



2
2013

VOJNOTEHNIČKI glasnik

NAUČNI ČASOPIS MINISTARSTVA ODBRANE REPUBLIKE SRBIJE

2 2013

VOJNOTEHNIČKI GLASNIK

ISSN 0042-8469
COBISS.SR-ID 4423938

VOJNOTEHNIČKI
glasnik
NAUČNI ČASOPIS
MINISTARSTVA ODBRANE
REPUBLIKE SRBIJE

www.vtg.mod.gov.rs

2

UDC 623 + 355/359

GODINA LXI APRIL-JUN 2013.

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

2

UDC 623 + 355/359

VOLUME LXI APRIL-JUNE 2013.

MINISTARSTVO ODBRANE REPUBLIKE SRBIJE
UNIVERZITET ODBRANE U BEOGRADU

Rektor

prof. dr *Miodrag Jevtić*, general-potpukovnik

MEDIJA CENTAR „ODBRANA“

Direktor

Slavoljub M. Marković, potpukovnik

Načelnik odseka za izdavačku delatnost

Dragana Marković

UREDNIK VOJNOTEHNIČKOG GLASNIKA

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,
- general-major 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,
- doc. dr Mirko Borisov, Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu,
- prof. dr Dragoljub Vujić, Vojnotehnički institut, Beograd,
- general-major vanr. prof. dr Mladen Vuruna, načelnik Vojne akademije, Beograd,
- pukovnik vanr. prof. 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 sisteme naoružanja Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu,
- general-potpukovnik 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 Momčilo Milinović, Katedra za sisteme naoružanja Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu,
- prof. dr Gradimir V. Milovanović, redovni član Srpske akademije nauka i umetnosti, Matematički institut SANU, 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. Stojić, 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 odelenja za naučnu i inventivnu delatnost, Uprava za stratejsko 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://aseeistant.ceon.rs/index.php/vtg/issue/current>

<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

Vojnotehnički glasnik je licenciran kod EBSCO Publishing-a, najvećeg svetskog agregatora časopisa, periodike i ostalih izvora u punom tekstu. Kompletan tekst *Vojnotehničkog glasnika* dostupan je u bazama podataka EBSCO Publishing-a.

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

MINISTRY OF DEFENCE OF THE REPUBLIC OF SERBIA
UNIVERSITY OF DEFENCE IN BELGRADE

Rector

Lt General Miodrag Jevtić, PhD, Professor

ODBRANA MEDIA CENTRE

Director

Lt Col *Slavoljub* M. Marković

Head of publishing department

Dragana Marković

EDITOR OF THE MILITARY TECHNICAL COURIER

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)
- Major 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
- Mirko Borisov, PhD, Faculty of Technical Sciences, University in Novi Sad
- Professor Dragoljub Vujić, PhD, Military Technical Institute, Belgrade
- Major General Mladen Vuruna, PhD, Associate Professor, Head of the Military Academy, Belgrade
- Colonel Goran Dikić, PhD, Associate 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 Weapon Systems Department at the Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade
- Lt 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 Momčilo Milinović, PhD, Weapon Systems Department at the Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade
- Professor Gradimir V. Milovanović, PhD, Member of the Serbian Academy of Sciences and Arts, Mathematical Institute of the SASA, 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://aseestant.ceon.rs/index.php/vtg/issue/current>

<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.

Military Technical Courier has entered into an electronic licensing relationship with EBSCO Publishing, the world's most prolific aggregator of full text journals, magazines and other sources. The full text of Military Technical Courier can be found on EBSCO Publishing's databases.

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

SADRŽAJ

ORIGINALNI NAUČNI ČLANCI

<i>Mihailo R. Mrdak</i> Struktura i svojstva plazma sprej APS-nikal-aluminid prevlake	7–22
<i>Momir R. Stanković, Milica B. Naumović, Stojadin M. Manojlović</i> Identifikacija parametara modela jednosmernog motora u prostoru stanja	23–36
<i>Leonid I. Grečihin</i> Toplotne pumpe u vazduhoplovstvu	37–54

PREGLEDNI ČLANCI

<i>Milan M. Šunjevarić, Mladen B. Veletić, Branislav M. Todorović</i> Radio-lociranje mobilne stanice u mrežama treće generacije	55–83
<i>Milan M. Andrejić</i> Merenje efikasnosti u logistici	84–104
<i>Rebeka M. Rudolf, Janko J. Ferčec</i> Merenje sile na zubima pomoću fiksni ortodontskih sistema	105–122
<i>Dalibor M. Đenadić, Miodrag T. Manić, Dejan I. Tanikić, Saša S. Ranđelović, Petar S. Đekić</i> Analiza i prikaz vrsta fiksatora u medicini kao i metoda obrade materijala za izradu fiksatora	123–139

STRUČNI ČLANCI

<i>Dražana N. Petrović, Branko N. Đedović, Nikola Č. Petrović</i> Primen a cost – benefit analize u vrednovanju i izboru javnih projekata (finansijski aspekt)	140–158
<i>Veljko P. Petrović, Veselin L. Mrdak, Branka R. Luković</i> Analiza rada sistema održavanja primenom teorije masovnog opsluživanja	159–181
<i>Slavica S. Ristić, Suzana R. Polić-Radovanović, Bore V. Jegdić</i> Termografsko ispitivanje energetske efikasnosti zgrade Vojnog muzeja	182–199
<i>Radiša R. Stefanović, Boban Z. Pavlović</i> Sigurnost protokola rutiranja u ad hoc mrežama i mogući napadi u mreži	200–217
<i>Vesna M. Radonjić, Andrijana N. Todosijević, Milica R. Petrović, Mirjana D. Stojanović, Aleksandra M. Kostić-Ljubisavljević</i> Analiza protokola radius i diameter sa aspekta tarifiranja telekomunikacionih servisa	218–241
<i>Dejan M. Tepšić, Mladen Đ. Veinović</i> Napadi na IEEE 802.11 bežične mreže	242–271
<i>Dejan R. Inđić</i> Karakteristike društveno-geografskih činilaca u zoni Drinsko-velikomoravskog strategijskog pravca	272–290

PRIKAZI

<i>Jelena S. Cice, Marko D. Andrejić, Nebojša K. Dražović</i> Inženjering bezbednosti: fizičke mere zaštite za osoblje visokorizične bezbednosti ..	291–308
<i>Nebojša N. Gaćeša</i> Prikaz knjige Aerodinamika letelica L. I. Grečihina, A. A. Lapčevića i N. G. Kuca	309–313
SAVREMENO NAORUŽANJE I VOJNA OPREMA	314–355
POZIV I UPUTSTVO AUTORIMA	356–365

CONTENTS

ORIGINAL SCIENTIFIC PAPERS

<i>Mihailo R. Mrdak</i> Structure and properties of plasma sprayed APS-Ni20Al coatings	7–22
<i>Momir R. Stanković, Milica B. Naumović, Stojadin M. Manojlović</i> Identification of the parameters of a DC motor state space model	23–36
<i>Leonid I. Grečihin</i> Heat pumps in aviation	37–54

REVIEW PAPERS

<i>Milan M. Šunjeverić, Mladen B. Veletić, Branislav M. Todorović</i> Radio-location of mobile stations in third generation networks	55–83
<i>Milan M. Andrejić</i> Measuring efficiency in logistics	84–104
<i>Rebeka M. Rudolf, Janko J. Ferčec</i> Force measurements on teeth using fixed orthodontic systems	105–122
<i>Dalibor M. Đenadić, Miodrag T. Manić, Dejan I. Tanikić, Saša S. Ranđelović, Petar S. Đekić</i> Analysis and an overview of fixators in medicine and the methods of processing materials for producing fixators	123–139

PROFESSIONAL PAPERS

<i>Dražana N. Petrović, Branko N. Đedović, Nikola Č. Petrović</i> Application of the cost benefit analysis in the evaluation and selection of public projects (financial aspect)	140–158
<i>Veljko P. Petrović, Veselin L. Mrdak, Branka R. Luković</i> Mass serving theory application to the analysis of maintenance system functioning .	159–181
<i>Slavica S. Ristić, Suzana R. Polić-Radovanović, Bore V. Jeqdić</i> Investigation of the energy efficiency of the military museum building by infrared thermography	182–199
<i>Radiša R. Stefanović, Boban Z. Pavlović</i> Safety of routing protocols in ad hoc networks and possible attacks in the network ..	200–217
<i>Vesna M. Radonjić, Andriana N. Todosijević, Milica R. Petrović, Miriana D. Stojanović, Aleksandra M. Kostić-Liubisavljević</i> Analysis of the radius and diameter protocols in terms of pricing telecommunication services	218–241
<i>Dejan M. Tepšić, Mladen Đ. Veinović</i> Attacks on IEEE 802.11 wireless networks	242–271
<i>Dejan R. Inđić</i> Characteristics of the socio-geographical factors in the Drina-Velika Morava strategic direction zone	272–290

REVIEWS

<i>Jelena S. Cice, Marko D. Andrejić, Nebojša K. Dragović</i> Security engineering: physical security measures for high-risk personnel	291–308
<i>Nebojša N. Gačeša</i> Review of the book „Aircraft aerodynamics“ by Leonid Ivanovich Gretchihin, A. A. Lapcevich and N. G. Kuch (Леонид Иванович Гречихин, А. А. Лапцевич и Н. Г. Куць)	309–313
MODERN WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT	314–355
CALL FOR PAPERS AND INSTRUCTIONS FOR AUTHORS	356–365

ORIGINALNI NAUČNI ČLANCI ORIGINAL SCIENTIFIC PAPERS

STRUCTURE AND PROPERTIES OF PLASMA SPRAYED APS-Ni20Al COATINGS

Mihailo R. Mrdak, Research and Development Center
IMTEL Communications a. d., Belgrade

DOI: 10.5937/vojtehg61-1985

FIELD: Chemical Technology

ARTICLE TYPE: Original Scientific Paper

Summary:

The aim of this study is to obtain, by optimizing the deposit parameters, optimal structural and mechanical properties of Ni20Al layers to be applied on a radar station part. The powder was deposited by the process of atmospheric plasma spraying (APS), with a plasma spray (PS) distance of 80, 90 and 100 mm. The coating with the best characteristics was deposited on the hardener of the GTD 2PV8 turbo gas engine for a radar station, in order to reduce the effect of oxidation and vibration on the wear at 450 - 500°C. The quality of Ni20Al coating layers was assessed on the basis of their microstructure, microhardness and tensile strength. The best structure and mechanical properties were found in the layers deposited with a distance of plasma spray of 80 mm. The surfaces morphology of the deposited coatings and the fracture morphology of the best layers were examined with the SEM (scanning electron microscope). The microstructure of the deposited layers of coatings was examined by light microscopy. The microstructural analysis of the deposited layers was performed according to the Pratt-Whitney standard. The evaluation of the mechanical properties of the layers was done by examining microhardness with the HV_{0.3} method and tensile testing was used for the bond strength. Studies have shown that the plasma spray distance significantly affects the mechanical properties and the microstructure of coatings. The effect of Ni20Al coating application has been tested on a hardener of the GTD 2PV8 turbo gas engine on a radar station.

Key words: structural properties, radar, property, plasma, microstructures, layers, deposits, coatings.

ACKNOWLEDGEMENT: The author is thankful for the financial support from the Ministry of Education and Science of the Republic of Serbia (national projects OI 174004, TR 34016)

Introduction

The composite Ni20Al nickel - aluminide powder was developed for aviation industry. Its important characteristic is a good deposition by plasma spray at the atmospheric pressure APS. NiAl is an important intermetallic material used in aviation industry and other industries. This material has good resistance to oxidation, corrosion and erosion. The material can be produced as an alloy or as clad powder. In the second case, clad powder produces intermetallic compounds using various sources of heat such as plasma (Moshksar, Mirzaee, 2004), (Hashemi, et al., 2009), (Sampath, et al., 1990), (Kumar, Selvarajan, 2006). The most important feature of nickel - aluminide is high strength and toughness with excellent resistance to high temperatures. These characteristics were the basis for the development and a wider application of NiAl-based coatings. Plasma spray technology is used widely in the production of intermetallic surface layers. NiAl coatings deposited by plasma spray have found wide application in the protection of areas exposed to elevated and high temperatures (Liu, White, 1985, pp.365-371), (Cahn, 1991, pp.18-25), (Chen, et al., 1993, pp.357-363), (Liu, Sikka, 1986, pp.13-16). In particular, these coatings have a potential demand in aviation industry and other industries of high-performance (Chen, et al., 1993, pp.357-363), (Liu, Sikka, 1986, pp.13-16). Nickel - aluminide plasma spray coatings are used as bonding coatings, where their function is to minimize thermo - mechanical stresses at the substrate/coating interface, as well as to increase coating adhesion (Hiemann, 1986). The coefficient of thermal expansion of these alloys is intermediate between the thermal expansion coefficients of ceramics and metals, and therefore can reduce stress at the interface. Moreover, the exothermic reaction between Ni and Al leads to better coating adhesion. In addition, it is mainly used as a bonding layer for ceramic materials (Lee, et al., 1996, pp.3003-3009). Nickel-based coatings are used when there is a need for good wear resistance combined with oxidation or hot corrosion resistance (Rosso, Ben-nani, 1998, pp.524-530). The Ni20Al coating is typically used as a bonding layer to improve adhesion of the subsequently deposited top layer, as a middle layer for mitigating non-compliance materials with different coefficients of thermal expansion, as a bonding layer resistant to oxidation for operating temperatures up to 650°C, as well as for the protection and revitalization of parts damaged by wear, oxidation and vibration. To obtain a functional layer, it is necessary to choose carefully a combination of plasma spraying parameters. For the control of plasma spray processes, the correlations between the parameters must be known well, as well as the individual effects of the parameters on the coating characteristics. One of important atmospheric plasma spray parameters is the dis-

tance of plasma spraying, which significantly affects the oxidation of melted particles during deposition on the surface as well as the pore size and the content. The oxide content increases with the distance increasing between the substrate and the plasma gun. In addition, with the increasing plasma spray distance, the content of pores increases, which significantly affects the mechanical properties of coatings (McPherson, Cheang, 1989). During the plasma spray process, nickel and aluminum react chemically above 660°C and form nickel - aluminide with an exothermic reaction which further transmits heat to the melted particles and to the surface. The products of this reaction are formed intermetallic compounds Ni_3Al , Ni_2Al_3 and NiAl which additionally increase the strength and the adhesion of coatings. These intermetallic compounds show superior properties at elevated temperatures. The key feature of the powder is to form coatings which are self - bonding for a wide range of metal substrates. Self-bonding materials require minimal surface preparation for good adhesion of the coating, which is suitable for thin substrates. Coatings deposited with optimal parameters are dense with a metallurgic bond at the interface with the base material. The properties of plasma deposited coatings are influenced by the microstructure of the layers. The microstructure and the phases that are formed when NiAl is the deposited depend of raw materials, technological processes and parameters used. NiAl is available as alloyed and as powder clad. For this work, the clad of Ni20Al powder was of interest. The clad of NiAl powder consists of the core of Ni and the outer shell of Al (Deevi, et al., 1997, pp.335-344). Aluminum is a chemical element that protects the coating of Ni from oxidation by forming Al_2O_3 oxide and an intermetallic compound $\gamma'\text{-Ni}_3\text{Al}$ in the basic alloy $\alpha\text{-Ni}$. At the atmospheric pressure, the Ni20Al powder deposited by the plasma spraying process produces a lamellar coating which consists of the $\alpha\text{-Ni}$ solid solution which includes $\gamma'\text{-Ni}_3\text{Al}$ phases and the NiAl phase in traces (Knotek, Lugscheider, 1976, pp.244-251), (Knotek, et al., 1980, pp.282-286). In accordance with the dual diagram of Ni-Al , the $\gamma'\text{-Ni}_3\text{Al}$ phase is built with the aluminum content of 12.5-14 wt.% Al , while the NiAl phase is built with the aluminum content of over 17 wt.% Al (ASM Handbook, 1992). The NiO oxides and $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ and pores are between the base lamellas at the interfaces.

This paper presents the results of experimental investigations of the influence of the plasma spray distance (PS) on the microstructure and the mechanical properties of the Ni20Al coating layers. The main objective was to attest the quality of coating and to apply it on the hardener of the GTD 2PV8 turbo gas engine on the radar station. Three groups of samples were made with three different plasma spraying distances: 80, 90 and 100 mm. The microstructure and the mechanical properties of coating layers were analyzed and studied in order to select the best coa-

ting quality. The coating with the best properties was tested on the hardener of the GTD 2PV8 turbo gas engine on the radar station at a time period of over 100 hours.

Materials and experimental details

The substrate material on which the coating layers were deposited was X15Cr13 stainless steel (EN 1.4024) in the thermally unprocessed state. For the production of coatings, the powder of the 'Sulzer Metco' company labeled Metco 404NS was used. The Ni20Al powder is composite powder with 80 wt.% Ni and 20 wt.% Al with a grain powder in a particle size range from 53 μ m to 90 μ m. The powder is well deposited and bonded for the Ni and Fe-based basis. The SG -100 plasma gun of the atmospheric plasma spray system (APS) by 'Plasmadyne' was used for powder deposition. The SG-100 plasma spray gun consisted of the cathode type K 1083-129, the anode type A 2084-145 and the gas injector type GI 2083-130. The Argon gas was used in the combination with the Helium and the power of supply of 40 KW. The plasma spray distance was the main parameter for the powder deposition. In this experiment, three different plasma spray distances (80mm, 90mm and 100mm) were used. An optimal distance of the plasma gun from the substrate allows the coating layers to have the smallest content of non-melted particles, oxides and pores. The pores, as volume errors, together with non-melted particles and oxides in the layers, significantly influence the strength of the coating and the protective effect of the coating in exploitation. The detailed values of plasma spray parameters have been shown in Table 1.

Table 1. Plasma spray parameters
Tabela 1. Plazma sprej parametri

Deposition parameters	Values
Plasma current, I (A)	800
Plasma Voltage, U (V)	38
Primary plasma gas flow rate Ar (l/min)	47
Secondary plasma gas flow rate He (l/min)	31
Carrier gas flow rate (l/min)	6
Powder feed rate (g/min)	50
Stand-off distance (mm)	80/90/100

The substrate surfaces were roughened with the white electrical corundum Al₂O₃ with particles sizes of 0.7 - 1.5mm before depositing the powder. The coatings were deposited with a thickness of 0.15 mm. The coating layers with the best structural and mechanical properties are deposited on the hardener of the GTD 2PV8 turbo gas engine.

The testing of the structural and mechanical properties of the coatings was done in accordance with the 'Pratt & Whitney' standard (Turbo-jet Engine, 2002, Pratt & Whitney).

The samples with the dimensions $70 \times 20 \times 1.5$ mm were used for the microhardness measurement and for the microstructure analysis. The microhardness of coatings was measured along the coating layers with the Vickers method ($HV_{0.3}$) with a load of 300 g. The measurement was done in the middle and at the ends of the samples. The presented results of microhardness were the averaged values.

The bond strength testing was done with the tensile testing method. The paired samples of dimensions $\varnothing 25 \times 50$ mm, one of which was with the deposited coating, were used for measuring the strength of the bond between the coating and the substrate. The testings were performed at room temperature at a speed of 1 mm/min. Five samples were done for each plasma spraying distance, and the measured values were averaged.

The microstructural analysis of the coating layers was done on the light microscope. The surface morphology of deposited coatings and the fracture morphology of the best layers were examined with the SEM.

Results and discussion

The measured values of the microhardness and the bond strength of deposited Ni20Al coatings depending on the plasma spray (PS) distance are shown in Figs. 1 and 2. The values of the microhardness of the coating layers are directly related to the plasma spraying distance. The plasma spray distance significantly affects the microhardness values and the bond strength of the deposited layers. The layers of Ni20Al coating, deposited with the smallest distance of 80 mm have a microhardness value of $220HV_{0.3}$ that is within the limits prescribed by the powder manufacturer ($190 - 230HV_{0.3}$) (Material Product Data Sheet, 2011).

These layers have shown the best microstructure with a denser packing of the melted particles and with the lowest proportion of the interlamellar oxides and pores. The highest value of the microhardness of $273HV_{0.3}$ was found in the layers with the highest proportion of oxides that were deposited with a plasma spray distance of 100 mm. A higher microhardness value than $243HV_{0.3}$ was also found in the layers deposited with a plasma spray at a distance of 90 mm. The layers of coatings deposited at a larger distance had the microhardness values above the prescribed values. The values of the microhardness coatings were in accordance with the proportion of the oxide in the deposited layers. Larger distances of the plasma spray affected a higher degree of the oxidation

of melted powder particles, followed up by a larger proportion of inter-lamellar oxides. These were confirmed by the metallographic examination of the coating layers.

Tensile bond strength is directly related to the plasma spray distance and to the proportion of inter-lamellar oxides and pores in the microstructure of Ni20Al coatings. The measurements of the values of the tensile bond strength showed that, for all three plasma spray distances, the obtained values were higher than 20.7MPa, which is prescribed by the powder manufacturer (Material Product Data Sheet, 2011).

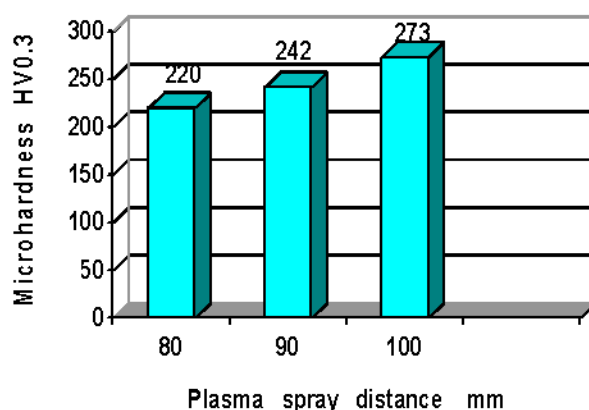


Figure 1 – Microhardness of Ni20Al layers
Slika 1 – Mikrotvrdoća Ni20Al slojeva

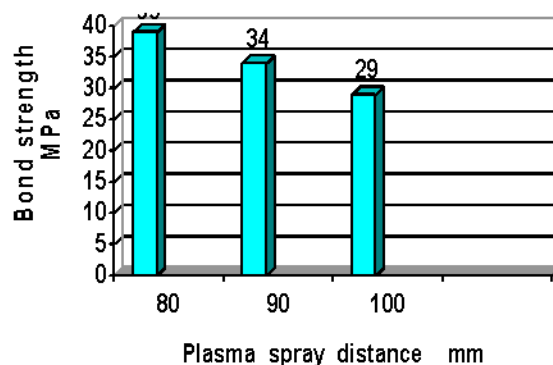


Figure 2 – Bond strength of Ni20Al layers
Slika 2 – Čvrstoća spoja Ni20Al slojeva

All deposited coatings had good values of the tensile bond strength resulting from the exothermic reaction of Al and Ni that occurs during the deposition of powder (McPherson, Cheang, 1989), (Deevi, et al., 1997, pp. 335-344), (Material Product Data Sheet, 2011). The exothermic reac-

tion enabled obtaining a good adhesion strength with the substrate as well as obtaining a good inter-lamellar cohesive strength. The highest value of the bond strength of 39MPa was found in the layers deposited by plasma spraying with the smallest distance. These layers had the lowest proportion of oxides NiO and Y - Al_2O_3 and pores (Knotek, Lugscheider, 1976, pp. 244-251), (Knotek, et al., 1980, pp. 282-286).

The tensile bond strength testing showed that, for all deposited coatings, the mechanism of destruction occurred at the interface between the substrate and the coating. This indicates a good melting of powder particles and their bonding to the substrate for all three plasma spray distances. Since the proportion of oxide, unmelted particles and pores is directly related to the microhardness values and the coating bond strength, the measured values for the deposited coating with the lowest plasma spray distance indicate that their proportion is the smallest in this coating. Also, these values are verified by the analysis of the coating microstructure on the light microscope.

Figs. 3 and 4 show the microstructures of the layers deposited by plasma spray (PS) at a distance of 80mm, which had the best microstructure and mechanical properties. The qualitative analysis of the deposited Ni20Al layers (Fig. 3) showed that, at the substrate/coating interface, there was an insignificant proportion of particles of the Al_2O_3 electric corundum due to roughening.

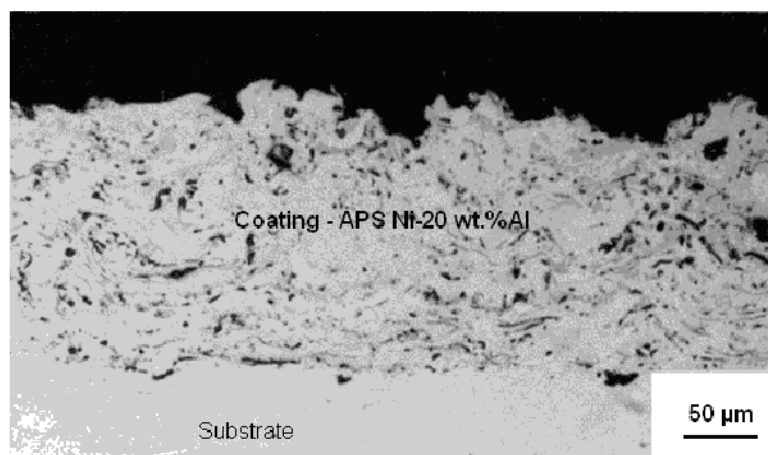


Figure 3 – Ni20Al coating microstructure deposited with a (PS) distance of 80 mm
Slika 3 – Mikrostruktura Ni20Al prevlake sa (PS) odstojanjem 80 mm

Along the substrate/coating interface, there are no microcracks and macrocracks. The coating/substrate bond is uniform without the separation of the coating layers from the substrate. The structure of the coating

is lamellar. The coating layers were continuously deposited without the presence of microcracks and macrocracks. There were no unmelted powder particles present in the layers. The coating substrate consists of a solid solution of α - Ni, which is light gray, and an intermetallic phase of γ' -Ni₃Al and NiAl (Fig. 4). In the lamellar base of the solid solution and intermetallic phases, the thin inter-lamellar oxide NiO and Y - Al₂O₃ films are clearly observed, derived from the oxidation of Ni and Al in the process of cooling and solidification of melted powder particles (Knotek, Lugscheider, 1976, pp.244-251), (Knotek, et al., 1980, pp. 282-286).

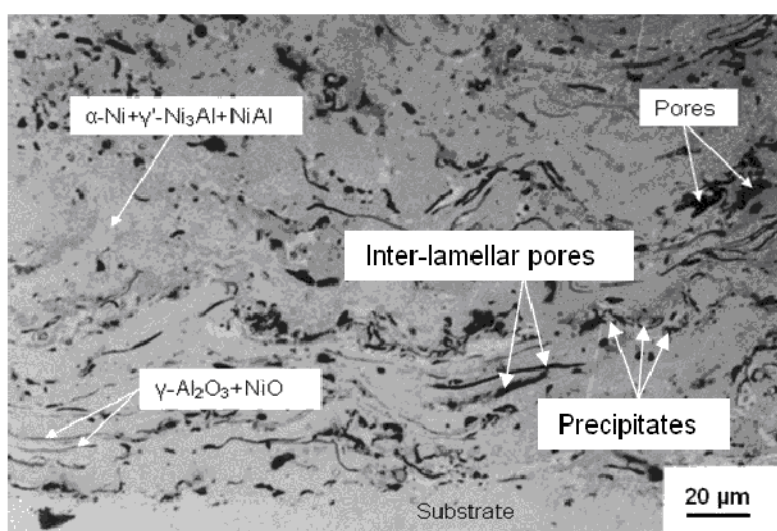


Figure 4 – Ni20Al coating microstructure deposited with a (PS) distance of 80 mm
Slika 4 – Mikrostruktura Ni20Al prevlake sa (PS) odstojanjem 80 mm

Dark inter-lamellar and spherical pores are clearly seen through the substrate layers. Due to a lower plasma spray distance, melted particles are more shortly retained in the plasma jet so rough oxides are not seen in the coating layers. Also, the coating layers do not show unmelted particles, microcracks and macrocracks. Precipitates of a spherical shape can be seen in a smaller proportion in the coating layers. The precipitates are a result of the impact of melted powder particles with the substrate and with the previously deposited layer. After the impact with the substrate, the melted particles chip at the ends, solidify and remain in the coating as residue.

Fig. 5 shows a scanning electron microphotography (SEM) of the surface of the Ni20Al coating deposited with the plasma spray at a distance of 80mm. The microphotography shows that the melted powder particles are uniformly distributed.

Unmelted particles are not present in the microstructure on the coating surface. Precipitates of a spherical shape can be seen in a small proportion. Along the boundaries of deposited particles, inter-lamellar pores and pores of irregular shape are observed. The microstructure of the Ni20Al coating surface is typical for atmospheric plasma spray (APS) coatings.

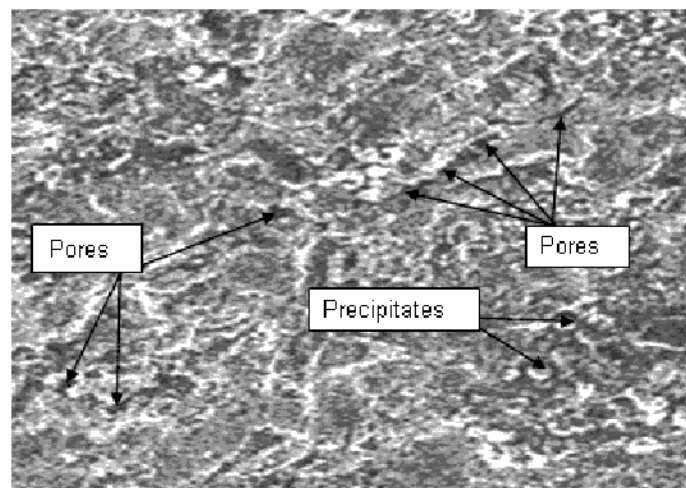


Figure 5 – SEM surface morphology of the Ni20Al coating deposited with a (PS) distance of 80 mm

Slika 5 – (SEM) Morfologija površine Ni20Al prevlake deponovane sa (PS) odstojanjem 80 mm

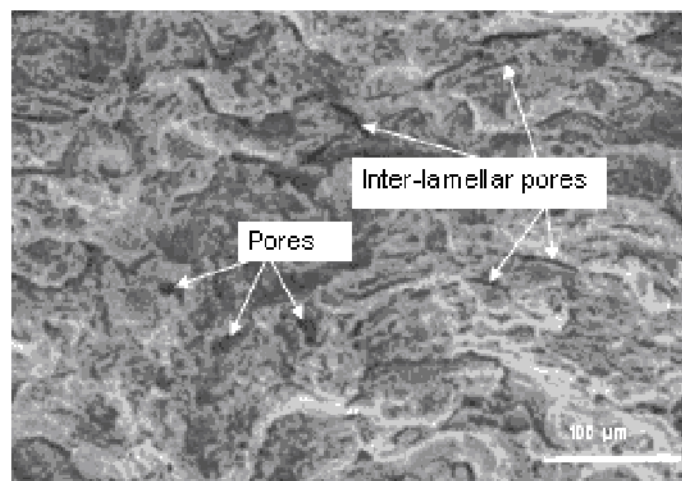


Figure 6 – SEM fracture morphologies of the Ni-20Al coating deposited with a (PS) distance of 80 mm.

Slika 6 – (SEM) Morfologije loma Ni-20Al prevlake deponovane sa (PS) odstojanjem 80 mm

Fig. 6 shows a microphotography of the fracture of the Ni20Al coating layers deposited with plasma spray at a distance of 80mm. The fracture morphology of the NiAl coating is seen at the fracture. The coating fracture is ductile. The microphotography clearly shows inter-lamellar pores and pores of irregular shapes present throughout the whole cross section of the coating; they did not affect the cohesion and adhesion strength significantly. Microcracks and macrocracks cannot be seen through the coating layers.

Conclusion

Ni20Al coatings were deposited by the procedure of atmospheric plasma spraying with three different plasma spraying (PS) distances of 80, 90 and 100 mm. The mechanical and microstructural characteristics of the deposited layer were researched and analyzed with the light microscope and the scanning electron microscope (SEM), which led to the following conclusions.

The coating microhardness, tensile bond strength and microstructure were in accordance with the terms of the plasma spray powder deposition. The quality of the coatings was directly dependent on the plasma spray distance.

The values of the coating microhardness increased with the increase of the plasma spraying distance due to the oxidation of melted particles and the formation of NiO and Y - Al_2O_3 oxides. The coating layers deposited with the highest plasma spraying distance of 100 mm had the highest microhardness values. These layers had the highest proportion of oxides. The layers deposited with the plasma spray distance of 80 mm had the microhardness values within the prescribed limits by the powder manufacturer. These layers had the lowest proportion of oxides.

The values of the tensile bond strength of the coatings for all three plasma spray distances were higher than the minimum value prescribed by the powder manufacturer. The highest value of the tensile bond strength is shown in the layers with the lowest plasma spray distance and with the smallest proportion of oxides in the microstructure. The fracture occurred along the coating/substrate interface in all investigated coatings. The values of the microhardness and the tensile bond strength were in correlation with their microstructures.

The structure of the layers of the deposited coatings is lamellar. The substrate consists of the solid solution of α - Ni and the intermetallic phases γ '-Ni₃Al and NiAl. In the lamellar base of the solid solution there are thin inter-lamellar NiO and Y - Al_2O_3 oxide films, derived from the oxidation of Ni and Al in the process of cooling and solidification of the melted powder particles. Inter-lamellar pores and spherical pores are present in

the coating layers. Rough oxides, unmelted particles, microcracks and macrocracks are not present in the coating layers while precipitates of a spherical shape are seen in a smaller proportion.

The obtained results have shown that the plasma spray distance significantly affects the structure and the mechanical properties of the coating layers. The testings of the coatings have confirmed that the best layers were deposited with a plasma spray distance of 80 mm.

The Ni20Al coatings, deposited with a plasma spray distance of 80 mm that showed the best microstructure and mechanical properties were deposited on the hardener of the GTD 2PV8 turbo gas engine on a radar station.

The application of the coating have significantly improved the efficiency of the hardener and the operational reliability. The effects of oxidation, vibration and wear have been significantly reduced on the part in the temperature range of 450 - 500°C. The effect of the Ni20Al coating has been tested and confirmed on the hardener of the GTD 2PV8 turbo gas engine on the radar station over a period of 100 hours in the "Moma Stanojlović" Aeronautical Plant - Batajnica.

Literature

ASM Handbook, 1992, Volume 3, Alloy Phase Diagrams, ASM International, Metals Park.

Cahn, R.W., 1991, Load-Bearing Ordered Intermetallic Compounds – A Historical View, MRS Bulletin, 5, pp.18–25.

Chen, J.Z., Herman, H. and Safai, S., 1993, Evaluation of NiAl and NiAl-B Deposited by Vacuum Plasma Spray, J. Thermal Spray Technology, 2, pp. 357–363.

Deevi, S.C., Sikka, V.K., Swindeman, C.J. and Seals, R.D., 1997, Reactive Spraying of Nickel-Aluminide Coatings, Journal of Thermal Spray Technology, 6(3), pp.335-344.

Hashemi, S.M., Enayati, M.H. and Fathi, M.H., 2009, *J. Therm. Spray. Technol.*, 18, 284.

Hiemann, R.B., 1996, Plasma – Spray Coating – Principles and Applications, VCH Publishers Inc., New York, USA.

Knotek, O., and Lugscheider, E., 1976, Thermoanalysis of Nickel Aluminum Spraying Powders, Proceedings of Eighth International Thermal Spray Conference, Miami Beach, pp.244-251.

Knotek, O., Lugscheider, E. and Cremer, K.H., 1980, Alumina and Aluminide Formation in Nickel Aluminum Spraying Powders, Proceedings of Ninth International Thermal Spray Conference, The Hague, pp.282-286.

Kumar, S. and Selvarajan, V., 2006, *Chem. Eng. Process.*, 45, 1029.

Liu, C.T. and White, C.L., 1985, High Temp. Ordered Intermetallic Alloys, Mat. Res. Soc., 39, pp.365–371.

Lee, N.Y., Stinton, D.P., Brandt, C.C., Erdogan, F., Lee, Y.D. and Mutasim, Z., 1996, J.Am. Cer. Soc., 79, 12, pp.3003–3009.

Liu, C.T. and Sikka, V.K., 1986, Nickel Aluminides for Structural Uses, J. of Metals, 38, pp. 13–16.

Material Product Data Sheet, 2011, Metco 404 NS 80% Nickel / 20% Aluminum Chemically Clad Powder, MSDS No 50 – 161, Sulzer Metco.

McPherson, R., and Cheang, P., 1989, Microstructural Analysis of Ni-Al Plasma Sprayed Coatings, Proceedings of Twelfth International Thermal Spray Conference, London, The Welding Institute, P17-1 - P17-10.

Moshksar, M.M., and Mirzaee, M., 2004, *Intermetallics*, 2004, 12, 1361.

Rosso, M., and Bennani, A., 1998, PM World Congress Thermal Spraying/Spray Forming, Granada, Spain, October, pp. 524–530.

Sampath, S., Gudmundsson, B., Tiwari, R., Herman H., 1990, in *Proc. Third National Thermal Spray Conf.*, Long Beach, CA, USA, 357.

Turbojet Engine – Standard Practices Manual (PN 582005)(2002), Pratt & Whitney, East Hartford, USA.

STRUKTURA I SVOJSTVA NIKAL-ALUMINID PREVLAKE DOBIJENE PLAZMA RASPRŠIVANJEM PRI ATMOSFERSKOM PRITISKU

OBLAST: hemijske tehnologije

VRSTA ČLANKA: originalni naučni članak

Sažetak:

Cilj ovog istraživanja je da se optimizacijom parametara deponovanja dobiju optimalne strukturne i mehaničke karakteristike Ni20Al slojeva, koji će se primeniti na delu za radarsku stanicu. Prah je deponovan atmosferskim plazma sprej (APS) postupkom sa plazma sprej (PS) odstojanjem 80, 90 i 100 mm. Prevlaka sa najboljim karakteristikama deponovana je na utvrđivaču turbo- gasnog motora GTD 2PV8 za radarsku stanicu, da bi se smanjio uticaj oksidacije i vibracija na habanje na 450–500°C. Procene Ni20Al slojeva prevlake urađene su na osnovu njihovih mikrostruktura, mikrotvrdoća i zatezne čvrstoće. Najbolju strukturu i mehaničke karakteristike pokazali su slojevi deponovani sa plazma sprej odstojanjem od 80 mm. Morfologija površine deponovane prevlake i morfologija loma najboljih slojeva ispitana je na SEM-u (skening elektronskom mikroskopu). Mikrostruktura slojeva deponovanih prevlaka ispitana je na svetlosnom mikroskopu. Mikrostruktura analiza deponovanih slojevima urađena je u skladu sa standardom Pratt-Whitney. Procena mehaničkih karakteristika slojeva urađena je ispitivanjem mikrotvrdoće metodom HV_{0.3} i čvrstoće spoja ispitivanjem na zatezanje. Istraživanja su pokazala da plazma sprej odstojanje bitno utiče na mehaničke osobine i mikrostrukture prevlaka. Efekat primene Ni20Al prevlake ispitivan je na utvrđivaču turbogasnog motora GTD 2PV8 na radarskoj stanici.

Uvod

Kompozitni nikal-aluminid prah Ni20Al razvijen je za potrebe vazduhoplovne industrije. Važna karakteristika je dobro deponovanje pra-ha plazma sprejom na atmosferskom pritisku (APS). Ovaj materijal ima dobru otpornost na oksidaciju, koroziju i eroziju. Materijal se može proiz-voditi kao legura ili kao kompozitni prah. Najvažnija karakteristika nikal-aluminida je velika čvrstoća i žilavost sa odličnom otpornošću na visoke temperature. NiAl prevlake deponovane plazma sprejom našle su široku primenu za zaštitu delova koji su izloženi povišenim i visokim temperatu-rama (Liu, White, 1985, pp.365-371), (Cahn, 1991, pp.18-25), (Chen, et al., 1993, pp.357-363), (Liu, Sikka, 1986, pp.13-16). Konkretno, ove pre-vlake imaju potencijalnu tražnju u avio-industriji i drugim industrijskim granama visokih performansi (Chen, et al., 1993, pp.357-363), (Liu, Sik-ka, 1986, pp.13-16). Ni20Al prevlaka tipično se koristi kao vezni sloj da poboljša adheziju naknadno deponovanog gornjeg sloja, kao srednji sloj za ublažavanje neusklađenosti materijala sa različitim koeficijentima termičkog širenja, kao oksidaciono otporan vezni sloj za radne tempera-ture do 650°C, za zaštitu i revitalizaciju delova uzrokovanih habanjem, oksidacijom i vibracijama. Da bi se dobio funkcionalni sloj neophodno je pažljivo odabrati kombinaciju plazma sprej parametara. Jedan od bitnih atmosferski plazma sprej parametara je plazma sprej odstojanje koje znatno utiče na oksidaciju istopljenih čestica u toku deponovanja na podlogu i na veličinu i sadržaj pora. Prevlake deponovane sa optimalnim parametrima su guste sa metalurškom vezom na interfejsu sa osnovnim materijalom. Prah Ni20Al deponovan plazma sprej postupkom na atmos-ferskom pritisku proizvodi lamelarne prevlake, koje se sastoje od čvrstog rastvora α -Ni u kojem se nalaze faze γ -Ni₃Al i u tragovima faza NiAl (Knotek, Lugscheider, 1976, pp.244-251), (Knotek, et al., 1980, pp. 282-286). Po dvojnog dijagramu Ni-Al, faza γ -Ni₃Al se gradi sa sadržajem aluminijuma od 12,5-14 tež.%Al, a faza NiAl sa sadržajem aluminijuma preko 17 tež.%Al (ASM Handbook, 1992). Između lamela osnove na međugranicama se nalaze oksidi NiO i γ -Al₂O₃ i pore.

U ovom radu prikazani su rezultati eksperimentalnih istraživanja uticaja plazma sprej odstojanja (PS) na mikrostrukturu i mehanička svo-jstva slojeva prevlake Ni20Al. Glavni cilj je bio da se prevlaka primeni na utvrđivaču turbo- gasnog motora GTD 2PV8 na radarskoj stanici. Urađene su tri grupe uzoraka sa tri različita plazma sprej odstojanja 80, 95 i 100 mm. Analizirane su i proučavane mikrostrukture i mehaničke karak-teristike prevlaka da bi se odabrala prevlaka najboljeg kvaliteta. Prevlaka sa najboljim karakteristikama testirana je na utvrđivaču turbogasnog mo-tora GTD 2PV8 na radarskoj stanici u periodu od 100 sati.

Materijali i eksperimentalni detalji

Materijal substrata na kojem su deponovani slojevi prevlake bio je od nerđajućeg čelika X15Cr13 (EN 1.4024) u termički neobrađenom stanju. Za proizvodnju prevlaka koristio se prah firme „Sulzer Metco“

sa oznakom Metco 404NS. Prah Ni20Al je kompozitni obloženi prah sa 80 tež.%Ni i 20 tež.%Al sa rasponom granulacije čestica praha od 53 μm do 90 μm . Za depoziciju praha korišćen je plazma pištolj SG -100 atmosferski plazma sprej sistema (APS) firme „Plasmadyne“. Plazma sprej pištolj SG -100 sastojao se od katode tipa K 1083 -129 A, anode tipa A 2084-145 i gas injektora tipa GI 2083-130. Kao gas korišćen je argon u kombinaciji sa helijumom i snaga napajanja od 40 KW. Plazma sprej odstojanje bio je osnovni parametar za deponovanje praha. U eksperimentu su korišćena tri različita plazma sprej odstojanja 80 mm, 90 mm i 100 mm. Pre deponovanja praha površine substrata su se hrapavile belim plemenitim elektrokorundom Al_2O_3 sa česticama veličine od 0,7 do 1,5 mm. Prevlake su deponovane sa debljinom do 0,15 mm. Ispitivanje strukturnih i mehaničkih karakteristika prevlaka rađeno je prema standardu Pratt & Whitney (Turbojet Engine, 2002, Pratt & Whitney). Za merenje mikrotvrdoće i analizu mikrostrukture uzorci su bili dimenzija 70×20×1,5 mm. Mikrotvrdoća prevlaka rađena je duž slojeva prevlaka metodom Vickers ($\text{HV}_{0.3}$) sa opterećenjem od 300 g. Ispitivanje čvrstoće spoja rađeno je metodom ispitivanja na zatezanje. Za merenje čvrstoće spoja između prevlake i substrata korišćeni su upareni uzorci dimenzija Ø25×50 mm od kojih je jedan bio sa deponovanom prevlakom. Ispitivanja su izvršena na sobnoj temperaturi pri brzini od 1 mm/min. Mikrostrukturna analiza slojeva prevlaka urađena je na svetlosnom mikroskopu. Morfologija površine deponovane prevlake i morfologija loma najboljih slojeva ispitana je na SEM-u (skening elektronskom mikroskopu).

Rezultati i diskusija

Vrednosti mikrotvrdoće slojeva prevlaka u direktnoj su vezi sa plazma sprej odstojanjem. Plazma sprej odstojanja bitno utiču na vrednosti mikrotvrdoće i čvrstoće spoja deponovanih slojeva. Slojevi Ni20Al prevlake deponovane sa najmanjim odstojanjem od 80 mm imaju vrednost mikrotvrdoće od 220 $\text{HV}_{0.3}$ koja je u granicama koju propisuje proizvođač praha (190–230 $\text{HV}_{0.3}$) (Material Product Data Sheet, 2011). Najveću vrednost mikrotvrdoće od 273 $\text{HV}_{0.3}$ imali su slojevi sa najvećim udelom oksida koji su deponovani sa plazma sprej odstojanjem od 100 mm. Slojevi prevlaka deponovanih sa većim odstojanjem imali su vrednosti mikrotvrdoće iznad propisanih vrednosti. Vrednosti mikrotvrdoća prevlaka bile su u skladu sa udelima oksida u deponovanim slojevima. Merenjem vrednosti zatezne čvrstoće spoja ustanovljeno je da su se za sva tri plazma sprej odstojanja dobile vrednosti više od 20.7MPa, koju propisuje proizvođač praha (Material Product Data Sheet, 2011). Sve deponovane prevlake imale su dobre vrednosti zatezne čvrstoće spoja koje proizilaze iz egzotermne reakcije Al i Ni koja se dešava za vreme depozicije praha (McPherson, Cheang, 1989), (Deevi, et al., 1997, pp.335-344), (Material Product Data Sheet, 2011). Najveću vrednost čvrstoće spoja od 39MPa pokazali su slojevi koji su deponovani sa najmanjim plazma sprej odstojanjem. Ti

slojevi imali su najmanji udeo oksida NiO i Y- Al_2O_3 i pora. Na slikama 3 i 4. su prikazane mikrostrukture slojeva deponovanih sa plazma sprej odstojanjem 80 mm, koji su imali najbolju mikrostrukturu i mehaničke karakteristike. Struktura prevlake je lamelarna. Slojevi prevlake deponovani su kontinualno bez prisustva mikropukotina i makropukotina. U slojevima nisu prisutne neistopljene čestice praha. Osnova prevlake sastoji se od čvrstog rastvora α - Ni svetlosive boje i intermetalnih faza γ -Ni $_3$ Al i NiAl (Sl.4). U lamelarnoj osnovi čvrstog rastvora i intermetalnih faza jasno se uočavaju tanki međulamelarni oksidni filmovi NiO i Y- Al_2O_3 koji potiču od oksidacije Ni i Al u procesu hlađenja i očvršćavanja istopljenih čestica praha (Knotek, Lugscheider, 1976, pp.244-251), (Knotek, et al., 1980, pp. 282-286). Kroz slojeve osnove jasno se uočavaju tamne inter-lamelarne i sferne pore. U slojevima prevlake se u manjem udelu uočavaju precipitati sfernog oblika. Precipitati su posledica sudara istopljenih čestica praha sa substratom i prethodno deponovanim slojem. Na slici 5. prikazana je (SEM) skenirana elektronska mikrofotografija površine Ni20Al prevlake deponovane sa plazma sprej odstojanjem 80 mm. Na mikrofotografiji se vidi da su istopljene čestice praha pravilno razlivene. U mikrostrukтури na površini prevlake nisu prisutne neistopljene čestice. U manjem udelu uočavaju se precipitati sfernog oblika. Duž granica deponovanih čestica uočavaju se međulamelarne pore i pore nepravilnog oblika. Mikrostruktura površine Ni20Al prevlake tipična je za (APS) atmosferski plazma sprej prevlake. Na slici 6. prikazana je mikrofotografija loma slojeva Ni20Al prevlake deponovane sa plazma sprej odstojanjem od 80 mm. Na prelomu se vidi morfologija loma NiAl prevlake. Prelom prevlake je žilav. Na mikrofotografiji se jasno vide interlamelarne pore i pore nepravilnog oblika koje su prisutne po celom preseku prevlake koje nisu bitno uticale na koheziju i adheziju čvrstoću.

Zaključak

Atmosferski plazma sprej postupkom su deponovane Ni20Al prevlake sa tri različita (PS) plazma sprej odstojanja 80, 90 i 100 mm. U ovom radu, istraživane su i analizirane mehaničke i mikrostrukturne karakteristike deponovanih slojeva na svetlosnom mikroskopu i (SEM) skenirana elektronskom mikroskopu, na osnovu čega se došlo do sledećih zaključaka.

Mikrotvrdoća, zatezna čvrstoća spoja i mikrostrukture prevlaka su bile u skladu sa uslovima plazma sprej deponovanja praha. Vrednosti mikrotvrdoće prevlaka se povećavaju sa povećanjem plazma sprej odstojanja zbog oksidacije istopljenih čestica. Slojevi prevlake deponovane sa najvećim plazma sprej odstojanjem 100 mm su imali najveće vrednosti mikrotvrdoće. Slojevi deponovani sa plazma sprej odstojanjem 80 mm su imali vrednosti mikrotvrdoće u granicama koje je propisao proizvođač praha. Ti slojevi imali su najmanji udeo oksida NiO i Y- Al_2O_3 .

Najveću vrednost zatezne čvrstoće spoja su pokazali slojevi sa najmanjim plazma sprej odstojanjem koji su u mikrostrukтури imali naj-

manji udeo oksida. Za sve ispitivane prevlake lom je išao na interfejsu između prevlake i substrata.

Struktura slojeva deponovanih prevlaka je lamelarna. Metalografska analiza prevlaka na svetlosnom mikroskopu je pokazala da se osnova prevlake sastoji od čvrstog rastvora α - Ni i intermetalnih faza γ -Ni₃Al i NiAl. U lamelarnoj osnovi čvrstog rastvora su prisutni tanki međulamelarni oksidni filmovi NiO i Y- Al₂O₃ koji potiču od oksidacije Ni i Al u procesu hlađenja i očvršćavanja istopljenih čestica praha. U slojevima prevlaka su prisutne interlamelarne i sferne pore. U slojevima prevlaka nisu prisutni grubi oksidi, neistopljene čestice, mikropukotine i makropukotine. Dobijeni rezultati su pokazali da plazma sprej odstojanje bitno utiče na strukturu i mehaničke karakteristike slojeva prevlaka.

Primenom Ni20Al prevlake deponovane sa plazma sprej odstojanjem od 80 mm koja je pokazala najbolju mikrostrukturu i mehaničke karakteristike, deponovana je na utvrđivaču turbomlaznog motora 2PV8 za radarsku stanicu. Primenom prevlake znatno se poboljšala efikasnost utvrđivaču turbomlaznog motora i pouzdanost rada. Na delu je znatno smanjen uticaj oksidacije i vibracija na habanje u rasponu temperature od 450 do 500°C. Efekat primene Ni20Al prevlake ispitan je i potvrđen na utvrđivaču turbogasnog motora GTD 2PV8 na radar-skoj stanici u Vazduhoplovnom zavodu „Moma Stanojlović” – Batajnica u periodu od 100 sati.

Ključne reči: strukturne osobine, radar, osobina, plazma, mikrostruktura, slojevi, depoziti, prevlake.

Datum prijema članka/Paper received on: 10. 05. 2012.

Datum dostavljanja ispravki rukopisa/Manuscript corrections submitted on:

23. 02. 2013.

Datum konačnog prihvatanja članka za objavljivanje/ Paper accepted

for publishing on: 25. 02. 2013.

IDENTIFIKACIJA PARAMETARA MODELA JEDNOSMERNOG MOTORA U PROSTORU STANJA

Momir R. Stanković, Stojadin M. Manojlović,
Univerzitet odbrane u Beogradu,
Vojna akademija, Beograd,
Milica B. Naumović, Elektronski fakultet Niš

DOI: 10.5937/vojtehg61-2437

OBLAST: elektrotehnika (automatika i upravljanje)
VRSTA ČLANKA: originalni naučni članak

Sažetak:

U radu je opisan jedan vrlo praktičan i edukativan metod identifikacije parametara modela u prostoru stanja motora jednosmerne struje. Opisani su svi eksperimenti neophodni za određivanje mehaničkih i električnih parametara jednosmernog motora u laboratorijskom okruženju. Parametri motora su estimirani primenom metode minimizacije srednje kvadratne greške. Poređenjem odziva realnog motora i modela dobijenog na osnovu vrednosti estimiranih parametara verifikovan je kvalitet opisanog metoda.

Ključne reči: identifikacija, estimacija parametara, model u prostoru stanja, motor jednosmerne struje.

Uvod

Identifikacija objekta upravljanja predstavlja početni i veoma važan korak u analizi i sintezi sistema automatskog upravljanja. Naime, od kvaliteta identifikacije u velikoj meri zavisi i kvalitet svih ostalih koraka u proračunima vezanim za upravljanje sistemom. Ona sama po sebi ne predstavlja cilj, već služi za formiranje baze podataka za dalju analizu i sintezu sistema. Do danas su razvijene mnoge metode identifikacije sistema, a izbor metode zavisi od samog sistema koji se identifikuje, od veličina sistema koje su dostupne merenju, od forme modela koji se zahteva i dr.

Klasične metode identifikacije baziraju se na vremenskom ili frekvencijskom odzivu sistema na odgovarajuću pobudu, a kao rezultat se dobija model sistema u formi funkcije prenosa (Ljung, 1999), (Astrom, Wittenmar, 1997). Uz pomoć odgovarajućeg akvizicionog sistema čitav postupak identifikacije može se automatizovati i učiniti dovoljno fleksibil-

nim za primenu na komponentama različite namene i karakteristika (Stanković, Manojlović, 2011, pp. 131–145), (Stanković, Manojlović, Jovanović, 2012, pp. 69–76).

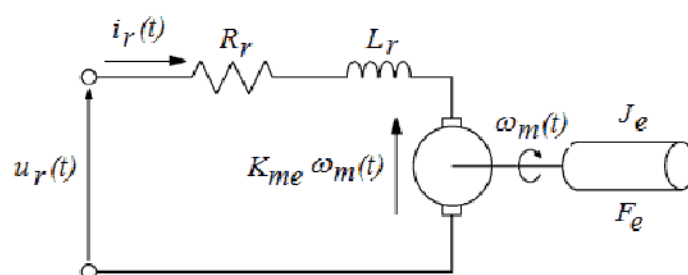
Moderniji pristup sistemima upravljanja podrazumeva analizu i sintezu sistema u prostoru stanja. Samim tim, razvijeni su i algoritmi identifikacije parametara modela sistema u prostoru stanja koji se zasnivaju na savremenijim teorijskim dostignućima iz oblasti modeliranja, obrade signala i sl. (Al-Qassar, Mazin, 2008, pp. 190–196), (Hadeif, Bourouina, 2008).

Osim toga, programski paketi, kao na primer MATLAB/SIMULINK, imaju razvijene specijalizovane alate namenjene za identifikaciju sistema. Ovi alati baziraju se na složenim algoritmima koji su ugrađeni u odgovarajuće funkcije. Potrebno je uneti ulazno/izlazne signale, definisati metod, formu modela i parametre koji se identifikuju, a preko komunikacijskih prozora moguće je podešavati tačnost algoritma, pratiti tok identifikacije i, na kraju, verifikovati dobijene rezultate (Stanković, Manojlović, Jovanović, 2012, pp. 69–76).

U ovom radu opisan je jedan vrlo praktičan metod identifikacije parametara modela u prostoru stanja motora jednosmerne struje. Metod se zasniva na predstavljanju jednosmernog motora, koji je sistem drugog reda, pomoću dva podsistema prvog reda: električnog i mehaničkog. Na osnovu odziva ovih podsistema na odgovarajuću pobudu (pseudo-slučajna binarna sekvenca) izvršena je estimacija parametara primenom metode minimizacije srednje kvadratne greške. Verifikacijom dobijenih rezultata potvrđen je kvalitet primenjene metode.

Model jednosmernog motora i estimacija parametara metodom minimizacije srednje kvadratne greške

Na slici 1 prikazana je principiska šema motora jednosmerne struje, upravljanog strujom rotora.



Slika 1 – Principiska šema jednosmernog motora
Figure 1 – Principle scheme of a DC motor

Dinamičko ponašanje motora sa slike 1 opisano je sledećim diferencijalnim jednačinama (Đurović, Kovačević, 2006, pp. 19–22):

$$L_r \frac{d}{dt} i_r(t) + R_r i_r(t) + K_{me} \omega_m(t) = u_r(t) \quad (1)$$

$$J_e \frac{d}{dt} \omega_m(t) + F_e \omega_m(t) = K_{em} i_r(t) \quad (2)$$

gde su:

- $u_r(t)$ – armaturni napon,
- $i_r(t)$ – struja armature,
- R_r – otpornost armaturnog namotaja,
- L_r – induktivnost armaturnog namotaja,
- ω_m – ugaona brzina osovine rotora,
- J_e – ekvivalentni moment inercije,
- F_e – ekvivalentni koeficijent viskoznog trenja,
- K_{em} i K_{me} – elektro-mehanička i mehaničko-električna konstanta motora, respektivno.

Motor jednosmeme struje, opisan jednačinama (1) i (2), kao sistem sa jednim ulazom i jednim izlazom, može se predstaviti kontinualnim modelom u prostoru stanja na sledeći način:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) = \begin{pmatrix} -\frac{R_r}{L_r} & -\frac{K_{me}}{L_r} \\ \frac{K_{em}}{J_e} & -\frac{F_e}{J_e} \end{pmatrix} \mathbf{x}(t) + \begin{pmatrix} \frac{1}{L_r} \\ 0 \end{pmatrix} u(t) \quad (3)$$

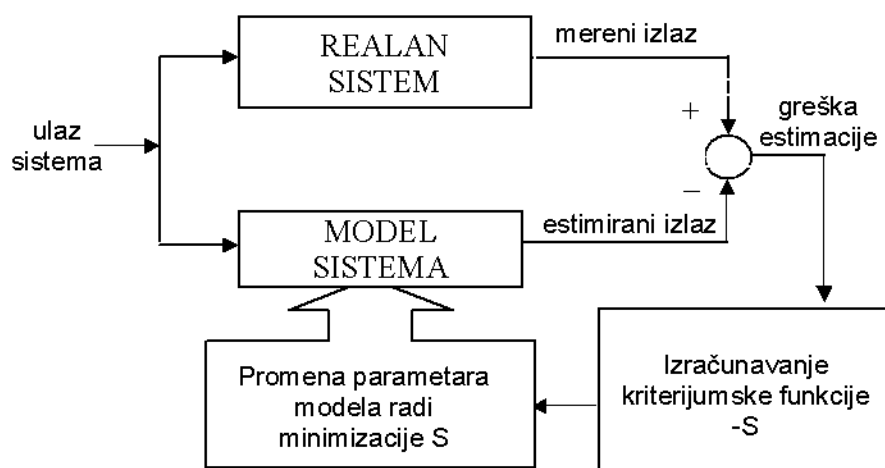
$$y(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & K_{tg} \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) \quad (4)$$

gde su: $\mathbf{x}(t) = [i_r(t) \quad \omega_m(t)]^T$, $u(t) = u_r(t)$, $y(t) = V_t(t) = K_{tg} \omega_m(t)$.

Merenje ugaone brzine rotora motora vrši se pomoću tahogeneratorskog napona, tako da $V_t(t)$ i K_{tg} predstavljaju napon i konstantu tahogeneratorskog napona, respektivno.

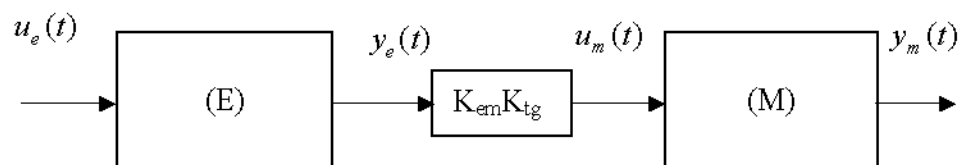
Uočimo da je sistem u potpunosti opisan pomoću šest parametara: R_r , L_r , J_e , F_e , K_{me} i K_{em} .

Postupak estimacije parametara primenom metode minimizacije srednje kvadratne greške ilustrovan je na slici 2 (Eykhoff, Wilsoons, 1974).



Slika 2 – Princip estimacije parametara metodom minimizacije srednje kvadratne greške
Figure 2 – Principle of the least squares method

Motor jednosmerne struje, čija je funkcija prenosa drugog reda, može se predstaviti preko dva podsistema prvog reda, kao što je prikazano na slici 3. Prvi podsistem je električni (E), iz kojeg se estimiraju električni, dok se iz drugog, tj. mehaničkog (M), estimiraju mehanički parametri (Basilio, Moreira, 2004).



Slika 3 – Motor jednosmerne struje prikazan preko dva sistema prvog reda
Figure 3 – DC motor represented by two first-order systems

Ako se jednačina (1) napiše na sledeći način:

$$L_r \frac{d}{dt} i_r(t) + R_r i_r(t) = u_r(t) - \frac{K_{me}}{K_{tg}} V_t(t) \quad (5)$$

model u prostoru stanja za električni podsistem dobija oblik:

$$\begin{aligned}\dot{x}_e(t) &= A_e x_e(t) + B_e u_e(t) \\ y_e(t) &= x_e(t)\end{aligned}\quad (6)$$

gde su:

$$x_e(t) = i_r(t), \quad A_e = -R_r / L_r, \quad B_e = 1 / L_r, \quad u_e(t) = u_r(t) - (K_{me} / K_{lg}) V_t(t)$$

Imajući u vidu da je algoritam estimacije diskretne prirode, potrebno je diskretizovati model (6). Diskretni model opisan je diferencnim jednačinama:

$$\begin{aligned}x_e[t_{k+1}] &= E_E x[t_k] + F_E u_e[t_k] \\ y_e[t_k] &= x_e[t_k]\end{aligned}\quad (7)$$

gde su:

$$E_E = e^{-T(R_r/L_r)}, \quad F_E = (1/R_r)(1 - E_E), \quad t_k = kT \quad (8)$$

dok je T – period diskretizacije.

Polazeći od jednačine (7) i parova izmerenih vrednosti $(i_r(t_i), u_e(t_i))$ $i = 0, 1, \dots, k-1$, može se formirati sledeća matricna jednakost:

$$\begin{bmatrix} i_r(t_1) \\ i_r(t_2) \\ \vdots \\ i_r(t_k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_r(t_0) & u_e(t_0) \\ i_r(t_1) & u_e(t_1) \\ \vdots & \vdots \\ i_r(t_{k-1}) & u_e(t_{k-1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_E \\ F_E \end{bmatrix} \Leftrightarrow \mathbf{i}_r = \mathbf{M}_e \boldsymbol{\theta}_e \quad (9)$$

Vektor estimiranih vrednosti parametra nalazi se na sledeći način:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_e = [\mathbf{M}_e^T \mathbf{M}_e]^{-1} \mathbf{M}_e^T \mathbf{i}_r \quad (10)$$

Slično se jednačina (2) može napisati u obliku:

$$J_e \frac{d}{dt} V_t(t) + F_e V_t(t) = K_{em} K_{tg} i_r(t) \quad (11)$$

Za mehanički podsistem model u prostoru stanja poprima sledeći oblik:

$$\begin{aligned}\dot{x}_m(t) &= A_m x_m(t) + B_m u_m(t) \\ y_m(t) &= x_m(t)\end{aligned}\quad (12)$$

gde su: $x_m(t) = V_t(t)$, $A_m = -F/J$, $B_m = 1/J$, $u_m(t) = K_{em} K_{tg} i_r(t)$

Prevođenjem u diskretan oblik dobijamo:

$$\begin{aligned}x_m[t_{k+1}] &= E_M[t_k] + F_M u_m[t_k] \\ y_m[t_k] &= x_m[t_k]\end{aligned}\quad (13)$$

gde je:

$$E_M = e^{-T(F_e/J_e)}; \quad F_M = (1/F_e)(1 - E_M); \quad t_k = kT \quad (14)$$

Polazeći od jednačine (12) i parova izmerenih vrednosti $(V_t(t_i), u_m(t_i))$ $i = 0, 1, \dots, k-1$, može se formirati sledeća matična jednakost:

$$\begin{bmatrix} V_t(t_1) \\ V_t(t_2) \\ \vdots \\ V_t(t_k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_t(t_0) & u_m(t_0) \\ V_t(t_1) & u_m(t_1) \\ \vdots & \vdots \\ V_t(t_{k-1}) & u_m(t_{k-1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_M \\ F_M \end{bmatrix} \Leftrightarrow \mathbf{V}_t = \mathbf{M}_m \boldsymbol{\theta}_m \quad (15)$$

Opisanim postupkom estimacije, vektor estimiranih vrednosti parametara dobija se na osnovu sledeće matične jednačine (Eykhoff, Wilsoons, 1974):

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_m = [\mathbf{M}_m^T \mathbf{M}_m]^{-1} \mathbf{M}_m^T \mathbf{V}_t \quad (16)$$

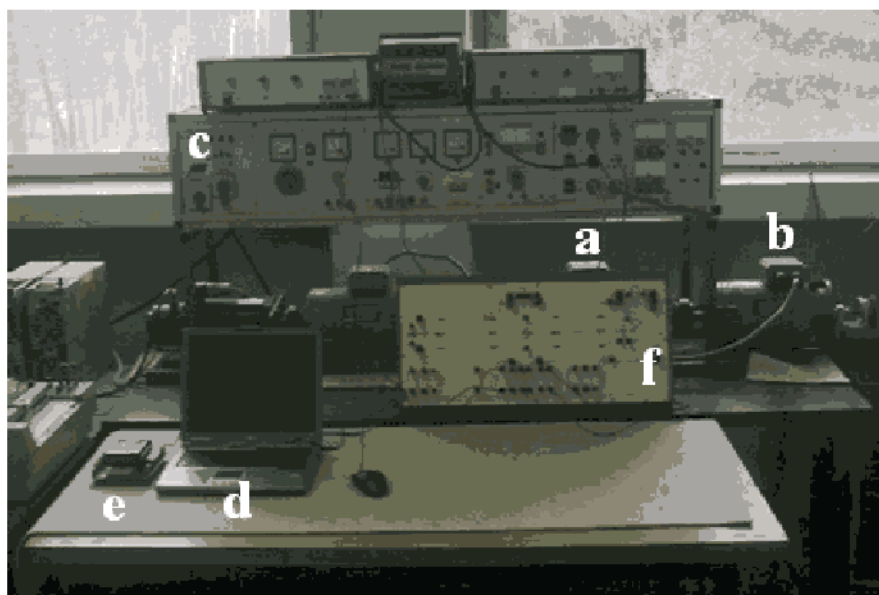
Na osnovu relacija (8) i (14) i estimiranih vrednosti $\hat{E}_E$, $\hat{F}_E$, $\hat{E}_M$, $\hat{F}_M$ nepoznati parametri motora računaju se prema formulama:

$$\begin{aligned}R_v &= (1 - \hat{E}_E) / \hat{F}_E \\ L_v &= -R_v T / \ln(\hat{E}_E) \\ F_e &= (1 - \hat{E}_M) / \hat{F}_M \\ J_e &= -F_e T / \ln(\hat{E}_M)\end{aligned}\quad (17)$$

Postupak određivanja preostala dva parametra, elektro-mehaničke i mehaničko-električne konstante, opisan je u narednom poglavlju.

Eksperimentalni rezultati

Identifikacija je realizovana kroz tri eksperimenta u laboratorijskim uslovima. Aparatura koja je korišćena prikazana je na slici 4. Objekat identifikacije je jednosmerni motor (a) sa nezavisnom pobudom, nominalne snage 0,34 kW. On je spregnut sa jednosmernim generatorom (b) koji u ovom spoju ima ulogu opterećenja. Pult (c) opremljen je odgovarajućim izvorima za napajanje i merim instrumentima. Akvizicioni sistem sastoji se od računara (d) i kartice (e). Svi spojevi vrše se na tabli (f) gde su na pregledan način izvedeni neophodni kontakti.



Slika 4 – Aparatura korišćena u eksperimentima
Figure 4 – Apparature used in experiments

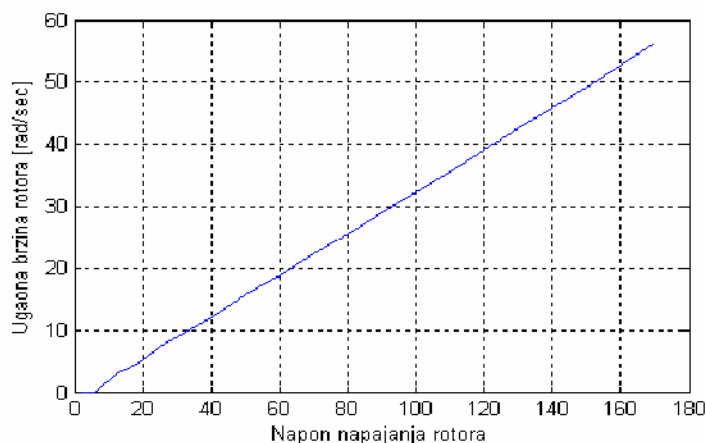
Kako je u opštem slučaju jednosmerni motor nelinearna komponenta, prvo je potrebno odrediti oblast linearnog režima rada motora, što je bio cilj prvog eksperimenta.

Određivanje linearnog režima rada motora

Određivanje linearnog režima rada motora jednosmerne struje predstavlja definisanje granica napona rotora $u_r(t)$, u kojima se ugaona brzina osovine motora linearno menja. Ovaj eksperiment je veoma važan za da-

Ili rad, jer sve definisane jednačine opisuju rad motora sa svojevrsnim aproksimacijama koje su dozvoljene samo u linearnom režimu rada. Naime, prilikom dobijanja modela uzeto je u obzir samo elektromagnetno polje statora, dok je elektromagnetno polje rotora zanemareno, pa je tako, prema jednačinama (3) i (4), usvojeno da je moment motora proporcijalno srazmeran struji rotora, a indukovana elektromotorna sila proporcionalno zavisna od ugaone brzine rotora. Ovakav model je dobar u okolini konkretne radne tačke, odnosno za konkretnu vrednost napona napajanja rotora.

Napajanje rotorskog namotaja vršeno je jednosmernim naponom koji je menjan u opsegu od 0 V do 170 V. Za različite vrednosti napona napajanja merena je ugaona brzina osovine motora pomoću tahogeneratora. Grafik zavisnosti ugaone brzine rotora od napona rotora, prikazan je na slici 5.



Slika 5 – Grafik zavisnosti ugaone brzine rotora od napona rotora
Figure 5 – Rotor shaft angular velocity vs armature voltage

Sa slike 5 se vidi da do napona od 10 V motor ima „mrtvu” zonu, a nakon te vrednosti nastupa linearni režim rada.

Estimacija konstanti K_{em} i K_{me}

Kada se elektromehanička i mehaničko-električna konstanta motora izraze u jedinicama SI sistema (prva u Vs/rad a druga u Nm/A) one imaju istu vrednost (Gugić, 1987). To znači da je dovoljno odrediti samo jednu od njih. Zadatak drugog eksperimenta bio je određivanje mehaničko-električne konstante, koja opisuje zavisnost indukovane elektromotorne sile na krajevima rotora motora od ugaone brzine obrtanja osovine motora.

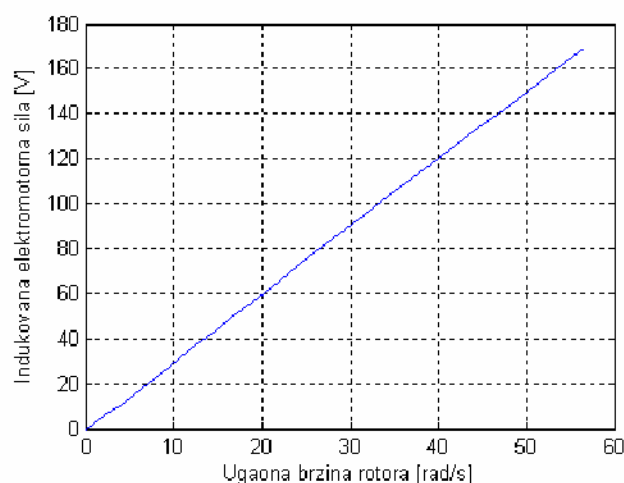
U ovom eksperimentu osovina motora okretana je pomoću drugog motora. Za različite vrednosti ugaone brzine ω_m , na krajevima rotorskog namotaja merena je vrednost napona. Kako u ovom slučaju motor radi u generatorskom režimu, izmerene vrednosti napona predstavljaju indukovanu elektromotornu silu. Na osnovu n izmerenih vrednosti formirani su sledeći vektori:

$$\mathbf{E}_{\text{ind}} = [E_1 \ E_2 \ \dots \ E_n]^T \quad \text{ i } \quad \mathbf{V}_t = [V_{t1} \ V_{t2} \ \dots \ V_{tn}]^T \quad (18)$$

Primenom algoritma metode najmanjih kvadrata dobijamo izraz za određivanje vrednosti konstante K_{me} (Eykhoff, Wilsoons, 1974):

$$K_{me} = K_{tg} \frac{\mathbf{V}_t^T \mathbf{E}_{\text{ind}}}{\mathbf{V}_t^T \mathbf{V}_t} \quad (19)$$

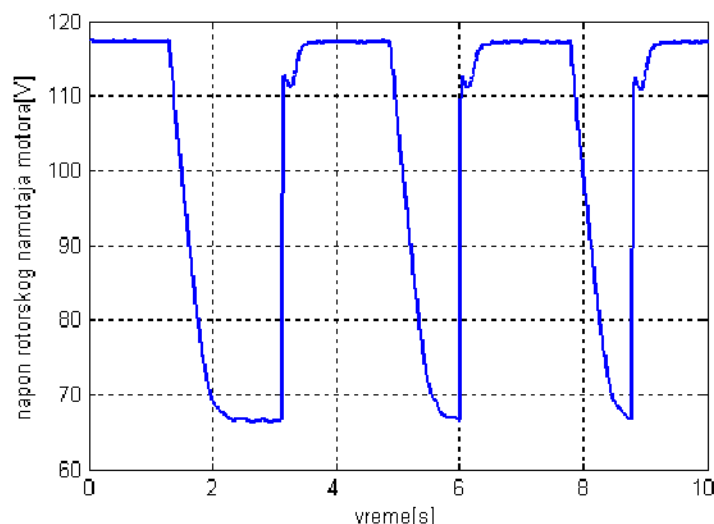
Za konkretne vrednosti dobija se $K_{me}=2.995 \text{ Vs/rad}$, odnosno $K_{em}=2.995 \text{ Nm/A}$. Grafik zavisnosti indukovane elektromotome sile od ugaone brzine osovine motora prikazan je na slici 6.



Slika 6 – Grafik zavisnosti indukovane EMS od ugaone brzine rotora
Figure 6 – Induced armature voltage vs shaft velocity

Estimacija R_r , L_r , J_e , i F_e

Radi realizacije eksperimenta kojim ćemo estimirati vrednosti R_r , L_r , F_e i J_e rotorski namotaj motora jednosmeme struje napajan je ručno generisanim slučajnim signalom, prikazanim na slici 7.



Slika 7 – Signal doveden na rotorski namotaj motora
Figure 7 – Applied armature voltage

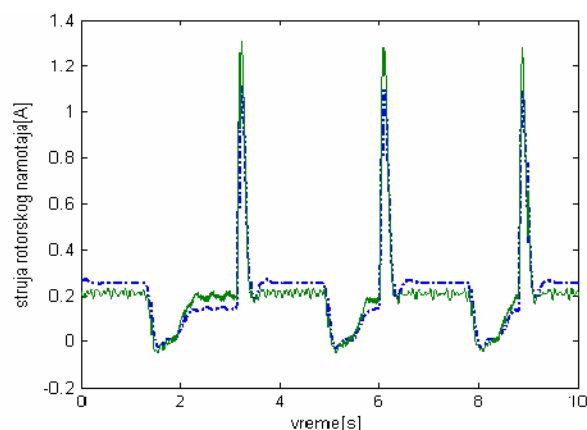
Pomoću akvizicione kartice izvršeno je snimanje ulaznog napona $u_r(t)$, struje rotora $i_r(t)$ i napona tahogeneratora $V_t(t)$ sa periodom odabiranja signala $T=0,01s$. Na osnovu izraza (9) i (15) formirane su odgovarajuće matrice i pomoću jednačina (10) i (16) dobijene su estimirane vrednosti $\hat{E}_E$, $\hat{F}_E$, $\hat{E}_M$, $\hat{F}_M$. Uvrštavanjem estimiranih vrednosti u relacije (17) izračunate su vrednosti parametara motora:

$$R_r = 25.16 \, \Omega, \quad L_r = 1.87 \, H, \quad J_e = 0.0204 \, \text{kgm}^2, \quad F_e = 0.0204 \, \text{kgm}/(\text{rad/s}).$$

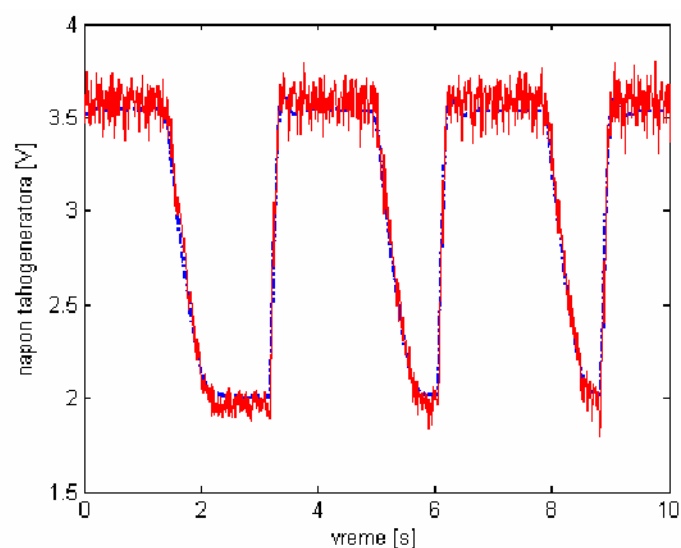
Verifikacija dobijenih rezultata

Radi verifikacije estimiranih parametara izrađen je model sistema u programskom paketu SIMULINK i realan signal doveden je na ulaz modela (Mathworks, 1996). Na slici 8 prikazani su odzivi električnog podsistema motora, tj. struja rotorskog namotaja realnog motora (puna zelena linija) i modela u SIMULINK-u (plava linija). Slika 9 prikazuje odzive mehaničkog podsistema motora, tj. napona tahogeneratora realnog motora (crvena linija) i modela (plava linija).

Sa slika se vidi da su odzivi modela i realnog motora veoma slični, pa se može zaključiti da primenjeni postupak identifikacije parametara daje zadovoljavajuće rezultate.



Slika 8 – Realna (zelena) i simulirana (plava) vrednost struje rotorskog namotaja
Figure 8 – Real (green) and simulated (blue) value of the armature current



Slika 9 – Realna (crvena) i simulirana (plava) vrednost napona tahogeneratora
Figure 9 – Real (red) and simulated (blue) value of the tachogenerator voltage

Zaključak

U radu je prikazan jedan postupak identifikacije parametara modela jednosmernog motora u prostoru stanja. Jednosmerni motor je u opštem slučaju sistem drugog reda. Međutim, motor se može predstaviti pomoću dva podsistema prvog reda: električnog i mehaničkog. Snimanjem odziva

oba podsistema na odgovarajuću pobudu, primenom algoritma minimizacije srednje kvadratne greške, estimirani su svi parametri modela.

Analiziran je konkretan motor srednje snage i u laboratorijskim uslovima izvršena su sva potrebna merenja. U radu su opisani svi neophodni eksperimenti koji su omogućili potpunu identifikaciju. Može se zaključiti da se opisanim postupkom identifikacije dobijaju rezultati zadovoljavajućeg kvaliteta.

Literatura

Al-Qassar, A., Mazin, Z., 2008, Experimental determination of electrical and mechanical parameters of dc motor using genetic Elman neural network, *Journal of Engineering Science and Technology* Vol. 3, pp. 190 – 196.

Astrom, K., Wittenmark, B., 1997, Computer-Controlled Systems: Theory and design, Third edition, *Tsinghua University Press*, Prentice Hall.

Basilio, J., Moreira, M., 2004, State-Space Parameter Identification in a Second Control Laboratory.

Đurović, Ž., Kovačević B., 2006, Signali i sistemi, *Akademski misao*, pp. 19-22.

Eykhooff, P., Wilsoons, J., 1974, System Identification Parameter and State Estimate.

Gugić, S., 1987, Električni servosistemi, *Školska knjiga*.

Hadef, A., Bourouina, A., 2008, Parameter identification of a DC motor via moments method, *Iranian Journal of Electrical and Computer Engineering*, Vol. 7/2

Ljung, L., 1999, System Identification: Theory for the User, *Second edition*, Prentice Hall.

Stanković, M., Manojlović, S., 2011, Primena akvizicione kartice u identifikaciji pozicionog servosistema, *Vojnotehnički glasnik/Military Technical Courier*, Vol. 59, No. 3, pp.131-145.

Stanković, M., Manojlović, S., Jovanović, Z., 2012, Acquisition system for analysis and design of electrical servo system based on USB DAQ card DT9812, *FACTA UNIVERSITATIS, Series: Automatic Control and Robotics*, Vol. 11, pp. 69–79.

Mathworks, Matlab, the Language of Technical Computing, 1996, *Natick*.

IDENTIFICATION OF THE PARAMETERS OF A DC MOTOR STATE SPACE MODEL

FIELD: Electrical Engineering

ARTICLE TYPE: Original Scientific Paper

Summary:

A method for the identification of the DC state space model parameters based on the minimization of the error function using the least squares method is described in this paper. The algorithm is practically

applied in the laboratory environment on an industrial DC motor. The verification of the results was performed by comparing the characteristic signals of real and modeled systems. The results show that the quality of the identification is satisfactory.

Introduction

The identification of system parameters is the first step in the analysis and synthesis of control systems. Identification Quality strongly impacts on the results of all other computations. In the theory of automatic control, many methods of identification are developed. Which method will be applied depends on the characteristics of the system. In this paper, we described an identification algorithm based on the least squares method. A practical test of this algorithm of estimation is done on a DC motor.

Parameter estimation with the least squares method

A DC motor is a second-order system described with two differential equations: one which describes electrical and one which describes mechanical parts of the motor. The idea is to analyse the motor as two first-order systems. The main signals are responses of two first order sub-systems on appropriate inputs. Using a discrete state-space model of the motor and applying the least square method on the recorded signals, we get straightforward equations for the computation of all the necessary parameters: R_n , L_n , J_n , F_n , K_{me} and K_{em} (Eykhoff, Wilsoons, 1974).

Experimental results

The practical application was realized in the laboratory where a DC middle-power motor was used as a control object. It is coupled with a DC generator which serves as a load. Generation of the input signals and measure of the responses were performed with the acquisition system based on the appropriate acquisition card and the MATLAB-SIMULINK software. The three following experiments were described:

1. Determination of the linear mode of the DC motor: determination of the interval of the armature voltage in which the rotor velocity of the rotor shaft changes linearly. This experiment is of great importance for further work because all derived equations, describing the operation of the DC motor, are valid if the motor is treated as a linear component.

2. Estimation of the value of K_{em} and K_{me} : the DC motor was in the generator mode with the coupled DC generator working in the motor mode. For different velocities of the rotor shaft, the induced voltage on the motor armature is measured. By forming the two column vectors based on the measurement values and using the least squares algorithm formula we get K_{em} . It should be noted that the coefficients K_{em} and K_{me} have the same numerical values when they are represented in appropriate SI units.

