenske (sinoptičke) karte (slika 7) – prikazuju vremenske uslove kao što su: frontovi, temperatura, padavine u određeno vreme ili u toku određenog vremenskog perioda i druge.



Slika 7 – Karta izohijeta - rasporeda količine padavina
Figure 7 – Precipitation map – isoclines

Sintezne karte

Ovim kartama se prikazuju rezultati i analize grupnih podataka, s tim što i na njima nije moguće prikazati sve karakteristike ili podatke vezane za životnu sredinu, pogotovu za složenije ekosisteme i pojave u istim.

One zahtevaju skupove podataka (zbirne podatke) koji znače grupisanje (zajedničko predstavljanje) izvora podataka iz određenih oblasti i njihovo analiziranje kao skupa podataka. Sintezne karte na taj način predstavljaju dobru osnovu za efikasnije upravljanje i monitoring životnom sredinom na opštem, a pogotovu na posebnom nivou.

Zaključak

Za potrebe zaštite i unapređenja stanja životne sredine mogu se koristiti postojeći geotopografski materijali. To se pre svega odnosi na karte u analognom i digitalnom obliku.

Kartama se najčešće prikazuje lokacija (određeni prostor) u određenom vremenu, pa se može reći da karte pokazuju i predstavljaju određeno vreme. Upoređujući informacije o dve ili više tačaka u određenom vremenu, kartograf može da kreira kartu i predstavi odgovarajuću promenu.

Karte koje se mogu koristiti za odslikavanje stanja životne sredine uglavnom imaju osobinu da sadrže visoko promenljive karakteristike. Kartiranje promena na ovim kartama je značajno zato što upoređujući trenutno stanje sa prethodnim, naučnici i drugi (oni koji upravljaju zaštitom životne sredine) mogu donositi potrebne i što je najbitnije pravovremene odluke.

Koristeći se odgovarajućom simbologijom, karta pruža mogućnost korisnicima da vrlo brzo snime – shvate važne informacije koje sa sobom nose određeni prostor, i da na taj način pronađu potrebne informacije kao što su: mesta zagađenja, važne komunikacije, veličinu naseljenog mesta i sl.

Česta je pojava da se za oslonac državne kartografije uzimaju vojne kartografsko-geodetske institucije (instituti ili agencije). Oni zajedno sa civilnim strukturama, vrlo često objedinjeni na pojedinim projektima, završavaju i značajne zadatke iz oblasti kartografije, a po potrebi i za projekte zaštite i unapređenja životne sredine.

Geotopografski materijali različitih razmera i oblika koje poseduje Vojnogeografski institut (VGI), u analognom i u digitalnom obliku [2], dobra su osnova za potrebe zaštite životne sredine.

Literatura

- [1] Borisov, M. I dr., *Modelovanje procesa nad topografskim podacima*, Glasnik Srpskog geografskog društva, vol 89, br. 3, str. 207-218, Beograd, 2009.
- [2] Borisov, M, *Vojne topografske karte*, *Vojnotehnički glasnik (Military Technical Courier)*, vol. 54, br. 1, pp. 81–87, ISSN 0042-8469, UDC 623+355/359, Beograd 2006.
- [3] Čvorović, Z., *Upravljanje rizicima u životnoj sredini*, monografija, Zadužbina Andrejević, Beograd, 2005.
- [4] Gigović, Lj., Digitalni modeli visina i njihova primena u vojnoj analizi terena, *Vojnotehnički glasnik (Military Technical Courier)*, vol. 58, br. 2, pp. 165–178, ISSN 0042-8469, UDC 623+355/359, Beograd, 2010.
- [5] Kostić, M. I dr. *Digitalno modelovanje podataka – evaluacija morfometrijskih karakteristika terena*, Naučnostručna konferencija, Planska i normativna zaštita prostora i životne sredine, Palić – Subotica, 2009.
- [6] Milanović, M i dr., *Teledetekcione metode istraživanja životne sredine, udžbenik*, Geografski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2009.
- [7] Peterca, M i dr., *Kartografija, udžbenik*, Vojnogeografski institut, Beograd, 1974.
- [8] Regodić, M., Primena satelitskih snimaka za dopunu sadržaja topografskih karata, *Vojnotehnički glasnik (Military Technical Courier)*, vol. 58, br. 4, pp. 63–85, ISSN 0042-8469, UDC 623+355/359, Beograd, 2010.
- [9] http://management.kochi-tech.ac.jp/PDF/ISMD/ISMD_Goto.pdf
- [10] <http://www.ehsfreeware.com/mapns.htm>

USING GEO-TOPOGRAPHIC MATERIALS FOR ENVIRONMENTAL PROTECTION

FIELD: Earth Sciences

Summary:

In accordance with the requirements for the protection and development of environment, the usage of spatial data represents a specific need for different kinds of geographical and cartographical information.

Theoretical and practical understanding of these requirements, with existing experiences and the use of appropriate standards, help in the process of solving particular ecological problems.

In this paper, the analysis (theoretical understanding of the problem) and the comparison of models will try to point out the importance, requirements and possibilities of using existing data from different geo-topographical materials such as charts at different scales in analog as well as digital forms.

Sources of information about an area:

Cartographic-analytic collecting of spatial information for environmental purposes is carried out mainly from the following sources: satellite images, geographic information systems / Environmental Information Systems (GIS / EIS), Geo-topographic materials in analogue and digital (especially maps) forms and physical measurements of ambient environment.

Types of maps which can be used for environmental protection:

Base maps are widely used mostly for military purposes. Being highly detailed, these maps can be largely used for the purposes of environmental protection, especially topographic maps of a scale of 1:25 000 to 1:200 000 and 1:250 000.

Thematic maps primarily give information on specific locations and specific content. For the purposes of environmental protection and improvement, thematic maps with specific topics are constructed most frequently.

Combined maps are specific and they are a combination of base and thematic maps. These are, for example, political, travel, touristic, hydrological, and synoptic maps.

Synthetic maps show the results and analysis of data collected. They cannot display all the characteristics or information related to the environment, especially data about complex ecosystems.

Conclusion: For the purposes of environmental protection and improvement, the existing geo-topographic materials can be used, especially maps in the analogue and digital form. Based on the content and topics depicted, there are many different types of maps. All maps, especially those with the specific content important for environment, have highly variable characteristics. The geo-topographic materials of different scales and shapes, both in analogue and digital forms, in the Military Geographic Institute (MGI) are a good basis for environmental protection and improvement purposes.

Keywords: environmental protection, analogue and digital charts, spatial data, GIS/EIS.

Datum prijema članka: 11. 08. 2009.

Datum dostavljanja ispravki rukopisa: 10. 06. 2010.

Datum konačnog prihvatanja članka za objavljivanje: 15. 06. 2010.

SAVREMENO NAORUŽANJE I VOJNA OPREMA MODERN WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT

Kraj tehnološke ere spejs šatla¹

Nakon 30 godina okončana je era spejs šatla, sistema za svemirski transport (*Space Transport System – STS*). Na poslednju misiju, STS-135, lansiran je šatl Atlantis iz NASA svemirskog centra Kenedi na Floridi, 8. jula 2011. godine u 11 časova i 29 minuta po lokalnom vremenu. Cilj dvanaestodnevne misije je snabdevanje Međunarodne svemirske stanice Alfa životnim namirnicama, logističkim elementima i rezervnim delovima, kao i dopremanje Mini istraživačkog modula 1 (*Mini Research Module – MRM 1*).