3. Estimation of the value of R_a , L_a , J_e and F_e : the armature winding is supplied with the appropriate input, and the armature current and the rotor velocity (with tachogenerator) were measured with the acquisition card. Applying the least squares estimation algorithm, we get the values of the required parameters of the DC motor.

Validation of the results

Based on the estimated parameters, the state space model and the transfer function were formed as appropriate models for the DC motor. The simulation was performed in the MATLAB-SIMULINK programme. The simulated and real signals were compared. The close agreement of these signals, as shown in Figs. 7 and 8, confirms the quality of the described algorithm.

Conclusion

The identification process is the first and very important step in the control system analysis and synthesis. In this paper, the algorithm of the identification of the state space model parameters of the DC motor is presented. The algorithm is based on the least squares method and all the necessary experiments in the laboratory conditions were described. The obtained results show good agreement between simulated and real systems.

Key words: identification, parameter estimation, state space model, DC motor.

Datum prijema članka/Paper received on: 23. 08. 2012.

Datum dostavljanja ispravki rukopisa/Manuscript corrections submitted on:

21. 10. 2012.

Datum konačnog prihvatanja članka za objavljivanje/Paper accepted for publishing on: 23. 10. 2012.

ТЕПЛОВЫЕ НАСОСЫ В АВИАЦИИ

Леонид Иванович Гречихин,
Минский государственный высший авиационный колледж,
Минск, Республика Беларусь

DOI: 10.5937/vojtehg61-3538

ОБЛАСТ: механика, аэродинамика

ВИД СТАТЬИ: оригинальная научная работа

Краткое содержание:

Рассмотрен общий принцип преобразования энергий в открытых энергосистемах. Дано обоснование работы теплового насоса на основе молекулярно-кинетической теории. Выяснены разные механизмы охлаждения самолета при его полете в неподвижной атмосфере. Показано, в каких условиях электромагнитные системы могут работать как тепловой насос. Установлено, что самолет в полете представляет собой тепловой насос.

Ключевые слова: *энергокомплекс, тепловой насос, воздушный тепловой насос, электромагнитный тепловой насос.*

Введение

Полеты самолетов в земной атмосфере стали возможными только потому, что самолет по отношению к окружающей среде является открытой системой. В результате возникают лобовое сопротивление и подъемная сила крыла самолета. При этом работающие на борту самолета двигатели преодолевают только лобовое сопротивление и подъем самолета, а на вращение вентиляторов и турбин черпается из окружающей среды. Например, выполненный полный аэродинамический расчет при полете самолета ТУ-134 (Гречихин, 2007, стр. 33-104) показал следующее. Два установленных на нем турбореактивных двигателя Д-30 II серии при крейсерском полете дают тягу 3,2 Т, а общее лобовое сопротивление составляет 4,4 Т. Недостающая тяга обеспечивается возникновением срывного течения за фюзеляжем (Гречихин, 2007, стр. 33-104). При крейсерском полете (номинальный режим) расход топлива составляет 1432 кг/ч (Лигум, 1975, стр. 320). Общая энергия, которая выделяется в единицу времени при полном сгорании топлива ~ 17 600 л.с. На преодоление лобового сопротивления при скорости движения 900 км/ч и на подъем самолета тратится мощность 13600 л.с. На вращение вентиляторов, компрессоров и турбин тратится мощность только 4000 л.с.

Известно, что при проведении стендовых испытаний мощность, затрачиваемая на вращение вентиляторов, компрессоров и турбин двух двигателей D-30 II серии, составляет 34 000 л.с., а на вращение турбин низкого давления – 19 500 л.с. Результирующая мощность, которую развивают турбины с вентиляторами и компрессорами, равна 53 500 л.с. (Крюков, 1975, стр. 198). Не понятно, откуда берется такая мощность на борту самолета. Естественно, предположить, что вентиляторы, компрессоры и турбины совместно с планером самолета работают как тепловой насос с достаточно высоким коэффициентом преобразования ~ 13 . Если самолет является тепловым насосом по отношению к окружающему воздуху, то вся его внешняя поверхность является коллектором теплового насоса. Чтобы такой коллектор мог генерировать мощность $53\,500 - 4000 = 49\,500$ л.с. достаточно обеспечить разность температур относительно окружающей среды всего $\Delta T \approx 1,7^{\circ}$. То, что самолет охлаждается в процессе полета, свидетельствует его обледенение.

Известно, что работающая турбина преобразует тепловую энергию в механическую работу, а затем в электрическую энергию. Такая система представляет собой тепловую машину, которая работает по замкнутому термодинамическому циклу Брайтона. Вентилятор и компрессор также работают по замкнутому термодинамическому циклу Брайтона. Это не вызывает никаких сомнений, так как термодинамическое описание работы тепловой машины исходит из того, что термодинамическая система замкнутая. Когда рассматривается работа двигателя внутреннего сгорания, то в этом случае энергетическая система действительно замкнутая, а в случае работы двигателей с внешним сгоранием, полет самолета, работа вентилятора, компрессора и турбины происходит существенное взаимодействие с окружающей средой и тогда система не является замкнутой. В этом случае поступают следующим образом. Из общего энергетического комплекса выделяется контролируемая ее часть и рассматривается она, как замкнутая термодинамическая система. Тогда возможно понять, что происходит, когда такая система потребляет или отдает какое-то количество энергии. При этом процессы взаимодействия с окружающей средой полностью исключаются. Однако, именно эти процессы в основном обуславливают эффективность работы тепловой машины открытого типа, т.е., определяют коэффициенты взаимного преобразования разных видов энергий.

Если учитывать процессы, обеспечивающие внешнюю энергосвязь, то закон сохранения энергии, сформулированный Джоулем, применять не позволительно. Тогда следует применять закон превращения энергии, как его определил Ломоносов. Такое небольшое

отличие одной и другой формулировок закона сохранения энергии приводило к неправильному пониманию, как работает тепловая машина открытого типа. Впервые в общем виде полный анализ работы энергосистем открытого типа был выполнен в работе (Гречихин, 2006, стр. 32-39). Самолет, совершающий полет, вентилятор, компрессор и турбина являются энергосистемами открытого типа аналогично работе теплового насоса. В этой связи возникает **цель**: рассмотреть работу тепловых насосов, как открытых энергосистем не с позиций термодинамики, а с применением молекулярно-кинетической теории, которая позволяет описать работу энергосистем как замкнутых, так и открытых.

Поставленная цель может быть достигнута путем решения следующих задач:

- рассмотреть общий принцип преобразования энергий в открытых энергосистемах;
- обосновать работу теплового насоса как открытой энергосистемы с применением молекулярно-кинетической теории;
- выяснить какие элементы в общей конструкции самолета приводят к охлаждению его корпуса;
- определить условия работы сложных бортовых электромагнитных энергокомплексов, когда возникает эффективный теплообмен с окружающей средой и реализуется принцип работы теплового насоса.

Общий анализ работы открытой энергосистемы

Полет самолета в атмосфере Земли совершается со сравнительно большими скоростями. Поэтому взаимодействие с окружающей средой возникает достаточно эффективное. Поэтому самолет, совершающий полет в неподвижной атмосфере Земли, является открытой энергосистемой. Рассмотрим в общем виде, каким образом происходит превращение разных видов энергий в открытых системах. Схематически взаимодействие сложных энергосистем показано на рис. 1. На этой схеме изображены независимые энергетические системы, в составе которых содержатся N_1 и N_2 энергетических подсистем каждая в своем энергетическом состоянии и находятся в равновесном состоянии, разделенные энергией активации E_a . Если равновесие нарушается, то системы могут как-то взаимодействовать между собой.

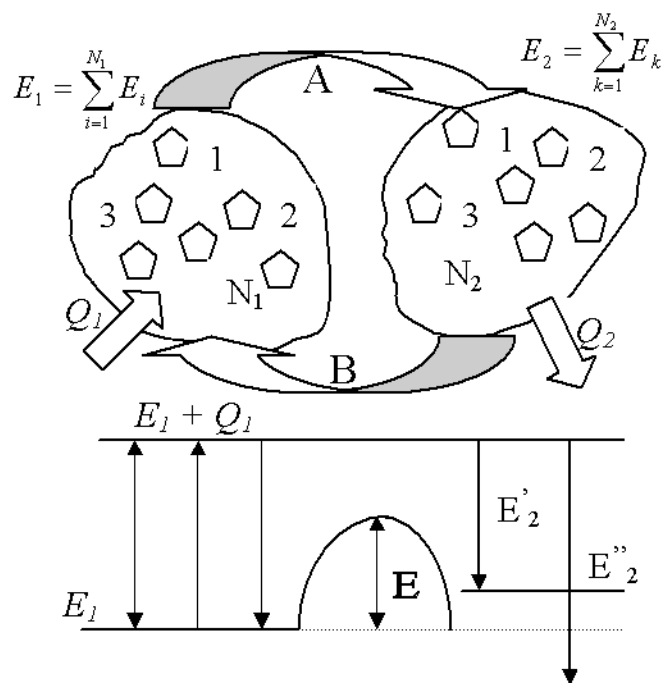


Рис. 1 – Схематическое изображение превращения энергии в открытой энергосистеме

Предположим, что первой системе сообщается энергия Q_1 , величина которой больше энергии активации E_a . Тогда возникнет неравновесное состояние в первой системе с энергией $(E_1 + Q_1)$ и она начнет взаимодействовать со второй системой. Возникнет канал перекачки энергии от первой системы ко второй по траектории **A** (см. рис. 1). Работа, которая будет при этом получена, составит:

$$A = E_1 + Q_1 - E_2. \quad (1)$$

Если вторая система находилась в состоянии $E_2 = E'_2$, то при $E_1 > E'_2$ возникнет самопроизвольный переход энергии от системы **A** в систему **B**. Коэффициент передачи энергии по каналу **A**, определяемый как отношение полученной работы к затраченной, определится следующим образом:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = 1 - \frac{E'_2 - E_1}{Q_1} \geq 1. \quad (2)$$

Коэффициент передачи энергии, определенный таким образом, больше или равен единице и он не является коэффициентом полезного действия, а его следует рассматривать как коэффициент преобразования энергии двумя этими системами по отношению к внешнему воздействию.

Если же вторая система находилась в состоянии $E_2 = E'_2$ и $E'_2 > E_1$, то тогда $\eta \leq 1$. В этом случае энергосистемы следует рассматривать как совместно замкнутые или консервативные. Для такой обобщенной системы коэффициент η меньше или равен единице и является коэффициентом полезного действия. В этом случае применим закон сохранения энергии.

При возникновении кругового процесса, часть энергии от второй системы к первой будет переходить по траектории **В**. Тогда полученная работа равна $A = Q_1 - Q_2$. Такая ситуация возникает в тепловых двигателях, где коэффициент полезного действия всегда меньше единицы.

Когда обе энергосистемы открытые и обладают колебательными свойствами с собственной частотой колебаний ω_0 , то такую общую систему можно привести в резонансное состояние, используя периодическое возбуждение со сравнительно малой энергией. Если возмущение осуществляется периодической функцией $Q = Q_0 \cos(\omega t)$, то энергия, приобретаемая открытой колебательной системой N_1 , равна (Гречихин, 2006, стр. 32–39):

$$Q_1 = \frac{CQ_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}}, \quad (3)$$

где C – размерный коэффициент пропорциональности.

В резонансе $Q_1 = CQ_0 / 2\beta\omega_0$ при коэффициенте затухания $\beta \rightarrow 0$ получаем $Q_1 \rightarrow \infty$. За некоторое время Q_1 достигнет энергии активации E_a . Работа, которую может совершить объединенная система, равна разности $E_1 - E_2$, а коэффициент преобразования энергий в этом случае

$$\eta = 1 + \frac{E_1 - E_2}{E_a}. \quad (4)$$

Отсюда при $E_a \rightarrow 0$ коэффициент преобразования стремится к бесконечности. Такая ситуация возникает при положительном коэффициенте обратной связи. Следовательно, используя резонансные свойства открытых энергосистем, коэффициент передачи энергий от

одной энергосистемы ко второй может быть получен самый максимальный, т.е., открытые резонансные системы обладают наилучшими возможностями превращения энергий разных видов в сложных энергетических комплексах.

В нестационарных условиях передача энергий по траекториям **A** и **B** (рис. 1) изменяются со временем. Ситуация усложняется. Общий подход описать достаточно проблематично. Поэтому в каждом конкретном случае необходимо разрабатывать свой подход и свою систему уравнений с их конкретным решением.

В случае наличия естественной разности энергетических состояний окружающая среда является активной и возникает канал перекачки энергии от окружающей среды к открытой системе в виде энергии Q_7 . Коэффициент взаимного преобразования энергий разных видов регулируется и может достигать больших значений, т.е., возможно реализовать взрывной механизм перекачки энергии (Гречихин, 2006, стр. 32-39). Открытая энергосистема с активной окружающей средой реализуется в естественных условиях при работе гидроэлектростанций, в ветроэнергетике, в процессе преобразования солнечной энергии, в шаровой молнии, а искусственно при работе кондиционеров, воздушных винтов, вентиляторов, компрессоров, турбин и при полетах самолетов. В открытых системах с активной окружающей средой преобразование энергии происходит без совершения работы, а это значит, что при преобразованиях энергий разных видов внутри системы исключаются переходные процессы. Активная окружающая среда не накладывает ограничений на скорость движения.

Краткий анализ работы открытых систем получения и преобразования энергий разных видов, свидетельствует о возможных существенных изменениях в основных методах получения и преобразования энергий в ближайшее время, а в понимании основных законов физики применительно к открытым системам с активной окружающей средой в резонансных условиях мы находимся только в начале их становления. Особый интерес представляет выяснить, каким образом можно использовать открытую энергосистему для получения избыточной энергии путем организации работы теплового насоса.

Работа теплового насоса как открытой энергосистемы

Тепловой насос - это устройство для переноса тепловой энергии от источника низкопотенциальной тепловой энергии (с низкой температурой) к потребителю (теплоносителю) с более высокой температурой (Амерханов, 2005, стр. 160), (Мазуров, Кузнецов, Ква-

кин, 2006, стр. 266–273), (Васильев, 2006, стр. 220), (Володин, 1996, стр. 24). Такое определение теплового насоса сложилось в результате первоначального применения его для обогрева помещений разного назначения. *Более полное определение тепловой насоса – это устройство, которое принудительно осуществляет переход энергии от более низкого, к более высокому энергетическому состоянию не только одного вида, но и с преобразованием разных видов энергий путем создания такой разности энергетических состояний, когда самопроизвольно происходит переход энергии от одной энергосистемы к другой.* Разность энергетических состояний, которая обеспечивает самопроизвольный переход энергий от одной энергосистемы к другой, создается как естественным, так и искусственным путем.

В качестве примера на рис. 2. показана принципиальная схема компрессионного теплового насоса, применяемого для обогрева помещения. В испарителе 3 хладагент испаряется и компрессором 4 пар подается в конденсатор 1, который нагревается и тепло отдает в помещение. Дроссель 2 служит для согласования сжатия – разрежения при работе теплового насоса. Получается, что компрессор 4 осуществляет переход энергий от низкопотенциального **В** к высокопотенциальному источнику энергий **А**, а в источнике **А** создается разность энергетических состояний относительно окружающей среды такая, что позволяет самопроизвольно повышать температуру внутри помещения путем организации теплового потока 1 (рис. 2).

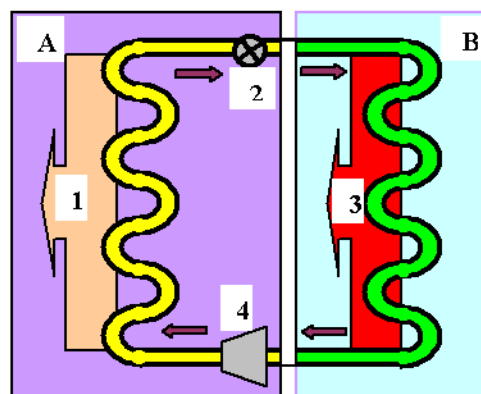


Рис. 2 – Схема компрессионного теплового насоса: 1 – конденсатор, 2 – дроссель, 3 – испаритель, 4 – компрессор

Принципиальная схема работы теплового насоса, приведенная на рис. 2, позволяет понять только принцип работы теплового насоса. Реально тепловые насосы создаются по более сложной схеме. Поэтому для анализа работы теплового насоса следует применять молекулярно-кинетическую теорию, которая позволяет оперировать не общими энергетическими параметрами, а как эти параметры формируются с включением разных взаимодействий на атомно-молекулярном и кластерном уровнях.

За определенный промежуток времени из окружающей среды, огромной по размеру, тепловой насос отбирает энергию и вводит ее в систему малого объема со значительно меньшей массой. В таком объеме температура может либо возрасть, либо наоборот уменьшаться в зависимости от соотношения потоков энергии на входе и на выходе, а также теплофизических свойства взаимодействующих энергосистем. Величина роста температуры обусловлена тем, насколько меньший обратный поток энергии из обслуживаемой системы в окружающую среду по сравнению с потоком, который вводится в систему. Эффективность теплового насоса определяется отношением разности температур на выходе и на входе к температуре на выходе, т.е., в конечном итоге, определяется насколько меньший поток энергии выходит из обслуживаемой энергосистемы. Следовательно, коэффициент теплопроизводительности насоса определяется отношением:

$$K_H = \frac{T_{\text{вых.}} - T_{\text{вх.}}}{T_{\text{вых.}}} \quad (5)$$

Температура на входе теплового насоса по существу является температурой окружающей среды. Тогда из (5) следует, что чем меньше температура окружающей среды, тем больше коэффициент теплопроизводительности. На самом деле все наоборот. По мере уменьшения температуры окружающей среды коэффициент теплопроизводительности падает, а при достаточно низких температурах тепловой насос вообще прекращает работать.

Поэтому коэффициент теплопроизводительности теплового насоса следует определять как отношение полезного тепла, передаваемого потребителю, к энергии, затраченной на работу теплового насоса. Этот коэффициент трансформации отличен от коэффициента,

определяемого по (5). Для согласования одного и другого коэффициентов вводят коэффициент степени термодинамического совершенства, который оценивают величиной 0,55. Получается, что термодинамический подход с анализом работы замкнутого термодинамического цикла для описания работы теплового насоса не достаточно правомерен.

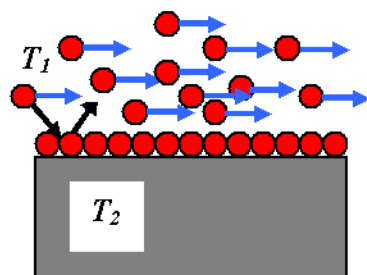


Рис 3 – Схема теплообмена корпуса самолета с окружающим воздухом

Коллектор воздушного теплового насоса. Общая схема работы теплообменника в воздушном коллекторе

приведена на рис. 3. Корпус самолета как теплообменник взаимодействует с воздухом окружающей неподвижной среды. На внешней поверхности самолета адсорбируются в основном молекулы кислорода. Адсорбционный слой молекул кислорода обладает температурой основы, т.е., корпуса самолета T_2 . Под воздействием потока воздуха вследствие упругого удара о корпус самолета адсорбированные молекулы кислорода приобретают дополнительную энергию. При наличии разности температур корпус самолета приобретает энергию вследствие конвективного теплообмена. Поток энергии, воспринимаемый корпусом самолета, составит

$$\dot{Q} = \frac{1}{4} \frac{P_0}{T_1} \theta \left(1 + \frac{v_c}{v_T} \right) v_T \frac{3}{2} (T_1 - T_2) \quad (6)$$

где P_0 – давление воздуха в окружающей среде, θ – коэффициент передачи энергии при столкновении молекул воздуха с кластерами материала корпуса самолета; v_c – скорость полета самолета и

$v_T = \sqrt{8k_B T_1 / \pi m_a}$ – среднехаотическая скорость движения молекул воздуха, T_1 – температура окружающей среды и T_2 – температура корпуса самолета. Общая внешняя поверхность самолета ТУ-134 ~ 230 м². Чтобы компенсировать недостающую мощность 49500 л.с. путем конвективного теплообмена, необходимо обеспечить разность температур относительно окружающей среды ~ 1,75°. На такую разность температур происходит охлаждение корпуса самолета. Выясним, какие элементы конструкции самолета приводят к охлаждению его корпуса.

Охлаждение корпуса самолета

Когда работает винт самолета, вентилятор, компрессор или турбина, то за тыльной стороной лопастей формируется срывное течение. В области срывного течения возникает разрежение, которое заполняется воздухом со скоростью звука. В процессе столкновения с поверхностью летательного аппарата, совершающего полет с дозвуковой скоростью, молекулы воздуха при столкновении передают часть своей энергии и воздух охлаждается и равновесное состояние реализуется в динамике при определенной разности температур. Так как происходит отсос энергии из окружающей среды, то возникают условия для работы теплового насоса.

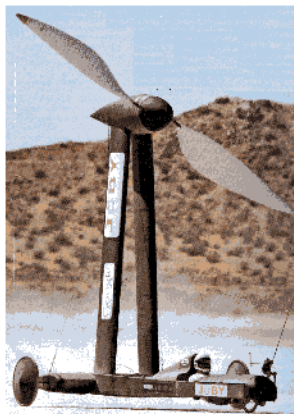


Рис. 4 – Воздушный винт вместо паруса

Например, работающий винт самолета представляет собой типичный тепловой насос. Экспериментально достаточно убедительное подтверждение этому описано в работах (Гречихин и др, 2010), (Популярная механика, 2010, стр. 84-87). В работе (Гречихин и др, 2010) работающий высокоскоростной винт позволял получать коэффициент преобразования 3,6, а в работе (Популярная механика, 2010, стр. 84-87) винт (рис. 4) в качестве паруса позволил получить коэффициент преобразования 2,85.

В винтомоторных самолетах с овальным крылом возможно реализовать вихревой насос с применением открытой турбины, как это показано на рис. 5. Располагать вихревые насосы следует там, где овальное крыло практически не работает. При полете самолета открытые турбины 4 со специальными лопастями и их вращением в определенном направлении работают как тепловой насос. Турбины превращают тепловую энергию окружающей среды в механическую работу и вращают электрогенераторы. В этом случае реализуется гибридный привод. Для реактивных самолетов с овальным крылом ситуация сложнее, но также представляет интерес.

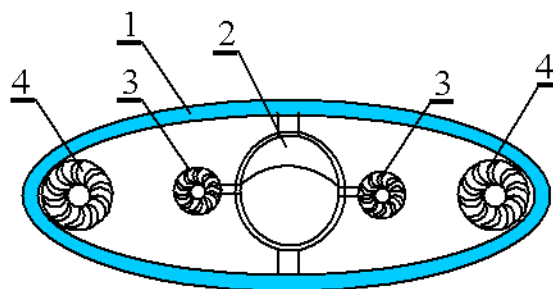


Рис. 5 – Овальное крыло с вихревым тепловым насосом:

- 1 – овальное крыло; 2 – фюзеляж;
- 3 – турбовинтовые или турбореактивные двигатели;
- 4 – вихревые тепловые насосы на основе открытой турбины.

На борту летательного аппарата следует применять более экономичную энергосистему открытого типа, как это было реализовано на самолете-мишени Ла-17Р, у которого в носовой части установлен ветрогенератор для обеспечения бортового электропитания. Чтобы

понять необходимость применения тепловых насосов на борту летательного аппарата с овальным крылом, произведем соответствующие оценки мощности используемых тепловых насосов.

Пусть для вращения турбин применены мотор-генераторы мощностью 4 кВт. Такие мотор-генераторы обеспечат преодоление энергии активации турбиной со следующими параметрами лопастей: длина лопасти 0,22 м, ширина между лопастями на оси вращения 0,12 м, длина хорды лопасти 0,1 м с радиусом скругления на вершине лопасти 9 см. Потребляемая мощность для преодоления энергии активации составит 3890 Вт. Преодоление такой энергии активации произойдет при частоте вращения турбины 940 об/мин. На частоте вращения турбины 4000 об/мин с указанными лопастями она начнет вырабатывать мощность 117 кВт, работая как тепловой насос. Две такие турбины будут вырабатывать мощность, равную мощности применяемых ДВС (типа двигателей Ванкеля) на легком двухмоторном самолете 270 л.с., и создадут тягу 359 кгс, а вырабатываемая мощность турбинами обеспечит полностью работу тянущих или толкающих винтов для малотоннажных самолетов с овальным крылом.

Тепловые насосы совместно с электрическими и тепловыми двигателями представляют собой сложную энергосистему. На транспорте такие системы получили название гибридных. В процессе взаимодействия летательного аппарата с воздухом окружающей среды можно максимально использовать принцип возврата энергии из окружающей среды применяя тепловой насос. В этом случае бортовые тепловые двигатели могут вообще не использоваться. Достаточно иметь на борту только аккумуляторы электрической энергии, которые в импульсном режиме должны преодолевать энергию активации. Если на борту самолета отказаться от тепловых двигателей и перейти полностью на электротягу, то каким образом, применяя электромагнитные динамические системы, можно осуществить отсос энергии из окружающей среды необходимой мощности.

Электромагнитные энергокомплексы в режиме теплового насоса

В настоящее время уже созданы электрические мотор-генераторы магнитодинамического типа, которые преобразуют механическую энергию в электрическую в резонансном режиме, и при этом позволяют получать большие мощности, а также вырабатывать избыточную энергию за счет взаимодействия с окружающей средой (Рощин, Годин, 2000, стр. 202-205), (Хмельник, 2007) путем организации конвективного теплообмена. Принципиальная конструкция магнитоди-

намического генератора резонансного типа изображена на рис. 6. Ротор такого преобразователя представляет собой металлический вал 4, на котором крепится металлический диск 2. На металлическом диске 2 по внешнему радиусу установлены плоские постоянные магниты 1. Форма и толщина плоского магнита может быть разной. Число постоянных магнитов должно быть четным и определяется механической мощностью, которую необходимо преобразовать в электрическую энергию, когда такое устройство работает как генератор. Металлический диск с постоянными магнитами вращается по часовой или против часовой стрелки, и при этом в индуктивностях L наводится ЭДС индукции. Сердечники индукционных катушек 5 имеют зазор, почти равный толщине постоянных магнитов.

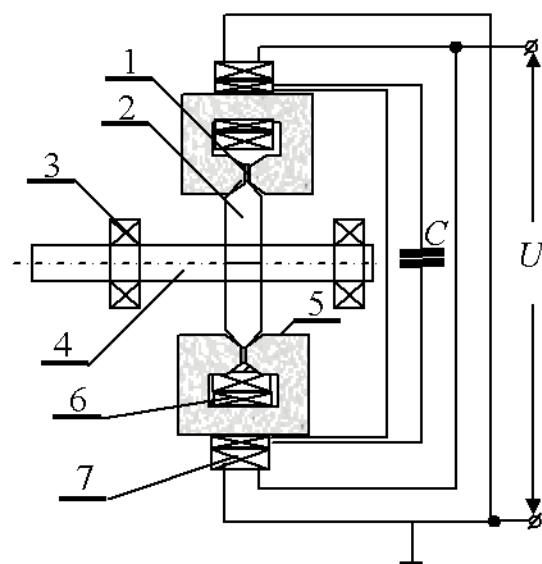


Рис. 6. Принципиальная схема резонансного магнитодинамического генератора переменного тока: 1 – постоянный магнит; 2 – металлический диск ротора; 3 – радиальный шариковый подшипник; 4 – вал ротора; 5 – сердечник магнитной катушки; 6 – катушка индуктивности; 7 – обмотка выходного трансформатора.

Постоянные магниты используются на основе ферритов-гранатов, которые расположены по окружности диска 2. На рис. 6 показан только один металлический диск с постоянными магнитами. Количество таких дисков определяется механической мощностью, которую необходимо преобразовать в электрическую энергию. Один металлический диск с постоянными магнитами, пересекающий зазор в катушках индуктивности, представляет собой отдельный модуль. На рис. 6 показан только один модуль, размещенный на металлическом вале ротора 4. Таких модулей может быть несколько. Между

собой они соединены параллельно или последовательно электрической цепью. Мощность преобразования энергии возрастает как в первом, так и во втором случаях.

Катушки индуктивности со своей электроемкостью и вращающийся металлический диск представляют собой замкнутую резонансную энергосистему. Мощность, вырабатываемая генератором, снимается с резонансного контура с помощью повышающего трансформатора 7.

В резонансных условиях ($\omega \cong \omega_0$) электрический ток во внешней цепи равен нулю. Следовательно, параллельный RLC-контур для приложенного переменного напряжения с частотой, равной частоте собственных колебаний контура, представляет собой бесконечное сопротивление. Это означает, что в условиях резонанса параллельный RLC-контур является замкнутой энергосистемой по отношению к внешнему источнику переменного напряжения. Запишем применительно к такой системе, в соответствии с законом превращения энергии, первое начало термодинамики, а именно:

$$dU_T + dA = 0, \quad (7)$$

Получается, что в резонансных условиях энергия, запасенная в колебательном контуре, расходуется на все виды работ за счет внутренней энергии. Если нет притока энергии извне, то переменные потери на активном сопротивлении компенсируются запасенной электрической энергией в контуре, а постоянные потери в сердечнике, за счет гистерезиса зависимости магнитной индукции от напряженности внешнего магнитного поля, т.е., компенсируются за счет тепловой энергии, запасенной в магнитном сердечнике. Поэтому в резонансных условиях электрический параллельный колебательный контур является замкнутой системой по отношению к приложенному внешнему переменному напряжению и открытой системой по отношению к теплообмену с окружающей средой, и при этом выполняет роль теплового насоса. Кроме этого, такой резонансный контур является активной магнитной антенной, воспринимающей магнитные и электромагнитные волны из окружающей среды.

Если не учитывать поступление энергии магнитных и электромагнитных волн в систему RLC-контура и рассматривать только тепловую составляющую, то тогда разность температур, которая обеспечивает потери за счет внутренней энергии сердечников катушек индуктивностей вследствие конвективного теплообмена, составит:

$$\Delta \bar{T} = \frac{P_{\alpha} m_a v_T^3 (\theta_{\Phi} S_{\Phi} + \theta_{Al} S_{Al})}{8k_B T (c_{\Phi} m_{\Phi} + c_{Al} m_{Al}) f} = 1,73 \quad (8)$$

Здесь P_{∞} – давление воздуха при нормальных условиях, v_T – среднехаотическая скорость движения молекул воздуха при температуре T , c_{ϕ} и m_{ϕ} – удельная теплоемкость и масса ферритового сердечника и c_{Al} и m_{Al} – удельная теплоемкость и масса дюралевого диска.

Получается, что конвективный теплообмен мотор-генератора с воздухом при температуре $T = 298$ К вполне обеспечивает нормальную работу такого устройства как теплового насоса, которое позволяет непосредственно преобразовывать тепловую энергию окружающей среды в электрическую энергию при разности температур 1,7 К и получать на выходе высокую выходную мощность. При длительной работе такого теплового насоса непрерывно должна понижаться температура окружающей среды. Экспериментально в работе (Рощин, Годин, 2000, стр. 202-205) при диаметре диска 1 м получали избыточную энергию ~ 70 кВт, а температура окружающей среды уменьшалась на 6-8 К, что вполне согласуется с разработанной моделью работы такого магнитодинамического мотор-генератора.

Таким образом, магнитодинамический мотор-генератор является типичным тепловым насосом, который преобразует низкопотенциальное тепло окружающей атмосферы в электрическую энергию с коэффициентом преобразования больше единицы. Так в аналогичном двигателе Минато (Хмельник, 2007) на вход статора подавалось напряжение 1,8 В, при этом ток потребления составлял 150 мА, а на выходе напряжение было 9,144 В с током потребления 192 мА (Хмельник, 2007). В результате коэффициент преобразования тепловой энергии в электрическую составил 3,25, а более мощный магнитный двигатель давал коэффициент преобразования 12-19 (Хмельник, 2007).

Кроме этого такое устройство является магнитной антенной, которая аккумулирует переменную энергию магнитного поля и электромагнитного поля окружающей среды. Например, в работе (Рощин, Годин, 2000, стр. 202-205) были обнаружены зоны повышенной напряженности магнитного поля со значением магнитной индукции 0,05 Тл, что соответствует напряженности магнитного поля 39,8 кА/м. Наличие таких мощных переменных магнитных полей вблизи работающего магнитодинамического мотор-генератора вызывает переменное электрическое поле напряженностью

$$E = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} H = 1,5 \cdot 10^7 \text{ В/м.} \quad (9)$$

Электрический пробой воздуха происходит при напряженности поля $3 \cdot 10^6$ В/м (Гречихин, 2008, стр. 302). Поэтому вокруг работающего магнитодинамического мотор-генератора возникает коронный разряд, в котором возбуждаются однократные ионы молекул азота со свечением воздуха в виде фиолетово-голубого ореола. Такое свечение наблюдалось многими исследователями (Рошин, Годин, 2000, стр. 202-205), (Хмельник, 2007), начиная с Николы Тесла.

Почему происходит аккумуляция магнитной энергии у работающего магнитодинамического мотор-генератора пытаются объяснить поляризацией неоднородного физического вакуума (Хмельник, 2007), (Дятлов, 1998). Если такой механизм в природе существует, то предстоит его экспериментально детально исследовать.

Получается, что за счет магнитного гистерезиса в ферро- и ферримагнитных материалах происходит охлаждение сердечников в применяемых индуктивностях. Чем больше коэрцитивная сила, тем заметнее будет охлаждение сердечников индуктивностей. Для получения магнитного насыщения следует увеличивать амплитуду тока, пропускаемого через индуктивности. В результате возрастет тепловыделение в обмотке индуктивности, а это для теплового насоса нежелательное явление. Поэтому в работе (Бигель, 2001) было предложено в качестве сердечников применяемых индуктивностей использовать ферриты с продольным магнитным резонансом в оптимальных условиях работы магнитодинамического мотор-генератора в качестве теплового насоса заданной мощности. Тепловой насос на продольном ферримагнитном резонансе аккумулирует энергию переменного магнитного поля.

Приведем оценки, выполненные применительно к земному магнетизму в (Гречихин, Кузь, 2013, стр. 253). Переменная составляющая магнитного поля Земли составляет 1% от ее постоянного значения ($\sim 0,5$ Эрстед). Например, относительная магнитная проницаемость феррита MgOFe_2O_3 $\mu_r = 8,33 \cdot 10^3$, относительная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_r = 21,13$. Тогда для феррита диаметром 1 см и длиной 10 см получаем $\Delta T = 0,8$ К. Если учесть, что вследствие магнитного гистерезиса также происходит падение температуры ферритового сердечника, то тогда $\Delta T = 2,5$ К. Получается, что в продольном резонансе охлаждение феррита происходит более интенсивно. Такое устройство представляет собой вихревой тепловой насос.

Электромагнитный тепловой насос можно использовать на любом виде транспорта. Он обладает достаточно малыми массо-габаритными характеристиками, а теплообмен с окружающей средой осуществляется всей площадью транспортного средства с набегающим потоком воздуха, т.е., реализуется огромный коллектор теплового насоса.

Вывод

Проведенный краткий анализ воздушных и электромагнитных тепловых насосов свидетельствует о том, что в ближайшем будущем в авиации появятся новые энергокомплексы преобразования разных источников энергий с целью полного отказа от углеводородного топлива. Человечество находится на пороге смены цивилизаций от углеводородной к водородно-водяной, а в конечном итоге сформируется цивилизация с бестопливной энергетикой, которая была реализована Николой Тесла. Вся энергетика в такой цивилизации будет основана на применении тепловых насосов. Авиация в настоящее время является локомотивом наметившегося прогресса в связи с созданием беспилотных летательных аппаратов.

Литература

- Амерханов, Р.А. 2005. *Тепловые насосы*. Энергоатомиздат, стр. 160.
- Бигель, А.С., Гречихин, Л.И., Рогожинский, Ю.А., & Шумский, И.П. 2001. Электромагнитный тепловой насос. У: Аграрная энергетика в XXI-м веке, Минск. УП «Технопринт».
- Васильев, Г.П. 2006. *Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев Земли*. «Красная звезда», стр. 220.
- Володин, В.И. 1996. *Влияние внутренних и внешних факторов на эффективность тепловых насосов*, стр. 24. Препринт ИПЭ-22, ИПЭ АНБ.
- Гречихин, Л.И. 2006. Общие основы формирования и превращения энергетических полей разной природы. *Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. «Энергетика»*, 3, стр. 32-39.
- Гречихин, Л.И. 2007. Современная аэродинамика полета летательных аппаратов и возможности компьютерного моделирования. У: Материалы VIII Международной конференции «АВИА-2007», 25-27 апреля, г. Киев., стр. 33-104
- Гречихин, Л.И. 2008. *Физика. Электричество и магнетизм. Современная электродинамика*. Право и экономика., стр. 302.
- Гречихин, Л.И., Сахарук, Д.А., Сивашко, А.Б., & Цанава, А.А. 2010. Энергетика воздушного винта беспилотного летательного аппарата. *Журнал «Энергетика»*, 4-5.
- Гречихин, Л.И., & Куць, Н.Г. 2013. *Энергетические комплексы на транспорте*. Право и экономика, стр. 253.
- Дятлов, В.Л. 1998. *Поляризация модель неоднородного физического вакуума*. Новосибирск: Изд. Ин-та математики.
- Крюков, А.М. 1975. Конструкция и летная эксплуатация двигателя D-30 2сер. У: *Воздушный транспорт*, стр. 198.
- Лигум, Т.И. 1975. Аэродинамика самолета ТУ-134А. У *Транспорт*, стр. 320.

Мазуров, О.К., Кузнецов, Н.В., & Квакин, С.Д. 2006. Тепловые насосы и их эффективность для целей теплоснабжения и улучшения экологической обстановки. *Изв. Рост. гос. строит. у-та*, 10, стр. 266-273.

Рощин, В.В., & Годин, С.М. 2000. Экспериментальное исследование физических эффектов в динамической магнитной системе. У: Международный конгресс «Фундаментальные проблемы естествознания и техники», С. Петербург, стр. 202-205

Хмельник, С.И. 2007. *Автономный бестопливный электромагнитный генератор*. Преузето са Интернета: site "Spasebloom.net"

Популярная механика 2010. *Популярная механика*, 9, стр. 84-87.

TOPLITNE PUMPE U VAZDUHOPLOVSTVU

Leonid Ivanovič Grečihin,
Državni viši koledž za vojno vazduhoplovstvo u Minsku,
Republika Belorusija

OBLAST: mašinstvo, aerodinamika
VRSTA ČLANKA: originalni naučni članak

Sažetak:

U radu je razmotren opšti princip konverzije energije u otvorenim energetskim sistemima. Prikazan je rad toplotne pumpe na osnovu molekularno-kinetičke teorije. Objašnjeni su razni mehanizmi hlađenja aviona prilikom leta u fiksnoj atmosferi. Prikazano je u kakvim uslovima elektromagnetni sistemi mogu da rade kao toplotna pumpa. Konstatovano je da avion u letu predstavlja toplotnu pumpu.

Ključne reči: *energokompleks, toplotna pumpa, vazдушна toplotna pumpa, elektromagnetna toplotna pumpa.*

HEAT PUMPS IN AVIATION

Leonid Ivanovich Gretchihin
Minsk State Higher Aviation Colledge, Department of Natural Scientific
Discipline, Minsk, Republic of Belarus

FIELD: Mechanics, Aerodynamics
ARTICLE TYPE: Original Scientific Paper

Summary:

The paper discusses the general principle of energy conversion in open energy systems and presents the heat pump operating principle based on the molecular-kinetic theory.

Various mechanisms of aircraft cooling during flight in the fixed atmosphere have been explained as well as the conditions in which electromagnetic systems can operate as heat pumps. It is stated that the aircraft in flight represents a heat pump.

Key words: energy system, heat pump, air heat pump, electromagnetic heat pump.

Дата получения работы/Paper received on: 09. 03. 2013.

Дата получения исправленной версии работы/Manuscript corrections submitted on: 13. 03. 2013.

Дата окончательного согласования работы /Paper accepted for publishing on: 15. 03. 2013.

PREGLEDNI ČLANCI REVIEW PAPERS

RADIO-LOCIRANJE MOBILNE STANICE U MREŽAMA TREĆE GENERACIJE

Milan M. Šunjevarić, Institut za sisteme zasnovane
na računarima RT-RK, Novi Sad, Srbija

Mladen B. Veletić, Elektrotehnički fakultet, Banja Luka,
Republika Srpska, Bosna i Hercegovina,

Branislav M. Todorović, Institut za sisteme zasnovane
na računarima RT-RK, Novi Sad, Srbija

DOI: 10.5937/vojtehg61-1754

OBLAST: telekomunikacije

VRSTA ČLANKA: pregledni članak

Sažetak:

Radio-lociranje mobilnih stanica u radio-mrežama počelo je jednostavnijim metodama (npr. Cell-ID metoda) koje su zahtevale samo manje modifikacije na mreži i uglavnom se radilo o mrežnom lociranju pomoću kojeg je ova usluga bila raspoloživa za sve vrste mobilnih telefona. Zbog male preciznosti pokrenut je razvoj sofisticiranijih metoda koji još uvek nije završen. Među naprednijim lokacijskim metodama nalaze se i one koje se zasnivaju na merenju lokacijskih parametara u vremenskom domenu. U ovom radu prikazana su opšta razmatranja radio-lokacijskih metoda u radio-mrežama sa detaljnom analizom metoda lociranja mobilne stanice u 3G (UMTS) mrežama na bazi merenja lokacijskih parametara u vremenskom domenu. Zbog ograničenog obima članka, primena ostalih metoda za lociranje u 3G mrežama (na bazi merenja snage, na bazi merenja radio-smerova, na bazi identifikacije ćelije – Cell ID i na bazi globalnog sistema pozicioniranja) nisu detaljno prikazane u ovom članku.

Ključne reči: radio-lociranje, mobilna stanica, mreže treće generacije, linija položaja, angulacija, lateracija, vreme dolaska, razlika vremena dolaska.

Ovaj članak je nastao u okviru rada na projektima TR-32030 i TR-36029 koje je delimično finansiralo Ministarstvo za prosvetu i nauku Republike Srbije.

Uvod

Radio-lociranje¹⁾ mobilne stanice (MS)²⁾ unutar savremenih ćelij-skih mreža treće generacije povećava nivo bezbednosti korisnika i otvara široke komercijalne mogućnosti za operatere koji omogućuju ovu uslugu. Najveća prepreka za realizaciju ove usluge, koja ograničava njegovu praktičnu primenu, jeste potreba za modifikacijom postojeće mrežne infrastrukture.

U zavisnosti od korišćene infrastrukture, metode radio-lociranja dele se na dve grupe: integrisane i samostalne metode (Simić, 2009).

Integrisane metode radio-lociranja odnose se na lociranje u radio-mrežama čija primarna funkcija nije lociranje. Najčešće, ovakve mreže su prvenstveno projektovane za komunikaciju, a mogućnost lociranja korisnika predstavlja samo još jednu novu uslugu u okviru radio-mreža. Tipičan primer su ćelijske mreže poput GSM i UMTS (Melikov, 2011). Postojeće komponente i protokoli dobijaju dodatne funkcije i bivaju modifikovani u skladu sa zahtevima konkretne usluge koja se bazira na poznavanju lokacije/pozicije korisnika ili objekta od interesa (LBS – engl. Location Based Services). Prednost integrisanih metoda lociranja je u tome što predstavljaju nadogradnju na postojeću infrastrukturu, tako da nije potrebna zasebna mreža namenjena samo lociranju, čime su znatno smanjeni troškovi implementacije. Nedostatak integrisanih metoda je u tome što usluga lociranja dodatno opterećuje mrežu. Sva merenja neophodna u postupku lociranja obavljaju se na postojećoj radio-opremi, koja je optimizovana za komunikaciju, a ne za lociranje, što može negativno uticati na saobraćaj u mreži.

Samostalne metode lociranja odnose se na lociranje u okviru infrastrukture koje su potpuno nezavisne od komunikacione mreže u kojoj je korisnik čija se lokacija određuje. Za razliku od integrisanih metoda, radio-oprema je u ovom slučaju isključivo namenjena za potrebe lociranja. Tipičan primer sistema koji koristi ovaj tip infrastrukture je sistem za globalno pozicioniranje (GPS – engl. Global Positioning System) (Grewal, Weill, Andrews, 2001). Osim GPS, važni predstavnici za ovakvu infrastrukturu su sistemi koji su posebno projektovani za potrebe lociranja u zatvorenom prostoru (*indoor*), kao što su kancelarije, poslovni centri i aerodromi. Nedostatak samostalnih metoda jeste što one zahtevaju da

¹⁾ Drugi naziv za radio-lociranje (engl. Radio-location) je radio-pozicioniranje (engl. Radio-positioning).

²⁾ U ovom radu termin mobilna stanica (MS) koristi se za označavanje mobilne stanice (*Mobile Station – MS*) u GSM mrežama, korisničke opreme (*User Equipment – UE*) u UMTS mrežama i mobilnog terminala u bežičnim mrežama generalno. Takođe, termin bazna stanica (BS) koristi se za označavanje bazne stanice (*Base Station – BS*) u GSM mrežama, čvora B (*Node B*) u UMTS mrežama i pristupne tačke u bežičnim mrežama generalno. Prema tome, MS i BS su skraćenice srpskih izraza.

korisnik poseduje posebne mobilne stanice kako bi se mogla odrediti lokacija, što poskupljuje implementaciju. Nekada to predstavlja modifikaciju standardnih mobilnih stanica za komunikaciju, ali vrlo često su to i potpuno specifični uređaji. Takođe, potrebni su mehanizmi za razmenu podataka između komunikacione i potpuno nezavisne lokacijske mreže.

Metode radio-lociranja, zavisno od mesta gde se vrše merenja lokacijskih parametara, dele se na: *mrežne* (engl. *Network-based*) metode i metode zasnovane na merenjima na individualnoj radio-stanici ili *stanične metode lociranja* (engl. *Mobile-based*). Mrežne metode lociranja su metode gde sva neophodna merenja, kao i sam proračun lokacije mobilne stanice, vrši mreža. Stanične metode lociranja su metode gde mobilna stanica vrši sva neophodna merenja i na osnovu njih računa sopstvenu lokaciju. Postoje i hibridna rešenja, kada sva neophodna merenja vrši mobilna stanica, te podatke šalje mreži gde se vrši konačni proračun lokacije mobilne stanice. Ove metode nazivaju se mrežne metode podržane mobilnom stanicom (*mobile-assisted-network-based*) ili, češće, samo stanicom podržane metode (*mobile-assisted*). Konačno, postoji i scenario kada sva neophodna merenja vrši mreža, te podatke šalje mobilnoj stanici gde se vrši konačni proračun lokacije. Ove metode nazivaju se stanične metode podržane mrežom (*network-assisted-mobile-based*), ali gotovo da se u praksi ne primenjuju. Treba naglasiti da mrežne metode ne zahtevaju nikakve promene na postojećim mobilnim stanicama, što je vrlo značajna prednost u odnosu na stanične ili hibridne metode lociranja. Zbog ove prednosti, bez obzira na to za koje se rešenje odluče, operateri najčešće ostavljaju bar jednu mrežnu metodu kao alternativno rešenje lociranja u sopstvenoj mreži, kako ne bi izgubili korisnike koji nisu raspoloženi da zbog dodatne usluge kupuju nove mobilne terminale.

Određivanje lokacije mobilnog korisnika u ćelijskim mrežama omogućava niz značajnih usluga koje mogu da ponude postojeći ćelijski sistemi. Mobilni operateri u okviru svojih mreža uvode nove protokole, a često i nove hardverske komponente koje bi podržale lociranje zadovoljavajuće tačnosti (CGALIES, 2002). Počev od 1996. god. kada se prvi put javila ideja o lociranju korisnika u ćelijskim radio-mrežama, razvijen je veliki broj ćelijskih metoda lociranja. Za razliku od satelitskog, ćelijsko lociranje uvek se realizuje kao integrisana infrastruktura. Dostupnost je dobra, naročito ako se ima u vidu da ovu uslugu treba realizovati na nivou jedne države, jer je to najčešće područje rada jednog operatera, za razliku od satelitskog koje ima globalno pokrivanje. Takođe, za razliku od satelitskog, ćelijsko lociranje nema ograničenja samo na *outdoor* uslove. Štaviše, najvećim delom i funkcioniše u *indoor* okruženju. Ipak, jedan od velikih problema ćelijskog lociranja predstavlja mogući negativni uticaj LBS usluge na kapacitet ovih sistema. Naime, LBS usluga zahteva do-

datnu signalizaciju u mreži i, naročito kada se zahteva visoka tačnost, zahteva prilične resurse koji se zbog toga ne mogu koristiti za prenos govora ili podataka.

Što se tiče primene metoda lociranja u ćelijskim mrežama treće generacije, Evropski institut za standardizaciju u telekomunikacijama ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) odgovoran je za standardizaciju tehnika lociranja za UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*) mreže u okviru Grupe za standardizaciju treće generacije mobilnih mreža (*3GPP Third Generation Partnership Project*). Postoje četiri standardizovane metode koje koriste zemaljske UMTS mreže (*UMTS Terrestrial Radio Access Network - UTRAN*) (*Functional specification of UE positioning in UTRAN*, 2007):

- metod na bazi ćelijske identifikacije (Cell ID),
- metod na bazi procene razlike vremena dolaska OTDoA (*Observed Time Difference of Arrival*),
- metod na bazi procene razlike vremena dolaska na uzlaznoj vezi U-TDoA (*Uplink – Time Difference of Arrival*) i
- metod na bazi globalnog satelitskog navigacionog sistema GNSS (*Global Navigation Satellite System*).

U ovom radu, nakon generalne analize metoda radio-lociranja, prikazani su principi i tehnike koje se koriste u UMTS mreži radi određivanja lokacije MS metodama lociranja zasnovanim na merenjima koja se vrše u mreži i metodama zasnovanim na merenjima koja se vrše na MS.

Metode radio-lociranja

Da bi se odredila lokacija mobilne stanice, potrebno je odrediti linije položaja. One predstavljaju skup tačaka na kojima se mobilna stanica može nalaziti. Lokacija mobilne stanice nalazi se u preseku dve ili više linija položaja (izolinija) dobijenih nekom lokacijskom metodom. Linija položaja može biti: (a) prava, ako je određena smerom na neki objekat, (b) kružnica, ako je određena merenjem udaljenosti od nekog objekta, ili (c) hiperbola, ako je određena merenjem razlike udaljenosti između dva objekta. Kod ćelijskih mreža lokacija mobilne stanice može grubo da se proceni tzv. blizinskim metodama (engl. *proximity sensing*) i metodama baziranim na proceni obeležja baznih stanica (engl. *fingerprinting*).

Blizinske metode lociranja ili *blizinsko lociranje* bazira se na identifikaciji najbližeg predajnika poznatih koordinata (referentnih tačaka: bazne stanice, pristupne tačke) (Küpper, 2005a), (Zhao, 2002), (Sun, et al, 2005), (Simic, Pejovic, 2008). One predstavljaju najjednostavnije i najrasprostranjenije metode lociranja. Ideja je zasnovana na činjenici da je zona pokrivanja radio-predajnika ograničenog dometa. U termi-

nologiji ćelijskog lociranja, mobilnoj stanici čija se lokacija određuje pridružuju se poznate koordinate bazne stanice koja trenutno opslužuje posmatranu mobilnu stanicu, odnosno pridružuju joj se koordinate uslužne bazne stanice. U terminologiji *indoor* WLAN lociranja, mobilnoj stanici se pridružuju poznate koordinate pristupne tačke. Blizinska metoda je vrlo popularna u ćelijskim radio-sistemima, gde je poznatija pod nazivom identifikacija ćelije (*Cell-Identification* – *Cell-ID* ili *Cell Global Identity* – CGI). U okviru ćelijskih radio-sistema, metode bazirane na blizinskom principu zahtevaju: identifikaciju najbliže referentne tačke (BS) i pristup bazi podataka u kojoj se nalaze geografske koordinate svih baznih stanica u mreži.

Metode bazirane na blizinskom principu mogu se realizovati i kao mrežna i kao stanična rešenja. Očigledne prednosti ove metode su gotovo nikakve modifikacije u postojećoj infrastrukturi, što rezultira malim troškovima implementacije. Osnovni nedostatak je nedovoljna tačnost, s obzirom na to da direktno zavisi od poluprečnika servisne ćelije i kreće se između 100 m u urbanim zonama do nekoliko desetina kilometara u ruralnim oblastima (teorijski do 35 km u GSM). Osim kod ćelijskog, ova metoda prisutna je i kod *indoor* lociranja. Tu pokazuje bolju tačnost s obzirom na manji domet radio, infracrvenih i ultrazvučnih tehnologija koje se primenjuju u *indoor* uslovima.

Angulacione metode baziraju se na određivanju linija položaja u obliku pravaca u čijem preseku se nalazi lokacija posmatranog objekta. Metode pozicioniranja bazirane na angulaciji nazivaju se AoA (*Angle of Arrival*) metode pozicioniranja, što u srpskom prevodu znači metode zasnovane na merenju ugla dolaska radio-talasa. U ćelijskim mrežama linije položaja predstavljaju pravce između mobilne stanice i baznih stanica, koji se određuju merenjem smera prostiranja radio-talasa koji dolaze do merne stanice od druge stanice. Za tako određene smerove koristi se naziv *radio-smerovi* (Šunjevarić, 1991). Budući da se bazna stanica i mobilna stanica, u opštem slučaju, ne nalaze u istoj horizontalnoj ravni, za određivanje linije položaja nije dovoljno merenje samo azimuta (ugao koji radio-smer zaklapa sa referentnim pravcem, tj. pravcem meridijana koji prolazi kroz mernu tačku) nego i ugla koji pravac prostiranja radio-talasa zaklapa sa horizontalnom ravni koji se naziva elevacija ili elevacioni ugao. Dakle, linije položaja određene su smerom prostiranja radio-talasa (azimutnim i elevacionim uglom) koji se određuje merenjem smera prostiranja radio-talasa koji dolaze od baznih stanica na poziciji mobilne stanice (stanična metoda) ili merenjem smera prostiranja radio-talasa koji dolaze od posmatrane mobilne stanice na mestima nekoliko baznih stanica (mrežna metoda). Postupak određivanja radio-smera naziva se radio-goniometrisanje. Da bi se odredili radio-smerovi potrebno je da bilo mobilne, bilo bazne stanice budu opremljene specijalnim an-

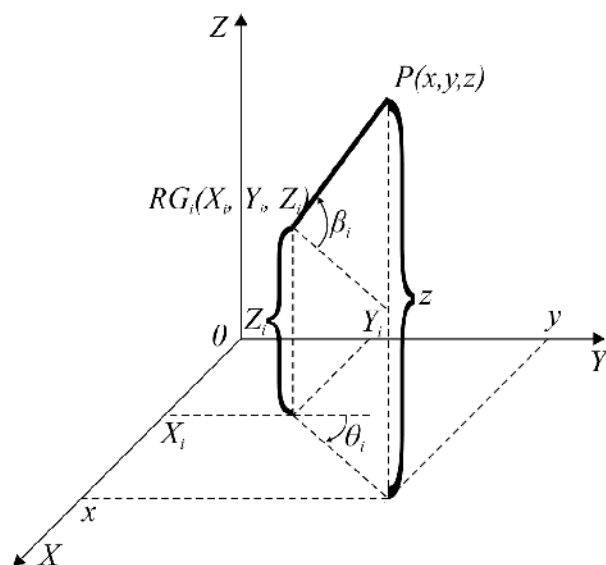
tenskim sistemima (antenskim nizovima) koji omogućavaju njihovo merenje. Metode zasnovane na angulaciji mogu se realizovati i kao mrežna i kao stanična rešenja, ali zbog ekonomičnosti i kompleksnosti antenski nizovi obično se instaliraju na baznim stanicama, pa su to uvek metode mrežnog tipa.

U slučaju mrežne metode, bazna stanica meri uglove pod kojim nailazi signal sa mobilne stanice i time ograničava lokaciju mobilne stanice na pravac koji prolazi i kroz mobilnu i kroz baznu stanicu koja vrši merenje. Ako se ovakva merenja izvrše sa dve bazne stanice, dobijaju se dve linije položaja u čijem presečištu leži posmatrana mobilna stanica. Za prikaz geometrijskih odnosa između baznih stanica i mobilne stanice, u opštem slučaju trebalo bi koristiti sfernu geometriju zbog zakrivljenosti Zemljine površine. Ipak, dimenzije ćelija (u većini slučajeva ispod 10 km) u ćelijskim mrežama su takve da se deo sfere pokrivene jednom ćelijom može smatrati ravnom površinom, pa se mogu koristiti pravougaoni koordinatni sistemi. Ako se koordinate i -te bazne stanice u trodimenzionalnom koordinatnom sistemu označe sa (X_i, Y_i, Z_i) i koordinate mobilne stanice sa (x, y, z) , tada, prema slici 1, uglovi θ_i i β_i predstavljaju azimut i elevaciju pod kojim se mobilna stanica vidi sa lokacije i -te bazne stanice. Ovi uglovi određeni su jednačinama (Šunjevarić, 1991):

$$\theta_i = \arctg \frac{x - X_i}{y - Y_i}, \quad (1)$$

$$\beta_i = \arctg \frac{z - Z_i}{\sqrt{(x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2}}, \quad (2)$$

Referentni pravac prema kojem se mere azimutni i elevacioni ugao, koji u stvarnosti predstavlja meridijan, tj. pravac jug-sever koji prolazi kroz mernu tačku (i -tu baznu stanicu), poklapa se sa y osom pravouglog koordinatnog sistema. Ako se pretpostavi da su koordinate mobilne stanice (x, y, z) nepoznate, očigledno da se sa dva merenja sa dve bazne stanice mogu formirati dva para ovakvih jednačina koje su dovoljne za određivanje tri nepoznate koordinate (x, y, z) . Osnovni problem kod ove metode predstavlja činjenica da izmerene vrednosti azimuta i elevacije nisu tačne, već približne, zbog čega ovaj sistem jednačina nije konzistentan i nema jedinstveno rešenje, pa se za njegovo rešavanje primenjuju različite statističke metode, čija tačnost je utoliko veća što su procenjene vrednosti uglova tačnije i što se koristi više merenja (na više BS). Kada se koriste tri BS na kojim se mere linije položaja (azimuti i elevacije), angulacija se zove *triangulacija*.



Slika 1 – Položaj i -te bazne stanice i mobilne stanice u pravouglom koordinatnom sistemu
Figure 1 – The position of the i -th base station and the mobile station in the Cartesian coordinate system

Tačnost procene azimuta i elevacije zavisi od više faktora. Ozbiljan problem metoda baziranih na angulaciji je i višestruka propagacija, naročito u uslovima kada ne postoji direktna optička vidljivost između mobilne i bazne stanice (*Non Line of Sight* – NLoS). U tom slučaju, signal sa mobilne stanice trpi višestruke refleksije i do bazne stanice može doći pod bilo kojim uglom. Zbog toga se obično preporučuje da se i angulacija radi bar sa tri bazne stanice, iako su teorijski dovoljne samo dve. Drugi problem triangulacije je loša rezolucija antenskih nizova, naročito ako bi se merenje vršilo na mobilnoj stanici čije dimenzije ne omogućavaju primenu antenskih nizova sa velikom rezolucijom.

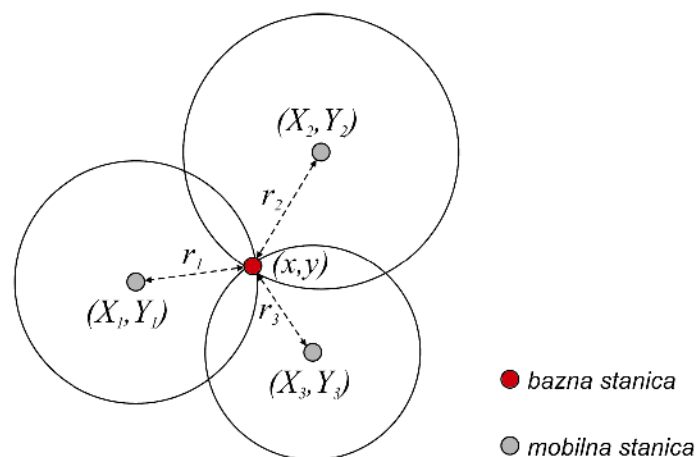
Lateracija je postupak koji se primenjuje kada su linije položaja u obliku kružnica ili hiperbola, odnosno kada su poznata rastojanja ili razlike rastojanja između mobilne stanice i bar tri bazne stanice. U oba slučaja dobija se sistem od n nelinearnih jednačina, gde je n broj baznih stanica. Rešavanjem ovog sistema dobija se nepoznata lokacija mobilne stanice. Lateracija u slučaju kada je $n = 3$, zove se *trilateracija*. Lateracija se javlja u dva oblika:

- *cirkularna lateracija*: kada su poznata rastojanja između mobilne stanice i baznih stanica,
- *hiperbolna lateracija*: kada su poznate razlike rastojanja između mobilne stanice i baznih stanica.

Inače, rastojanja koja su osnova oba lateraciona metoda dobijaju se merenjem: vremena propagacije signala između BS i MS (*Time of Arrival* - ToA), vremenskih razlika propagacije signala između mobilne i baznih stanica (*Time Difference of Arrival* - TDoA) ili merenjem snage signala na prijemu, a zatim procenom rastojanja primenom nekog od propagacionih modela.

Cirkularna lateracija je postupak određivanja nepoznate lokacije mobilne stanice na osnovu poznatih rastojanja između mobilne stanice i bar tri bazne stanice (Melikov, 2011). Neka je r_i poznato rastojanje između mobilne stanice i i -te bazne stanice, gde je $i = 1, \dots, n$. Poznata vrednost rastojanja r_i ograničava moguće lokacije mobilne stanice na kružnicu poluprečnika r_i oko i -te bazne stanice. Ako se iskoristi poznato rastojanje između mobilne stanice i druge bazne stanice, lokacija mobilne stanice dodatno se ograničava na dva moguća položaja koja se nalaze u preseku dve kružnice. Poslednja neodređenost položaja mobilne stanice otklanja se merenjem rastojanja mobilne od treće bazne stanice. Proračun nepoznate lokacije mobilne stanice (slika 2) ostvaruje se na sledeći način. Neka (X_i, Y_i) predstavljaju poznate koordinate i -te bazne stanice u pravouglom koordinatnom sistemu, a (x, y) nepoznate koordinate mobilne stanice. Rastojanje r_i između i -te bazne stanice i mobilne stanice određeno je jednačinom $r_i = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2}$. (3)

Merenjem ovog rastojanja od tri ili više baznih stanica (merenjem vremena ili snage signala) može se napisati sistem nelinearnih jednačina ($i \geq 3$) u kojima su nepoznate koordinate mobilne stanice (x, y) .



Slika 2 – Ilustracija cirkularne lateracije u horizontalnoj ravni
Figure 2 – Illustration of the circular lateration in the horizontal plane

Rastojanje r_i dobijeno merenjem vremena ili snage signala na prijemu, nije potpuno tačno i sadrži grešku usled nepotpune sinhronizacije i višestruke propagacije. To ima za posledicu da presek tri kružnice određene jednačinom (3) nije jedna tačka, već zona čija površina zavisi od tačnosti merenja rastojanja. Takođe, sistem jednačina (3) nije konzistentan i nema jedinstveno rešenje, pa se za njegovo rešavanje primenjuju različite matematičke metode. Metode pozicioniranja bazirane na cirkularnoj lateraciji i proceni rastojanja na osnovu merenja vremena nazivaju se ToA metode lociranja. Najpoznatiji sistem koji je baziran na ovom principu je GPS.

Hiperbolna lateracija je postupak određivanja nepoznate lokacije mobilne stanice na osnovu poznatih razlika rastojanja između mobilne stanice i bar tri bazne stanice (Melikov, 2011), (Šunjevarić, 1991). U ovom slučaju linije položaja imaju oblik hiperbola. Hiperbola je geometrijsko mesto tačaka za koje je razlika rastojanja od dve fiksne tačke (A i B), koje se nazivaju žiže, konstantna. Između ove dve tačke može se nacrtati odgovarajuća hiperbola za svaku tačku (poziciju objekta) i na taj način dobija se polje hiperbola. Ako se u tačkama A i B nalaze bazne stanice, tada svakoj zadatoj vrednosti razlike rastojanja mobilne stanice od baznih stanica odgovara jedna hiperbola. Za određivanje pozicije mobilne stanice potrebne su najmanje dve hiperbole određene pomoću dva para baznih stanica, koje se seku pod povoljnim uglom (što bližem 90°). Razlika udaljenosti posmatrane mobilne stanice od ove dve bazne stanice meri se pomoću radio-talasa koji putuju od predajnika bazne stanice do prijemnika mobilne stanice približno konstantnom brzinom ($c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$). Ako je pređeni put radio-talasa suviše dug, moraju se uračunati određene korekcije zbog promene brzine i puta prostiranja. Razlika udaljenosti određuje se zračenjem impulsnih signala i merenjem vremenske razlike između trenutaka pristizanja signala do prijemnika od jednog i drugog predajnika ili merenjem fazne razlike između signala koji dolaze od ova dva predajnika. Metode lociranja bazirane na proceni vremenskih razlika nazivaju se TDoA metode lociranja. Postoje i sistemi koji koriste obe vrste merenja. Određivanje lokacije merenjem razlike vremena je manje precizno od metoda na bazi merenja fazne razlike (Šunjevarić, 1991).

Neka su sa r_i i r_j označena rastojanja između mobilne stanice i i -te, odnosno j -te bazne stanice, respektivno, gde je $i, j = 1, \dots, n$ i $i \neq j$. Poznata vrednost razlike rastojanja $r_i - r_j$ određuje moguće lokacije mobilne stanice na hiperboli u čijim se žižama nalaze bazne stanice i i j . Ova hiperbola definisana je skupom tačaka za koje je razlika rastojanja od dve fiksne tačke konstantna.

Ako se u sistem uvede i treća bazna stanica, k , i ako je poznata razlika rastojanja $r_i - r_k$ gde je r_k rastojanje između mobilne stanice i k -te bazne stanice, lokacija mobilne stanice nalazi se i na drugoj hiperboli u čijim se žižama nalaze bazne stanice i i k . Konačna lokacija mobilne stanice nalazi se u preseku ove dve hiperbole (slika 3).



Slika 3 – Određivanje lokacije MS u presečištu tri hiperbole
Figure 3 – Determination of the MS location at the intersection of three hyperbolas

Kao i u slučaju cirkularne lateracije, i ovde se formira sistem nelinearnih jednačina, od kojih svaka predstavlja razliku rastojanja mobilne stanice u odnosu na par baznih stanica:

$$r_{ij} = r_i - r_j = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2} - \sqrt{(X_j - x)^2 + (Y_j - y)^2}, \quad (4)$$

gde je d_{ij} razlika rastojanja između:

- mobilne stanice i bazne stanice i , r_i , i
- mobilne stanice i bazne stanice j , r_j , pri čemu važi $i \neq j$.

Merenja razlike rastojanja nisu imuna na greške, pa presek hiperbola nije tačka već zona konačne površine. S tim u vezi, sistem jednačina (4) nije konzistentan i nema jedinstveno rešenje, pa se za njegovo rešavanje primenjuju različite statističke metode.

Metode lociranja zasnovane na *proceni obeležja baznih stanica* (*Fingerprinting*) vrlo su popularne, kako u ćelijskim sistemima, tako i za potrebe pozicioniranja u *indoor* uslovima (Simic, Pejovic, 2008). Osnovna ideja kod ovih metoda zasniva se na utvrđivanju lokacije mobilne stanice na osnovu propagacionih karakteristika radio-signala koje ta mobilna stanica meri na određenom mestu u mreži. Iako se pod pojmom lociranja primenom ove metode podrazumevaju različiti algoritmi, u svom izvornom obliku lociranje zasnovano na proceni obeležja baznih stanica izvodi se u dve faze: 1. pripremnoj fazi (*Off-line* faza) i 2. izvršnoj fazi (*On-line* faza).

Pripremna faza (*off-line*): područje u kojem se želi koristiti ova metoda najpre se izdela na manje celine – zone, a zatim se u svakoj od zona izvrši merenje karakterističnih parametara za bazne stanice koje se mogu „videti” iz posmatrane zone (najčešće snage signala od više baznih stanica koje mobilna stanica „vidi” sa tog mesta). Vektor vrednosti snage signala baznih stanica koje je mobilna stanica izmerila u poznatoj tački naziva se vektor obeležja (*fingerprint*). Ovi vektori i odgovarajuće koordinate na kojima su dobijeni pamte se u bazi podataka operatora mobilne mreže.

Druga (*on-line*) faza: mobilna stanica čija se pozicija određuje, na osnovu standardne procedure merenja snaga signala (ili drugih obeležja) sa okolnih baznih stanica, formira vektor obeležja i šalje ga serveru u mreži; server pronalazi vektor u bazi podataka koji je po određenom kriterijumu najbliži procenjenom vektoru obeležja i na taj način proceni gde se nalazi mobilna stanica.

Najčešće korišćeni algoritam u ove svrhe je traženje euklidskog rastojanja između procenjenog vektora obeležja i svih dostupnih u bazi podataka. Neka je procenjeni vektor obeležja (npr. vektor vrednosti snage signala baznih stanica koji je izmerila mobilna stanica na nekoj lokaciji):

$$\vec{P} = [P_{O1}, \dots, P_{On}] \quad (5)$$

Pretpostavimo da je za M lokacija sa koordinatama (x_m, y_m) formirana baza podataka sastavljena od koordinata ovih M lokacija i vektora obeležja (određenih u fazi 1), pri čemu se kao obeležja koriste snage signala baznih stanica koje su izmerene na lokacijama sa koordinatama (x_m, y_m) :

$$\vec{P}_m = [P_{DBm,1}, \dots, P_{DBm,n}] \quad m \in \{1, \dots, M\}. \quad (6)$$

Mera razlike između vektora procenjenog na lokaciji (x_m, y_m) i vektora iz baze podataka određuje se kao euklidsko rastojanje:

$$\delta_m^2 = |\vec{P} - \vec{P}_m|^2 = \sum_{k=1}^n (P_{Ok} - P_{DBm,k})^2. \quad (7)$$

Koordinate koje su pridružene vektoru obeležja u bazi podataka koji je imao najmanje euklidsko rastojanje od procenjenog vektora (sa indeksom m_{MS}) predstavljaju koordinate lokacije mobilne stanice:

$$\delta_{m_{MS}}^2 = \min_{1 \leq m \leq M} \delta_m^2, \quad (8)$$

tako da se nepoznate koordinate mobilne stanice dobijaju kao $(x_{m_{MS}}, y_{m_{MS}})$.

Problem u primeni metode zasnovane na bazi podataka koja sadrži vektore obeležja može se desiti u slučaju kada formula (8) da više rešenja za m_{MS} , odnosno više lokacija mobilne stanice za procenjeni vektor obeležja.

Ovaj problem može se izbeći pažljivim izborom vektora obeležja na osnovu kojih će se procenjivati lokacija mobilne stanice, kao i dovoljnom rezolucijom, što merenja izabranog obeležja, što koordinata tačaka u kojima se prikupljaju podaci sa terena i smeštaju u bazu podataka.

U ćelijskim sistemima pozicioniranje bazirano na vektoru obeležja uglavnom se realizuje kao mobilnom stanicom podržana (*mobile-assisted*) varijanta, s obzirom na to da neophodna merenja vrši mobilna stanica koja izmerene podatke šalje mreži gde se i vrši proračun lokacije.

Lokacijska metoda na bazi formiranja vektora obeležja često se koristi u *indoor* uslovima, gde je najpopularnija primena u kombinaciji sa WLAN mrežama.

Radi povećanja tačnosti lokacijskog postupka često se kombinuju metode koje se zasnivaju na proceni različitih lokacijskih parametara za potrebe određivanja nepoznate lokacije mobilne stanice. Iako su teorijski moguće sve kombinacije, u praksi su u većem obimu zaživele samo dve:

- kombinacija identifikacije najbližeg predajnika (*proximity sensing*) i podatka o rastojanju i/ili uglu i
- kombinacija lateracije i angulacije.

Prva kombinacija (*proximity sensing* i rastojanje) posebno je popularna u ćelijskim radio-mrežama. Najčešći je slučaj kombinacije identifikacije najbližeg predajnika, tj. uslužne bazne stanice, i rastojanja između mobilne i uslužne bazne stanice. Rastojanje između mobilne i uslužne bazne stanice procenjuje se na osnovu parametra koji se u ćelijskim sistemima koristi za sinhronizaciju i izvorno nema nikakve veze sa lociranjem. Ovaj parametar bazna stanica određuje merenjem vremena za koje signal pređe put od uslužne bazne stanice do mobilne i nazad (*round trip time – RTT*³⁾), i na osnovu njega procenjuje rastojanje između mobilne i uslužne bazne stanice. Primeri ovih parametara su: TA (*timing advance*) u GSM i RTT u UMTS. Dakle, koristeći dodatne parametre (TA, RTT) lokacija mobilne stanice dodatno je ograničena na kružni prsten (slika 4) ili na deo kružnog prstena oko uslužne bazne stanice. Debljina ovog prstena određena je rezolucijom RTT parametra iz kojeg se i procenjuje nepoznato rastojanje.

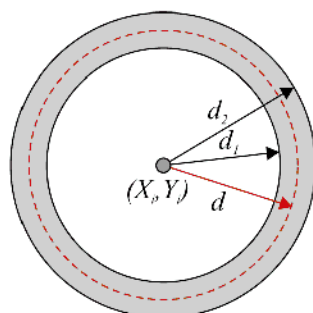
Ako je bazna stanica dodatno opremljena i antenskim nizom, moguće je dalje ograničiti lokaciju mobilne stanice na sektor određen usmerenošću antenskog niza.

Ipak, sve ove kombinacije pokazuju manju tačnost od metoda zasnovanih na lateraciji i angulaciji. Sa druge strane, ukoliko je geometrija baznih stanica koje učestvuju u merenju potrebnih parametara loša, kao

³⁾ *Round Trip Time* ili *Round Trip Delay Time* su metode koje su zasnovane na proceni ukupnog vremena potrebnog signalu da stigne od predajnika do prijemnika i vremena potrebnog za prenos signala u suprotnom smeru.

što je slučaj na auto-putu, lateracija i angulacija ponaosob pokazuju loše rezultate. U tom slučaju pribegava se kombinaciji lateracije i angulacije.

$$p_i(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{\pi(d_2^2 - d_1^2)}, & \text{za } d_1 \leq r \leq d_2 \\ 0, & \text{drugde} \end{cases} \quad (9)$$



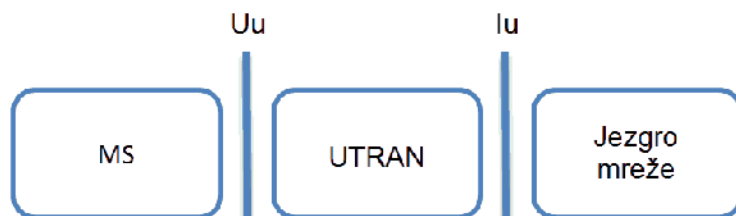
Slika 4 – Određivanje lokacije MS merenjem nivoa primane snage:
(X_b, Y_b) – koordinate bazne stanice

Figure 4 – Determination of the MS location by measuring the received power level:
(X_b, Y_b) – base station coordinates

Osnovne karakteristike UMTS standarda

Mobilni radio-sistemi treće generacije (3G) zasnivaju se na CDMA konceptu. Evropski 3G sistem UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) zasnovan je na širokopojasnom CDMA (*Wideband CDMA* – WCDMA), koji predstavlja DS-SS pristup na bazi pseudoslučajnih sekvenci visoke učestanosti.

Arhitektura UMTS sistema na najvišem nivou sadrži mobilne stanice (*User Equipment* – UE), radio-pristupnu mrežu (*UMTS Terrestrial RAN* = UTRAN) i jezgro mreže (*Core Network* – CN), a prikazana je na slici 5 (Valtanen, 2008). Međuveza MS i UTRAN mreže označava se kao *Uu* interfejs, a međuveza UTRAN mreže i jezgra mreže označava se kao *Iu* interfejs.



Slika 5 – Arhitektura UMTS sistema
Figure 5 – UMTS system architecture

Kontroler radio-mreže (RNC) jeste element mreže čija je uloga raspolaganje i upravljanje radio-resursima, tj. baznim stanicama koje su povezane na njega. U različitim situacijama on ima tri različite uloge, saglasno kojima se naziva:

- upravljački RNC (*Controlling RNC – CRNC*),
- uslužni RNC (*Serving RNC – SRNC*) i
- usmeravajući RNC (*Drifting RNC – DRNC*).

RNC koji upravlja jednom BS naziva se upravljački RNC (CRNC) i odgovoran je za upravljanje saobraćajnim opterećenjem i zagušenjem u njegovim ćelijama. Takođe, izvršava algoritam za upravljanje pristupom i dodelom koda novim radio-vezama (novim pozivima) koje se uspostavlja u ovim ćelijama.

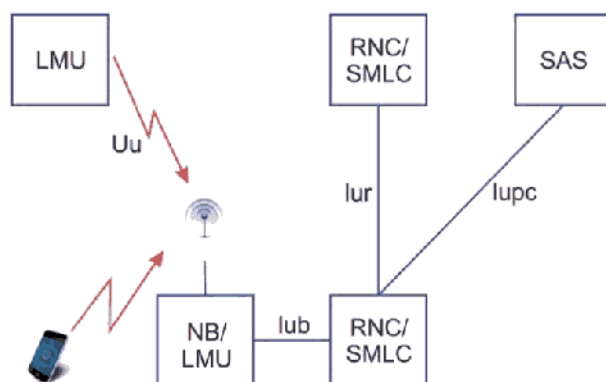
Ako mobilna UTRAN veza koristi resurse više od jednog RNC, kontroleri radio-mreže (RNC) koji su uključeni u vezu imaju dve različite logičke uloge. Uslužni RNC (*Serving RNC – SRNC*) jeste RNC koji završava *Iu* vezu koja obuhvata prenos korisničkih podataka prema i od jezgra mreže i signalizacije koja se koristi za aplikacioni deo radio-pristupne mreže (*Radio Access Network Application Part – RANAP*). Uslužni RNC takođe završava signalizaciju vezanu za upravljanje radio-resursima (*Radio Resource Control – RRC*) na nivou 3 između MS i UTRAN mreže. BS koja je povezana na UTRAN mrežu ima jedan i samo jedan SRNC. Sve osnovne upravljačke funkcionalnosti koje se odnose na radio-resurse izvršavaju se u SRNC, ali kako kašnjenje i zahtevi za bitskom brzinom stalno rastu dolazi do pomeranja upravljačkih funkcija prema baznoj stanici. Usmeravajući RNC (*Drifting DRNC – DRNC*) jeste bilo koji RNC, ako nije SRNC, koji upravlja ćelijama koje koristi mobilna stanica. DRNC je odgovoran za podršku SRNC u upravljanju radio-resursima; može da izvršava makrodiverziteti kombinovanje i deljenje, ali transparentno usmerava podatke na korisničkoj ravni prema SRNC između *Iub* i *Iur* interfejsa. Jedna mobilna stanica ne mora da ima DRNC, može da ima jedan ili, ako je moguće, i više.

Kada se skupu aktivnih ćelija neke mobilne stanice doda nova ćelija (radio-linije su simultano uključene u vezu) i ona poveže u mrežu preko RNC koji nije SRNC, taj novi RNC preuzima „drift” ulogu. Kasnije, kada mobilna stanica koja se kreće ažurira skup aktivnih ćelija, moguće je da se relocira SRNC, tako da dolazi do promene kod DRNC, pa ona deluje kao nova SRNC (Holma, Toskala, 2004), (Laiho, Wacker, 2002).

Princip lokalizovanja mobilne stanice u UMTS mreži prikazan je na slici 6. Glavne funkcije izvršavaju se unutar uslužnog kontrolera radio-mreže SRNC, koji može da radi u dva režima: centralni RNC i centralni SAS (*Standalone SMLC*). RNC u režimu centralnog RNC upravlja tokom zahteva za lokalizaciju, bira metod lokalizacije, obezbeđuje podatke ukoliko je potrebno i, konačno, estimira lokaciju korisnika. SAS režim, ili SAS

mod, izvršava procedure zasnovane na zahtevima uslužnog kontrolera radio-mreže (SRNC). SAS izvršava globalno lociranje GNSS (*Global Navigation Satellite System*) i lociranje na uzlaznoj trasi na bazi merenja razlike vremena U-TDoA (*Uplink – Time Difference of Arrival*). Takođe, u ovom režimu SRNC ima aktivnu ulogu u komunikaciji između MS i jezgra mreže (*Core Network*) (Borkowski, 2008).

Upravljački CRNC odlučuje u kolikoj meri će se pojedini elementi UMTS mreže aktivirati, te koja su merenja neophodna. Lokalna jedinica za merenje (*Local Measurement Unit – LMU*) izvršava radio-merenja (merenje kašnjenja signala od baznih stanica do LMU) i prosleđuje podatke do CRNC. U UTRAN-FDD⁴ mrežama bazne stanice poseduju dodeljeni LMU koji obezbeđuje vremensku sinhronizaciju sa susednim baznim stanicama. U slučaju da ne postoji optička vidljivost između baznih stanica, operatori mogu konfigurisati samostalnu LMU (*stand-alone LMU*). Bazne stanice UTRAN-TDD mreža su a priori sinhronizovane, tako da nemaju potrebu za LMU.



Slika 6 – Infrastruktura UMTS mreže koja se koristi za lokalizaciju
Figure 6 – UMTS infrastructure used for localization

Metode lociranja MS u UMTS mreži

U UMTS mreži, u zavisnosti od korišćene mrežne infrastrukture, mogu da se koriste i stanične i mrežne lokacijske metode, tj. određivanje lokacije MS može da se vrši na strani MS ili na strani mreže. U UMTS mrežama mogu se koristiti: metode na bazi merenja u vremenskom domenu (*time-based*), metode na bazi merenja nivoa primljene snage (*Received Signal Strength – RSS*) i metode na bazi merenja ugla pod kojim signal

⁴ UTRAN mreža može da radi u dva moda (sa frekvencijskim i sa vremenskim dupleksom): UTRAN-FDD i UTRAN-TDD

dolazi do prijemne antene, koje zahtevaju korišćenje adaptivnih antenskih nizova. Mrežne metode koje koriste GNSS informacije, zajedno sa pojedinim izmerenim podacima, predstavljaju posebne metode. Isto tako, može da se koristi kombinacija svih pomenutih metoda, a u tom slučaju govori se o tzv. hibridnim metodama sa boljim karakteristikama.

U većini pomenutih metoda tačnost je umnogome ograničena zbog nepostojanja optičke vidljivosti između radio-prijemnika i radio-predajnika, te višeputne propagacije. Postojanje optičke vidljivosti između radio-prijemnika i radio-predajnika u znatnoj meri utiče na tačnost u proceni lokacije MS.

Metode lociranja na bazi merenja u vremenskom domenu (Time-based)

Metode na bazi merenja vrednosti parametara propagacije radio-signalu u vremenskom domenu dele se prema vrsti korišćenih lokacijskih parametara na: RTT, ToA i TDoA metode. Ovi parametri mogu se meriti različitim metodama koje se ostvaruju u vremenskom ili faznom domenu.