Poslednje lansiranje spejs šatla, misija STS-135, orbiter Atlantis

Nakon povratka Atlantisa i okončanja Programa Šatl, SAD po prvi put nakon pedeset godina neće imati letelicu kojom bi mogle poslati čoveka u svemir. Uбудuće, to će se obavljati ruskim raketnim programom Sojuz, u kojem cena iznajmljivanja jednog mesta u posadi iznosi oko 50

¹ http://www.nasa.gov/externalflash/the_shuttle/, 05. 07. 2011.

miliona dolara, dok troškovi lansiranja jednog šatla iznose oko 450 miliona dolara, a prema procenama nekih nezavisnih stručnjaka troškovi idu i do milijardu i po dolara. Od početka razvoja Programa Šatl, kada je 1969. godine započeto ulaganje u razvoj, izgradnju i održavanje flote svemirskih letelica za višekratnu upotrebu, utrošeno je oko 210 milijardi dolara, dok se ruski koncept Sojuz, kojim se ljudi šalju u svemir kapsulom za jednokratnu upotrebu, mada tehnološki inferiorniji, ipak pokazao mnogo podnesnijim od američkog programa, i u toj, moglo bi se reći tehnološko-finansijskoj trci, pobedio je ruski Sojuz.

Nakon američkog Programa Apolo, kojim je razvijena tehnologija slanja čoveka u svemir jednokratnom kapsulom, usledio je Program Šatl i tehnološki napredak u vidu orbitera za višekratnu upotrebu. Ta, do sada, najkompleksnija mašina, koja je namenjena za transport ljudi i tereta u svemir i iz svemira, projektovana da poleće kao raketa, a sleće poput jedrilice, činila je flotu od 5 orbitera (u kolokvijalnoj upotrebi je termin šatl, eng. *shuttle*): Kolumbija, Čelindžer, Diskaveri, Atlantis i Endeavor. Nakon uspešnog prvog dvodnevno let, koji je obavio orbiter Kolumbija od 12. do 14. aprila 1981. godine, nacionalni elan je rastao i iz godine u godinu se uvećavao broj uspešno obavljenih letova. Rekordne 1985. godine flotu je činilo četiri orbitera, a samo te godine obavljeno je ukupno 9 letova, i nikad više nakon toga nije bilo toliko letova u jednoj godini. Nacionalni zanos uznosio se čak dotle da se smatralo da će se u doglednoj budućnosti realizovati dinamika od jednog leta nedeljno, pa čak i komercijalizacija u svrhu svemirskog turizma.

Međutim, 28. januara 1986, drugi let te godine okončao se tragično (prvi je uspešno obavljen od 12. do 18. januara). U 73. sekundi nakon lansiranja eksplodirao je spoljni rezervoar, a sa njim i orbiter Čelindžer, usmrтивši sedmočlanu posadu naočigled celokupne svetske javnosti, koja je lansiranje posmatrala u direktnom prenosu. To je bio civilizacijski šok koji je svemirske ambicije SAD sveo u realnije okvire, a američku naciju počeo da navikava na ljudske žrtve u programima osvajanja svemira. Letovi šatla su obustavljeni radi obavljanja dodatnih analiza, uvođenja novih tehničkih rešenja i procedura, a lansiranjem Diskaverija obnovljeni su 29. septembra 1988. godine. Zbog tragično izgubljenog Čelindžera pristupilo se izgradnji orbitera Endeavor, koji je prvi let obavio od 7. do 16. maja 1992. godine.

Program je uspešno tekao sve do 2003. godine i nove tragedije, koja se desila prilikom povratka Kolumbije na Zemlju 1. februara. Zbog oštećenja toplotnog štita prilikom lansiranja 16. januara, orbiter se 16 minuta pre planiranog sletanja na pistu u Svemirskom centru Kenedi raspao u atmosferi, usmrтивši sedam članova posade. Ta tragedija je zapečatila sudbinu Programa Šatl, koji zbog velikog smanjenja budžeta NASE odlazi u muzej, iako bi se, po svojoj tehnologiji i resursima, još nekoliko godina mogao uspešno eksploatisati.



*Atlantis će na nosaču spejs šatla (modifikovani Boeing 747-100)
biti prebačen u muzej*

Nasleđe koje je Program Šatl ostavio ljudskoj civilizaciji kreće se od briljantnih uzleta u vidu postavljanja Svemirskog teleskopa Habi i izgradnje Međunarodne svemirske stanice Alfa, do bizarnih zastranjivanja u vidu izgradnje mini-šatla X-37B, bez ljudske posade, isključivo za vojne potrebe SAD. Još nije poznato kakva je bila misija tog mini-šatla tokom njegovog devetomesečnog boravka u orbiti Zemlje 2010. godine.

Veliko je pitanje u kojoj meri će biti razvijani budući programi za slanje ljudi u osvajanje novih prostranstava u svemiru, jer, kako piše *Frankfurter allgemeine Zeitung*, „zašto rizikovati ljudske živote kada su za istraživanja dalekog kosmosa mnogo praktičniji roboti i računari za kojima, uostalom, na Zemlji nema ko da žali ukoliko nestanu“.

Tokom svakog januara u SAD se odaje počast izginulim članovima posade Apola 1 (27. januar 1967), Čelindžera (misija STS-51L, 28. januar 1981) i Kolumbije (misija STS-107, od 16. januara do 1. februara 2003). Takođe, od 2003. godine u januaru nisu obavljana lansiranja spejs šatla.

Orbiter	Broj letova	Prvi let	Poslednji let	Ukupni broj članova posade	Preleteo km (u milion.)	Napomena
Columbia	28	STS-1, 12.-14.04.1981.	STS-107, 16.01– 01.02.2003.	159	197,5	Raspao se pri povratku
Challenger	10	STS-6, 04.-09.04.1983.	STS-51L, 28.01.1986.	60	44,3	Eksplodirao pri poletanju
Discovery	39	STS-41D, 30.08.-05.09.1984.	STS-133, 24.02.- 07.03.2011.	228	220,1	
Atlantis	33	STS-51J, 03.-07.10.1985.	STS-135, 08.- 21.07.2011.	195	179,6	
Endeavour	25	STS-49, 07.-16.05.1992.	STS-134, 29.04– 13.05.2011.	151	186,4	
UKUPNO	135	12.04.1981.	08.07.2011.	793	827,9	

Američko vazduhoplovstvo forsira autonomne sisteme²

U cilju smanjenja budžetskih troškova Vazduhoplovstvo SAD (USAF) svojom Naučno-tehnološkom strategijom usmerava svoj dalji razvoj u pravcu intenzivnog uvođenja autonomnih sistema u delatnosti koje su do sada dominantno bile vezane za ljudsku aktivnost.

Sredstvo najvećeg stepena autonomnosti koje danas koristi *USAF* su bespilotne letelice i namera je da se širom upotrebom autonomnih sistema poveća efikasnost njihove upotrebe. Bespilotne letelice i prateći senzori dostavljaju ogromnu količinu informacija zemaljskim operatorima i analitičarima, koji treba da ih analiziraju i odluče koji su od tih podataka najznačajniji. Vazduhoplovstvo SAD želi da agresivnim sprovođenjem autonomnosti poveća raspoloživost operativno relevantnih obaveštajnih podataka svojim snagama uz istovremeno smanjenje personalnih troškova.

„Jedna stvar koju smo čuli od naših visokih komandanata, i generala Švarca lično, je 'Ne treba mi više podataka, treba mi više znanja'“, kaže Stiven Voker, visoko pozicionirani pripadnik *USAF* zadužen za nauku, tehnologiju i inženjering. „Naš cilj je da sve te podatke redukujemo na ključne informacije koje su potrebne borcima“.

Početkom 2010. godine Kancelarija savetnika *USAF* za nauku publikovala je izveštaj pod nazivom „Tehnološki horizonti“, koji sav odjekuje od poziva na povećanje upotrebe autonomnih sistema. Neke oblasti koje su spomenute u tom izveštaju, koje treba da se unaprede autonomnim sistemima, su: planiranje misija, modeliranje ljudskog ponašanja, kontrola sadejstva i saradnje (npr., unutar roja malih bespilotnih letelica) i interfejsi čovek-mašina.

² Jane's Defense Weekly, Volume 48, Issue 8, 23 February 2011.

Saudijska Arabija se naoružava nemačkim tenkovima Leopard 2A7+³

Prema izveštaju magazina *Špigl* i komentara *Dojče vele*, Saudijska Arabija želi da se naoruža sa više od 200 nemačkih tenkova Leopard 2A7+, od kojih je, navodno, već 44 primeraka kupljeno.

Vest je izazvala mnoštvo reakcija i negodovanja, naročito opozicije. Predsednica zelenih Klaudija Rot protestuje uz objašnjenje: „Saudijska Arabija je pomogla Bahreinu da uguši demokratski pokret i to pomoću tenkova. Saudijska Arabija naveliko učestvuje u međunarodnom terorizmu i potpomaže strukture Talibana. Za mene je ovo katastrofalan pad kredibiliteta nemačke politike.“ Takođe, i socijaldemokrate negoduju: „Ta zemlja je usred bureta baruta i nije potrebno da joj se još isporuče i šibice“, kako kaže generalna sekretarka SPD Andrea Nales. „Saudijska Arabija je jedan od najgorih kršitelja ljudskih prava u regionu“, tvrdi Klaus Ernst, šef Levičarske stranke, smatrajući da je princip funkcionisanja nemačke vlade u toj trgovini: „najopasnije oružje – za one koji najgore tlače ljude“. Na insistiranje novinara da se ministar Vestervele izjasni o tom poslu, on je rekao da Nemačka „mora da traži partnere u arapskom svetu, jer je to u našem spoljnopolitičkom interesu, pa i partnere koji različito od nas gledaju na pitanja prava ili civilnog društva“. Opozicija je najavila pokretanje diskusiju u Bundestagu po tom pitanju.



Tenk Leopard 2, proizvod nemačke firme *KMV (Kraus Mafaj Vegman)*, ušao je u serijsku proizvodnju 1979. godine i do sada ih je proizvedeno oko 3.000. Predstavlja jedan od najuspešnijih proizvoda nemačke

³ <http://www.dw-world.de/dw/article/0,,15211071,00.html>, 05. 07. 2011.

vojne industrije. Njegova osnovna karakteristika je velika prilagodljivost konstrukcije zahtevima različitih kupaca i varijabilna oprema koju poseduje. Zamišljen je kao okosnica oklopnih snaga. Posadu čine četiri člana: komandir, nišandžija/strelac, punilac i vozač. Glavno oružje tenka je top kalibra 120 mm sa magacinom od 42 granate, a sekundarno mitraljez MG3 sa magacinom od 4.750 metaka. Oklop je načinjen od treće generacije kompozitnih materijala. Tenk pokreće dizel motor od 1.500 KS i može da razvije brzinu od 70 km/h, a sa jednim punjenjem rezervoara može da pređe oko 470 km.

Rusija uspešno testirala raketu „bulava“ dometa od 8.000 kilometara⁴

Ruska mornarica je krajem juna uspešno testirala naprednu balističku raketu „bulava“, koja ima domet od 8.000 kilometara, iz nuklearne podmornice nove generacije. Projektil „bulava“ lansiran je iz podmornice „Jurij Dolgoruki“ u Belom moru, koje razdvaja Rusiju i Skandinaviju. Nakon lansiranja bojna glava rakete dosegla je oblast na severnoj Kamčatki koju Rusija koristi za testiranje balističkih raketa, udaljenu 5.500 kilometara.

„Bulava“ je hipersonična interkontinentalna raketa sa bojnim glavama koje mogu da probiju svaku potencijalnu raketnu odbranu i imaju domet od 8.000 kilometara. Ona može da nosi od šest do deset nuklearnih bojnih glava. To je prvi uspešni test „bulave“ i predstavlja jedan od najskupljih vojnih projekata Moskve u postsovjetskom periodu. Pretpostavlja se da bi ta napredna raketa mogla da uđe u upotrebu sledeće godine, posle još četiri uspešna testa. Ruska vojska je navela da u ovoj godini planira još pet test-lansiranja „bulave“.

Srpske bespilotne letelice

Na sajmu naoružanja „Partner 2011“, održanom u Beogradu od 28. juna do 1. jula 2011. godine, predstavljen je novi model bespilotne letelice „pegaz 011“. Letelicu je razvio Vojnotehnički institut. „Pegaz 011“ je namenjen za misije dnevnog i noćnog izviđanja i osmatranja s dužinom leta od 12 časova. Sa gotovo stopostotnom sigurnošću prenosi informacije u komandni centar. Brza, precizna i elegantna, uglavnom nevidljiva letelica predstavlja veliki oslonac vojnih mirovnih i ratnih akcija.

⁴ Beta, 28. 06. 2011.



Letelica „pegaz 011“ opremljena je dnevnom i noćnom kamerom, laserskim daljinometrom ili radarom i u realnom vremenu posredstvom zaštićenog komunikacionog linka prenosi sliku sa terena. Sleće i poleće automatski na uređene ili poluuređene staze, a opremljena je i padobranom za prinudno spuštanje.

„Pegaz 011“ planiran je kao veliki oslonac Vojske Srbije, ali, osim čisto vojne primene, on može dati veliki doprinos policijskim akcijama potrage i potere, kao i u kontroli državne granice.

Ranije je razvijena i predstavljena bespilotna letelice kratkog doleta „vrabac“,



„Vrabac“ je bio prvi domaći sistem mini bespilotne letelice, na kojem je više od dve godine radilo deset stručnjaka Vojnotehničkog instituta (VTI) u saradnji sa Vazduhoplovnim zavodom „Moma Stanojlović“. Osim u vojne svrhe, letelica koja podseća na aviomodel može da se koristi i za izviđanje terena prilikom poplava i požara, nadgledanje dalekovoda i kontrolu saobraćaja.