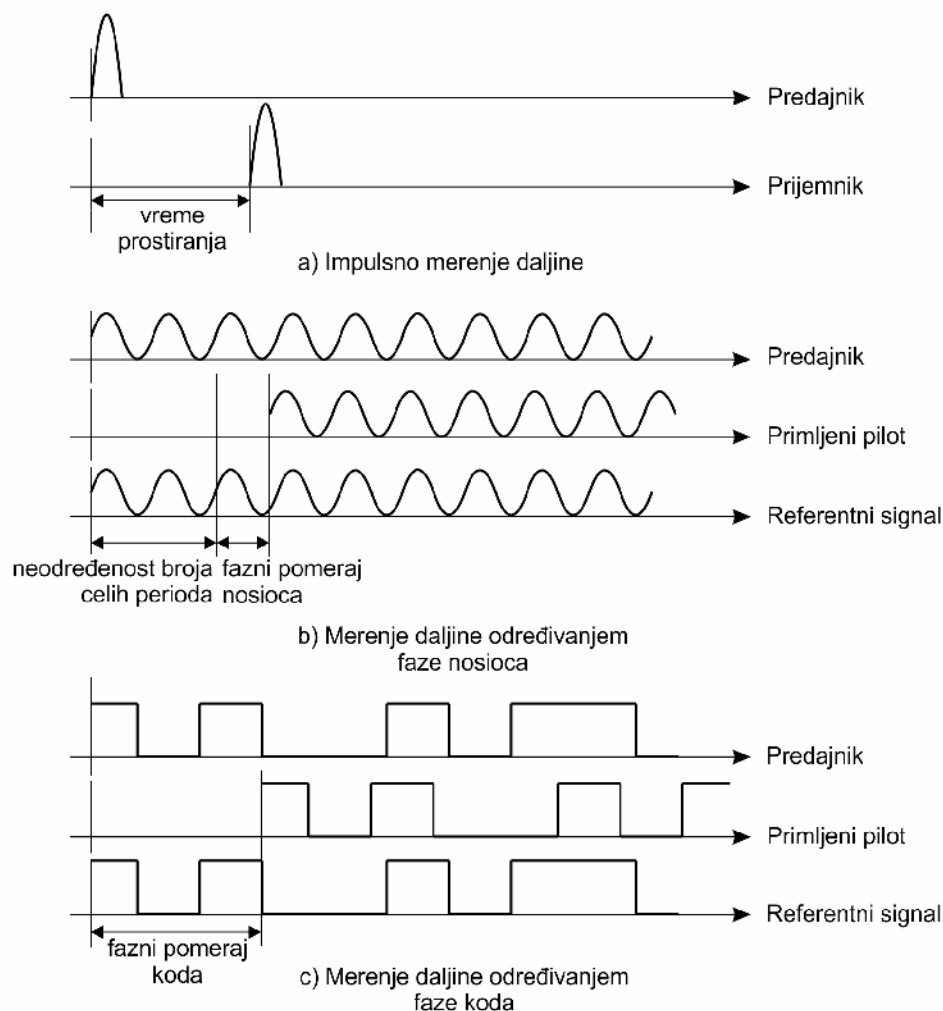
Metode merenja lokacijskih parametara radio-signalu

Prema (Caffery, 2000), u CDMA mrežama mogu se koristiti tri metode za merenje lokacionih parametara radio-signalu u vremenskom domenu:

impulsno merenje daljine (Pulse ranging). Vrš se pomoću pilot signala koji ima oblik jednog radio-impulsa. ToA se meri na prijemnoj strani (slika 7a). Trenutak emitovanja impulsa mora biti poznat prijemnoj strani. U slučaju da se meri TDoA, tačno vreme emisije nije potrebno, ali radio-impuls mora emitovati više radio-predajnika (baznih stanica) u istom trenutku;

fazno merenje daljine (Carrier phase ranging). Primljeni pilot signal poredi se sa referentnim signalom kojeg generiše prijemnik (slika 7b). U trenutku emitovanja, pilot signal i referentni signal moraju biti u fazi. Ovaj metod merenja pati od problema *integer ambiguity*, odnosno višeznačnosti koja se manifestuje nepoznatim brojem faznih ciklusa (perioda). Najlakši način da se prevaziđe ovaj problem je korišćenje pilot signala jako male frekvencije, a samim tim talasne dužine reda kilometra. Međutim, ovo nije praktično zbog dimenzija antena, tako da je potrebno koristiti napredne metode koje se baziraju na brojanju faznih ciklusa;

kodno merenje daljine (Code phase ranging). Princip je veoma sličan prethodno opisanom, uzimajući u obzir da je pilot signal modulisan poznatom sekvencom (kodom). Predajnik i prijemnik generišu sekvence u istom trenutku (slika 7c). Vreme propagacije signala određuje se na osnovu merenja razlike faznih stanja primljenih sekvenci sa jedne i druge BS (pomerač čipova), koja se određuje međukorelisanjem primljenih signala.



Slika 7 – Ilustracija merenja lokacijskih parametara u vremenskom domenu
Figure 7 – Illustration of the local parameters measurement in the time domain

Vreme dolaska (Time of Arrival - ToA)

ToA predstavlja vreme koje prijemna strana „vidi” na svom internom takt signalu kada primi signal. Kod ovog tipa merenja, jedan od faktora koji umnogome utiče na procenjenju vrednost je perioda ponavljanja internog takt signala. Imajući u vidu da se posmatrana vrednost inkrementuje samo u trenutku kada se pojavi pozitivna ili negativna ivica takt signala, promena bilo kog signala između dve rastuće ili opadajuće ivice takta

uneće grešku. Prema tome, u bilo kom trenutku unutar pomenutog perioda procenjena vrednost ToA biće ista. Ukoliko se ova vrednost preslika na udaljenost, maksimalna greška koja se može napraviti zbog konačnog trajanja periode (frekvencije) takta može da se izračuna prema formuli:

$$\varepsilon_{takt} = \frac{c}{f} \quad (10)$$

gde je c brzina svetlosti, a f je frekvencija takt signala. Kada je vrednost greške ista kao tipična dužina komunikacionog kanala, postaje neizvodljivo da se proceni lokacija korisnika na osnovu ToA merenja.

Iako izmerena vrednost najviše zavisi od tehnologije, uobičajeno je da se ona modeluje sumom konstantne i promenljive komponente. Prema tome, vrednost t dobija se sumiranjem konstantne komponente t_{tx} koja predstavlja vremenski trenutak predaje i vremena propagacije, tj. vremena koje je potrebno signalu da pređe put od predajnika do prijemnika:

$$t = t_{tx} + \frac{r}{c} + \varepsilon_{sync} \quad (11)$$

U prethodnoj relaciji c predstavlja brzinu propagacije (obično se radi o brzini svetlosti), dok r predstavlja fizičku dužinu komunikacione linije. Vrednost ε_{sync} kompenzuje razliku u sinhronizaciji predajne i prijemne strane.

Takođe, uočava se da prethodna relacija ima smisao samo u slučaju kada su predajnik i prijemnik ili sinhronizovani ($\varepsilon_{sync} = 0$) ili nesinhronizovani, ali sa poznatim $\varepsilon_{sync} \neq 0$. Kao što se vidi, upravo je poznavanje ε_{sync} od krucijalnog značaja kod ToA metode, ali je svakako i njegov glavni nedostatak, imajući u vidu da je sinhronizacija celokupne mreže često skupa za implementaciju i održavanje.

Analiza faktora koji utiču na vrednost promenljive komponente vremena u prethodnoj relaciji može da se razdvoji na uticaj frekvencije takt signala i uticaj propagacije. Greška usled frekvencije takta je uniformna: ima vrednost od 0 do one definisane izrazom (10). S druge strane, propagacioni efekti su stohastički i zavise od izabranog scenarija, pa greška nastala usled toga može da se opiše funkcijom gustine raspodele, npr. Gausovom raspodelom. Na taj način dolazi se do:

$$t = t_{tx} + \frac{r}{c} + \varepsilon_{sync} + \mu_{takt} + \mu_{prop}, \quad \begin{cases} \mu_{takt} \equiv Unif(0, c/f) \\ \mu_{prop} \equiv Norm(0, \sigma_{prop}) \end{cases} \quad (12)$$

gde σ_{prop} predstavlja standardnu devijaciju greške izazvane propagacionim efektom.

Razlika vremena dolaska (Time Difference of Arrival – TDoA)

TDoA predstavlja razliku dva ToA merenja dobijena od dva ekvivalentna signala emitovana u istom trenutku. Za ovaj tip merenja nije potrebna sinhronizacija između predajnika i prijemnika koja je potrebna kod ToA merenja. Pošto TDoA predstavlja razliku između dva ekvivalentna signala emitovana u istom trenutku, onda se t_{tx} iz izraza (12) gubi. Dakle, uz pretpostavku da su u trenutku t_{tx} emitovani signali sa dve bazne stanice, te da je mobilna stanica od prve bazne stanice na udaljenosti r_1 , a od druge na udaljenosti r_2 , razlika vremena dolaska signala od baznih stanica do mobilne stanice t određena je sa:

$$t = t_{tx} + \frac{r_1}{c} + \varepsilon_{sync} - \left(t_{tx} + \frac{r_2}{c} + \varepsilon_{sync} \right) - \frac{r_1 - r_2}{c}. \quad (13)$$

TDoA se može meriti na uzlaznoj (*uplink*) i na silaznoj (*downlink*) trasi. Na uzlaznoj trasi MS emituje signal koji se prima na dve BS. Ovaj način merenja može imati problem usled skalabilnosti, jer se sve operacije izvršavaju na strani mreže. Nasuprot tome, pri merenju na silaznoj trasi, dve BS emituju, u isto vreme, dva ekvivalentna signala koje prima MS. Ovaj režim je očigledno skalabilniji od prethodnog. Ali, bez obzira na mod koji je odabran, obe BS moraju biti međusobno sinhronisane, mada BS i MS ne moraju.

Uvodeći promenljivu komponentu u TDoA, dobija se:

$$t = \frac{r_1 - r_2}{c} + \mu_{takt} + \mu_{prop}, \quad \begin{cases} \mu_{takt} \equiv Tri(-c/f, c/f) \\ \mu_{prop} \equiv Norm(0, 2\sigma_{prop}) \end{cases} \quad (14)$$

U prethodnoj relaciji figuriše trougaona raspodela greške od $-c/f$ do c/f , nastala oduzimenjem dve uniformne raspodele. Takođe, pretpostavlja se da su komponente šuma iste u komunikacionom kanalu od MS do BS1 i MS do BS2.

Važno je uočiti da metode na bazi merenja vremena propagacije signala zahtevaju sinhronizaciju predajne i prijemne strane (ToA) ili sinhronizaciju više predajnika (TDoA). Koliki je uticaj greške u vremenskoj sinhronizaciji najbolje pokazuje činjenica da, prilikom lokalizovanja korisnika, vremenski *offset* od $1\mu s$ unosi grešku lokalizacije od 300 m.

U slučaju da se za pozicioniranje MS koristi ToA, lokacija MS se estimira na preseku procenjenih udaljenosti:

$$r_i = ct_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}. \quad (15)$$

x_i, y_i su koordinate i -te BS, x, y su nepoznate koordinate MS, r_i je udaljenost između MS i i -te BS izračunata na osnovu propagacionog vremena (t_i). U praksi, $r_i \equiv \tau_i - \tau$, gde je τ_i izmerena vrednost ToA od i -te BS, a τ greška merenja. Jednoznačno rešenje može se dobiti na osnovu najmanje tri izmerena ToA vremena.

Alternativno, pozicija MS može se odrediti rešavanjem sistema jednačina u kojima figuriše TDoA između dva para BS. Na osnovu izmerene vrednosti razlike vremena dolaska signala TDoA od dva para BS (tri bazne stanice), mogu se odrediti dve hiperbole u čijem preseku se nalazi potencijalna lokacija MS. Prema tome, procenu lokacije daje rešenje nelinearnog sistema jednačina predstavljenog hiperbolama:

$$\begin{aligned} c(t_1 - t_2) &= \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} - \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} \\ c(t_1 - t_3) &= \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} - \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2} \end{aligned} \quad (16)$$

gde t_1, t_2, t_3 predstavljaju merena vremena propagacije signala od odgovarajuće BS sa koordinatama x_i, y_i , dok x, y označavaju nepoznate koordinate MS (Borkowski, 2008). Uticaj greške merenja u prethodnim relacijama manifestuje se pomerajem hiperbola.

Lociranje na osnovu merenja TDoA zahteva podatke o lokaciji baznih stanica i stvarnu vrednost razlike vremena prostiranja RTD (*Real Time Difference*) signala na silaznim trasama, jer bazne stanice UTRAN mreže nisu sinhronizovane, pa prema tome i RTD nije konstantno. Ovu informaciju može da dostavi LMU na fiksnoj lokaciji koja verifikuje UTRAN ramove ili meri vremensku razliku između ramova SFN-SFN⁵ uzimajući u obzir sve lokalne BS.

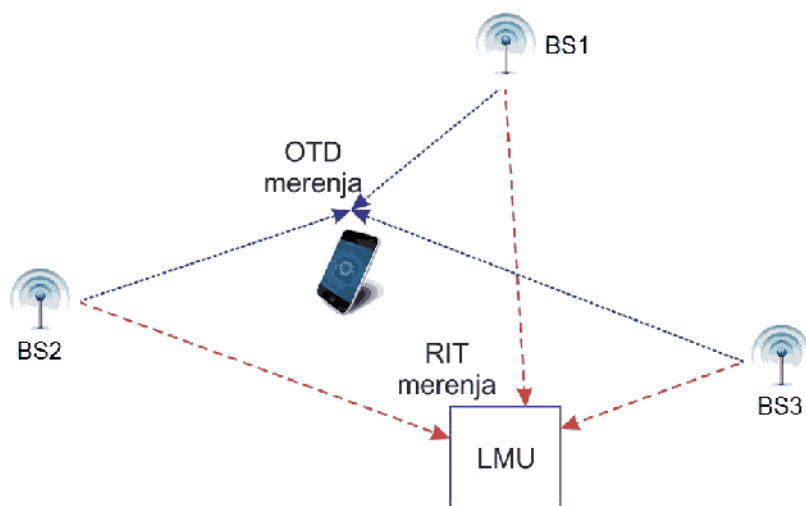
Treba napomenuti da tehnika zasnovana na merenju TDoA nije imuna na realne uslove prostiranja i hardverska ograničenja. Glavna prepreka implementaciji metode lokalizacije na bazi merenja TDoA odnosi se na potrebu za modifikacijom mobilne stanice, realizaciju i održavanje LMU i ograničenu dostupnost pilot signala u tipičnom ćelijskom scenariju.

Standardizovana TDoA metoda koristi tzv. vreme „spavanja” na silaznoj trasi (*Idle Period Downlink* – IPDL). Prema toj metodi, BS prekida emisiju kako bi se povećao broj pilota i time omogućila primena TDoA tehnike. Nasuprot ovoj, moguće je realizovati i tehniku koja se primenjuje na uzlaznoj trasi (*Uplink Time Difference of Arrival* – U-TDoA). Time se izbegavaju periodi mirovanja i potreba za modifikacijom mobilne stanice. Međutim, merenje razlike vremena dolaska na uzlaznoj trasi zahteva, pored LMU, dodatna merenja na strani mreže, što znači da nije jeftina.

⁵ SFN *System Frame Number* – broj sistemskog rama.

Metode lociranja merenjem lokacijskih parametara na silaznoj trasi

Princip rada OTDoA-IPDL (*Observed Time Difference of Arrival – Idle Periods Downlink*) metode prikazan je na slici 8. Merenje vremena korišćenjem strukture vremenskih intervala koje generiše bazna stanica vrši se i na strani mobilne stanice i na strani LMU. Merenja na strani MS vrše se radi određivanja razlike udaljenosti baznih stanica od MS i određivanja udaljenosti od svake bazne stanice, dok se merenja na strani LMU vrše zbog određivanja vremenskog pomeraja između trenutaka emitovanja signala sa baznih stanica (*offset*) koji je posledica nepostojanja sinhronizacije između baznih stanica (*Initial Simulation Results for the OTDOA-PE positioning method, 2000*).



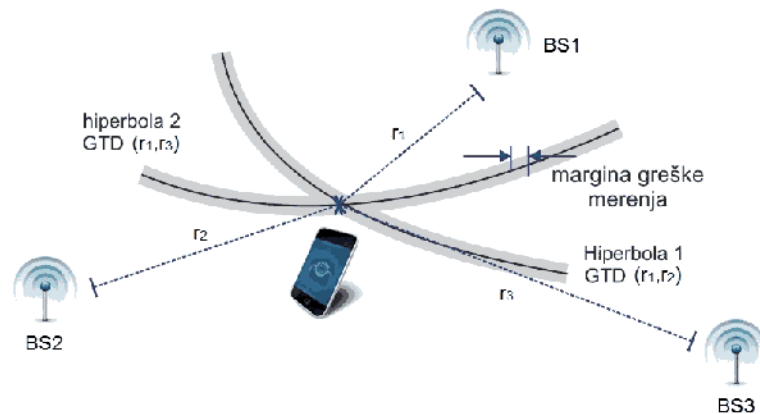
Slika 8 – OTD (Observed Time Difference) i RIT (Radio Interface Timing) merenja
Figure 8 – OTD (Observed Time Difference) and RIT
(Radio Interface Timing) measurements

OTDoA-IPDL merenja mogu se koristiti za određivanje linija položaja u obliku kružnica ili hiperbola merenjem ToA i TDoA, respektivno. Ukoliko se želi primeniti jedna od ove dve OTDoA metode (merenje ToA ili TDoA), merenja vremena moraju biti obavljena na MS i LMU. Merenja izvršena na LMU nazivaju se RIT (*Radio Interface Timing*) merenja (merenje vremenskog pomeraja između trenutaka emitovanja signala sa baznih stanica), dok se merenja izvršena na strani MS označavaju kao OTD (*Observed Time Difference*) merenja (merenje razlike vremena koja se vidi na MS).

Hiperbolna OTDoA. Ova metoda lokalizacije može se prikazati na sledeći način: neka postoje dve bazne stanice, BS_1 i BS_2 ; neka je r_1 geo-

metrijska udaljenost prve bazne stanice od MS, a r_2 udaljenost druge bazne stanice od iste MS. Lokacija MS nalazi se na onim koordinatama (liniji položaja) koje zadovoljavaju uslov da je razlika $r_2 - r_1$ konstantna. Po definiciji, tačke čije koordinate zadovoljavaju ovaj uslov leže na hiperboli. Ukoliko se, na isti način, ali korišćenjem drugog para baznih stanica (BS_1 i BS_3), odredi još jedna hiperbola, tada se lokacija MS nalazi određivanjem tačke preseka dve pomenute hiperbole (slika 10).

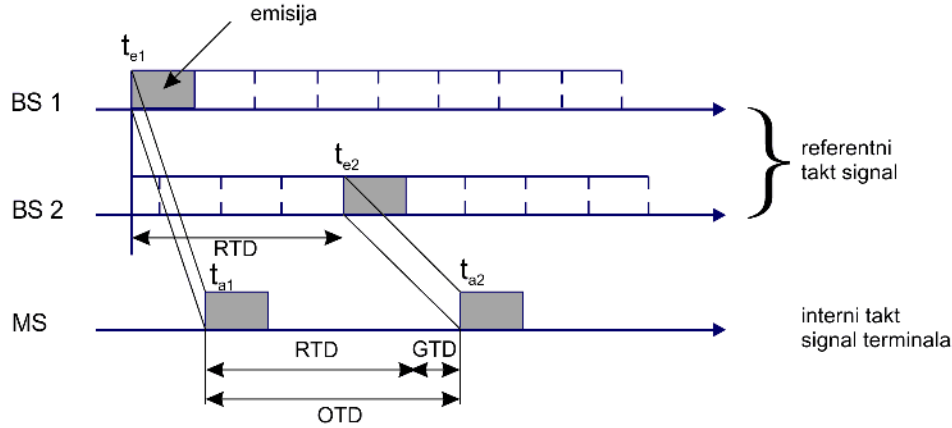
Razlika rastojanja $r_2 - r_1$ proporcionalna je vremenskom intervalu između trenutaka prijema podataka na silaznoj trasi od različitih BS, pretpostavljajući da su podaci sa BS poslali u istom trenutku. Ovaj interval naziva se geometrijska razlika vremena (*Geometric Time Difference – GTD*), a određen je sa $GTD = (r_2 - r_1)/c$, gde c predstavlja brzinu svetlosti. Zbog odsustva vremenske sinhronizacije, ovaj interval nije moguće meriti zbog čega se koriste vremenski intervali označeni kao: izmerena razlika vremena (*Observed Time Difference – OTD*) i stvarna razlika vremena (*Real Time Difference – RTD*).



Slika 9 – Ilustracija određivanja lokacije MS pomoću hiperbolne OTDoA metode
Figure 9 – Illustration of determining the MS location using the OTDoA hyperbolic method

Veza između GTD, OTD i RTD ilustrovana je na slici 10. OTD se odnosi na vreme koje se vidi na mobilnoj stanici. Ukoliko t_{a1} predstavlja vreme prijema podatka od BS_1 , a t_{a2} vreme prijema podatka od BS_2 , onda je $OTD = t_{a2} - t_{a1}$. Potrebno je napomenuti da su t_{a1} i t_{a2} određeni u odnosu na interni takt signal mobilne stanice (Küpper, 2005b).

RTD predstavlja vremenski pomeraj između trenutaka kada su emitovani signali sa dve bazne stanice i on se određuje u LMU u odnosu na njegov interni takt. Ukoliko je t_{e1} vreme emitovanja signala sa BS_1 , a t_{e2} vreme emitovanja signala sa BS_2 , onda je $RTD = t_{e2} - t_{e1}$. Nakon određivanja OTD i RTD, proračunava se GTD kao $GTD = OTD - RTD$.



Slika 10 – Veza između GTD, OTD i RTD
Figure 10 – Connection between GTD, OTD and RTD

Treba napomenuti da RTD nije tačna već procenjena vrednost vremena koja je određena u LMU. Svakako, treba uzeti u obzir propagaciona kašnjenja. Prema tome, vreme prijema signala u LMU ne predstavlja vreme emisije signala od strane BS. Kako bi se mogao otkloniti efekat kašnjenja, moraju se znati tačne lokacije LMU i svih BS. Takođe, treba napomenuti da korekciona tehnika može uneti dodatnu grešku ukoliko lokacija LMU i BS nije određena na valjan način, kao i u slučaju da signal ne dolazi linijom optičke vidljivosti do LMU.

Cirkularna OTDoA. Razlika u odnosu na prethodnu konfiguraciju je sledeća: udaljenosti baznih stanica do mobilnih stanica r_1 , r_2 i r_3 ujedno predstavljaju poluprečnike kružnica koje se presecaju na mestu lokacije mobilne stanice. Za određivanje ovih rastojanja, neophodno je poznavati vreme propagacije signala od BS do terminala. Međutim, ovo vreme se ne može odrediti, jer se na BS ne beleži trenutak emitovanja signala od strane BS, a čak i kad bi se ovo vreme registrovalo, ono ne bi moglo da se poveže sa vremenom dolaska signala na MS, jer takt signali na MS i BS nisu vremenski sinhronizovani.

Zbog toga, za određivanje navedenih rastojanja mora da se nađe drugi način. Neka je $t_{i,MS}$ vreme dolaska signala od BS_i , mereno prema referentnom takt signalu MS, a $t_{i,LMU}$ vreme dolaska signala od BS_i , mereno prema takt signalu LMU. Dalje, neka r_i predstavlja traženu geometrijsku udaljenost BS_i od MS, a $r_{i,LMU}$ poznatu udaljenost između BS_i i LMU. Tada važi:

$$r_i - r_{i,LMU} = c(t_{i,MS} - t_{i,LMU} + \varepsilon), \quad (17)$$

gde je c brzina svetlosti i ε razlika takt signala MS i LMU. Rešavajući prethodnu relaciju po r_i i uvrštavajući dobijene vrednosti u:

$$r_i = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2}, \quad (18)$$

dobija se sistem od tri jednačine sa tri nepoznate, gde su (x, y) i ε nepoznate. Treba napomenuti da je pomenuta tehnika izvodljiva samo u slučaju da je ε određeno za jedan par takt signala. To znači da se podaci svih BS moraju meriti na jednom LMU ili na više njih ako imaju sinhronizovani takt signal.

Merenje vremena na radio-interfejsu u LMU (RIT merenja)

RIT merenja obavljaju dodeljena ili samostalna LMU, a potrebna su samo kod UTRAN-FDD moda rada, pošto su kod UTRAN-TDD moda bazne stanice međusobno sinhronizovane. Merenje vremena vrši se korišćenjem zajedničkog pilotskog kanala CPICH (*Common Pilot Indicator Channel*). Takođe, merenja mogu biti obavljena u odnosu na interni takt signal LMU jedinice ili u odnosu na GPS (*Global Positioning System*) vreme.

Merenje vremena koje se vidi na mestu MS (OTD merenja)

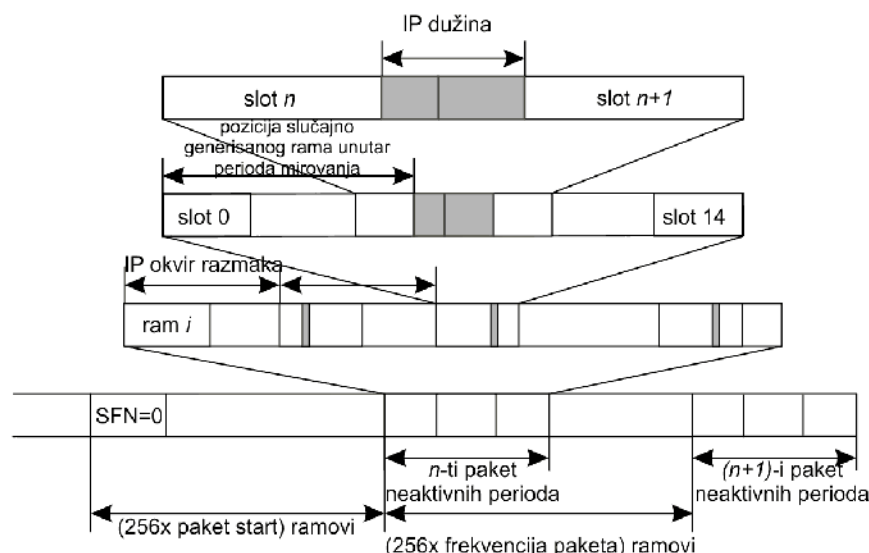
OTD merenja izvršavaju se određivanjem vremenske razlike (pomeraja) između brojeva sistemskog rama SFN-SFN. Međutim, zbog postojanja *near-far* ili *hearability* efekta kod CDMA sistema, mobilna stanica može biti u situaciji da ne identifikuje dovoljno BS potrebnih za OTD merenja. Kako bi se prevazišao ovaj problem, svaka BS mora da prekine predaju unutar kratkih intervala, tokom kojih MS ima mogućnost da detektuje kanal CPICH od susedne BS. Ovi intervali nazivaju se neaktivnim ili spavačkim (*idle*) intervalima, a odgovarajući metod se označava kao IPDL (*Idle Periods Downlink*) mod. Nepravilnosti u pojavljivanju intervala mirovanja određene su pseudoslučajnim (*Pseudo-Noise* – PN) generatorom. Međutim, PN sekvenca može biti predvidiva, pa se, s tim u vezi, početak svakog neaktivnog perioda može jednoznačno odrediti.

Postoje dva moda u kojima IPDL može da radi:

- *kontinualni* – u ovom modu neaktivni periodi pojavljuju se s vremenom na vreme,

- *eruptivni* – neaktivni periodi pojavljuju se u naletima, ali tako da ih ima dovoljno da mobilna stanica obavi merenja. Uzastopni naleti odvojeni su intervalima dugog trajanja koji ne sadrže neaktivne periode.

Postavljanje neaktivnih intervala unutar transmisionog niza podataka bazne stanice ilustrovano je na slici 11. Kod UTRAN-FDD neaktivni intervali imaju tipično dužinu 5-10 čipova. Najviše se pojavljuje jedan neaktivan interval unutar rama, a njegova pozicija određena je PN generatorom. Kao što je ilustrovano na slici 11, neaktivni interval može da zahvati dva susedna kanalska intervala. Na drugoj strani, neaktivni period kod UTRAN-TDD ima uvek trajanje jednog kanalskog intervala i nema mogućnost da zahvati dva kanalska intervala. SMLC upravlja IPDL metodom (Borkowski, 2008), (*Time Aligned IP-DL positioning technique*, 1999).



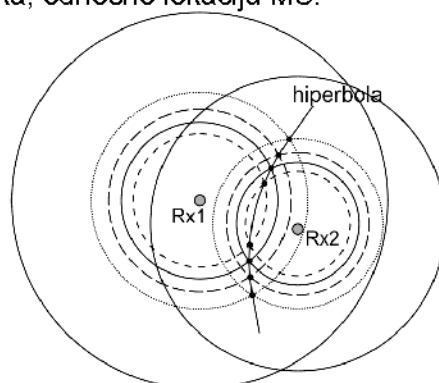
Slika 11 – Postavljanje neaktivnih perioda
Figure 11 – Setting of idle periods

Metode lociranja merenjem lokacijskih parametara na uzlaznoj trasi

Metode lociranja merenjem lokacijskih parametara na uzlaznoj trasi U-TDoA (*Uplink TDoA*) zasnivaju se na merenju ToA vremena, što obavlja mreža. Posmatra se poznati signal emitovan sa MS koji prima najmanje četiri LMU. Vreme propagacije signala proporcionalno je udaljenosti između MS i LMU. Razlika između vremena prijema na dve LMU definiše hiperbolu. Lokacija MS se procenjuje na osnovu preseka više hiperbola. Prednost ovakvog metoda je u tome što nije potrebno znati vreme emitovanja, kao i u tome što se ne traže nikakve dodatne funkcionalnosti na strani MS.

Slika 12. ilustruje kako se određuje lokacija MS (Figueiras, Frattasi, 2010). Dva prijemnika RX_1 i RX_2 su na fiksnim lokacijama i predstavljaju jedan par LMU. Parovi kružnica sa centrom u RX_1 i RX_2 imaju radijuse koji su određeni na osnovu vremena koje je potrebno signalu da pređe put od predajnika (MS) do prijemnika (LMU), t_{tr}^1 . Razlika radijusa je konstantna i proporcionalna razlici vremena t_{tr}^1 i t_{tr}^2 . Razlika $t_{tr}^1 - t_{tr}^2$ predstavlja vrednost koju U-TDoA sistem meri. Na slici su nacrtane kružnice konstantnog rastojanja od LMU za par LMU. Tačke u kojim se seku kružnice koje imaju konstantne vrednosti razlike njihovih poluprečnika određuju hiperbolu na kojoj može biti locirana MS za izmerenu vrednost razli-

ke vremena t^{tr1} - t^{tr2} . Merenjem ovih vremena i za drugi par LMU, može se na isti način nacrtati hiperbola koja se sa prethodnom seče u dve tačke. Treći par LMU omogućava crtanje i treće hiperbole koja jednoznačno određuje tačku preseka, odnosno lokaciju MS.



Slika 12 – Crtanje hiperbole na osnovu merenja vremenskog kašnjenja
Figure 12 – Drawing the hyperbola based on the time delay measurement

Zaključak

Ključni problemi koji usporavaju implementaciju lokacijskih usluga u ćelijskim mrežama do danas nisu u potpunosti rešeni. Ona rešenja koja povećavaju tačnost pozicioniranja, po pravilu povećavaju kompleksnost, ali i cenu, što je presudan faktor. Nasuprot tome, jednostavna i popularna rešenja, bazirana na poznavanju servisne ćelije, ne daju dovoljnu tačnost. Zbog svega toga operatorima je omogućeno da izaberu metodu koja im najviše odgovara, u smislu kompleksnosti i cene implementacije, ali uz uslov da se ispune zahtevi po pitanju minimalne tačnosti koja je potrebna srevišima za hitne pozive.

U ovom radu prikazana su opšta razmatranja radio-lokacijskih metoda u radio-mrežama sa detaljnom analizom metoda lociranja mobilne stanice u 3G (UMTS) mrežama na bazi staničnog i mrežnog merenja lokacijskih parametara. Detaljno su analizirane metode lociranja na bazi merenja u vremenskom domenu (ToA, TDoA, OTDoA-IPDL, UTDaA). Ove metode pokazuju veću preciznost u odnosu na blizinske metode (Proximity sensing) i metode bazirane na proceni obeležja baznih stanica (Fingerprinting). Ove metode, takođe, zahtevaju duže vreme za početno lociranje. Nedostaci su potreba za značajnim izmenama na baznim i mobilnim stanicama, kao i troškovi koje te izmene proizvode. Pored toga, dolazi i do značajnijeg povećanja *overhead-a*, što utiče na prenosnu moć mreže i dodatno opterećuje prenosne linije. Radi sveobuhvatnog sagledavanja problema lociranja u 3G (UMTS) mrežama, autori su sprovedli istraživanje moguće-

sti primene i ostalih metoda radio-lociranja na bazi merenja nivoa primljene snage (RSSI), metoda lociranja zasnovanih na merenju radio-smjera (AoA), metoda na bazi ćelijske identifikacije i, konačno, satelitskih metoda. Rezultati ovih istraživanja biće prikazani u sledećem radu, zajedno sa uporednom analizom i predlogom povoljnog rešenja.

Literatura

- Borkowski, J.M., 2008, *On Applicable Cellular Positioning for UMTS*, PhD Thesis, United Kingdom,
- Caffery, J., 2000, *Wireless Location in CDMA Cellular Radio Systems*, Kluwer Academic Publishers,
- Coordination Group on Access to Location Information for Emergency Services (CGALIES), 2002, "Report on implementation issues related to access to location information by emergency services (E112) in the European Union", available at: http://ec.europa.eu/echo/civil_protection/civil/pdfdocs/cgaliesfinalreportv1_0.pdf,
- Figueiras, Frattasi, 2010, *Mobile Positioning and Tracking*, John Wiley and Sons, Ltd.,
- Functional specification of UE positioning in UTRAN, 2007, 3GPP TS 25.305, release 8 (v8.0.0), Stage 2,
- Grewal, M.S., Weill, L.R., Andrews, A.P., 2001, *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration*, John Wiley and Sons,
- Holma, H., Toskala, A., 2004, *WCDMA for UMTS*, John Wiley and Sons, Ltd,
- Initial Simulation Results for the OTDOA-PE positioning method, 2000, 3GPP TSG-RAN WG1R1-00-1186, www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/WG1_RL1/TSG-R1_16/docs/PDFs/R1-00-1186.pdf,
- Küpper, A., 2005a, "Fundamentals of Positioning in Location-based Services: fundamentals and operation", Wiley, Chichester, England,
- Küpper, A., 2005b, "Location-based Services", John Wiley and Sons,
- Laiho, J., Wacker, A., Novosad, T., 2002, *Radio network planning and optimization for UMTS*, John Wiley and Sons, Ltd,
- Melikov, A., Ed., 2011, *Cellular Networks – Positioning, Performance Analysis, Reliability*, Rijeka, InTech,
- Simić, M., 2009, Lociranje korisnika u ćelijskim radio mrežama, *Telekomunikacije*, Broj 5, Ratel,
- Simic, M. & Pejovic, P., 2008, An algorithm for determining mobile station location based on space segmentation. *IEEE Communications Letters*, Vol. 12, No. 7, July, 499–501,
- Sun, G., Chen, J., Guo, W., Liu, K.J.R., 2005, "Signal processing techniques in network-aided positioning—A survey of state-of-the-art positioning designs", *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 22, No 4, July, pp. 12–23,
- Šunjevarić, M.M., 1991, *Radio-goniometrija*, Vojnoizdavački i novinski centar, Beograd,
- Time Aligned IP-DL positioning technique, 1999, 3GPP TSG-RAN WG1 R1-99b79, www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/WG1_RL1/TSGR1_07/Docs/Pdfs/R1-99b79.pdf,

Valtanen, J., 2008, Transport Formats in UMTS Radio Network Controller's Software Implementation, *Master's Thesis*, Espoo, January,

Zhao, Y., 2002, "Standardization of mobile phone positioning for 3G systems", *IEEE Communication Magazine*, vol. 40, no. 7, July, pp. 108–116.

RADIO LOCATION OF MOBILE STATIONS IN THIRD GENERATION NETWORKS

FIELD: Telecommunications

ARTICLE TYPE: Review Paper

Summary

Mobile station localization in mobile networks started with simple methods (e.g. Cell-ID method) which required only slight modifications of network infrastructures. Principally, it was about network localization by which a localization service became available to all types of mobile phones. Due to low precision, the initiated development of more sophisticated methods has not been finished yet. Among the advanced location-based methods are those based on the measurement of location parameters in the time domain. In this paper the general consideration of radio location methods in 3G (UMTS) radio networks is presented. The use of time based measurement methods was analysed in detail. Due to the limited article length, the use of other locating methods in 3G networks (based on power measurements, on radio direction measurement, and on cells identification – Cell ID and global positioning system – GPS) are not described.

Introduction

Mobile station localization within modern cellular networks increases the level of user security and opens wide opportunities for commercial operators who provide this service. The major obstacle for the implementation of this service, which also prevents its practical usage, is the modification of the existing network infrastructure.

In general, depending on the infrastructure used, positioning methods can be divided into two groups: integrated and independent. Integrated methods are primarily created for communication networks. A possibility to locate users represents just an additional service within a radio network. Independent methods are totally detached from the communication network in which the user whose location is being determined is.

Radio location methods

Determining the location of a mobile radio station is performed by determining the intersection of two or more lines of position. These lines represent the position of the set of points at which the mobile station may be located. These lines can be: (a) direction, if specified by a direction on an object, (b) circle, if determined by measuring the distance of an object, or (c) a hyperbola, if the difference is determined by measuring the distance

between two objects. In cellular networks, the location of mobile stations can be estimated roughly by proximity sensing methods and methods based on an evaluation of the characteristics of base stations (fingerprinting).

Basic characteristics of the UMTS standard

The radio network controller (RNC) has three different roles and is therefore known as: Controlling RNC (CRNC), Serving RNC (SRNC) and Drifting RNC (DRNC). The Local Measurement Unit (LMU) performs radio measurements (measuring the delay of signals from base stations to the LMU) and forwards the data to the CRNC. The main location functions are performed within the Serving RNC which can operate in two modes: RNC central and central SAS (Standalone SMLC). The RNC in the RNC central mode controls the flow of requirements for the localization, chooses the method of localization, provides information as necessary and, finally, estimates the location of the user. The SAS mode performs the procedures based on the requirements of the service radio network controller (SRNC). The SAS executes the global location (Global Navigation Satellite System) and location on the uplink, based on measuring the time difference U-TDoA (Uplink - Time Difference of Arrival).

Methods of locating the MS in a UMTS network

In the UMTS network, depending on the used network infrastructure, both the station and network-based method can be used, i.e. determining the MS location can be performed on the MS or on the network side. In UMTS networks, the following methods can be used: methods based on measurements in the time domain (time-based), methods based on measurements of a received power level (Received Signal Strength - RSS), methods based on measuring the angle under which the signal arrives to the receiving antenna and methods based on the global location system (Global Navigation Satellite System).

The methods based on measuring the values of the parameters of radio signals propagation in the time domain, analyzed in detail in the work, are divided by the type of location parameters used into: RTT, ToA and TDoA methods.

Conclusion

This paper examines the methods of radio locating in radio networks with a detailed analysis of methods of locating mobile stations in the 3G (UMTS) cellular networks based on station and network measurements of location parameters in the time domain.

Key words: Radio location, mobile station, angulation, lateration, 3G networks, position line, Time of Arrival (ToA), Time Difference of Arrival (TDoA).

Datum prijema članka/Paper received on: 30. 03. 2012.

Datum dostavljanja ispravki rukopisa/Manuscript corrections submitted on: 25. 04. 2012.

Datum konačnog prihvatanja članka za objavljivanje/ Paper accepted for publishing on: 27. 04. 2012.

MEASURING EFFICIENCY IN LOGISTICS

Milan M. Andrejić, Faculty of Transport and Traffic Engineering,
Logistics Department, University of Belgrade

DOI: 10.5937/vojtehg61-1756

FIELD: Logistics, Operations Management
ARTICLE TYPE: Review Paper

Abstract:

Dynamic market and environmental changes greatly affect operating of logistics systems. Logistics systems have to realize their activities and processes in an efficient way. The main objective of this paper is to analyze different aspects of efficiency measurement in logistics and to propose appropriate models of measurement. Measuring efficiency in logistics is a complex process that requires consideration of all subsystems, processes and activities as well as the impact of various financial, operational, environmental, quality and other factors. The proposed models have a basis in the Data Envelopment Analysis method. They could help managers in decision making and corrective actions processes. The tests and results of the model show the importance of input and output variables selection.

Key words: *efficiency, logistics, measuring methods, data envelopment analysis.*

Introduction

Modern product and service markets are very dynamic with a great number of participants. In order to stay in the market, companies constantly have to measure and monitor their performances as well as to define appropriate corrective actions. Depending on industries and types of systems, there are a large number of different performances. One of the basic and frequently used performances is efficiency. Efficiency is a very important indicator of the analysis of companies' operations.

There is no universal and generally accepted definition of efficiency. Different authors define efficiency in different ways. In (Gleason, Barnum, 1982, pp. 379-386), the notion of effectiveness means the level of the goals accomplishment ("doing the right things"), while under the notion of efficiency they mean the accomplishment of these goals in the best possible way ("doing the right things in the right way"), i.e. accomplishing the

largest number of outputs while using the least amount of resources. In the past, both in literature and in practice, the greatest attention was paid to the operational efficiency. Operational efficiency can be defined as the ratio between the exploited resources and the accomplished results.

The efficiency measurement process in manufacturing companies is completely different from the efficiency measurement process in service companies. Raw materials and components in the production process are transformed in the final product. Tangibles and easy measurability of the final product and resource usage greatly facilitate the efficiency measurement of production processes. On the other hand, the final product in service companies is a realized service that is by its nature transient, intangible and quantity immeasurable, for which realization is often necessary to employ different measurable resources such as space, time, labor, etc.

Products of logistics companies as well as typical service companies are: transport services, warehouse services, material-handling services, freight forwarding services and other services. For their realization, it is necessary to use various resources such as transport and material handling equipment, warehouse space, time, energy, labor, etc. whose usage is not easily measurable. An additional problem of measuring efficiency in logistics is the complexity, integration and mutual dependence of both resources involved and realized services.

When defining performances of logistics systems, it is possible to make very different and even conflicting aspects of performances. Defining and measuring the efficiency of logistics systems as one of the most important performances in recent years is very significant. Existing models for measuring and monitoring efficiency are not fully applicable in logistics and contain a large number of constraints. The lack of models for measuring and monitoring the efficiency in logistics systems applicable in practice is evident. This confirms the lack of papers and models tested on real examples. The aforementioned problem and the importance of monitoring and measuring the efficiency of logistics services for practitioners and researchers are the main motive of this paper. Recently, an increasing number of authors have been advocating the use of approaches such as the Data Envelopment Analysis (DEA) method (Min, Joo, 2006, pp. 259-65). The DEA method is used for estimating the efficiency of homogeneous Decision Making Units (DMUs).

This paper provides an overview of models for measuring the efficiency in logistics. A special emphasis is placed on DEA models, the most frequently used method in efficiency measurement. The aspects of efficiency measurement in logistics are also investigated. Different models tested on real examples are described in this paper.

Aspects of measuring efficiency in logistics

Measuring efficiency in logistics can be viewed from various aspects. From the point of time and the significance of the decision-making, there are three hierarchical levels of efficiency measurement: strategic, tactical and operational level. In accordance with the mentioned aspects, it is possible to make a difference among the following efficiency measurement aspects in logistics: activities efficiency, processes efficiency, subsystems efficiency, systems efficiency and supply chain efficiency (Fig. 1).

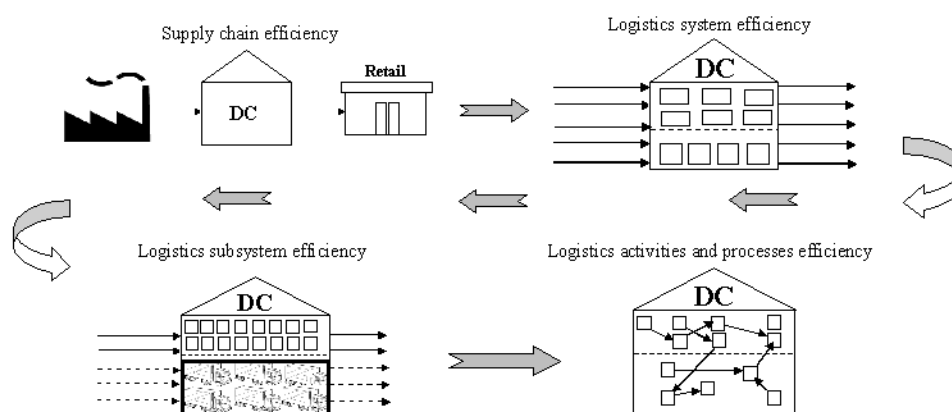


Figure 1 – Different perspectives on efficiency measuring
Slika 1 – Različite perspektive merjenja efikasnosti

Measuring and monitoring the efficiency of logistic networks, chains, systems, processes and activities primarily refers to the direct logistics flows, but the efficiency of reverse logistics flows is also important. In addition to monitoring and measuring the efficiency in logistic systems (freight forwarding, logistic centres, distribution centres, warehouses, etc.), it is necessary to analyze the efficiency of logistic activities and processes in systems whose main function are not logistic services (retail chains, hospitals, banks, etc.) For a successful measurement of the efficiency in logistics, it is necessary to consider a large number of inputs and outputs different in nature. Financial, technical, environmental, energy, social and many other factors expressed in different units influence efficiency in logistics. In this sense, it is possible to measure: energy efficiency, eco efficiency, cost efficiency, quality efficiency, etc. It can be concluded from the previous discussion that measuring efficiency in logistics is a complex

process that requires consideration of all subsystems, processes and activities as well as the impact of various financial, operational, environmental, quality and other factors.

Efficiency measuring models in logistics

From the initial works (Farrell, 1957, pp. 253-290 and Charnes, et al, 1978, pp. 429-444) and setting the basis of the DEA method as well as from introducing the notion of a DMU (Decision Making Unit), an expansion of the works from this area occurs. The suitability of application and the quality of the obtained results have influenced the application of this method in different profit and non-profit organizations: banks, libraries, hospitals, schools, universities, kindergartens, etc.

In the field of logistics, the DEA method is mostly used for the evaluation of the efficiency of 3PL (Third Party Logistics) providers from the perspective of customers and the provider (Min, Joo, 2006, pp. 259-65). The authors in (Zhou, et al, 2008, pp. 262-279), with the help of the DEA method, attempt to define the benchmark performances variables for 3PL providers in China. In their work, they consider the change of efficiency during a period of time as well as the interaction of certain factors upon the performances. In (Hamdan, Rogers, 2008, pp. 235-244), the authors apply the DEA method to measure the efficiency of 3PL providers with the stress upon the warehouse operations. Some papers refer to the estimation of distribution centres (DC) and warehouse efficiency. Thus in (Ross, Droge, 2002, pp. 19-32), the authors examine the efficiency of 102 DCs as parts of complex supply chains as well as the change of this efficiency over the course of time. A fuzzy DEA model for measuring the efficiency of transport quality is proposed in (Pamučar, 2011, pp. 40-61). In (Ilić, Andrejić, 2011, pp. 93-115), the authors analyse the efficiency of possible queuing models at gas stations using the large-scale queuing theory. Benchmarking and monitoring the international operators of the warehouse performances by applying the DEA method was given in (de Koster, Balk, 2008, pp. 1-10). The method has been in many ways applied to measuring efficiency in supply chains (de Koster, Balk, 2008, pp. 1-10).

Supply chain efficiency measurement

Supply chains are complex systems composed of many interrelated and conditioned processes. Supply chains and similar complex systems and processes are viewed as "black boxes" for a long time. Their structure and operating are not considered properly. For a successful efficiency evaluation of

supply chains, it is necessary to measure the performances of all participants in the chain, including suppliers, manufacturers, traders and end users.

Some papers in the literature measure the efficiency of independent participants in the supply chain using the DEA method. However, the number of papers that analyse the efficiency of supply chains is very small. The problem of measuring the efficiency of supply chains in the literature has been recognized as a problem of measuring the efficiency of multi-stage processes. The authors in (Cook, et al, 2010, pp. 423-430) have categorized DEA models into four categories:

- standard DEA approach;
- efficiency decomposition approach;
- network DEA approach;
- game-theoretic approach.

It is important to know that each supply chain member has its own strategy of achieving efficiency. Sometimes, due to possible conflicts between supply chain members, one member's inefficiency may be caused by another's efficient operations. For example, the supplier may increase its raw material price to enhance its revenue and to achieve an efficient performance. This increased revenue means increased cost to the manufacturer. Consequently, the manufacturer may become inefficient unless it adjusts its current operating policy. Measuring supply chain performance becomes a difficult and challenging task because of the need to deal with the multiple performance measures related to the supply chain members and the need to integrate and coordinate the performance of those members (Liang, et al, 2006, 35-49).

Two hurdles are present in measuring the performance of supply chains. One is the existence of multiple measures that characterize the performance of each member in a supply chain. The other is the existence of conflicts between supply chain members with respect to specific measures.

The problem of input and output variables classification is a big problem in supply chain efficiency measuring. Some measures linked to related supply chain members cannot be simply classified as "outputs" or "inputs" of the supply chain. For example, the supplier's revenue is not only an output of the supplier (the supplier wishes to maximize it), but also an input to the manufacturer (the manufacturer wishes to minimize it). Simply minimizing the total supply chain cost or maximizing the total supply chain revenue (profit) does not model and solve the conflicts. Therefore, the meaning of supply chain efficiency needs to be carefully defined and studied. Models need to define and measure the efficiency of a supply chain as well as supply chain members. A standard DEA approach uses two separate DEA runs for two supply chain members and calculates independent efficiency for each member. This approach does not treat common measure in a coordinated manner (Fig. 2).

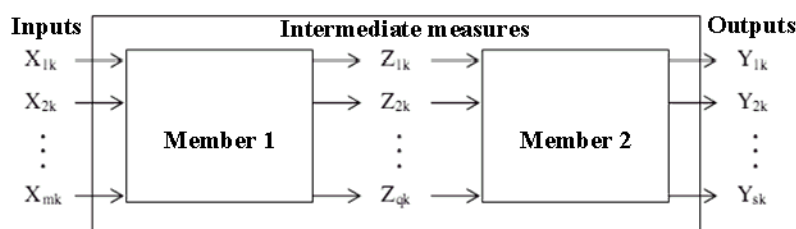


Figure 2 – Two-stage supply chain
Slika 2 – Dvoetajni lanac snabdevanja

Efficiency decomposition models define the efficiency of the overall two-stage process. This approach takes into account the equality of intermediate measures. In literature, overall efficiency is defined as the sum or the product of efficiencies of individual stages (members). Network DEA models analyse a complex structure where intermediate measures are not only inputs to the second stage. These models are applied in more general situations than two-stage processes.

The fourth type of approach uses game theory concepts. It originates from (Liang, et al, 2006, 35–49) where DEA is used to measure the performance of supply chains with two members (as in a manufacturer–retailer setting, for example). The concepts of the Stackelberg game (or leader–follower) and the cooperative game are used to develop models for measuring performance in supply chain settings. There are two main approaches: non-cooperative and cooperative models. In non-cooperative models, one-stage (member) is a leader while the other stage is a follower. The leader maximizes its efficiency regardless of the follower efficiency. The follower maximizes efficiency and with constraint that leader's efficiency is the same. The cooperative efficiency evaluation model maximizes the joint efficiency of the both members and forces the two players to agree on a common set of weights on the intermediate measures. In (Andrejić, Kilibarda, 2011, pp. 237–242), a practical application of this approach is tested.

Measuring efficiency of logistics systems and subsystems

DCs represent complex systems with a large number of interconnected subsystems, processes and activities. They also represent the basic hubs of the goods distribution process and connect a large number of participants in supply chains. In order to maintain the competitive edge, they have to monitor and measure the efficiency, but also define the sui-

table corrective actions, if necessary. The managers and employees in such systems are faced with several different tasks that are mainly connected with determining the optimal amount of the resources (input) for realizing a certain number of shipments, of a satisfactory level of quality. Only such systems can satisfy both the demands of the customers and their own demands. Apart from a DC as a system, this section describes in more detail two basic subsystems, which are the transport and warehouse subsystems. Regardless of the strong connection, these subsystems have different goals, in different cases even conflicts. Just as DCs, these subsystems strive to maximize the efficiency. In this sense, DC managers must at the same time take into account the efficiency of a DC as a system together with its subsystems.

Model formulation for logistics systems and subsystems efficiency measurement

In the process of applying the DEA and Multiple Objective Data Envelopment Analysis (MODEA) approaches, one of the most important steps represents the selection of the input and output variables (Boussofiene, et al, 1991, pp. 1-15). This work has evaluated the efficiency of 20 DCs of three trading companies who operate in the region of Serbia and who have similar sale networks, products ranges and distribution systems (Kilibarda, et al, 2011, pp. 996-1010). In order to estimate the DC and warehouse and transport subsystem efficiency, the variables describing their functioning in the best way have been used. The number of employees, the number of pallet places and the number of distribution vehicles at the DC disposal represent the main input variables, while the number of realized deliveries, the number of errors in the warehouse subsystem and the number of errors in the transport subsystem represent the output variables used in this work. The number of employees in a DC represents the common input variable, while the number of realized deliveries represents the common output variable in the transport and warehouse subsystem. It is assumed that DCs realize the deliveries the sizes of which are approximately the same. As the second input variable to estimate the warehouse subsystem efficiency, the number of pallet places in the DC has been used. On the other hand, the number of vehicles at DC disposal represents an input variable in the transport subsystem. The mentioned variables primarily refer to the estimation of the operational efficiency. In order to obtain the results whose quality and reliability are higher, as additional output variables, the quality indicators have been used. DCs of trading companies, but also DCs in general are characterized by a large number of indicators of realized deliveries. Errors in the transport and warehouse subsystems represent qualitative indicators which may be the

cause of dissatisfaction and complaints on the part of the customer, i.e. a low service quality level. Errors in the warehouse subsystem are mostly related to the errors in the order-picking process (shortage/excess in the delivery, articles mix-up, damage), but also to other processes such as bad inventory management, etc. Errors in transport primarily concern the delivery that is falling behind schedule, as well as the damaging and losing goods in the transport process. As it can be seen in Fig. 3, in order to estimate the DC efficiency, six variables have been used (three input and three output variables), while, in order to estimate the efficiency of its subsystems, four variables have been used per each system (two input and two output ones).

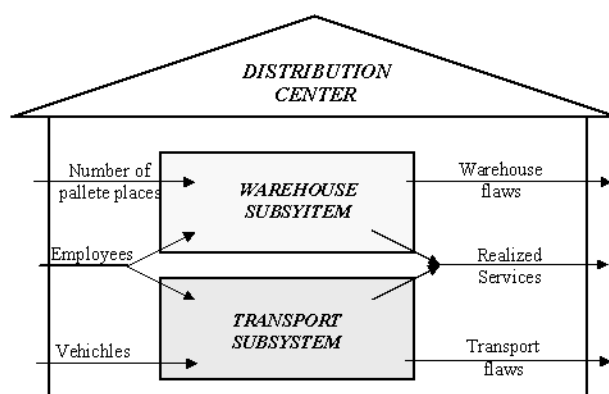


Figure 3 – DC and basic subsystems
Slika 3 – DC i osnovni podsistemi

The variables of input and output variables are given in Table 1. Table 1 also offers the descriptive statistics of the variables used in this paper. In order to obtain the results of higher quality and reliability, on the recommendation in (Klimberg, et al, 2010, pp. 79-93), the normalization of all variables has been performed. The number of errors in the transport and warehouse subsystems represents the output variables of the negative orientation, i.e. smaller variables are favorable. Regarding the fact that the DEA method perceives all output variables as positively oriented (larger variables are favorable), the change in the orientation of the mentioned variables has been performed. Prior to defining the model to estimate the DC and its subsystems efficiency, it is necessary to mention that the model proposed in this paper does not consider the external factors which may influence their efficiency, and do not come within the competence of the management of the company. The mentioned factors may be: weather conditions, market situation, industry branch, competition behavior, etc.

Inputs and output variables in DC

Table 1

Ulazne i izlazne promenljive distributivnog centra

Tabela 1

<i>DMU</i>	<i>Employees</i>	<i>Palette places</i>	<i>Vehicles</i>	<i>Realized deliveries</i>	<i>Warehouse errors</i>	<i>Transport errors</i>
<i>Mean</i>	98.26	3941.10	27.96	4544.95	483.65	749.25
<i>Standard</i>	56.10	1898.57	10.45	2730.54	375.48	444.78
<i>Max</i>	186	6793	45	9006	1336	1426
<i>Min</i>	34	684	13	1207	36	133

In this particular case, a DC (with warehouse and transport subsystems) represents a DMU whose efficiency is estimated. This work estimates the efficiency of 20 DCs and their transport and warehouse subsystems by means of applying the DEA and MODEA approach. The DEA method is a mathematical programming technique which gives an opportunity to compare different DMUs based on multiple inputs and outputs. This paper utilizes the DEA approach in order to estimate the efficiency of DCs and warehouse and transport subsystems. According to this approach, a logistic system or subsystem represents a "black box", i.e. the processes and activities that are not realized within the subsystem are not taken into consideration. From the group of DEA models, the basic CCR model has been chosen (Charnes, et al, pp. 429-444). By applying the CCR models, an independent estimation of the DC, warehouse and transport subsystems has been performed.

The described model belongs to the group of standard approaches which perform an independent estimation of the system efficiency without entering into the structure of the very system. In this manner, it is not possible to measure the DC efficiency taking into account the efficiency of the transport and warehouse subsystems, regarding the fact that these two subsystems possess common input and output variables. The CCR DEA models are not "sensitive" enough when evaluating the DMU efficiency, regarding the fact that they do not take into consideration the compromises and conflicts of independent DC subsystems goals. The MODEA approach offers the possibility of overcoming the mentioned problem (Klimberg, Puiddcombe, 1999, pp. 201-232). The MODEA does not represent a simple set of independent standard CCR DEA models, but takes into account the common resources and multiple goals of the subsystems. In the model suggested in this section, the common input variable is the number of employees, while the common output variable is the number of realized deliveries. In most of the cases, the contribution of the common variable in one subsystem depends upon the contribution of the same variable in the other subsystem. In the ideal case, the ratio of the common variables sho-

uld be approximately 1 (the contribution of the common variable is identical). By further limitations upon the influence of the common variables in different goals on the part of the decision maker, the model becomes "closer" to the real state of affairs and good operational practice. The examination of the weights of the variables and their influence within the goals enables the decision makers to reach a suitable compromise. In the analyzed example, the set of decision making units makes 20 DC (DMU) ($k = 1, 2, \dots, 20$), with two subsystems each ($p=1,2$). The warehouse and transport subsystems are characterized by i input variables ($i=1,2, \dots, m_p$) and r output variables ($r=1,2, \dots, s_p$). In this particular case, the transport and warehouse subsystems have two input and output variables each ($m_1 = m_2 = s_1 = s_2 = 2$). The variable of the r -th output of the p -th subsystem of the k -th DC is marked by y_{rkp} , while x_{ikp} marks the variable of the i -th output of the p -th subsystem of the k -th DC. The weight coefficient assigned to the r -th output of the p -th subsystem u_{rp} and the weight coefficient assigned to the i -th output of the p -th subsystem v_{ip} represent the unknown variables (decision making variables). The coefficient φ represents the parameter of closeness of the common resources, assigned by the decision maker. In the concrete case, the MODEA model for measuring the efficiency of the k -th DC has the following form:

$$\text{Max} \sum_{p=1}^2 w_{kp} = w_{k1} + w_{k2} = u_{r1} y_{rk1} + u_{r2} y_{rk2} \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{m_p} v_{ip} x_{ikp} - 1, p = 1, 2 \quad (2)$$

$$\sum_{r=1}^{s_p} u_{rp} y_{rkp} - \sum_{i=1}^{m_p} v_{ip} x_{ikp} \leq 0, \forall p = 1, 2, \forall k = 1, 2, \dots, 20 \quad (3)$$

$$1 - \varphi \leq \frac{\frac{u_{r1}}{s_1}}{\frac{u_{r2}}{s_2}} \leq 1 + \varphi \quad (4)$$

$$1 - \varphi \leq \frac{\frac{v_{i1}}{m_1}}{\frac{v_{i2}}{m_2}} \leq 1 + \varphi \quad (5)$$

$$v_{ip} \geq 0, p = 1, 2; i = 1, 2 \quad (6)$$

$$u_{rp} \geq 0, p = 1, 2; r = 1, 2 \quad (7)$$

In this paper, the efficiency of 20 DCs and their transport and warehouse subsystems has been analyzed. The set of the observed DCs can be deemed homogenous due to the fact these DCs operate in the same way and under the same conditions. The efficiency estimation has been carried out by applying the CCR DEA and MODEA approaches. The first three models refer to the MODEA approach, in which the coefficient ϕ (closeness parameter) takes the variables of 10%, 20% and 50%. By comparing the number of DC efficiencies obtained by applying the MODEA and CCR DEA approaches, it is pointed to a considerably larger number of efficient DMUs by applying the latter approach. This can be explained by the fact that the CCR model joins all indicators into a unique measure of efficiency with no separation or observation of the efficiency of its subsystems, i.e. it "overrates" the efficiency of DC.

By applying the MODEA approach, only 15% efficient DC can be obtained, while the CCR approach yields even 45% efficient DC. Such results can be explained by the fact that the CCR model does not take into consideration the efficiency of subsystems in a DC. On the other hand, according to the MODEA approach, a DC is efficient if the transport and warehouse subsystems are efficient. The average DC efficiency by applying the MODEA approach amounts to 1.1388 with the average efficiency of the warehouse subsystem amounting to 0.5158, and the transport one to 0.6229. The observed DC set can be considered as relatively inefficient and the largest portion of this inefficiency is a consequence of the warehouse subsystem inefficiency (Kilibarda, et al, 2011, pp. 996-1010).

The efficiency of one DC subsystem (warehouse or transport one) does not entail the DC efficiency. It can easily be concluded that the warehouse subsystem efficiencies are smaller than the transport subsystem efficiencies regardless of the variable of the parameter ϕ . By analyzing the obtained variables, it can be concluded that there is a certain number of DCs whose subsystems do not change the efficiency regardless of the approach. DMU 2, DMU 12 and DMU 17 represent the DCs with stable performances and efficient according to both the MODEA and the CCR DEA approach. Stable efficiency of these centres can be explained by a relatively small quantity of the used resources for the realization of a great number of deliveries with the number of errors in the transport and warehouse subsystems DMU 2 and DMU 12 considerably lower than the average (Kilibarda, et al, 2011, pp. 996-1010).

By analyzing Fig. 4 in more detail, three characteristic DC groups can be selected. The first group is comprised of the formerly mentioned efficient units. This group includes DMU 2, DMU 12 and DMU 17 whose transport and warehouse subsystems are efficient. The second group includes the units whose warehouse subsystems are significantly more

efficient than the transport subsystems. Such units are DMU 1 and DMU 11. As opposed to them, DMU 3, DMU 6, DMU 8, DMU 9 and DMU 13 have significantly more efficient transport subsystems. The last two DC groups, apart from inefficiency of at least one subsystem are characterized by the overall DC inefficiency. This confirms the claim that no DC can be efficient if one of its subsystems is inefficient.

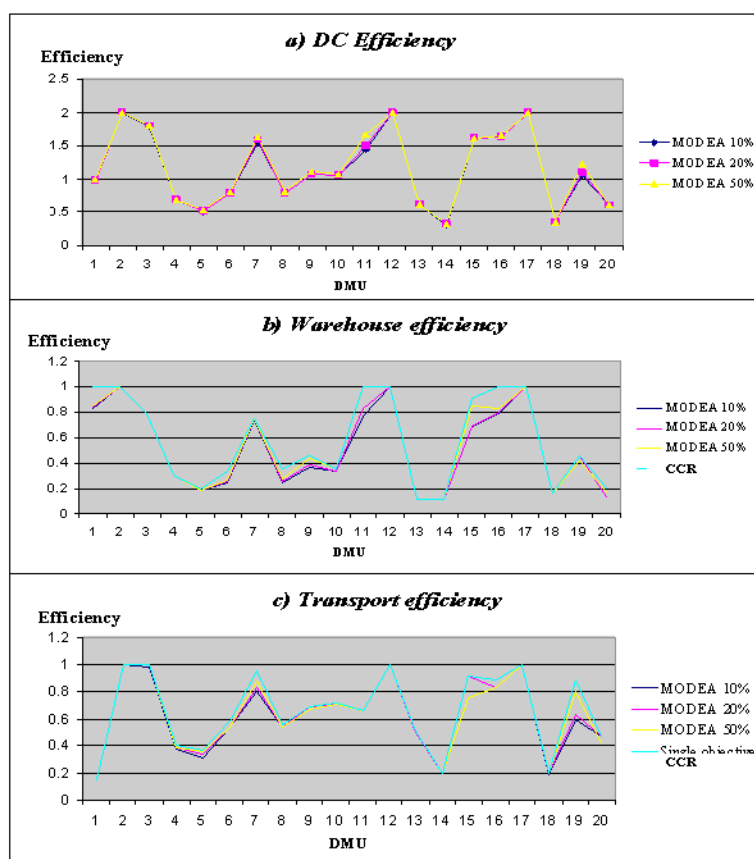


Figure 4 – Efficiency of a DC and its subsystems
Slika 4 – Efikasnost DC i osnovnih podsistema

Measuring efficiency of refrigerated warehouses

Energy efficient warehouses and distribution centers are integral components of supply chain strategies, especially nowadays in competitive global economy. Warehouses are moving beyond a simple storage function and today they offer high-tech inventory tracking and value-

added services as quality-control testing and repackaging. As warehouses grow more sophisticated, their energy consumption grows too. For example, in the U.S., warehouses only for lighting spend an average of 10\$/m². Energy costs for some warehouses are more than 10% of their total revenue. It does not matter whether a production, warehouse or distribution center is 1000 square meters or 500000 square meters, it is necessary to cut costs and to improve operating efficiencies. Refrigerated warehouses (RWs) represent special types of warehouses that use 2.8 times more energy for operating than conventional warehouses (Roy, 2010, pp. 64-70). RWs are very important links in a supply chain (ASHRAE, 2006). They are also large energy consumers.

Logistic systems, especially RWs, demand more energy for process operation. In a situation of increasing energy demand and rising energy costs, energy efficiency measures are becoming more important. The need for energy efficiency measuring and monitoring becomes a necessity. This paper uses one of the most frequently used methods for measuring efficiency – the DEA method for RWs energy efficiency measuring. According to this method, RWs are viewed as systems that use inputs (labor, electricity, fuel, water, space, etc.) to produce products and deliver services with a high level of quality. Management plays the key role in the energy consumption reduction. This paper presents a model for evaluating RWs energy efficiency, which should help managers to reduce energy consumption.

The constant return to scale (CRS) assumption is appropriate when all firms operate on an optimal scale. The CCR gives relative technical efficiency (TE). However, imperfect competition, government regulations, constraints on finance, etc., may cause a firm not to operate on an optimal scale. In contrast to the CCR, the model that assumes CRS (proportional increase in inputs results in a proportional increase in outputs), (Coelli, Prasada, O'Donnell, Battese, 2005) extends the original DEA model to variable returns to scale (VRS - increase in inputs does not result in a proportional change in output). This model is known in the literature as the BCC model. The BCC model measures the pure technical efficiency (PTE), and provides a measure of efficiency which ignores the influence of the volume of business, because RWs are compared only with other RWs of a similar scale. Scale efficiency (SE) indicates whether the observed RW operates with an optimal volume of operations. SE can be obtained for each RW by conducting both CCR and BCC models, and then by decomposing the TE scores obtained from the CCR model into two components, one due to scale inefficiency and one due to pure technical inefficiency. If there is a difference in CCR and BCC TE scores for a particular RW, then this indicates that the firm has scale inefficiency (Coelli, Prasada, O'Donnell, Battese, 2005):

$$TE \text{ (Technical Efficiency - CCR)} = PTE \text{ (Pure Technical Efficiency - BCC)} \times SE \text{ (Scale Efficiency)}$$

It is important to note that the overall efficiency of energy consumption consists of two factors: environmental factors and energy management factors. The environmental factors include weather conditions, occupant intensity, imperfect competition, government regulations, constraints on finance, etc. The energy management factors include equipment efficiency, operating strategy, etc. Due to the difficulty of separating the effect of the environmental factors from overall energy efficiency, there is little research analysis of the effect of energy management of RWs with the DEA. Therefore, we use the DEA to measure the overall energy efficiency in detail by examining the environmental factors and the management factors. Considering the fact that RWs can control energy consumption and reduce it in order to become more efficient, in this paper, we adopted the input orientation of DEA models.

Five inputs and two outputs are used for evaluating the efficiency of 15 RWs. The data are generated in accordance with the actual values of RWs in real systems (Andrejić, et al, 2011, pp. 313-319). The following inputs are taken into consideration (Table 2): RW size (m^3), labor, facility utilization (%), electricity consumption, other energy costs (water, fuel, gas, etc). The RW size presents the facility volume. It is better to use m^3 rather than m^2 when describing the warehouse space. The percentage of facility utilization is a good indicator for the rationalization of energy consumption. Electricity consumption is a basic measure for energy efficient measuring. As mentioned before, electricity costs are more than 50% of all costs in RWs, so a detailed analysis of this input is necessary. This measure is expressed in MWh/year. All other costs of water, fuel, gas, etc., consumption are incorporated in one measure – other energy costs, and they are expressed in thousands of monetary units (m.u.).

On the other hand, the proposed model uses two outputs: successfully realized services and goods deterioration. Successfully realized services are services that are realized according to customer requirements (right time, right place, right quality, etc). Goods deterioration is caused by poor handling and storing of goods (i.e. inappropriate temperature, pressure and humidity).

In accordance with the defined input and output values, as mentioned, we used the input minimizing orientation of CCR and BCC models, where the emphasis is on the maintenance or improvement of the level of service provided with the minimum use of inputs. In this paper, the analysis is carried out with the DEA software efficiency measurement system (EMS), developed by the Operations Research Department at the University of Dortmund (<http://www.ub.uni-dortmund.de/service/benuord.htm.en>). Table 2 presents the descriptive statistics for the outputs and inputs of the 15 RWs.

Table 2

Descriptive statistics for the inputs and outputs in refrigerated warehouses

Tabela 2

Deskriptivna statistika ulaznih i izlaznih promenljivih skladišta hladnjača

Inputs/outputs	Mean	Standard deviation	Max	Min
Size (m3)	51.67	23.29	92.72	26.36
Employees	74.68	29.72	132.69	31.95
Facility utilization (%)	69.20	17.64	98.20	44.48
Electricity consumption (MWh/year)	3993.44	843.75	5078.87	2420.65
Other energy costs (1000 m.u.)	26.66	11.04	48.01	11.73
Realized services (1000)	535.79	215.94	997.13	298.57
Goods deterioration (%)	9.54	5.89	19.37	1.12

The results of the DEA analysis, TE and SE scores for each RW are given in Table 3. Out of the 15 RWs, 8 (53%) were found TE with a score of 100%. The remaining 7 RWs (47%) were technically inefficient since they had a TE score lower than 100%. The average efficiency of 15 analyzed RWs is 85%, which roughly means that each RW can store and deliver the current quantities of goods up to 15% less resources during the observed period (in this case one year). In this way, the RWs can realize potential savings of 600 MWh in electricity consumption and 4000 m.u. in other energy costs in average. In average, the RWs could operate with 11 employees less. The average technical inefficiency of the observed RWs is 15%. Most of the inefficiency is in SE, about 14%, while about 1% of inefficiency corresponds to PTE. These results show the fact that most of the inefficiency is the result of the inadequate size of the facility, and the environmental factor rather than management (i.e. an RW does not operate on an optimal scale). In real systems, the inefficiency is often caused by bad management. The detailed analysis of the obtained results shows that the RWs can be classified into certain groups. Namely, the DEA analyses have found that there are 8 technically efficient and 7 inefficient RWs. As mentioned before, most RWs do not operate on the optimal scale. A reason for their inefficiency can be found in the size of RWs and the environmental factors (Andrejić, et al, 2011, pp. 313-319).

Table 3

RWs efficiency scores

Tabela 3

Efikasnost skladišta hladnjača

RW	TE (CRS)	PTE (VRS)	SE
RW 1	0.54	1.00	0.54
RW 2	1.00	1.00	1.00
RW 3	1.00	1.00	1.00

RW	TE (CRS)	PTE (VRS)	SE
RW 4	0.53	0.98	0.54
RW 5	1.00	1.00	1.00
RW 6	1.00	1.00	1.00
RW 7	0.80	1.00	0.80
RW 8	1.00	1.00	1.00
RW 9	1.00	1.00	1.00
RW 10	0.61	1.00	0.61
RW 11	0.97	0.98	0.99
RW 12	1.00	1.00	1.00
RW 13	0.50	0.91	0.55
RW 14	0.86	1.00	0.86
RW 15	1.00	1.00	1.00
<i>Average efficiency</i>	<i>0.85</i>	<i>0.99</i>	<i>0.86</i>
<i>Efficient units</i>	<i>8 (53%)</i>	<i>12 (80%)</i>	<i>8 (53%)</i>
<i>Inefficient units</i>	<i>7 (47%)</i>	<i>3 (20%)</i>	<i>7 (47%)</i>

The slack movements, which arise because of the sections of the piece-wise linear frontier that runs parallelly to the axes are reported in order to give an accurate indication of RWs TE. The analysis of slack values (Table 4) shows that there is a significant slack in the input variable. Much of the inefficiency is the result of scale inefficiency of the RW operating. Potential improvements are related to the average decrease in inputs, which range from 0.7% for other energy costs up to 11.21% for employees while maintaining RW current level of outputs.

Potential savings in inputs

Table 4

Potencijalne uštede u ulazima

Tabela 4

	Actual average	Average slack	Potential reduce
Size	51.67	3.51	6.79%
Employees	74.68	8.37	11.21%
Facility utilization	69.20	5.39	7.78%
Electricity consumption	3993.44	254.85	6.38%
Other energy costs	26.66	0.19	0.70%

Namely, RW energy efficiency heavily depends on the organization management, technologies, size of facility and awareness of employees in RWs, as well as of a number of external factors.

Conclusions

Measuring and monitoring the efficiency in logistics is one of the crucial success factors in the market. The main objective of this paper is to define some kind of efficiency measurement models review. This paper describes different aspects of measuring efficiency in logistics. The main efficiency measurement aspects in logistics described in this paper are: activities efficiency, processes efficiency, subsystems efficiency, systems efficiency and supply chain efficiency. The paper further describes the fundamental issues and models for measuring efficiency in certain areas. The tests and results of the model show remarkable importance of input and output variables selection. In this paper, the models for measuring supply chain, systems, and subsystems are described in more detail. They are also tested on real examples. The methodology for measuring refrigerated warehouses is also described in this paper.

In literature, there is a lack of case studies, i.e. model testing in concrete examples. This fact indicates the insufficient amount of research in this area. The efficiency of supply chains and logistics systems is also influenced by a great number of factors upon which the company management have no influence. In future models, it would be desirable to introduce certain indicators which, to a certain extent, can describe external factors such as: weather conditions, market situation, competition behavior, etc. The presented models are a good basis for the development of future models. Incorporating different performance indicators (quality, cost, environmental, social, etc.) in efficiency measurement models should be a subject of future research.

References

- American Society for Heating Refrigeration and Air-Conditioning Engineers ASHRAE, 2006, *Handbook: Refrigeration*, I-P Edition,
- Andrejić, M., Kilibarda, M., 2011, *Efikasnost logističkih procesa distribucije proizvoda*, National Conference on Quality, Kragujevac, A 237-A 242,
- Andrejić, M., Ratković, B., Kilibarda, M., Bjelić, N., 2011, *Measuring energy efficiency of refrigerated warehouses*, React Conference, Belgrade, pp. 313-319.
- Boussofiane, A., Dyson, R. G. and Thanassoulis, E., 1991, *Applied Data Envelopment Analysis*, European Journal of Operational Research, Vol. 52, No. 1, pp. 1-15.
- Charnes, A., Cooper, W.W., Rhodes, E., 1978, *Measuring efficiency of decision making units*, European Journal of Operations Research, Vol. 2, No. 6, pp. 429-444.
- Coelli, T. D., Prasada, D.S.R., O'Donnell, C. J. and Battese, G.E., 2005, *An introduction to efficiency and productivity analysis*, Springer 2nd ed, New York,

- Cook, W.D., Liang, L. and Zhu, J., 2010, *Measuring performance of two-stage network structures by DEA: A review and future perspective*, Omega, Vol. 38, No. 6, pp. 423-430.
- de Koster, M.B.M. and Balk., B.M., 2008, *Benchmarking and monitoring international warehouse operations in Europe*, Production and Operations Management, Vol. 17, No. 2, pp. 1-10.
- Farrell, M. J., 1957, *The Measurement of productive Efficiency*, Journal of the Royal Statistical Society, Vol. 120, No. 3, pp. 253-290.
- Gleason, J.M., Barnum, D.T., 1982, *Toward valid measures of public sector productivity: performance measures in urban transit*, Management Science, Vol. 28, No. 4, pp. 379-386.
- Hamdan, A., Rogers, K.J., 2008, *Evaluating the efficiency of 3PL logistics operations*, International Journal Production Economics, Vol. 113, No.1, pp. 235-244.
- Ilić, S., Andrejić, M., 2011, *Analiza efikasnosti mogućih modela opsluživanja na pumpnim stanicama primenom teorije masovnog opsluživanja/Analysis of effectiveness of possible queuing models at gas stations using the large-scale queuing theory*, Vojnotehnički glasnik/Military Technical Courier, Vol. 59, No. 4, pp. 93-115, Ministry of Defence of the Republic of Serbia, Belgrade.
- Kilibarda, M., Andrejić, M., Vidović, M., 2011, *Measuring efficiency of logistics processes in distribution centers*, 14 th QMOD Conference on Quality and Service Sciences 2011 - From LearnAbility & InnovAbility to SustainAbility, San Sebastian. Spain, pp. 996-1010.
- Klimberg, R.K. and Piddicombe, M., 1999, *A Multiple Objective Approach to Data Envelopment Analysis*, Advances in Mathematical Programming and Financial Planning, Vol. 5, pp. 201-232.
- Klimberg, R.K., Lawrence, K. D. and Lawrence, S. M., 2010, *Data envelopment analysis is not multiobjective analysis*, Applications of Management Science, Vol. 14, pp. 79-93.
- Liang, L., Yang, F., Cook, W.D., Zhu, J., 2006, *DEA models for supply chain efficiency evaluation*, Annals of Operations Research, Vol. 145, No. 1, pp. 35-49.
- Min, H., Joo, S., 2006, *Benchmarking the operational efficiency of third party logistics providers using data envelopment analysis*, Supply Chain Management: An International Journal, Vol. 11, No. 3, pp. 259-65.
- Pamućar, D., 2011, *Fuzzy-DEA model za merenje efikasnosti kvaliteta transporta/Fuzzy-DEA model for measuring the efficiency of transport quality*, Vojnotehnički glasnik/Military Technical Courier, Vol. 59, No. 4, pp. 40-61, Ministry of Defence of the Republic of Serbia, Belgrade.
- Ross, A., Droge, C., 2002, *An integrated benchmarking approach to distribution center performance using DEA modeling*, Journal of Operations Management, Vol. 20, No. 1, pp. 19-32.
- Roy, M., 2010, *Green Warehouses*, ASHRAE Journal, Vol. 52, No. 3, pp. 64-70.
- Zhou, G., Min, H., Xu, C., Cao, Z., 2008, *Evaluating the comparative efficiency of Chinese third-party logistics providers using data envelopment analysis*, International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, Vol. 38, No. 4, pp. 262-279.
<http://www.ub.uni-dortmund.de/service/benu-ord.htm.en>

MERENJE EFIKASNOSTI U LOGISTICI

OBLAST: logistika, operativni menadžment

VRSTA ČLANKA: pregledni članak

Sažetak:

Dinamično tržište i promene u okruženju u velikoj meri utiču na funkcionisanje logističkih sistema. Logistički sistemi moraju realizovati aktivnosti i procese na efikasan način. U radu se analiziraju različiti aspekti merenja efikasnosti u logistici i predlažu odgovarajući modeli merenja. Merenje efikasnosti u logistici predstavlja kompleksan proces koji zahteva sagledavanje svih podсистема, procesa i aktivnosti, kao i uticaja različitih finansijskih, operativnih, ekoloških, kvalitativnih i drugih faktora. Predloženi modeli bazirani su na Data Envelopment Analysis metodi. Oni mogu pomoći menadžerima u procesu odlučivanja i sprovođenja korektivnih akcija. Analizom rezultata testiranih modela potvrđen je značaj izbora ulaznih i izlaznih veličina.

Uvod

Savremeno poslovanje prvenstveno podrazumeva izražito zahtevnu tržišnu borbu, bez obzira na to da li se radi o proizvodnji ili pružanju usluga u bilo kojoj grani industrije. Postupak merenja efikasnosti u proizvodnim kompanijama u velikoj meri se razlikuje od postupka merenja efikasnosti u uslužnim kompanijama. Za proizvodnju materijalnog proizvoda koriste se materijali, sirovine i komponente od kojih u proizvodnom procesu nastaje finalni proizvod. Opipljivost i laka merljivost finalnog proizvoda, kao i upotrebljenih resursa, u velikoj meri olakšavaju merenje efikasnosti proizvodnih procesa. Nasuprot tome, kod uslužnih kompanija finalni proizvod je realizovana usluga koja je po svojoj prirodi prolaznog karaktera, neopipljiva i kvantitativno nemerljiva, za čiju upotrebu se angažuju različiti, često teško merljivi resursi, kao što su prostor, vreme i angažovana radna snaga. Proizvod logističkih kompanija, kao tipičnih uslužnih kompanija, najčešće su transportne, skladišne, pretovarno-manipulativne, špeditorske i druge usluge, u čijoj realizaciji se angažuju različiti resursi, kao što su transportna i pretovarno-manipulativna sredstva, skladišni prostor, vreme, radna snaga, itd. čiju upotrebu nije jednostavno izmeriti. Dodatni problem merenja efikasnosti u logistici predstavlja kompleksnost, integrisanost i međusobna uslovljenost, kako angažovanih resursa, tako i realizovanih usluga.

Aspekti merenja efikasnosti u logistici

Sa vremenskog aspekta razlikuje se merenje efikasnosti na strateškom, taktičkom i operativnom nivou. Sa aspekta nivoa merenja efikasnosti moguće je razlikovati: efikasnost aktivnosti, efikasnost procesa, efikasnost podсистема, efikasnost sistema i efikasnost lanca. Kada je reč o merenju i praćenju efikasnosti logističkih mreža, lanaca, sistema, procesa i aktivnosti moguće je razlikovati efikasnost direktnih i povratnih logističkih tokova. Osim praćenja i merenja efikasnosti u logističkim sistemima (špedicije, logistički centri, distributivni centri, skladišta itd...) neophodno je analizirati efikasnost

logističkih aktivnosti i procesa u sistemima čija osnovna funkcija nije pružanje logističkih usluga (trgovinski lanci, zdravstvene ustanove itd.). Za uspješno merenje efikasnosti u logistici neophodno je sagledati veliki broj ulaza i izlaza koji su po svojoj prirodi raznorodni (finansijski, tehnički, ekološki, energetski, socijalni itd.) i izražavaju se u različitim merim jedinicama. U tom smislu moguće je meriti energetske, ekološke, troškovne i druge tipove efikasnosti u logistici. Sa druge strane, često je neophodno sagledati pomenute aspekte i definisati jedinstvenu meru efikasnosti.

Modeli merenja efikasnosti u logistici

Za procenu efikasnosti distributivnih centara (DC) dugo su korišćeni „single ratio” pokazatelji, kao što su iskorišćenost opreme i produktivnost radne snage. S obzirom na to da pomenuti izmeritelji nisu najbolji pokazatelji efikasnosti, u (Min, Joo, 2006, pp. 259-65) ističu da se veliki broj autora zalaže za upotrebu Data Envelopment Analysis (DEA) metode. DEA metoda predstavlja jedan od najšire korišćenih alata za merenje efikasnosti. U oblasti logistike DEA metoda se najčešće koristi za procenu efikasnosti 3PL (Third Party Logistics) provajdera, kako iz perspektive provajdera (Min, Joo, 2006, pp. 259-65), tako i iz perspektive korisnika. U (Zhou, et al, 2008, pp. 262-279), uz pomoć DEA metode, pokušavaju da definišu benchmark vrednosti performansi za 3PL provajdere u Kini. Manji broj radova odnosi se na procenu efikasnosti DC i skladišta. Tako u (Ross, Droge, 2002, pp. 19-32) istražuju efikasnost 102 DC, kao delova kompleksnih lanaca snabdevanja i promenu te efikasnosti u vremenu. Metoda je višestruko primenjivana za merenje efikasnosti u lancima snabdevanja (Cook, et al, 2010, pp. 423-430).