Mini bespilotne letelice su sredstvo koje koriste moderne armije za trenutno informisanje o stanju na terenu, odnosno o poziciji prijateljskih ili neprijateljskih snaga. Letelica snima odozgo, prikupljajući podatke, i za-

tim ih preko daunlinka prebacuje ka stanici na zemlji. Što je manja, to ju je teže uočiti i oboriti.

Istorijat korišćenja bespilotnih letelica u Vojsci Srbije počeo je pre nekoliko godina, kada je srpska vojska uvela u upotrebu devet izraelskih „orbitera“, koji omogućavaju prenos informacija u realnom vremenu.

Poređenja radi, i „orbiter“ i „vrabac“ mogu da ostanu u vazduhu više od sat i po. Operativna visina leta izraelske letelice je između 170 i 700 metara, a srpskog „vrapca“ od 300 do 500 metara. „Orbiter“ funkcioniše na daljinama do 15 kilometara, a operativni radijus „vrapca“ je 12 kilometara.

Projektovanjem ovih bespilotnih letelica naša zemlja je nastavila da održava svoje razvojne kapacitete.

Priredili
Milan Babić i Nebojša Gaćeša

POZIV I UPUTSTVO AUTORIMA O NAČINU PRIPREME ČLANKA

Uputstvo autorima o načinu pripreme članka za objavljivanje u *Vojnotehničkom glasniku* urađeno je na osnovu Akta o uređivanju naučnih časopisa, Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije, evidencioni broj 110-00-17/2009-01, od 09. 07. 2009. godine. Primena ovog Akta prvenstveno služi unapređenju kvaliteta domaćih časopisa i njihovog potpunijeg uključivanja u međunarodni sistem razmene naučnih informacija. Zasnovano je na međunarodnim standardima ISO 4, ISO 8, ISO 18, ISO 215, ISO 214, ISO 18, ISO 690, ISO 690-2, ISO 999 i ISO 5122, odnosno odgovarajućim domaćim standardima.

VOJNOTEHNIČKI GLASNIK (www.vtg.mod.gov.rs, ISSN 0042-8469 – štampano izdanje, ISSN 2217-4753 – online, UDC 623+355/359) jeste multidisciplinarni naučni časopis Ministarstva odbrane Republike Srbije, koji objavljuje naučne i stručne članke, kao i tehničke informacije o savremenim sistemima naoružanja i savremenim vojnim tehnologijama. Časopis prati jedinstvenu intervi-dovsku tehničku podršku Vojske na principu logističke systemske podrške, oblasti osnovnih, primenjenih i razvojnih istraživanja, kao i proizvodnju i upotrebu sredstava naoružanja i vojne opreme, i ostala teorijska i praktična dostignuća koja doprinose usavršavanju pripadnika Ministarstva odbrane i Vojske Srbije.

Ministarstvo prosvete i nauke Republike Srbije, saglasno odluci iz člana 27. stav 1. tačka 4), a po pribavljenom mišljenju iz člana 25. stav 1. tačka 5) Zakona o naučnoistraživačkoj delatnosti („Službeni glasnik RS”, br. 110/05, 50/06-ispr. i 18/10), utvrdilo je kategorizaciju Vojnotehničkog glasnika, za 2011. godinu:

za oblast **osnovna istraživanja**:

– na listi časopisa za matematiku, računarske nauke i mehaniku: kategorija naučni časopis nacionalnog značaja (M₅₂),

– na listi časopisa za geonauke i astronomiju: kategorija naučni časopis nacionalnog značaja (M₅₂),

za oblast **tehnološki razvoj**:

– na listi časopisa za elektroniku i telekomunikacije: kategorija naučni časopis nacionalnog značaja (M₅₂),

– na listi časopisa za mašinstvo: kategorija naučni časopis nacionalnog značaja (M₅₂),

– na listi časopisa za materijale i hemijske tehnologije: kategorija naučni časopis nacionalnog značaja (M₅₂),

– na listi časopisa za industrijski softver i informatiku: kategorija naučni časopis (M₅₃).

Usvojene liste domaćih časopisa za 2011. godinu mogu se videti na adresi: http://www.nauka.gov.rs/cir/index.php?option=com_content&view=article&id=1336%3Ausvojene-liste-domacih-naucnih-casopisa-za-2011-godinu&catid=23%3Anajnovije-vesti&Itemid=109

Podaci o kategorizaciji mogu se pratiti i na sajtu KOBSON-a (Konzorcijum biblioteka Srbije za objedinjenu nabavku):

<http://nainfo.nb.rs/kobson.82.html> ili <http://nainfo.nb.rs/kategorizacija>.

Pristup ovoj stranici dopušten je samo ovlašćenim korisnicima Akademske mreže Srbije (AMRES).

Kategorizacija časopisa izvršena je prema Pravilniku o postupku i načinu vrednovanja i kvantitativnom iskazivanju naučnoistraživačkih rezultata istraživača, koji je propisao Nacionalni savet za naučni i tehnološki razvoj (Službeni glasnik RS, broj 38/2008). Detaljnije informacije mogu se pronaći na sajtu Ministarstva za nauku: http://www.nauka.gov.rs/cir/index.php?option=com_content&task=view&id=621&Itemid=37.

U skladu sa ovim pravilnikom i tabelom o vrsti i kvantifikaciji individualnih naučnoistraživačkih rezultata (u sastavu Pravilnika), objavljeni rad u *Vojnotehničkom glasniku* vrednuje se sa 1,5 bod (kategorija M₅₂) i 1 bod (kategorija M₅₃).

Časopis se prati u kontekstu Srpskog citatnog indeksa – SCindeks (baza podataka domaćih naučnih časopisa – detalji dostupni na sajtu <http://scindeks.nb.rs>) i podvrgnut je stalnom vrednovanju (monitoringu) u zavisnosti od uticajnosti (impakta) u samoj bazi i, dopunski, u međunarodnim (Thompson-ISI) citatnim indeksima.

Članci se dostavljaju Redakciji elektronskom poštom na adresu vojnotehnicki.glasnik@mod.gov.rs, na srpskom, engleskom, ruskom, nemačkom ili francuskom jeziku (arial, srpska latinica, veličina slova 11 pt, prored exactly).

Članak treba da sadrži sažetak sa ključnim rečima, uvod, razradu, zaključak, literaturu i rezime sa ključnim rečima na engleskom jeziku (bez numeracije naslova i podnaslova). Obim članka treba da bude do jednog autorskog tabaka (16 stranica formata A4 sa proredom exactly).

Obrazac za pisanje članka u elektronskoj formi može se preuzeti na adresi <http://www.vtg.mod.gov.rs>, sa stranice OBRAZAC ZA PISANJE ČLANAKA.

Naslov

Naslov treba da odražava temu članka. U interesu je časopisa i autora da se koriste reči prikladne za indeksiranje i pretraživanje. Ako takvih reči nema u naslovu, poželjno je da se pridoda i podnaslov. Naslov treba da bude preveden i na engleski jezik. Ovi naslovi ispisuju se ispred sažetka na odgovarajućem jeziku.

Tekući naslov

Tekući naslov se ispisuje u zaglavlju svake stranice članka radi lakše identifikacije, posebno kopija članaka u elektronskom obliku. Sadrži prezime i inicijal imena autora (ako autora ima više, preostali se označavaju sa „et al.“ ili „i dr.“), naslove rada i časopisa i kolaciju (godina, volumen, sveska, početna i završna stranica). Naslovi časopisa i članka mogu se dati u skraćenom obliku.

Ime autora

Navodi se puno prezime i ime (svih) autora. Veoma je poželjno da se navedu i srednja slova autora. Prezimena i imena domaćih autora uvek se ispisuju u originalnom obliku (sa srpskim dijakritičkim znakovima), nezavisno od jezika na kojem je napisan rad.

Naziv ustanove autora (afilijacija)

Navodi se pun (zvanični) naziv i sedište ustanove u kojoj je autor zaposlen, a eventualno i naziv ustanove u kojoj je autor obavio istraživanje. U složenim organizacijama navodi se ukupna hijerarhija (na primer, Vojna akademija, Katedra vojnih elektronskih sistema, Beograd). Bar jedna organizacija u hijerarhiji mora biti pravno lice. Ako autora ima više, a neki potiču iz iste ustanove, mora se, posebnim oznakama ili na drugi način, naznačiti iz koje od navedenih ustanova potiče svaki od navedenih autora. Afilijacija se ispisuje neposredno nakon imena autora. Funkcija i zvanje autora se ne navode.

Kontakt podaci

Adresa ili e-adresa autora daje se u napomeni pri dnu prve stranice članka. Ako autora ima više, daje se samo adresa jednog, obično prvog autora.

Kategorija (tip) članka

Kategorizacija članaka obaveza je uredništva i od posebne je važnosti. Kategoriju članka mogu predlagati recenzenti i članovi uredništva, odnosno urednici rubrika, ali odgovornost za kategorizaciju snosi isključivo glavni urednik.

Članci u časopisima se razvrstavaju u sledeće kategorije:

Naučni članci:

1. originalan naučni rad (rad u kojem se iznose prethodno neobjavljivani rezultati sopstvenih istraživanja naučnim metodom);
2. pregledni rad (rad koji sadrži originalan, detaljan i kritički prikaz istraživačkog problema ili područja u kojem je autor ostvario određeni doprinos, vidljiv na osnovu autocitata);
3. kratko ili prethodno saopštenje (originalni naučni rad punog formata, ali manjeg obima ili preliminarog karaktera);
4. naučna kritika, odnosno polemika (rasprava na određenu naučnu temu, zasnovana isključivo na naučnoj argumentaciji) i osvrti.

Izuzetno, u nekim oblastima, naučni rad u časopisu može imati oblik monografske studije, kao i kritičkog izdanja naučne građe (istorijsko-arhivske, leksikografske, bibliografske, pregleda podataka i sl.) – dotad nepoznate ili nedovoljno pristupačne za naučna istraživanja.

Radovi klasifikovani kao naučni moraju imati bar dve pozitivne recenzije.

Spisak recenzenata Vojnotehničkog glasnika može se videti na adresi <http://www.vtg.mod.gov.rs>, na stranici SPISAK RECENZENATA.

Ako se u časopisu objavljuju i prilozi vannaučnog karaktera, naučni članci treba da budu grupisani i jasno izdvojeni u prvom delu sveske.

Stručni članci:

1. stručni rad (prilog u kojem se nude iskustva korisna za unapređenje profesionalne prakse, ali koja nisu nužno zasnovana na naučnom metodu);
2. informativni prilog (uvodnik, komentar i sl.);
3. prikaz (knjige, računarskog programa, slučaja, naučnog događaja, i sl.).

Jezik rada

Jezik rada može biti srpski, engleski ili drugi jezik koji se koristi u međunarodnoj komunikaciji u određenoj naučnoj oblasti (ruski, nemački ili francuski).

Tekst mora biti jezički i stilski doteran, sistematizovan, bez skraćenica (osim standardnih). Sve fizičke veličine moraju biti izražene u Međunarodnom sistemu mernih jedinica – SI. Redosled obrazaca (formula) označava se rednim brojevima, sa desne strane u okruglim zagradama.

Sažetak (apstrakt) i rezime

Sažetak (apstrakt) jeste kratak informativan prikaz sadržaja članka koji čitaocu omogućava da brzo i tačno oceni njegovu relevantnost. U interesu je uredništava i autora da sažetak sadrži termine koji se često koriste za indeksiranje i pretragu članaka. Sastavni delovi sažetka su cilj istraživanja, metodi, rezultati i zaključak. Sažetak treba da ima od 100 do 250 reči i treba da se nalazi između zaglavlja (naslov, imena autora i dr.) i ključnih reči, nakon kojih sledi tekst članka. Ako je rad napisan na srpskom (ruskom, nemačkom ili francuskom) jeziku poželjno je da se, pored sažetka na srpskom (ruskom, nemačkom ili francuskom), daje i sažetak u proširenom obliku na engleskom jeziku – kao tzv. rezime (summary). Ovakav rezime treba da bude na kraju članka, nakon odeljka Literatura. Važno je da rezime bude u strukturiranom obliku, a njegova dužina može biti do 1/10 dužine članka (opširniji je od sažetka sa početka članka). Početak ovog rezimea može biti prevedeni sažetak (sa

početka članka), a zatim treba da slede prevedeni glavni naslovi, podnaslovi i osnovne zaključka članka (literatura se ne prevodi). Potrebno je da se u strukturiranom rezimeu prevede i deo teksta ispod naslova i podnaslova, vodeći računa da on bude proporcionalan njihovoj veličini, a da odražava suštinu. Nakon rezimea na engleskom jeziku (proširenog sažetka) dodaje se njegov prevod na srpskom (ruskom, nemačkom ili francuskom), da bi redakcija izvršila proveru i lekturu.

Cljučne reči

Ključne reči su termini ili fraze koje adekvatno predstavljaju sadržaj članka za potrebe indeksiranja i pretraživanja. Treba ih dodeljivati oslanjajući se na neki međunarodni izvor (popis, rečnik ili tezaurus) koji je najšire prihvaćen ili unutar date naučne oblasti. Za npr. nauku uopšte, to je lista ključnih reči Web of Science. Broj ključnih reči ne može biti veći od 10, a u interesu je uredništva i autora da učestalost njihove upotrebe bude što veća. Ključne reči daju se na jeziku na kojem je napisan članak (sažetak) i na engleskom jeziku. U članku se pišu neposredno nakon sažetka, odnosno nakon rezimea.

Datum prihvatanja članka

Datum kada je uredništvo primilo članak, datum kada je uredništvo konačno prihvatilo članak za objavljivanje, kao i datumi kada su u međuvremenu dostavljene eventualne ispravke rukopisa navode se hronološkim redosledom, na stalnom mestu, po pravilu na kraju članka.

Zahvalnica

Naziv i broj projekta, odnosno naziv programa u okviru kojeg je članak nastao, kao i naziv institucije koja je finansirala projekat ili program, navodi se u posebnoj napomeni na stalnom mestu, po pravilu pri dnu prve strane članka.