Merenje efikasnosti u lancima snabdevanja

Iz perspektive DEA metode, kao najčešće korišćene metode za merenje efikasnosti višefaznih procesa, postoji veliki broj modela i metoda koje se direktno ili uz izvesne modifikacije mogu primeniti na lance snabdevanja. U ovom radu izrađen je pregled DEA modela za merenje efikasnosti lanaca snabdevanja. Prema (Cook, et al, 2010, pp. 423-430) pomenuti modeli mogu se klasifikovati u četiri grupe:

- standardni DEA modeli;
- modeli dekompozicije efikasnosti;
- mrežni DEA modeli;
- modeli bazirani na teoriji igara.

Merenje efikasnosti logističkih sistema i podsistema

Distributivni centri predstavljaju kompleksne sisteme sa velikim brojem međusobno povezanih podsistema, procesa i aktivnosti. Radi održavanja konkurentnosti, oni moraju pratiti i meriti efikasnost, ali i definisati odgovarajuće korektivne akcije, ukoliko je to potrebno. Pred menadžerima i zaposlenima u ovakvim sistemima postavlja se više različitih zadataka koji su uglavnom vezani za određivanje optimalne količine resursa (ulaza) za realizovanje određenog broja isporuka, odgovarajućeg nivoa kvaliteta. Pored DC kao sistema u radu su detaljnije analizirana i dva osnovna podsistema i to tran-

спортни i skladišni podsistem. Bez obzira na jaku povezanost ovi podsistemi imaju različite ciljeve, u određenim slučajevima i konfliktne. Kao i DC i podsistemi teže maksimizaciji efikasnosti. U tom smislu menadžeri DC moraju istovremeno voditi računa o efikasnosti DC, kao sistema, ali i njegovih podsistema. U radu je analizirana efikasnost 20 DC i njegovih transportnih i skladišnih podsistema. Skup posmatranih DC može se smatrati homogenim s obzirom na to da DC posluju na isti način i pod istim uslovima. Procena efikasnosti sprovedena je primenom CCR DEA i Multiple Objective Data Envelopment Analysis (MODEA) pristupa. Primenom MODEA pristupa dobija se svega 15% efikasnih DC, dok se CCR pristupom dobija čak 45% efikasnih DC. Ovakvi rezultati mogu se objasniti činjenicom da CCR model ne razmatra efikasnost podsistema u DC. Sa druge strane, prema MODEA pristupu (Kilibarda, et al, 2011, pp. 996-1010) DC je efikasan ako su i transportni i skladišni podsistem efikasni.

Merenje efikasnosti skladišta hladnjača

Energetski efikasna skladišta i distributivni centri sastavni su delovi strategije lanca snabdevanja, posebno danas u konkurentnoj globalnoj ekonomiji. U situaciji povećanja potrošnje energije i rasta troškova energije, energetska efikasnost postaje sve važnija. Potreba za merenjem i praćenjem energetske efikasnosti postaje nužnost.

Pet ulaznih i dve izlazne veličine korišćene su za procenu efikasnosti 15 skladišta hladnjača. Ulazne veličine korišćene u ovom modelu su: veličina objekta, iskorišćenost objekta, potrošnja energije, ostali energetske troškovi (naftni derivati, gas, voda itd.). Izlazne veličine, razmatrane u predloženom modelu, jesu: uspešno realizovane usluge i stepen kvaranja robe. Analizom rezultata zaključeno je da efikasnost skladišta hladnjača u velikoj meri zavisi od menadžmenta, tehnološke razvijenosti i odgovornosti zaposlenih, a mnogo manje od spoljnih faktora (Andrejić, et al, 2011, pp. 313-319).

Zaključak

Merenje i praćenje efikasnosti u logistici jedan je od presudnih faktora uspeha na tržištu. Osnovni cilj ovog rada je pregled modela merenja efikasnosti. U radu se opisuju različiti aspekti merenja efikasnosti u logistici, od kojih su osnovni: efikasnost aktivnosti, efikasnost procesa, efikasnost podsistema, efikasnost sistema i efikasnost lanca snabdevanja.

Rad detaljnije opisuje osnovne probleme i modele za merenje efikasnosti u pojedinim oblastima. Testovi i rezultati modela pokazuju izuzetan značaj izbora ulaznih i izlaznih promenljivih.

Ključne reči: efikasnost, logistika, metode merenja, Data Envelopment Analysis.

Datum prijema članka/Paper received on: 31. 03. 2012.

Datum dostavljanja ispravki rukopisa/Manuscript corrections submitted on: 23. 04. 2012.

Datum konačnog prihvatanja članka za objavljivanje/ Paper accepted for publishing on: 25. 04. 2012.

FORCE MEASUREMENTS ON TEETH USING FIXED ORTHODONTIC SYSTEMS

Rebeka T. Rudolf^{1,2}, Janko J. Ferčec¹

¹University of Maribor, Faculty of Mechanical Engineering, Slovenia

²Zlatarna Celje d.d., Slovenia

DOI: 10.5937/vojtehg61-2960

FIELD: Materials

ARTICLE TYPE: Review Paper

Abstract:

The fixed orthodontic appliance consists of brackets that are bonded to the teeth. When the wire is engaged in the slot of the brackets, it generates forces for orthodontic tooth movement. The change in periodontal blood supply provides a biological response which leads to remodelling of the alveolar bone and the orthodontic tooth movement. Many variables influencing orthodontic treatment cannot be controlled fully, such as growth and tissue response to appliances. However, the force placed on the tooth should be a controllable variable, and a careful study of the physics underlying clinical applications can help in reducing undesirable side effects. The properties of orthodontic wires such as: strength, stiffness, elasticity and spring-back define their clinical usefulness. The ideal orthodontic wire should exhibit the following properties: large spring-back, low stiffness, good formability, high stored energy, biocompatibility and environmental stability, low surface friction, and the capability of being welded or soldered to auxiliaries. The ideal arch wire has not been introduced yet. Once the wire is activated or bent, it is the unloading or deactivating forces that produce the orthodontic tooth movement. For these reasons, it is necessary to know the force level caused by each individual wire used in orthodontic treatment. Finally, the purpose of this paper is a presentation of force measurements which are generated by different super-elasticity NiTi wires.

Key words: Force Measurements, orthodontic system, teeth, NiTi alloys.

¹ ACKNOWLEDGMENT: This article has been supported by the EUREKA Programme Orto-NiTi within the framework of the Ministry of Higher Education, Science and Technology of the Republic of Slovenia and Serbia, and also by the Programme for Young Researcher within the framework of the Slovenian Research Agency. The authors thank Zlatarna Celje d.d., Slovenia and Serbia, for working on the development of the new Ni-Ti alloy.

Introduction

Dental braces

Fixed dental braces (Fig. 1) are designed to correct the false branched teeth. They are composed of brackets attached to the teeth and the wire is usually made of NiTi shape memory alloy. The wire has a feature which links it to the teeth so that it always acts with a force. Optimal forces and torques move the teeth depending on the tooth type and the tooth direction and they are usually between 0.1-2 N and 1-50 Nmm. Insufficient forces and torques are ineffective and may extend the treatment duration. Conversely, excessive forces and torques can lead to severe pain, or periodontal damage and large root resorption (Profitt, 2007). For these reasons, it is necessary to know which forces are caused by individual wires.

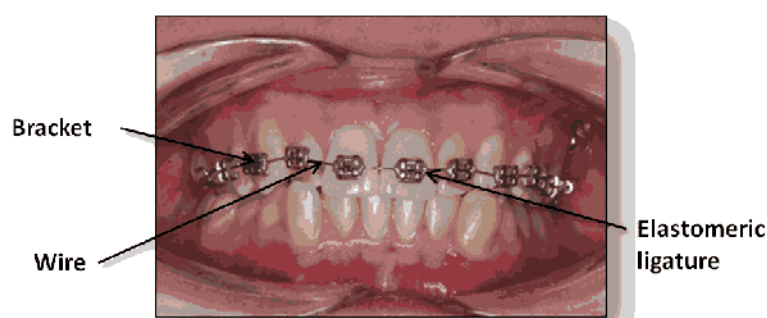


Figure 1 – Dental brace
Slika 1 – Zubna proteza

The force measurement of teeth began with the introduction of dental braces. In the beginning, measured procedures were more simple and imprecise. In recent years, the numbers of experimental devices that measure the forces and torques in three dimensions have grown. In the last five years, research has been conducted in this area that was focused on accurate measurement of the forces on the teeth as a result of the action of orthodontic wires. For these purposes, some "real" experiments have also been made to determine these forces.

Orthodontic wire

Orthodontic wires are usually made of the NiTi. These materials belong to a group of shape memory materials which are among the group known as functional materials. The first observation of the sha-

pe memory behaviour of materials goes back to 1932, when Swedish researcher Arne Ölander first noticed this phenomenon on a sample of gold and cadmium (Au-Cd). In 1962, William J. Buehler and his colleagues in the "Naval Ordnance Laboratory" observed the shape memory effect in the alloy of nickel and titanium. This alloy was named NiTiNOL (Nickel-Titanium Naval Ordnance Laboratory) (Lagoudas, 2008).

The use of NiTiNOL wire in orthodontics was introduced by Andreassen in 1971 and is now used increasingly because of its unique elastic properties (Their, et al, 2004, pp. 229-233). The main advantage of NiTi orthodontic wires compared to conventional (e.g. stainless steel) is their ability to deliver constant stress to push the teeth into the proper position. This property makes this product much more efficient, thus reducing the length of orthodontic treatment for patients. The level of stress in the wire can be controlled through their chemical composition and its thermo-mechanical history. It can also control the geometrical dimensions, as is the case with conventional wires (Coluzzi et al, 1996, pp. 197-205).

Properties of NiTi orthodontic wires

The reasons why the shape memory alloy NiTi was implemented in medicine or orthodontic treatment are the following: they have an excellent memory properties, excellent mechanical properties, good corrosion resistance and excellent biocompatibility. The most important characteristics for orthodontic application of NiTi alloys are super-elasticity and biocompatibility. These two properties are described below (Proffit, 2007).

Superelasticity

Orthodontic wires use a special property of the NiTi memory alloy and this is super-elasticity. Super-elasticity is referred to as a reversible martensitic transformation, which is caused due the change in stress or stress state. A sufficiently large load causes the transformation of austenite into martensite (**Fig. 2**). Unloading returns the transformation of the austenite and the original shape (Lagoudas, 2008).

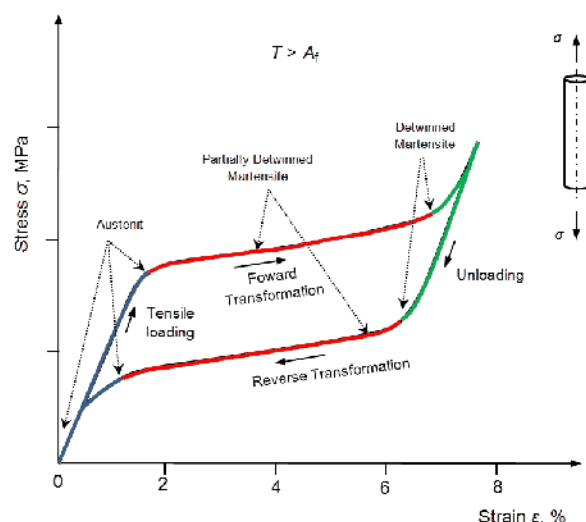


Figure 2 – Diagram of the stress-strain curve for the superelasticity shape memory alloy NiTi in the tension loading

Slika 2 – Dijagram krive deformacije superelastične memorijske legure NiTi pri opterećenju istezanjem

Biocompatibility

The generally accepted definition of biocompatibility is very complicated. Williams (1988) described biocompatibility as “the ability of a material to perform with appropriate host response in a specific application”. This definition covers the fact that there are many possible interactions between biomaterial and the host, and it does not focus solely on toxicity or injurious effects to the host system. A more concrete definition was proposed in 1998 by Wintermantel, who defined biocompatibility as the structural and surface compatibility between a technical and a biological system, where the structural part is governed by the mechanical properties, and the surface compatibility by the biomaterial superficial physical, chemical, biological and morphological properties. Today, it is necessary to evaluate biocompatibility in accordance with the relevant Standard. Considering the multitude of new advanced materials and devices, a general Standard has been adopted. Using these guidelines, the Standard allows easier comparison of results, while allowing flexibility for individual purposes/needs (Es-Souni, et al, 2004, pp. 557-567). NiTi alloys have a high degree of biocompatibility. In the oxidation reaction of titanium, a surface layer of harmless TiO_2 is formed surrounding the sample. This layer has the high corrosion resistance of titanium alloy and is generally harmless to the human body. Because of the

biocompatibility and good mechanical properties of NiTi alloys, there are many opportunities to develop and improve products for application in biomedicine (Auricchio, Massarotti).

General principles of force activity

Fig. 3 shows the procedure of treatment, respectively tooth movement in the proper position by means of force; **Fig. 3a** shows a settlement of teeth in the arch, while **Fig. 3b** shows the settlement of teeth in the plane of the teeth.

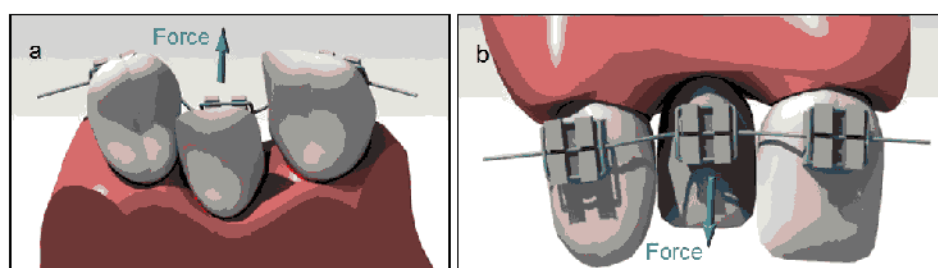


Figure 3 – Presentation of needed force by treatment
Slika 3 – Prikaz zahtevane sile pri lečenju

On this basis, it will be necessary to determine the most optimal wire that does not cause excessive and not too small a stress to the periodontal ligament (PDL). The level of stress in the wire will be controlled through its chemical composition and thermo-mechanical history, as well as geometric dimensions (Lagoudas, 2008). The accuracy of the results will be verified by experiments on a model, where we will measure the actual forces and torques. The purpose of our study is to measure the forces generated by different superelasticity NiTi wires. **Fig. 4** shows the direction of the forces on the tooth (Ferčec, et al, 2012).

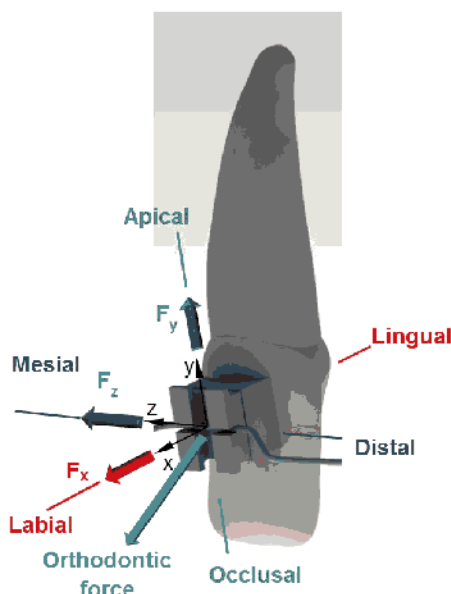


Figure 4 – Direction of the forces on the tooth
Slika 4 – Pravci delovanja sile na zub

State of the art

In the last five years, research has been conducted in this area, focusing on accurate measurement of the forces on the teeth as a result of the action of orthodontic wires. For these purposes, some "real" experiments have also been made to determine these forces.

Since 1970, numerical methods which have been developed with a computer programme have been used (de Weck, Yong). Research works have been conducted by the Finite Element Method (FEM), related to the determination of stress in the periodontal ligament (PDL) and displacement of teeth under orthodontic force (Norman, et al, 2010, pp. 98-108), (Chang, et al, 2004, pp. 339-45), (Kojimaa, Fukuib, 2010), (Qian, Fan, Liu & Zhang, 2008, pp. 48-52), (Field, et al, 2009, pp. 174-181).

In the literature has so far worked by using force measurement directly on the teeth by the Finite Element Method under orthodontic force. The Table below shows the articles that have been published on this subject in various scientific journals.

The force measurement of teeth began with the introduction of dental braces. In the beginning, measured procedures were more simple and imprecise. In recent years, the numbers of experimental devices that measure the forces and torques in three dimensions have grown. Various experimental procedures were published in different journals (Fuck, et al, 2007, pp. 363-376), (Lapatki, Paul, 2009, 377-396), (Hisham, et al, 2009, pp. 518-528), (Milczewski, et al, 2007), (Sifakakis, et al, 2009, pp. 305-11), (Fuck, Drescher, 2010, pp. 6-18), (Lapatki, et al, 2007, pp. 73-78).

Examples of forces measurement with the experiment

Example 1:

Lars-Michael Fuck, Dirk Wiechmann and Dieter Drescher were involved in measuring the forces and torque applied to the teeth. In the study they researched the forces and torques created by using a new lingual bracket (**Fig. 5**) through the phase of the orthodontic treatment. This dental brace was compared with a labial straight-wire appliance. The samples within the mouth were scanned in 10 patients and, with the method of "rapid prototyping-a", they made models of their teeth. Then they measured the initial forces and moments with a robotic measuring device (see **Fig. 6**). The measurements were performed at a temperature of 37°C (Fuck, et al, 2007, pp. 363-376).



Figure 5 – Intra-oral view of the Incognito lingual brackets
 Slika 5 – Prikaz usne duplje s nevidljivom fiksnom protezom

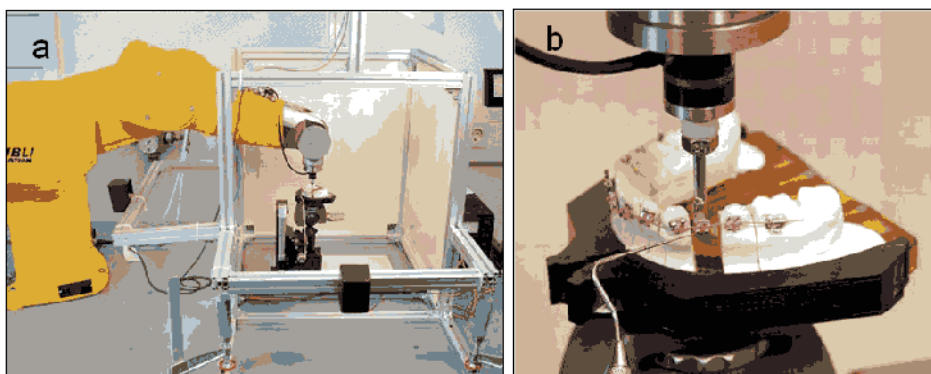


Figure 6 – (a) Robotic-Measurement-System (b) positioned and ligated measurement bracket (Sifakakis, et al, 2009, pp. 305-11)

Slika 6 – (a) Robotički merni sistem (b) postavljena i povezana merna proteza (Sifakakis, et al, 2009, str. 305-11)

Forces and moments were analyzed in all models included in all teeth measured. The forces and torques were then presented as the length of the corresponding vector. The statistical analysis of the average force of all ten casts revealed no significant differences between lingual and labial brackets in connection with the forces, while the moments were different.

Example 2:

Bernd G. Lapatki and Oliver Paul researched by using force measurements and moments through the sensor (see **Figs. 7, 8**). The feasibility of this accession was demonstrated using the Finite Element Method (FEM). The sensor was of a very small size so that it could be integrated into the bracket (**Fig. 9**) (Lapatki, Paul, 2009, 377-396).

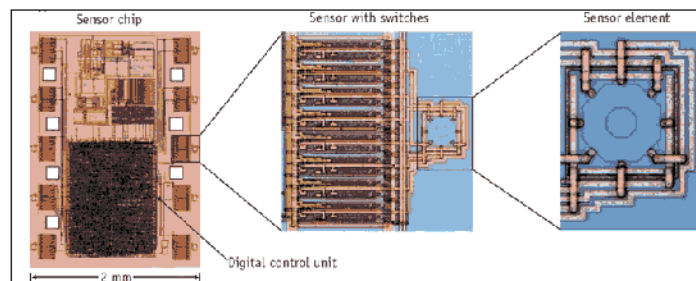


Figure 7 – Micrograph of the sensor chip (measuring $2 \times 2.5 \text{ mm}^2$)
Slika 7 – Mikrofotografija čipa senzora (dimenzija $2 \times 2,5 \text{ mm}^2$)

The micrograph in Fig. 7 is applicable to manufacture true-scale smart brackets. The actual sensor element (rightwards) measures only the area of $50 \times 50 \mu\text{m}^2$. The eight contacts permit current flow in different directions („spinning-current method“), (Hisham, et al, 2009, pp. 518-528).

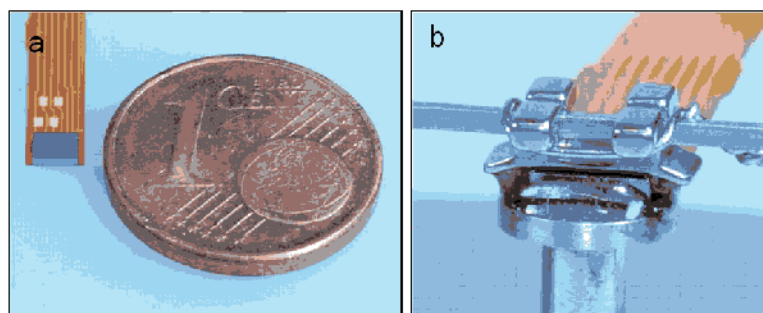


Figure 8 – Miniaturized sensor system was connected: (a) electrically using flip-chip bonding, (b) true-scale smart bracket with the adhesively-attached slot, the inserted wire and the mounting pin (Hisham, et al, 2009, pp. 518-528).

Slika 8 – Minijaturni senzorski sistem je povezan (a) električnim putem pomoću flip-chip veze (b) pametni breket stvarne veličine sa zalepljenim slotom, umetnutom žicom i nosećom iglom (Hisham, et al, 2009, pp. 518-528).

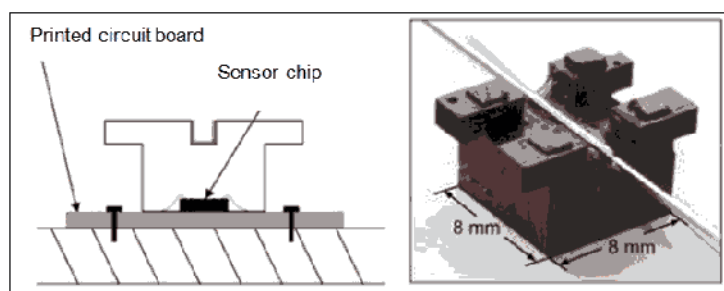


Figure 9 – Installation of the sensor chip in the bracket (Scheid, Weiss, 2012)
Slika 9 – Instaliranje senzorskog čipa u breketu (Scheid, Weiss, 2012)

Example 3:

The latest, more high-profile research, discussed in articles, has been undertaken by Hisman M. Badawi and his co-workers (Hisham, et al, 2009, pp. 518-528). In their study, they measured forces and torques using nanosensors. The experiment is shown in **Figs. 10 and 11** (Hisham, et al, 2009, pp. 518-528).

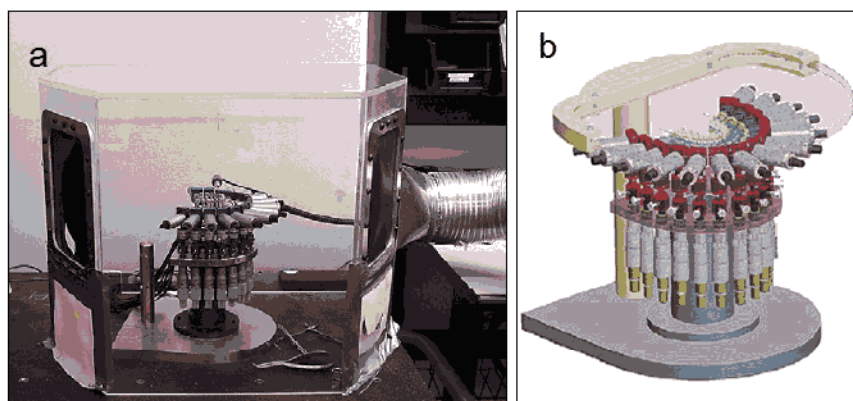


Figure 10 – (a) OSIM device in a temperature chamber; (b) 3D model of the device
Slika 10 – (a) OSIM uređaj u temperaturnoj komori, (b) trodimenzionalni model uređaja

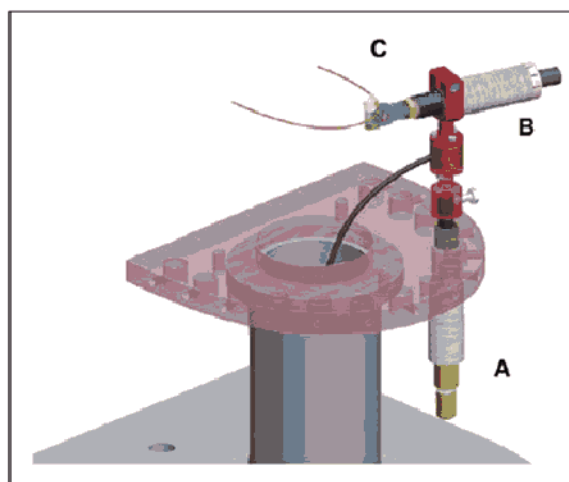


Figure 11 – Load cell: A- vertical micrometer; B-horizontal micrometer; C-tooth adapter
Slika 11 – Merna ćelija A –vertikalni mikrometar, B-horizontalni mikrometar, C- adapter zuba

Numerical method solution for the determination of the orthodontic forces

Numerical methods have been used to define the force caused on the teeth by different types of super-elasticity NiTi wires attached to the front surface of teeth at various angles. In doing so, we hope to establish what stress the wire causes on the periodontal ligament. With respect to permissible stress in the ligament, we will define the characteristics of the super-elastic wire. On the basis of the results and properties, we will give guidance and a directive for selecting the optimal wire.

In order to confirm the numerical model successfully, we will experiment "in vitro" with the most realistic conditions, using wires and brackets. In this way, we will try to verify the obtained results with a numerical simulation. We will do simplified 3D models of the orthodontic wire, the bracket, teeth and tissues with the CATIA software. The software tool for the numerical simulation of ABAQUS will define all load properties and also a stress calculation, from which we can then calculate the force. The obtained results have been analyzed.

The information on the forces and torque generated by the action of the teeth wire in dental braces is important for the dentist - orthodontics and especially for patients who use this device. In this way, orthodontists obtain information about the wires placed in the mouth to assure sufficient force on the tooth, to align the teeth more rationally, quickly and painlessly for the patient who wears the dental braces. Nevertheless, the studies which determine what should be a force on the teeth so that there is no pain for patients and that treatment does not last too long, are already known.

Based on clinical studies, we assume that we can identify the most optimal force caused by wire. From the knowledge of these forces, a wire that will have specific super-elastic properties can be chosen. This is influenced by an appropriate chemical composition (the content of Ni and Ti) and the geometry of wires (cross section). The presented problems are difficult, because people have different properties of the tissue in the mouth (they change even locally) or the state of the periodontal ligament, which is important in moving the teeth to the proper position.

The orthodontic 3D model for this study was built using CATIA V5 software. A 3D model of a crowded central incisor, lateral incisor and canine in the upper dental arch simulated real malocclusion. A fixed orthodontic appliance was used to simulate the orthodontic treatment in a case with moderate crowding. Metal brackets were bonded to the teeth and wire inserted into the slots. Data for tooth dimensions were taken from the literature (Scheid, Weiss, 2012). The teeth crowns in the model had the following heights and mesio-distal widths, respectively: 11.2 mm and

8.6 mm for the central incisor, 9.8 mm and 6.6 mm for the lateral incisor and 10.6 mm and 7.6 mm for the canine. The root lengths were: 13 mm for the central incisor, 13.4 mm for the lateral incisor and 16.5 mm for the canine. The position of the teeth in the model resembled moderate crowding in the upper dental arch. The lateral incisor was moved 4 mm lingual and 3 mm gingival from its normal position in the dental arch in order to present moderate crowding. A 3D model of the upper frontal teeth was obtained, with the periodontal ligament modelled for the length of the whole root (0.25 mm in width) (**Fig. 12**). A supportive bone was modelled in a 2 mm thick layer, with the underlying cortical bone. The orthodontic NiTi wire was inserted into the bracket slot of each tooth in the model. For the wire model, a diameter of 0.012"(0.305 mm) was taken into consideration.

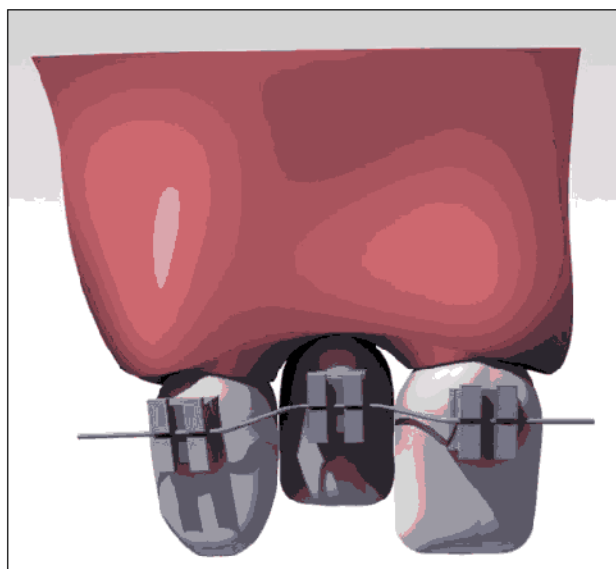


Figure 12 – CAD model of tooth position
Slika 12 – CAD model položaja zuba

The 3D model was based on the thesis that all materials are isotropic materials, which means that there are two independent material constants. In order to simplify the model, materials were considered to be homogeneous, meaning that linear and elastic material behaviour included two constants: Young's modulus and a Poisson ratio. The values of Young's modulus and Poisson ratio for the alveolar bone, periodontal ligament, tooth and bracket were taken from literature (Table I) (Todorović, et al, 2010, pp. 41-47).

Table 1 – Young's modulus and Poisson number
Tabela 1 – Jungov modul i Poasonov broj

Linear-elastic material parameters used for:	Young's Modulus of Elasticity, E [MPa]	Poisson's ratio
Alveolar bone	13800 ¹⁸	0.30 ¹⁸
Teeth	20000 ¹⁸	0.30 ¹⁸
Periodontal ligament	1 ²³	0.45 ²³
Bracket (stainless steel)	180000	0.3

In the numerical analysis that was performed, three different NiTi orthodontic wires with various modulus of elasticity (Table II) were used. The purpose of the analysis was to determine the initial force when the wire was inserted into the slot of the brackets and ligated. Although the behaviour of NiTi wires in terms of superelasticity is complex, we simplified the material properties, and the modulus of austenite for numerical analysis was taken (Auricchio, Taylor, 1997, pp. 175-194), (Šestak, Čemy, Pokluda, 2009). The NiTi orthodontic wires at a given stress have martensitic structure which transforms during treatment back to austenite. The data for the austenite modulus for various wires are presented in Table II (Proffit, 2007, pp. 359-394). In all three wires the Poisson number was 0.3 (Proffit, 2007, pp. 359-394).

Table 2 – Material parameter of wires for the numerical model
Tabela 2 – Parametar materijala žica za numerički model

Wire	Young's Modulus of martensite, E [MPa]
1.	50000
2.	54000
3.	58000

The brackets and wire were meshed by hexagonal finite elements (Fig. 13). In a real orthodontic treatment, especially in the levelling stage, it is desirable for the wire to slide through the slot of the bracket as freely as possible having the least friction (Proffit, 2007, pp. 359-394). In order to choose an orthodontic wire wisely, it is important to know the friction properties between the wire and the bracket. The information about these properties in the literature has not been consistent. It is very difficult to determine accurately the friction characteristics between the wire and the bracket, because the contact conditions between them vary widely. For the friction coefficient between the wire (NiTi) and the bracket (stainless steel) a value of 0.3 (Noda, et al, 1993, pp.

154-160) was taken from the literature. The boundary conditions for load were taken from the surface stress in the wire.

By using the ABAQUS software for numerical simulation, a model with three different orthodontic wires was presented. The values of the stress on the bracket, PDL and the lateral incisor itself produced by different types of wires are shown in **Figs. 14a, 14b and 14c**. It can be seen that by increasing the elastic modulus of the wire, the stresses on the bracket, PDL and tooth became more intense.

Figure 13 – The finite-element mesh of the model
Slika 13 – Mreža konačnih elemenata modela

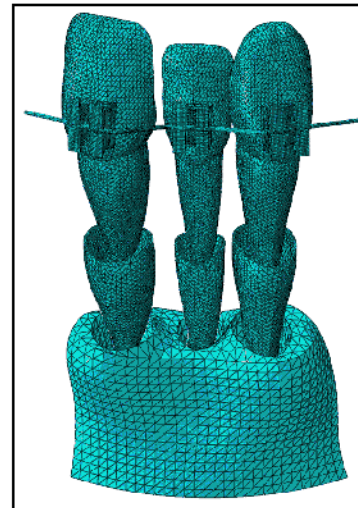


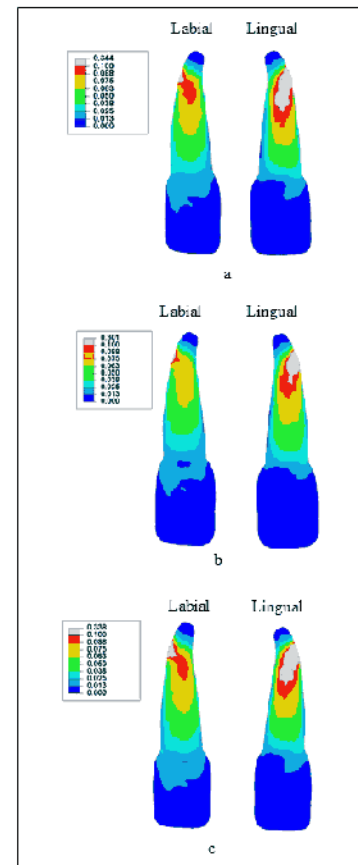
Fig. 15 shows *Von Mises* equivalent stresses on the PDL of the lateral incisor. We could see that on the PDL the compressive stresses in the tensile stresses zone are similar to the formatted stresses on the lateral incisor. The maximal equivalent stress after *Von Mises* on the PDL of the lateral incisor is formatted on the circumference of the PDL by the contact with the tooth crown. Bigger stresses on the mesial side than on the distal side are probably consequences of the smaller distance between the bracket on the lateral incisor and the bracket on the canine. The second reason could be also a stiff contact between the bracket and the wire.

Figure 14 – *Von Mises* equivalent stresses on the tooth lateral incisor:

- (a) $E = 50000 \text{ MPa}$; (b) $E = 54000 \text{ MPa}$;
- (c) $E = 58000 \text{ MPa}$

Slika 14 – Ekvivalentni fon Mizesov napon na bočni sekutić

- (a) $E = 50000 \text{ MPa}$; (b) $E = 54000 \text{ MPa}$;
- (c) $E = 58000 \text{ MPa}$



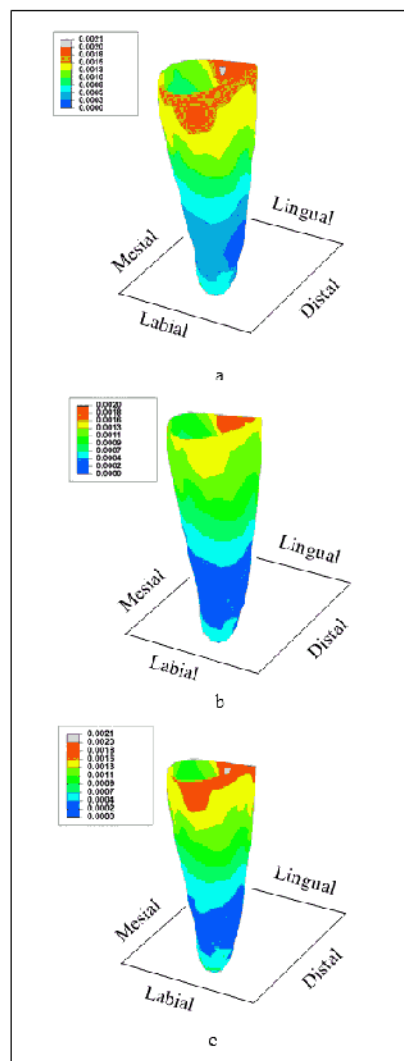


Figure 15 – Von Mises equivalent stresses on the periodontal ligament:
(a) $E = 50000$ MPa; (b) $E = 54000$ MPa; (c) $E = 58000$ MPa

Slika 15 – Ekvivalentni fon Mizesov napon na parodontalnom ligamentu
(a) $E = 50000$ MPa; (b) $E = 54000$ MPa; (c) $E = 58000$ MPa

Table III shows the average *Von Mises* equivalent stresses for the separate internal force and the calculated resultant force. The force level was obtained with this simulation. The average *Von Mises* equivalent stresses were calculated using the values on the cut plane of the bracket.

Table 3 – The average Von Mises equivalent stresses, internal forces on the cut plane of the bracket and the calculated resultant forces

Tabela 3 – Prosečni ekvivalentni fon Mizesov napon, unutrašnje sile na ravan breketa i izračunate rezultujuće sile

Wire	Average stresses [MPa]			Components of internal forces [N]			Orthodontic force [N]
	σ_{xx}	τ_{xy}	τ_{xz}	F_x	F_y	F_z	F
1	0.0341	-0.012	-0.0015	0.35	-0.12	-0.016	0.37
2	0.0346	-0.0121	-0.00152	0.354	-0.124	-0.0156	0.375
3	0.035	-0.0124	-0.00161	0.358	-0.127	-0.017	0.38

The Finite Element Method (FEM) is a powerful tool for the analysis of complex structures, but the outcome is dependent on the formulation of the problem (Toms, Eberhardt, 2003, pp. 657-65). The acting forces in the beginning stage of orthodontic treatment in the case with moderate crowding were presented using the FEM. This was an attempt to quantify and evaluate the effects of orthodontic loads applied to the bracket and teeth in order to achieve initial tooth movement. With the intention of simplifying the procedure, the moment of force was not taken into account. The emphasis was put on the level of force produced by the NiTi wire. It was determined that, by the smallest elastic modulus of 50,000 MPa, the calculated force on the lateral incisor was approximately 0.37N. A bigger force was produced by the wires with a higher value of elastic modulus. The force level was smaller than it is supposed to be optimal for orthodontic tooth movement (0.09-0.98 N).

Conclusions

In the past, numerous studies have been carried out to determine the actual level of force applied to the teeth, in which the initial force caused by orthodontic wires was measured by means of load cells on specially constructed models.

In the present study, the level of the orthodontic forces caused by the the initial NiTi wire was determined using the Finite Element Method (FEM). For the simulation we used commercially available software for numerical simulation by FEM - Abaqus. The numerical model with boundary conditions similar to those in the mouth was constructed. Much emphasis was placed on the choice of material parameters and biological segment in the numerical model.

Material parameters such as an elastic module and Poisson's ratio for the bone and teeth were available. The determination of the material parameters of the periodontal ligament was difficult due to the small space of the ligament that surrounds the tooth. In the present 3D computer model simulating the force system in a simple orthodontic case, we presented the stresses on the periodontal ligament. The results of simulation showed that complex stresses were created due to various components of the forces applied to the tooth. The calculation of individual and resultant forces was done at the same time taking into consideration two components of the force applied to the brackets on the tooth: normal and tangential. The results indicated that the calculated force is in the range of predicted optimal force for orthodontic tooth movement.

In this paper, a numerical simulation of a complex biological system with applied orthodontic forces was shown. Although the numerical simulation required substantial simplification of a real life situation, the results are clinically relevant. The future of the numerical model lies in the ability to introduce more relevant parameters into the successful simulation of more complex orthodontic problems.

References

- Auricchio, F., & Massarotti, V. *One Way and Two Way-Shape Memory Effect: Thermo-Mechanical Characterization of Ni-Ti wires*. Retrieved from <http://www.2.unipv.it/compmech/dissertations/zanaboni.pdf>.
- Auricchio, F., & Taylor, R. 1997. *Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.*, 143, pp. 175-194.
- Chang, Y., Shin, S., & Baek, S. 2004. Three-dimensional finite element analysis in distal en masse movement of the maxillary dentition with the multi-loop edgewise archwire. *Eur J Orthod*, 26(3), pp. 339-45. PMID:15222721. doi:10.1093/ejo/26.3.339
- Coluzzi, B., Biscarini, A., di Massoa, L., Mazzolai, F.M., Staffolanib, N., Guerrab, M., Tuissi, A. 1996. Phase transition features of NiTi orthodontic wires subjected to constant bending strains. *Journal of Alloys and Compounds*, 233(1-2), pp. 197-205.
- de Weck, O., & Yong, K.I. *Finite Element Method*. Retrieved from http://web.mit.edu/16.810/www/16.810_L4_CAE.pdf.
- Es-Souni, M., & Fischer-Brandies, H. 2004. Assessing the biocompatibility of NiTi shape memory alloys used for medical applications. *Analytical and Bio-analytical Chemistry*, 381(3), pp. 557-567.
- Ferčec, J., Glišić, B., Šćepan, I., Marković, E., Stamenković, D., Anžel, I., Flašker, J., Rudolf, R., 2012, Determination of Stresses and Forces on the Orthodontic System by Using Numerical Simulation of the Finite Elements Method. *A. Phys. Polonica A* 2012; 122: 659-665.
- Field, C., Ichim, I., Swain, M.V., Chan, E., Darendeliler, M.A., Li, W., & Lig, Q. 2009. Mechanical responses to orthodontic loading: A 3-dimensional finite

element multi-tooth model. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 135(2), pp. 174-181.

Fuck, L.M., & Drescher, D. 2010. Force Systems in the Initial Phase of Orthodontic Treatment: A Comparison of Different Levelling Archwires. *Journal of Orofacial Orthopaedics*, 67(1), pp. 6-18.

Fuck, L.M., Wiechmann, D., & Drescher, D. 2007. Comparison of the Initial Orthodontic Force Systems Produced by a New Lingual Bracket System and a Straight-Wire Appliance. *Journal of Orofacial Orthopaedics*, 66(5), pp. 363-376.

Hisham, M., Badawia, R., Toogoodb, W., Jason, P.R., Heod, C.G., & Paul, W.M. 2009. Three-dimensional orthodontic force measurements. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 136(4), pp. 518-528.

Kojimaa, Y., & Fukuib, H. 2010. Numeric simulations of en masse space closure with sliding mechanics. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 138(6).

Lagoudas, D.C. 2008. *Shape Memory Alloys, Modeling and Engineering Applications*. Texas: Springer.

Lapatki, B.G., Bartholomeyczik, J., Ruther, P., Jonas, I.E., & Paul, O. 2007. Smart Bracket for Multi-dimensional Force and Moment Measurement. *Journal of Dental Research*, 86, pp. 73-78.

Lapatki, B.G., & Paul, O. 2009. Smart Brackets for 3D-Force-Moment Measurements in Orthodontic Research and Therapy: Developmental Status and Prospects. *Journal of Orofacial Orthopaedics*, 68(5), pp. 377-396.

Milczewski, M.S., Martelli, C., Canning, J., Stevenson, M., Simoes, J., & Kalinowski, H. 2007. Measurement of orthodontic forces using polymer PCF. In: Optical Internet, 32nd Australian Conference on Optical Fibre Technology, COIN-ACOFT Joint International Conference.

Noda, T., Okamoto, Y., & Hamanaka, H. 1993. . *J. Jpn Orthod Soc*, 52(2), pp. 154-160.

Norman, D.P., Carlos, N.E., Pacheco, M.C., Thomé, G., & Pereira, J. 2010. 3D simulation of orthodontic tooth movement. *J. Orthod.*, 1(5), pp. 98-108.

Proffit, W.R. 2007. *Contemporary orthodontics*. St. Louis: Elsevier, Mosby, pp. 359-394.

Qian, Y., Fan, Y., Liu, Z., & Zhang, M. 2008. *Numerical simulation of tooth movement in a therapy period*, pp. 48-52.

Scheid, R.C., & Weiss, G. 2012. *Woelfels Denatal Anatomy*. Lippincott Williams & Wilkins.

Sifakakis, I., Pandis, N., Makou, M., Eliades, T., & Bourauel, C. 2009. Forces and moments on posterior teeth generated by incisor intrusion biomechanics generated by incisor intrusion biomechanics. *Orthod Craniofac Res.*, 12(4), pp. 305-11.

Šestak, P., Čemy, M., & Pokluda, J. 2009. *Influence of compound twinning on Youngs moduli in NiTi martensite*. Retrieved from <http://www.esomat.org>

Their, M., Treppmann, D., Drescher, D., & Boureau, C. 2004. Transformation characteristics and related deformation behaviour in orthodontic NiTi wire. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 3, pp. 229-233.

Todorović, A., Radović, K., Grbović, A., Rudolf, R., Maksimović, I., & Stamenković, D. 2010. Stress analysis of a unilateral complex partial denture using the finite-element method. *Materijali i tehnologije*, 44(1), pp. 41-47.

Toms, S.R., & Eberhardt, A.W. 2003. A nonlinear finite element analysis of the periodontal ligament under orthodontic tooth loading. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 123(6), pp. 657-665. pmid:12806346

METODE MERENJA SILA NA ZUBIMA KOD FIKSNOG ORTODONTSKOG SISTEMA

OBLAST: materijali

VRSTA ČLANKA: pregledni članak

Sažetak:

Fiksni ortodontski aparat sastoji se od bravica (breketa) povezanih zubima. Nakon provlačenja kroz otvore na breketima, žica generiše silu koja utiče na ortodontsko pomeranje zuba. Promena u parodontalnom dotoku krvi predstavlja biološki odgovor koji dovodi do preoblikovanja alveolarne kosti i ortodontskog pomeranja zuba. Mnoge promene koje utiču na ortodontsko pomeranje zuba, poput rasta i odgovora tkiva na aparat, ne mogu da se kontrolišu u potpunosti. Međutim, sila kojom se deluje na zub treba da bude promenljiva i na nju se može uticati, a pažljivo izvedeno ispitivanje fizičke osnove kliničkih primena može da bude od pomoći pri smanjivanju neželjenih sporednih efekata. Osobine ortodontskih žica, kao što su jačina, krutost, elastičnost i spring-back efekat definišu njihovu kliničku primenljivost. Idealna ortodontska žica treba da poseduje sledeće osobine: izražen spring-back efekat, nisku krutost, dobru obradivost, visok nivo uskladištene energije, biokompatibilnost i stabilnost u okruženju, malo površinsko trenje, kao i sposobnost zavarivanja i lemljenja s pomoćnim delovima. Idealna žica za luk još nije pronađena. Kada se žica aktivira ili savije, ortodontsko pomeranje zuba vrši se pod uticajem rasterećenja ili deaktiviranja sile. Stoga je potrebno znati nivo sile koju proizvodi svaka žica pojedinačno pri ortodontskom lečenju. Cilj ovog rada je da izmeri sile nastale dejstvom različitih superelastičnih NiTi žica.

Ključne reči: merenje sile, ortodontski sistem, zubi, legure bazirane na niklu i titanu

Datum prijema članka/Paper received on: 25. 11. 2012.

Datum dostavljanja ispravki rukopisa/Manuscript corrections submitted on: 20. 03. 2013.

Datum konačnog prihvatanja članka za objavljivanje/ Paper accepted for publishing on: 22. 03. 2013.

ANALIZA I PRIKAZ VRSTA FIKSATORA U MEDICINI I METODA OBRADJE MATERIJALA ZA IZRADU FIKSATORA

Dalibor M. Đenadić, Dejan I. Tanikić, Tehnički fakultet u Boru,
Univerzitet u Beogradu
Miodrag T. Manić, Saša S. Randelović, Petar S. Đekić,
Mašinski fakultet u Nišu, Univerzitet u Nišu

DOI: 10.5937/vojtehg61-2093

OBLAST: materijali

VRSTA ČLANKA: pregledni članak

Sažetak:

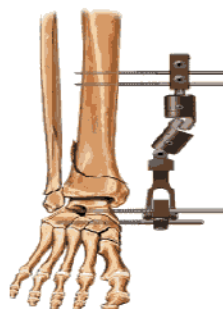
Fiksator je medicinski uređaj proizveden da pruži podršku oštećenim biološkim strukturama. Metalni biomaterijali uglavnom se koriste za zamenu polomljenih ili oštećenih tvrdih tkiva, najčešće kostiju, zbog svoje velike čvrstoće, žilavosti i otpornosti na habanje. U oblasti ortopedije koja se bavi skeletnim poremećajima nerđajući čelici, legure titanijuma i aluminijuma (Ti-6Al-4V), legure kobalta i hroma, kompozitni materijali i drugi biokompatibilni materijali nalaze primenu za stabilizaciju povreda potpornih tkiva ili predstavljaju zamenu za koštano tkivo. Najčešće korišćeni medicinski fiksatori su: igle, šipke, pločice, zavrtnji, cevi, žice, klinovi i eksterni fiksatori. Za sve vrste fiksatora postoje metode obrade kojima se oni izrađuju, pri čemu se koriste i konvencionalne i nekonvencionalne metode obrade.

Ključne reči: legure, metode obrade, materijali, konvencije, kost, biomaterijali.

Uvod

Fiksator je medicinski uređaj proizveden da pruži podršku oštećenim biološkim strukturama. U oblasti ortopedije koja se bavi skeletnim poremećajima, kao što su povrede ili oboljenja kostiju, kičme, zglobova, mišića i tetiva, različiti metali, legure titana, kobalta i sl. nalaze primenu u stabilizaciji povreda potpornih tkiva ili kao zamena za koštano tkivo. Metalni implantati koji se često koriste u ortopedskoj hirurgiji uključuju zglobove proteze (totalne proteze kuka, kolena i lakta), delove za fiksaciju preloma (pločice, zavrtnji, eksterni fiksatori) i delove za fiksaciju kičme (Cvijović-Alagić, Rakin, 2008, pp. 121–130).

U principu, fiksatori se dele na spoljašnje i unutrašnje u zavisnosti od mesta ugradnje (van ili unutar tela). Najčešće vrste medicinskih fiksatora su igle, šipke i ploče. Na slici 1. prikazan je fiksator koji se koristi za spoljašnje fiksiranje tibije (Đenadić, et al, 2012, pp. 3.32-3.39).



Slika 1 – Spoljašnje fiksiranje tibije
Figure 1 – External fixation of tibia

U ovom radu prikazani su neki od najčešće korišćenih materijala koji se koriste za izradu fiksatora, kao i mogućnosti za njihovu izradu i obradu, kako bi se kao takvi primenjivali u medicini za različite namene.

Vrste fiksatora i materijali od kojih se izrađuju

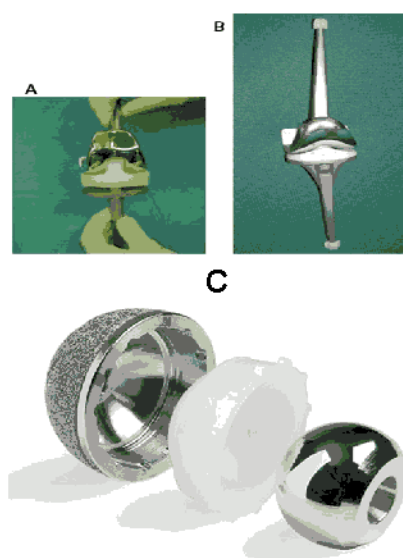
Danas se za izradu fiksatora i implanta koriste biokompatibilni materijali. To su oni materijali koji pokazuju dobre karakteristike u kontaktu sa ćelijama, tkivima ili telesnim tečnostima ljudskog organizma. Najčešće se koriste za zamenu ili nadogradnju strukturalnih komponenti ljudskog organizma kako bi se nadomestila oštećenja do kojih dolazi zbog starenja, bolesti ili nesrećnih slučajeva. Karakteristike koje treba da posедуju ovakvi materijali su: netoksičnost, otpornost prema koroziji, izdržljivost, veliku čvrstoću, žilavost uz niske vrednosti modula elastičnosti.

Danas se u ortopedskoj hirurgiji najviše koriste nerđajući čelici (austenitni i precipitaciono ojačani), superlegure na bazi kobalta (kobalt-hrom legure), titan i njegove legure i, nešto ređe, kompozitni materijali (Hrivnjak, Zmik, 1993). Za izradu fiksatora najviše se koriste titan i njegove legure.

Kao što je rečeno u uvodu, navedeni materijali koriste se za izradu zglobnih proteza, elemenata za fiksaciju preloma i za fiksiranje kičme.

Za zglobne proteze karakteristično je da implante u ovom slučaju predstavljaju cevi koje se ubacuju u medularni kanal kosti kako bi stabilizovali protezu i delove zgloba. Kada je u pitanju totalna proteza kuka, glava

butne proteze najčešće se izrađuje od kobalt-hrom legure, dok se komponenta koja zamenjuje butnu kost izrađuje od legure titana. Pokretni delovi zgloba obično se izrađuju od kobalt-hrom legure i polietilena velike gustine, kako bi se postiglo značajno smanjenje trenja između kliznih površina zgloba. Konstrukcije totalnih proteza i materijali od koji se one izrađuju znatno su unapređeni, ali je problem životnog veka i dalje prisutan, pa su istraživanja vezana za vek trajanja proteza od izuzetnog značaja. Na slici 2. prikazane su neke varijante proteze kolena i zglobova kuka (Đenadić, et al, 2012, pp. 3.32-3.39).



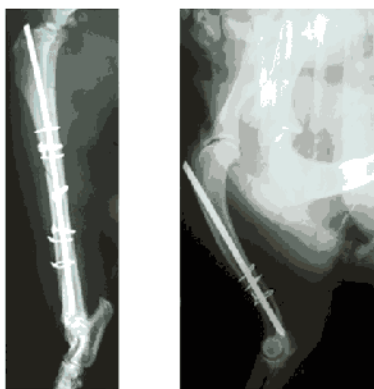
Slika 2 – Revizijska proteza kolena (A), šarnirska endoproteza kolena (B), moguće zamene zglobova kuka: kombinacija metal – polietilen (C)

Figure 2 – Revision knee prosthesis (A), Hinged knee endoprosthesis (B), Possible combination of a hip joint metal – polyethylene (C) replacement

Fiksatori lomova uključuju pločice, zavrtnje, žice, klinove i eksterne fiksatore, a izrađuju se od različitih metalnih legura, najčešće od legura titana (Cvijović-Alagić, Rakin, 2008, pp.121-130).

Pločice za fiksaciju uspešno se koriste pri tretiranju lomova kostiju, npr. kod loma podlaktice. U poslednjih nekoliko godina postignut je napredak u pogledu materijala za njihovu izradu, kao i u njihovom dizajnu. S obzirom na to da su mesta koja se tretiraju pločicama isuviše kruta, u nekim slučajevima se za imobilizaciju koriste znatno elastičniji eksterni fiksatori ili se tradicionalni materijali za njihovu izradu (nerđajuć čelici i kobalt-hrom legure) zamenjuju novijim materijalima poput legura titana (Tarnita, et al, 2010, pp.145-150), koji imaju bolju statičku i dinamičku čvrstoću.

Intramedularni klinovi su u ortopedskoj hirurgiji počeli da se primenjuju četrdesetih godina prošlog veka. Uglavnom se koriste kod lomova dugih kostiju, tako što se postavljaju u medularni kanal kosti. Time je omogućena odlična fiksacija mesta preloma. Za razliku od pločica i zavrtneja, koji se takođe koriste za fiksaciju preloma, intramedularni klinovi važe za implantne delove kod kojih postoji mogućnost raspodele opterećenja, što je jako važno, jer predstavljaju unutrašnju potporu polomljene kosti. Najviše su opterećeni na savijanje, ali su isto tako izloženi i pritisku i uvijanju, tako da ovi klinovi malog prečnika, izrađeni od legure velike čvrstoće i dobre elastičnosti, doprinose ubrzanom procesu zarastanja. Na slici 3. prikazani su zahvati fiksiranja tibije i nadlaktice korišćenjem intramedularnih klinova, priteznih vijaka i ortopedske žice (Đenadić, et al, 2012, pp. 3.32-3.39).

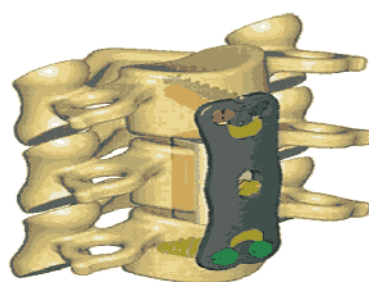


Slika 3 – Osteosinteza tibije (potkolenice) intramedularnim klinom, priteznim vijcima i ortopedskom žicom (levo), odnosno osteosinteza humerusa (nadalaktice) intramedularnim klinom i ortopedskom žicom (desno)

Figure 3 – Osteosynthesis of the tibia (shin) with the intramedullary nail, tightening screws and orthopedic wire (left), or osteosynthesis of the humerus (upper arm) with the intramedullary nail and orthopedic wire (right)

Eksterni fiksatori često se koriste u ortopedskoj hirurgiji i to tako što se fragmenti kosti stabilizuju zavrtanjima koji prolaze kroz njih i povezani su sa fiksatorom koji se nalazi van tela pacijenta. Tri tipa eksternih fiksatora koriste se u ortopediji: monolateralni fiksator, prstenasti fiksator i hibridni fiksator. Ranije su eksterni fiksatori izrađivani od nerđajućeg čelika, a danas se za njihovu izradu koriste legure titana i legure aluminijuma, dok se zavrtnji izrađuju od Ti-6Al-4V legure. Prednost legura titana ogleda se u njihovoj maloj specifičnoj težini, velikoj čvrstoći i boljoj biokompatibilnosti nego što je to slučaj kod drugih legura. Primer eksternog fiksatora prikazan je na slici 1.

Kičmeni implantati koriste se za stabilizaciju delova kičme koji su pretrpeli određenu traumu. Oni se najčešće ugrađuju trajno u organizam, jer je uklanjanje operacijom jako rizično i teško. Zbog toga se izrađuju od legura titana zbog biokompatibilnosti i kompatibilnosti sa magnetnom rezonancom, ali se poslednjih godina ubrzano radi na razvoju legura koje u svom sastavu ne sadrže vanadijum. Na slici 4. prikazan je primer fiksacije prednje vratne kičme pomoću pločica (Tamita, et al, 2008, pp.1363-1364), (Tamita, et al, 2009, pp.120-103).



Slika 4 – Pločice za prednju vratnu kičmu
Figure 4 – Plates for the front neck spine

Metode izrade i obrade materijala za izradu fiksatora u medicini

Današnji razvoj pomenutih materijala zasnovan je na naučnom pristupu i odvija se interdisciplinarnom saradnjom fundamentalnih i primenjenih disciplina, kvantitativnih metoda i računara. Tako su npr. mikrolegirani čelici, čelici povišene čvrstoće i korozijske postojanosti, Ti-legure, Ni i Co-superlegure, kompozitni materijali, tehnička keramika, intermetalni spojevi i drugi današnji materijali razvijeni naučnim istraživanjima. Današnja istraživanja materijala karakterišu sledeća obeležja:

1) Nove analitičke metode i savremeni instrumenti za određivanje karakteristika materijala (npr. tunelni skening mikroskop i sinhrotron) možda su najvažniji pokretač otkrivanja i poboljšanja atomskih i molekularnih granica.

2) Računarske simulacije omogućavaju kreiranje materijala „in situ”, uključujući modeliranje promena strukture i svojstava tokom procesa oblikovanja.

3) Mogućnosti prepoznavanja, slikovnog predstavljanja i kvantifikacije strukturnih oblika u nano i mikrosvetu uz računarsko modeliranje, uvođe nas u područje projektovanja materijala željenog sastava, strukture i svojstava, polazeći od atomskog i molekularnog nivoa.

4) Materijal se odmah oblikuje u gotovo konačan oblik izratka bez međufaza za dobijanje poluproizvoda u obliku šipki, cevi, limova i slično – tzv. „net shape” i „near net shape” postupci.

5) Proizvodnja novih materijala usko je povezana s postupcima koji bi se uslovno mogli nazvati „tehnologijama materijala”. Radi se o svim onim postupcima tokom kojih se bitno menjaju sastav i struktura, odnosno formiraju svojstva materijala, a često i svojstva konačnog proizvoda. To su npr. klasični postupci livenja, postupci oblikovanja praha, lasersko sinterovanje, postupci modifikacije i prevlačenja površina, postupci oblikovanja kompozita itd.

Materijali i delovi dobijeni metalurgijom praha

Današnji savremeni materijali dobijaju se optimizacijom sastava i mikrostrukture materijala prema željenim svojstvima. Metalurgija praha (Powder Metallurgy – PM) pruža velike mogućnosti za ostvarenje takvog pristupa proizvodnji materijala i delova. Metalurgija praha danas obuhvata ne samo proizvodnju metala u obliku praha nego i nemetalnih prahova, te oblikovanje delova iz takvih prahova postupkom sinterovanja, odnosno srašćivanja. Prema tome, jasno je da se materijali koji se koriste za izradu fiksatora i implanta mogu proizvesti i obraditi nekim od postupaka o kojima će biti reči u daljem tekstu.

Klasični PM postupci

Nagliji razvoj PM počeo je proizvodnjom i upotrebom „tvrdih metala”, a poslednjih godina PM prolazi kroz period velikog napretka (Dowson, 1993). Danas se tim postupcima postižu jednaka ili čak bolja svojstva od onih dobijenih tradicionalnim postupcima oblikovanja metala. Postupci oblikovanja praha danas se takođe koriste i u proizvodnji keramike i metalnih kompozita.

Primeru radi, ultrabrzo srašćivanje pruža nove mogućnosti proširenja legiranja i prečišćavanja mikrostrukture, dobijanje ranije nedostižnih kompozita, kao i amorfni i kristalnih struktura.

Mehaničko legiranje omogućava, pored ostalog, dobijanje disperzijski očvrnutih legura (ODS – oxide-dispersion-strengthened metalnih kompozita) za primenu na povišenim temperaturama.

Postoji veliki broj materijala i delova za koje postoje nepobitni razlozi da se proizvedu upravo PM postupcima: tvrdi metali, vatrostalni metali, kompoziti, specijalne legure itd.

Savremeni postupci izrade na gotovo konačan oblik („net shape i near net shape technologies”)

Jedan od osnovnih ciljeva ovih postupaka je visoka iskoristivost materijala uz što manje primenjenih operacija u procesu oblikovanja. Oni se mogu svrstati u tri kategorije:

1) konsolidacijski postupci za postizanje pune gustine (vruće izostatičko brizganje – HIP, injekcijsko brizganje metala – MIM, oblikovanje metala u testastom stanju (semi-solid), hladno/vruće izostatičko brizganje – CHIP/HIP, kovanje praha);

2) nanošenje raspršivanjem (plasma spraying) i oblikovanje raspršivanjem (spray forming);

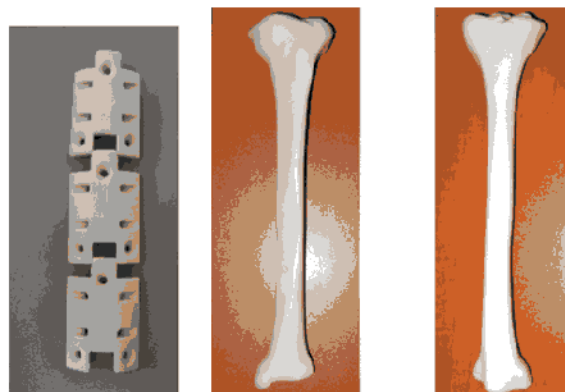
3) oblikovanje nadogradnjom – brza izrada prototipova (Rapid Prototyping) i brza proizvodnja delova (Rapid Manufacturing – npr. laserskim sinterovanjem).

Jedan od vrlo zanimljivih postupaka za izradu delova u jednoj operaciji jeste proces laserskog taloženja (sinterovanja) metalnih prahova sloj po sloj. Metalne čestice se injektiraju u fokus laserskog snopa čija je putanja računarski vođena u tri ose. Putanja je određena geometrijom trodimenzionalnog modela izratka dobijenog oblikovanjem pomoću CAD paketa. Na slici 5. prikazan je uređaj za izradu modela korišćenjem navedenog postupka, dok su na slici 6. prikazani modeli koji mogu da se dobiju navedenim postupkom (Tamita, et al, 2010, pp.145-150), (Tamita, et al, 2008, pp.1363-1364), (Tamita, et al, 2009, pp.120-103), (Dowson, 1993).



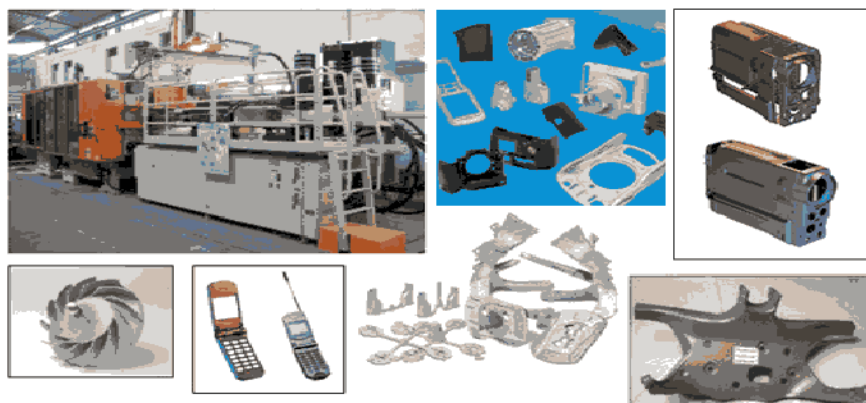
Slika 5 – Sistem za vođenje i štampanje Rapid Prototyping 3D Zcorp 310

Figure 5 – Rapid Prototyping 3D Zcorp 310 system for managing i printing



Slika 6 – Modeli pločica i prototip tibije
Figure 6 – Plate models and a tibia prototype

Od nekoliko postupaka oblikovanja u polučvrstom stanju (semi-solid) najpoznatiji je Thixomoulding (Walukas, et al, 1997). Radi se o istiskivanju praha metala u kalup u testastom, poluukrućenom stanju, što je slično injekcijskom brizganju polimera. Prednosti ovog postupka jesu: povećana tačnost i iskoristivost materijala u odnosu na livenje pod pritiskom i precizno livenje, izostanak završnih operacija obrade, oblikovanje vrlo složenih geometrija itd. Na slici 7. prikazan je uređaj za Thixomoulding postupak i neki od mogućih modela izrade.



Slika 7 – Postrojenje za izvođenje Thixomoulding postupka sa modelima koji se izrađuju
Figure 7 – Plant for Thixomoulding procedure with manufactured models

Oblikovanje raspršivanjem ili postupak dinamičkog kompaktiranja kapljica (LDC – Liquid Dynamic Compaction) koristi se za dobijanje ultrasitnih prahova iz raspršenog mlaza kapljica, za pripremu ultrabrzog gašenih metala (amorfni metali), za oblikovanje poluproizvoda i izradaka real-

nih oblika i dimenzija ili za nanošenje prevlaka skeniranjem površine podloge mlazom kapljica. Mikrostruktura delova oblikovanih raspršivanjem čestica karakterisana je jednoličnom raspodelom sitno dispergiranih konstituenata u odnosu na liveno stanje. Visoki troškovi LDC postupaka ograničavaju za sada širu primenu.

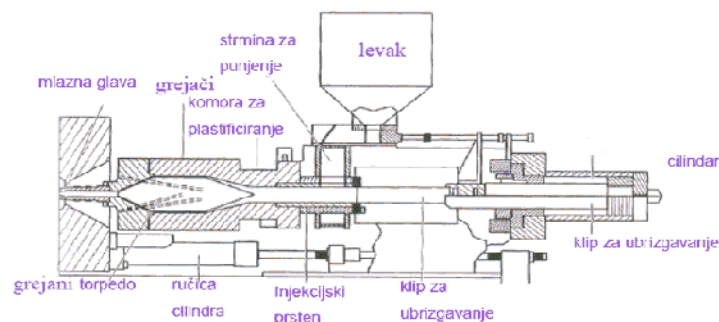
Posebno obećavajuće PM tehnologije odnose se na oblikovanje nanostrukturnih materijala iz prahova čija su zrna dimenzija manjih od 1 μm .

Titanijum legure proizvedene PM tehnologijama, uz primenu hladnog i vrućeg izostatičkog brizganja, imaju sve veći značaj u industriji, medicini i drugim oblastima, jer se navedenim postupcima dobijaju legure veće čvrstoće pri visokim temperaturama, povećava tvrdoća i modul elastičnosti. Često se primenjuje legura Ti-6Al-4V koja se proizvodi ili mešanjem elementarnih prahova ili u obliku predlegiranog praha za proizvodnju hirurških instrumenata i implanta. Jedan takav uređaj za brizganje prikazan je na slici 8, dok je na slici 9. prikazana šema jednog takvog uređaja.



Slika 8 – Injekcijsko brizganje (gore), injekcijsko brizganje test-uzoraka za ispitivanje mehaničkih svojstava (dole)

Figure 8 – Injection molding (above), injection molding test specimens for testing mechanical properties (below)



Slika 9 – Šema uređaja za injekcijsko brizganje

Figure 9 – Scheme of the device for injection molding

Metalni kompoziti uglavnom se proizvode postupcima oblikovanja prahova, ali se i taloženjem iz parne faze takođe mogu dobiti slojeviti metalni kompoziti.

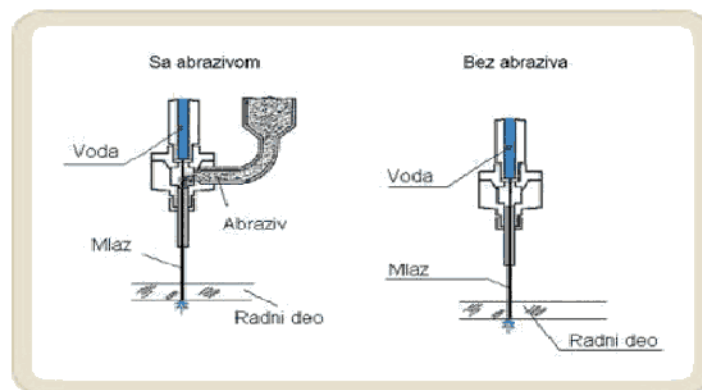
Postupci modifikovanja i prevlačenja površina primenjuju se zbog povećanja otpornosti na trošenje, korozijske i hemijske postojanosti, a i iz dekorativnih razloga (Ashby, 2011), npr. nerđajući čelici koji zadovoljavaju potrebe u smislu korozijske i hemijske postojanosti za elemente u mašinstvu, optici, elektronici, medicinskoj tehnici itd. Ovim postupcima moguće je nanositi različite metale, legure, keramičke spojeve (karbide, nitrde i okside), kao i sasvim nove kombinacije materijala u jednom ili više slojeva na metalne i nemetalne substrate. U primeni su najzastupljeniji postupci za nanošenje tankih slojeva taloženjem iz parne faze – PVD (preko 50%), kao i hemijskim taloženjem iz parne faze – CVD (Đenadić, et al, 2010, pp.3.91-3.96). Osim navedenih, sve je više u primeni i modifikovanje u plazmi i implantacija jona.

Kada su u pitanju konvencionalne metode obrade navedenih materijala sve vrste obrade: sečenje, struganje, glodanje, bušenje, brušenje, poliranje itd. nalaze primenu i to kako na klasičnim tako i na savremenim CNC mašinama. Kada su u pitanju složeniji oblici koji treba da se izrađuju, a to su pre svega implantati, kao i neki elementi fiksatora, onda se koriste isključivo CNC mašine (Suh, et al, 2006, pp.677-688).

Što se tiče nekonvencionalnih metoda, interesantna metoda za obradu složenih elemenata je sečenje vodenim mlazom ili tzv. sečenje na Water Jet-u.

Sečenje vodenim mlazom ili sečenje na Water Jet-u jedna je od najinovativnijih metoda današnjice. Water Jet je proces hladne obrade rezanjem vodom koji omogućava da se radi sa materijalima koji se ranije nisu mogli obrađivati tradicionalnim metodama ili su se obrađivali uz velike teškoće.

Princip rada zasnovan je na prolazu vode kroz uski regulator protoka vode i rezu cev, pod ekstremno visokim pritiskom, oko 3800 bara. U dodiru sa materijalom kinetička energija se pretvara u energiju pritiska i na taj način se razlaže materijal. Brzina kretanja vodenog mlaza je 1000 m/sek, što je oko tri puta brže od brzine zvuka. Snaga i brzina vodenog mlaza raseca mekane materijale, a uz dodatak abrazivnog peska proces sečenja se proširuje na gotovo sve moguće materijale. Debljina reza kreće se od 0,08 mm do 1,3 mm, u zavisnosti od vrste i debljine materijala koji se seče, što ovoj tehnologiji daje veliku prednost u uštedi materijala. Upravljački sistem daje mogućnost rezanja različitih formi i oblika sa velikom preciznošću i visokim kvalitetom reza. Na slici 10. šematski je prikazan postupak obrade sa abrazivom i bez abraziva.



Slika 10 – Šematski prikaz postupka obrade Water Jet-om sa abrazivom i bez abraziva
Figure 10 – Schematic processing of Water Jet with and without abrasive blast

Rezanje vodenim mlazom ne zagreva materijal, što je naročito korisno za rezanje alatnog čelika i drugih metala kod kojih izlaganje visokim temperaturama može promeniti karakteristike materijala. Mala širina zareza omogućuje bolju iskoristivost sirovine. Rezanje korišćenjem mašine Water Jet je veoma jednostavno. Dimenzije delova mogu se uneti u upravljačku jedinicu, a mašina precizno reže programirani oblik. Takav način izrade je puno brži i jeftiniji od uobičajenog načina. Rad mašine za vodeno rezanje se jednostavno automatizuje, što olakšava serijsku proizvodnju. Vodeno rezanje ne ostavlja nazubljene niti oštre ivice, što eliminiše potrebu za dodatnom obradom, jer površina ostaje glatka i čista. Garantovana preciznost postupka je 0,05 mm, a u zavisnosti od materijala i njegove debljine, kvaliteta i kompleksnosti konture reza moguće su uštede i do 50 % u odnosu na konvencionalne metode sečenja. Sečenjem materijala vodenim mlazom ne menjaju se termička, hemijska i mehanička svojstva materijala.

Ukratko, prednosti rezanja vodom su: proces je hladan, nema zagrevanja za vreme rezanja; nema promene strukture materijala (mikropucanja, očvršćavanja rezne površine, tenzije materijala itd.); nema opasnih gasova niti prašine za vreme rezanja; štiti životnu i radnu okolinu (prirodni pesak i voda); nudi veliku brzinu rezanja i rezanje materijala koji se ne mogu rezati drugim metodama; visoka preciznost; optimalna iskorišćenost materijala zahvaljujući CAD/CAM tehnologiji; nema potrebe za završnim radom na proizvodu (osim u slučajevima kada je potreban veoma visok kvalitet); izbor stepena kvaliteta reza kreće se od 1 do 5, što zavisi od potreba proizvodnje; mogućnost izrade prototipa ili velikih serija; visoka fleksibilnost primene u gotovo svim industrijskim oblastima, kao i druge prednosti. Vodom je moguće seći metale (čelik, nerđajući čelik, aluminijum, titanijum i njegove legure, kobalt-hrom legure itd.), plastične i kompozitne materijale, keramiku, staklo, gumu, drvo itd.

Razvoj novih legura za buduću primenu

Danas se na polju materijala koji se koriste za različite namene gotovo svakoga dana pojavljuje nešto novo. Isti slučaj je i sa materijalima koji se koriste u medicini za fiksaciju, implataciju itd. Ranije su se najviše koristili nerđajući čelici, a nakon toga, uporedo sa njima, superlegure na bazi kobalta, dok danas primat preuzima titan sa svojim legurama. Međutim, radi se i na tome da se postojeće legure titana još više unaprede ili da se otkriju neke nove koje će biti još boljih karakteristika.

Legure titana, naročito legure $\alpha+\beta$ tipa, kao što je Ti-6Al-4V, smatraju se najprikladnijim biokompatibilnim metalnim materijalima zbog odlične kombinacije mehaničkih karakteristika, otpornosti prema koroziji i biokompatibilnosti (Tanikić, et al, 2012, pp.202-215). Međutim, vrednost njihovih modula elastičnosti je ipak znatno veća u poređenju sa vrednostima modula elastičnosti ljudske kosti. Osim toga, istraživanja iz prošle decenije pokazala su da je vanadijum izuzetno toksičan, pa se radi na tome da se pronađu legure koje neće biti toksične za ljudski organizam. Takođe je jako važno i da se pri razvoju novih legura smanji Jungov modul elastičnosti.

Osnovna ideja u razvoju novih legura za primenu u medicini jeste da se vanadijum i aluminijum zamene niobijumom, tantalom i cirkonijumom, kako bi se na taj način izbegle negativne karakteristike do sada široko primenjivane Ti-6Al-4V legure, jer se pokazalo da je toksičnost pomenuutih elemenata izuzetno niska. Neke novije legure u razvoju su: Ti-3Al-2,5V ($\alpha+\beta$); Ti-5Al-2,5Fe ($\alpha+\beta$); Ti-6Al-7Nb ($\alpha+\beta$); Ti-15Mo (β); Ti-13Nb-13Zr(β); Ti-12Mo-6Zr-2Fe (β); Ti-45Nb (β); Ti-35Nb-7Zr-5Ta (β); Ti-55,8Ni (intermetalna).

Legura koja pokazuje izuzetna svojstva je Ti-13Nb-13Zr. Ova legura je legura titana β tipa i odlikuje se niskim vrednostima modula elastičnosti, sa jedne strane, i čvrstoćom koja je znatno poboljšana u odnosu na Ti-6Al-4V leguru, sa druge strane, zbog čega je interesantna za primenu u biomedicinskom inženjerstvu.

Zaključak

U okviru ovog rada prikazani su materijali koji se danas najviše koriste u biomedicinskom inženjerstvu. Kada je u pitanju primena u medicini može se zaključiti da titan i njegove legure pokazuju značajne prednosti u odnosu na ostale grupe biokompatibilnih metalnih materijala.

Od velike je važnosti da se razvoj novih materijala usmeri ka smanjivanju toksičnosti, povećanju biokompatibilnosti, kao i smanjenju modula elastičnosti, kako bi se što više smanjila razlika između modula elastično-

sti kosti i implantnog materijala, čime bi se sprečilo dalje oštećivanje koštanog tkiva i smanjenje gustine kostiju.

Osim toga, prikazane su neke mogućnosti za dobijanje i obradu biokompatibilnih materijala koji se najviše koriste, na osnovu čega se zaključuje da postoji širok spektar mogućnosti, kako za dobijanje, tako i za obradu ovih materijala. Sigurno je da će se u budućnosti u velikoj meri povećati proizvodnja navedenih materijala, kako u Evropi i svetu, tako i u Srbiji.

U Srbiji postoje fabrike koje se bave obradama nekih od navedenih materijala, dok se u inostranstvu uglavnom proizvode navedeni materijali, izuzev nerđajućeg čelika i nekih legura koji mogu da se proizvedu i u Institutu Vinča, u Sartidu iz Smedereva itd. Postoje pogoni širom Srbije za obradu navedenih materijala, npr. SLOVAS iz Čačka, SQUAREZ iz Sremske Kamenice itd., gde osim CNC pogona postoje i pogoni sa Water Jet-om, a pogona ima i u svim zemljama bivše Jugoslavije, što je jako bitno za izradu fiksatora i implanta koji se koriste kako u Srbiji tako i u drugim zemljama.

Od velike je važnosti da izrada i obrada pominjanih materijala bude precizna i čista, kako bi se mogućnosti za neke poremećaje u organizmu, npr. trovanje i slično svele na najmanju moguću meru. Takođe, bitno je da tokom obrade ne dolazi do hemijskih ili mehaničkih promena u samom materijalu.

Budućnost će sigurno doneti veliki broj materijala koji će se koristiti za izradu fiksatora i implanta, kao i veliki broj metoda za njihovu obradu, jer se intenzivno radi na razvoju materijala u hemijskoj industriji i medicini. Istovremeno se u mašinskoj industriji i informatici radi na iznalaženju novih metoda modeliranja i mogućnosti obrade, odnosno na izradi dobijenih modela pomoću računara.

Literatura

- Ashby, M.F., 2011, *Materials Selection in Mechanical Design*, Pergamon Press, Oxford,
- Cvijović-Alagić, I., Rakin, M., 2008, *Integritet biomedicinskih implanata od legura titana (drugi deo)*, Integritet i vek konstrukcija, Vol. 8, No. 2, pp. 121-130,
- Dowson, G., 1993, *Introduction to Powder Metallurgy – The Process and its Products*, European Powder Metallurgy Ass., Shrewsbury, England,
- Đenadić, D., Manić, M., Tanikić, D., Despotović, V., 2010, *Novi postupci za dobijanje veštačkog dijamanta kao novog reznog materijala*, 36. Jupiter konferencija, Beograd, Zbornik radova (ISBN: 978-86-1083-696-9), pp. 3.91-3.96, 11-12 maj,
- Đenadić, D., Manić, M., Tanikić, D., Ranđelović, S., 2012, *Prikaz vrsta fiksatora i metoda obrade elemenata za fiksatore u medicini*, 38. Jupiter konferencija, Beograd, Zbornik radova (ISBN: 978-86-7083-757-7), pp. 3.32-3.39, 15-16 maj,
- Hrivnjak, I., Zrnik, J., 1993, *Recent developments in advanced and novel materials*, Metalurgija 8,

Suh, S.H., Chung, D.H., Lee, B.E., Shin, S., Choi, I., Kim, K.M., 2006, Step-Compliant CNC system for turning: Data model, architecture and implementation, *Computer-Aided Design*, Vol. 38, No. 6, pp. 677-688,

Tanikić, D., Manić, M., Đenadić, D., Ranđelović, S., Milovanović, J., Đekić, P., 2012, *Metali i legure u funkciji biomaterijala*, Vojnotehnički glasnik/Military Technical Courier, Vol. 60, No. 2, pp. 202-215, Ministarstvo odbrane Republike Srbije, Beograd,

Tarnita, D., Tarnita, D.N., Bizdoaca, N., Negru, M., Copilus, C., 2008, *Modular orthopedic implants for forearm bones based on shape memory alloys*, In: /S/ Proceedings of the 19th International DAAAm Symposium, "Intelligent Manufacturing and Automation: Focus on Next Generation of Intelligent Systems and Solutions", Trnovo, 1363-1364, Slovakia 22-25 October,

Tarnita, D., Tarnita, D.N., Bizdoaca, N., Popa, D., 2009, *Modular adaptive bone plate based on intelligent materials*, In: 11th Essen Symposium on Biomaterials and Biomechanics Fundamentals and Clinical Applications, Essen, March 5-7, pp. 120-103

Tarnita, D., Tarnita, D.N., Popa, D., Grecu, D., Tarnita, D., Niculescu, D., Cismaru, F., 2010, *Numerical simulation of human tibia osteosynthesis using modular plates based on Nitinol staples*, *Romain Journal of Morphology and Embryology*, Vol. 51, pp. 145-150,

Walukas, D.M., Decker, R.F., Vinig, R.E., Carnahan, R.D., 1997, *Thixomolding® of Magnesium*, Proceedings of 1st Int. Conf. on Mg Science&Technology, Israel.