Prethodne verzije rada

Ako je članak u prethodnoj verziji bio izložen na skupu u vidu usmenog saopštenja (pod istim ili sličnim naslovom), podatak o tome treba da bude naveden u posebnoj napomeni, po pravilu pri dnu prve strane članka. Rad koji je već objavljen u nekom časopisu ne može se objaviti u *Vojnotehničkom glasniku* (preštampati), ni pod sličnim naslovom i izmenjenom obliku.

Tabelarni i grafički prikazi

Poželjno je da naslovi svih prikaza, a po mogućstvu i tekstualni sadržaj, budu dati dvojezično, na jeziku rada i na engleskom jeziku.

Tabele se pišu na isti način kao i tekst, a označavaju se rednim brojevima sa gornje strane. Fotografije i crteži treba da budu jasni, pregledni i pogodni za reprodukciju. Crteže treba raditi u programu word ili corel. Fotografije i crteže treba postaviti na željeno mesto u tekstu.

Navođenje (citiranje) u tekstu

Način pozivanja na izvore u okviru članka mora biti jednoobrazan. U samom tekstu, u uglastim zagrada, obavezno napisati redni broj iz odeljka Literatura sa kraja članka, na mestu na kojem se vrši pozivanje, odnosno citiranje.

Napomene (fusnote)

Napomene se daju pri dnu strane na kojoj se nalazi tekst na koji se odnose. Mogu sadržati manje važne detalje, dopunska objašnjenja, naznake o korišćenim izvorima (na primer, naučnoj građi, priručnicima), ali ne mogu biti zamena za citiranu literaturu.

Lista referenci (literatura)

Citirana literatura obuhvata, po pravilu, bibliografske izvore (članke, monografije i sl.) i daje se isključivo u zasebnom odeljku članka, u vidu liste referenci. Reference se nabrajaju redosledom kojim se navode u tekstu. Reference se ne prevode na jezik rada i navode se u uglastim zagradama. Bibliografski podatak za knjigu sadrži prezime i inicijale imena autora, naziv knjige, naziv izdavača, mesto i godinu izdanja. Bibliografski podatak za časopis sadrži prezime i ime autora, naslov članka, naziv časopisa, broj i godinu izdanja, kao i broj stranice. Naslovi citiranih domaćih časopisa daju se u originalnom, punom ili skraćenom, ali nikako u prevedenom obliku. Pri navođenju internet sajta kao literature navodi se i datum korišćenja. Obavezno je pozivanje na literaturu u samom tekstu članka (takođe se navodi brojevima u uglastim zagradama). Brojevi treba da odgovaraju spisku literature koji je dat u zasebnom odeljku, pri kraju članka.

Veoma je preporučljiva upotreba punih formata referenci koje podržavaju vodeće međunarodne baze namenjene vrednovanju, kao i Srpski citatni indeks, a propisani su uputstvima:

1. APA – Publication Manual of the American Psychological Association,
2. CBE – Council of Biology Editors Manual, Scientific Style and Format,
3. Chicago – The Chicago Manual of Style,
4. Harvard – Harvard Style Manual,
5. Harvard-BS – Harvard Style Manual – British Standard,
6. MLA – Modern Language Association Handbook for Writers of Research

Papers i

7. NLM – The National Library of Medicine Style Guide for Authors, Editors, and Publishers.

Takođe, prihvaćeni su i formati dati u uputstvima:

1. American Chemical Society (ACS) Style Guide i
2. American Institute of Physics (AIP) Style Manual.

Nestandardno, nepotpuno ili nedosledno navođenje literature u sistemima vrednovanja časopisa smatra se dovoljnim razlogom za osporavanje naučnog statusa časopisa.

Pored članka dostavlja se propratno pismo u kojem treba istaći o kojoj vrsti članka se radi, koji su grafički prilozi (fotografije i crteži) originalni, a koji pozajmljeni.

U propratnom pismu navode se i podaci autora: ime, srednje slovo, prezime, čin, zvanje, e-mail, adresa poslodavca (VP), kućna adresa, telefon na radnom mestu i kućni (mobilni) telefon, račun i naziv banke, SO mesta stanovanja i JMB građana.

Ako je više autora članka, u propratnom pismu se navodi pojedinačni procentualni udeo radi obračuna honorara.

Svi radovi podležu stručnoj recenziji, a objavljeni radovi i stručne recenzije honorišu se prema važećim propisima.

Adresa redakcije: Vojnotehnički glasnik, 11000 Beograd, Braće Jugovića 19.

E-mail: vojnotehnicki.glasnik@mod.gov.rs.

Odgovorni urednik
 Nebojša Gaćeša
 nebojsa.gacesa@mod.gov.rs
 tel.: 011/3349-497,
 064/8080-118

CALL FOR PAPERS AND ARTICLE FORMATTING INSTRUCTIONS

The instructions to authors about the article preparation for publication in the *Military Technical Courier* are based on the Act on scientific journal editing of the Ministry of Science and Technological Development of the Republic of Serbia, No 110-00-17/2009-01 of 9th July 2009. This Act aims at improving the quality of national journals and raising the level of their compliance with the international system of scientific information exchange. It is based on international standards ISO 4, ISO 8, ISO 18, ISO 215, ISO 214, ISO 18, ISO 690, ISO 690-2, ISO 999 and ISO 5122 and their national equivalents.

THE MILITARY TECHNICAL COURIER (www.vtg.mod.gov.rs, ISSN 0042-8469 – print issue, ISSN 2217-4753 – online, UDC 623+355/359) is a multidisciplinary scientific journal of the Ministry of Defence of the Republic of Serbia. It publishes scientific and professional papers as well as technical data about contemporary weapon systems and modern military technologies. Offering a logistic system support, the *Courier* is a part of a unique technical support to the Army services in the field of fundamental, applied and development research. It also deals with production and use of weapons and military equipment as well as with theoretical and practical achievements leading to professional development of the personnel of the Ministry of Defence and the Army of the Republic of Serbia.

Pursuant to the decision given in Article 27, paragraph 1, point 4, and in accordance with the acquired opinion given in Article 25, paragraph 1, point 5 of the Act on Scientific and Research Activities (*Official Gazette of the Republic of Serbia*, No 110/05, 50/06-cor and 18/10), the Ministry of Education and Science of the Republic of Serbia classified the *Military Technological Courier* for the year 2011

in the field **fundamental research**:

- on the list of periodicals for mathematics, computer sciences and mechanics: category: scientific periodical of national interest (M₅₂),
- on the list of periodicals for earth sciences and astronomy: category: scientific periodical of national interest (M₅₂),

in the field **technological development**

- on the list of periodicals for electronics and telecommunications, category: scientific periodical of national interest (M₅₂),
- on the list of periodicals for mechanical engineering, category: scientific periodical of national interest (M₅₂),
- on the list of periodicals for materials and chemical technology, category: scientific periodical of national interest (M₅₂),
- on the list of periodicals for industrial software and IT, category: scientific periodical (M₅₃).