ANALYSIS AND AN OVERVIEW OF FIXATORS IN MEDICINE AND THE METHODS OF PROCESSING MATERIALS FOR PRODUCING FIXATORS

FIELD: Materials

ARTICLE TYPE: Review Paper

Summary

The fixator is a medical device that provides support to fractured biological structures. Metal biomaterials are mainly used for replacing broken or damaged hard tissues such as bones because of their high strenght, toughness and corrosion resistance. Materials such as stainless steel, titanium and aluminium alloys (Ti-6Al-4V), cobalt and chromium alloys, composite materials and other biocompatible materials are used in orthopedy for the stabilization of connective tissue injuries or as a substitute for the bone tissues. Fixators are classified according to the place of installation to external and internal fixators. Widely used medical fixators are pins, rods plates, screws, pipes, wires, nails and external fixators. Conventional and non-conventional methods of processing are used in the production process for all types of fixators.

Introduction

Fixators are medical devices manufactured to support damaged biological structures. In the field of orthopedic surgery that deals with skeletal disorders such as bone, spine, joints, muscles and tendons injuries and diseases, various metals, titanium and cobalt alloys etc. are used to stabilize the supporting tissue injuries or as a substitute for bone tissues. Metallic implants are frequently used in orthopedic surgery as joint prosthesis (hip, knee and elbow) fracture fixation devices (plates, screws, external fixators) and devices for the fixation of the spine.

In principle, fixators are divided into external and internal ones, depending on the place of installation (outside or inside the body). The most common types of medical fixators are pins, rods and plates.

This paper presents some of the most common materials used for the production of fixators, their processing and possibilities of use in medicine for various purposes.

Types of fixators and materials used for their production

Nowadays, biocompatible materials are usually used for the production of fixators and implants. These materials show good performances in contact with cells, tissues or body fluids. They are commonly used to replace or upgrade the structural components of the human body in order to compensate for damage that occurs due to aging, illness or accidents. These materials should have the following features: non-toxicity, resistance to corrosion, durability, high strength, toughness at low values of elastic modulus.

The most commonly used materials in orthopedic surgery are stainless steels (with austenitic and precipitation strengthening), cobalt-based super-alloys (e.g. cobalt-chromium alloys), titanium and its alloys and sometimes composite materials. However, titanium and its alloys are primarily used.

The implants for joint prosthesis are the tubes that are inserted into the medullary canal of the bone in order to stabilize prosthesis and parts of the joint. In total hip prosthesis, the femoral prosthesis head is usually made of cobalt-chromium alloys, while the component that replaces the femur is made of titanium alloys.

Fracture fixators include plates, screws, wire, nails and external fixators. They are made of different metal alloys, mostly of titanium alloys.

Methods of manufacturing and processing materials used for fixators in medicine

The main characteristics of the research in the field of materials used for fixators are:

- 1) New analytical techniques and modern instruments for characterization of materials (e.g. tunnel scanning microscope and synchrotron)*
- 2) Computer simulations*

3) *Recognition capabilities, visual representation and quantification of structural forms in the micro and nano world using computer modeling*

4) *The material is immediately formed in the approximately final form of the workpiece ("Net shape" and "near net shape" procedures)*

5) *Production of new materials is closely associated with the procedures that are usually called "Materials Technologies"*

Materials and parts obtained using the powder metallurgy

Modern materials are obtained by optimizing the composition and microstructure of the material to the desired properties

Classical procedures PM

Nowadays, these methods achieve equal or even better properties than those obtained by traditional methods of metal forming. Methods of powder forming today are also used in the manufacture of ceramics and metal composites.

Modern methods of the manufacturing in the nearly final shape ("net shape and near net shape technologies")

They can be classified into three categories:

1) *Consolidation methods used to achieve full density*

2) *Plasma spraying and Spray forming*

3) *Rapid Prototyping and rapid production of parts (Rapid Manufacturing)*

One of the most interesting processes to produce parts in one operation is the laser deposition process (sintering) of metal powders, layer by layer.

The best known method of forming in semi-solid state is thixomoulding.

A water jet cutting is one of the most innovative methods nowadays. The Water Jet is the process of cold processing using a jet of water, which allows to work with materials that previously could not be processed using traditional methods (or only with great difficulties).

Development of new alloys for future use

Titanium alloys, especially alloys $\alpha + \beta$ type such as Ti-6Al-4V are considered the most suitable biocompatible metallic materials due to their excellent combination of mechanical properties, corrosion resistance and biocompatibility.

The basic idea in the development of new alloys for use in medicine is to replace aluminum and vanadium with niobium, tantalum and zirconium, in order to avoid the negative features of widely used Ti-6Al-4V alloy. It is shown that the toxicity of these elements is extremely low. Some newly developed alloys are: Ti-3Al-2, 5V ($\alpha + \beta$) Ti-5Al-2, 5Fe ($\alpha + \beta$) Ti-6Al-7Nb ($\alpha + \beta$) Ti-15Mo (β) ; Ti-13Nb-13Zr (β) Ti-12Mo-6Zr-2Fe (β) Ti-45Nb (β) Ti-35Nb-7Zr-5Ta (β) Ti-55, 8Ni (intermetallic).

The alloy that shows excellent properties is Ti-13Nb-13Zr. This alloy is a β -type titanium alloy. It is characterized by low values of elastic modulus and significantly improved strength compared to the Ti-6Al-4V alloy, making it very attractive for applications in biomedical engineering.

Conclusion

Titanium and its alloys show significant advantages compared to other groups of biocompatible metallic materials used in medicine.

Most of the materials studied in this article are not produced in Serbia, except for the stainless steel and certain alloys that can be produced in the Vinca Institut and the Sartid Smederevo company. However, there are a number of plants for processing of the studied materials, such as Slovas from Cacak, Aquarez from Sremska Kamenica, etc. For example, Aquarez has CNC drives, as well as Water Jets. Similar plants can be found all around the former Yugoslavia, which is very important for manufacturing fixators and implants used in Serbia and beyond.

It is of great importance that the production and processing of these materials is accurate and clean, in order to reduce potential human disorders (e.g. poisoning) to a minimum.

Key words: alloys, processing, materials, conventions, bone, biomaterials

Datum prijema članka/Paper received on: 07. 06. 2012.

Datum dostavljanja ispravki rukopisa/Manuscript corrections submitted on: 12. 07. 2012.

Datum konačnog prihvatanja članka za objavljivanje/ Paper accepted for publishing on: 14. 07. 2012.

STRUČNI ČLANCI PROFESSIONAL PAPERS

PRIMENA COST-BENEFIT ANALIZE U VREDNOVANJU I IZBORU JAVNIH PROJEKATA (FINANSIJSKI ASPEKT)

Dragana N. Petrović, Branko N. Đedović, Nikola Č. Petrović,
Visoka poslovna škola strukovnih studija, Čačak

DOI: 10.5937/vojtehg61-1440

OBLAST: operaciona istraživanja
VRSTA ČLANKA: stručni članak

Sažetak:

Cost-benefit analiza predstavlja veoma koristan instrument za vrednovanje i izbor javnih projekata, prvenstveno onih sa životnim vekom 30 i više godina, kao što su: izgradnja bolnice, kanala za navodnjavanje, mosta, tunela, razvoj i proizvodnja novog sredstva NVO i sl. Analiza se primenjuje i u privatnom sektoru, za ocenjivanje projekata koji se, jednim delom, finansiraju iz državnih sredstava ili putem kredita. Preduzetnik ili privredno društvo ne pokazuju interesovanje ili ne raspolazu sredstvima dovoljnim za realizaciju projekata (za otvaranje škola, pozorišta i sl). Cost-benefit analiza daje informacije državnim organima i poslovnim bankama o isplativosti ulaganja, bez kojih oni ne mogu doneti odluku o finansijskoj podršci realizacije projekta.

Izbor najbolje investicione alternative ostvaruje se na bazi finansijske i ekonomske analize, kao dva integralna dela cost-benefit analize. Sadržaj ovog rada čini finansijska analiza koja istražuje finansijsku isplativost projekta isključivo sa stanovišta predlagača i finansijera. U jednom od narednih brojeva časopisa obradićemo i ekonomsku analizu, kao celovitu analizu efikasnosti projekta.

Ključne reči: cost-benefit analiza, javni projekti, investicione alternative, životni ciklus, finansijska analiza, ukupna ulaganja, poslovni troškovi i prihodi, sadašnja vrednost novca, finansijska diskontna stopa, neto sadašnja vrednost novčanog toka, finansijska održivost projekta, troškovi, investicije, procena, ekonomska analiza.

Uvod

Cost-benefit analiza predstavlja veoma koristan instrument za vrednovanje i izbor javnih projekata, kao što su: izgradnja bolnice, kanala za navodnjavanje, mosta, razvoj i proizvodnja novog sredstva NVO i sl. Analiza se primenjuje i u privatnom sektoru, za ocenjivanje projekata koji se, jednim delom, finansiraju iz državnih sredstava ili putem kredita.

Proizvodi vojne industrije takođe nemaju klasičan robni karakter, zbog čega se isplativost njihove proizvodnje ne može procenjivati isključivo iz ekonomskog aspekta. Za ocenjivanje i izbor projekata razvoja i proizvodnje određenih vrsta sredstava NVO, za koje je moguće predvideti troškove, dok je koristi nemoguće precizno utvrditi, koristi se analiza troškova i efekata, višekriterijumska analiza i sl. Drugoj grupi sredstava pripadaju sredstva kod kojih se svi očekivani efekti (u vidu koristi i troškova, uključujući i štete) mogu monetizovati. Ocena isplativosti projekata njihovog razvoja i proizvodnje, najčešće se utvrđuje primenom cost-benefit analize.

Ukupne koristi i troškove, uključujući i štete koje donose javni projekti, protežu se na sve oblasti društvenog života: privredu, životni standard, zdravlje ljudi, životnu sredinu (na lokalnom nivou, u okviru državne zajednice i regiona) itd. Zbog toga ovu analizu nije lako izvršiti. Na primer, ekonomske koristi koje učesnici u saobraćaju imaju iz realizacije projekta izgradnje auto-puta, tunela, mosta i sl., čine uštede u vremenu koje se postižu na određenoj relaciji (izbegava se putovanje kroz naseljena mesta, smanjuju se kašnjenja na poslu), ostvaruju se uštede goriva, smanjuje se broj povređenih i smrtno stradalih u prevozu itd. Ukoliko su ulaganja u javne projekte veća, a životni vek projekta duži, povećava se rizik i neizvesnost njegove realizacije, što cost-benefit analizu čini znatno složenijom. Kao takva, ona je i znatno skuplja i zahteva duže vreme za obradu, ali je bez alternative, jer obezbeđuje pokazatelje relevantne za ocenu finansijsko-ekonomske opravdanosti projekta. Analiza je potrebna svima koji kao investitori žele da doprinesu ostvarivanju određenog investicionog poduhvata: državnim institucijama, preduzećima, organizacijama u različitim oblastima netržišne proizvodnje, fondovima i dr.

Izbor najbolje opcije ostvaruje se na bazi finansijske i ekonomske analize, kao dva integralna dela cost-benefit analize. Sadržaj finansijske analize čini analiza procenjenih novčanih tokova, tj. priliva i odliva novca, koji bi mogli nastati iz godine u godinu, tokom planskog perioda (vremena realizacije nekog projekta, koje je i vreme sprovođenja analize) (Panić, 2006). Finansijska analiza podrazumeva obračunavanje i analizu:

- ukupnih ulaganja;
- poslovnih troškova i prihoda i
- finansijske održivosti.

Metode za ocenjivanje finansijske efikasnosti investicionih projekata

Statičke metode. Kao pokazatelj ekonomske efikasnosti ulaganja, iz grupe statičkih metoda, u praksi je često korišćen kriterijum roka vraćanja investicija. Primena ovog kriterijuma svodi se na utvrđivanje perioda vraćanja investicija (izraženog brojem godina) u kojem će se vratiti uložena investicijska sredstva, kao i perioda u kojem će se izjednačiti ukupna investicijska ulaganja sa sadašnjom vrednosti neto koristi od projekta (Jovanović, 2006).

Pokazatelj roka vraćanja investicija može se simbolički izraziti u vidu odnosa:

$$t = \frac{I_s}{NK_s}, \text{ pri čemu je:}$$

t – rok, tj. godina povratka investicionih ulaganja,

I_s – sadašnja vrednost ukupnih investicija (ulaganja) u projekat,

NK_s – sadašnja vrednost neto koristi (ukupnih novčanih priliva i odliva).

Da bi izračunali broj godina za povraćaj investicionih ulaganja, prethodno treba izvršiti diskontovanje troškova i koristi na sadašnju vrednost, u godini početka investicionih ulaganja. Uložene investicije u projekat vратиće se u godini u kojoj su ukupna ulaganja (od početnih, koja će biti izvršena u prvoj godini fizičke realizacije, do poslednje godine investicionog angažovanja) jednaka novčanim prilikovima. Nakon te godine, investitor može koristiti neto priliv za finansiranje potreba proširene reprodukcije. Upravo je to razlog interesovanja investitora za projekat sa najkraćim rokom vraćanja.

Projekat je prihvatljiv ukoliko je vreme povraćaja investicionih ulaganja kraće od perioda eksploatacije, zbog čega su takva ulaganja finansijski opravdana. Projekat je neprihvatljiv (finansijski neopravdan) ako je vreme povraćaja duže od perioda eksploatacije. Donja granica prihvatljivosti projekta je u uslovima kada je vreme povraćaja izjednačeno sa vekom trajanja projekta (Andrejić, i dr, 2011, pp.142-157).

Postupak izračunavanja ocene ekonomske efikasnosti projekta, na bazi kriterijuma roka vraćanja investicija, veoma je jednostavan i lak, zbog čega je ovaj kriterijum često korišćen u praksi. Pri njegovoj primeni mora se poći od nekog, unapred zadatog roka vraćanja. Na primer, to može biti ekonomski vek trajanja mašina, koje čine predmet ulaganja. Ukoliko je u pitanju više alternativnih investicionih rešenja, biće izabran projekat sa najkraćim rokom povraćaja. Ovaj kriterijum najčešće se koristi za utvrđivanje ekonomske efikasnosti kratkoročnih ulaganja, kada se treba opredeliti između više varijantnih rešenja istog projekta, za koje je broj godina povratka investicija kraći. Ukoliko je reč o dugoročnim projektima, izračunavanje ovog pokazatelja ne zasniva se na celokupnom periodu investiranja već samo na delu tog perioda, koji se smatra reprezen-

tativnim za celi eksploatacioni vek projekta. Osnovni nedostatak ovog kriterijuma je upravo u tome što ne uzima u obzir ukupne troškove i ukupne koristi u celokupnom periodu eksploatacije investicija. Kriterijum roka vraćanja investicija ne daje odgovor na pitanje da li ukupne koristi (novčano izražene) nadvisuju ukupne troškove u životnom veku projekta. Njegova slabost prvenstveno se odnosi na ocenjivanje ekonomske efikasnosti dugoročnih ulaganja. Tada, investitori ovaj kriterijum koriste u kombinaciji sa drugim kriterijumima iz grupe dinamičkih metoda.

Dinamičke metode. Zbog slabosti statičkih metoda u ocenjivanju finansijske isplativosti dugoročnih ulaganja, u praksi se često koriste dinamičke metode. Ono što statičke metode zanemaruju u svojoj primeni, dinamičke metode ispravljaju. Dinamičke metode obuhvataju ceo vek investicionog projekta (Đedović, 2010).

Iz grupe dinamičkih metoda, za ocenu finansijske isplativosti projekta najčešće se koriste dva kriterijuma: 1. neto sadašnja vrednost novčanih tokova u svim godinama eksploatacije projekta i 2. cost-benefit koeficijent (B/C ratio). Za izračunavanje ovih pokazatelja neophodno je početi od podataka o ukupnim prilivima i odlivima novca koje donosi jedan projekat. Novčani prilivi formiraju se iz sledeći stavki: a) poslovnih prihoda i b) rezidualne vrednosti. Novčani odlivi nastaju po osnovu: a) ulaganja u pribavljanje osnovnih i obrtnih sredstava i b) poslovnih troškova.

Predmet razmatranja mogao bi biti projekat u bilo kojoj oblasti materijalne (tržišne) i nematerijalne (netržišne) proizvodnje:

- u rudarstvu: projekat izgradnje rudnika,
- u poljoprivredi: projekat izgradnje kanala za navodnjavanje,
- u zdravstvu: projekat izgradnje bolnice,
- u vojnoj industriji: projekat razvoja i proizvodnje novog sredstva NVO itd.

Projekat kao predmet razmatranja, za koji su prethodno izvršene analize izvodljivosti (sa stanovišta dostupnosti infrastrukture, materijala, opreme, zaštite životne sredine i dr.) koje su potvrdile realnost i održivost za duže vreme, izrađuje se u više varijantnih rešenja. U nastavku je potrebno izvršiti analizu ekonomske isplativosti mogućih rešenja. Cost-benefit analizi podvrgavaju se sve projektne varijante koje su potvrđene kao moguće. Biće izabrana ona varijanta projekta kojom se postiže najveća razlika između koristi i troškova. U tekstu koji sledi razmatrani su prilivi i odlivi novca koje donosi jedan od mogućih projekata.

Ukupna ulaganja

Ukupna ulaganja predstavljaju izdaci (novčani odlivi iz preduzeća) nastali povodom pribavljanja:

1. osnovnih sredstava (stalne – fiksne imovine). Čine ih ulaganja u pribavljanje sredstava u:

a) materijalnom obliku: troškovi eksproprijacije zemljišta; izgradnje građevinskog objekta (proizvodne hale, upravne zgrade, skladišta sirovi-
na i dr); troškovi pribavljanja opreme (domaće i uvozne), uključujući tro-
škove montaže i dr.

Osnovna sredstva dugoročno su vezana za poslovanje (zbog njiho-
vog postepenog trošenja), a najčešće se pribavljaju u prvoj godini projek-
ta. U ostalim godinama nema naknadnih ulaganja u osnovna sredstva,
što se potvrđuje i podacima iz tabele 1. Ulaganjima u osnovna sredstva
dolazi do odliva novca iz preduzeća, pa iznosi vezani za nabavke pojedini-
h vrsta sredstava imaju negativan predznak (Malešević, 2003).

Na kraju planskog perioda, fiksna sredstva u preostalom iznosu (re-
zidualna vrednost) i dalje se mogu koristiti. Rezidualna vrednost je dis-
kontovana vrednost novčanih tokova koji mogu biti stvarani po isteku ve-
ka korišćenja projekta. Otuda je ispravno uključiti rezidualnu vrednost u
finansijsku analizu, tako što se za njenu veličinu umanjuje iznos kapitala
uloženog u fiksnu imovinu;

b) nematerijalnom obliku (start-up ulaganja). To su ulaganja, izvr-
šena u početnim godinama korišćenja projekta, u: istraživanje i razvoj,
obuku, patente, licence i sl.

2. obrtnih sredstava (obrtne – tekuće imovine). Čine ih ulaganja
u pribavljanje sredstava u:

a) materijalnom obliku. To su različite vrste zaliha: materijala za iz-
radu, nedovršene proizvodnje, gotovih proizvoda, alata, rezervnih delova,
sitnog inventara i sl.;

b) obliku prava. To su kratkoročna potraživanja, kao: potraživanja
od kupaca (po osnovu prodaje robe na kredit), od dobavljača (uplaćeni
avansi za nabavku materijala), od zaposlenih (na ime datih, a neopravda-
nih akontacija), naknada šteta i manjkova koje zaposleni treba da nadok-
nade) i dr.;

c) obliku novca. To su novčana sredstva na tekućem i deviznom
računu, novčana sredstva blagajne i dr.

Pribavljanjem obrtnih sredstava, gotovo po pravilu, nastaju tekuće
obaveze (obaveze prema dobavljačima), jer se novčana plaćanja ne izvr-
šavaju u trenutku prijema obrtnih sredstava u materijalnom obliku. U te-
kuće obaveze spadaju i obaveze prema zaposlenim (jer se isplata zara-
da ne izvršava odmah po završetku njihovog obračuna), obaveze prema
državi (za neplaćene poreze i doprinose) i sl. Tekuće obaveze treba da
budu isplaćene u roku kraćem od jedne godine. Sve dotle preduzeće će
evidentirati porast obrtnih sredstava (jer je primilo materijal), ali u tom tre-
nutku neće imati novčani odliv. Do novčanog odliva će doći kasnije, u ro-
ku kraćem od jedne godine, kada dolazi i do gašenja tekućih obaveza.
Zato stanje obrtnih sredstava, u svakoj od godina analiziranog perioda,
treba korigovati naniže, za iznos tekućih obaveza. Razlika između obrtnih

sredstava i tekućih obaveza predstavlja vrednost neto obrtnih sredstava (Stevenson, 2005). Međutim, ni taj iznos ne odražava ulaganja (novčane odlive) izvršena u obrtna sredstva u bilo kojoj analiziranoj godini. Izračunavanje ovih ulaganja može se izvršiti samo na bazi promene stanja neto obrtnih sredstava u jednoj godini u odnosu na prethodnu. Tako se promene neto obrtnih sredstava u drugoj godini planskog perioda utvrđuju iz razlike iznosa neto obrtnih sredstava u toj i prethodnoj godini ($500 - 120 = 380$, sa oznakom „minus“, jer je to iznos novčanog odliva). Primer jednostavnog pregleda ukupnih ulaganja nastalih u vezi sa jednim projektom ilustruje tabela 1.

Tabela 1
Table 1

Pregled ukupnih ulaganja (u 000 RSD)
Summary of the overall investment (in 000 RSD)

Namena ulaganja (po godinama)		Godine					
		1	2	3	4	5	6
1.	Zemljište	-1.000					
2.	Zgrade	-2.200					
3.	Oprema	-1.500		-1.000		-1.200	
4.	Kapitalno održavanje			-20			
5.	Rezidualna vrednost						40
A	Ukupna vrednost fiksne imovine (1+2+3+4-5)	-4.700	0	-1.020		-1.200	40
6.	Istraživanje i razvoj	-200					
7.	Licence	-500					
8.	Obuka zaposlenih	-150		-100			
B	Ukupni start-up troškovi (6+7+8)	-850	0	-100	0	0	0
9.	Obrtna sredstva	400	700	750	800	800	950
10.	Tekuće obaveze	280	200	280	380	300	440
11.	Neto obrtna sredstva (9-10)	120	500	470	420	500	510
C	Promene iznosa neto obrtnih sredstava	-120	-380	- 90	- 330	- 170	- 340
Ukupna ulaganja (A+B+C)		-5.670	-380	-1.210	- 330	-1.370	- 300

Poslovni troškovi i poslovni prihodi

Poslovni troškovi i poslovni prihodi jesu procenjeni troškovi, odnosno očekivani prihodi u vezi sa nekim projektom. Dok troškovi izazivaju odliv novca, prihodi dovode do priliva novca. Troškovi i prihodi čine uzročno-posledične procese koji nastaju povodom ostvarivanja proizvodnje konkretnih vrsta proizvoda (usluga) (Frame, 2002).

Poslovni troškovi ili troškovi poslovanja obuhvataju:

a) direktne troškove proizvodnje. Čine ih troškovi kao što su: troškovi materijala, zarada, proizvodnih i neproizvodnih usluga. Troškovi amortizacije su obračunski troškovi, jer ne nastaju novčani izdaci, zbog čega ne ulaze u poslovne troškove.

Preporuka je Svetske banke da se pri utvrđivanju društvenih koristi i troškova investicionog projekta određene grupe troškova i koristi uključuju ili isključuju iz analize. Transferna plaćanja (otplate glavnice i kamate na uzete kredite, porezi i subvencije) dovode do novčanog odliva, ali ne predstavljaju stvarno korišćenje resursa. Ovi izdaci ne ulaze u poslovne troškove, jer se na ovaj način vrši transfer resursa iz jednog sektora u drugi (oni se uključuju u analizu finansijske održivosti projekta);

b) troškove uprave (administracije) i

c) troškove prodaje.

Poslovni prihodi obuhvataju prihode ostvarene prodajom proizvoda (usluga) na domaćem i inostranom tržištu. Utvrđuju se kao proizvod količine prodatih proizvoda i njihovih jediničnih cena. U ove prihode ne ulaze:

– prilivi novca ostvareni po osnovu subvencija i dotacija države i

– porez na dodatu vrednost (uključen je u cenu prodatih proizvoda – usluga).

Treba naglasiti da su za projekte javnog sektora, očekivani prihodi često manji od očekivanih poslovnih troškova. Jednostavno, cene proizvoda i usluga javnog sektora najčešće su pod uticajem države. Kao takve, one su znatno niže od cena koje bi se formirale u tržišnim uslovima. I takvi projekti mogu biti realizovani, bez obzira na to što nisu finansijski isplativi.

Neto poslovni prihod izračunava se za svaku godinu analiziranog perioda i to kao razlika između poslovnih prihoda i poslovnih troškova. Pojednostavljen pregled poslovnih prihoda i troškova prikazan je u tabeli 2. Troškovi izazivaju novčane odlive, pa njihovi godišnji iznosi imaju negativan predznak „minus“, za razliku od poslovnih prihoda koji nose pozitivan predznak (Sniedovich, 2005). U zavisnosti od odnosa poslovnih prihoda i poslovnih troškova, neto poslovni prihod može imati pozitivan (ako su godišnji poslovni prihodi veći od godišnjih poslovnih troškova) ili negativan predznak (obrnuta situacija). Iz pregleda je uočljivo da tokom prve godine nema ni poslovnih troškova ni poslovnih prihoda, zbog toga što se u toj godini ostvaruju početna ulaganja, kao osnova za otpočinjanje procesa proizvodnje.

Tabela 2
Table 2

Pregled poslovnih troškova i poslovnih prihoda (u 000 din, tekuće cene)
A review of business costs and operating revenues (in 000 RSD, current prices)

Vrste poslovnih prihoda i poslovnih troškova		Godine					
		1	2	3	4	5	6
1.	Troškovi materijala	0	-800	-870	-900	-950	-1.000
2.	Troškovi zarada	0	-600	-700	-800	-850	-850
3.	Troškovi prodaje	0	-200	-360	-400	-430	-450
4.	Troškovi uprave	0	-450	-500	-520	-550	-600
A	Ukupno procenjeni poslovnji toškovi (1+2+3+4)	0	-2.050	-2.430	-2.620	-2.780	-2.900
5.	Prihodi od prodaje proizvoda	0	1.600	4.800	5.000	5.000	6.000
6.	Prihodi od aktiviranja proizvoda za sopstvene potrebe	0	300	0	520	680	0
B	Ukupno procenjeni poslovnji prihodi (5+6)	0	1.900	4.800	5.520	5.680	6.000
Ukupno procenjeni neto poslovnji prihod		0	-150	2.370	2.900	2.900	3.100

Za procenu prihvatljivosti projekta relevantne su ne samo kvantitativne vrednosti procenjenih (direktnih) troškova, koji su merljivi i izvesni, već i uticaji (indirektni troškovi) koje projekat donosi preduzeću i društvenoj zajednici. To su uticaji projekta na okruženje, uži i širi region. Oni se, na primer, mogu izraziti u vidu gubitaka koji proizlaze iz devastacije okoline (zbog izgradnje auto-puta) ili gubitaka koji bi mogli nastati usled povećanja opasnosti od različitih vrsta havarija, sve do ugrožavanja života lokalnog stanovništva i smanjenja kvaliteta zemljišta u neposrednoj okolini (zbog proširenja proizvodnje zapaljivih materija) i sl.

Kao i kod troškova, osim očekivanih (ali neizvesnih) merljivih koristi koje projekat donosi nosiocu njegove realizacije (izražene u vidu porasta prihoda i ostvarivanju dobitka), može se govoriti i o koristi društva. Realizacijom projekta mogu nastati i pozitivni uticaji – koristi po društvo, koje se mogu podeliti na neposredne i posredne koristi. Neposredne koristi treba očekivati u povećanju izvornih prihoda budžeta države: porezi i doprinosi na zarade zaposlenih, porez na dobit itd. Posredne koristi izražavaju se u mogućnosti korišćenja inovacija (nastalih tokom razvoja novog sredstva NVO), u proizvodnji klasičnih tržišnih proizvoda, u porastu izvoza NVO i smanjenju deficita trgovinskog bilansa, povećanju zaposlenosti, u porastu tražnje repromaterijala i, na toj osnovi, podsticaju razvoja ekstraktivne industrije i sl. Pri donošenju odluke o pružanju finansijske podr-

ške, državni organ može doneti odluku o finansijskoj podršci projekata koji donose i određene negativne efekte. Jer, razvoj i proizvodnja javnih dobara, pa i sredstava NVO, ne mogu se ostvariti bez određenih negativnih uticaja po društvo. Svakako, granicu prihvatljivosti mora odrediti državna administracija.

Finansijski prinos na ulaganja

U nastavku finansijske analize neophodno je uporediti podatke iz tabela 1 i 2, zbog čega je formirana tabela 3. Ako se iznos procenjenih ukupnih novčanih priliva umanjuje za ukupne novčane odlive, dobija se iznos neto novčanog toka, za svaku godinu analiziranog perioda. Prilivi se formiraju iz poslovnih prihoda, a odlivi novca nastaju po osnovu ulaganja i troškova koje projekat podrazumeva (Nikolić, Borović, 1996).

Tabela 3
Table 3

Pregled novčanih priliva i odliva (u 000 din, tekuće cene)
Summary of cash inflows and outflows (in 000 RSD, current prices)

Očekivani novčani tokovi po godinama		Godine					
		1	2	3	4	5	6
1.	Ukupni procenjeni poslovni prihodi	0	1.900	4.800	5.520	5.680	6.000
A	Ukupni procenjeni poslovni prilivi (1)	0	1.900	4.800	5.520	5.680	6.000
2.	Ukupni procenjeni poslovni troškovi	0	-2.050	-2.430	-2.620	-2.780	-2.900
3.	Ukupno procenjena ulaganja	-5.670	-380	-1.210	-330	-1.370	300
B	Ukupni procenjeni novčani odlivi (2+3)	-5.670	-2.430	-3.640	-2.950	-4.150	-3.200
Očekivan ukupan neto novčani tok (za analizirani period) (A+B)		-5.670	-530	1.160	2.570	1.530	2.800

Očekivani neto novčani tokovi, tj. saldo novčanih tokova (u celokupnom životnom veku projekta) procenjeni su prema stvarnim (tekućim) tržišnim cenama u svakoj od analiziranih godina. Nominalni iznos priliva i odliva novca menja se pod dejstvom promena tržišnih cena, s jedne, i utrošenih faktora proizvodnje i obima prodaje, s druge strane. Ukoliko su novčani prilivi (prihodi) veći od odliva (ulaganja i troškovi), neto novčani

tok ima pozitivan predznak (donosi koristi), a u suprotnom negativan predznak (izaziva štete). Procenjuje se da će u prve dve godine biti ostvaren negativan, a u preostalom periodu pozitivan neto novčani tok. Na osnovu zbira neto novčanih tokova u celokupnom analiziranom periodu ($- 5.670.000 - 530.000 + 1.160.000 + 2.570.000 + 1.530.000 + 2.800.000 = 1.860.000$ dinara), mogli bi zaključiti da ukupne koristi (+ 8.060.000 dinara) nadmašuju ukupne štete (- 6.200.000 dinara). Međutim, to ne mora biti tačno, zbog toga što se novčani tok u jednoj godini ne može upoređivati niti sabirati sa novčanim tokom u bilo kojoj narednoj godini, ukoliko se prethodno ne izvrše potrebna preračunavanja. Potrebno je sve novčane tokove izraziti u novčane jedinice jednake vrednosti. Utvrđeni troškovi i koristi za svaku godinu projekta moraju se svesti na zajedničku jedinicu mere, kako bi se mogle upoređivati alternative. Svi troškovi i koristi svode se na sadašnje vrednosti, služeći se tehnikom diskontovanja (Đedović, Nadoveza, 2008). Na bazi razlike utvrđujemo neto sadašnju vrednost budućih troškova i koristi. Koristeći podatke iz tabele 3, najpre ćemo razmotriti problem vremenske vrednosti novca, a zatim pristupiti izračunavanju **finansijske neto sadašnje vrednosti na ulaganja**, kao osnovnog pokazatelja prinosa ostvarenog na uloženi kapital. Pre nego objasnimo postupak izračunavanja ovog finansijskog indikatora, razmotrićemo problem vremenske vrednosti novca.

Vremenska vrednost novca

Donošenje odluke o realizaciji nekog projekta (što čini investitor) zasniva se na proceni budućih finansijskih rezultata i oceni isplativosti ulaganja. Ključno pitanje je kolika je sadašnja vrednost prinosa kojima će investitor raspolagati na kraju svake godine. Stopa (obeležena oznakom „i”) po kojoj se buduća vrednost novca svodi na sadašnju, naziva se **finansijska diskontna stopa**. Kao mera propuštenog prinosa na dugoročna ulaganja, diskontna stopa je istovremeno minimalna stopa prinosa prihvatljiva za investitora, ispod koje se ne isplati ulagati u bilo koji projekat. Ova stopa prinosa mora biti najmanje u visini kamatne stope na neoročenu štednju. Projekat čija je stopa prinosa niža od kamatne stope (diskontne stope) ne predstavlja unosnu alternativu ulaganja (Čupić, 2009).

Sam postupak izračunavanja sadašnje vrednosti novčanog toka u bilo kojoj narednog godini naziva se **diskontovanje**. Tako se sadašnja vrednost nekog iznosa novca u n-toj godini može izračunati putem jednačine:

$$\text{Sadašnja vrednost novca} = \frac{\text{Budućnost novca}}{(1+i)^n}$$

i – izabrana diskontna stopa;

n – godina u kojoj se utvrđuje sadašnja vrednost novca;

$(1+i)^n$ – vrednost koju 1 dinar, sada uložen, ima na kraju neke godine, uz kamatnu stopu „i“: na kraju prve godine 1 dinar vredeće $1+i$; na kraju druge godine vredeće $(1+i)^2$ itd.

Postupkom diskontovanja očekivani novčani tok iz bilo koje naredne godine svodi se na novčane jedinice prve godine (godine početka investiranja), odnosno na novčane jedinice iste vrednosti. Svođenje očekivanog (budućeg) novčanog toka na sadašnju vrednost od bitnog je značaja, jer od toga zavisi i konačna odluka o projektu. Izboru diskontne (kamatne) stope pridaje se velika važnost, jer se na sadašnju vrednost (po toj stopi) svode prihodi i koristi, odnosno troškovi i gubici. Istovremeno, diskontna stopa je oportunitetni trošak, tj. poželjna stopa povratka za investitora. Izbor njene visine zavisi od vrste projekta (koji je predmet analize) i sektora ulaganja, stanja na tržištu kapitala, visine kamatne stope, razvojne i spoljnotrgovinske politike zemlje itd.

Na osnovu tabele 3 ulagač zna koliki su (proračunati) budući prihodi, a, naspram njih, koliki su troškovi i ulaganja, odnosno da li se može očekivati pozitivan ili negativan novčani tok na kraju svake godine. Ipak, njemu je u interesu da svaki od tih tokova bude ostvaren što ranije, da bi imao nova ulaganja. On zato želi da sazna koliko budući novčani tokovi (od realizacije projekta) vrede danas.

U situaciji kada su očekivani neto novčani tokovi obračunati prema tekućim cenama (kao u našem slučaju), svođenje nominalnih novčanih tokova na njihovu sadašnju vrednost može se izvršiti procesom diskontovanja.

Nakon identifikovanja vrste troškova i koristi, potrebno ih je vrednosno utvrditi, tj. izraziti u novčanom obliku (Raković, 2007). Neophodno je izabrati odgovarajući sistem cena, na osnovu kojeg će se izvršiti merenje direktnih i indirektnih efekata koje donosi projekat. To mogu biti:

- tržišne cene,
- obračunske cene ili
- stalne cene (najčešće su to cene koje važe u godini inicijalnog ulaganja).

Cost-benefit analiza najčešće koristi korigovane tržišne cene koje se obično zovu obračunske cene ili cene u senci (shadow prices). Ovim cenama ispravljaju se nepravilnosti u formiranju tržišnih cena, uzrokovane nesavršenošću tržišta (postojanje monopola, dejstvo mera ekonomske politike itd). Pri određivanju obračunskih cena osnovno je pitanje da li su dobra razmenljiva ili nerazmenljiva.

Diskontovanje (preračunavanje) očekivanih novčanih tokova na kraju svake godine analiziranog perioda, na novčane jedinice godine u kojoj je ostvareno inicijalno ulaganje, izvršićemo primenom diskontne stope od 4% (Ekonomiska komisija EU je za potrebe finansijske analize preporučila upotrebu diskontne stope od 5% za period 2007–2013. god) tabela 4:

Tabela 4
Table 4

Diskontovanje novčanih tokova (u 000 din, tekuće cene)
Discounting of cash flows (in 000 RSD, current prices)

Godine	Očekivani nominalni neto novčani tokovi	Izraz $(1+r)^n$	Sadašnja vrednost neto novčanih tokova
1.	- 5.670	$(1+0,04)^0=1,00000$	-5.670
2.	-530	$(1+0,04)^1=1,04000$	-510
3.	1.160	$(1+0,04)^2=1,08160$	1.072,48
4.	2.570	$(1+0,04)^3=1,12486$	2.284,73
5.	1.530	$(1+0,04)^4=1,16985$	1.307,86
6.	2.800	$(1+0,04)^5=1,21665$	2.301,40
Neto novčani tok (za analizirani period)	1.860	Sadašnja vrednost neto novčanog toka (za analizirani period)	786,47

Nakon uvažavanja vremenske vrednosti novca, primenom diskontne stope od 4%, možemo pouzdano zaključiti da li je ulaganje u projekat finansijski isplativo. Ako bi se desilo da je neto sadašnja vrednost (za celokupan analizirani period) negativna, ulaganje u projekat ne bi bilo isplativo, jer bi, za veličinu tog iznosa, gubici bili veći od koristi.

Ako bi se desilo da je neto sadašnja vrednost (za celokupan analizirani period) negativna, ulaganje u projekat ne bi bilo isplativo, jer bi, za veličinu tog iznosa, gubici bili veći od koristi (Jovanović, Langović, 2003). U našem slučaju, ulaganje u projekat je isplativo, jer donosi više koristi od troškova (za 786.470 dinara). Ovaj zaključak se znatno razlikuje od zaključka na osnovu tabele 3, kada je nekorigovani neto novčani tok u celokupnom planskom periodu procenjen u iznosu od 1.860.000 dinara. Odnosno, iznos od 786.470 dinara danas vredi isto koliko i iznos od 1.860.000 dinara, na kraju analiziranog perioda. Može se desiti da ukupan neto novčani tok bude procenjen u minimalnom pozitivnom iznosu (npr. 50.000 dinara), a da preračunata neto sadašnja vrednost novčanog toka ima negativan predznak (npr. -180.000 dinara). Ako bi se zadovoljili samo prvim podatkom i izabrali taj projekat, doneli bismo pogrešnu odluku. Ovo ulaganje je finansijski neracionalno, jer je negativna ukupna neto sadašnja vrednost novčanog toka. Upravo u tome je značaj procesa diskontovanja, tj. svođenja neto budućeg iznosa novčanog toka na sadašnji iznos.

Indikatori finansijske isplativosti projekta

Odgovor na pitanje da li se iz procenjenih poslovnih prihoda mogu pokriti procenjeni ukupni troškovi, uključujući i ulaganja (tabela 3), dobija se izračunavanjem određenih pokazatelja finansijske isplativosti (finansijskog prinosa) projekta. Najčešće korišćen pokazatelj je neto sadašnja vrednost novčanog toka (finansijska) – $NSVNT_{(n)}$. Oznaka „f“ data je da bi označila da je reč o pokazatelju finansijske analize. Pokazatelj pod istim nazivom koristi se i u okviru ekonomske (društvene) analize, s tom razlikom što u indeksu nosi oznaku „e“ (sledi razmatranje i ovog pokazatelja) (Hilton, Maher, Selto, 2003).

Pokazatelj $NSVNT_{(n)}$ utvrđuje se na bazi sadašnje vrednosti novčanih tokova u svim godinama planskog perioda. Sadašnja vrednost formira se na bazi aktuelnih tržišno formiranih i administrativno regulisanih cena, nezavisno od toga što one mogu biti iskrivljene (kao odraz ukupnog stanja u nacionalnoj ekonomiji). $NSVNT_{(n)}$ značajna je za investitora (predlagača projekta), zbog čega je i prirodno da njega interesuje pokazatelj finansijske isplativosti, koji respektuje tekuće cene, ma kako one bile formirane:

$$NSVNT_{(n)} = SVNT_0 + SVNT_1 + SVNT_2 + \dots + SVNT_n$$

gde je:

$SVNT_{0-n}$ – novčani tokovi od godine ulaganja, označene oznakom „o“, do „n“ godina eksploatacije projekta.

U 1. i 2. godini (tabela 4) bila bi ostvarena negativna neto sadašnja vrednost $(-5.670.000 - 510.000 = -6.180.000 \text{ din})$, a u ostalim godinama analiziranog perioda ulaganje bi donelo pozitivnu neto sadašnju vrednost novčanog toka $(1.072.480 + 2.284.730 + 1.307.860 + 2.301.400 = 6.696.470 \text{ dinara})$. Analizirano ulaganje donosi ukupnu pozitivnu neto sadašnju vrednost novčanog toka u iznosu od 786.470 dinara. Ovo ulaganje je finansijski (za investitora i finansijere) isplativo, a bilo bi izabrano ukoliko je to jedino ulaganje. Ako je predmet analize više alternativnih ulaganja, izbor će pasti na projekat čija je $NSVNT_{(n)}$ najveća.

Finansijska održivost projekta

Za svaki projekat je bitno da se obezbedi finansijska održivost, odnosno da postoji usklađenost između očekivanih novčanih priliva (uključujući finansijske izvore) i odliva (uključujući kreditne obaveze), i to u svakoj pojedinačno posmatranoj godini analiziranog perioda. Novčani prilivi nastaju po osnovu poslovnih prihoda i finansijskih izvora. Dotle, novčani odlivi obuhvataju: ulaganja

u stalnu imovinu (zgrade, zemljište, opremu, održavanje opreme i sl.), poslovne troškove i kreditne obaveze (otplate glavnice i kamate).

Projekat je finansijski održiv ako u bilo kojoj godini neto novčani tok (razlika novčanih priliva i odliva) bude pozitivan. Tada je i kumulativni neto novčani tok takođe pozitivan. Ukoliko taj uslov nije ispunjen, projekat postaje finansijski neodrživ, jer se njegova realizacija dovodi u pitanje, u godini kada su odlivi veći od priliva novca (Petrović, 1993).

Kumulativni novčani tok u bilo kojoj godini predstavlja zbir kumulativnog novčanog toka prethodne godine i neto novčanog toka u godini izračunavanja. Samo u prvoj godini projekta kumulativni i neto novčani tok imaju jednaku vrednost. Može se desiti i da u nekoj godini neto novčani tok bude negativan. Finansijska održivost projekta se ni tada ne dovodi u pitanje, ukoliko u toj godini kumulativni novčani tok bude pozitivan.

Tabela 5

Table 5

Finansijska održivost (u 000 din, tekuće cene)
Financial sustainability (in 000 RSD, current prices)

Novčani troškovi		Godine					
		1	2	3	4	5	6
1.	Ukupni finansijski izvori	10.000	2.300	0	1.300	0	0
2.	Ukupni poslovni prihodi	0	1.900	4.800	5.520	5.680	6.000
A	Ukupni novčani prilivi (1+2)	10.000	4.200	4.800	6.820	5.680	6.000
3.	Ukupni poslovni troškovi	0	-2.050	-2.430	-2.620	-2.780	-2.900
4.	Ukupna ulaganja	-5.670	-380	-1.210	-330	-1.370	-300
5.	Kamata	0	0	-5	-5	-5	-5
6.	Otplata glavnice duga	0	0	-30	-30	-30	-30
7.	Porezi	0	-200	-400	-480	-500	-550
B	Ukupni novčani odlivi (3+4+5+6+7)	-5.670	-2.630	-4.075	-3.465	-4.685	-3.785
	Neto novčani tok (A-B)	4.330	1.570	725	3.355	995	2.215
	Kumulativni novčani tok	4.330	5.900	6.625	9.980	10.975	13.190

Zaključak

Cost-benefit analizu treba koristiti samo u slučajevima gde nije jednostavno kvantitativno utvrditi ekonomske koristi za ulagače. Koriste je finansijske institucije pri donošenju odluke o pružanju finansijske podrške u realizaciji nekog preduzetničkog ili javnog projekta. To su projekti za koje se očekivani prihodi i koristi, kao i troškovi i gubici predloženih alternativa, moraju proceniti za svaku godinu projekta, u periodu njegovog životnog veka od 30, pa i više godina.

Cost-benefit analiza postaje kriterijum vrednovanja investiranja, jer, osim finansijskih institucija, daje informacije javnim preduzećima i organima državne i lokalne administracije, potrebne za donošenje odluka kojima se obezbeđuje racionalno korišćenje ograničenih društvenih resursa. Administracija će koristiti ovu analizu i za ocenu prihvatljivosti investicionog projekta čiji su predlagači u privatnom sektoru. Preduzetnik ili privredno društvo ne pokazuju interesovanje ili ne raspolažu sredstvima dovoljnim za realizaciju projekata (za otvaranje škola, pozorišta i sl). Finansijskom podrškom države mogu se podstaći takvi zahvati značajni za društvo. Pri proceni ovih projekata jedan isti investicioni projekat može biti prihvatljiv za preduzeće (jer mu donosi značajan porast prihoda), ali za društvo može biti negativno ocenjen (npr. zbog zagađenja vazduha). U tim uslovima, cost-benefit analiza će poslužiti kao osnova za donošenje odluke o realizaciji nekog projekta.

Literatura

- Andrejić, M., Đorović, B., Pamučar, D., 2011, *Upravljanje projektima po pristupu projekt menadžmenta*, Vojnotehnički glasnik/Military Technical Courier, vol. 59, br. 2, pp. 142-157,
- Čupić, M., 2009, *Cost – benefit analiza*, Business Start – up centre, Kragujevac.
- Đedović, B., 2010, *Vođenje i vrednovanje projekata*, Fakultet za menadžment malih i srednjih preduzeća, Beograd.
- Đedović, B., Nadoveza, B., 2008, *Kvantitativne metode u menadžmentu*, Fakultet za MSP, Beograd.
- Frame, J., 2002, *The New Project Management*, Second edition, Jossey – Bass, San Francisco.
- Hilton, R., Maher, M., Selto, F., 2003, *Cost Management: Strategies for Business Decisions*, McGraw – Hill, New York.
- Jovanović, P., 2006, *Upravljanje projektom*, FON, Beograd.
- Jovanović, M., Langović, A., 2003, *Upravljanje projektom*, Megatrend Univerzitet primenjenih nauka, Beograd.
- Malešević, E., 2003, *Upravljanje investicijama*, Građevinski fakultet, Subotica.
- Nikolić, I., Borović, S., 1996, *Višekriterijumska optimizacija*, Beograd.
- Panić, P., 2006, *Investicije, ocena i upravljanje projektima*, Fakultet spoljne trgovine, Bijeljina.
- Petrović, N., 1993, *Analiza „troškovi – rezultati“ u izboru projekata tehničke modernizacije*, Novi glasnik, br. 4-5.
- Raković, R., 2007, *Kvalitet u upravljanju projektima*, Građevinska knjiga, Beograd.
- Sniedovich, M., 2005, *Towards an AoA – Free Courseware for Critical Path Method*, The University of Melbourne, Australia.
- Stevenson, W., 2005, *Operations Management*, McGraw – Hill, New York.

APPLICATION OF THE COST BENEFIT ANALYSIS IN THE EVALUATION AND SELECTION OF PUBLIC PROJECTS (FINANCIAL ASPECT)

FIELD: Operational Research
ARTICLE TYPE: Professional Paper

Summary

The cost-benefit analysis is a very useful tool for the evaluation and selection of public projects, especially those with a life expectancy of 30 or more years, such as: building hospitals, irrigation canals, bridges, tunnels, development and production of new funds and new weapons and military equipment (WME), etc. The analysis can also be applied in the private sector for the evaluation of projects which are in one part financed by state funds or through loans when entrepreneurs or companies do not show interest or do not have sufficient funds for the realization of projects (for opening schools, theaters, etc). The cost-benefit analysis provides information for government agencies and commercial banks about the profitability of investments, without which they cannot make a decision of financial support for the project realization.

The selection of the best investment alternatives is realized on the basis of financial and economic analyses as two integral parts of the cost-benefit analysis. The content of this paper is the financial analysis that examines the financial viability of the project only from the standpoint of the sponsor and financier. In one of the next issues of the journal, we will also process the economic analysis as well as a complete analysis of the effectiveness of the project.

Introduction

In the introduction, the paper explained the position that the use of the cost-benefit analysis is possible only if the total costs and benefits can be monetized. It is a comprehensive, very complex and expensive analysis, without an alternative because it provides indicators relevant to the assessment of the social feasibility of the project.

Methods for evaluating the financial efficiency of investment projects

The content of the financial analysis discussed here is the analysis of the estimated outflow and the expected cash flow, for the various reasons during the time of realization of one of more alternative projects. Two methods are considered for evaluating the financial efficiency of an investment: 1. static methods, with an emphasis on the essence and the weakness of the application of the criterion of investment return time, and 2. dynamic methods that are indispensable for determining the viability of long-term projects. From the group of dynamic methods, two criteria are commonly used: a) the

Petrović, N. i dr., Primena cost-benefit analize u vrednovanju i izboru javnih projekata (finansijski aspekt), pp. 140–158

net present value of cash flows in all years of investment and b) cost-benefit ratio (C/B) ratio). The calculation of these indicators is achieved on the basis of data on inflow and outflow of money, which is envisaged in all years of exploitation of a project.

The total investment

The total investment which leads to an outflow of money is analysed. Therefore, the monetary amount related to the procurement of certain types of fixed and current assets has a negative sign (Table 1)

Operating expenses and operating income

Business expenses (cash outflows) and operating income (cash flows) that can be expected in connection with a project are analysed here. From their differences in each year of the analysed period, the net operating income is calculated (Table 2)

Financial return on investment

If the total amount of estimated cash flows is reduced by the total cash outflows, a total amount of net cash flow for each year of the project life cycle will be obtained. In some years, positive cash flow will be achieved and in some years negative.. Their sum would not be sufficient to determine the financial viability, because the cash flow in one year cannot be added to the cash flow of the next year. All cash flows or costs and benefits should be reduced to present values using the method of discounting. A financial net present value can be then calculated (Table 4). The rate at which the future value of money comes down to the present is called a financial discount rate.

For each project, it is essential to ensure its financial viability. The project is financially viable if the cumulative net cash flow is positive in any given year (Table 5).

Conclusion

It is pointed out that the cost-benefit analysis should be used only in cases where it is not easy to quantitatively determine the economic benefits to investors. The cost-benefit analysis becomes a criterion for evaluating investment because it provides information for state and local administration and commercial banks for making a decision of financial support in the implementation of an entrepreneurial project or a public project.

Key words: cost-benefit analysis, public projects, investment alternatives, life cycle, financial analysis, total investment, operating costs and revenues, present value of money, financial discount rate, net present value of cash flow, financial viability of the project, costs, investment, evaluation, economic analysis.

PRIMENA COST-BENEFIT ANALIZE U VREDNOVANJU I IZBORU JAVNIH PROJEKATA (FINANSIJSKI ASPEKT)

Rezime:

Cost-benefit analiza predstavlja veoma koristan instrument za vrednovanje i izbor javnih projekata, prvenstveno onih sa životnim vekom 30 i više godina, kao što su: izgradnja bolnice, kanala za navodnjavanje, mosta, tunela, razvoj i proizvodnja novog sredstva naoružanja i vojne opreme (NVO) i sl. Analiza se primenjuje i u privatnom sektoru, za ocenjivanje projekata koji se, jednim delom, finansiraju iz državnih sredstava ili putem kredita. Preduzetnik ili privredno društvo ne pokazuje interesovanje ili ne raspolaze sredstvima dovoljnim za realizaciju projekata (za otvaranje škole, pozorišta i sl). Cost-benefit analiza daje informacije državnim organima i poslovnim bankama o isplativosti ulaganja, bez kojih oni ne mogu doneti odluku o finansijskoj podršci realizacije projekta.

Izbor najbolje investicione alternative ostvaruje se na bazi finansijske i ekonomske analize, kao dva integralna dela cost-benefit analize. Sadržaj ovog rada čini finansijska analiza koja istražuje finansijsku isplativost projekta, isključivo sa stanovišta predlagača i finansijera. U jednom od narednih brojeva časopisa obradimo i ekonomsku analizu, kao celovitu analizu efikasnosti projekta.

Uvod

U uvodnom delu rada obrazložen je stav da je primena cost-benefit analize moguća samo ukoliko se ukupni troškovi i koristi mogu monetizovati. To je sveobuhvatna, veoma složena i skupa analiza, ali je bez alternative, jer obezbeđuje pokazatelje relevantne za ocenu društvene opravdanosti projekta.

Metode za ocenjivanje finansijske efikasnosti investicionih projekata

Finansijska analiza je predmet razmatranja ovog pitanja. Sadržaj ove analize čini analiza procenjenog odliva i očekivanog priliva novca, po raznim osnovama tokom vremena realizacije jednog od više alternativnih projekata. Razmotrene su dve metode za ocenjivanje finansijske efikasnosti ulaganja: 1. statičke metode, u okviru kojih je ukazano na suštinu i slabosti primene kriterijuma roka vraćanja investicija i 2. dinamičke metode koje su nezamenljive za utvrđivanje isplativosti dugoročnih projekata. Iz grupe dinamičkih metoda najčešće se koriste dva kriterijuma: a) neto sadašnja vrednost novčanih tokova u svim godinama ulaganja i b) cost-benefit koeficijent (C/B racio). Izračunavanje ovih pokazatelja ostvaruje se na osnovu podataka o prilivu i odlivu novca, koji se predviđaju u svim godinama eksploatacije jednog projekta.

Ukupna ulaganja

U okviru ovog pitanja predmet analize čine ukupna ulaganja, koja dovode do odliva novca. Zbog toga, novčani iznosi vezani za nabavke pojedinih vrsta osnovnih i obrtnih sredstava imaju negativan predznak (tabela 1).

Poslovni troškovi i poslovni prihodi

Ovde su analizirani poslovni troškovi (odlivi novca) i poslovni prihodi (prilivi novca) koji se mogu očekivati u vezi sa nekim projektom. Iz njihove razlike u svakoj godini analiziranog perioda izračunava se neto poslovni prihod (tabela 2).

Finansijski prinos na ulaganja

Ako se iznos procenjenih ukupnih novčanih priliva umanjuje za ukupne novčane odlive, dobija se iznos neto novčanog toka, za svaku godinu životnog veka projekta (tabela 3). U nekim godinama biće ostvaren pozitivan, a u nekim negativan neto novčani tok. Na osnovu njihovog zbira ne bi se mogla utvrditi finansijska isplativost projekta, jer se novčani tok u jednoj godini ne može sabirati sa novčanim tokom u narednoj godini. Sve novčane tokove, odnosno koristi i troškove, treba svesti na sadašnje vrednosti, služeći se metodom diskontovanja. Na toj osnovi može se pristupiti izračunavanju finansijske neto sadašnje vrednosti (tabela 4). Stopa po kojoj se buduća vrednost novca svodi na sadašnju naziva se finansijska diskontna stopa.

Za svaki projekat bitno je da se obezbedi njegova finansijska održivost. Projekat je finansijski održiv ukoliko je u bilo kojoj godini kumulativni neto novčani tok pozitivan (tabela 5).

Zaključak

Na kraju rada data su zaključna razmatranja. Naglašeno je da cost-benefit analizu treba koristiti samo u slučajevima gde nije jednostavno kvantitativno utvrditi ekonomske koristi za ulagače. Cost-benefit analiza postaje kriterijum vrednovanja investiranja, jer daje informacije organima državne i lokalne administracije i poslovnim bankama, potrebne za donošenje odluke o pružanju finansijske podrške u realizaciji nekog preduzetničkog ili javnog projekta.

Ključne reči: cost-benefit analiza, javni projekti, investicione alternative, životni ciklus, finansijska analiza, ukupna ulaganja, poslovni troškovi i prihodi, sadašnja vrednost novca, finansijska diskontna stopa, neto sadašnja vrednost novčanog toka, finansijska održivost projekta.

Datum prijema članka/Paper received on: 31. 01. 2012.

Datum dostavljanja ispravki rukopisa/Manuscript corrections submitted on:

18. 10. 2012.

Datum konačnog prihvatanja članka za objavljivanje/ Paper accepted for publishing on: 20. 10. 2012.

ANALIZA RADA SISTEMA ODRŽAVANJA PRIMENOM TEORIJE MASOVNOG OPSLUŽIVANJA

Veljko P. Petrović, Ministarstvo odbrane
Uprava za odbrambene tehnologije SMR, Beograd
Veselin L. Mrdak, Vojska Srbije,
Tehnički opitni centar, Beograd
Branka R. Luković, Ministarstvo odbrane,
Uprava za odbrambene tehnologije SMR, Beograd

DOI: 10.5937/vojtehg61-2001

OBLAST: matematika (teorija masovnog opsluživanja)
VRSTA ČLANKA: stručni članak

Sažetak:

U radu je izvršena analiza mogućih modela i uslova za primenu Teorije masovnog opsluživanja radi sagledavanja odnosa između klijenata koji traže opslugu i kanala koji ih opslužuju, kao i dimenzioniranja tehnoloških elemenata u optimalnom režimu za posmatrani sistem održavanja. Na osnovu stvarnih prikupljenih podataka i statističke analize intenziteta dolazaka i opsluživanja borbenih vozila u radionici za tehničko održavanje, izvršeno je matematičko modelovanje realnih procesa opsluživanja i kvantifikovanje pojedinih parametara rada sistema održavanja radi utvrđivanja slabosti postojećih modela i potrebnih korektivnih akcija.

Ključne reči: sistem masovnog opsluživanja, tehnološki zahtev, tehnološki element, opsluživanje, održavanje.

Uvod

Razvoj nauke, tehnike, ekonomije i vojnih nauka uslovljava projektovanje složenih sistema i primenu automatizacije u svim oblastima ljudske delatnosti. Život u savremenom industrijskom društvu praćen je stalnim rastom industrijske proizvodnje, stanovništva i potrošnje i proizvodi neminovno svakodnevno čekanje u redu da bi se obavila neka aktivnost ili primila usluga, što je uticalo na formiranje teorije masovnog opsluživanja (Ilić, Andrejić, 2011, pp.93-115).

Jedan od aktuelnih logističkih problema gde se može razmotriti mogućnost primene matematičkog modelovanja Teorije masovnog opsluživanja jeste optimizacija postojećeg sistema održavanja. Optimizacija pomenutog sistema sa aspekta ekonomičnosti i efikasnosti, a uz upotrebu

savremenih tehnika, metoda, softvera i opreme (Andrejić, 2001, pp.36-52) trebalo bi da se odvija na sledeći način:

- efikasno opsluživanje klijenata i dobijanje pouzdanih podataka o parametrima stanja posmatranog sistema održavanja;
- smanjenje broja radionica za tehničko održavanje;
- optimizacija broja lica potrebnih za opsluživanje klijenata;
- centralizovano i automatizovano praćenje parametara stanja sistema održavanja, uz primenu kvalitetnog informacionog sistema (Andrejić, et al, 2010, pp.33-61) za upravljanje i nadzor.

Rešavanjem mnogih praktičnih problema u okviru procesa održavanja, tehnološki zahtevi (TZ) za održavanje pojavljuju se sa karakteristikama koje imaju obeležja stohastičnosti i stacionarnosti. Ova obeležja pružaju mogućnost da se pod određenim uslovima koristi Teorija masovnog opsluživanja (TMO) radi dimenzioniranja tehnoloških elemenata (TE) u posmatranom sistemu održavanja.

Sama analiza sistema masovnog opsluživanja (SMO) podrazumeva analizu ulaznog toka klijenata, vremena čekanja i broja klijenata u redu, vremena opsluživanja, kao i izlaznog toka klijenata.

Prost tok ima poseban značaj u teoriji masovnog opsluživanja, jer su, u praksi (Vukadinović, 1988), ulazni potoci klijenata često prosti, ali i zato što se pri zameni potoka proizvoljne strukture prostim tokom dobijaju zadovoljavajući rezultati.

Prost tok događaja je Poasonov (*Poisson*) tok događaja koji poseduje osobinu stacionarnosti, tj. tok događaja koji poseduje osobine ordinarnosti, odsustva posledica i stacionarnosti.

Mnogi proračuni izvedeni pri rešavanju različitih zadataka TMO ukazuju na to da se u najvećem broju slučajeva mogu dobiti zadovoljavajuća rešenja ako se pretpostavi da su potoci klijenata Poasonovi.

Kod Poasonovog potoka broj događaja X , koji se realizuju na proizvoljnom intervalu $(t, t + \tau)$ ima Poasonovu raspodelu:

$$P_{t,\tau}(X = m) = \frac{[a(t, \tau)]^m}{m!} e^{-a(t, \tau)} \quad (1)$$

gde je $a(t, T)$ srednji broj događaja za vreme T .

Vreme opsluge predstavlja osnovnu karakteristiku rada svakog pojedinog kanala opsluživanja u odnosu na klijenta koga opslužuje.

Niz slučajeva iz realnih projekata pokazuje da vreme opsluge može biti različito i u situacijama kada identične zahteve opslužuje jedan isti radnik. Prema tome, u većini slučajeva vreme opsluživanja (T) je slučajna promenljiva čija je potpuna karakteristika opisana funkcijom raspodele:

$$F(t) = P(T < t), \quad t \geq 0 \quad (2)$$

Bez detaljnog proučavanja funkcionisanja kanala prilikom opsluživanja određenog klijenta ne može se unapred tvrditi kakav konkretni oblik ima funkcija raspodele $F(t)$. Generalno, vreme opsluživanja različitih kanala u posmatranom sistemu opsluživanja može se okarakterisati različitim funkcijama raspodele verovatnoća.

U teorijskim razmatranjima i mnogim praktičnim proračunima analiziraju se slučajevi gde se vreme opsluživanja podvrgava eksponencijalnoj raspodeli verovatnoća, definisanoj funkcijom i gustom raspodele sledećeg oblika:

$$F(t) = 1 - e^{-\mu t}, f(t) = \mu e^{-\mu t}, t \geq 0 \quad (3)$$

pri čemu parametar μ predstavlja intenzitet opsluživanja (u našim razmatranjima intenzitet održavanja) i ima jednostavan fizički smisao: recipročna vrednost veličine μ jednaka je srednjem vremenu opsluživanja (matematičko očekivanje vremena opsluživanja):

$$M(t) = \int_0^{\infty} t \cdot dF(t) = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \frac{1}{\mu} \quad (4)$$

Praktična razmatranja su pokazala da ova raspodela dobro opisuje slučajeve u kojima se veći broj klijenata opslužuje za kraće vreme, a manji je broj onih klijenata koje treba duže opsluživati.

Pored navedenog, praksa je takođe pokazala da se vreme opsluge može često opisati Erlangovom raspodelom, čije su gustina, matematičko očekivanje i disperzija sukcesivno:

$$f(t) = \frac{(\mu k)^k}{(k-1)!} \cdot t^{k-1} \cdot e^{-\mu k t}, t \geq 0, M(t) = \frac{k}{\mu}, D(T) = \frac{1}{k\mu^2} \quad (5)$$

gde je k broj događaja.

Kako propusna moć i druge karakteristike procesa opsluživanja relativno malo zavise od oblika zakona raspodele vremena opsluživanja, već uglavnom od njegove srednje vrednosti, u TMO se, posebno zbog jednostavnosti primene u modelima, najčešće koristi eksponencijalni zakon vremena opsluge klijenata.

Matematički modeli SMO primenljivi na proces održavanja

Postoji veliki broj matematičkih modela razvijenih u okviru TMO za analiziranje odnosa između klijenata koji traže opslugu i kanala koji ih opslužuju. U matematičkim modelima masovnog opsluživanja uobičajeno je da se kao ulazi koriste sledeći parametri:

- λ – intenzitet ulaznog potoka,

- μ – intenzitet opsluge od strane TE,
- n – broj kanala, tj. TE,

a kao izlazi:

- P_{ops} – verovatnoća opsluge TZ,
- k_r – srednji broj TZ u redu za opslugu,
- t_r – srednje vreme boravka TZ u redu.

U praksi, prilikom dimenzioniranja sistema, najčešće se traži broj kanala, tj. TE (n) potrebnih za opsluživanje TZ, a u pojedinim situacijama intenziteti λ i μ . Shodno tome, sve relevantne veličine mogu se pojaviti i kao ulazi i kao izlazi, što je uslovljeno konkretnom situacijom. Činjenica koja mora biti prisutna prilikom razrade modela je da broj veličina koje su nepoznate (izlazi) ne bude veći od relacija koje teorija masovnog opsluživanja može omogućiti. U tabelarnom prikazu dat je pregled osnovnih karakteristika SMO i njihovo ponašanje u zavisnosti od funkcije u sistemu koja se analizira.

Pregled osnovnih karakteristika SMO

Tabela 1

Review of the MSS key characteristics

Table 1

Karakteristike SMO	Ulaz	Izlaz
λ - intenzitet ulaznog potoka (TZ/jedinici vremena)	intenzitet ulaznog potoka TZ koji ulaze u sistem opsluge	intenzitet ulaznog potoka koji SMO može da „izdrži”
μ – intenzitet opsluge od strane TE (TZ/jedinici vremena)	intenzitet opsluge jednog kanala (produktivnost TE)	potrebna proizvodnost TE (μ)
IS – interval strpljivosti TZ na početku opsluge	vremenski interval u kojem klijent ne trpi štetu od čekanja na opslugu	neophodan interval strpljivosti da bi sistem bio stabilan
n – broj kanala (TE)	raspoloživost broja kanala (TE) u sistemu	potreban broj kanala u sistemu
P_{ops} – verovatnoća opsluge TZ	zadata verovatnoća opsluge TZ	ostvarena verovatnoća opsluge klijenta (TZ)
Karakteristike SMO	Ulaz	Izlaz
k_r – srednji broj TZ u redu za opslugu	-	srednji broj TZ koji čekaju u redu za opslugu
$F_{TZ}(x)$ – raspodela verovatnoća broja TZ u redu	-	raspodela verovatnoća broja TZ koji čekaju na opslugu
t_r – srednje vreme boravka TZ u redu	dozvoljeno srednje vreme čekanja (TZ) na opslugu	srednje vreme koje klijent (TZ) provede u redu za opslugu
m – srednji broj mesta u redu	maksimalno mogući broj mesta u redu za čekanje	potreban broj mesta u redu za čekanje TZ na opslugu

U prethodnom delu naglašeno je da je teorija masovnog opsluživanja razvijena uz pretpostavku stohastičnosti i stacionarnosti posmatranog sistema, pa se kao takva može uspešno koristiti za dimenzioniranje tehnoloških elemenata sistema održavanja, kada su ispunjene pretpostavke pod kojima je sistem razvijan. U uslovima prisutne nestacionarnosti, za dimenzioniranje tehnoloških elemenata mogu se koristiti postojeći matematički modeli uz prethodni izbor merodavnog vremenskog intervala u kojem je stacionarnost zastupljena.

Pored stohastičnosti i stacionarnosti, prema S. Vukićeviću (Vukićević, 1995), osnovni uslovi za primenu TMO su i:

- merodavne veličine za dimenzioniranje TE sistema održavanja moraju biti prisutne u matematičkom modelu, uz obezbeđenje odgovarajućeg matematičkog aparata kojim se dimenzioniranje može obaviti,
- da se TZ u sistemu održavanja pojavljuju i opslužuju na način koji pokriva teoretske raspodele verovatnoća, za koje su razvijeni odgovarajući matematički modeli,
- matematički modeli, po pravilu, moraju respektovati mogućnost za nastajanje reda i čekanje na uslugu,
- matematički modeli svojim ostalim pretpostavkama moraju biti u saglasnosti sa suštinom procesa koji se stvarno dešava u sistemu održavanja,
- matematički modeli moraju uvažiti prisustvo intervala strpljivosti ukoliko on postoji.

U sistemima održavanja karakteristično je prisustvo većeg broja situacija koje se mogu rešavati primenom TMO, od kojih se posebno izdvajaju sledeće:

MO_1 – nestrpljivi zahtevi i odsustvo ispomoći TE (kada nema mogućnosti da klijent bude opsluživan jednovremeno od više kanala);

MO_2 – strpljivi zahtevi i odsustvo ispomoći TE (kada nema mogućnosti da klijent bude opsluživan jednovremeno od više kanala), i koja je predmet našeg interesovanja;

MO_3 – nestrpljivi zahtevi i potpuna ili delimična ispomoć TE (kada je moguća jednovremena opsluga jednog klijenta od strane svih ili većeg broja raspoloživih kanala);

MO_4 – strpljivi zahtevi i potpuna ili delimična ispomoć TE (kada je moguća jednovremena opsluga jednog klijenta od strane svih ili većeg broja raspoloživih kanala).

Primenjen model SMO za opsluživanje rada radionice za tehničko održavanje

Rad radionice za tehničko održavanje analiziran je sa aspekta opsluživanja borbenih vozila (b/v) koja su, u većini slučajeva, dolazila u slučajnim momentima vremena. Posmatran je period od tri godine u izabranoj jedinici.

Radionica za tehničko održavanje posmatrana je kao SMO sa čekanjem u kojem klijent (TZ), kada zatekne sve kanale zauzete, ne dobija otkaz, već staje u red i čeka oslobađanje kanala, tj. potrebno vreme za čekanje veće je od intervala strpljivosti na početku opsluge.

Iako posmatrana radionica za tehničko održavanje predstavlja zatvoren SMO u okviru višeg – logističkog sistema, uvažavajući tvrdnju S. Vukadinovića (Vukadinović, 1988) da „proizvoljan SMO, otvoren ili zatvoren, ima ograničen broj izvora klijenata, ali u nizu slučajeva broj tih izvora klijenata je tako veliki da se može zanemariti uticaj stanja samog SMO na potok klijenata“, pretpostavka je da se radionica analizira kao otvoren SMO zbog velikog broja izvora klijenata i dužeg perioda posmatranja (tri godine).

Isti autor takođe naglašava da su ključne osobine prostog potoka: ordinarnost, odsustvo posledica i stacionarnost u mnogim slučajevima narušene.

Tako, u našem slučaju, pretpostavka ordinarnosti nije strogo ispunjena, jer se na elementarnom intervalu vremena Δt pojavljuje više od jednog klijenta – borbenog vozila, istina, u ređem broju slučajeva. Primera radi, u okviru izvršenja radnji prelaza sa jednog vida eksploatacije na drugi, pripreme za odlazak na teren i slično, narušena je pretpostavka ordinarnosti.

Pretpostavka odsustva posledica takođe se smatra nedovoljno zasnovanom. Prisutni su slučajevi gde pojava jednog događaja povlači za sobom pojavu drugih događaja. Tako, odlaganje planiranog TP izaziva odlaganje drugih preventivnih radnji; nedostatak rezervnih delova ima za posledicu nastanak slučajnih otkaza drugih sastavnih delova i kompletnog sredstva.

Takođe, veći broj različitih uticaja na posmatrani potok događaja narušava pretpostavku stacionarnosti. Ako se pojave posmatraju u relativno ograničenim intervalima, ta pretpostavka može da služi kao zadovoljavajuća osnova rešenja.

Prema Vukadinoviću (1988), „bez obzira na to što ova tri uslova nisu potpuno zadovoljena, pretpostavka o njihovom ispunjenju može da bude prihvatljiva realna osnova za proučavanje procesa masovnog opsluživanja“. Svesni prethodnih ograničenja, učinjen je pokušaj primene TMO na konkretnu jedinicu u svojstvu otvorenog, višekanalnog SMO sa čekanjem. Obradom podataka iz radioničke dokumentacije stvoreni su uslovi za analizu procesa, sagledavanje mogućnosti primene TMO, izvođenje zaključaka o empirijskoj raspodeli frekvencija različitih ulaznih potoka b/v i slaganje sa nekom od poznatih teorijskih raspodela itd., a u narednoj fazi dimenzioniranje TE u sistemu održavanja shodno postavljenoj funkciji cilja.

Izbor modela sistema održavanja može se odraziti na kvalitet i upotrebljivost rezultata. Pošlo se od pretpostavke da svaki mehaničar određene specijalnosti predstavlja jedan kanal opsluživanja u SMO, potpuno nezavisan od drugih, jer raspoloživi izvor podataka ne pruža mogućnost drugačijeg zaključivanja.

Analiza ulaznih potoka, posebno za tenkove i posebno za transportere, treba da da odgovor na pitanje da li je moguća primena TMO, a pre svega – da li su ispunjeni uslovi stohastičnosti i stacionarnosti.

Svako planiranje radnji preventivnog održavanja (tehnički pregledi, prelazi s jednog na drugi vid eksploatacije, kontrolni pregledi, periodični pregledi itd.) narušava stohastičnost procesa.

Prisustvom nestacionarnosti javlja se i dilema za koje stanje nestacionarnosti treba projektovati resurs. Svaku nestacionarnost obično prati tehnološka neusaglašenost TZ i TE koji treba da ih realizuju.

Prema Vukićeviću (1995), pitanju ocene da li je TZ stacionaran ili ne mora se prilaziti sa posebnom pažnjom i to u onoj vremenskoj jedinici koja ima presudan značaj za buduće dimenzioniranje TE, čijim delovanjem se realizuje jedan ili grupa TZ.

U okviru posmatranog SMO za relevantni interval opravdano je izabrati jedan od sledećih:

- prosečno vreme zadržavanja sredstva u SMO;
- interval od momenta nastanka otkaza do momenta preuzimanja na opsluživanje;
- interval u kojem je vrednost gotovosti (raspoloživosti) TMS na zahtevanom nivou i
- jedan dan, koliko sredstvo ostaje u SMO.

Prosečno vreme zadržavanja sredstva u SMO i vremenski interval od momenta nastanka otkaza do momenta preuzimanja na opsluživanje nisu prihvatljivi, jer snimljeni statistički uzorak ne daje mogućnost za takvu analizu.

Dužina intervala u kojem je vrednost gotovosti (raspoloživosti) TMS u zahtevanim granicama, predstavlja dobru polaznu osnovu. Prema podacima iz Standarda narodne odbrane (SNO 1096/85, 1986) zahtevana gotovost za složena mašinska TMS, klasifikovana kao bitna, iznosi 0,94. Kako je u posmatranoj jedinici bilo ukupno 114 tenkova i 92 transportera, prema zahtevanoj gotovosti može biti neipsravno najviše 7 tenkova i 6 transportera. U periodu od tri godine bilo je ukupno 1337 zahteva za održavanje tenkova i 1502 zahteva za održavanje transportera, pa se za relevantni interval može uzeti tri dana.

I, na kraju, interval od jednog dana se može razmatrati kao relevantni, jer se polazi od pretpostavke da se kroz dnevno planiranje aktivnosti najveći broj TZ realizuje onog dana kad su i nastali.

Analizirajući interval od jedan dan, posebno za tenkove, transportere i zbirno, utvrđeno je da nije ispunjena pretpostavka ordinarnosti, jer se u relevantnom intervalu pojavljuje broj TZ veći od jedan. Sa povećavanjem intervala na dva, tri, pet dana itd. ova pojava u još većoj meri dolazi do izražaja.

Uvažavajući navedene činjenice, primenjena je TMO, uz pretpostavku da se radi o „prostom toku“. Analizom podataka dobijeni su rezultati prikazani u tabeli 2 iz koje se vidi da se slučajna promenjiva X_i – broj vozila na dan, primenom hipoteze o slaganju empirijske i teorijske raspodele, u svim slučajevima podvrgava Poasonovoj raspodeli.

Ulazni i izlazni tok u SMO

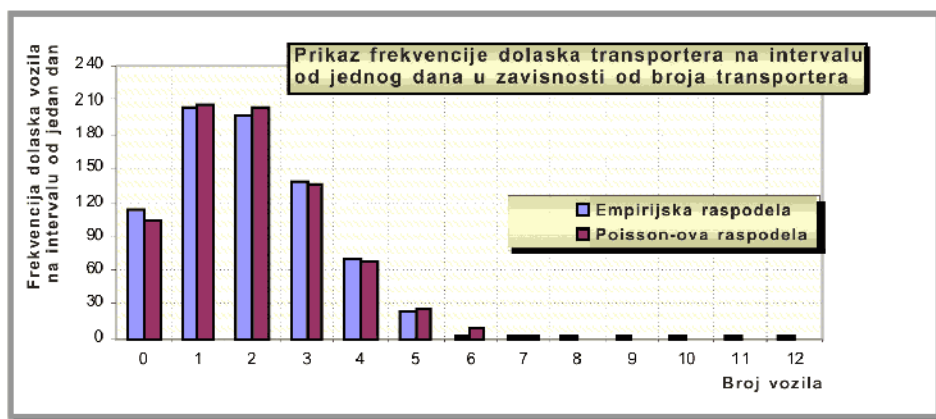
Tabela 2

Input and output stream of the MSS

Table 2

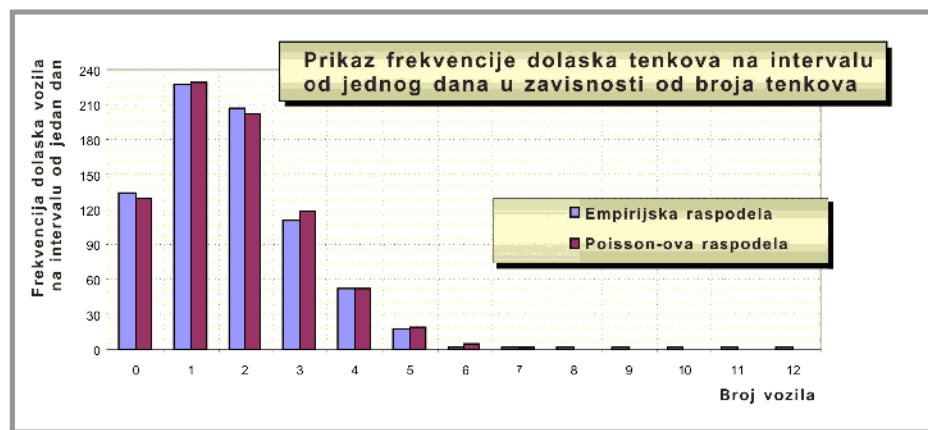
Teh. sredstvo		Ulazni tok		Izlazni tok – opsluživanje			
Vrsta	Kol.	Raspodela	Intenzitet (λ)	Vrsta TE	Raspodela	Intenzitet (μ)	Faktor opsluge ($\rho = \lambda / \mu$)
BVP M-80A	1502	Poason	1,984	meh. za b/v	Erlangova drugog reda	0,9278	2,1384
				elmeh. za b/v	Eksponeenc.	2,0828	0,9525
				svi meh.	Erlangova drugog reda	0,6543	3,0318
Tenk (T-72 i M-84)	1337	Poason	1,766	meh. za b/v	Erlangova trećeg reda	0,7337	2,4069
				elmeh. za b/v	Eksponeenc.	1,8376	0,9610
				svi meh.	Erlangova trećeg reda	0,5334	3,3105
BVP M-80A Tenk (T-72 i M-84)	2839	Poason	3,750	meh. za b/v	-		
				elmeh. za b/v	Eksponeenc.	1,9536	1,91953
				svi meh.	-		

Prikaz frekvencije dolaska transportera na intervalu od jednog dana dat je na slici 1.



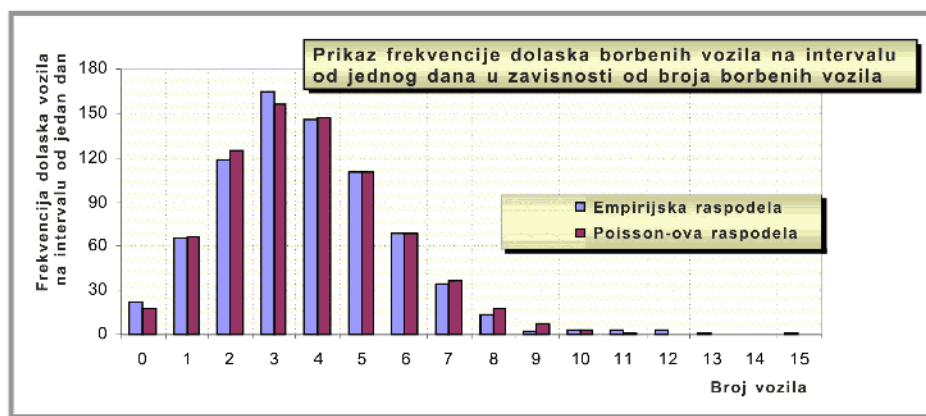
Slika 1 – Frekvencija dolazaka transportera BVP M-80A
Figure 1 – Frequency of transporter arrivals – M-80A

Prikaz frekvencije dolaska tenkova u intervalu od jednog dana dat je na slici 2.



Slika 2 – Frekvencija dolazaka tenkova
Figure 2 – Frequency of tank arrivals

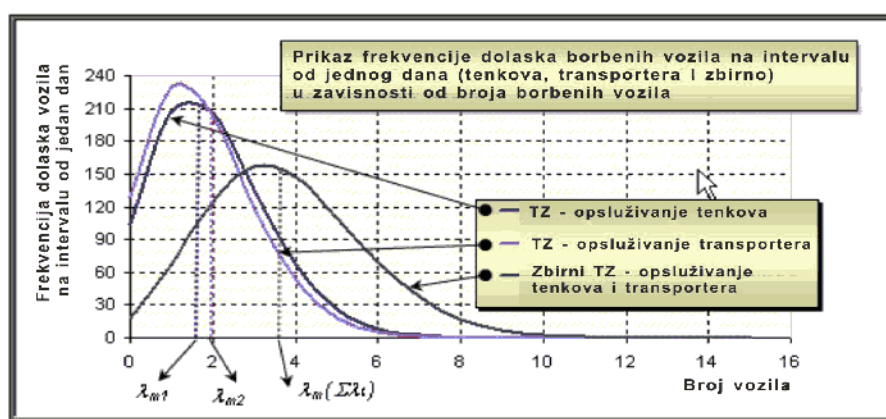
Na kraju je, kroz zbimi prikaz, grafički prikazana frekvencija dolaska b/v (transportera i tenkova) u intervalu od jednog dana, prema slici 3.



Slika 3 – Frekvencija dolazaka borbenih vozila
Figure 3 – Frequency of combat vehicle arrivals

Na osnovu usvojenih pretpostavki, radionica se posmatra kao otvoreni SMO u kojem svaki mehaničar određene specijalnosti (TE) predstavlja jedan kanal za opsluživanje. Ako su svi kanali u momentu dolaska u radionicu zauzeti, b/v staje u red za čekanje. Kako sva b/v u jedinici moraju biti opslužena, to broj mesta u redu treba shvatiti uslovno.

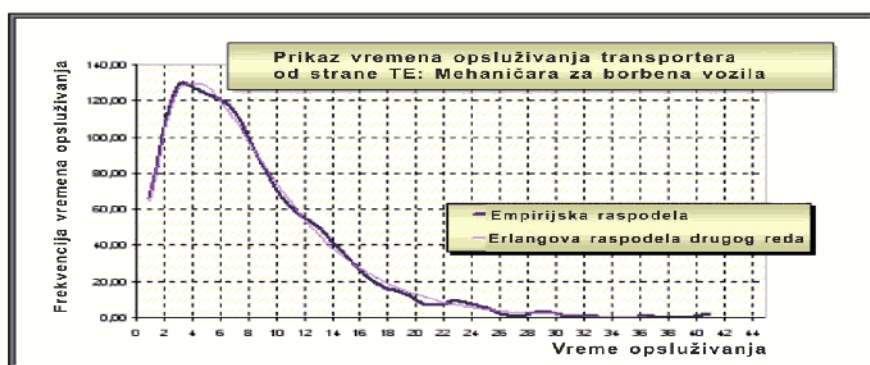
Na slici 4 prikazan je zbirni TZ, dobijen sabiranjem dva TZ, homogen u odnosu na TE koji opterećuje. Homogenizacija TZ, osim što smanjuje broj TE, može biti i važno mesto racionalizacije, jer se sabiranjem TZ mogu pojaviti „manje“ stohastički i „manje“ nestacionarni TZ.



Slika 4 – Frekvencija dolazaka borbenih vozila kao zbirni TZ
Figure 4 – Frequency of c/v arrivals as collective TD

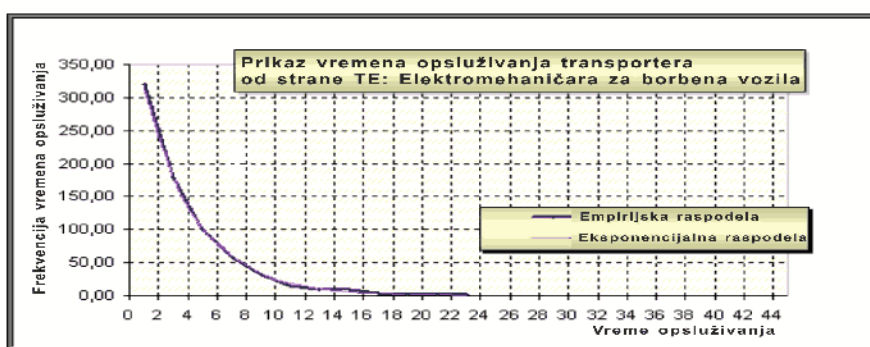
Osnovne karakteristike rada odeljenja za b/v (SMO) za izračunate vrednosti λ i μ su: kanali za opsluživanje (TE) od kojih je 5 mehaničara za b/v ($n_{meh}=5$) i 4 elektromehaničara za b/v ($n_{emeh}=4$), što odgovara realnoj situaciji, i broj mesta u redu za čekanje ($m=5$). U najvećem broju slučajeva vreme opsluge se podvrgava Erlangovom, odnosno eksponencijalnom zakonu raspodele verovatnoće. U SMO kod kojeg ulazni potok transportera BVP M-80 predstavlja „prost potok”, razmatrana su tri slučaja opsluživanja sa mehaničarima različite specijalnosti.

U prvom slučaju BVP M-80 opslužuje mehaničar za b/v. Grafički prikaz vremena opsluživanja prikazan je na slici 5.



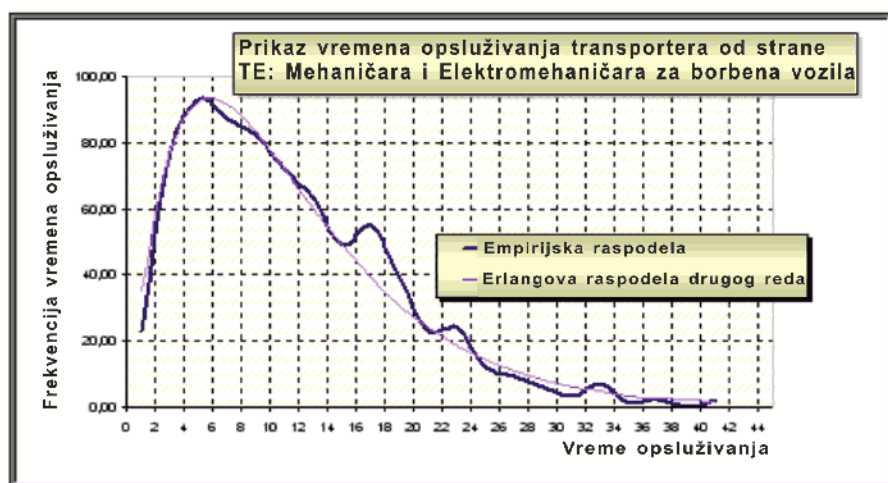
Slika 5 – Opsluživanje BVP M-80 koje vrše meh. za b/v
Figure 5 – M-80 served by mechanics for c/v

U drugom slučaju elektromehaničar za b/v opslužuje BVP M-80. Prikaz vremena opsluživanja dat je na slici 6.



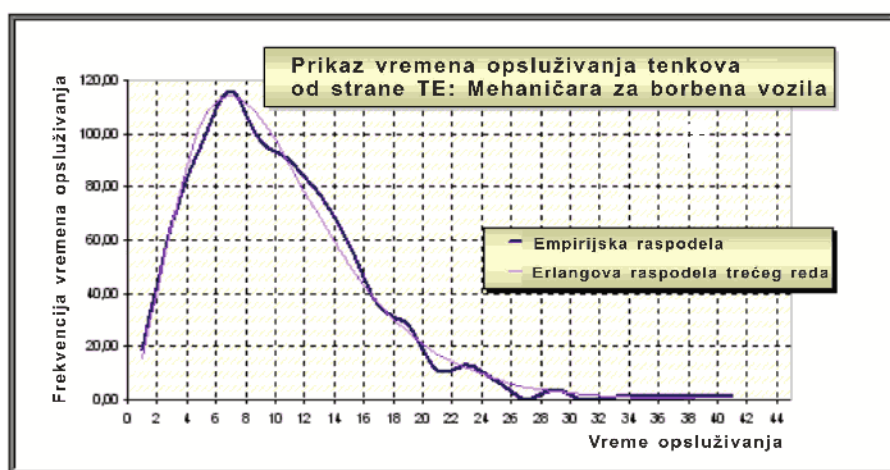
Slika 6 – Opsluživanje BVP M-80 koje vrše elektromeh. za b/v
Figure 6 – M-80 served by electro-mechanics for c/v

U trećem slučaju BVP M-80 opslužuju mehaničari i elektromehaničari za b/v. Grafički prikaz vremena opsluživanja transporterera BVP M-80 dat je na slici 7.



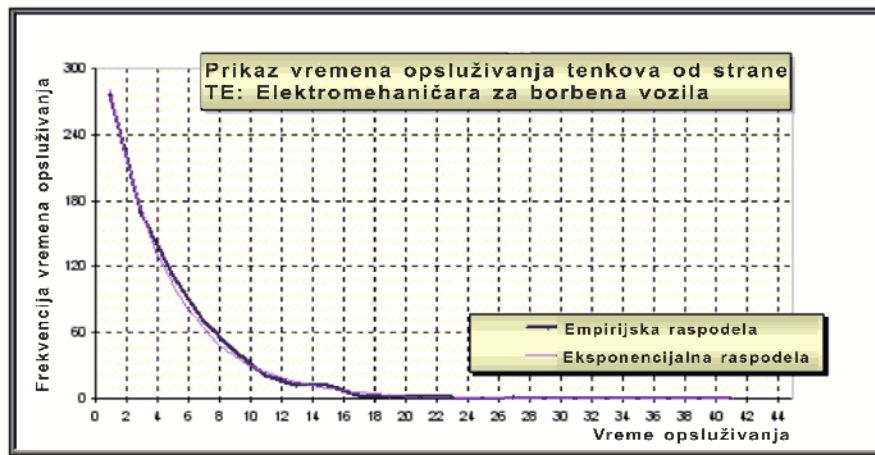
Slika 7 – Opsluživanje transporterera BVP M-80 koje vrše meh. i elektromeh. za b/v
Figure 7 – M-80 served by mechanics and electro-mechanics for c/v

Analogno prethodnom, razmatran je ulazni tok tenkova (M-84), takođe u tri različita slučaja. U prvom slučaju tenkove opslužuje mehaničar za b/v. Prikaz vremena opsluživanja tenkova dat je na slici 8.



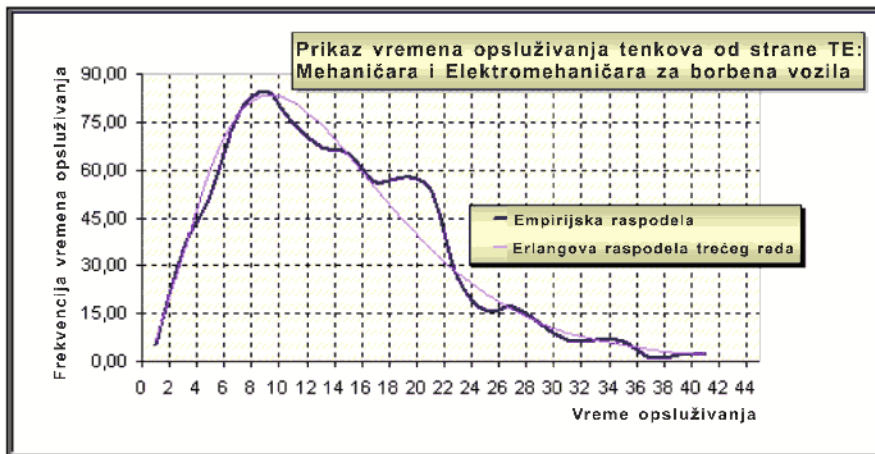
Slika 8 – Opsluživanje tenkova koje vrše meh. za b/v
Figure 8 – Tanks served by mechanics for c/v

U drugom slučaju tenkove opslužuje elektromehaničar za b/v. Prikaz vremena opsluživanja dat je na slici 9.



Slika 9 – Opsluživanja tenkova koje vrše elektromeh. za b/v
Figure 9 – Tanks served by electro-mechanics for c/v

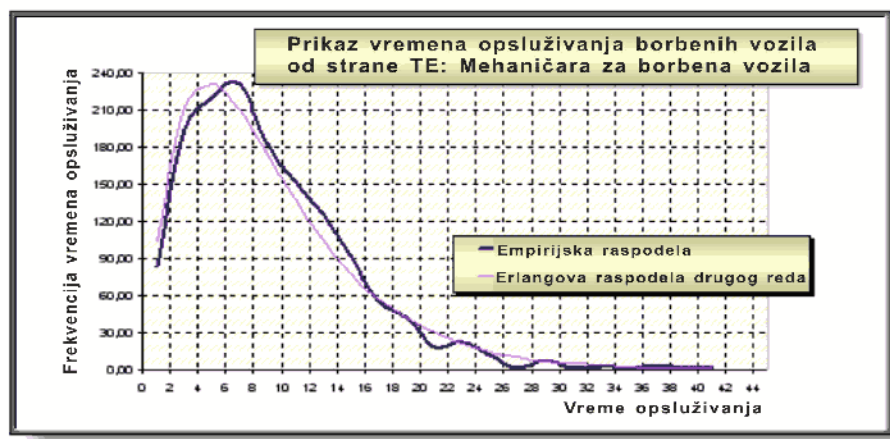
U trećem slučaju tenkove opslužuju mehaničari i elektromehaničari za b/v. Grafički prikaz vremena opsluživanja tenkova dat je na Slici 10.



Slika 10 – Opsluživanja tenkova koje vrše meh. i elektromeh. za b/v
Figure 10 – Tanks served by mechanics and electro-mechanics for c/v

Konačno, analizirana su tri slučaja opsluživanja zbirnog ulaznog toka transportera BVP M-80 i tenkova (M-84) koje vrše mehaničari različite specijalnosti.

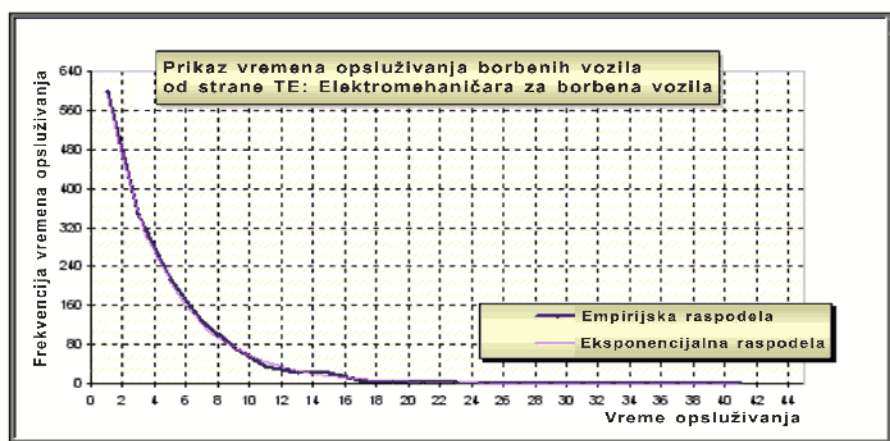
U prvom slučaju tenkove i transportere opslužuje mehaničar za b/v. Prikaz vremena opsluživanja tenkova i transportera dat je na slici 11.



Slika 11 – Opsluživanje b/v koje vrše meh. za b/v
Figure 11 – Tanks and transporters served by mechanics for c/v

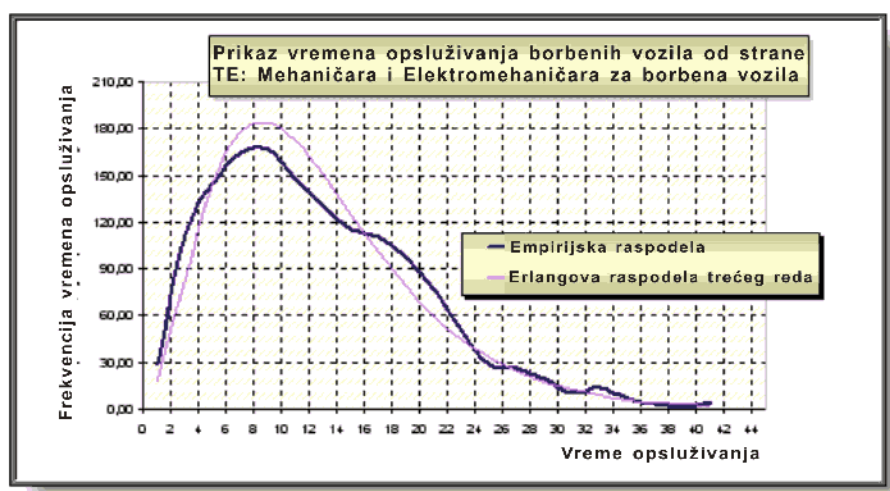
Uz primenu hipoteze o slaganju empirijske i pretpostavljene teorijske raspodele, utvrđeno je da se empirijska raspodela ne može složiti sa nekom od poznatih teorijskih raspodela.

U drugom slučaju tenkove i transportere opslužuje elektromehaničar za b/v. Grafički prikaz vremena opsluživanja tenkova i transportera dat je na slici 12.



Slika 12 – Opsluživanje b/v koje vrše elektromeh. za b/v
Figure 12 – Tanks and transporters served by electro-mechanics for c/v

U trećem slučaju tenkove i transportere opslužuju mehaničari i elektromehaničari za b/v. Prikaz vremena opsluživanja tenkova i transportera dat je na slici 13.



Slika 13 – Opsluživanje b/v koje vrše meh. i elektromeh. za b/v
Figure 13 – The tanks and transporters served by mechanics and electro-mechanics for c/v

Analizom trećeg slučaja, uz primenu hipoteze o slaganju empirijske i pretpostavljene teorijske raspodele, utvrđeno je da se empirijska raspodela ne može složiti sa nekom od poznatih teorijskih raspodela.

Iz prethodnih grafičkih prikaza pokazano je da se, primenom hipoteze o slaganju empirijske i pretpostavljene teorijske raspodele, u različitim varijantama opsluživanja b/v koje vrši elektromehaničar za b/v empirijske raspodele slažu sa nekim od poznatih teorijskih raspodela. Sa druge strane, pri opsluživanju b/v koje vrši mehaničar za b/v, slaganje empirijskih i teorijskih raspodela nije zastupljeno u svim razmatranim varijantama, što nas navodi na zaključak da je primena ovog modela SMO ograničena samo na određene slučajeve.

Optimizacija u SMO

Optimizacija u SMO može se predstaviti preko zavisnosti uspešnosti funkcionisanja sistema i parametara koji opisuju proces opsluživanja uz data ograničenja vrednosti tih parametara. Osnovni pokazatelji efektivnosti su:

- broj kanala opsluživanja n ;
- srednje vreme opsluživanja $\bar{t}_{op}$;
- srednji broj klijenata koji pristupaju u sistem u jedinici vremena $\bar{\lambda}_0$.

Ako se verovatnoća opsluživanja izabere za kriterijum efektivnosti, funkcionalna zavisnost je:

$$P_{ops} = f(n, \bar{t}_{ops}, \lambda). \quad (6)$$

Inverzne zavisnosti su oblika:

$$n = g(P_{ops}, \bar{t}_{ops}, \lambda); \quad (7)$$

$$\bar{t}_{ops} = h(P_{ops}, n, \lambda) \quad \text{i} \quad (8)$$

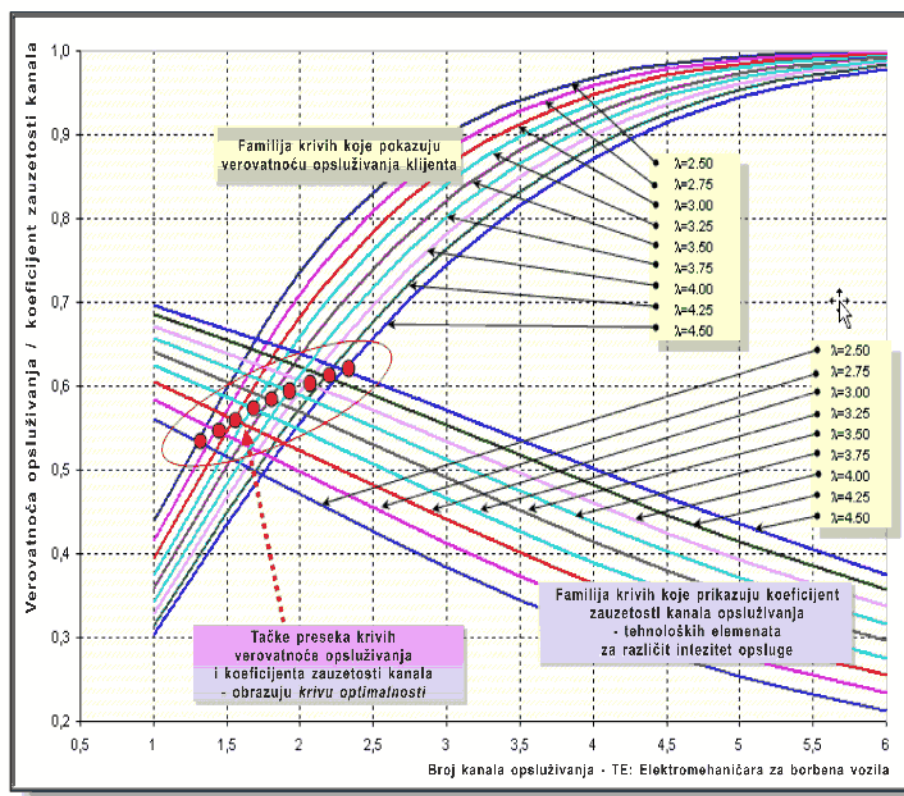
$$\lambda = \rho(P_{ops}, n, \bar{t}_{ops}) \quad (9)$$

Uzimajući u obzir uticaj svake od ovih veličina na verovatnoću opsluživanja pojedinačno, kao i u celokupnosti, potrebno je odrediti optimalan broj kanala opsluživanja, odnosno TE. Postizanje maksimalne vrednosti P_{ops} ne znači ostvarenja optimalne vrednosti.

Analizu funkcionisanja SMO u optimalnom režimu najbolje je izvesti upoređenjem dva suprotna kriterijuma efektivnosti: verovatnoće opsluživanja i koeficijenta zauzetosti kanala opsluge, uz pretpostavku da su polazni parametri: srednje vreme opsluživanja i intenzitet ulaznog potoka klijenata – konstantni. Pod tim uslovima treba odrediti optimalan broj kanala opsluživanja: $n = n_{opt}$.

Kao kriterijum optimalnosti prihvatamo sledeću činjenicu: SMO funkcioniše u optimalnom režimu ako verovatnoća opsluživanja i koeficijent zauzetosti kanala opsluživanja imaju dovoljno velike vrednosti, tako da će stajanje TE biti minimalno.

Na slici 14 je, pored zavisnosti P_{ops} od n , za postojeću vrednost $\bar{t}_{ops}$ i različite vrednosti λ nacrtana i familija krivih koja pokazuje koeficijent zauzetosti kanala opsluživanja, odnosno verovatnoću zauzetosti kanala $K_z = K_{\Sigma} = P_{\Sigma}$ takođe u funkciji od n , prema podacima o opsluživanju b/v (transportera i tenkova) od strane TE: elektromehaničara za b/v. Sa slike se vidi da kad P_{ops} ima vrednosti bliske jedinici, P_{zk} ima niske vrednosti (recimo za $\lambda=2,5$ i $n=6$, P_{ops} iznosi 0,9983, dok P_{zk} iznosi 0,2129 ili 21,3%). Pomenuti režim funkcionisanja sistema ne može se prihvatiti kao zadovoljavajući, jer 78,7% kanala opsluživanja stoji, tj. sistem ne radi u optimalnom režimu.



Slika 14 – Optimalne vrednosti potrebnog broja TE
Figure 14 – Optimal values of the required number of TE

Koristeći slučaj koji odgovara realnoj situaciji u kojem je $\lambda=3,75$, vreme opsluživanja konstantno, a broj TE na opsluživanju različit, pogledaćemo odnos vrednosti verovatnoće opsluživanja i koeficijenta zauzetosti kanala u tabeli 3.

Vrednosti P_{ops} i P_{zk} za različite vrednosti n

Tabela 3

Values of P_{ops} and P_{zk} for different values of n

Table 3

n	1	2	3	4	5	6
P_{ops}	0,342	0,613	0,801	0,913	0,967	0,989
$P_{zk}=K_z$	0,657	0,588	0,512	0,438	0,371	0,316

Uočava se da su vrednosti obe verovatnoće najbliže za broj kanala opsluživanja $n=2$. U ostalim slučajevima ova odstupanja su veća. Pобољшanje jednog kriterijuma izaziva pogoršanje drugog i obrnuto. Zaključuje se da je optimalan broj kanala opsluživanja kada P_{ops} i P_{zk} imaju jednake vrednosti, a iznosi verovatnoća prelaze 51%, tj.

$$n = n_{opt} \text{ ako je } P_{ops} = K_z, \lambda = const, \bar{t}_{ops} = const, \quad (10)$$

Iz ovog uslova dobija se analitički izraz za određivanje optimalnog broja kanala opsluživanja. Kako je

$$K_z = \frac{\bar{n}_z}{n}, n = n_{opt}, P_{ops} = K_z, \lambda = const, \bar{t}_{ops} = const, \quad (11)$$

sledi da je:

$$P_{ops} = \frac{\bar{n}_z}{n}, n_{opt} = \frac{\bar{n}_z}{P_{ops}}, \lambda = const, \bar{t}_{ops} = const, \quad (12)$$

Ako se iskoristi formula

$$n_z = \rho \cdot P_{ops} \Rightarrow n_{opt} = \rho = \frac{\lambda}{\mu} = \lambda \cdot \bar{t}_{ops}, \quad (13)$$

utvrđuje se da je za određivanje optimalnog broja kanala opsluživanja potrebno znati dva osnovna parametra: intenzitet ulaznog potoka i srednje vreme opsluživanja. Na prethodnoj slici prikazane su optimalne vrednosti broja TE u preseku krivih P_{ops} i P_{zk} . Spajanjem tih tačaka dobijamo krivu optimalnosti. Prema prethodnim relacijama, za vrednosti $\lambda=3,75$ i $\mu=1,953$, dobija se da je $\rho=1,92$, tj. optimalan broj elektromehaničara za b/v

$$n_{opt} = \rho = 1,92 \approx 2.$$

Analizirajući prikazani slučaj optimizacije u SMO utvrđuje se da je broj TE – elektromehaničari za b/v predimenzioniran tj. sa 2 TE (umesto 4 koliko ima realan sistem) može biti realizovan najveći broj tehnoloških zahteva.

Vreme zadržavanja u SMO

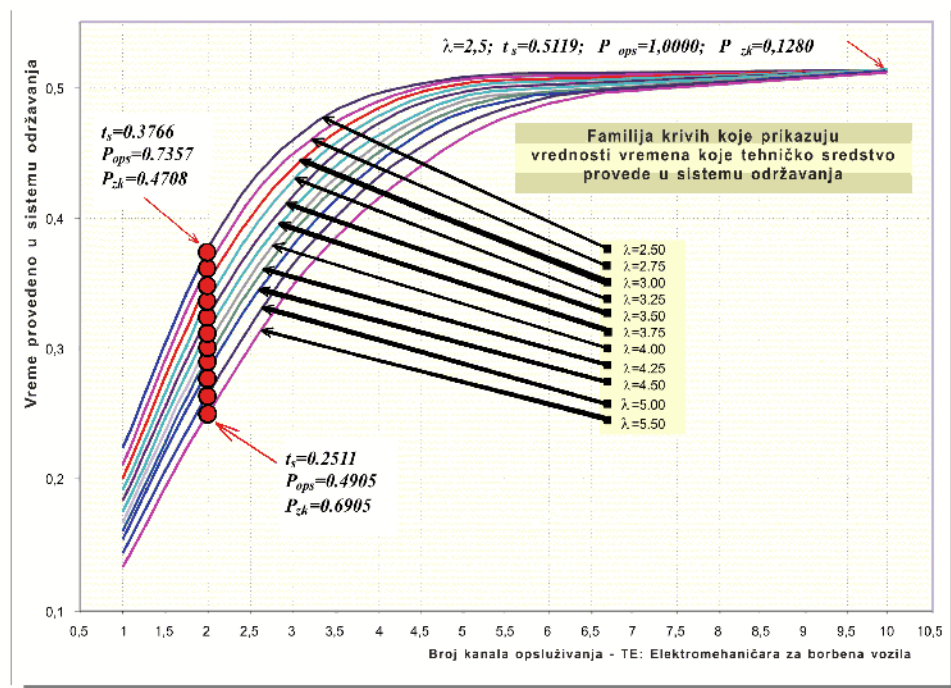
Analizirajući vremena zadržavanja tehničkog sredstva u sistemu održavanja može se uočiti da, povećavanjem broja kanala opsluživanja sve vrednosti vremena konvergiraju ka jednoj vrednosti $t_s = 0,5119$ [dana] = $0,5119 \times 7,5 = 3,84$ [sata].

Koristeći rezultate iz prethodnog dijagrama, gde je pokazano da je broj od 2 kanala opsluživanja, tj. dva TE: elektromehaničara za borbeno vozila optimalan, na slici 15 dat je opseg vrednosti vremena zadržavanja u sistemu održavanja za različite vrednosti intenziteta otkaza (od $\lambda=2,50$ do $\lambda=5,50$) i on se kreće od $t_s = 0,2511$ [dana] do $t_s = 0,3766$ [dana].

Uočava se da kod vrednosti vremena provedenog u sistemu održavanja $t_s = 0,2511$ [dana] za intenzitet otkaza $\lambda=5,50$ verovatnoća opsluživanja dostiže vrednost koja je ispod 51%, tj. iznosi $P_{ops}=0,4905$.

Ova vrednost verovatnoće je za nas neprihvatljiva, pa je za intenzitet otkaza $\lambda=5,50$ nužno razmatrati situaciju u kojoj postoje tri kanala opsluživanja.

Prema analiziranim podacima može se jasno uočiti kako se menja vreme koje tehničko sredstvo provede u sistemu održavanja, kada broj kanala opsluživanja varira od jedan do deset. Uporedo s tim uočava se i menjanje vrednosti verovatnoće opsluživanja i verovatnoće zauzetosti kanala.



Slika 15 – Vreme koje tehničko sredstvo provede u sistemu održavanja
Figure 15 – Retention time for the technical means in the maintenance system

Zanimljivo je da za $n=10$ i različite vrednosti intenziteta otkaza verovatnoća opsluživanja ima vrednosti koje odgovaraju približno 100%-tnoj realizaciji koje se kreću od $P_{ops}(\lambda=2,50) = 100\%$ do $P_{ops}(\lambda=5,50) = 99,95\%$.

Zaključak

U sadašnjim restriktivnim uslovima finansiranja i reforme sistema odbrane, radi pravovremenog pružanja usluga klijentima koji imaju zahtev za održavanje, uz istovremeno smanjenje ukupnih troškova, sve je prisutnija potreba da se primenom naučnih metoda projektuju optimalni modeli masovnog opsluživanja (Ilić, et al, 2011, pp. 93-115).

U ovom radu učinjen je pokušaj da se, koristeći matematičke modele razvijene u okviru TMO, analizira jedinica za održavanje kao SMO, tj. sagledaju odnosi između klijenata koji traže opslugu i kanala koji ih opslužuju, kao i funkcionisanje sistema u optimalnom režimu. Uz uvažavanje niza pretpostavki utvrđene su ograničene mogućnosti primene TMO na ovakve sisteme, a proces optimizacije pokazuje predimenzioniranost realnog sistema.

Literatura

Andrejić, M., 2001, *Metode i softver za podršku planiranju u logističkim organizacionim sistemima*, Vojnotehnički glasnik/Military Technical Courier, Vol. 49, No. 1, pp 36-52,

Andrejić, M., Ljubojević, S., 2009, *Operaciona istraživanja u funkciji podrške odlučivanju u sistemu odbrane*, Vojnotehnički glasnik/Military Technical Courier, Vol. 57, No. 3, pp 15-28,

Andrejić, M., Milenkov, M., Ljubojević, S., 2010, *Logistički informacioni sistem*, Vojnotehnički glasnik/Military Technical Courier, Vol. 58, No. 1, pp. 33-61.

Ilić, S., Andrejić, M., 2011, *Analiza efikasnosti mogućih modela opsluživanja na pumpnim stanicama primenom teorije masovnog opsluživanja*, Vojnotehnički glasnik/Military Technical Courier, Vol. 59, No. 4, pp 93-115,

Nikolić, N., 2005, *Istraživanje modela i metoda masovnog opsluživanja za primenu u vojnim procesima*, doktorska disertacija, Vojna akademija, Beograd,

Petrović, V., Pekić, N., 2010, *Primena teorije masovnog opsluživanja na sisteme održavanja*, SYM-OP-IS 2010, XXXVII Simpozijum o operacionim istraživanjima,

Petrović, V., 2008, *Modelovanje jedinica za održavanje*, Magistarski rad, Beograd,

Vukadinović, S., 1988, *Masovno opsluživanje*, Naučna knjiga, Beograd,

Vukićević, S., 1995, *Skladišta*, Preving, Beograd,

SNO 1096/85, 1986, *TTZ za razvoj TMS*, Biro za standardizaciju i metrologiju u JNA.

MASS SERVING THEORY APPLICATION TO THE ANALYSIS OF MAINTENANCE SYSTEM FUNCTIONING

FIELD: Mathematics (Operations Research)

ARTICLE TYPE: Professional Practice

Summary:

This paper describes models and conditions for the application of the Mass Serving Theory in order to analyze relations between clients demanding the service and channels which provide the service as well as to design technological elements in the optimal regime for the given maintenance system. Based on the actual data collected and the statistical analysis of the expected intensity of combat vehicle arrivals and queuing at service for technical maintenance, the mathematical modeling of a real process of queuing was carried out and certain parameters quantified, in terms of determining the weaknesses of the existing models and the corrective actions needed.

Introduction

While solving many practical problems within the process of maintenance, the technological demands (TD) for maintenance appear with the characteristics of stochasticity and stationarity. These properties provide the ability of the Mass Serving Theory (MST) to be used, under certain conditions, for the dimensioning of technological elements (TE) in the reporting maintenance system. The analysis of the mass serving system (MSS) means the analysis of the input stream of clients, time and number of customers in a queue, time of serving and the output stream of clients as well.

Mathematical models of the mass serving system applicable to maintenance processes

There are many mathematical models developed in the MST to analyze the relationship between clients demanding the serving and channels that serve them. In the mathematical models of mass serving, the following parameters are commonly used as inputs: Input stream intensity, Serving intensity of the TE, Number of channels, i.e. TE; as outputs: Serving probability of TD, The average number of TD in a serving queue, and The average time of stay in the TD queue.

In practice, during the system sizing, the number of channels is usually required, i.e. TE (n) necessary to serve the TD, and in certain situations Input stream intensity and Serving intensity of the TE.

Applied model of the mass serving system for the description of service for technical maintenance functioning

The functioning of the technical workshop is analyzed in terms of serving combat vehicles (c/v) which, in most cases, come at random periods of time. The time period of three years in the selected unit has been observed.

The service for technical maintenance is considered as an MSS with queuing in which the client (TD) does not get cancellation when all channels are occupied, but it gets into a queue and waits for the channel release, i.e. the required queuing time is greater than the period of patience at the beginning of serving.

The analysis of input streams, for tanks and transporters separately, should give the answer to the question whether the application of the MST is possible, i.e. whether the conditions of stochasticity and stationarity are primarily satisfied.

The time interval of one day is considered as relevant because it is assumed that the largest number of TD are executed on the day of occurrence, following daily based planning activities.

The obtained results show that, by applying the hypothesis of matching the empirical and theoretical distribution, the random variable X_i – the number of vehicles per day is subjected to Poisson's distribution in all cases.

It was shown that, by applying the hypothesis about matching the theoretical and empirical distributions for different cases of c/v serving by electro-mechanics for c/v, the empirical distributions match with some of the given theoretical distributions. On the other hand, when the c/v were serviced by the mechanics for c/v, there is no matching between the empirical and the theoretical distribution for all considered cases, which leads to the conclusion that the application of this model is limited to certain cases.

The optimization in the mass serving system

The MSS optimization could be presented by the dependency of the system functioning performance and the parameters that describe the process of serving within the given limited values of the parameters. The key indicators of effectiveness are: the number of serving channels; the average serving time and the average number of clients accessing the system per time unit.

The best way of analysing the functioning of MSS in the optimum regime is a comparison of the two opposing criteria of effectiveness: the probability of serving and the ratio of the serving channel occupancy, assuming that the initial parameters - the average time of serving and the intensity of the input stream of clients - are constant. Under these conditions, the optimal number of serving channels should be determined.

As a criterion of optimality, we accept the following fact: the MSS operates in the optimum regime if the probability of serving and the ratio of the serving channel occupancy are large enough, values so that the TE value is minimal.

It can be noticed that the values of both probabilities are similar when the number of serving channels is 2. In other cases, these deviations are larger. The improvement of one criterion causes the deterioration of the other one and vice versa. It can be concluded that

the optimal number of serving channels is when P_s and P_{zk} have equal values, and the values of probability exceed 51%.

The analysis of the shown case of the optimization in the MSS indicates that the number of TE is oversized i.e. the largest number of technological requirements could be fulfilled with 2 TE (instead of 4 as in a real system).

Retention time in the mass serving system

When analyzing the retention time of technical means in the MSS, we can notice that, by increasing the number of serving channels, all values of time converge to a single value.

Using the previous results which show that the number of 2 serving channels is optimal, we have analysed the range of values of retention time in the MSS for different values of malfunction intensity.

The analyzed data show clearly how the retention time for technical means in the maintenance system changes when the number of serving channels varies from one to ten. At the same time, we can see the change of the value of the probability of serving and the probability of channel occupancy.

Conclusion

This paper presents an attempt to analyze a maintenance unit as an MSS using mathematical models developed in the MST, i.e. to review the relationships between clients who demand serving and channels that serve them as well as functioning in the optimum regime. With respect to many assumptions, the application of the MST for such systems was found to be limited, while the optimization process indicates the oversizing of the real system.

Key words: mass serving system, technological demand, technological element, servicing, maintenance.

Datum prijema članka/Paper received on: 14. 05. 2012.

Datum dostavljanja ispravki rukopisa/Manuscript corrections submitted on: 12. 06. 2012.

Datum konačnog prihvatanja članka za objavljivanje/ Paper accepted for publishing on: 14. 06. 2012.

INVESTIGATION OF THE ENERGY EFFICIENCY OF THE MILITARY MUSEUM BUILDING BY INFRARED THERMOGRAPHY

Slavica S. Ristić, GOŠA Institute, Belgrade,
Suzana R. Polić-Radovanović, CIK – Central Institute
for Conservation, Belgrade,
Bore V. Jegdić, GOŠA Institute, Belgrade

DOI: 10.5937/vojtehg61-2901

FIELD: Energy Efficiency
ARTICLE TYPE: Professional Paper

Abstract:

Infrared (IR) thermography, as a diagnostic technique, is used to find anomalies in the thermal signature of the Military museum building in Belgrade, to identify irregularities or deficiencies, such as wet materials, voids, or missing insulation and to inspect energy efficiency of the museum building and microclimatic indoor conditions. It is very important to perform preventative maintenance and stop undesirable environment influences that induce structural damage, modification of materials and agglomeration of pollutants and microorganisms on the cultural heritage artifacts, stored in the museum depot or exhibited in the galleries. The main causes for corrosion in historical buildings and museum artifacts are moisture and changeable temperature conditions. This paper deals with the results obtained in the application of IR thermography in determination of these conditions in the Military museum building, where very important metal artifacts are exhibited and deposited. The results show poor thermal insulation, wet walls and, generally, low energy efficiency.

Key words: *thermography, museum, military, artifacts, energy efficiency, buildings, insulation, wetting.*

Introduction

IR (infrared) thermography is a non-destructive testing (NDT) technique, which is becoming increasingly popular in the study of structural characteristics of building elements, as in the detection of defects and moi-

¹ ACKNOWLEDGMENT: The work was financed by the Ministry of Education, Science and Technological Development of Serbia, Projects No. TR-35046, and TR-34028, and by the Ministry of Culture of Serbia.

sture, determination of energy efficiency (Vavilov, 2010, pp.906-910), air leakage and flows as well as thermal insulation (Maldague, Moore, 2001), (Kittel, Kroemer, 1980), (Agema AB, 1993), (Hain, et al, 2005, pp.10-14).

IR thermography is a very powerful tool for NDT, in many areas of science, industry, biology and medicine, military and for cultural heritage preservation as well. It is ideal for surveillance, security, energy audits and a wide array of monitoring applications. New developments have been brought in the recent years in the field of IR instrumentation: high sensitive array detectors without cooling, high spatial resolution, digital signal processing, new software, (Flir Systems, 2011), (Litos, Honner, Kunes, 2004) leading also to improvement and further dissemination of IR measuring and testing methods in many application fields (Kutin, et al, 2010, pp.66-70), (Ristić, Polić-Radovanović, 2009), (Polić-Radovanović, 2010, p.161), (Hain, et al, 2005, pp.10-14), (Litos, Honner, Kunes, 2004). IR cameras, known as thermal imagers, are specially designed electronic devices that detect thermal radiation. They convert this radiation into thermal images, or thermograms, which visually portray temperature differences as small as 0.01°C (Flir Systems, 2011).

The progress of IR thermography makes this method, alone or combined with others, very useful to detect heat loss, moisture in walls and roofs, thermal insulation, structural damage, etc.. An IR camera can detect moisture very quickly, identifying the location and size of moisture damaged areas. These portable, battery-operated instruments, record the thermal data either as still, digital images or on conventional videotapes or digital videos. The image is displayed live in a viewfinder or on an LCD view screen. Different radiant temperatures are shown as different colors or shades of gray. It may sometimes be useful to display temperature values, though, but not in building testing. The temperature differences are what is usually of interest.

The IR thermographic technique can detect the different inertial thermal behavior of materials within the first 10 centimeters of walls and can be used to investigate the structure and composition of walls (Avdelidis, Moropoulou, 2004, pp.119-127), (Grinzato, et al, 2002, pp.165-169), (Imposa, 2010), (Titman, 2001, pp.149-154), (Maierhofer, Roellig, 2009), (Bosiljkov, et al, 2010, pp.239-249). The surface thermal anomalies are caused by structural and moisture conditions. The fastest and simplest way to test a large area of a building surface is to use a passive approach (Poli, 2007, pp.134-140), but more useful information can be obtained when the active method (artificial stimulated temperature differences) has been used. A great value of infrared thermography is that it makes possible to see invisible thermal signatures related to many of these problems in buildings (Thermography, Level I, 2006), (Ristić, et al, 2012, pp.84-90), (Hain, et al, 2005, pp.10-14).

The problem in building materials degradation is correlated to the water content inside the walls. Evaporation flux from wall surfaces can quantitatively be estimated by measuring the surface temperature since it depends in a sensitive way on the evaporation rate (Ceteras, Wood, 2006), (Švaić, Boras, 2006), (Polić-Radovanović, et al, 2011, pp.33-40), (Ristić, et al, 2012, pp.84-90), (Polić, 2007, pp.134-140). Moisture in the museum buildings is a big problem in historical, cultural and technical heritage preservation because moisture is one of the main factors responsible for the damage of items inside (Grinzato, et al, 2002, pp.165-169), (Titman, 2001, pp.149-154), (Polić-Radovanović, et al, 2011, pp.33-40), (Bosiljkov, et al, 2010, pp.239-249), (Ristić, et al, 2012, pp.84-90).

The Military Museum is a very important institution of historical and cultural heritage protection. The museum building was built in 1924 for the purposes of the Military-Geographical Institute. In 1956, the building was given to the Military Museum. It is positioned on the bastion of the 1st south-eastern front of the Belgrade Fortress, surrounded by the fortress ramparts and the most beautiful Belgrade Park, Kalemegdan. The Museum represents one of the symbols of the Belgrade Fortress. The bombing of Belgrade in 1944 destroyed the museum buildings and collections. After the war, the building was repaired and new work on collecting objects, especially from the previous war, started. Today, the Museum has around 30,000 objects (historically important weapons and military metal equipment, banners, uniforms, medals) in 12 collections and very impressive library and photo collections with over 100,000 photographs (<http://www.muzej.mod.gov.rs>).

The vicinity of the Danube and a high level of underground water are the permanent threats to the museum building. For this reason, the constant inspection of the building is necessary. The results of the thermographic inspection of the Military Museum building, especially its depot and galleries, related to moisture mapping are analyzed in this paper. The moisture in the ceilings, walls and floors of the depot and the galleries can permanently deteriorate the collected items. Extreme care is needed to prevent this. One of the most important activities is the preservation of cultural and historical property for the future.

Thermal insulation and moisture detection by thermography

IR thermography is based on the property that each body spontaneously emits infrared electromagnetic radiation (Maldague, 2001). According to the fundamental Law of Planck, all the objects emit IR radiation above absolute zero, but this radiation becomes visible to the human eye when the temperature is above about 500°C. A variation of such emission, either natural or

artificially induced, causes a thermal disequilibrium, easily visualized through the IR monitoring equipment into two-dimensional images.

IR cameras have been developed to detect IR emission and visualize it as a visible image. For common applications, the useful portion of the IR spectrum lines in the 0.8 to 20 μm . For operating distances restricted to a few meters, in the absence of fog or water droplets, the atmosphere absorption has little effect (for IR thermographic NDT). Generally, the most useful bands (for IR thermographic NDT) are 3 to 5 μm (called 'short waves' or SW) and 8 to 12 μm (called 'long waves' or LW) since these match the atmospheric transmission bands. It is interesting to add that for temperature between -10°C and $+130^{\circ}\text{C}$, measurements can be done without much difference in both bands (Kittel, Kroemer, 1980), (Maldague, Moore, 2001). The wavelengths of IR radiation for the camera (sensitive range) are between 2 and 14 μm . The 2-5.6 μm range is generally used to visualize temperature, between 40°C and 2000°C and the 8-14 μm range is used for temperature between -20°C and ambient temperatures.

Infrared thermography can be used both as a qualitative and quantitative tool. Some applications do not require exact surface temperatures. For example, to identify hidden structure, thermal bridges, mortars adhesion, or moisture areas, it is sufficient to acquire thermal images. The infrared inspection of buildings for heat loss was one of the first commercial uses for infrared thermography. Buildings may be quickly and thoroughly scanned via infrared, identifying problem areas that cannot be seen by the naked eye – ensuring the integrity of both structural and environmental systems for building inspection, repair verification and insurance purposes.

Besides different limitations (limited thickness of material under the surface, emissivity problems, effects of thermal losses, cost of the equipment, etc), IR thermography is recognized as a thermal, nondestructive testing method, which holds many advantages with respect to other methods of non-destructive testing. Thermograms measure the temperature distribution at the surface of the object during the test. It is important to point out that this temperature distribution is the result of a dynamic process. The IR camera can detect moisture quickly and non-destructively, identifying the location and the size of moisture damaged areas, due to the effects of evaporative cooling (the cooling effect can range from a few tens to more than 10°C). The temperature of the areas with moisture can be colder than dry ones, because of surface evaporation, or warmer, because of the higher thermal inertia of water content versus building materials. The apparent discrepancies between the two results are due to different microclimatic conditions in the time of scanning.

The simplest technique for the moisture detection is passive thermography working in steady state (Titman, 2001, pp.149-154), (Švačić, Boras, 2006). Thermography is based on the changes of optical properties of the surface in the IR spectrum bend, due to the presence of

moisture. The water staining of the surface changes the absorptive properties in the visual band, but the actual water content of each point is not proportional to optical emissivity. Such a visual indication is symptomatic, but sometime misleading, because it appears suddenly when moisture concentrates, but remains after the surface dried out.

The two basic types of water intrusion detectable with IR cameras are tracing water and deep seated moisture conditions. Tracing water thermal patterns are generally long, thin, amorphous patterns. In some cases, one can trace the water marks back to their source where water is entering the building. The water intrusion inside the building is a specific leak site, around a window frame or a door jam, for example. Moisture formed of water vapor (condensation at the dew point temperature) can also produce water damage on interior walls, especially on thermal benches and parts with poor insulation.

Thermography enables accurate locating of building moisture issues and tracking to their source. Places that cannot be physically reached with moisture meters can be inspected by thermography. After repair, the drying process is monitored, to confirm that moisture is gone.

Results and discussion

The same thermoCAM T-335 IR camera FLIR Systems has been used for recording thermograms, as in previous studies (Flir Systems, 2011), (Polić-Radovanović, et al, 2011, pp. 33-40), (Ristić, Polić-Radovanović, 2009), (Ristić, et al, 2012, pp. 84-90). The results are shown with the thermograms and the associated digital photo images. Some of the thermograms were processed by the measuring tools such as the measuring line, the measuring point and the isotherm.

The thermographic inspection was made twice, first in October and then at the end of November 2010. The indoor temperature T_i , the outdoor temperature T_{ou} and the humidity h , were recorded simultaneously. During the first tests, the average values were: $T_i=15^{\circ}\text{C}$, $T_{ou}=19^{\circ}\text{C}$, $h=73\%$. It was cloudy and without wind during the measurement.

Moisture detection

The Military museum has a rich library with over 15,000 titles, from the areas of History, History of Art, Archaeology, Museology and other similar branches of science and more than 5,000 magazines (<http://www.muzej.mod.gov.rs>). The moisture can damage the paper and destroy very important documents. For this reason, the library was investigated by thermography.

In the museum library, the indoor temperature was 20.2°C with a humidity of 55%. The calculations show that the dew point occurs when the tem-

perature falls to 10.8°C. The analysis of the thermogram shows that optically visible stains on the wall are larger than the area of the currently active moisture. In this corner, an electrical wire is surrounded by a wet wall (Fig.1).

The next thermographic inspection was done at the end of November, two days after a heavy rain, at the following conditions: $T_{ou} = 5^{\circ}\text{C}$, $T_{in} = 11^{\circ}\text{C}$, weather conditions: Overcast, no wind (Figs.1c and 1d). Active, visible moisture and leakage through the building originated from the terrace above this part of the room, covering the big wall area.

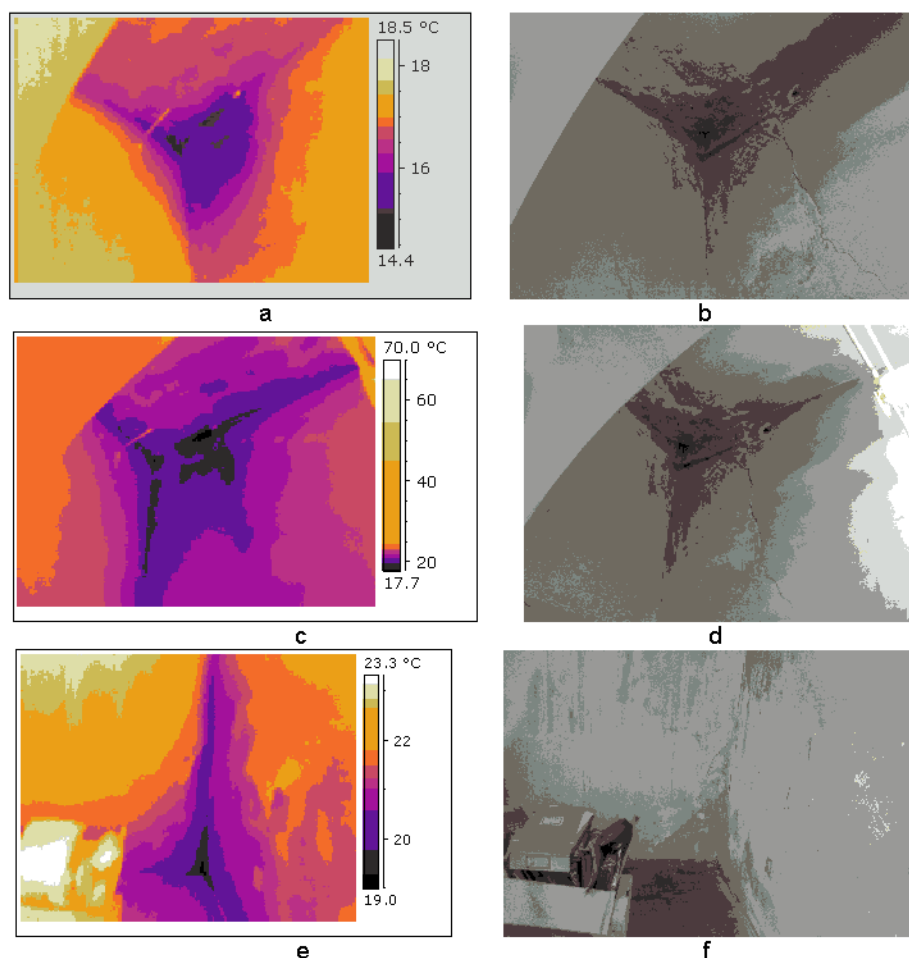


Figure 1 – Moisture in the far left corner of the library in relation to the front door, a,b-thermogram and the photo in the October test, c,d-thermogram and the photo in the November test, e and f- the lower part of the same corner during the second test

Slika 1 – Vлага u levom krajnjem uglu biblioteke u odnosu na ulazna vrata, a,b-termogarm i fotografija snimljeni u oktobru, c,d- termogarm i fotografija snimljeni u novembru, e, f-donj deo istog ugla snimljeni u drugom testu

The moisture was not detected in the wall above the first (from left) window (Fig.2a). Poor sealing of the windows was recorded. Brighter parts of the thermogram represent the parts of the wall with a layer of plaster disbonded. The air under the plaster is a good insulator; therefore, these parts were warmer (brighter) than the rest of the wall.

Wet areas and poorly insulated areas tend to behave similarly and look similarly on thermograms. It is necessary to make some judgments of areas that are suspected solely on their thermal behavior: whether the indicators are structurally driven; i.e., caused by walls, floors, penetration etc.; or, if there is evidence of moisture within the walls. The information about the construction of the building, if available, is helpful.

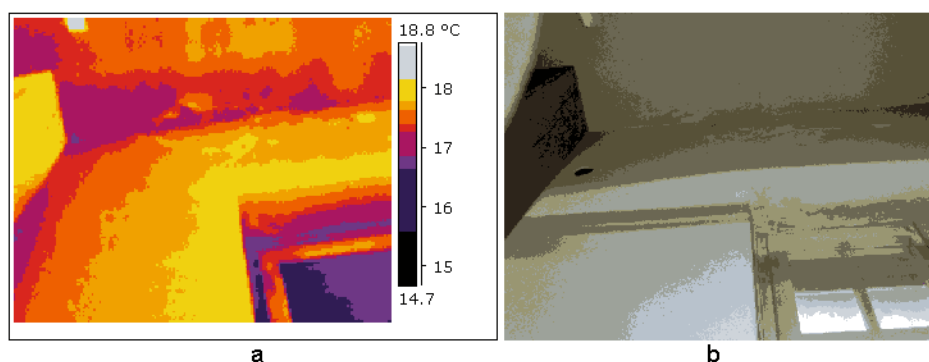


Figure 2 – Part of the wall above the first left window
Slika 2 – Deo zida iznad prvog levog prozora

For thermographic inspection, the museum depot is particularly interesting, with its collection of weapons (Figs. 3 and 4). The moisture in the ceilings, walls and floors of the depot can permanently deteriorate metal items. Corrosion of metal artifacts takes place very rapidly in the wet museum depots and galleries, because moisture and oxygen in the environment react chemically with the artifacts materials. During this process, corrosion products are formed both inside the objects and on their surface. Extreme care is needed to prevent this.

In the weapons depot, the temperature during the October test was $T_{in} = 21^{\circ}\text{C}$, humidity 60%. Under these conditions, the dew point would be when the temperature reaches 13°C . The concrete bridge (Fig.3a) is colder than the rest of the wall. It is a potential place for the condensation of moisture.

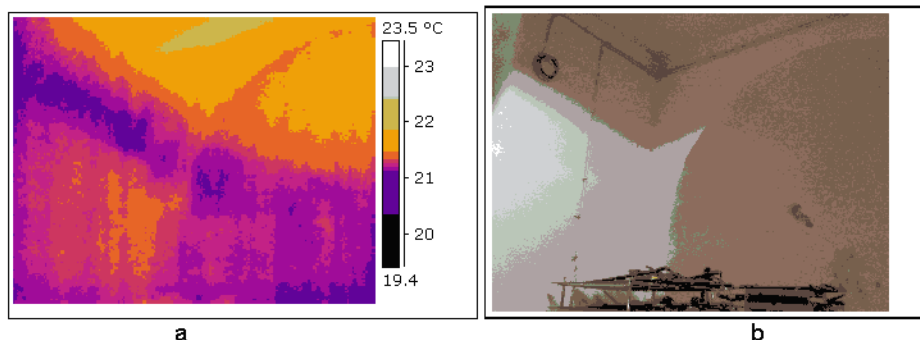


Figure 3 – Visible cold zones and the concrete beam in the weapons depot
Slika 3 – Vidljive hladne zone i betonska greda u depo naoružanja

The second set of thermographic tests, performed two days after a heavy rain, ($T_{ou} = 5^{\circ}\text{C}$, $T_{in} = 20^{\circ}\text{C}$), displays the extent of the moisture intrusion in the weapons depot (Fig. 4). In the upper left corner (Fig. 4a), beside the cold concrete bridge, there was damp penetration since the depot is in the basement, below the ground level. A similar case is in the right corner, too. The electrical installations are visible as bright lines on both thermograms.

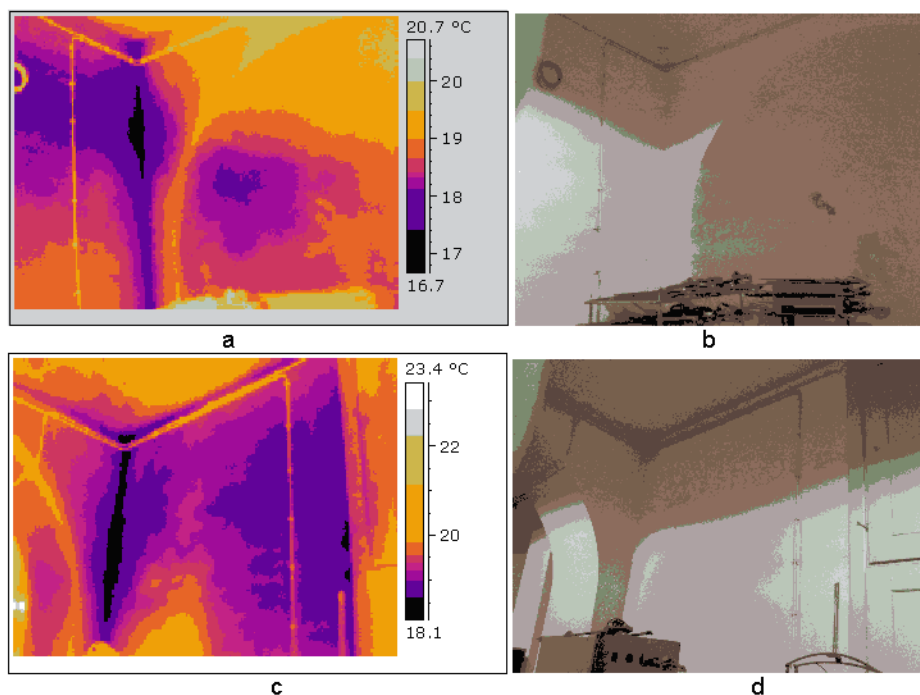


Figure 4 – Thermograms and the photos of the weapons depot with visible moisture
Slika 4 – Termogrami i fotografije depoa naoružanja sa vidljivom vlagom

The presence of moisture in the depot where old metal artifacts are kept, contributes to the acceleration of corrosion and deterioration of exhibits. The thermographic inspection shows that moisture is penetrating from the roof and from the poor leakage location (Fig. 5).

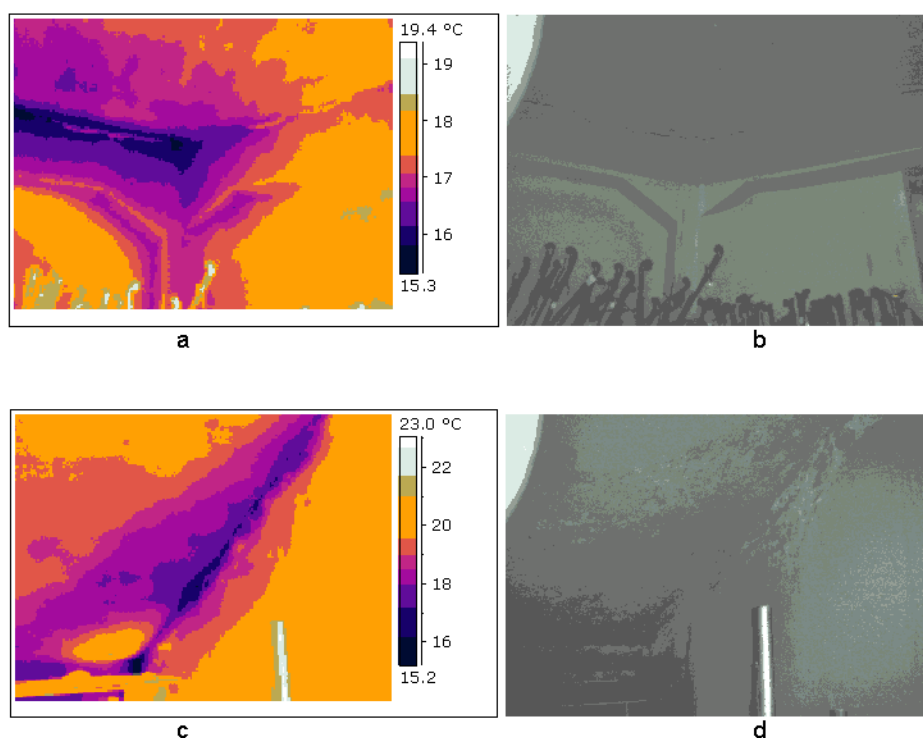


Figure 5 – Some details of the old metal artifacts depot
Slika 5 – Nekoliko detalja depoa sa zbirkom starih metalnih eksponata

Moisture intrusion was detected in most of the inspected museum depots and other rooms,. The active moisture was detected in the depot of gifts, too. During the thermogram recording, the measured temperature was $T_{in}=20.8^{\circ}\text{C}$ and moisture was 53.7%. If the measured moisture retains, and the temperature lowers to $T_{in}= 10.8^{\circ}\text{C}$, then the condensation of moisture from the air appears on the walls. Figs. 6 show a part of the ceiling in the right upper corner with a-thermogram, b-digital photo and c-diagram of the temperature changes along the line tool.

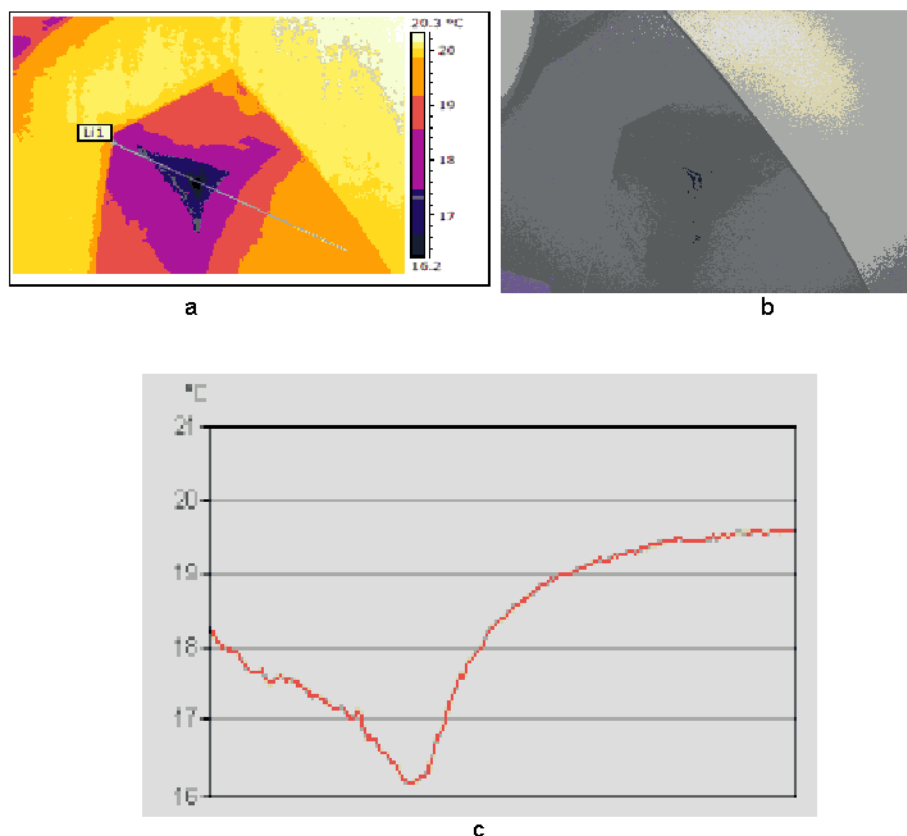


Figure 6 – Part of the gifts depot
Slika 6 – Deo depoa sa zbirkom darova

Fig. 7 shows the presence of moisture in the museum Casemates. The inspection was performed under these meteorological conditions: $T_{ow}=19^{\circ}\text{C}$, $T_{in}=15.4^{\circ}\text{C}$, humidity of 67%, dew point temperature 9.3°C . Metal objects have been kept in the dungeons of the Military Museum at Kalemegdan, and the present moisture has a beneficial effect on the development of corrosion (Polić-Radovanović, Ristić, Jegdić, Nikolić, 2010), (Polić-Radovanović, 2010, p.161), (Jegdić, et al, 2011, pp.50-56), (Jegdić, et al, 2012, pp.169-182).

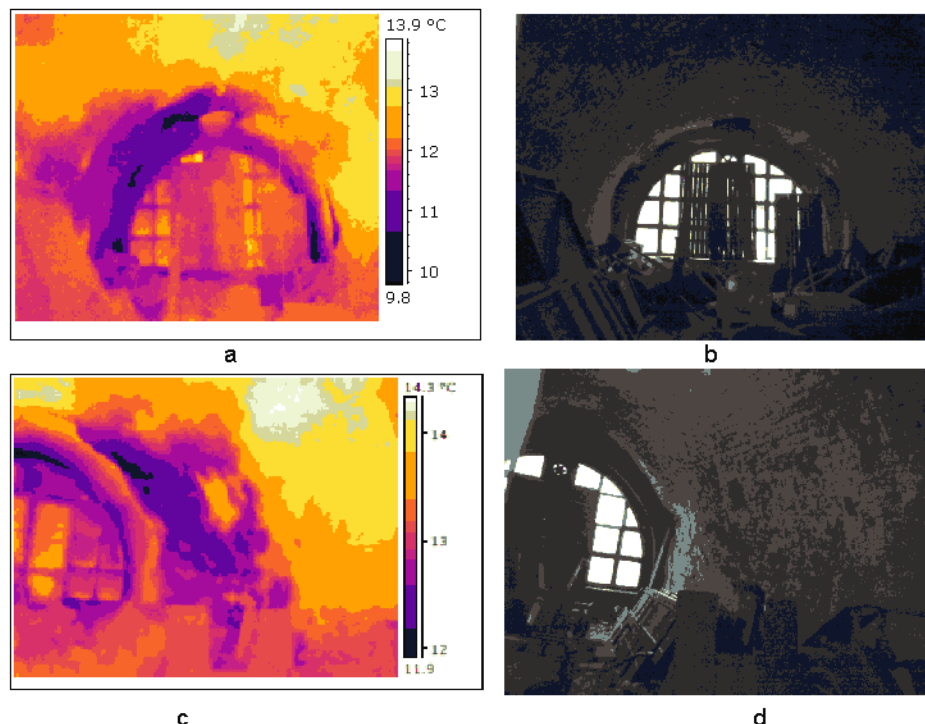


Figure 7 – Moisture in the museum Casemates, a,b – the first casemate
c,d – moisture in the second one
Slika 7 – Vлага u muzejskim kazamatima, a, b – prvi kazamat,
c,d – vлага u drugom kazamatu

Thermal insulation inspection

Missing, damaged or non-performing insulation will clearly be visible, in a thermal image when there is at least 10°C stable temperature difference between the conditioned space and the outside air (Vavilov, 2010, pp.906-910). It is often possible to do work with less of a temperature spread due to differences in the thermal capacitance of building materials. The inspection is typically done from both inside and outside. During the thermographic inspections of the Military museum building, the thermal insulation was registered as well.

The workshop for metal conservation was investigated by thermography. The cold and damp workshop walls are presented in Fig. 8, (a thermogram-, b-digital photo, c-isotherm indicating that moisture covered the area).

The collection of old metal artifacts is stored in the depot where the wall and the roof have poor thermal insulation. Figs. 9a to 9c show the

right corner of the depot. There are stains, but currently there is no moisture in the walls. The wall behind the shelves which restrict the access for thermographic inspection is colder than the other walls because of poor thermal insulation. The part of the door and the poor roof insulation are shown in Figs. 9c and 9d. The same situation is in the depot with the collection of non-European weapons.

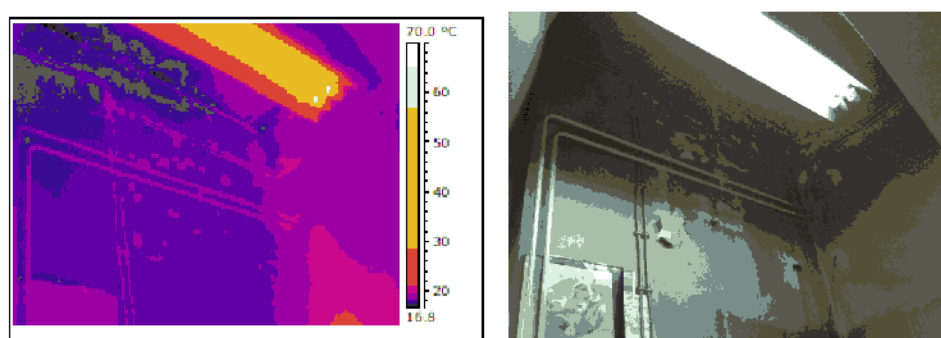
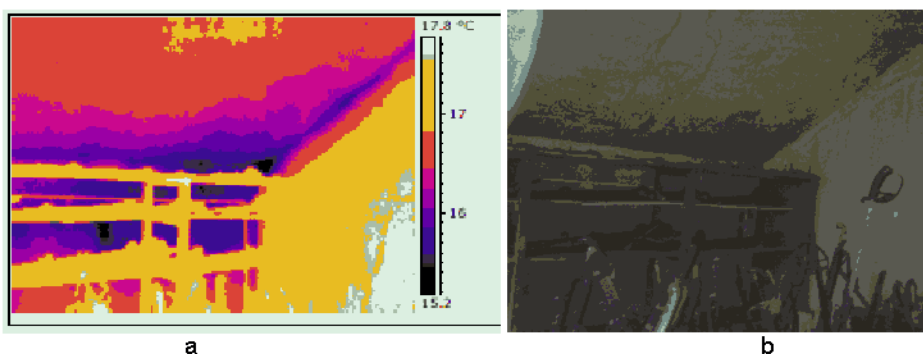


Figure 8 – Appearance of the cold wall in the workshop for metal conservation
Slika 8 – Izgled hladnog zida u radionici za konzervaciju metalnih eksponata



a

b

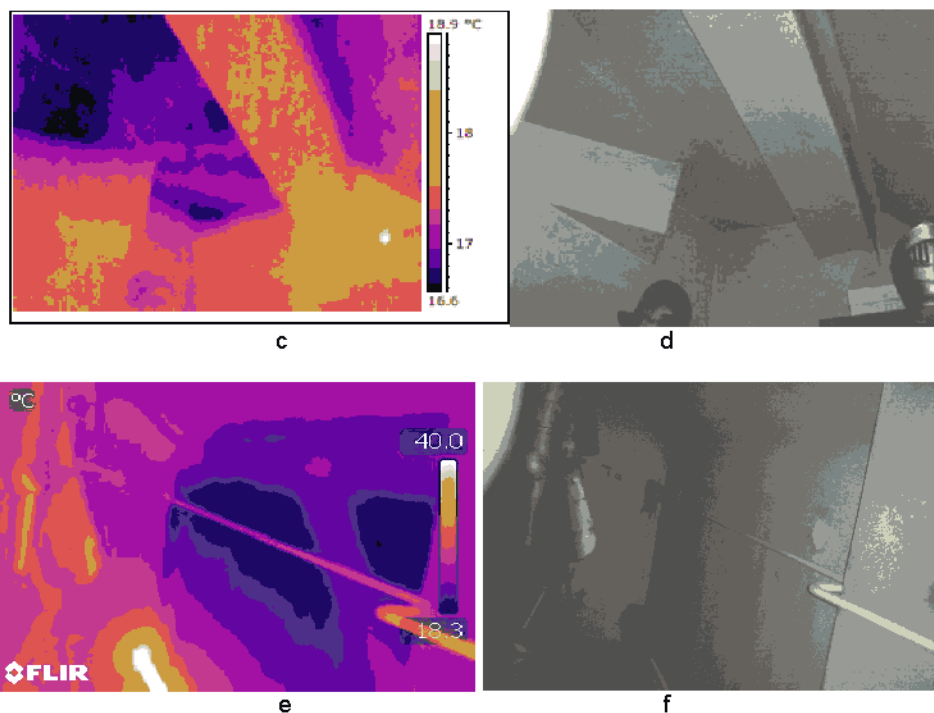


Figure 9 – Depot of old metal artifacts, a,b – side wall, c,d – roof, e,f – wall of the depot with the collection of non-European weapons
Slika 9 – Depo zbirke starih metalnih eksponata, a,b-bočni zid, c,d – krov, e,f – zid depoa sa zbirkom neevropskog naoružanja

The thermal insulation is also very poor in the museum offices. Fig. 10 shows the thermogram and the photo recorded in the museum office located in the attic.

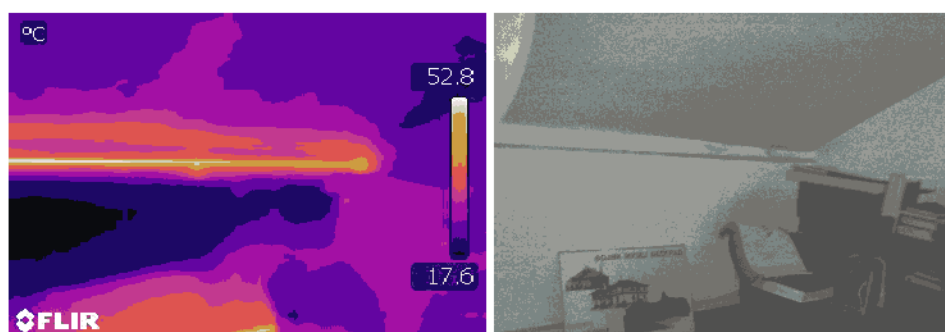


Figure 10 – Office in the attic, poor thermal insulation
Slika 10 – Kancelarija u potkrovlju, loša termalna izolacija

The thermographic tests of the photo collections depot confirm that there is no potential leak, penetration or condensation of moisture, only poor thermal insulation (Fig. 11).

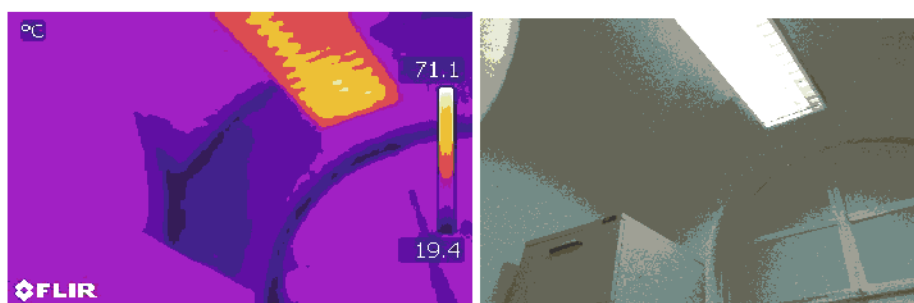


Figure 11 – Poor thermal insulation in the photo collections depot.
Slika 11 – Loša termička izolacija u depou sa zbirkom fotografija

Visual and infrared images of some windows and doors of the museum building show the poorly sealing windows, with an air leakage. This is a very important malfunction for the energy efficiency of the building (Fig 12).

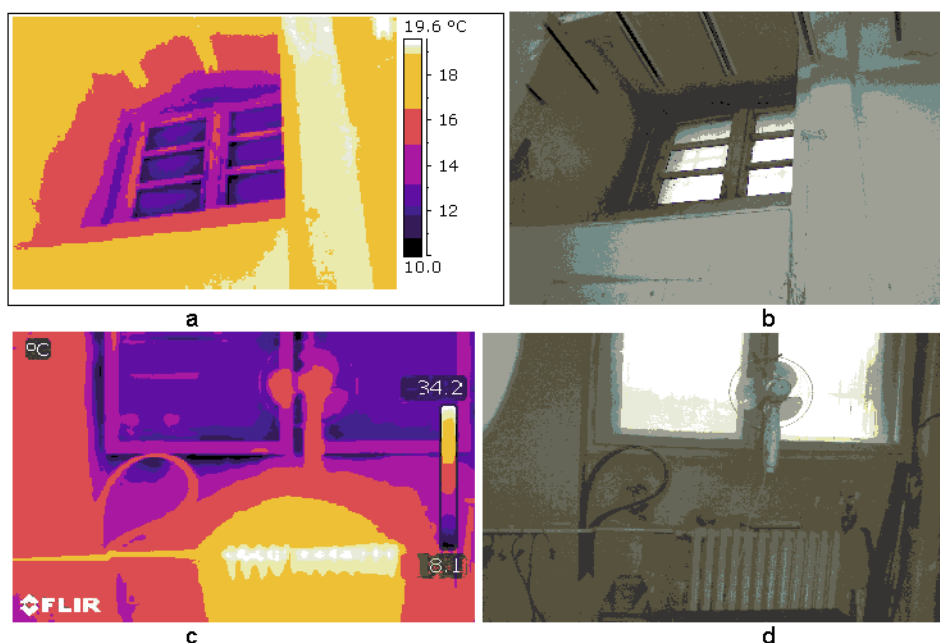


Figure 12 – Poorly sealing windows, cold air leakage, a,b – banners depot and c,d – in the workshop for metal conservation
Slika 12 – Lošo zaptivanje prozora, prodor hladnog vazduha, a,b – depo sa zbirkom ratnih zastava, c,d – radionica za konzervaciju metalnih eksponata

Conclusions

The thermographic tests performed in the Military Museum at Kalemegdan in Belgrade have shown that the energy efficiency of the building is low. A number of depots in the museum building have adequate conditions of humidity and temperature for storing museum exhibits; however, in some depots, galleries and offices, there are poor thermal insulation, wet walls, poor sealing windows and doors where outdoor air penetrates (cold or hot air). The thermography inspection of the building confirmed the presence of moisture in the areas where it cannot be seen by naked eye and the places where the successful operations have been made to stop moisture leaking down the walls or damp penetration.

These elements have a significant impact on the museum building and the microclimate indoor conditions responsible for the development of moisture condensation and object corrosion.

For the preventive and curative maintenance of the museum building current state, it is necessary to perform extensive, detailed thermographic investigation. The obtained results are the reference for future tests and show that IR thermography can be used as a useful technique to ensure the protection of museum exhibits, museum buildings and the environment.

References

- Agema AB, *Infrared systems, User manual for installation and operation of Thermovision®900, Stockholm, electronic series* 1993. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Avdelidis, N.P., & Moropoulou, A. 2004. Review paper: Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures. *Journal of Cultural Heritage*, 5, pp.119-127.
- Bosiljkov, V., Uranjek, M., Tarnić, R., & Bokan-Bosiljkov, V. 2010. An integrated diagnostic approach for the assessment of historic masonry structures. *Journal of Cultural Heritage*, 1, pp. 239-249.
- Ceteras, N., & Wood, S. 2006. Infrared Thermography and Water Damage Assessment. In: *Infra Motion, Proceedings, ITC 115 A*.
- Flir Systems, 2011. FLIR T-Series. *The ultimate IR handbook for R&D professionals*. Retrieved from <http://www.flir.com/l/5392/2012-01-03/34OXW>.
- Grinzato, E., Bressan, C., Marinetti, S., Bison, P.G., & Bonacina, C. 2002. Monitoring of the Scrovegni Chapel by IR thermography: Giotto at infrared. *Infrared Physics & Technology*, 43, pp.165-169.
- Hain, M., Bartl, J., & Jacko, V., 2005. The use of infrared radiation in measurement and non-destructive testing. *Measurement Science Review*, 5(3), pp.10-14.
- Imposa, S. 2010. Infrared thermography and Georadar techniques applied to the 'Sala delle Nicchie' (Niches Hall) of Palazzo Pitti, Florence (Italy). *Journal of Cultural Heritage*, 11, pp. 259-264.

Jegdić, B., Polić-Radovanović, S., Ristić, S., & Alil, A. 2011. Corrosion processes, nature and composition of corrosion products on iron artefacts of weaponry. *Scientific Technical Review*, 61(2), pp.50-56.

Jegdić, B.V., Ristić, S.S., & Polić-Radovanović, S.R. 2012. Corrosion and conservation of weapons and military equipment. *Vojnotehnički glasnik*, 60(1), pp.169-182.

Kittel, C., & Kroemer, H. 1980. *Thermal physics*. New York: W.H. Freeman and Company.

Kutin, M., Ristić, S., Burzić, Z., & Puharić, M. 2010. Testing the tensile features of steel specimens by thermography and conventional methods. *Scientific Technical Review*, 60(1), pp.66-70.

Litos, P., Honner, M., & Kunes, J. 2004. University of West Bohemia: Thermography applications in technology research. *Infra Mation Proceedings ITC*.

Maierhofer, C., & Roellig, M. 2009. Active thermography for the characterization of surfaces and interfaces of historic masonry structures. *NDTCE09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Nantes, France, Jun 30th - July 3rd*. In: *NDTCE09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Jun 30th - July 3rd, Nantes, France*.

Maldague, X.P.V., & Moore, P.O., 2001. *Non Destructive Testing Handbook-Vol. 3 Infrared and thermal testing*. American Society for Nondestructive Testing.

Poli, T., et al., 2007. A portable NMR device for the evaluation of water presence in building materials. *Journal of Cultural Heritage*, 8, pp.134-140.

Polić-Radovanović, R.S., Ristić, S., Jegdić, B., & Nikolić, Z. 2010. *Metodološki i tehnički aspekti primene novih tehnika u zaštiti kulturne baštine*. Beograd: Institut 'Goša'.

Polić-Radovanović, S. 2010. Research unfavorable environmental impact to the cultural heritage in light of international heritological practice. In: *International Scientific Conference on Environment and Biodiversity, Ecologica, Beograd.*, p.161.

Polić-Radovanović, S., Ristić, S., Popović-Živanović, M., & Jegdić, B. 2011. Thermographic diagnosis of objects to cultural heritage protection. *Tehnička dijagnostika*, 10(2), pp.33-40. Retrieved from <http://scindeks.ceon.rs/article.aspx?artid=1451-19751102033P0>.

Ristić, S., & Polić-Radovanović, S. 2009. *Muzejski metalni eksponati u promenljivim temperaturnim uslovima-Vojni muzej u Beogradu*. Beograd: Institut Goša. Studija.

Ristić, S., Polić-Radovanović, S., Jegdić, B., Ristić, R., & Radojković, B. 2012. Moisture Mapping of Aeronautical Museum Depot and Galleries by IR Thermography. *Scientific Technical Review*, 62(2), pp.84-90.

Švaić, S., & Boras, I. 2006. *Ic termografija-primjena kod očuvanja kulturne baštine*. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje.

Thermography Level I, Course Manual 2006. Stockholm: Infrared Training Publ No1 560 093 D.

Titman, D. 2001. Applications of thermography in non-destructive testing of structures. *Journal of NDT & E International*, 34, pp. 149-154.

Vavilov, A. 2010. A Pessimistic View of the Energy Auditing of Building Structures with the Use of Infrared Thermography. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 46(12), pp.906-910.

http://www.muzej.mod.gov.rs/webcms/smarty/478_kprint-page_len/index.html
(visited: 15.10.2012)

TERMOGRAFSKO ISPITIVANJE ENERGETSKE EFIKASNOSTI ZGRADE VOJNOG MUZEJA

OBLAST: energetska efikasnost
VRSTA ČLANKA: stručni članak

Sažetak:

Infracrvena termografija, kao dijagnostička tehnika, služi za ispitivanje energetske efikasnosti zgrada i unutrašnjih mikroklimatskih uslova. Korišćena je za otkrivanje nepravilnosti toplotnih karakteristika zgrade Vojnog muzeja u Beogradu, s ciljem da se pronađu nepravilnosti ili nedostaci, kao što su vlažni materijali, šupljine, oštećenja ili nedostatak toplotne izolacije. Ova ispitivanja su veoma važna za preventivno održavanje zgrade, kao i za sprečavanje nepovoljnih uticaja iz okruženja na objekte istorijskog i kulturnog nasleđa, koji izazivaju oštećenja na strukturi i materijalu i dovode do nagomilavanja štetnih zagađivača na objektima koji su smešteni u muzejskim depoima ili izloženi u galerijama. Na primer, vlaga i promenljivi temperaturni uslovi glavni su uzroci pojave i razvoja korozije u zgradama od istorijskog značaja i muzejskim eksponatima. Ovaj rad prikazuje rezultate termografskih ispitivanja zgrade Vojnog muzeja, gde se nalaze veoma značajni metalni eksponati. Rezultati pokazuju da postoji veoma loša toplotna izolacija, vlaga u zidovima i slaba energetska efikasnost.

Infracrvena termografija je tehnika ispitivanja bez razaranja, koja je postala veoma značajna za ispitivanje karakteristika elemenata građevinskih objekata, defekata i vlage u strukturi. Ovom tehnikom proverava se kvalitet zaptivanja i termičke izolacije i određuje energetska efikasnost.

Infracrvena termografija je veoma značajna za beskontaktno ispitivanje u mnogim oblastima nauke, u industriji, biologiji i medicini, u vojnim aplikacijama, u zaštiti kulturne baštine itd. Termografija je idealna kao tehnika za monitoring različitih procesa i postrojenja, kao i za ispitivanje energetske efikasnosti zgrada. Napredak tehnologije izrade termografskih kamera doprineo je, u velikoj meri, efikasnijoj primeni ove tehnike. Danas su IC kamere portabl instrumenti sa visokom rezolucijom, koji mogu veoma brzo i precizno da snime i reprodukuju temperaturnu sliku ispitivanog objekta.

Problemi vezani za degradaciju i oštećenja materijala u građevinarstvu povezani su sa prisustvom vlage u zidovima. Ovaj problem je od

posebnog značaja za objekte koji predstavljaju kulturnu baštinu ili se koriste za čuvanje i prikazivanje predmeta kulturne baštine.

U ovom radu prikazani su rezultati termografskih ispitivanja Vojnog muzeja na Kalemegdanu u Beogradu. Ovaj muzej je od posebnog značaja za očuvanje istorijske i kulturne baštine, jer u svojoj zbirci sadrži više hiljada primeraka naoružanja od neolita do najsavremenijih modela, zbirku zastava, fotografija i dokumenata.