The approved lists of national periodicals for the year 2010 can be viewed at: http://www.nauka.gov.rs/cir/index.php?option=com_content&view=article&id=1336%3Ausvojene-liste-domacih-naucnih-casopisa-za-2011-godinu&catid=23%3Anajnovije-vesti&Itemid=109

The information on the categorization can be also found on the website of KOB-SON (Consortium of Libraries of Serbia for Unified Acquisition), <http://nainfo.nb.rs/kob-son.82.html> or <http://nainfo.nb.rs/kategorizacija>. The access to this web page is possible only from computers linked to the Internet via the Academic computer network.

The periodical is categorized in compliance with the Regulations on the procedure and method of evaluation and quantitative formulation of scientific and research results of researchers, stipulated by the National Council for Scientific and Technological Development (*Official Gazette of RS*, No 38/2008). More detailed information can be found on the website of the Ministry of Science: http://www.nauka.gov.rs/cir/index.php?option=com_content&task=view&id=621&Itemid=37.

In accordance with the Regulations and the table about types and quantification of individual scientific and research results (as a part of the Regulations), a paper published in the *Military Technical Courier* scores 1,5 (one and a half point (category M₅₂) and 1 (one) point (category M₅₃).

The journal is in the Serbian Citation Index – SC index (data base of national scientific journals – details available at <http://scindeks.nb.rs>) and is constantly monitored depending on the impact within the base itself and on the international (Thompson-ISI) citation indexes.

Articles are submitted electronically to the Editorial Office at the e-address in Serbian, English, Russian, German or French, using Arial, a font size of 11pt and Exactly spacing.

The article should contain the abstract with keywords, introduction, body, conclusion, references and the summary in English language (without heading and subheading enumeration). The article length should not exceed 16 pages of A4 paper format.

The article should be formatted following the instructions in the Article Form which can be downloaded from:

<http://www.vtg.mod.gov.rs>.

Title

The title should be informative. It is in both Journal's and author's best interest to use terms suitable for indexing and word search. If there are no such terms in the title, the author is strongly advised to add a subtitle. The title should be given in English as well.

The titles precede the abstract and the summary in an appropriate language.

Letterhead title

The letterhead title is given at a top of each page for easier identification of article copies in an electronic form in particular. It contains the author's surname and first name initial (for multiple authors add "et al"), article title, journal title and collation (year, volume, issue, first and last page). The journal and article titles can be given in a shortened form.

Author's name

Full name(s) of author(s) should be used. It is advisable to give the middle initial. Names are given in their original form (with diacritic signs if in Serbian).

Author's affiliation

The full official name and seat of the author's affiliation is given, possibly with the name of the institution where the research was carried out. For organizations with complex structures, give the whole hierarchy (for example, Military Academy, Department for Military Electronic Systems, Belgrade). At least one organization in the hierarchy must be a legal entity. When some of multiple authors have the same affiliation, it must be clearly stated, by special signs or in other way, which department exactly they are affiliated with. The affiliation follows the author's name. The function and title are not given.

Contact details

The postal address or the e-mail address of the author (usually of the first one if there are more authors) is given in the footnote at the bottom of the first page.

Type of articles

Classification of articles is a duty of the editorial staff and is of special importance. Referees and the members of the editorial staff, or section editors, can propose a category, but the editor-in-chief has the sole responsibility for their classification.

Journal articles are classified as follows:

Scientific articles:

1. Original scientific paper (giving the previously unpublished results of the author's own research based on scientific methods);
2. Survey paper (giving an original, detailed and critical view of a research problem or an area to which the author has made a contribution visible through his self-citation);
3. Short or preliminary communication (original scientific paper of full format but of a smaller extent or of a preliminary character);
4. Scientific critique or forum (discussion on a particular scientific topic, based exclusively on scientific argumentation) and commentaries.

Exceptionally, in particular areas, a scientific paper in the Journal can be in a form of a monograph or a critical edition of scientific data (historical, archival, lexicographic, bibliographic, data survey, etc.) which were unknown or hardly accessible for scientific research.

Papers classified as scientific must have at least two positive reviews.

The list of referees of the Military Technical Courier can be viewed at:

<http://www.vtg.mod.gov.rs>.

If the journal contains non-scientific contributions as well, the section with scientific papers should be clearly denoted in the first part of the Journal.

Professional articles:

1. Professional paper (contribution offering experience useful for improvement of professional practice but not necessarily based on scientific methods);
2. Informative contribution (editorial, commentary, etc.);
3. Review (of a book, software, case study, scientific event, etc.).

Language

The article can be in Serbian, English or other language used in international communication in a particular scientific field (Russian, German or French).

The grammar and style of the article should be of good quality. The systematized text should be without abbreviations (except standard ones). All measurements must be in SI units. The sequence of formulae is denoted in Arabic numerals in parentheses on the right-hand side.

Abstract and summary

An abstract is a concise informative presentation of the article content for fast and accurate evaluation of its relevance. It is both in the Editorial Office's and the author's best interest for an abstract to contain terms often used for indexing and article search. The abstract describes the purpose of the study and the methods, outlines the findings and state the conclusions. A 100- to 250- word abstract should be placed between the title and the keywords with the body text to follow. Besides an abstract in Serbian (Russian, German or French), articles in Serbian (Russian, German or French) are advised to have a summary in English, at the end of the article, after the Reference list. The summary should be structured and long up to 1/10 of the article length (it is more extensive than the abstract). It can start with the translated Serbian (Russian, German or French) abstract from the beginning of the article with translated main headings, subheadings and major conclusions to follow (Reference list is not translated). The structured summary should also contain the proportional informative parts of the text below the headings and subheadings. The summary in English is followed by its Serbian (Russian, German or French) version for the Editorial Office to perform checking and proofreading.

Keywords

Keywords are terms or phrases showing adequately the article content for indexing and search purposes. They should be allocated heaving in mind widely accepted international sources (index, dictionary or thesaurus), such as the Web of Science keyword list for science in general. The higher their usage frequency is, the better. Up to 10 keywords immediately follow the abstract and the summary, in respective languages.

Article acceptance date

The date of the reception of the article, the dates of submitted corrections in the manuscript (optional) and the date when the Editorial Board accepted the article for publication are all given in a chronological order at the end of the article.

Acknowledgements

The name and the number of the project or programme within which the article was realised is given in a separate note at the bottom of the first page together with the name of the institution which financially supported the project or programme.

Article preliminary version

If an article preliminary version has appeared previously at a meeting in a form of an oral presentation (under the same or similar title), this should be sta-

ted in a separate note at the bottom of the first page. An article published previously cannot be published in the *Military Technical Courier* even under a similar title or in a changed form.

Tables and illustrations

All the captions should be in the original language as well as in English, together with the texts in illustrations if possible. Tables are typed in the same style as the text and are denoted by Arabic numerals at the top. Photographs and drawings, placed appropriately in the text, should be clear, precise and suitable for reproduction. Drawings should be created in Word or Corel.

Citation in the text

Citation in the text must be uniform. When citing references in the text, use the reference number set in square brackets from the Reference list at the end of the article.

Footnotes

Footnotes are given at the bottom of the page with the text they refer to. They can contain less relevant details, additional explanations or used sources (e.g. scientific material, manuals). They cannot replace the cited literature.