Blizina Dunava i visok nivo podzemnih voda predstavljaju konstantnu opasnost da se vlaga u zgradi muzeja poveća i ošteti muzejske eksponate plavljenjem ili pojavom korozije. Zbog toga je neophodan kontinuirani monitoring zgrade muzeja. Analiza rezultata termografskih ispitivanja zgrade Vojnog muzeja koji su, pre svega, fokusirani na ispitivanje prisustva vlage u depoima i galerijama, pokazala je da postoji realna opasnost od oštećenja zgrade i eksponata. Vlaga je otkrivena u prostorijama biblioteke, depou naoružanja, depou sa zbirkom starih metalnih eksponata, sa zbirkom darova, u depou sa zbirkom neolitskog naoružanja, kao i u radionici za konzervaciju metalnih eksponata. Kapilarna vlaga je prisutna u kazamatima, a u depoima i kancelarijama u potkrovlju postoji curenje kroz oštećenja na krovu i spoju zidova. Na više mesta snimljeni su termički mostovi (betonske grede), koji su potencijalna mesta za kondenzaciju vlage iz vazduha i za gubitak toplote u promenljivim zimskim uslovima. Slaba termička izolacija snimljena je u nekoliko kancelarija, depou sa zbirkom neolitskog naoružanja, depou sa zbirkom fotografija i još u nekoliko prostorija.

Termografska snimanja izvršena su dva puta, u različitim atmosferskim uslovima i dobijeni rezultati ukazuju na slabu energetska efikasnost zgrade Vojnog muzeja i opasnost od oštećenja muzejskih eksponata zbog prisustva vlage u depoima i galerijama.

Ključne reči: termografija, muzej, vojni artefakti, energetska efikasnost zgrade, izolacija, kvašenje

Datum prijema članka/Paper received on: 16. 11. 2012.

Datum dostavljanja ispravki rukopisa/Manuscript corrections submitted on: 18. 12. 2012.

Datum konačnog prihvatanja članka za objavljivanje/ Paper accepted for publishing on: 20. 12. 2012.

SIGURNOST PROTOKOLA RUTIRANJA U AD HOC MREŽAMA I MOGUĆI NAPADI U MREŽI

Radiša R. Stefanović, Visoka tehnička škola
strukovnih studija, Požarevac

Boban Z. Pavlović, Univerzitet odbrane u Beogradu,
Vojna akademija, Katedra telekomunikacija i informatike,
Beograd

DOI: 10.5937/vojtehg61-1826

OBLAST: telekomunikacije

VRSTA ČLANKA: stručni članak

Sažetak:

U članku se opisuju ad hoc mreže, specifične po svojoj mobilnosti, iznenadnoj promeni stanja i samoorganizovanju. Zbog svojih svojstava protokoli rutiranja u ad hoc mrežama moraju biti prilagođeni primenama i zadovoljavati sigurnosne zahteve – tajnost, integritet i raspoloživost. Navedena su svojstva i izazovi za razvoj protokola koji bi se suprotstavili napadima, posebno u vojnim primenama. Opisani su neki od poznatih napada i navedena jedna od metoda za ispitivanje sigurnosti protokola rutiranja.

Ključne reči: protokoli, ad hoc mreže, sigurnost.

Uvod

Ad hoc mreže su privremene mreže uspostavljene za neku određenu svrhu. Učesnici u mreži, mobilne stanice, ulaze i izlaze iz mreže, pomeraju se, stvaraju nove i raskidaju stare veze. Bez infrastrukture i centralnog upravljanja, moraju same da prikupljaju informacije o susednom čvoru i da upravljaju komunikacijom. Usled sve većih potreba za komunikacijom na mestima gde ne postoji infrastruktura, kao što su mesta nesreće, požari, poplave, poljoprivredno zemljište i svakako za potrebe vojske, naglo se povećava broj bežičnih uređaja. Komunikacija po principu bilo gde i bilo kada sve je traženija. U radu će težište biti na ad hoc mrežama za potrebe vojske. Za ove mreže je tipično da moraju prenositi taktičke informacije i u uslovima protivničkih dejstava, što zahteva da protokoli u ad hoc mrežama pružaju sigurnost. Svakako da je razvoj interneta i bežičnih komunikacija doveo i do ubrzanog razvoja zlonamernih postupaka kojima je cilj pristup neovlašćenim informacijama, ometanje i onemogućavanje komunikacija ili promena podataka u ličnom interesu.

Specifičnosti *ad hoc* mreža

Bežične *ad hoc* mreže jesu dinamične samoorganizujuće mreže ravnopravnih čvorova (Omidyar, 2000). Formiraju se bez prethodnog planiranja, bez postojanja infrastrukture, tako da svaki čvor podjednako učestvuje u prosleđivanju saobraćaja. Osim što šalje svoje podatke i podatke svojih korisnika, ponašajući se kao domaćin (eng. *host*), mora usmeriti i proslediti kontrolne podatke drugih čvorova (eng. *router*). Usmeravanje se dinamički prilagođava stanju mreže u zavisnosti od njenih promena, promenom položaja, prestankom rada ili dolaskom novih čvorova. S obzirom na to da se komunikacija ostvaruje preko bežične veze javlja se i problem šuma, slabljenja i interferencije. Sve to zahteva specifične protokole koji mogu odgovoriti navedenim izazovima. Osnovne karakteristike *ad hoc* mreža su: mobilnost, višeskokovitost, decentralizacija i samoorganizovanost. Prema primeni, razlikujemo mobilne *ad hoc* mreže (eng. **Mobile Ad hoc NETWORKS** – MANET), pristupne mreže (*mesh* mreže) i senzorske mreže.

Mobilne *ad hoc* mreže

MANET tehnologija izvedena u formi „petljastih” mobilnih mreža ponaša se kao robustna i isplativija alternativa koja unapređuje mobilnu mrežnu infrastrukturu baziranu na ćelijskom principu. Takođe, postojeće i buduće umrežavanje u vojnim komunikacijama zahtevaće robustniji i IP podržani prenos podataka u mobilnom bežičnom okruženju sa visoko autonomnim segmentima mrežne topologije. U kombinaciji sa satelitskim prenosom, MANET tehnologija može da obezbedi najfleksibilniji metod uspostavljanja komunikacija u slučaju bezbednosnih, protivpožarnih i spasilačkih operacija kada se zahteva funkcionalno otporno i efikasno dinamičko umrežavanje (Snow, Varshney, Malloy, 2000).

Kao što je prethodno rečeno, MANET predstavlja autonomni sistem mobilnih čvorova koji imaju mogućnost slobodne i proizvoljne promene lokacije. Sistem može da funkcioniše izolovano ili preko interfejsa i mrežnih prelaza da komunicira sa fiksnom mrežom. Bežična veza ostvaruje se na bazi slučajnog položaja mobilnih čvorova, odnosno *ad hoc* mreže, u zavisnosti od predajne snage čvorova i parametara prijema (Corson, Macker, 2009).

MANET mreže karakterišu sledeće značajne osobine:

1. Dinamična topologija: čvorovi imaju osobinu slobodnog kretanja i na taj način se mrežna topologija (koja je zapravo *multihop*) može slučajno i brzo menjati, pri čemu sadrži jednosmerna i dvosmerne linkove. Pokretljivost čvorova može obuhvatiti veliki raspon, od malog kretanja pešačka po prostoriji do velike pokretljivosti automobila na auto-putu.

2. Ograničen propusni opseg – promenljivi kapacitet linkova: ostvarena propusnost bežičnih komunikacija zbog uticaja efekata višestrukog pristupa, fedinga, šuma i interferencije najčešće je manja od maksimalne brzine radio-prenosa.

3. Ograničena energija: čvorovi u MANET mreži zavise od baterijskog ili nekog drugog izvora napajanja, tako da je najvažniji optimizacioni kriterijum prilikom projektovanja sistema održavanja energije.

4. Ograničena sigurnost komunikacije: uopšteno, mobilne bežične mreže osetljivije su na pretnje sigurnosti u odnosu na žične. Međutim, prednost MANET mreža predstavlja decentralizovana upravljačka priroda kojom se obezbeđuje dodatna robustnost pri pojavi pojedinačnih otkaza u odnosu na centralizovani pristup.

Zbog stalne promene stanja mreže, stanice moraju da prepoznaju prekid veze sa stanicom sa kojom su prethodno bile u vezi (najčešće se radi o susednoj stanici) i da pronađu novi alternativni put prema odredištu.

Mesh mreže

Bežične pristupne mreže (eng. *Wireless Mesh Networks* – WMN) razvijene su radi pružanja komunikacionih usluga na područjima gde se ulaganje u infrastrukturu ne isplati ili je neizvodljivo. Sastoje se od čvorova usmerača (eng. *Mesh Router* – MR) koji obezbeđuje bežičnim stanicama preko mrežnog prolaza (eng. *gateway*) pristup spoljašnjoj mreži, najčešće internetu. Za razliku od MANET mreže nema energetske ograničenja, statičnija je i može imati više primopredajnika u jednom čvoru. Saobraćaj u ovim mrežama uglavnom je usmeren od provajdera i prema provajderu, pa su i čvorovi blizu provajdera sa najvećim opterećenjem. Mesh mreža mora imati veću propusnost, jer joj istovremeno pristupa veći broj korisnika, zbog svoje prvenstvene namene pristupa internetu.

Senzorske mreže

Bežične tehnologije omogućile su razvoj senzorskih stanica male potrošnje energije i komunikacije malog dometa. Senzorske stanice su jednostavne strukture i sastoje se od senzora, mikroprocesora za obradu podataka i komunikacionog dela. Primena senzorskih mreža je najviše zastupljena u proizvodnim procesima, kao što su industrijsko upravljanje i nadzor. U vojsci je primena uglavnom ograničena na nadzor i kontrolu ulaska u određene prostorije radi sigurnosti, kao i nadzor područja radi mogućeg ugrožavanja zdravlja zaposlenog ljudstva.

Algoritmi rutiranja u MANET mrežama

Efikasno rutiranje jedno je od glavnih pitanja koje treba rešiti u *ad hoc* mrežnoj arhitekturi (Tipper, et al, 2002), (Trivedi, 2001). U mobilnim mrežama izdvajaju se tri grupe protokola rutiranja: proaktivni ili tablični (*table-driven*), reaktivni ili protokoli na zahtev (*on-demand*) i hibridni protokoli, čije su osnovne karakteristike prikazane u tabeli 1.

Tabela 1

Osnovne karakteristike proaktivnih, reaktivnih i hibridnih protokola rutiranja

Table 1

Basic characteristics of proactive, reactive and hybrid routing protocols

Algoritam Karakteristika	Proaktivni	Reaktivni	Mešoviti
Topološka zavisnost	Periodično	Po zahtevu	Oba
Organizacija mreže	Jednonivovska/ hijerarhijska	Jednonivovska	Hijerarhijska
Upravljanje mobilnošću	Periodično ažuriranje	Održavanje putanje	Oba
Pristup putanji	Uvek dostupan	Dostupan po potrebi	Oba
Komunikaciono opterećenje	Visoko	Nisko	Srednje

U proaktivnim protokolima rutiranja put prema odredištu određuje se čim se čvor uključi u mrežu i održava se tokom rada povremenim obnavljanjem puta (tabela rutiranja je u svakom trenutku ažurna). U reaktivnim protokolima rutiranje se odvija prema potrebi slanja podataka. Kada čvor želi poslati podatke odredištu, ako ne postoji dostupan put, protokol pokrene proces nalaženja puta prema odredištu. Hibridni protokoli rutiranja kombinuju prethodno navedene načine rada.

Proaktivni protokoli rutiranja

U konvencionalnim mrežama za rutiranje se najčešće koriste algoritmi najkraćeg rastojanja (*distance vector*) i stanja linka (*link state*) koji podrazumevaju periodično ažuriranje tabela rutiranja (Das, et al, 2000), (Haas, Pearlman, 2000). U nekim slučajevima izvršena je adaptacija algoritama za upotrebu u *ad hoc* mrežama, gde se svaki mobilni čvor posmatra kao ruter. Ovakvi algoritmi pripadaju klasi proaktivnih, odnosno *table-driven* algoritama, čiji su predstavnici DSDV (*Destination-Sequen-*

ced Distance Vector), WRP (Wireless Routing Protocol), FSR (Fisheye State Routing), OLSR (Optimized Link State Routing) i GSR (Global State Routing) protokol.

DSDV (Destination-Sequenced Distance Vector)

Tabela rutiranja kod DSDV algoritma sadrži sledeći skok (*hop*), cenu putanje i određeni broj sekvence (Perkins, Bhagwat, 1994), (Guoyou, 2007). Dodeljivanje brojeva sekvenci ima zadatak da napravi razliku između neaktivnih i najnovijih putanja, kao i da se izbegne formiranje petlji. Tabele rutiranja ažuriraju se na dva načina: potpuni prenos (*full dump*), pri čemu se prenose sve dostupne informacije, dok drugi način podrazumeva samo prenos promena (*incremental dump*) u odnosu na prethodni sadržaj tabele rutiranja.

WRP (Wireless Routing Protocol)

WRP algoritam formira tabele rutiranja koje sadrže rastojanje do određenoćeg čvora, cenu linka i liste prenetih poruka – MRL (*Message Re-transmission List*). MRL sadrži informacije o susednim čvorovima koji nemaju ažurne poruke. Pri prijemu poruke ažuriranja, čvor modifikuje tabelu rutiranja i traži nove, poboljšane putanje u skladu sa informacijama. Ukoliko nema promene u tabeli rutiranja, vrši se prenos *Hello* poruke kojom se obezbeđuje održanje povezanosti. Nakon detekcije bilo kakve promene na linku, čvor proverava prisutnost svojih suseda, čime se eliminišu petlje i povećava brzina konvergencije. Nedostatak WRP algoritma je potreba za velikom količinom resursa pri obradi podataka i ograničena skalabilnost.

FSR (Fisheye State Routing)

FSR algoritam karakteriše smanjenje veličine poruke ažuriranja (tehnika ribljeg oka – *fish-eye*) u zavisnosti od udaljenosti mobilnog čvora. Time se vrši pravovremeno ažuriranje poruka sa bliskih čvorova, ali se formira i veliko kašnjenje sa udaljenih. Međutim, manje precizni podaci o najboljoj putanji ka udaljenom odredištu postaju detaljniji kako se paket približava odredištu. FSR obezbeđuje bolju skalabilnost u odnosu na veličinu mreže, jer ne čuva informacije o svim mrežnim čvorovima na istom nivou. Umesto toga, preciznost informacija o stanju linka je obrnuto proporcionalna rastojanju, čime se smanjuje preopterećenje, jer se informacije razmenjuju češće kod bliskih, nego u slučaju udaljenih čvorova.

OLSR (Optimized Link State Routing)

OLSR algoritam karakteriše optimalno rutiranje u zavisnosti od stanja veza. Svaki čvor odabira među svojim susedima onoga koji je zadužen za prosleđivanje kontrolnih paketa. Svaki čvor prati koji su ga čvorovi odabrali za dalje prosleđivanje kontrolnih paketa i stanje veza samo prema njima. Samo te veze dužan je da objavi mreži. Optimizacija dolazi do izražaja sa većom gustinom čvorova u mreži.

GSR (Global State Routing)

GSR algoritam temelji se na razmeni informacija o stanju svih veza, pomoću kojih čvorovi održavaju globalnu sliku mrežne topologije i lokalno odlučuju o rutiranju. Za razliku od protokola DSDV, paketi stanja veza se ne šalju svima u mreži, već samo susednim čvorovima.

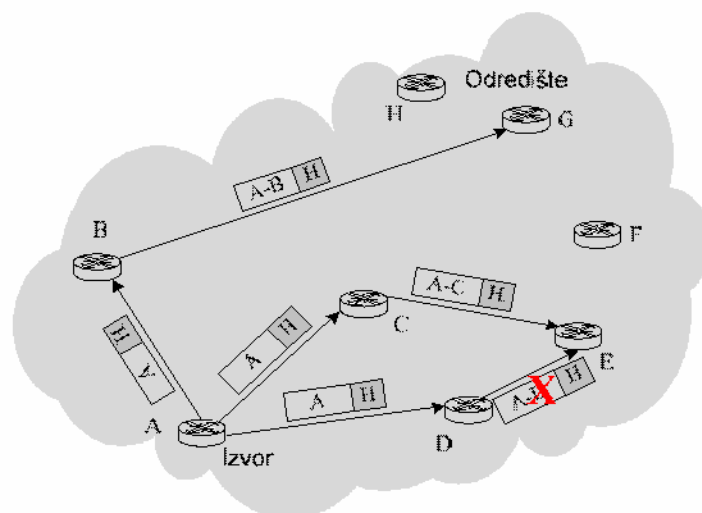
Proaktivni algoritmi rutiranja kod konvencionalnih mreža obrađuju veoma retko promene mrežne topologije. Proaktivno rutiranje bazira se na tabelama rutiranja (*table-driven*) za koje je karakteristično dodatno opterećenje kontrolnim paketima. Čvorovi u kontinuitetu određuju putanje ka svim dostupnim čvorovima i pokušavaju da održe najažurnije informacije, tako da izvorni čvor može trenutno dobiti željenu putanju rutiranja. Međutim, nedostaci ovih algoritama mnogo su veći od prednosti. Prvo, veliko je dodatno zauzimanje propusnog opsega (periodične informacije o ažuriranju topologije šalju se uvek, bez obzira na to da li se dogodila promena). Zatim, brže je iskorišćenje kapaciteta baterija, jer se čvorovi aktiviraju za prijem/predaju informacija o rutiranju koje nisu uvek potrebne. Sledeći nedostatak je slabija skalabilnost mreže (velika količina informacija u mreži je direktno srazmerna broju mrežnih čvorova), kao i postojanje redundantnih putanja usled velikog broja rutera (mobilni čvor-ruter) i nemogućnost brzog odgovora na dinamičke promene u mrežnoj topologiji. U slučaju MANET mreža, primena navedenih algoritama zahteva mehanizme koji će dinamički sakupljati informacije o promenama i slati ažurne podatke na bazi promena.

Reaktivni protokoli rutiranja

Zbog prethodnih razloga pojavljuju se *on-demand* protokoli za rutiranje, odnosno protokoli po zahtevu (reaktivni). Osnovna ideja podrazumeva da se ne koristi periodično oglašavanje putanja, već se putanja otkriva samo kada je potrebna, tj. na zahtev. Na taj način smanjuje se mrežni saobraćaj, ali se postavlja pitanje efikasnosti protokola, kao i kašnjenje pri određivanju putanje. Najpoznatiji *on-demand* algoritmi rutiranja u MANET mrežama su DSR (*Dynamic Source Routing*), AODV (*Ad hoc On-demand Distance Vector*), TORA (*Temporally Oriented Routing Algorithm*), LAR (*Location-Aided Routing*) i ABR (*Associatively-Based Routing*).

DSR (Dynamic Source Routing)

DSR algoritam rutiranja baziran je na konceptu izvornog (*source*) rutiranja u kojem pošiljalac definiše sekvencu čvorova kroz koje će paket biti poslat (Johnson, Maltz, Hu, Jetcheva, 2009). Sekvenca se nalazi u keš memoriji (tabela rutiranja) na svakom čvoru. Proces rutiranja sastoji se od dve faze: otkrivanja i održavanja rute.

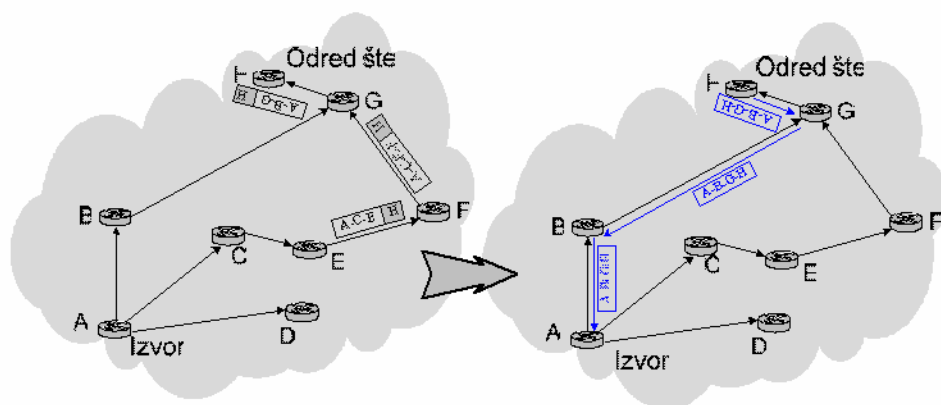


Slika 1 – Proces otkrivanja rute kod DSR algoritma rutiranja
Figure 1 – Process of route discovery in the DSR routing algorithm

Putanja se otkriva dinamički i to samo onda kada je potrebna. Ukoliko pošiljalac namerava da pošalje paket, proverava svoju tabelu rutiranja i, ukoliko postoji sekvencu ka odredištu, putanja je određena i paket će prelaziti preko poznatih čvorova. Ako u keš memoriji ne postoji odgovarajuća sekvencu, pošiljalac inicira otkrivanje rute slanjem paketa zahteva za rutom, RREQ (*Route REQuest*) preko svojih suseda kroz mrežu. RREQ paket mora da sadrži adresu pošiljaoca, odredišta, kao i memoriju za skladištenje adresa prikupljenih na putu u polju snimanje rute (*route record*). Sadržaj polja *route record* stalno raste, tj. ažurira se dok paket ne stigne do odredišta. Odredišni čvor generiše paket RREP (*Route REPLY*) odgovor na rutu radi obaveštavanja pošiljaoca o otkrivenoj ruti.

Postoje dve mogućnosti slanja RREP paketa. Prvo, RREP se može vratiti inverznom rutom prema polju *route record* iz RREQ paketa. Međutim, to je moguće samo ako je kvalitet prenosa isti u oba smera, odnosno ako su bežični linkovi apsolutno simetrični, što najčešće nije slučaj. Drugi način je uključivanje originalnog paketa RREQ u RREP koji odredišni čvor šalje izvorišnom. Kada izvorišni čvor dobije inverzni RREQ, on tada zna gde da pošalje RREP. Ovaj metod zove se *piggybacking*.

U fazi održavanja rute definisani su mehanizmi potvrđivanja (*acknowledgement*) i obaveštavanja o grešci na putanji RERR (*Route Error*). Potvrde mogu biti *hop-to-hop* (provera grešaka pri svakom hopu, odnosno prenosu preko bežičnog linka) ili *end-to-end* (provera grešaka samo na predaji i prijemu). Kod provere na svakom hopu, nakon prijema paketa, svaki čvor šalje potvrdu čvoru od kojeg je primio paket u definisanom intervalu (*timeout*). Čvor koji nije primio potvrdu šalje izvorišnom čvoru RERR poruku kojom ga obaveštava koji bežični link više nije funkcionalan. Zatim se može koristiti alternativna putanja (ako postoji) ili se ponovo može pokrenuti proces otkrivanja putanje. U slučaju *end-to-end* kontrole, ne postoji informacija o tome na kom čvoru je došlo do prekida, pa izvorišni čvor može da pretpostavi da je došlo do prekida na poslednjem linku, što nije uvek tačno. Međutim, implementacija ovakve kontrole je mnogo jednostavnija i ne uvodi dodatno opterećenje u mrežu (slika 2).



Slika 2 – Proces održavanja putanje
Figure 2 – Process of maintaining the path

Prednosti DSR algoritma rutiranja:

- veoma laka implementacija,
- mogućnost rada sa asimetričnim linkovima,
- ušteda propusnog opsega i energije (ruteri se ne oglašavaju periodično, već po zahtevu),
- nema dodatnog saobraćajnog opterećenja u mreži kada nema promene mrežne topologije,
- protokol podržava višestruke putanje ka odredištu, tako da nije potrebno otkrivati nove putanje uvek kada dođe do prestanka rada nekog čvora.

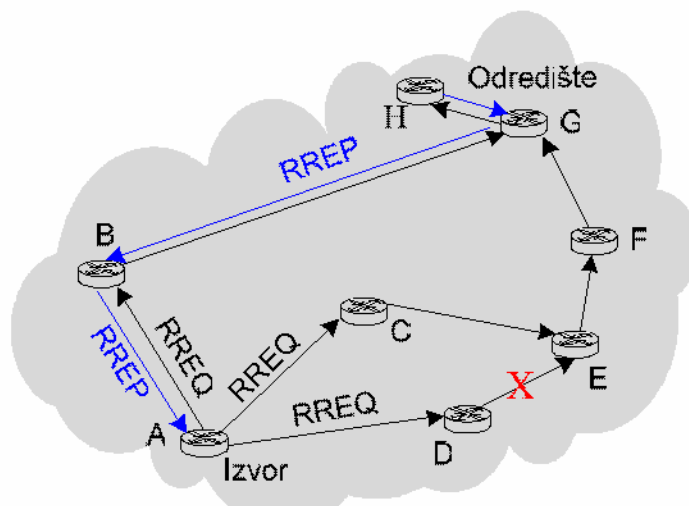
Nedostaci DSR algoritma rutiranja:

- dodatno zauzimanje propusnog opsega (sadržaj RREQ paketa brzo raste prolaskom kroz mrežu, jer čuva adrese svih čvorova kroz koje paket prolazi, usled slanja čitave sekvence čvorova, moguće je da informacija o rutiranju bude znatno veća od korisne poruke),
- skalabilnost (što je mreža veća, potrebno je više bežičnih hopova, tako da će porast veličine poruka u jednom trenutku postati neprihvatljiv za normalnu komunikaciju).

Konačno, DSR protokol je pogodan za primenu u MANET mrežama sa manjim brojem mobilnih čvorova koji se kreću srednjim brzinama.

AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector)

Izvorišni čvor emituje RREQ paket svim susedima radi otkrivanja putanje do odredišta i čeka na odgovor, što je slično DSR algoritmu, kako je prikazano na slici 3. Razlika je, pre svega, u strukturi RREQ paketa (Perkins, Das, 2009), (Perkins, Royer, Das, 2003). Broj sekvence SN (*Sequence Number*) jeste broj koji generiše svaki čvor i koji se uvećava svaki put kada se u njegovom dometu dogodi neka promena (izlazak iz dometa komunikacije ili prestanak funkcionisanja čvora). Odredišni broj sekvence, DSN (*Destination Sequence Number*) jedinstveni je broj koji se čuva u tabeli rutiranja i povezan je sa svakom poznatom putanjom na čvoru. Prema tome, minimalni format RREQ paketa je: RREQ (src, dest, srcSN, dstSN) – adresa izvorišnog čvora, adresa odredišnog čvora, izvorišni broj sekvence i odredišni broj sekvence. RREQ paket više ne sadrži polje *route record*, odnosno nema više informacija o čvorovima kroz koje prolazi, što je možda najbitnija prednost ovog pristupa – paket je manji i propusni opseg se čuva. Osnovna razlika je u tome što DSR čuva celu putanju (sekvencu čvorova), dok AODV pamti samo naredni skok u celoj putanji. Kada RREQ paket stigne do čvora koji ima putanju do odredišnog čvora, vrši se poređenje vrednosti DSN polja i tabele rutiranja tekućeg čvora. Ako je vrednost DSN iz RREQ veća, putanja tekućeg čvora nije dovoljno „sveža” i tada šalje RREQ paket dalje i ažurira DSN vrednost u svojoj tabeli rutiranja. U suprotnom, čvor generiše RREP paket koji šalje izvornom čvoru zajedno sa informacijom o otkrivenoj putanji. Iz prethodnog se može zaključiti da je osnovna namena DSN koncepta odgovor na dinamičke promene mrežne topologije. RREP paket vraća se izvorišnom čvoru preko inverzne putanje koja je formirana prilikom propagacije RREQ paketa. Za svaku putanju u tabeli rutiranja čvor održava listu susednih čvorova koji koriste tu putanju kako bi ih obavestio u slučaju prekida linka na toj putanji. Prekid linka otkriva se odsustvom *hello* poruka koju svaki čvor mora da emituje nakon isteka unapred definisanog intervala.



Slika 3 – Princip određivanja putanje kod AODV algoritma rutiranja
Figure 3 – Principle of determining the path of the AODV routing algorithm

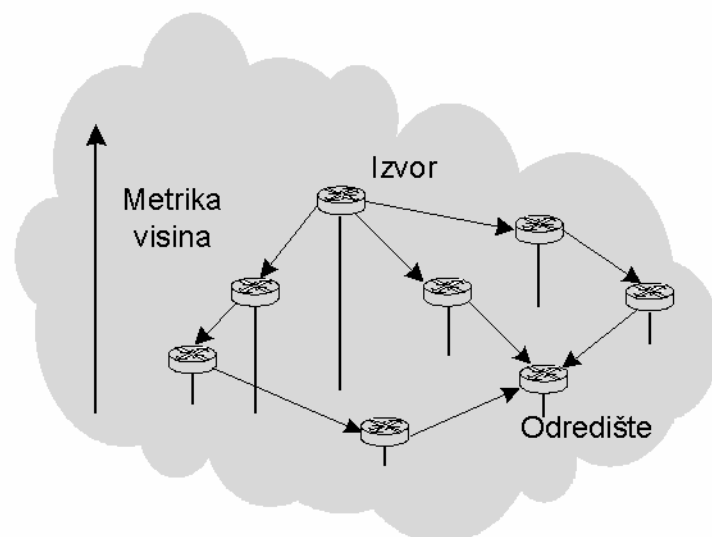
Prednosti AODV u odnosu na DSR algoritam rutiranja:

- znatno manje dodatno mrežno opterećenje, jer su kontrolni paketi i poruke manji,
- pri rutiranju koriste se samo dve adrese, umesto cele putanje. Na ovaj način postiže se dobra skalabilnost, jer veličina paketa ne zavisi od veličine mreže,
- AODV podržava rutiranje ka više definisanih čvorova istovremeno (eng. *multicast*).

Međutim, AODV se može primeniti samo u slučaju simetričnih linkova. Zatim, svaki čvor mora da emituje *hello* poruke, čime se dodatno uvećava opterećenje mreže i smanjuje mogućnost uštede energije u tzv. *sleep* režimu. Takođe, AODV ne omogućava višestruke putanje do istog odredišta, tako da u slučaju kada neki čvor izađe iz dometa ili prestane da funkcioniše, mora se otkriti potpuno nova putanja.

TORA (Temporally Oriented Routing Algorithm)

Ovaj algoritam predstavlja *link-reversal* algoritam, gde se mrežna topologija definiše upotrebom usmerenog acikličnog grafa, u kojem su čvorovi u mreži prikazani kao čvorovi grafa sa usmerenim granama koje predstavljaju linkove. Link je uvek usmeren od čvora sa većom visinom ka čvoru sa manjom visinom. Odredišni čvor ima najmanju visinu u grafu, dok se ostalim čvorovima dodeljuju veće visine u skladu sa porastom rastojanja od odredišta (Park, Corson, 2009).



Slika 4 – Uslovi definisanja TORA algoritma
Figure 4 – Conditions for the TORA algorithm

Formiranje grafa započinje kada svi čvorovi u mreži u grafu imaju neodređenu visinu (NULL), izuzev odredišnog koji ima visinu nula (ZERO), manju od vrednosti NULL. Izvorišni čvor emituje paket QRY (*Query*) susedima, pri čemu se prenosi kroz mrežu i markira sve potencijalne čvorove za otkrivanje putanje postavljanjem *route request flag* na svakom čvoru. Kada QRY paket stigne do čvora sa bar jednim silaznim linkom, čvor emituje paket UPD (*Update*) koji se vraća unazad kroz mrežu i postavlja visine svih čvorova čiji je *route request flag* setovan. Sada svak čvor dobija veću visinu od prethodnog, pri čemu se formira jedna silazna putanja između izvorišnog i odredišnog čvora. Uslovi definisanja TORA algoritma prikazani su na slici 4.

Navedenim mehanizmom omogućava se formiranje više silaznih putanja do svakog odredišnog čvora, odnosno podržava se *multipath* rutiranje. U slučaju prekida linka, ako čvor ima bar jednu silaznu putanju, ne ponavlja se proces otkrivanja putanje, već se emituje UPD paket i oporavlja mrežni graf.

Prednosti TORA algoritma:

- proces otkrivanja putanje je veoma brz,
- mogućnost rutiranja po više putanja (eng. *multipath*),
- oporavak grafa u slučaju otkaza linka je na lokalnom nivou,
- algoritam podržava rutiranje u više skokova (eng. *multicast*).

Osnovni nedostatak algoritma je zahtev za spoljašnjim mehanizmom sinhronizacije merenja vremena, kao što je GPS (*Global Positioning*

System), usled čega znatno poskupljuje konfiguracija algoritma. Takođe, sa porastom vremena, mrežni graf postaje sve manje optimalan. Problem se može rešiti slanjem *refresh* paketa za osveženje grafa, što unosi dodatno opterećenje za mrežu.

Osnovna primena TORA algoritma je kod velikih mreža sa gusto raspoređenim čvorovima, gde prethodni algoritmi ne daju dobre rezultate. Za ovakav mrežni scenario potrebno je opremiti svaki mrežni čvor GPS prijemnikom i implementirati TORA algoritam.

LAR (Location-Aided Routing)

LAR za rutiranje koristi podatke o lokaciji radi povećavanja efikasnosti smanjenjem kontrolnih paketa. Kao i prethodni algoritam, zahteva stalnu dostupnost globalnog sistema za pozicioniranje (GPS).

ABR (Associatively-Based Routing)

ABR je usmereni protokol, koji novu putanju uspostavlja prema kriterijumu stabilnosti bežične veze. Stabilnost određuje na osnovu poznavanja karakteristika uspostavljene veze u nekom intervalu.

Hibridni (Mešoviti) protokoli rutiranja

Može se zaključiti da su prethodno navedeni protokoli rutiranja korisni i primenljivi u određenim slučajevima i situacijama. Ali, kako neke od situacija često nisu jednostavno određene, to se kombinacijom svojstava gornjih protokola može postići bolja efikasnost. Tada za komunikaciju u jednom delu mreže upotrebljavaju proaktivne protokole rutiranja, a u ostalom delu reaktivne protokole rutiranja. Najpoznatiji algoritmi hibridnih protokola rutiranja su zonski protokol rutiranja ZRP (*Zone Routing Protocol*), ADV (*Adaptive Distance Vector*) i CEDAR (*Core Extraction Distributed Ad hoc Routing*).

ZRP (Zone Routing Protocol)

ZRP protokol primenjuje reaktivni ili proaktivni protokol rutiranja u zavisnosti od toga da li je odredište unutra ili van zone područja određene udaljenosti. Unutar zone komunikacija se obavlja proaktivnim, a van zone reaktivnim protokolom rutiranja.

ADV (Adaptive Distance Vector)

ADV protokol karakterističan je po adaptivnom mehanizmu, kojim se smanjuje broj kontrolnih paketa ako se opterećenje mreže povećava.

CEDAR (Core Extraction Distributed Ad hoc Routing)

CEDAR protokol zasniva se na izboru jezgrenih čvorova, koji čine najmanji dominirajući skup čvorova, sa osobinom da se svaki čvor nalazi u dominantnom skupu ili je bar susedan čvoru iz dominantnog skupa. Jezgreni čvorovi nalaze rutu i usmeravaju saobraćaj za čvorove koji su sa njima povezani, kao njihovi članovi.

Sigurnost rutiranja u ad hoc mrežama

Pod pojmom sigurnost prenosa informacija uglavnom se podrazumeva ispunjavanje tri najbitnija sigurnosna zahteva. To su tajnost (*confidentiality*), integritet (*integrity*) i raspoloživost (*availability*).

- Tajnost podrazumeva zaštitu podataka od neovlašćenog pristupa i korišćenja. Do podataka treba da dođe samo onaj kome su oni i namenjeni. U vojsci se tajnost gotovo uvek obezbeđuje šifrovanjem (Terzić, 2011), a ključevi se neprestano menjaju. Ako neovlašćena osoba čak i dođe do podataka, bez poznavanja kriptografskog ključa ne može ih upotrebiti.
- Integritet štiti podatke od neovlašćene promene. Autentičnost podataka postiže se primenom kodova (*message authentication code*) ili digitalnim potpisima.
- Raspoloživost predstavlja zahtev da željena usluga bude uvek dostupna. Nedostupna usluga može biti štetna, kao i krađa (povreda tajnosti) i lažno predstavljanje (povreda integriteta). Uskraćivanje pristupa usluzi (*denial of service*) teško se otkriva, jer se ne zna da li je nedostupnost podacima posledica napada ili nekog spoljnog uticaja.

Napadi u ad hoc mrežama

Zbog načina prenosa otvorenim medijem, bežična mreža je podložna raznim napadima, a među najvažnije se ubrajaju:

- preplavlivanje – napad kojim neprijatelj opterećuje mrežu lažnim zahtevima za traženje puta ili neprekidno šalje pakete sa ciljem da preoptereći rutiranje u čvorovima;
- lišavanje sna – radnja kada napadač kontinuirano šalje kontrolne pakete i ne dozvoljava uštedu energije i gašenje delova koji ne moraju biti aktivni;
- crna rupa – napad kada lažnim odgovorima neprijatelj tvrdi da je preko njegovog čvora najkraći put do odredišta. Takvim postupkom uspeva da pridobije da većina puteva vodi preko njegovog čvora, a zatim odbacuje sve pakete koji dođu do njega;

- podela mreže – postiže se lažnim rutiranjem paketa, tako da je između nekih čvorova komunikacija potpuno onemogućena, pa se deli na dva odvojena dela. Izolacija jednog čvora je specijalni slučaj podele, a primenjuje se na nekom od bitnih čvorova;
- crvni put – napad koji zahteva saradnju dva zlonamerna čvora. Komunicirajući međusobno stvaraju privid najkraće udaljenosti, čime mogu postići da većina puteva prolazi njima;
- navala – napad koji je primenljiv kod protokola koji određuju puteve na osnovu zahteva koji je prvi stigao. Neprijatelj neprestano šalje svoje zahteve za uspostavljanjem puta prema odredištu, sa težnjom da dođu do čvorova koji su najbliži odredištu pre legitimnih zahteva. Time napadač postiže da se nalazi na većini puteva i kontroliše saobraćaj;
- otkrivanje lokacije – napad kojim neprijatelj dolazi do informacije o poziciji čvorova, a samim tim i o topologiji mreže;
- nevidljivi čvor – napad kojim neprijatelj sakriva identitet svog čvora. Napadač učestvuje u komunikaciji jednostavno ponavljajući primljene pakete.

Da bi neki protokol zadržao željenu efikasnost (Jevtović, Pavlović, 2011) i u uslovima napada, mora imati mogućnost da pronađe ispravne puteve i da otkrije kvarove na njima. Drugim rečima, mora osigurati otkrivanje puta i uspešno prosleđivanje podataka.

Ispitivanje sigurnosnih svojstava komunikacijskih protokola provodi se da bi se odredila tačnost i pouzdanost uz prisustvo napada na mrežu. Postoji veći broj metoda za ispitivanje, ali autori najčešće objavljuju rezultate upoređujući postojeće protokole pod određenim napadima, simulacijom mreže. Mrežna simulacija koristan je alat u ispitivanju efikasnosti i može pokazati kako se protokol ponaša u uslovima definisanog napada. S obzirom na to da se u simulaciji neprijateljske akcije moraju definisati da bi se mogao sagledati njihov uticaj na mrežu, simulacija ne može odgovoriti na pitanje kako će se mreža ponašati u slučaju do sada nepoznatog napada. Ako se simulacijom pokaže da je napad malo verovatan, to ne znači da ne postoji, odnosno da je protokol siguran od tog napada. Mrežna simulacija uglavnom se ne koristi u fazi ispitivanja puta, već češće u fazi prosleđivanja paketa, kako bi se predvidelo ponašanje mreže u datim okolnostima.

Zaključak

Uspostava mrežne konekcije i uspešno prosleđivanje podataka je važna funkcija svake komunikacijske mreže. Za razliku od žičnih i infrastrukturnih bežičnih mreža, *ad hoc* mreže karakteriše veća mobilnost, višeskokovitost i samoorganizovanost. Zbog specifičnosti pojavila se potreba za razvojem protokola dizajniranih specijalno za *ad hoc* mreže. Za posebne namene, kao što su vojne potrebe, kod dizajniranja protokola uzi-

ma se u obzir sigurnost kao jedan od najvažnijih zahteva. U vojnim avio-sistemima, po pitanju sigurnosti moraju se koristiti sistemi sa nultom tolerancijom na pogreške. Postoji više metoda za ispitivanje sigurnosti protokola za rutiranje, a često primenjena je mrežna simulacija. Kombinacija više različitih metoda povećava uspešnost ispitivanja.

Literatura

- Corson, S., Macker, J., 2009, *RFC 2501: Mobile Ad Hoc NETWORKING (MANET): routing protocol performance issues and evaluation consideration*, available at <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-manet-issues-01.txt> (visited: 10. 05. 2009).
- Das, S., Perkins, C., Royer, E., 2000, *Performance Comparison of two on-demand routing protocols for ad hoc networks*, INFOCOM 2000, IEEE, pp.3-12.
- Guoyou, H., 2007, *Destination-sequenced distance vector (DSDV) protocol*, Technical report, Helsinki University of Technology, Finland.
- Haas, Z.J., Pearlman, M. R., 2000, *The Zone Routing Protocol (ZRP) for Ad Hoc Networks*, internet draft, March.
- Jevtović, V.M., Pavlović, Z.B., 2011, *Topološka analiza telekomunikacionih mreža*, Vojnotehnički glasnik/Military Technical Courier, Vol.59, No.1, pp 96-110.
- Johnson, D.B., Maltz, D.A., Hu, Y.C., Jetcheva, J.G., 2009, *The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DSR)*, IETF Manet Working Group INTERNET-DRAFT available at <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-manet-dsr-07.txt> (visited: 12. 05. 2009).
- Omidyar, C.G., 2000, *Survivability analysis of Ad Hoc wireless network architecture*, volume 1818 of Lecture Notes in Computer Science.
- Park, V.D., Corson, M.S., 2009, *Temporally-Ordered Routing Algorithm (TORA) version 1: functional specifications*, internet draft, available at <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-manet-tora-spec-01.txt> (visited 24. 06. 2009).
- Perkins, C., Bhagwat, P., 1994, *Highly dynamic destination sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers*, Proceedings of SIGCOMM, pp. 234-244.
- Perkins, C., Das, S.R., 2009, *Ad-hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing*, IETF Manet Working Group INTERNET-DRAFT available at <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-manet-aodv-11.txt> (visited: 19. 05. 2009).
- Perkins, C., Royer, E.B., Das, S., 2003, *Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing*, RFC 3561, July.
- Snow, A.P., Varshney, U., Malloy, A. D., 2000, *Reliability and survivability of wireless and mobile networks*, IEEE Computer.
- Terzić, R.M., 2011, *Predlog ad hoc računarske mreže na Katedri vojnih elektronskih sistema VA primenom bluetooth tehnologije*, Vojnotehnički glasnik/Military Technical Courier, Vol.59, No.1, pp 111-120.
- Tipper, D., Dahlberg, T., Shin, H., Charnsripinyo, C., 2002, *Providing fault tolerance in wireless access networks*, IEEE Communications Magazine, pp. 40-58.
- Trivedi, K.S., 2001, *Probability and Statistics with Reliability, queuing, and Computer Science Applications*, John Wiley & Sons, Second edition.

SAFETY OF ROUTING PROTOCOLS IN AD HOC NETWORKS AND POSSIBLE ATTACKS IN THE NETWORK

FIELD: Telecommunications

ARTICLE TYPE: Professional Paper

Summary:

This paper describes an ad hoc network, specific for its mobility, more abruptness and self-organization. Because of their properties, routing protocols in ad hoc networks must be adapted to applications and satisfy safety requirements - confidentiality, integrity and availability. These are the characteristics and challenges for the development of protocols to counter attacks, especially in military applications. Some of the known attacks are described and one of the methods for safety testing routing protocols is listed.

Introduction

Ad hoc networks are temporary networks established for some particular purpose. Participants in the network – stations, entities (entrances and exits) from the network- move, create new and terminate the old connection. Without the infrastructure and central management, they need to find information about the neighboring nodes and to manage communication. Due to the growing need for communication in areas where there is no infrastructure, such as site accidents, fires, floods, agricultural land, and certainly for the army, the number of wireless devices is increasing. Communication based on the principle anywhere and anytime is in demand. In this paper, the focus will be on ad hoc networks for military purposes. This network must be able to transmit tactical information in the presence of enemy attack, which requires an answer to the question of security protocols in ad hoc networks. Certainly, the development of the Internet and wireless communications has led to rapid development of malicious procedures intended to unauthorized access to information, communications jamming and disabling or changing data in the personal interest.

Specifics of ad hoc networks

Wireless ad hoc networks are dynamic self-organizing networks of peer nodes (Omidyar, 2000). They are formed without planning, without any infrastructure and each node is equally involved in traffic forwarding. In addition to sending information, they act as a host which has to transmit the control data from/to other nodes. the routing process dynamically adapts to the network status as it changes, in accordance with changing position or termination/arrival of new nodes. Since the communication is based on wireless connection, there is a problem of noise attenuation and interference. As it is previously mentioned, all this requires the selected protocols that can cope with these challenges.

Stefanović, R., i dr., Sigurnost protokola rutiranja ad hoc mrežama i mogući napadi u mreži, pp. 200–217

Ad hoc networks are characterized by: mobility, abruptness, decentralization and self-organization. Regarding their application, these networks are divided into mobile ad hoc networks MANET, access networks (mesh) and sensor networks.

MANET routing algorithm in networks

Efficient routing is one of the main issues that has to be resolved in an ad hoc network architecture (Tipper, et al, 2002), and (Trivedi, 2001).

Mobile networks are divided into three groups of routing protocols: proactive or table-driven, reactive or protocols on request (on-demand) and hybrid protocols, whose main characteristics are given in Table 1.

In proactive routing protocols, the route to a destination is determined as soon as the node joins the network and will be held during the times of periodic renewal (routing table is updated each time). In reactive protocols, routing is done by sending the appropriate data. When a node wants to send data to the destination, if there is no available link, the protocol starts the process of finding a path towards the destination. Hybrid routing protocols combine the above modes.

Routing security in ad hoc networks

Security of information transfer generally requires fulfilling the three most important security requirements. These are: confidentiality, integrity and availability.

The attacks in ad hoc networks

Because of the open medium transmission, the wireless network is vulnerable to various attacks, the most important including:

- *Flooding*
- *Sleep deprivation*
- *Black Holes*
- *Distribution network*
- *Wormhole*
- *The rush*
- *Detection of the location*
- *The invisible node*

To maintain a desired efficiency in terms of attack, routing protocol must be able to find the correct paths and failures to disclose them. In other words, protocols must provide path detection and successful submission of data.

Conclusion

Establishing a network connection and a successful data transmission is an important feature of any communication network. Unlike wired and wireless infrastructure networks, ad hoc networks are characterized by greater mobility, abruptness and self-organization. Because of the specificity, the need for the development of protocols designed particularly for ad hoc networks has developed. For special purpo-

ses, as military requirements are, designing the protocol takes into account safety as one of the most important requirements. In military air systems, security systems with zero tolerance for error must be used. There are several methods for safety testing of routing protocols, and the network simulation is often applied. The combination of different methods increases the success of test performances.

Key words: *protocols, ad hoc networks, security.*

Datum prijema članka/Paper received on: 17. 04. 2012.

Datum dostavljanja ispravki rukopisa/Manuscript corrections submitted on: 25. 05. 2012.

Datum konačnog prihvatanja članka za objavljivanje/ Paper accepted for publishing on: 27. 05. 2012.

ANALIZA PROTOKOLA RADIUS I DIAMETER SA ASPEKTA TARIFIRANJA TELEKOMUNIKACIONIH SERVISA

Vesna M. Radonjić, Andrijana N. Todosijević, Milica R. Petrović,
Mirjana D. Stojanović, Aleksandra K. Kostić-Ljubisavljević,
Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Beograd

DOI: 10.5937/vojtehg61-2221

OBLAST: telekomunikacije
VRSTA ČLANKA: stručni članak

Sažetak:

Tarifiranje servisa povezano je sa funkcijama utvrđivanja verodostojnosti i autorizacijom. Ove funkcije obično se razmatraju zajedno i implementiraju na istom serveru uz pomoć zajedničkog protokola. Najpoznatiji protokoli za verifikaciju, autorizaciju i tarifiranje jesu protokoli RADIUS i Diameter.

Iako protokol RADIUS ima široku upotrebu za mehanizme kontrole verodostojnosti, autorizacije i tarifiranja, ima i određene nedostatke koji mogu biti prouzrokovani samim protokolom ili lošom implementacijom i korišćenjem protokola.

Diameter protokol je skalabilni protokol koji je dizajnirala IETF radna grupa sa ciljem da zameni RADIUS protokol u skoroj budućnosti. Diameter protokol fokusira se na fleksibilno proširenje, napredne algoritme rutiranja, dinamičko ispravljanje grešaka i sigurnosne karakteristike transportnog sloja.

U radu je prikazan opšti pregled RADIUS i Diameter protokola, uključujući njihove osnovne operacije sa težištem na aplikacijama tarifiranja. Sličnosti ovih protokola ogledaju se u podršci istim funkcijama i u sličnom formatu paketa. Razlike se odnose na arhitekturu protokola, način utvrđivanja verodostojnosti, mehanizme autorizacije i tarifiranja. Sa aspekta tarifiranja, najvažnije prednosti protokola Diameter jesu mogućnost prenosa tarifnih informacija u realnom vremenu, kao i implementirani mehanizmi za ispravljanje grešaka sa ciljem da se minimizira gubitak tarifnih podataka u situacijama otkaza. Zahvaljujući ovim karakteristikama protokol Diameter ostvaruje znatnu prednost u odnosu na RADIUS u mrežama naredne generacije.

Key words: tarifni sistem, verodostojnost, autorizacija, obračun, funkcionalnost, arhitektura protokola, nadgledanje u realnom vremenu, telekomunikacione mreže.

Zahvalnica: Ovaj rad je deo rezultata istraživanja na projektu „TR32025“ koji finansira Ministarstvo prosvete i nauke Republike Srbije.

Uvod

S obzirom na sve veći broj telekomunikacionih servisa i činjenicu da su ranije telekomunikacione mreže podržavale ili samo jedan servis ili mali broj različitih servisa, problem tarifiranja u novim mrežama postaje sve složeniji i značajniji. Tarifiranje servisa je proces koji je bitan za upravljanje, planiranje i naplaćivanje servisa. Čuvanje i razmena tarifnih podataka posebno su važni u mrežama u kojima se zahteva tarifiranje korisnika u realnom vremenu.

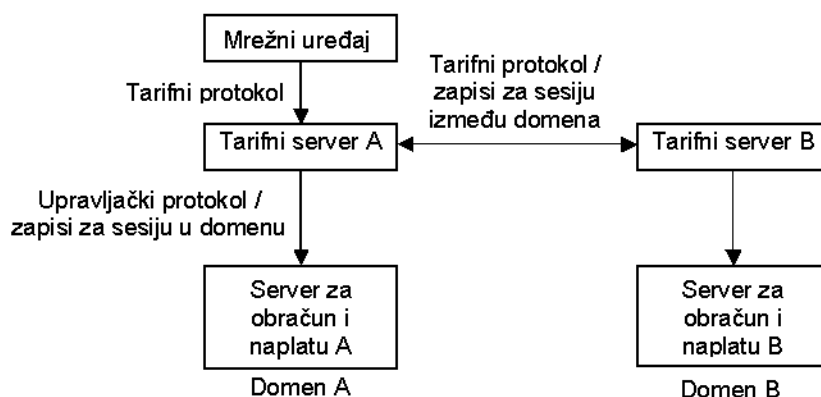
Funkcije tarifiranja povezane su sa funkcijama utvrđivanja verodostojnosti i autorizacijom. Utvrđivanje verodostojnosti je neophodno kako bi se osigurala naplata korišćenja servisa pravom korisniku, dok autorizacija osigurava raspoloživost relevantnih podataka samo ovlašćenim osobama. Zbog toga se funkcije utvrđivanja verodostojnosti, autorizacije i tarifiranja (AAA, *Authentication, Authorization and Accounting*) obično razmatraju zajedno i implementiraju na istom serveru, uz pomoć zajedničkog protokola (Aboba, et al, 2000), (Pras, et al, 2001, pp.108-113), (Zseby, et al, 2002). U kontekstu obezbeđivanja ovih funkcija izdvajaju se protokoli RADIUS (*Remote Authentication Dial In User Service*) i Diameter.

Razvojem i uvođenjem novih tehnologija postavljaju se novi zahtevi za AAA protokole. U ovom radu analiza je usmerena na tehničke mogućnosti protokola RADIUS, kao najviše korišćenog AAA protokola i protokola Diameter, koji uvodi nova funkcionalna poboljšanja.

U prvom delu rada izložen je radni okvir za upravljanje tarifiranjem, koji je definisao IETF. Zatim su opisani mehanizmi funkcionisanja protokola RADIUS i Diameter i prikazana je njihova uporedna analiza. Posmatrani su, pored AAA funkcija, i opšti aspekti. Na kraju su predložena zaključna razmatranja.

Funkcije AAA i odgovarajući protokoli

IETF je ustanovio radni okvir za upravljanje tarifiranjem sa ciljem da definiše skup alata koji se mogu koristiti da ispune zahteve različitih aplikacija (Aboba, et al., 2000). Na slici 1 prikazana je arhitektura upravljanja tarifiranjem, koja obuhvata interakcije između elemenata mreže, tarifnih servera i servera za obračun i naplatu. Elementi mreže prikupljaju informacije o iskorišćenju resursa i prosleđuju ih tarifnom serveru posredstvom odgovarajućeg protokola ili u formi zapisa za svaku sesiju. Tarifni server zatim generiše i prosleđuje relevantne podatke serveru za obračun i naplatu, koji takođe može da obavlja funkcije fakturisanja, verifikacije obračuna, analize trendova i planiranja kapaciteta. Kada se primenjuje tarifiranje prema korišćenju, neophodni su tarifni podaci radi fakturisanja. U slučaju primene ravnomerne šeme tarifiranja, tarifni podaci se koriste prevashodno za verifikaciju obračuna, analizu trendova i planiranje kapaciteta.



Slika 1 – IETF arhitektura upravljanja tarifiranjem
Figure 1 – IETF accounting management architecture

Utvrđivanje verodostojnosti je proces kojim se potvrđuje korisnikov digitalni identitet, obično putem neke vrste identifikatora i pripadajućih podataka. Primeri tih podataka su lozinke, tokeni, digitalni sertifikati i brojevi telefona. Autorizacijom se utvrđuje da li je određeni entitet ovlašćen da izvrši neku aktivnost. Ona se može izvršiti preko niza ograničenja, poput vremenskog, ograničenja fizičke lokacije ili ograničenja protiv višestrukih prijava istog entiteta ili korisnika. Primeri tipova usluga su filtriranje IP adrese, dodeljivanje adrese, dodeljivanje rute, QoS, diferencijalne usluge, upravljanje tokom saobraćaja, obavezno tunelovanje do određene krajnje tačke i enkripcija. Tarifiranje korisnika u novijim mrežama podrazumeva praćenje korišćenja mrežnih resursa. Tarifni podaci mogu se koristiti za upravljanje, planiranje i naplaćivanje servisa, kao i za druge (specifične) svrhe. Tarifiranje u realnom vremenu odnosi se na podatke koji se dostavljaju tokom vremena korišćenja resursa. Grupno tarifiranje odnosi se na podatke koji se čuvaju i kasnije dostavljaju provajderu servisa. Podaci koji se obično prikupljaju su identitet korisnika, vrsta pružene usluge i vreme početka i završetka usluge.

Radna grupa IETF-a za AAA prvenstveno se bavi pristupom mreži i odgovarajućim protokolima:

- RADIUS je razvijen za potrebe komutiranog pristupa.
- TACACS (*Terminal Access Controller Access Control System*) jeste razvijen za potrebe terminalskog pristupa.
- SNMP (*Simple Network Management Protocol*) omogućava upravljanje pojedinačnim elementima mreže i služi za potrebe konfigurisanja mrežnih elemenata.
- COPS (*Common Open Policy Service*) zasniva se na klijent/server modelu, sa tipičnom primenom u protokolu RSVP.
- Diameter predstavlja poboljšanu verziju RADIUS protokola i razvijen je za pristup mreži i mobilni IP.

Razvojem i širenjem interneta i uvođenjem novih tehnologija pristupa, kao što su DSL, Ethernet, bežični pristup i mobilni IP, dizajn rutera i pristupnih servera je sve kompleksniji i postavlja nove zahteve za AAA protokole (Zseby, et al., 2002). Protokoli kao što su RADIUS i TACACS ne odgovaraju zahtevima novih tehnologija.

Protokol SNMP ima važnu ulogu u upravljanju tarifiranjem. Funkcionalnost SNMP u tarifiranju povezana je sa daljinskim pretraživanjem rezultata merenja tokova saobraćaja koji su relevantni za tarifiranje, a memorišu se u elementima mreže kao deo standardizovane baze upravljačkih informacija (MIB, *Management Information Base*).

COPS je relativno jednostavan protokol koji se zasniva na klijent/server modelu i obuhvata procedure za uspostavljanje dijaloga i identifikaciju zahteva. COPS koristi transportni protokol TCP (*Transmission Control Protocol*) da osigura pouzdan prenos signalizacionih informacija između krajnjih sistema. Daljinsko konfigurisanje elemenata mreže uključenih u proces tarifiranja može se obavljati posredstvom protokola SNMP ili COPS.

IETF je usvojio i preporučio protokol Diameter kao najpogodniji AAA protokol, koji je, pored primene za pristup mreži i u mobilnim IP komunikacijama, takođe predviđen za rad sa lokalnim AAA funkcijama, kao i za rad u roaming-u. Protokol se zasniva na modelu upit/odgovor, a informacije se razmenjuju u formi parova vrednosti atributa (AVP, *Attribute Value Pair*). Razmena tarifnih podataka obavlja se posredstvom para poruka: *Accounting Request* i *Accounting Answer*. AVP-ovi pridruženi ovim porukama omogućavaju prenos informacija o verodostojnosti i autorizaciji, iskorišćenosti resursa relevantnih za tarifiranje određenog servisa, planiranju kapaciteta i dr. Osnovni protokol može se koristiti samo za potrebe tarifiranja ili sa specifičnim Diameter aplikacijama, kao što su mobilni IP ili pristupni server mreže.

Osnovne funkcije protokola RADIUS

RADIUS je najčešće korišćen AAA protokol (Rigney, 1997). Danas postoje razni komercijalni i *open-source* RADIUS serveri. Najčešću primenu nalazi kod mrežnih uređaja poput rutera, svičeva, modema i sl. Protokol se bazira na klijent-server modelu i na transportnom sloju koristi UDP protokol. Na strani klijenta koristi se NAS (*Network Access Server*), koji obavlja zadatke vezane za prosleđivanje korisničkih parametara RADIUS serveru, kao i za obradu primljenih odgovora (Metz, 2001). Sa druge strane nalaze se RADIUS serveri koji su zaduženi za primanje upita, proveru primljenih korisničkih parametara i zatim vraćanja potrebnih konfiguracijskih parametara koji će omogućiti pružanje adekvatne usluge korisniku od strane klijenta.

RADIUS protokol koristi se iz više razloga: mrežni uređaji u osnovi ne poseduju mogućnost čuvanja velikog broja autentifikacijskih parametara različitih korisnika, s obzirom na ograničene resurse kojima raspolažu, olakšava i centralizuje tarifiranje korisnika, pruža određeni nivo zaštite protiv aktivnih napada neovlašćenih korisnika, ima veliku podršku različitih proizvođača mrežne opreme (Hashmathur, et al, 2010, pp.48-54). RADIUS se, iz navedenih razloga, danas smatra standardom za udaljeno utvrđivanje verodostojnosti korisnika.

Pored utvrđivanja verodostojnosti i autorizacije, primena protokola RADIUS podrazumeva i prenos informacija o tarifiranju između NAS i tarifnog (*accounting*) servera. Ključne osobine su (Tuomimäki, 2003, pp.1-16):

- klijent/server model: NAS predstavlja klijenta RADIUS tarifnog servera. Klijent je odgovoran za prosleđivanje informacija i tarifiranje određenom RADIUS serveru. Server prima upit i šalje potvrdu klijentu o uspešnom prijemu upita. RADIUS tarifni server može da radi kao *proxy* klijent drugim tarifnim serverima;

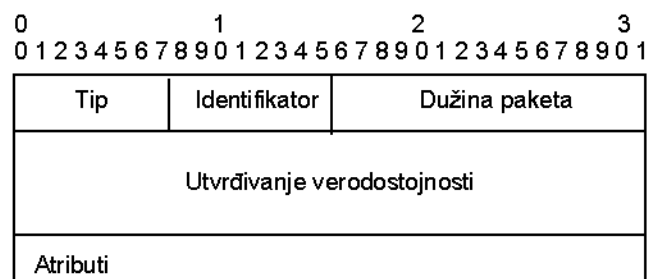
- bezbednost mreže: transakcije između klijenta i servera su verodostojne, što se postiže korišćenjem zajedničkog tajnog ključa koji se nikada ne šalje mrežom;

- mogućnost proširenja: sve transakcije sastoje se od *Attribute-Length-Value* trojki varijabilne dužine. Nove vrednosti atributa mogu biti dodate bez remećenja već postojeće implementacije protokola.

Kada je klijent konfigurisan da koristi RADIUS tarifiranje, na početku isporuke servisa biće generisan *Accounting Start* paket, koji opisuje tip servisa i korisnika servisa, i poslat serveru, koji šalje potvrdu o uspešnom prijemu. Na kraju će biti generisan *Accounting Stop* paket koji opisuje tip isporučenog servisa i opcino statistike poput proteklog vremena, ulaznih i izlaznih okteta ili ulaznih i izlaznih paketa. To će biti poslato serveru koji šalje potvrdu da je paket uspešno primljen.

Accounting-Request (bilo *Start* ili *Stop*) šalje se RADIUS tarifnom serveru putem mreže. Ako u određenom periodu nema potvrde, upit se šalje određeni broj puta. Klijent može i da prosledi upit alternativnom serveru ili serverima koji se koriste u slučaju pada ili nedostupnosti prvog servera. Alternativni server može se koristiti i nakon neuspelih pokušaja slanja primarnom serveru zbog pada. Algoritmi za vraćanje ili oporavak od pada su predmet mnogih istraživanja.

RADIUS tarifni server može zahtevati druge servise radi ispunjenja zahteva i u tom slučaju on je klijent. Ako RADIUS tarifni server nije u mogućnosti da uspešno primi paket, on ne sme da pošalje *Accounting-Response* potvrdu klijentu. Tačno jedan RADIUS tarifni paket je enkapsuliran u UDP polje podataka, pri čemu UDP koristi port 1813. Kada je generisan odziv, portovi izvora i destinacije su obrnuti. Na slici 2 prikazan je format RADIUS paketa.



Slika 2 – Format RADIUS paketa
Figure 2 – RADIUS packet format

– **Tip (Code)**: ovo polje je dužine jednog okteta i opisuje tip RADIUS paketa. Kada se paket primi sa pogrešnim *Code* poljem, odbacuje se. RADIUS *Accounting Code* polja su redom:

- 4 – Accounting-Request
- 5 – Accounting-Response

– **Identifikator (Identifier)**: ovo polje je dužine jednog okteta i pomaže u slaganju upita i odziva.

– **Dužina paketa (Length)**: zauzima dva okteta. Označava dužinu paketa, uključujući *Code*, *Identifier*, *Length*, *Authenticator* i *Attributes*. Okteti koji su duži ili kraći od polja *Length* treba da budu ignorisani i odbačeni. Minimalna dužina je 20, a maksimalna 4096 okteta.

– **Utvrđivanje verodostojnosti (Authenticator)**: polje je dužine šesnaest okteta. Najvažniji oktet se prenosi prvi. Ova vrednost koristi se da utvrdi verodostojnost poruka između klijenta i RADIUS tarifnog servera.

– **Atributi (Attributes)**: mogu imati više slučajeva. Red atributa istog tipa treba da bude sačuvan, što se ne zahteva za red atributa različitog tipa.

Prilikom prijave u mrežu, korisnik šalje svoje podatke RADIUS klijentu koji zatim izmenjuje RADIUS poruke specifičnog formata s RADIUS serverom. Svrha tih poruka je ostvarivanje tri funkcije AAA koncepta: utvrđivanje verodostojnosti, autorizacije i tarifiranja korisnika.

Kada se uzmu u obzir sve poruke koje razmenjuju RADIUS klijent i server, kao i sami zahtevi korisnika, komunikacija izgleda ovako:

1. Korisnik šalje svoje identifikacione podatke RADIUS klijentu sa željom da mu se odobri pristup određenim mrežnim resursima.

2. Klijent izvršava proces utvrđivanja verodostojnosti i autorizacije razmenom poruka sa RADIUS serverom:

- a. klijent šalje upit – *Access-Request*,
- b. server odgovara odzivom, koji može da bude: *Access-Reject* (ako se korisnikov upit za pristup odbacuje) ili *Access-Accept* (ukoliko se korisnikov upit za pristup prihvata).

1. Klijent izvršava proces tarifiranja korisnika:
 - a. klijent šalje serveru poruku *Accounting-Request* (Start), koja predstavlja zahtev za početak sesije,
 - b. server odgovara sa *Accounting-Response*, čime počinje sesija,
 - c. kada korisnik želi da završi sesiju, klijent šalje serveru *Accounting-Request* (Stop),
 - d. server odgovara sa *Accounting-Response*, čime se završava sesija i korisnik se isključuje iz mreže.

Nakon što je NAS odobrio pristup korisniku, on šalje poruku *Accounting Start* (RADIUS *Accounting-Request* upit koji sadrži atribut *Acct-Status-Type* sa vrednošću „start”) RADIUS serveru. Slanje te poruke označava početak korisnikovog pristupa mreži. *Accounting Start* poruke obično sadrže identifikaciju korisnika, njegovu IP adresu, mesto pristupa i jedinstveni identifikator sesije. Kao odgovor, server uzvraća odzivnom porukom *Accounting-Response*.

Nakon uspostavljene sesije, NAS može povremeno slati *Interim Update* poruke serveru. Radi se o RADIUS *Accounting-Request* porukama koje sadrže atribut *Acct-Status-Type* sa vrednošću *Interim Update*. Uobičajeno, *Accounting Interim* poruke prenose podatke o trajanju trenutne sesije i o trenutnom korišćenju podataka, što je korisno za praćenje ličnih troškova, odnosno za nadgledanje rada korisnika u mreži.

Na kraju, prilikom isključivanja korisnika iz mreže, NAS šalje *Accounting Stop* poruku (RADIUS *Accounting-Request* poruka s vrednošću „stop” atributa *Acct-Status-Type*). Poruka sadrži detalje o ukupnom vremenu trajanja sesije, prenesenoj količini podataka, razlogu isključivanja i ostale informacije vezane za pristup mreži.

Klijent obično šalje *Accounting-Request* poruke u određenim intervalima, sve dok ne primi *Accounting-Response* odgovor. Osnovna svrha ovih podataka jeste da se korisniku može naplatiti usluga u skladu s njegovom potrošnjom. Uz naplatu potrošnje, podaci se koriste i za računanje statistike, kao i za nadzor same mreže (Rigney, 1997).

Arhitektura i rad protokola Diameter

Protokol Diameter razvijen je sa ciljem da ukloni nedostatke i funkcionalna ograničenja protokola RADIUS. Sam naziv ovog protokola – Diameter (prečnik) upućuje na njegove karakteristike u odnosu na RADIUS (poluprečnik). Iako je jezgrena funkcionalnost protokola RADIUS ostala netaknuta, način njene implementacije je promenjen. Uz to, dodata su brojna proširenja i ostvarene nove mogućnosti. Iako Diameter nije potpuno kompatibilan sa protokolom RADIUS, njihova saradnja je moguća upotrebom jednog od mnogobrojnih proširenja. Upravo je jednostavnost proširivost protokola Diameter bila jedna od osnovnih ciljeva njegovog

razvoja. Dodatni razvoj protokola Diameter podstakle su organizacije poput IETF-a i 3GPP-a (*The 3rd Generation Partnership Project*) stalnim doradama i iscrpnim specifikacijama.

Protokol Diameter namenjen je za rad u lokalnom AAA i roving okruženju za aplikacije poput pristupanja mreži i IP mobilnosti. Osnovnu aplikaciju protokola treba da podrže sve Diameter aplikacija. Diameter omogućava:

- isporuku AVP-ova,
- mogućnost pregovaranja,
- notifikaciju grešaka,
- mogućnost proširenja dodavanjem novih komandi i AVP-ova,
- osnovne servise neophodne za aplikacije, kao što su upravljanje korisničkim sesijama ili tarifiranje.

Svi podaci preneseni protokolom su u formi AVP-a. Neke od ovih AVP vrednosti koriste se za sam protokol, dok su neke povezane sa posebnim aplikacijama koje omogućava Diameter. Parovi se mogu dodati proizvoljno u Diameter poruke sve dok su uključeni zahtevani parovi, a nisu obuhvaćeni oni nezahtevani. AVP-ovi se koriste u okviru ovog protokola kako bi omogućili sledeće karakteristike:

- prenos informacija o verodostojnosti korisnika, radi omogućavanja servera da verifikuje korisnika,
- prenos specifičnih informacija o autorizaciji između klijenta i servera, koji omogućava donošenje odluke o odobravanju korisničkog upita,
- razmenu informacija o korišćenju resursa, koja može biti korišćena u svrhe tarifiranja, planiranja kapaciteta itd.,
- prosleđivanje, posredništvo i preusmeravanje poruka kroz hijerarhiju servera.

Osnovni protokol Diameter može se koristiti samo za tarifiranje, ili sa aplikacijama poput mobilnog IPv4 ili mrežnog pristupa. Takođe, postoji mogućnost proširenja protokola za nove aplikacije, dodavanjem novih komandi ili AVP-ova.

Protokol Diameter osmišljen je kao kombinacija osnovnog protokola i širokog spektra aplikacija koje mu nude jednostavnu mogućnost proširenja za ostvarenje raznovrsnih dodatnih usluga. Osnovni protokol nudi temeljne mehanizme i funkcionalnosti zajedničke svim aplikacijama. Većina njih temelji se na osnovnoj funkcionalnosti protokola RADIUS, dok je ostatak rezultat novih rešenja i poboljšanja postojećih ideja. Ovde su definisani osnovni formati poruka, mehanizmi prenosa podataka i upravljanja greškama, metode komunikacije između pojedinih elemenata arhitekture i osnovne sigurnosne funkcije. Aplikacije nisu klasične programske aplikacije nego protokolna rešenja koja se nadovezuju na funkcionalnosti osnovnog protokola. Svaka aplikacija određena je posebnom oznakom i u osnovnu strukturu može uneti nove naredbe i nove obavezne parove atributa i vred-

nosti, čime se stvaraju dodatne funkcionalnosti. Primeri su: aplikacija za podršku mobilom IP-u (*Mobile IP, Diameter Mobile IPv4 Application*), aplikacija za pristupne mrežne servere (*NASREQ, Diameter Network Access Server Application*), aplikacija za podršku protokola EAP (*Diameter Extensible Authentication Protocol Application*), aplikacija za podršku kontrole naplate (*Diameter Credit-Control Application*), aplikacija za CMS (*Diameter Cryptographic Message Security Application*) i aplikacija za podršku protokola SIP (*Diameter Session Initiation Protocol Application*).

Arhitektura protokola Diameter temelji se na modelu *peer-to-peer*. Na taj način je svaki njen element ujedno i klijent i server, zavisno od trenutnih potreba mreže. Elementi takođe mogu biti i mrežni agenti. Stoga, elemente arhitekture ovog protokola po trenutnim ulogama i zaduženjima u mreži možemo podeliti na klijente, servere i agente (Calhoun, et al, 2003).

Element koji primi zahtev krajnjeg korisnika za spajanjem na mrežu automatski postaje klijent. U većini slučajeva klijent je ujedno i pristupni mrežni server. Nakon prikupljanja korisničkih podataka o verodostojnosti, klijent šalje poruku s pristupnim upitom jednom od elemenata arhitekture protokola koji će taj upit opslužiti. Takav element u ovom slučaju biće ili server ili jedan od agenata. Pretpostavi li se da je pomenuti element server, on će biti zadužen za mehanizme utvrđivanja verodostojnosti korisnika na osnovu primljenih podataka. Ako je verodostojnost bila uspešna, konfiguracijski podaci i podaci vezani za korisnički pristup biće poslani natrag klijentu kao odgovor na pristupni upit. U protivnom, upit će biti odbijen. Protokol podržava i iniciranje poruka od strane servera, kao što je obustava servisa određenom korisniku. Arhitektura temeljena na modelu *peer-to-peer* puno je fleksibilnija, jer dopušta da svaki od mrežnih elemenata bude ili klijent ili server i, prema potrebi, omogućava obavljanje i jedne i druge funkcije.

Osim klijenata i servera, važan deo arhitekture protokola Diameter su i agenti. Diameter agent je čvor koji ne omogućava verodostojnost/autorizaciju lokalno, već server vrši ove operacije, dok jedan čvor može biti i klijent i server istovremeno. Po svojoj ulozi, agenti mogu biti zaduženi za prosleđivanje (*Relay Agent*), preusmeravanje (*Redirect Agent*), posredništvo (*Proxy Agent*) i prevođenje (*Translation Agent*) protokola.

Agenti zaduženi za prosleđivanje koriste se za prosleđivanje poruka na odgovarajuće odredište, zavisno od informacija dobijenih iz pristigle poruke. Jedna od njihovih prednosti je sposobnost prikupljanja i agregacije zahteva pristiglih iz različitih domena i područja i njihovo usmeravanje prema zajedničkom odredišnom području. Time se eliminišu zahtevni postupci konfiguracije pristupnih servera za svaku promenu serverskog elementa Diameter mreže.

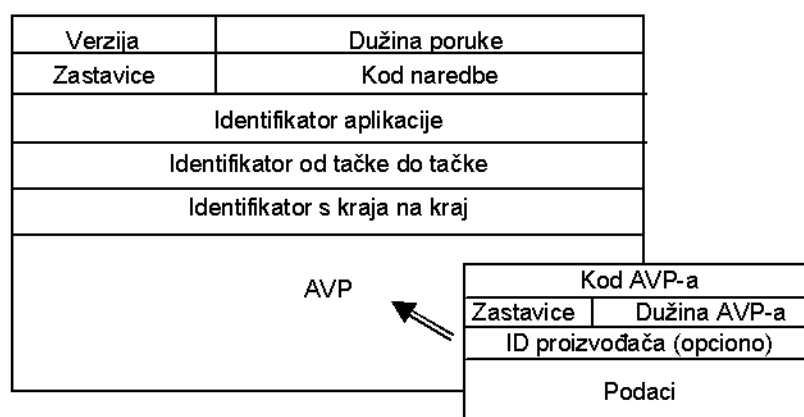
Posrednički agenti se, takođe, koriste za prosleđivanje poruka, ali, za razliku od agenata zaduženih samo za prosleđivanje, sposobni su i za promenu sadržaja tih poruka. To omogućava ostvarenje brojnih servisa dodatne vrednosti, uvođenje pravila obrade zavisno od pojedinih poruka i

obavljanje administrativnih zadataka za pojedino područje ili domen. U slučaju da nije potrebno menjati sadržaj poruke, ulogu posredničkog agenta može preuzeti i agent zadužen za prosleđivanje.

Agenti zaduženi za preusmeravanje služe kao središnji konfiguracijski nosilac za sve ostale elemente Diameter arhitekture. Po prijemu poruke agent proverava svoju tabelu rutiranja i, kao odziv, šalje informacije vezane za preusmeravanje. Razlika između posredničkog agenta i agenta zaduženog za preusmeravanje jeste što posrednički agent ne zna adresu servera kojem treba da prosledi poruku već tu informaciju saznaje pomoću agenta zaduženog za preusmeravanje.

Agenti zaduženi za prevođenje imaju zadatak da prevode poruke raznih protokola za utvrđivanje verodostojnosti, autorizaciju i tarifiranje u poruke protokola Diameter i obrnuto. Ova funkcionalnost je veoma korisna pri integraciji sa ostalim, trenutno više korišćenim AAA protokolima, posebno sa protokolom RADIUS.

Struktura zaglavlja Diameter protokola prikazana je na slici 3.



Slika 3 – Format zaglavlja Diameter paketa (Calhoun, et al., 2003)

Figure 3 – Diameter packet format

Značenje svakog od polja zaglavlja je sledeće:

- **Verzija** (*Version*): vrednost polja je 1 da bi se naznačilo da je u pitanju Diameter protokol verzije 1.
- **Dužina poruke** (*Message length*): ovo polje zauzima 3 okteta i ukazuje na dužinu cele poruke koja se prenosi, uključujući pri tome i polja koja se nalaze u zaglavlju Diameter poruke.
- **Zastavice naredbi** (*Command flags*): dužina polja zastavice naredbi je 8 bita. Dodeljivanje vrednosti bitima vrši se na sledeći način:
 - **R** (*request*) – Upit/Odziv. Ukoliko je vrednost ovog bita 1, poruka predstavlja upit, u suprotnom je u pitanju odziv.

- **P** (*proxiable*) – Mogućnost prosleđivanja. Ako ovo polje nije setovano poruka se mora obraditi isključivo lokalno. Ukoliko je vrednost ovog bita 1 Diameter poruka može se proslediti, prenositi i uputiti i na drugi administrativni domen.
- **E** (*error*) – Greška. Ovaj bit ukazuje na to da li poruka sadrži grešku u protokolu. Ukoliko je vrednost polja E u poruci 1, smatra se da je u pitanju poruka sa greškom. Ukoliko je u pitanju zahtev, ovo polje ne sme da bude setovano.
- **T** (*re-transmitted*) – Mogućnost ponovnog slanja. Ova zastavica se aktivira nakon greške u slanju, a da bi se onemogućilo dupliranje poslatih upita. Ukoliko se ne dobija odgovor na poslati upit, ova zastavica se postavlja na 1 prilikom ponovnog slanja iste poruke, sa ciljem da ukaže na mogućnost umnoženih upita zbog otkaza linka. Ukoliko se poruka sa upitom šalje prvi put bit mora biti 0. Na taj način Diameter agenti se brinu isključivo o broju upita koje su poslali na osnovu jednog primljenog upita. Sve retransmisije koje su drugi entiteti obavili ne uzimaju se u obzir i ne moraju se posebno pratiti. Agenti koji su primili poruku sa aktivnim poljem T moraju zadržati ovu vrednost prilikom prosleđivanja poruke. Takođe, ukoliko je za poslati upit primljen odgovor u vidu greške u protokolu, zastavica se ne sme aktivirati i njena vrednost mora ostati 0. Samo u slučaju kada se za poslati upit ne dobije odgovor, polje se postavlja na 1.
- **Kod naredbe** (*Command code*): koristi se za saopštavanje naredbi pridruženih poruci. Ovo polje podržava više od 16 miliona različitih komandi. Kodovi od 0 do 255 su tzv. RADIUS tipovi kodova i koriste se za obezbeđivanje kompatibilnosti sa RADIUS protokolom. Vrednosti od 256 do 16.777.213 namenjene su za nepromenljive, standardne komande koje je dodelio IETF. Ostale vrednosti polja namenjene su za eksperimentalnu upotrebu.
- **Identifikator aplikacije** (*Application ID*): koristi se da identifikuje aplikaciju za koju je poruka namenjena.
- **Identifikator od tačke do tačke** (*Hop-by-hop Identifier*): predstavlja 32-bitno polje koje potpomaže uparivanje upita i odgovora. Pošiljalac upita mora obezbediti da ovo polje bude jedinstveno za datu konekciju u datom trenutku, dok pošiljalac odziva mora obezbediti poklapanje vrednosti ovog polja sa vrednošću polja odgovarajućeg upita.
- **Identifikator s kraja na kraj** (*End-to-end Identifier*): predstavlja polje dužine 4 okteta čija je namena da detektuje duplicirane poruke.
- **AVP**: Parovi vrednosti atributa predstavljaju konkretne podatke koji se prenose porukom. Diameter protokol definiše skup osnovnih atributa i svakom od njih dodeljuje odgovarajuću semantiku. AVP prenose sve podatke vezane za verodostojnost, autorizaciju i tarifiranje, kao i za rutira-

nje, sigurnosne informacije i detalje konfiguracije upita i odziva. Takođe, AVP ima svoje sopstveno zaglavlje.

Zaglavlje AVP-a čine:

- AVP kod (AVP code): ovo polje u kombinaciji s poljem identifikatora proizvođača jedinstveno označava atribut. Dužine je 3 okteta.
- AVP zastavice (Flags): sastoji se od 8 bita i obuhvata zastavice koje definišu da li je podrška za AVP obavezna (M bit), da li postoji polje identifikatora proizvođača (V bit), da li je potrebna enkripcija (P bit). Ostalih 5 bitova se trenutno ne koristi.
- AVP dužina (AVP length): polje je veličine 3 okteta i ukazuje na ukupan broj okteta koji čine AVP (zaglavlje i korisne informacije).
- Identifikator proizvođača (Vendor ID): vrednost ovog polja, ukoliko postoji, predstavlja 32-bitni kod koji dodjeljuje IETF.

Svaka Diameter poruka mora sadržati kod naredbe u svom zaglavlju i na taj način se utvrđuje aktivnost koja će se izvršiti po prijemu poruke. Tako, na primer, naredba ACR označava da poruka sadrži informacije vezane za tarifiranje. Razmena tarifnih podataka obavlja se posredstvom para poruka ACR/ACA. Za svaki par komandi tipa upit/odziv postoji jedan kod naredbe, a zastavicom naredbi R (koja je ranije definisana) vrši se diferencijacija podtipa.

U klasičnoj arhitekturi protokoli za verifikaciju, autorizaciju i tarifiranje zahtevali su ručnu (statičku) konfiguraciju adresa mrežnog pristupnog servera i klijenata kako bi se slali upiti prilikom prijave korisnika. Takvi postupci unose dodatno opterećenje u složenim i velikim mrežama.

Diameter protokol, uz podršku ručnoj konfiguraciji, donosi i mogućnost dinamičkog otkrivanja ostalih Diameter čvorova (Ooms, 2007). Dinamično otkrivanje moguće je s obzirom na činjenicu da Diameter serveri i agenti šalju poruke sa informacijama o sopstvenim mogućnostima i podržanom nivou sigurnosti obližnjim čvorovima. Klijenti tako, u zavisnosti od korišćenih aplikacija, traženog nivoa sigurnosti i ostalih parametara, mogu odabrati odgovarajući čvor kojem će proslediti korisnički upit. Za pojedini čvor (u ovom slučaju za klijenta) novootkrivena lokacija odgovarajućeg čvora čuva se lokalno preko tabele čvorova i tabele rutiranja čvorova.

Nakon pronalaženja odgovarajućeg čvora kojem će zahtev biti prosleđen potrebno je uspostaviti konekciju sa tim čvorom, jer Diameter na transportnom sloju koristi protokole TCP ili SCTP (*Stream Control Transmission Protocol*). U odnosu na UDP ovi protokoli pružaju pouzdan prenos koji je vrlo važan za aplikacije koje razmenjuju podatke vezane za tarifiranje.

S obzirom na *peer-to-peer* model, pojedini Diameter čvor može imati i više uspostavljenih konekcija u jednom trenutku. Protokol Diameter eksplicitno definiše da u jednom trenutku pojedini čvor mora uspostaviti bar dve konekcije prema čvorovima unutar istog područja ili domena, koji se tada nazivaju primarnim i sekundarnim čvorom.

Radi boljeg razumevanja rada protokola Diameter treba razlikovati pojmove konekcije i sesije. Sesija predstavlja logičku vezu pristupnog uređaja i servera na nivou aplikacije. Konekcija je veza na transportnom nivou, uspostavlja se između dva čvora i služi za razmenu Diameter poruka. Jednu sesiju može činiti više uspostavljenih konekcija. Sesija se može zamisliti kao niz poruka razmenjenih između klijentskog i server-skog čvora u određenom periodu. Svaka sesija određena je jedinstvenim identifikatorom – *Session-Id* kojeg definiše klijent.

Pokretanje sesije slično je kao kod većine klijent-server modela. Sesija počinje slanjem upita klijenta ka serveru. U okviru protokola Diameter, klijent serveru šalje poruku koja sadrži poruku *Auth-Request*, a koja, pored ostalog, sadrži i identifikator sesije. U slučaju kada je potrebno proslediti poruku, ona se na putu do servera prosleđuje odgovarajućim agentima. Treba napomenuti da poruka *Auth-Request* nije u potpunosti definisana u skupu poruka osnovnog protokola Diameter, jer atributi koje prenosi zavise od aplikacije koja se koristi.