Reference list (Literature)

The cited literature encompasses bibliographic sources such as articles and monographs and is given in a separate section in a form of a reference list. References, quoted in square brackets, are not translated to the language of the article. A bibliographic entry for a book contains the author's surname and first name initial, book title, publisher, place and year of publication. A bibliographic entry for an article contains the author's surname and first name, article title, journal title, issue number, year of publication and page numbers. Titles of cited national journals are given in their full or shortened original form, but never translated. Web references are given with the retrieval date. Citations in the body of the text are necessary. Numbers in square brackets must correspond to the numbers in the Reference list at the end of the article. It is highly advisable to use full format references supported by leading international evaluation bases as well as the Serbian Citation Index. Here are the recommended style guides:

1. APA – Publication Manual of the American Psychological Association,
2. CBE – Council of Biology Editors Manual, Scientific Style and Format,
3. Chicago – The Chicago Manual of Style,
4. Harvard – Harvard Style Manual,
5. Harvard-BS – Harvard Style Manual – British Standard,
6. MLA – Modern Language Association Handbook for Writers of Research Papers and
7. NLM – The National Library of Medicine Style Guide for Authors, Editors, and Publishers.

The formatting given in the following instructions is also acceptable:

1. American Chemical Society (ACS) Style Guide and
2. American Institute of Physics (AIP) Style Manual.

In journal evaluation systems, non-standard, insufficient or inconsequent citation is considered to be a sufficient cause for denying the scientific status to a journal.

The article should be accompanied with a cover letter with the information about the author(s): surname, middle initial, first name, citizen personal number, rank, title, e-mail address, affiliation address, home address including municipality, phone number in the office and at home (or a mobile phone number), bank account and the name of the bank.

If there are more authors, their share in the article should be given in percents for honorarium calculation purposes.

The cover letter should state the type of the article and tell which illustrations are original and which are not.

All articles are peer reviewed. All authors and reviewers are paid an honorarium on publication of the article.

Address of the Editorial Office:
Vojnotehnički glasnik, 11000 Beograd,
Braće Jugovića 19.
E-mail: vojnotehnicki.glasnik@mod.gov.rs.
Managing Editor
Nebojša Gaćeša
nebojsa.gacesa@mod.gov.rs
tel.: +381 11 3349 497, +381 64 80 80 118

MEDIJA CENTAR „ODBRANA“

- Braće Jugovića 19, 11000 Beograd •
- Telefoni: (011) 3201-995 i 23-995
Telefaks: (011) 3241-009 •
- Tekući račun: 840-312849-56 • PIB: 102116082
- Broj potvrde o evidentiranju za PDV: 135328814 •

POZIV NA PRETPLATU ZA 2011. GODINU

Pretplaćujemo se na časopis:

br. primeraka

1. „Vojnotehnički glasnik“

Godišnja pretplata 1.200,00 dinara

Prilikom uplate pozvati se na broj: 54

.....

2. „Novi glasnik“

Godišnja pretplata 1.800,00 dinara

Prilikom uplate pozvati se na broj: 53

.....

3. „Vojno delo“

Godišnja pretplata 1.400,00 dinara

Prilikom uplate pozvati se na broj: 51

.....

Pretplatne cene važe do 31. 12. 2011. godine.

Broj primeraka izdanja koja se naručuju upisati u narudžbenicu, a primerak narudžbenice sa dokazom o izvršenoj uplati na gore navedeni tekući račun poslati na gore navedenu adresu.

Kupac

tel.:

Mesto

Ulica

br.

Potpis naručioca

M. P.

.....

Likovno-grafički urednik
mr *Nebojša Kujundžić*
e-mail: nebojsa.kujundzic@mod.gov.rs

Tehničko uređenje
Zvezda Jovanović

Lektor i korektor
Sladjana Mirčevski
e-mail: sladjana.mircevski@mod.gov.rs

Prevod na engleski
Jasna Višnjić, profesor
e-mail: visnjicjasna@yahoo.com

Prevod na ruski
Olivera Hajduković, profesor
e-mail: oliverahajdukovic@lukoil.rs

Prevod na nemački
Gordana Bogdanović, profesor
e-mail: gordana.bogdanovic@yahoo.com

CIP – Каталогизacija у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

623+355 / 359
355 / 359

ВОЈНОТЕХНИЧКИ гласник : научни часопис
Министарства одбране Републике Србије =
Military technical courier : scientific
periodical of the Ministry of Defence of the
Republic of Serbia / одговорни уредник
Небојша Гаћеша. - Год. 1, бр. 1 (1953) -
- Београд (Браће Југовића 19) : Министарство
одбране Републике Србије, 1953- (Београд :
Војна штампарија). - 24 cm

Доступно и на:
<http://www.vtg.mod.gov.rs>
Тромесечно. - Друго издање на другом медијуму:
Vojnotehnički glasnik (Online) = ISSN
2217-4753
ISSN 0042-8469 = Војнотехнички гласник
COBISS.SR-ID 4423938

Cena: 350,00 dinara
Tiraž: 850 primeraka

Na osnovu mišljenja Ministarstva za nauku, tehnologiju i razvoj Republike Srbije,
broj 413-00-1201/2001-01 od 12. 9. 2001. godine,
časopis „Vojnotehnički glasnik“ je publikacija od posebnog interesa za nauku.

UDC: Narodna biblioteka Srbije, Beograd

Graphic design editor
Nebojša Kujundžić MA
e-mail: nebojsa.kujundzic@mod.gov.rs

Copy editing
Zvezda Jovanović

Proofreader
Dobrila Miletić BA
e-mail: dobrila.miletic@mod.gov.rs

English translation and polishing
Jasna Višnjić BA
e-mail: visnjicjasna@yahoo.com

Russian translation and polishing
Olivera Hajduković BA
e-mail: oliverahajdukovic@lukoil.rs

German translation and polishing
Gordana Bogdanović BA
e-mail: gordana.bogdanovic@yahoo.com

CIP – Catalogisation in the publication
National Library of Serbia, Belgrade

623+355 / 359
355 / 359

ВОЈНОТЕХНИЧКИ гласник : научни часопис
Министарства одбране Републике Србије =
Military technical courier : scientific
periodical of the Ministry of Defence of the
Republic of Serbia / одговорни уредник
Небојша Гаћеша. - Год. 1, бр. 1 (1953) -
- Београд (Браће Југовића 19) : Министарство
одбране Републике Србије, 1953- (Београд :
Војна штампарија). - 24 cm

Доступно и на:
<http://www.vtg.mod.gov.rs>
Тромесечно. - Друго издање на другом медијуму:
Vojnotehnički glasnik (Online) = ISSN
2217-4753
ISSN 0042-8469 = Војнотехнички гласник
COBISS.SR-ID 4423938

Price: 350.00 RSD
Printed in 850 copies

According to the Opinion of the Ministry of Science and Technological Development
No 413-00-1201/2001-01 of 12th September 2001, the *Military Technological Courier* is a
publication of special interest for science.

UDC National Library of Serbia

ISSN 0042-8469



9 770042 846003