Nakon prihvatanja poruke *Auth-Request* server u poruku odziva može uključiti atribut *Authorization – Lifetime*, kojim se određuje vreme (u sekundama) u okviru kojeg klijent mora biti ponovno autorizovan. Nakon eventualnog isteka vremenske kontrole server briše sesiju iz liste aktivnih sesija i oslobađa sve za nju rezervisane resurse. Klijent zatim mora ponovo poslati poruku sa upitom za uspostavljanje autentifikacije sesije.

Tokom trajanja sesije server može započeti postupak ponovnog utvrđivanja verodostojnosti ili ponovne autorizacije. Ponovno utvrđivanje verodostojnosti i/ili autorizacija izvršavaju se slanjem upita od servera ka klijentu, a koji sadrži naredbu *Re-Auth-Request*. Ovaj postupak koristan je za praćenje trenutne aktivnosti korisnika radi tarifiranja i naplate odgovarajućih servisa, kao na primer kod *prepaid* usluga, kada je serveru potrebna potvrda da korisnik još uvek koristi određeni servis. Nakon uspešno poslatog *Re-Auth-Answer* odziva, klijent mora poslati i odgovarajuću poruku za utvrđivanje verodostojnosti i/ili autorizaciju specifičnu za datu aplikaciju. Autentifikacija sesije uspostavlja se tek nakon što server pošalje odziv. Za kontrolu sesije i praćenje uzroka eventualnih nepredviđenih prekida koristi se atribut *Origin-State-Id*.

Ostatak komunikacije između klijenta i servera, koji uključuje dogovore oko svih potrebnih korisničkih parametara ili razmenu informacija za pružanje i izvršavanje ostalih servisa, takođe se obavlja preko različitih parova atributa i njihovih vrednosti definisanih u pojedinim aplikacijama.

Poruke vezane za prekid sesije koriste se samo u slučaju pružanja usluga utvrđivanja verodostojnosti i autorizacije i to onda kada se prati i održava stanje sesije. Za usluge tarifiranja koriste se poruke za prekid tarifiranja. Prekid sesije može započeti ili klijent ili server. Ukoliko klijent želi da prekine sesiju, serveru će poslati poruku *Session-Termination-*

Request u koju je uključen atribut *Termination-Clause* koji sadrži opis razloga prekida sesije. Na taj način serveru se stavlja na znanje da se sesija prekida. Nakon prijema upita, server šalje odgovarajući odziv i briše sesiju iz liste aktivnih sesija i oslobađa zauzete resurse. Ako prekid inicira server (npr. zbog administrativnih razloga kao što je manjak memorijskog prostora), poslaće klijentu poruku *Abort-Session-Request*. Klijent treba da pošalje odziv na ovaj upit, a zatim da pokrene postupak prekida sesije. Ipak, postoje situacije kada klijent nije obavezan da prekine sesiju nakon primanja poruke za prekid sesije od servera. Sesija se prekida odgovorom na upite za prekidom sesije od strane čvorova koji su ih primili.

Diameter protokol omogućava prenos tarifnih informacija u realnom vremenu i u njega je ugrađeno nekoliko metoda za ispravljanje grešaka sa ciljem da se minimizira gubitak tarifnih podataka u slučaju otkaza. Uređaj koji generiše tarifne podatke dobija informacije ili od autorizovanog servera (ukoliko je povezan sa njim) ili od tarifnog servera, uzimajući u obzir način prosleđivanja tarifnih podataka. Ove informacije uključuju pravovremeno zahtevane tarifne zapise.

Prenos tarifnih informacija u realnom vremenu jedan je od osnovnih zahteva sistema, kao što je i potreba za izvršavanjem provere kreditnog limita i detektovanje prevara. Nasuprot tome, grupno tarifiranje nije jedan od osnovnih zahteva i nije podržano od Diameter protokola. Međutim, iako Diameter obrađuje tarifne upite pojedinačno, za većinu aplikacija sasvim je dovoljno što transportni protokoli koji se koriste obično u jednom paketu prenose grupu upita u slučaju gustog saobraćaja.

Serveri za autorizaciju upravljaju odabirom odgovarajuće strategije prenosa, pri čemu se izbor bazira na poznavanju korisnika i njegovih veza sa roming saradnicima. Server (ili agenti) koriste *Acct-Interim-Interval* i *Accounting-Realtime-Required* vrednosti parova atributa za kontrolu rada Diameter klijenata. *Acct-Interim-Interval* AVP daje instrukciju Diameter čvoru koji ima ulogu klijenta da neprekidno šalje tarifne zapise, čak i za vreme trajanja sesije. *Accounting-Realtime-Required* AVP koristi se za kontrolu ponašanja klijenta u slučaju kada je prenos tarifnih zapisa neuspešan ili je zakasnio.

Diameter tarifni server može da poništi privremeni interval ili zahtev za prenosom u realnom vremenu tako što će u *Accounting-Answer* odzivnoj poruci poslati *Acct-Interim-Interval* ili *Accounting-Realtime-Required* AVP. Kada je prisutan jedan od ova dva AVP-a u odzivu, poslednja primljena vrednost treba da se koristi za buduće tarifne aktivnosti u istoj sesiji.

Diameter čvor koji uspešno primi autentifikacionu i/ili autorizovanu poruku od baznog AAA servera mora prikupiti tarifne informacije za tu sesiju. *Accounting-Request* upit koristi se da prenese tarifne informacije do

lokalnog AAA servera, pri čemu server mora poslati *Accounting-Answer* odziv kao potvrdu o prijemu. Odziv sadrži Result-Code AVP, koji može ukazati na prisustvo greške u tarifnoj poruci. Odbačen upit može dovesti do prekida korisničke sesije, u zavisnosti od vrednosti Accounting-Realtime-Required AVP-a koji je za datu sesiju primljen ranije.

Svaka Diameter aplikacija mora definisati svoje specifične AVP-ove koji moraju biti prisutni u *Accounting-Request* poruci u delu nazvanom „Tarifni AVP-i“. Aplikacija mora pretpostaviti da će AVP-ovi definisani RFC preporukom biti prisutni u svim tarifnim porukama, tako da se u ovom delu definišu isključivo njihovi AVP vezani za specifičan servis.

Mehanizam Diameter protokola kreiran je tako da prevaziđe manje gubitke poruka, kao i povremene otkaze mreže. Diameter čvorovi koji imaju ulogu klijenta moraju implementirati odgovarajuće procedure zaštite od otkaza servera ili mrežnih linkova. Oni mogu imati neizbrisivu memoriju za sigurno čuvanje tarifnih zapisa tokom ponovnog podizanja sistema ili dužih mrežnih i serverskih otkaza. Klijent ne bi trebalo da ukloni tarifne podatke iz bilo koje memorijske lokacije sve dok ne primi odgovarajući Accounting-Answer odziv. Takođe, klijent može ukloniti najstarije, nedostavljene ili još uvek nepotvrđene tarifne podatke ukoliko više nema dovoljno memorijskih resursa. Diameter čvorovi koji imaju ulogu agenta moraju detektovati duplirane tarifne zapise nastale zbog slanja istog zapisa ka više servera, kao i umnožene poruke u tranzitu. Ova detekcija vrši se na osnovu inspekcije parova *Session-Id* i *Accounting-Record-Number* AVP-ova. Ukoliko se zahteva strogo utvrđivanje verodostojnosti od agenata, za ovu svrhu može se koristiti sigurnost sa kraja na kraj.

U zavisnosti od tipa tarifnog servisa i uputstava servera za autorizaciju postoje i različite vrste tarifnih zapisa. Ukoliko je tarifni servis takav da su početak i kraj događaja istovremeni, mora postojati par atributa Accounting-Record-Type sa setovanom vrednošću na EVENT_RECORD. Ako je u pitanju privremeni tarifni servis merljivog trajanja, moraju se koristiti parovi atributa sa posebnim vrednostima za početak i kraj zapisa – START_RECORD i STOP_RECORD. Ukoliko autorizacioni server nije dozvolio privremeno tarifiranje za odgovarajuću sesiju, moraju se generisati dva tarifna zapisa za svaki servis s obzirom na tip sesije. Kada je za datu sesiju poslat početni tarifni upit, Accounting-Record-Type par atributa mora se podesiti na vrednost START_RECORD. Kada se pošalje poslednji tarifni upit, vrednost mora biti STOP_RECORD. Ako je server za autorizaciju dozvolio privremeno tarifiranje, Diameter klijent mora kreirati i dodatni zapis, označen kao INTERIM_RECORD. Za jednu sesiju mora postojati samo jedan privremeni zapis koji traje u tom trenutku na pristupnom uređaju. Ukoliko se za istu sesiju generiše novi zapis on će se sačuvati preko prethodnog privremenog tarifnog zapisa.

Poređenje radius i diameter protokola

Iako je na tržištu protokola za AAA funkcije i dalje najpopularniji protokol RADIUS, njegova popularnost i dominacija imaju izraženu tendenciju pada. Osnovni razlog za to su sve izraženija ograničenja koja se posebno zapažaju pri razvoju novih i sve popularnijih tehnologija. Samim tim, nameće se pitanje protokola koji će ga zameniti. S obzirom na trenutne prednosti, uvedena poboljšanja, fleksibilnost, mogućnost proširenja, IETF-ovu i 3GPP-ovu podršku i podršku velikih kompanija, veliki su izgledi da ta uloga pripadne upravo protokolu Diameter. Kratak pregled najznačajnijih razlika protokola RADIUS i Diameter prikazan je u tabeli 1.

Tabela 1 – Uporedni prikaz karakteristika protokola RADIUS i Diameter
Table 1 – Comparison of the RADIUS and Diameter protocols

	RADIUS	Diameter
Arhitektura	klijent-server	peer-to-peer
Protokol na transportnom sloju	UDP	TCP i SCTP
Sigurnost	Nedovoljna podrška sigurnosti s kraja na kraj. Ne podržava poruke greške.	Koristi napredne algoritme rutiranja i omogućava dinamičko ispravljanje grešaka.
Autentifikacija	Nedovoljna podrška mobilnosti.	Puna podrška mobilnosti.
Autorizacija	Podržava samo periodičnu ponovnu autorizaciju.	Sadrži niz poruka koje se mogu koristiti prilikom nepredviđenih prekida komunikacije.
Tarifiranje	Nema mogućnost tarifiranja u realnom vremenu.	Ima mogućnost prenosa tarifnih informacija u realnom vremenu.

U slučaju primene RADIUS protokola, klijent-server koncept podrazumeva da se serveri mogu koristiti i kao posredni klijenti ostalim RADIUS serverima. Sama komunikacija između klijenta i servera temelji se na deljenom tajnom ključu koji se iz sigurnosnih razloga nikada ne šalje mrežom. Uprkos njegovim kvalitetnim rešenjima i pozitivnim karakteristikama treba uzeti u obzir da je protokol RADIUS razvijen sredinom 90-ih godina prošlog veka s namerom da pruži usluge AAA za potrebe tadašnje mrežne arhitekture. Skalabilnost protokola tada je bila u drugom planu. Zahtevi su se s godinama, razvojem novih tehnologija, porastom broja korisnika i složenosti usluga uveliko promenili. Kako bi odgovorio sve zahtevnijim trendovima i podržao brojne nove usluge, RADIUS je za svaku veću promenu zahteva dobijao nove i složenije dodatke. Vremenom je broj ugrađenih dodataka postao toliko veliki da se pri izradi novih prestalo voditi računa o njihovom uzajamnom delovanju. Osim nedostatka skalabilnosti, postala su očigledna i ostala ograničenja. Jedno od njih svakako

je isključiva upotreba nesigurnog i nepouzdanog UDP protokola na transportnom sloju. Mnoga ograničenja protokola RADIUS proizlaze iz činjenice da je on dizajniran kako bi pružio infrastrukturu za usluge AAA u tradicionalnim mrežama sa komunikacijom baziranom na tehnologiji PPP (*Point to Point Protocol*). Usluge se danas kreću u potpuno drugom smeru, prema tehnologiji mobilnog IP-a. Uzevši u obzir navedena ograničenja u kombinaciji s nedostatkom fleksibilnosti i slabom proširivošću protokola jasna je potreba za razvojem novijeg i naprednijeg naslednika.

AAA protokoli, kao što su TACACS i RADIUS, inicijalno su mogli da obezbede *dial-up* PPP i pristup terminalnom serveru. Razvojem interneta i novih pristupnih tehnologija, ruteri i NAS postali su kompleksniji i složeniji, postavljajući nove zahteve pred AAA protokole.

Protokol RADIUS ne podržava autorizaciju bez utvrđivanja verodostojnosti s obzirom na to da za slanje klijentskih upita zahteva i podatke o verodostojnosti. Protokol Diameter ne insistira na slanju ovih podataka u upitima, što predstavlja jedan od trenutnih zahteva IETF-ove radne grupe NASREQ (*Network Access Server Requirements*) koja se bavi uslugama podržanim na pristupnim mrežnim serverima.

Iako je PAP (*Password Authentication Protocol*) danas prilično nesiguran protokol, mnoge aplikacije ga i dalje koriste. Otuda se javlja potreba da AAA protokoli prenose obične, tekstualne ključeve preko velikih mreža. Da bi to bilo ostvarivo, tajnost ključeva mora biti osigurana. Takvi ključevi ne smeju biti izloženi posredničkim serverima koji se nalaze duž ruta. S obzirom na to da protokol RADIUS podržava samo sigurnost od tačke do tačke, ne može sprečiti izlaganje ključeva posredničkim serverima, niti osigurati tajnost ključa s kraja na kraj, što posredničkim serverima omogućava kontakt sa nezaštićenim podacima. Protokol Diameter omogućava takav stepen zaštite upotrebom CMS-a, u kojem su podaci sigurni, čak i kada putuju kroz razne posredničke servere. Pri upotrebi posredničkih servera, Diameter omogućava njihovo praćenje kroz mrežu, dok protokol RADIUS to ne podržava. Takođe, implementacije RADIUS-a tipično zahtevaju da ime ili adresa servera ili klijenta bude ručno konfigurisana, zajedno sa odgovarajućim deljenim tajnim ključevima. To rezultira velikom administracijom i može dovesti do narušavanja sigurnosti ako *Request Authenticator* nije konstantno jednak sa zahtevanim u RADIUS-u. Kroz DNS (*Domain Name System*) Diameter omogućava dinamičko otkrivanje parova. Dodela dinamičkih ključeva sesije omogućena je kroz sigurnost transportnog sloja.

S obzirom na to da RADIUS nema mogućnost utvrđivanja verodostojnosti s kraja na kraj, neispravan server ili zlonamerni korisnik mogu neprekidno ponavljati slanje starih paketa. Postupak može uzrokovati nemogućnost pružanja dalje usluge na opterećenom serveru. Takođe, napadi ponavljanjem mogu prouzrokovati slanje višestrukih administrativnih

poruka, čime se remeti praćenje potrošenih korisničkih resursa, a samim tim i naplata. Protokol Diameter pruža efikasne mehanizme odbrane od napada ponavljanjem pomoću vremenskih oznaka i CMS-a.

Protokol RADIUS zahteva postojanje deljenog tajnog ključa između klijenata i servera, što predstavlja problem kod podrške mobilnosti. Ukoliko se pretpostavi kretanje čvorova između različitih administrativnih celina, tajni ključ, jednak onom na domaćem serveru mobilnog čvora, trebalo bi da poseduju svi agenti u domenima kroz koje je taj mobilni čvor prošao. Samim tim, baze podataka agenata sadržale bi beskonačno mnogo tajnih ključeva korisnika. Protokol Diameter ne koristi mehanizme deljenog tajnog ključa, već se oslanja na IPsec (*IP Security*) i TLS (*Transport Layer Security*) kako bi obezbedio sigurnost komunikacije klijenata i servera.

RADIUS definiše verodostojnost na aplikacionom sloju i šemu integriteta koja se zahteva samo za upotrebu sa paketima odziva. S obzirom na to da RFC 3162 definiše upotrebu IPsec sa RADIUS-om, podrška IPsec se ne zahteva. Nije moguće definisati odvojene šeme autorizacije za svaku aplikaciju. To ograničava korist IPsec u domenu AAA aplikacija (kao što je roaming), gde može biti definisana različita sertifikaciona hijerarhija za upotrebu u AAA okruženju. Radi pružanja univerzalne podrške za sigurnost na transportnom sloju, IPsec je obavezan u Diameter-u, dok je TLS opcionalan.

Pošto je protokol RADIUS trenutno najčešće korišćen protokol za AAA, veoma je važno da potencijalni naslednici ovog protokola što jednostavnije sarađuju s njim. Ovde su ključni elementi RADIUS prilazi. Iako Diameter ima ostvarenu podršku za rad sa protokolom RADIUS preko takvih elemenata, kompatibilnost još uvek nije potpuna. Brojni IETF-ovi zahtevi za proširenjem osnovnog protokola Diameter, u kombinaciji s različitim implementacijama i verzijama protokola RADIUS, ponekad ipak uzrokuju međusobnu nekompatibilnost.

Posedovanje svojstva usklađivanja stanja kod AAA protokola znači da njihovi serveri pomažu klijentima pri obavljanju simultane kontrole korisničke prijave, ograničenjima pri tuneliranju i smanjenju vremena povezivanja. To je moguće ako se osigura oporavak stanja u slučajevima gubitka podataka pri ispadu ili greškama u sistemu. To se obično ostvaruje porukama za praćenje stanja sesije ili resursa i porukama za osvežavanje ili prekid veze. Protokol RADIUS ne sadrži naredbe koje bi se mogle primeniti za ostvarenje takvih poruka. Takođe, zbog modela arhitekture nije svaki element u mogućnosti da samostalno započne komunikaciju slanjem poruka bez prethodnog upita. Protokol Diameter već u svojoj osnovnoj specifikaciji podržava potrebne poruke.

Protokol Diameter sadrži niz poruka koje se mogu koristiti prilikom nepredviđenih prekida komunikacije, najčešće iniciranih sa serverske strane. U najnovijim verzijama RADIUS takođe sadrži niz poruka za prekid veze, ali bez mogućnosti da takve poruke budu poslate sa servera.

Ponovna autorizacija na zahtev odnosi se na mogućnost ponovnog traženja autorizacije klijenta ili servera. Protokol RADIUS podržava tek mogućnost periodične ponovne autorizacije i to bez prethodnih zahteva. Diameter je podržava u potpunosti kroz svoj sesijski orijentisan, *peer-to-peer* odnos između klijenata i servera.

Neželjene poruke, u kontekstu podrške za slanje neželjenih poruka, bile bi poruke koje nisu odgovor na neki eksplicitan upit. Protokol RADIUS ne dozvoljava serverima slanje ovakvih poruka klijentima. Ograničenje prvenstveno proizlazi iz arhitekture temeljene na klasičnom modelu klijent-server, gde isključivo klijenti šalju upite (neželjene poruke). Kod Diameter-a to je jednostavno omogućeno, jer je u *peer-to-peer* arhitekturi svaki čvor ujedno i klijent i server, pa samim tim u bilo kom trenutku bez prethodnog upita može poslati poruku nekom drugom čvoru. Ovo svojstvo najčešće se koristi za potrebe tarifiranja, u trenucima kada pristupni mrežni server treba da prekine određenu korisničku sesiju ili za podršku uslugama gde podatke o sesiji treba menjati tokom njenog trajanja.

U kontekstu formata paketa, osnovni problem je u veličini polja za oznaku sesija u zaglavlju RADIUS paketa, jer veličina od jednog okteta ne odgovara današnjim potrebama. Protokol Diameter za identično polje ima osigurana četiri okteta.

Osnovno ograničenje proširivosti protokola RADIUS sastoji se u ograničenju broja atributa koje prosečan paket ovog protokola može preneti. Takvo ograničenje nastaje zbog veličine polja oznake broja atributa od samo jednog okteta. Kod protokola Diameter veličina sličnog polja iznosi četiri okteta. Rezultat toga jeste da RADIUS omogućuje najviše 256 parova atributa i vrednosti po paketu, a Diameter čak 2^{32} . RADIUS, takođe, omogućava upotrebu višestrukih atributa istog tipa, što je nepovoljno za servere i klijente koji treba da odrede da li su višestruki identični atributi zapravo jedan fragmentisani ili više nezavisnih. Takođe, iako protokol RADIUS podržava attribute specifične za razne proizvođače, ne podržava takve naredbe. Protokol Diameter podržava i te naredbe kroz odgovarajuće aplikacije proizvođača.

Postupci retransmisije, ostvareni kod protokola RADIUS, prilično su složeni, stvaraju dodatno kašnjenje i iziskuju dodatne serverske resurse. Ponovno je razlog način na koji je ostvareno praćenje i identifikovanje pojedinih transmisija. S druge strane, Diameter koristi pouzdane protokole na transportnom sloju, kao što su TCP i SCTP protokoli, koji automatski nude mehanizme retransmisije, čime se smanjuje pritisak na serverske resurse. RADIUS koristi UDP protokol i ne definiše retransmisiju, pa, kao rezultat, pouzdanost zavisi od implementacije. To je glavni problem u tarifiranju, gde se gubitak paketa može direktno odraziti na prihod. Osim toga, kod protokola RADIUS kontrola toka zbog upotrebe protokola UDP praktično ne postoji. Upotreba pouzdanih transportnih protokola poput

TCP-a ili SCTP-a protokolu Diameter omogućuje kontrolu toka prvenstveno mehanizmom kliznih prozora.

Politika protokola RADIUS je takva da se sve poruke koje ne sadrže očekivanu informaciju ili sadrže greške ignorišu i odbacuju. Tako može doći do slučaja da pristupni mrežni server pretpostavi da mu je lokalni RADIUS server postao nepristupačan, jer ne dobija nikakve odgovore na poslati upit. Posledica toga je ponovno slanje svih neodgovorenih zahteva sa pristupnog servera drugim serverima. Međutim, oni neće promeniti opštu politiku ignorisanja i odbacivanja, niti će pristupni ruter ponovno dobiti odgovor. Ceo proces će se ponavljati dok pristupni server napokon ne odustane od upita, što jasno pokazuje nedostatke opisane procedure. Protokol Diameter zahteva da svaka poruka bude potvrđena ili pozitivnim odgovorom ili odgovorom koji sadrži šifru i opis greške. Pristupni server na ovaj način odmah saznaje kada i u kojoj poruci je došlo do greške.

Diameter podrazumeva podršku upravljanju greškama, sposobnost pregovaranja, obavezne/neobavezne parove atributa, za razliku od protokola RADIUS koji ne omogućava direktnu podršku agentima, pa ponašanje agenata varira u zavisnosti od implementacije. Diameter eksplicitno definiše ponašanje agenata.

Kako RADIUS ne omogućava eksplicitnu *proxy* podršku, nedostatak mogućnosti revizije sigurnosnih karakteristika na transportnom sloju dovodi do toga da je roming podležan spoljnim napadima, kao i prevarama partnera. Zbog toga RADIUS nije odgovarajući za široku primenu u internetu. Obezbeđivanjem eksplicitne podrške za roming unutar domena i rutiranje poruka, reviziju i sigurnost na transportnom sloju, Diameter omogućava siguran i skalabilan roming (Calhoun, et al, 2003).

Značajan napor utrošen je u omogućavanju kompatibilnosti protokola Diameter sa RADIUS-om i funkcionisanja oba istovremeno, u istoj mreži. Inicijalno, očekuje se da će Diameter biti ugrađen u mrežne uređaje, kao i u gejtvaje, omogućujući komunikaciju RADIUS uređaja i Diameter agenata. Ova sposobnost omogućava da se Diameter podrška doda postojećoj mreži, dodavanjem gejtvaja ili servera oba protokola.

Zaključak

Trendovi razvoja novih tehnologija i usluga svakim danom postavljaju nove izazove ostvarenju AAA mehanizama. Jasno je da su ti mehanizmi danas preko potrebni zbog načina rada samih usluga i zbog stepena sigurnosti koji one moraju ponuditi.

Sa konceptom koji je konstantno dorađivan, dopunjavan i prilagođavan, protokol RADIUS služi mnogim korisnicima širom sveta skoro dve decenije. Ovaj protokol korisnicima pruža centralizovanu kontrolu nad funkcijama utvrđivanja verodostojnosti, autorizacije i tarifiranja korisnika.

Do sada su se nedostaci ovog protokola uglavnom prevazilazili korišćenjem dodatnih sigurnosnih mehanizama. Međutim, protokol RADIUS ne može u potpunosti da ispuni sve veće zahteve koji se postavljaju pred AAA funkcije. Razlog je najčešće zastarela, kruta i nefleksibilna arhitektura, kao i složenost implementacije proširenja.

Radi prevazilaženja ovih nedostataka usledio je razvoj novog protokola koji bi, na temelju već ostvarenih i proverenih principa, omogućio upravo sve ono što dosadašnji protokoli ne mogu. Primer takvog novog protokola je Diameter. Njegova osnovna i najznačajnija karakteristika je jednostavna mogućnost proširenja osnovnog rešenja. U kombinaciji sa usavršenim funkcionalnostima koje nude svi ostali AAA protokoli stvoreno je kvalitetno novo rešenje. Prednosti takvog rešenja prepoznali su brojni proizvođači, organizacije i samostalni programeri. Treba napomenuti da je 3GPP odabrao upravo Diameter kao osnovni signalizacioni protokol za utvrđivanje verodostojnosti, autorizaciju i tarifiranje i upravljanje pokretljivošću unutar njihovog velikog projekta, multimedijalnog podsistema zasnovanog na protokolu IP (IP *Multimedia Subsystem*, IMS) (Kumar, Harihar, 2012, pp.266-269).

S obzirom na opisane karakteristike protokola Diameter, tehničke prednosti u odnosu na RADIUS i ostale konkurentne protokole, veliku podršku razvojne zajednice i velikih kompanija, u narednom periodu se očekuje da Diameter potpuno potisne trenutno više korišćeni protokol RADIUS. Pitanje je samo koliko će trajati ova tranzicija i da li će doći do eventualne značajnije konkurencije na tržištu.

Literatura

- Aboba, B., Arkko, J., Harrington, D., 2000, *Introduction to Accounting Management*, RFC 2975 (Informational), IETF.
- Calhoun, P., Loughney, J., Guttman, E., Zorn, G., Arkko, J., 2003, *Diameter Base Protocol*, RFC 3588 (Standards Track), IETF.
- Hashmathur R., Govardhan, A., Venkat Narayana Rao, T., 2010, *Design and Implementation of RADIUS – An Network Security Protocol*, Global Journal of Computer Science and Technology, 10(7) Ver. 1.0, pp.48-54.
- Kumar, V, Harihar, M., 2012, *Diameter-based Protocol in the IP Multimedia Subsystem*, International Journal of Soft Computing and Engineering, 1(6), pp.266-269.
- Metz, C., 2001, *AAA PROTOCOLS: Authentication, Authorization, and Accounting for the Internet*, IEEE Internet Computing online.
- Ooms, W., 2007, *Providing AAA with the Diameter protocol for multi-domain interacting services*, Master Thesis, Faculty of Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science, Design and Analysis of Communication Systems, University of Twente.
- Pras, A., Van Beijnum, B-J., Sprenkels, R., Parhonoyi, R., 2001, *Internet Accounting*, IEEE Communications Magazine, 39(5), pp.108-113.

- Rigney, C., 1997, *RADIUS Accounting*, RFC 2139 (Informational), IETF.
- Tuomimäki, J., 2003, *Overview, Details and Analysis of Radius Protocol*, pp.1-16, Seminar on Internetworking, Helsinki University of Technology.
- Zseby, T., Zander, S., Carle, G., 2002, *Policy Based Accounting*, RFC 3334 (Experimental), IETF.

ANALYSIS OF THE RADIUS AND DIAMETER PROTOCOLS IN TERMS OF PRICING TELECOMMUNICATION SERVICES

FIELD: Telecommunications

ARTICLE TYPE: Professional Paper

Summary:

Introduction

Accounting of telecommunication services is closely related to the functions of authentication and authorization. These functions are usually considered together and implemented within the same server using a common protocol. The most renowned protocols for authentication, authorization and accounting are the RADIUS and Diameter protocols.

AAA functions and related protocols

In this chapter, the accounting management architecture developed by IETF is presented. It includes the interaction between network elements, accounting servers and billing and charging servers. Accounting data can be used for management, planning and charging users as well as other (specific) purposes. Authentication is the process of confirming a user's digital identity, usually through some type of identifiers and related data. Authorization determines whether a particular entity is authorized to perform an activity.

Basic Functions of the RADIUS Protocol

The RADIUS architecture is based on a client-server model. It uses UDP on the transport layer. Transactions between the client and the server are authenticated, which is achieved by using a common secret key that is never sent through the network. Given the limited resources available to network devices, RADIUS facilitates and centralizes charging end users, provides some protection against active attacks by unauthorized users and it has great support from different network equipment vendors. Although RADIUS is a widely accepted protocol for the mechanisms of authentication, authorization and accounting, it has certain shortcomings that may be caused by the protocol itself or by its poor implementation.

Architecture and Operation of the Diameter Protocol

Diameter is a scalable protocol designed by the IETF working group in order to eliminate shortcomings and functional limitations of the RADIUS protocol and eventually to replace it in the near future.

Most of the basic Diameter mechanisms and its functionality are based on the fundamental functionality of the RADIUS protocol and the rest is a result of new solutions and improvements to the existing ideas. The Diameter protocol focuses on the expansion of flexible, advanced routing algorithms, dynamic troubleshooting and safety characteristics of the transport layer. This paper defines the basic packet formats, data transfer mechanisms and error management, methods of communication between individual elements of the architecture and basic security functions. The Diameter protocol architecture is based on the peer-to-peer model. Besides clients and servers, network agents can be the elements of this architecture. The Diameter agent is an element that does not allow authentication / authorization locally, but the server performs this operation, while one node can be both the client and the server simultaneously. The role of agents can be forwarding (Relay Agent), redirection (Redirect Agent), mediation (Proxy Agent) and translation (Translation Agent). Since the peer-to-peer model is applied, each Diameter element can establish more connections at the same time. Diameter enables the delivery of attribute value pairs, the possibility of negotiation, error notification, extensibility by adding new commands and attribute value pairs, the basic services necessary for applications such as managing user sessions or accounting.

Comparison of the RADIUS and Diameter protocols

Although at the protocol market for authentication, authorization and accounting, the RADIUS protocol remains the most popular, its popularity and dominance has a decreasing tendency. The main reasons for this are more prominent limitations which are particularly perceived due to new and increasingly popular technology. Therefore, the main issue is about a protocol that will replace RADIUS. The peer-to-peer architecture used by Diameter is much more flexible than the client-server model because in the peer-to-peer architecture every element can be both the client and the server, depending on the current needs of the network. At the transport layer, Diameter uses the TCP or SCTP protocols. When compared to UDP, these protocols provide reliable transmission which is very important for applications exchanging data related to accounting. In addition, the Diameter protocol allows the transmission of accounting information in real time and it incorporates several methods for troubleshooting in order to minimize the loss of accounting data when a failure occurs, which is not the case with RADIUS. Given the present benefits, introduced improvements, flexibility, expandability, IETF and 3GPP's support and the support of big companies, there is a great chance that Diameter will replace RADIUS.

Conclusion

This paper presents a general overview of the RADIUS and Diameter protocols, including some of their basic operations with a special emphasis on accounting applications. The similarities of these pro-

protocols are reflected in the support of the same functions in a similar format of the packages. The differences are related to the protocol architectures and the methods of determining authentication, authorization and accounting mechanisms. Regarding accounting aspects, the most important advantages of the Diameter protocol are its possibility to transmit accounting information in real time and implemented mechanisms for troubleshooting in order to minimize the loss of accounting data in case of failure. Owing to these characteristics, the Diameter protocol achieves a significant advantage over RADIUS in next generation networks.

Key words: Accounting system, Authentication, Authorization, charging, functionality, Protocol architecture, real-time monitoring, telecommunication networks.

Datum prijema članka/Paper received on: 07. 07. 2012.

Datum dostavljanja ispravki rukopisa/Manuscript corrections submitted on: 03. 12. 2012.

Datum konačnog prihvatanja članka za objavljivanje/ Paper accepted for publishing on: 05. 12. 2012.

NAPADI NA IEEE802.11 BEŽIČNE MREŽE

Dejan M. Tepšić, Mladen Đ. Veinović,
Univerzitet Singidunum, Beograd

DOI: 10.5937/vojtehg61-2301

OBLAST: računarske nauke, telekomunikacije

VRSTA ČLANKA: stručni članak

Sažetak:

U radu su prikazani nedostaci današnjih IEEE 802.11 bežičnih mreža u situacijama kada se nađu na meti napadača. U meri u kojoj su namenjena i obim ovog rada to dozvoljavali, obrađene su savremene metode napada na bežične računarske mreže. Uprkos napretku i razvoju sigurnosnih protokola i dalje postoje slabosti u IEEE 802.11 bežičnim mrežama. Mogući su brojni netehnički, mrežni i softverski napadi. Za sada, bežične mreže nije preporučljivo koristiti u okruženjima gde se ne toleriše nepouzdanost ili nedostupnost.

Ključne reči: WLAN, IEEE 802.11, bežične mreže, napadi.

Uvod

U celokupnoj istoriji umrežavanja, nikada nije bilo lakše prodrati u mrežu. IEEE 802.11 bežična mrežna tehnologija omogućuje napadačima i mrežnim administratorima jeftine, čak i besplatne alate za rad. Bilo da su u pitanju strastveni korisnici Linux ili Windows operativnih sistema, alati su dostupni svuda. Zbog postojanja sveprisutne piraterije i hakerskih zajednica, napadači mogu dobiti čak i skupe softvere za analizu i upad na mrežu bez finansijskih ulaganja. Ovaj rad prikazuje najvažnije alate i način njihovog efikasnog korišćenja za prodiranje u bežične mreže i otkrivanje korisnih informacija.

Jedan od najvećih problema današnjih bežičnih mreža je nedostatak efikasnih sistema za detekciju upada. Banke, osiguravajuća društva, kao i druge organizacije koje poseduju osetljive informacije, imaju korporativne politike koje ne dozvoljavaju upotrebu bežičnih mreža. Oni misle da takva politika obezbeđuje sigurnost njihovih ožičenih mreža, ali tu ozbiljno greše. Zlonamernu bežičnu pristupnu tačku mogu postaviti na mrežu napadači ili zaposleni. Tada, bez sistema za detekciju upada, ne bi ni na koji način znali da su svi njihovi sigurnosni mehanizmi zaobiđeni, dajući pun pristup napadaču u opsegu od nekoliko stotina metara od objekta. Mrežni administratori trebalo bi da znaju da koriste alate za pronalaženje

bežičnih pristupnih tačaka, da onemoguće neovlašćene bežične pristupne tačke i da poznaju sve ranjivosti bežičnih mreža. Jedan od najtežih zadataka predstavlja upoznavanje korisnika sa bežičnim mrežnim tehnologijama. Korisnici često ne razumeju tehnologiju, niti rizike povezane sa njom. IEEE 802.11 bežične mreže imaju značajan udeo u nekim organizacijama, ali istovremeno stvaraju ogromnu sigurnosnu rupu. Kompanije moraju pažljivo razmotriti da li su bežične mreže pogodne za njih i mogu li biti adekvatno zaštićene. Brojni faktori utiču na sigurnost bežičnih mreža, od planske instalacije do obuke IT osoblja.

Zaboravljanje pokrivanja nedostataka u bežičnoj mrežnoj sigurnosti može dovesti do upada napadača u mrežu. Rizici mogu uveliko prevagnuti dobit korišćenja bežičnih tehnologija, tako da se neke kompanije odlučuju da ih uopšte ne koriste. Ipak, čak i takve kompanije moraju se zaštititi od bežičnih napada. Poželjno im je demonstrirati alate za napad. Ukoliko imaju bežične mreže osigurane WEP sigurnosnim mehanizmom, otkrivanje WEP ključa brzo će im otvoriti oči. Svakako, ove demonstracije uvek treba izvoditi uz dozvolu klijenta, u zatvorenom okruženju. U suprotnom, to može dovesti do pravnog spora i drugih neželjenih rezultata.

Vreme nikada nije prijatelj IT stručnjaka. Praćenje razvoja novih alata i tehnika zahteva dosta rada i vremena. Tako i ovaj rad predstavlja presek trenutnog stanja u svetu sigurnosti IEEE 802.11 bežičnih mreža.

Bezbednost u IEEE 802.11 bežičnim mrežama

Sigurnost IEEE 802.11 bežičnih mreža prvobitno je bila osigurana WEP sigurnosnim protokolom koji se oslanja na RC4 algoritam za šifrovanje i CRC algoritam za proveru integriteta (Milovanović, 2009). Osnovni problemi WEP-a su kratki inicijalizacioni vektor, nesigurna provera integriteta podataka, korišćenje zajedničkog ključa, nepostojanje mehanizma za upravljanje i zamenu ključeva, nedostatak zaštite od beskonačnog umetanja istog paketa u mrežu, nepostojanje autentifikacije bežične pristupne tačke i sl. Posledice navedenih propusta su laki napadi na WEP mreže, odnosno njihova potpuna nesigurnost.

Zbog toga je započeo rad na IEEE 802.11i protokolu koji je trebalo radikalno da poboljša sigurnost bežičnih mreža. Budući da je razvoj protokola potrajao, izdat je WPA standard, kako bi nadomestio sigurnosnu prazninu koju je izazvao WEP. Takođe, WPA se oslanja na RC4 i CRC algoritme, ali donosi privremene ključeve i MIC algoritam za očuvanje integriteta podataka. Uvedena je 802.1X autentifikacija, odnosno više nisu potrebni zajednički ključevi već je moguće koristiti autentifikacione servere. Povećana je dužina inicijalizacionog vektora koji se dobija na osnovu serijskog broja paketa, kako bi se sprečilo umetanje istog paketa u bežičnu mrežu. Slabost WPA sigurnosnog mehanizma je korišćenje zajedničkog ključa.

Kasnije se pojavio i WPA2 (IEEE 802.11i). Za razliku od WPA mehanizma koji je radio na starim uređajima uz zamenu softvera, WPA2 zahteva nove mrežne uređaje koji mogu obavljati AES šifrovanje. AES zamenjuje RC4 algoritam i donosi znatno veću sigurnost. Integritet podataka kriptografski je zaštićen.

Prvobitni WEP sigurnosni protokol danas je gotovo nezaštićen od brojnih, dokazano izvodljivih napada. WPA, iako noviji sigurnosni protokol, takođe poseduje sigurnosne propuste, te se kao takav ne preporučuje za upotrebu u okruženjima gde se zahteva visok stepen sigurnosti. Sa druge strane, WPA2 sigurnosni protokol, iako dokazano ranjiv, predstavlja sasvim solidno rešenje za kriptografsku zaštitu podataka prilikom prenosa putem IEEE 802.11 bežičnih mreža.

Iako su IEEE 802.11 protokolom definisani sigurnosni standardi, bežične mreže predstavljaju jednu od najslabijih karika u lancu računarskih mreža. Osnovni sigurnosni zahtevi svake računarske mreže su pouzdana provera identiteta korisnika, zaštita privatnosti i autorizacija korisnika. Pomenuti zaštitni mehanizmi poseduju niz sigurnosnih propusta. Međutim, zbog nedovoljne upućenosti u značaj same sigurnosti, veliki broj korisnika ne koristi nikakvu vrstu zaštite, što njihovu mrežu ostavlja otvorenu za napadače. Za uspešnu autentifikaciju korisnika neophodno je korišćenje pouzdanog sistema provere identiteta korisnika.

Neophodno je razmotriti koliko je napad na bežičnu računarsku mrežu izvodljiv u praksi. Početni problem svakog napada je doći do signala same mreže i tako izvesti aktivan ili pasivan napad. Da bi napadač bio u mogućnosti da izvede pasivan napad mora imati opremu koja može da osluškuje i presreće saobraćaj između bežične pristupne tačke i klijenta, što znači da napadač mora poznavati fizički sloj definisan standardom IEEE 802.11. Za aktivan napad potrebno je posedovati opremu koja je sposobna da šalje podatke na mrežu (Evseev, et al, 2011, pp.15–39), a ona nije jeftina. Treba uzeti u obzir i činjenicu da proizvođači bežične mrežne opreme često zanemaruju napade na sloju veze, smatrajući ih nepraktičnim i neizvodljivim, što je pogrešno iz dva razloga:

1. Mogućnost postojanja napadača koji nije ograničen materijalnim resursima i vremenom, tj. napadač može uložiti velika sredstva i svoje vreme kako bi pristupio podacima. Kao primer može poslužiti industrijska špijunaža, koja je prilično profitabilan posao.

2. Hardver potreban za pasivan i aktivan napad dostupan je svima u obliku bežičnih mrežnih kartica ili adaptera za računare. Modifikacija drajvera na takvim karticama omogućuje izvođenje pasivnih i aktivnih napada. Vreme uloženo u takav posao nije kratko, ali je izmena drajvera posao koji se obavlja samo jednom. Ukoliko se gotovi izmenjeni drajveri objave na internetu postaju dostupni svima.

Zbog toga je razumno pretpostaviti da dovoljno motivisan napadač može ostvariti pun pristup sloju podataka i da je u mogućnosti da izvede pasivne i aktivne napade na bežične mreže.

U bežičnim mrežama koriste se različite antene. Prilikom projektovanja bežične mreže u nekom području potrebno je detaljno pregledati to područje i utvrditi optimalnu vrstu antena koje će se koristiti i njihovu snagu zračenja, vodeći računa o svim ograničenjima. Takođe, mora se uzeti u obzir da je frekvencija koju koriste bežične mreže po standardima IEEE 802.11 b, g i n od 2,4 GHz nelicencirana, što znači da može doći do interferencije sa bežičnim uređajima koji rade na istoj ili sličnoj frekvenciji, pa čak i do potpunog uskraćivanja servisa do kojeg uglavnom dolazi usled nepažnje projektanta bežične mreže. Osim toga, potrebno je pretpostaviti da napadač može imati bolju i osetljiviju opremu od one koja je propisana standardima, što praktično proširuje domet mreže van fizičkih granica organizacije kojoj mreža pripada i omogućuje brojne napade među kojima „napad sa parkirališta“ (parking lot attack) i „ratnu vožnju“ (wardriving).

Sigurnosni napadi na IEEE 802.11 bežične mreže

Bežične lokalne računarske mreže definisane IEEE 802.11 standardom nude praktičnost, pokretljivost, a u mnogim slučajevima mogu biti jeftinije i jednostavnije za implementaciju od ožičenih mreža. Kao posledica potražnje i novih industrijskih standarda bežična mrežna tehnologija je prihvaćena i ostaće prisutna. Svakako, postavlja se pitanje sigurnosti bežične mrežne tehnologije.

Bežične mreže definisane su na Institutu inženjera elektrotehnike i elektronike (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) 802.11 skupom standarda (Tanenbaum, Wetherall, 2010). IEEE 802 standard dobio je ime na osnovu godine i meseca kada je ova grupa formirana – februar 1980 godine. Broj 11 u nazivu standarda odnosi se na bežične LAN mreže. Postoji čitav niz industrijskih grupa za bežično umrežavanje, ali dve glavne, opšteprihvaćene su IEEE 802.11 radna grupa i Wi-Fi Alliance.

Uz bežične mreže dolaze novi sigurnosni rizici (Earle, 2006).

Netehnički napadi

Ove vrste napada koriste različite ljudske slabosti, kao što su nedostatak savesti, nehat i preterana poverljivost prema strancima. Tu su, takođe, fizičke ranjivosti koje napadaču daju direktan pristup na bežične uređaje. To su često najlakše vrste napada koji uključuju:

- upad na bežične uređaje koje su korisnici samostalno instalirali i ostavili nezaštićene,

- socijalni inženjering, napadi gde se napadač predstavlja kao neka druga osoba i navodi korisnike na odavanje informacija o sopstvenoj mreži,
- fizički pristup na pristupne tačke, antene i ostalu bežičnu opremu.

Mrežni napadi

Kada je reč o mrežnim napadima, postoje brojne tehnike koje napadači mogu koristiti kako bi provalili unutar bežične mreže ili je bar onesposobili. Ovi napadi uključuju:

- instaliranje zlonamernih bežičnih pristupnih tačaka i varanje bežičnih klijenata koji se povezuju na njih,
- snimanje mrežnog saobraćaja sa udaljenosti: šetnjom, vožnjom ili letom iznad mreže,
- napadanje mrežnog saobraćaja lažiranjem MAC adrese (napadač se maskira kao legitiman korisnik), napad „čoveka u sredini“ (umetanje bežičnog sistema između bežične pristupne tačke i bežičnih klijenata) i slično,
- korišćenje mrežnog protokola poput SNMP-a,
- napad uskraćivanja servisa (Denial of Service, DoS),
- ometanje RF signala.

Softverski napadi

Pored sigurnosnih problema sa IEEE 802.11 protokolom, prisutne su softverske ranjivosti operativnih sistema i programa na bežičnim klijentima. Navodimo neke primere softverskih napada:

- napadanje operativnih sistema i drugih aplikacija na bežičnim klijentima,
- upadi putem podrazumevanih parametara, kao što su lozinke i SSID-jevi koji se mogu lako odrediti,
- razbijanje WEP ključeva i prisluškivanje unutar mrežnog sistema šifrovanja,
- ostvarivanje pristupa iskorišćavanjem slabe mrežne autentifikacije.

Metodologija napada

Pre nego što započne testiranje bežične mreže na sigurnosne propuste važno je definisati formalnu metodologiju testiranja (Graves, 2010). Postoje formalne procedure koje bi trebalo uključiti u testiranje da bi ono bilo ispravno i da bi se optimalno iskoristilo:

- prikupljanje javnih informacija, kao što su imena domena i IP adrese koje mogu poslužiti kao dobro polazište,
- mapiranje mreže da bi se dobila opšta ideja o njenom izgledu,

- skeniranje sistema da bi se videlo koji uređaji su aktivni i komuniciraju,
- utvrđivanje servisa koji se koriste,
- pretraga za specifičnim ranjivostima,
- napad na sistem.

Napadači započinju napad na bežične mreže posmatranjem sistema kako bi pronašli njegove slabosti. Za početak potrebno je pretražiti sledeće parametre bežične mreže:

- jačinu radio-signala,
- specifične SSID-ijeve koji se emituju,
- IP adresni plan,
- zaštitne mehanizme, kao što su WEP, WPA, WPA2 ili VPN saobraćaj,
- hardverske modele uređaja,
- softversku verziju uređaja.

Snimanje sistema

Prvi korak pre samog napada je snimanje sistema (footprinting), odnosno sakupljanje informacija o mreži koje su dostupne svima. Većina podataka otkriva se pomoću pretraživača kao što je Google (www.google.com). Zapravo, Google je jedan od omiljenih alata za obavljanje procene sigurnosti u celini. Iznenadjujuće je šta se sve može učiniti sa njim. Moguće je tražiti informacije o bežičnim sistemima, njihovoj konfiguraciji, pretraživati ključne reči i informacije koje su slučajno ili namerno objavljene na internetu. Budući da su bežične mreže uglavnom lokalizovane, javno dostupne informacije možda neće biti rasprostranjene u onoj meri kao što je to slučaj kod ožičenih mrežnih sistema.

Sledeća područja u potrazi za informacijama o bežičnim sistemima su internet baze podataka bežičnih mreža, koje sadrže podatke kao što su SSID-jevi, MAC adrese i GPS koordinate bežičnih pristupnih tačaka koje su otkrili znatizeljni napadači.

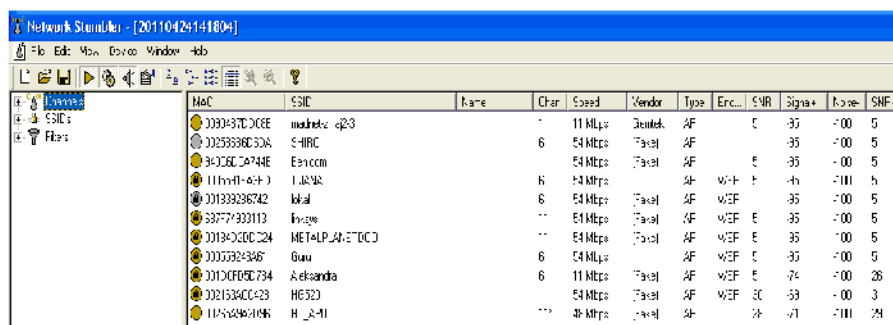
Mapiranje mreže

Drugi korak je stvaranje mrežne karte koja pokazuje kako bežični sistem izgleda. Mapiranje bi trebalo učiniti iz oba smera, unutar i izvan mreže, jer bežične mreže poseduju radio-talasnu karakteristiku. Emitovanje radio-talasa omogućuje njihovo otkrivanje sa obe strane.

Network Stumbler

Network Stumbler (www.netstumbler.com) najbolji je alat za mapiranje bežičnih mreža, odnosno za stvaranje unutrašnjeg i spoljašnjeg izgleda bežične mreže. Ovaj besplatni Windows alat omogućuje napadaču skeniranje radio-talasa izvan zgrade, dok sedi u automobilu na parkirištu ili tokom „ratne vo-

žnje“. Može se pokrenuti i unutar zgrade kako bi pronašao sve bežične pristupne tačke, među kojima i zlonamernu koju ne pripadaju toj mreži. Slika 1 prikazuje informacije koje Network Stumbler može prikupiti o bežičnoj mreži, bez obzira na to da li je zaštićena WEP, WPA ili WPA2 sigurnosnim protokolom.

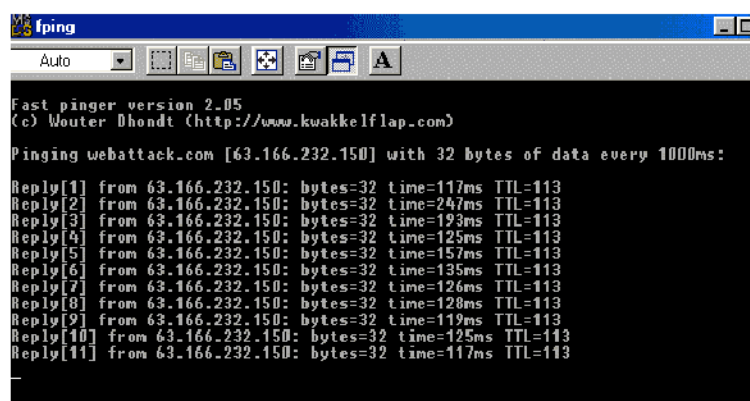


Mac	SSID	Name	Chan	Speed	Vendor	Type	Enc...	SNR	Signal	Power	SNR+
000037C0C0EE	madnetz_q23		-	11 Mbps	Realtek	AF	E	-35	-100	5	
00253838E3DA	S-HRC		6	54 Mbps	Intel	AF	E	-35	-100	5	
3C03C0C0744E	Easycam			54 Mbps	Intel	AF	E	-35	-100	5	
11111111-1111	LAN		6	54 Mbps	Intel	AF	E	-35	-100	5	
001333333333	lola		6	54 Mbps	Intel	AF	E	-35	-100	5	
337777333113	lola			54 Mbps	Intel	AF	E	-35	-100	5	
0013C0C0C0C0	METALPLANE7000			54 Mbps	Intel	AF	E	-35	-100	5	
000037C0C0EE	Gau		6	54 Mbps	Intel	AF	E	-35	-100	5	
0013C0C0C0C0	Aleksandra		6	11 Mbps	Intel	AF	E	-35	-100	26	
00253838E3DA	H6320			54 Mbps	Intel	AF	E	-35	-100	3	
11111111-1111	H_2-11			54 Mbps	Intel	AF	E	-35	-100	24	

Slika 1 – Network Stumbler
Figure 1 – Network Stumbler

Nmap i Fping

Ovi alati koriste protokol za upravljanje porukama na internetu (Internet Control Message Protocol, ICMP), kako bi se utvrdilo koji klijenti su prisutni na bežičnoj mreži, bez obzira na to da li je mreža zaštićena WEP, WPA ili WPA2 sigurnosnim protokolom. Nmap (<http://nmap.org>) i Fping (<http://fping.sourceforge.net>) jesu alati napisani za Windows, UNIX i Linux platforme. Razlikuju se od običnog ping-a koji pokušava dobiti odgovor samo od jednog klijenta, u tome što oni šalju ping paket na jednog klijenta i momentalno prelaze na sledećeg u round-robin algoritmu. Ako klijent odgovori, to se beleži i uklanja sa spiska klijenata za proveru. Ako klijent ne odgovori u određenom roku, smatra se nedostupnim. Na slici 2 prikazan je alat Fping.



Slika 2 – Fping
Figure 2 – Fping

Kada se prikupe osnovne informacije o bežičnoj mreži, kao što su SSID i IP adrese, više informacija moguće je saznati kroz proces skeniranja sistema koji se zove nabrojiva lista (enumeration). Nabrojiva lista je ispitivanje sistema i pravljenje liste sa svim detaljima koje je moguće otkriti o tome šta i kako radi. Procesom nabrojive liste moguće je otkriti:

- žive bežične mrežne uređaje (pristupne tačke i bežične klijente),
- jačinu radio-siguala,
- koji sigurnosni mehanizmi se koriste,
- koji mrežni portovi su otvoreni na bežičnim pristupnim tačkama i klijentima.

Network Stumbler ne samo da može otkriti žive bežične mrežne uređaje, već i detaljnije informacije o jačini radio-siguala i sigurnosni mehanizam koji se koristi. Stoga je Network Stumbler dobar alat za skeniranje sistema.

Korišćenjem alata za skeniranje portova kao što je Nmap moguće je videti koji mrežni portovi su otvoreni na bežičnim mrežnim uređajima. Skeniranje portova pomaže napadačima u stvaranju detaljnije slike o servisima koji su dostupni na bežičnoj mreži. Te informacije im pružaju polaznu tačku da pokušaju iskoristiti potencijalne ranjivosti sistema. Tabela 1 prikazuje portove koji se često mogu pronaći otvoreni i koji su osetljivi na napade.

Često napadani mrežni portovi

Tabela 1

Often attacked network ports

Table 1

Broj porta	Servis	Protokol
20	FTP data (File Transfer Protocol)	TCP
21	FTP control	TCP
22	SSH (Secure Shell)	TCP
23	Telnet	TCP
25	SMTP (Simple Mail Transfer Protocol)	TCP
53	DNS (Domain Name System)	UDP
80	HTTP (HyperText Transfer Protocol)	TCP
110	POP3 (Post Office Protocol version 3)	TCP
135	DCE/RPC Endpoint Mapper for Microsoft networks	TCP, UDP
137,138,139	NetBIOS over TCP/IP	TCP, UDP
161	SNMP (Simple Network Management Protocol)	TCP, UDP
443	HTTPS (HTTP over SSL)	TCP
512,512,514	Berkeley remote commands (rsh, rexec and rlogin)	TCP
1433	Microsoft SQL Server	TCP, UDP
1434	Microsoft SQL Monitor	TCP, UDP
3389	Windows Terminal Server	TCP

Napadi na IEEE 802.11 bežične mreže

Socijalni inženjering

Socijalni inženjering (Beaver, Davis, 2005) jeste tehnika napadača kojom se iskorišćava prirodno poverenje većine ljudi. Napadači se često predstavljaju kao zaposleni radnici unutar kompanije ili kao neke druge osobe, kako bi dobili informacije kojima inače ne bi mogli pristupiti. Zatim koriste dobijene informacije kako bi dublje prodrli u računarsku mrežu.

Socijalni inženjering se lakše izvodi u većim kompanijama, ali to se može dogoditi svakome. Napadač može tvrditi da je kupac, poslovni partner, konsultant, administrator i sl.

Najlakši način za početak prikupljanja informacija tokom socijalnog inženjeringa je jednostavno pretraživanje interneta putem Googlea. Napadač može koristiti Google kako bi pronašao telefonski imenik kompanije, organizacione dijagrame, mrežne dijagrame i sl. Te informacije mogu se koristiti kao osnova za socijalni inženjering i konačan prodor u mrežu.

Napadač može koristiti razne metode za prikupljanja informacija od zaposlenih. Dve jednostavne i manje zahtevne metode su telefon i elektronska pošta. Napadač može jednostavno pozvati slučajnog zaposlenog i početi postavljati pitanja. Pritom koristi telefon na kojem neće odati svoj identitet. Isto može učiniti i sa elektronskom poštom, pri čemu će promeniti svoj nalog u e-mail klijentu ili će koristiti Web poštu (webmail).

Fizička sigurnost IEEE bežičnih mreža

Neovlašćena oprema

Vrlo čest problem je naivno uvođenje bežične opreme na mrežu. Naime, neki korisnici samostalno instaliraju bežičnu opremu u kancelariji, ne razumejući sigurnosne probleme povezane sa njihovom radnjom.

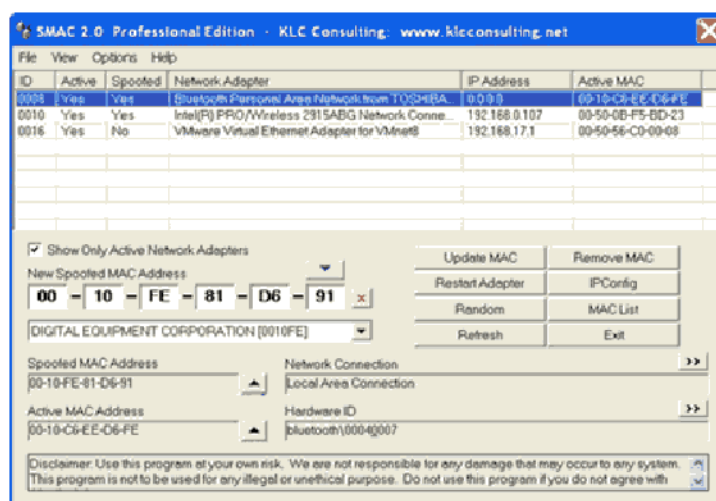
Podešavanje snage zračenja bežične pristupne tačke

Radio-talasi putuju, što znači da napadačima nije potrebna fizička konekcija na bežičnoj mreži. Prvi korak za testiranje bezbednosti bežične računarske mreže jeste da se utvrde njene granice. Radio-talasi ne poštuju definisane granice, pa je na mestima gde se ne želi emitovanje signala neophodno smanjiti snagu zračenja bežične pristupne tačke, tako da signali putuju na kraćim udaljenostima. Ukoliko se signali i dalje prostiru van definisanih granica mreže može se uneti dodatno slabljenje upotrebom atenuatora. Konačno, moguće je jednostavno premestiti bežičnu pristupnu tačku.

Provera mreže za neželjenim klijentima

Većina bežičnih pristupnih tačaka omogućuje da se vide IP adrese asociranih klijenata ili keš svih MAC adresa. Za male mreže dovoljno je povremeno pregledati keš MAC adresa, kako bi bili sigurni da su samo legitimni klijenti asocirani na bežičnu pristupnu tačku. Ukoliko se pronađe klijent koji tu ne pripada, može se koristiti MAC filtriranje za blokiranje tog klijenta.

Za velike mreže praćenje svih MAC adresa unutar kompanije je isuviše teško. Pritom, napadač bi mogao koristiti alat za nadgledanje protoka podataka i otkriti legitimne MAC adrese klijenata. Tada bi mogao koristiti alat za menjanje MAC adrese, kao što je SMAC (Spoof MAC) koji mu omogućava da promeni hardversku ili MAC adresu na bilo kom interfejsu na Windows operativnom sistemu. Slika 3 prikazuje SMAC (www.klcconsulting.net/smac) korisnički interfejs. Ovaj napad podjednako je efikasan na bežičnim mrežama zaštićenim WEP, WPA ili WPA2 sigurnosnim protokolom.



Slika 3 – SMAC
Figure 3 – SMAC

Antene

Antene su sastavni deo bežičnih računarskih mreža. Prilikom postavljanja bežične pristupne tačke mora se razmotriti oblast zračenja različitih tipova antena. Tip izabrane antene utiče na performanse i domet bežične mreže, kao i njenu sigurnost.

U bežičnim računarskim mrežama koriste se četiri osnovna tipa antena:

- parabolična,
- yagi,
- dipol,
- omnidirekciona.

Parabolična antena

Parabolična antena prvenstveno se koristi za konekcije tipa tačka na tačku. Može biti u obliku tanjira ili kao žičana rešetkasta mreža. Parabolična antena je usmerena, što znači da zrači u jednom određenom pravcu.

Yagi antena

Yagi antena fokusira zrake, ali u manjoj meri nego parabolična antena. Pogodna je za konekcije tipa tačka na tačku na manjim udaljenostima. Poput parabolične antene, yagi antena je, takođe, direkciona.

Napadači mogu koristiti modifikovane yagi antene, kako bi znatno povećali razdaljinu sa koje mogu pristupiti bežičnoj mreži. Ovakve antene osiguravaju dobit od 16 dBi. Usmerene antene su dobre za ciljanje u susjedne zgrade. Na slici 4 prikazana je modifikovana yagi antena, Cantenna (www.cantenna.com).



Slika 4 – Cantenna (usmerena, direkciona antena)
Figure 4 – Cantenna (focused, directional antenna)

Dipol antena

Dipol antena je dvosmerna, a prvenstveno se koristi za povezivanje klijenata na bežičnu pristupnu tačku.

Omnidirekciona antena

Omnidirekciona antena zrači u svim smerovima, uz gubitak snage zračenja sa povećanjem udaljenosti. Slika 5 prikazuje omnidirekcionu antenu. Većina bežičnih pristupnih tačaka isporučuje se sa malom omnidirekcionom antenom.

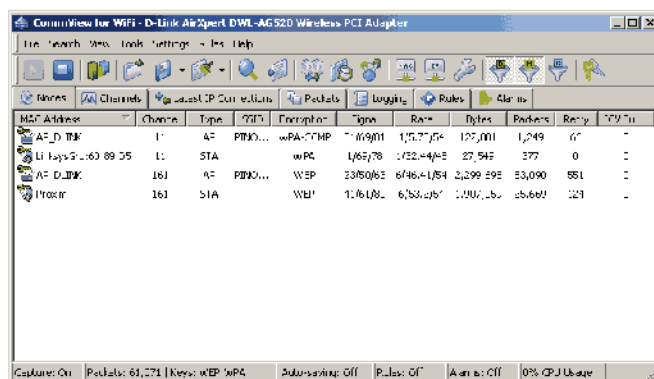


Slika 5 – Omnidirekciona antena
Figure 5 – Omnidirectional antenna

Otkrivanje podrazumevanih vrednosti Nadgledanje protoka podataka

CommView for WiFi

CommView for WiFi je alat za nadgledanje protoka podataka (sniffer), specifičan za bežične mreže (Cache, Wright, Liu, 2010). Pored toga, nudi statističke analize na osnovu kojih se mogu prepoznati oblici neovlašćenog korišćenja mreže. CommView sakuplja pakete, čuva ih i analizira. Da bi snimio sve pakete na mreži postavlja bežični adapter u mod za monitorisanje. CommView for WiFi (slika 6) ne može prikupiti podatke sa bežične pristupne tačke zaštićene WEP, WPA ili WPA2 sigurnosnim protokolom, osim ako se ne unesu odgovarajući ključevi. CommView for WiFi je komercijalni proizvod napisan za Windows operative sisteme, dostupan za preuzimanje sa internet adrese www.tamos.com/products/commview.

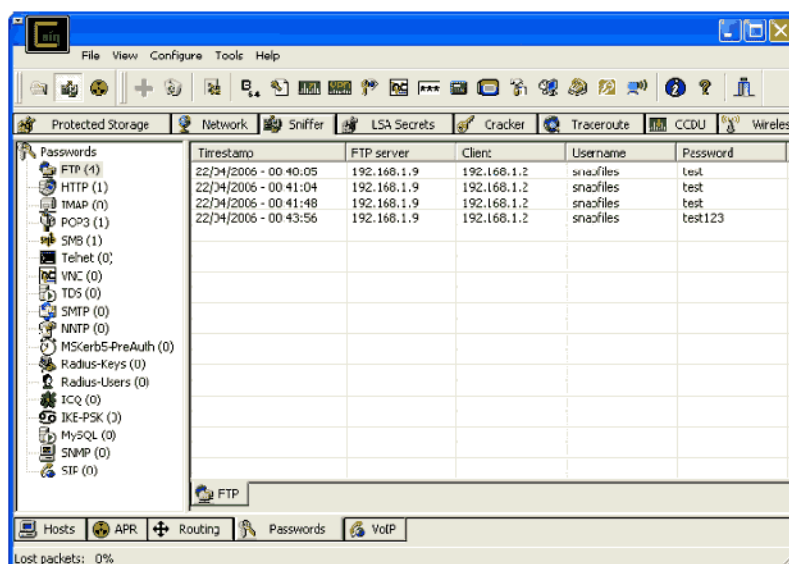


Slika 6 – CommView for WiFi
Figure 6 – CommView for WiFi

Otkrivanje lozinki

Cain & Abel

Cain & Abel je besplatan alat za otkrivanje lozinki (password recovery) napisan za Windows platformu. Sastavljen je od dva programa, Cain i Abel (slika 7), koji zajedno omogućuju pronalaženje raznih vrsta lozinki njuškanjem po mreži, razbijanje šifrovanih lozinki koristeći rečnike, napade grubom silom, dešifrovanje šifrovanih lozinki, otkrivanje lozinki unutar polja, otkrivanje keširanih lozinki i dr. Ovaj alat koristi sigurnosne slabosti unutar nekih protokola, metoda autentifikacije i mehanizama za keširanje. Cain & Abel može analizirati šifrovane protokole, kao što su SSH i HTTPS, i hvatati ovlašćenja na mehanizmima za autentifikaciju. Cain & Abel (www.oxid.it/cain.html) predstavlja univerzalni alat za otkrivanje svih vrsta lozinki. Zahvaljujući sigurnosnim propustima u okviru WEP i WPA sigurnosnog protokola, Cain & Abel može uspješno otkriti tajni ključ.



Slika 7 – Cain & Abel

Figure 7 – Cain & Abel

Prikupljanje IP adresa

Arping

Napadači traže mete – IP adrese. Ako se na bežičnoj mreži koristi zaštitni mehanizam filtriranja MAC adresa, tada napadač mora prikupiti IP adrese. To može uraditi jednostavnim slanjem probnog signala *ping*

na svakog klijenta na mreži da bi dobio tabelu translacija MAC adresa u IP adrese. Ali, to je neefikasno, pa umesto toga napadač može *ping*-ovati opštu adresu mreže (broadcast), što će zauzvrat poslati probni signal *ping* na sve klijente na lokalnoj podmreži. To je ono što alat Arping radi.

Na Windows operativnim sistemima *arp* naredba pruža pristup lokalnom ARP kešu. Upisivanje komande *arp-a* u komandnom odzivniku (command prompt) prikazaće sve stavke ARP keša tog računara, koji čuva sve prethodno razrešene hardverske ili MAC adrese.

Alat Arping (www.habets.pp.se/synscan/programs.php?prog=arping) sličan je probnom signalu *ping*, ali razlikuje se po tome što radi na mrežnom sloju. Dok probni signal *ping* testira dostupnost IP adrese, Arping prikazuje IP adresu cilja, njegovu MAC adresu, kao i vreme koje je proteklo između ARP zahteva i ARP odgovora. Korišćenje opcije *U* šalje ARP zahtev na opštu adresu mreže i kao rezultat dobijaju se sve IP adrese na tom mrežnom opegu.

Na slici 8 prikazan je primer korišćenja alata Arping.

```
$ sudo arping -c 3 -a piggy
ARPING 192.168.42.1
60 bytes from 00:60:97:34:91:55 (192.168.42.1): index=0 time=488.997 usec
60 bytes from 00:60:97:34:91:55 (192.168.42.1): index=1 time=482.917 usec
60 bytes from 00:60:97:34:91:55 (192.168.42.1): index=2 time=542.998 usec

--- 192.168.42.1 statistics ---
3 packets transmitted, 3 packets received, 0% unanswered
$
$ sudo arping -c 3 -a 00:60:97:34:91:55
ARPING 00:60:97:34:91:55
60 bytes from 192.168.42.1 (00:60:97:34:91:55): icmp_seq=0 time=1.250 msec
60 bytes from 192.168.42.1 (00:60:97:34:91:55): icmp_seq=1 time=1.128 msec
60 bytes from 192.168.42.1 (00:60:97:34:91:55): icmp_seq=2 time=1.114 msec

--- 00:60:97:34:91:55 statistics ---
3 packets transmitted, 3 packets received, 0% unanswered
$
```

Slika 8 – Arping
Figure 8 – Arping

Prikupljanje SSID-ijeva

AirJack

Za spajanje na bežičnu pristupnu tačku neophodno je znati njen SSID. Nasuprot onome što neki misle, SSID nije lozinka i ne treba ga posmatrati kao takvog.

Essid_jack je deo paketa alata otvorenog koda AirJack, i može se preuzeti sa Web adrese <http://sourceforge.net/projects/airjack>. Es-

ssid_jack otkriva čak i skrivene SSID-ijeve. Razlog tome je što bežična pristupna tačka šalje SSID kao otvoreni tekst kada se legitiman bežični klijent pokušava spojiti. Međutim, većina napadača su nestrpljivi i ne žele da čekaju da se neko od legitimnih korisnika pokuša povezati. U stvari, Essid_jack se predstavlja kao bežična pristupna tačka, na taj način što lažira svoju MAC adresu. Zatim, šalje disasocijacionu poruku klijentima, forsirajući ih da se disasociraju sa legitimne bežične pristupne tačke. Klijenti potom pokušavaju da urade reasocijaciju na bežičnu pristupnu tačku i, čineći to, šalju zahtev za asocijaciju koji sadrži SSID pristupne tačke kao otvoreni tekst. Tada Essid_jack snima SSID. Na slici 9 prikazan je alat Essid_jack, kao i primer zadavanja lažne MAC adrese i praćenja saobraćaja na kanalu 1. Napad je uspešan i otkriven je SSID legitimne bežične pristupne tačke „l3p3r0us“. Alat Essid_jack delotvoran je za napade na bežične mreže zaštićene WEP sigurnosnim protokolom.

```
#./ssid_jack
Essid Jack: Proof of concept so people will stop calling an ssid a password.

Usage: ./ssid_jack -b <ssid> [ -d <destination mac> ] [ -c <channel number> ]
[ -i <interface name> ]
    -b: ssid, the mac address of the access point (e.g. 00:de:ad:be:ef:00)
    -d: destination mac address, defaults to broadcast address.
    -c: channel number (1-14) that the access point is on, defaults to current.
    -i: the name of the AirJack interface to use (defaults to aj0).

#./ssid_jack -b 00:40:96:5b:37:af -c 1 -i aj0
Got it, the ssid is (escape characters are c style):
"l3p3r0us"
```

Slika 9 – Essid_jack
Figure 9 – Essid_jack

Ratna vožnja

Kada se razmatraju mogući napadi na bežične mreže, prvo što se pomisli jeste da neko vozi svoj automobil po komšiluku sa prenosnim računarom i otkriva bežične pristupne tačke na koje se kasnije pokušava spojiti (Hurley, Rogers, Thornton, 2007). Ta aktivnost otkrivanja bežičnih računarskih mreža naziva se „ratna vožnja“ (wardriving). Isti napad moguće je izvesti i bez automobila, šetajući po komšiluku sa ručnim računarom (Pocket PC). Tada se napad naziva „ratna šetnja“ (warwalking). Napad je moguće izvesti i u vožnji biciklom (warcycling), kao i letom iz aviona (warflying).

Sve što je potrebno za „ratnu vožnju“ jeste softver i bežična mrežna kartica ili adapter, na koje je moguće dodati eksternu antenu za povećanje

nje jačine signala do bilo koje pronađene bežične pristupne tačke. To napadaču omogućuje da otkrije bežične pristupne tačke na većim udaljenostima nego kada se koristi ugrađena antena unutar bežične mrežne kartice. Takođe, moguće je koristiti uređaj za globalno pozicioniranje (Global Positioning System, GPS) kako bi se na karti odredile koordinate otkrivenih bežičnih pristupnih tačaka.

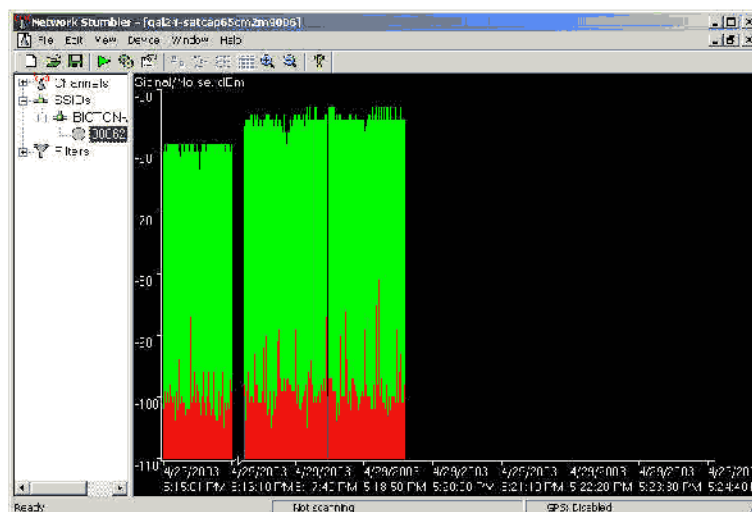
Network Stumbler

Network Stumbler je najkorišćeniji alat za „ratnu vožnju” napisan za Windows platformu. On koristi aktivni metod skeniranja opisan IEEE 802.11 standardom za otkrivanje bežičnih pristupnih tačaka. Tvorci ovog standarda kreirali su opciju aktivnog skeniranja kako bi klijenti sa višestrukim jedinstvenim mrežama mogli naći sve njihove dostupne mreže. Network Stumbler šalje brojne ispitne poruke (probe request) i evidentira odgovore na njih (probe response). Nakon što bežična pristupna tačka dobije ispitnu poruku, odgovara sa upravljačkim okvirom koji sadrži mrežni BSSID, odnosno jedinstvenu MAC adresu pristupne tačke, i SSID pristupne tačke. Sigurnosno rešenje koje se nameće jeste korišćenje bežičnih pristupnih tačaka koje mogu maskirati svoj SSID, prisiljavajući klijente da prethodno znaju SSID mreže kojoj pristupaju. Network Stumbler može otkriti bežične mreže zaštićene WEP, WPA ili WPA2 sigurnosnim protokolom, ali ne može prijaviti bežične pristupne tačke koje maskiraju svoj SSID. U tom slučaju napadač mora koristiti napredniji alat Kismet.

Kada Network Stumbler locira bežičnu mrežu, beleži sledeće informacije:

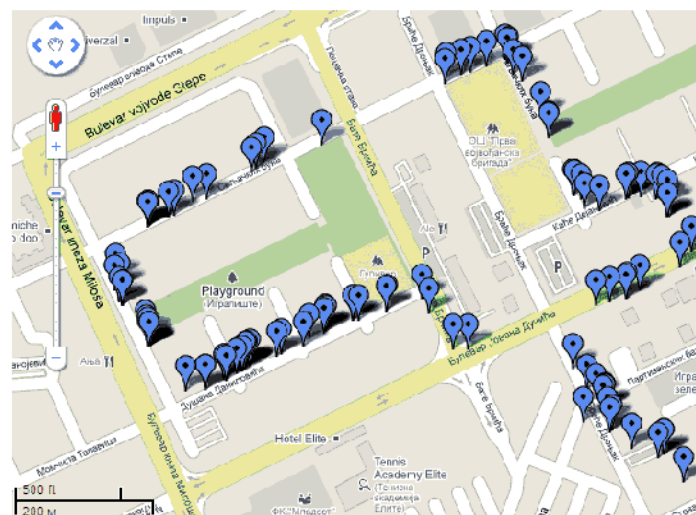
- signal, šum i odnos signal/šum (SNR) otkrivene bežične pristupne tačke, što napadaču daje informaciju koliko je udaljen od nje,
- operativni kanal (između 1 i 11),
- osnovni SSID (BSSID), zapravo MAC adresu pristupne tačke,
- Service Set Identifier (SSID), jedinstveni identifikator bežične računarske mreže maksimalne dužine do 32 karaktera, ugrađen u zaglavlje svih poslatih paketa preko bežične mreže,
- naziv bežične pristupne tačke.

Network Stumbler poseduje grafički prikaz jačine signala i odnosa signal/šum (slika 10) primljenih sa bežičnih pristupnih tačaka ili drugih bežičnih klijenata u okruženju. Ovi parametri omogućuju da se sa usmerenom antenom otkrije lokacija izvorišta signala. Kada je opremljen GPS uređajem, Network Stumbler beleži koordinate otkrivenih bežičnih pristupnih tačaka.



Slika 10 – Network Stumbler – Odnos signal/šum
Figure 10 – Network Stumbler – Signal/Noise ratio

Po završetku „ratne vožnje“ potrebno je sačuvati podatke iz Network Stumbler-a u vidu txt datoteke. Takvu txt datoteku moguće je menjati i uneti koordinate u internet alatu GPS Visualizer (www.gpsvisualizer.com) koji će zadate koordinate ucrtati na Google mapama (slika 11). Takvu mapu (www.personalmag.rs) moguće je sačuvati u različitim grafičkim formatima.



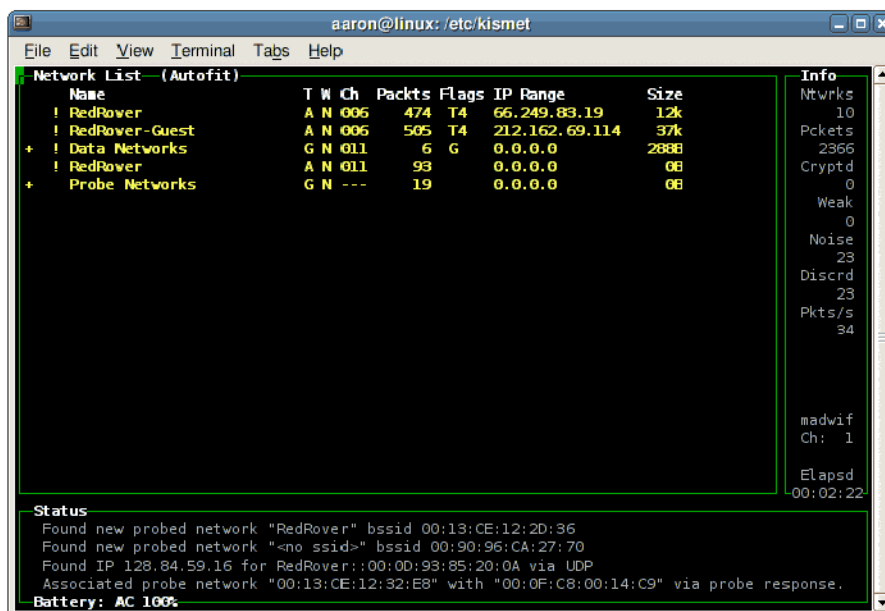
Slika 11 – GPS Visualizer – Mapa skenirane oblasti ucrtana u Google mapama
Figure 11 – GPS Visualizer – Map of the scanned area marked in Google Maps

Kismet

Network Stumbler ne pronalazi mreže koje ne odašilju svoj SSID, te ga je potrebno dopuniti drugim alatima. Kismet je pasivni mrežni skener, alat za nadgledanje protoka podataka i sistem detekcije upada. Sposoban je za otkrivanje saobraćaja sa bežične pristupne tačke i bežičnih klijenata na standardnim i skrivenim bežičnim mrežama zaštićenim WEP ili WPA sigurnosnim protokolom sa tajnim ključem. Funkcioniše na svim bežičnim mrežnim adapterima koji mogu raditi u režimu za monitorisanje.

Kismet je napisan za Linux, te kao takav zahteva odgovarajuću proceduru pri instalaciji. Prvi korak pri instalaciji Kismet-a (<http://kismetwireless.net>) jeste konfigurisanje pomoću skripte, zadavanjem komande `./configure` iz komandnog okruženja (command shell). Zatim je potrebno ulogovati se sa `root` korisničkim nalogom. Da bi se kompajlirao Kismet potrebno je zadati komandu `make` i zatim `make install` da bi se instalirao Kismet. Potom treba instalirati besplatan alat Global Positioning System Daemon (<http://prdownload.berlios.de/gpsd/gpsd-2.38.tar.gz>) koji daje prostom informaciju dobijenu sa GPS-a. To je korisno za „ratnu vožnju” kako bi otkrivene bežične mreže bilo moguće ponovo pronaći.

Instalacija je završena i komandom `kismet` startuje se program koji će automatski prepoznati bežičnu mrežnu karticu ili adapter.



Slika 12 – Kismet
Figure 12 – Kismet

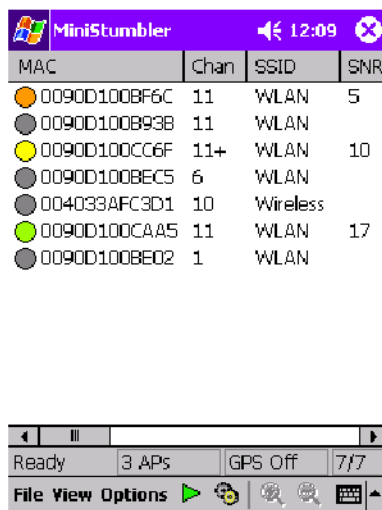
Na slici 12 prikazane su informacije koje su dostupne kada Kismet radi. Vidi se da Kismet ima tri okvira:

- listu mreža (Network List),
- statističke informacije (Info),
- status (prikazuje glavne događaje, kao što su pronađene bežične mreže i stanje baterije na prenosivom računaru).

Kismet prikazuje spisak pronađenih bežičnih mreža bez određenog redosleda. Za sortiranje po različitim kriterijumima koristi se taster *s*. Pritiskom na taster *i* dobijaju se detaljne informacije o određenoj bežičnoj mreži. Kismet automatski snima sve podatke u datoteke za evidenciju (log file) dok je pokrenut. Kada se završi rad sa Kismet-om, pritiskom na taster *q* zatvara se aplikacija.

MiniStumbler

MiniStumbler (slika 13) jeste kompaktno izdanje Network Stumblera za ručni računar (Pocket PC) i mobilne uređaje sa Windows Mobile platformom. Obično se koristi za „ratnu šetnju“, jer nudi slične mogućnosti kao i Network Stumbler, jednostavan je za upotrebu i mobilan. Zbog manjeg ekrana prikazuje manje informacija i nema mogućnost grafičkog prikaza odnosa signal/šum za pojedinačne mreže, ali u log fajlovima čuva iste podatke kao i veći brat Network Stumbler. Dostupan je besplatno za preuzimanje sa internet adrese www.netstumbler.com/downloads.



Slika 13 – MiniStumbler
Figure 13 – MiniStumbler

Mrežni napadi

Lažiranje MAC adrese

Uobičajen napad za zaobilaženje osnovne kontrole pristupa u bežičnim mrežama je maskiranje sopstvene MAC adrese MAC adresom nekog od legitimnih klijenata na mreži (MAC address spoofing). Napadači to čine krađom identiteta, odnosno predstavljaju se kao da imaju identitet drugog klijenta. Svi mrežni uređaji, ožičeni ili bežični, moraju imati mrežni identifikator, MAC (Media Access Control) adresu. MAC adresa svakog uređaja je jedinstveni broj od 48 bita (šest bajtova) koji dodeljuje proizvođač mrežnog uređaja. Prva 24 bita (tri bajta) MAC ili hardverske adrese čine broj jedinstven za svakog proizvođača mrežne opreme. Te vrednosti dodeljuje IEEE, pod nazivom organizacijski jedinstveni identifikator (Organizationally Unique Identifier, OUI). Javno dostupna internet baza jedinstvenih identifikatora svih proizvođača nalazi se na adresi: <http://standards.ieee.org/develop/regauth/oui/public.html>.

Preostala 24 bita (tri bajta) MAC adrese stvaraju jedinstveni identifikator za svaku mrežnu karticu. Ideja je da se uređaj identifikuje na mreži bez izazivanja konflikata sa drugim sistemima, pa napadač koji koristi lažnu MAC adresu može napraviti velike nevolje. Ovaj napad je podjednako poguban za bežične mreže zaštićene WEP, WPA ili WPA2 sigurnosnim protokolom.

Za promenu MAC adrese na Linux-u moguće je koristiti besplatnu alatku GNU MAC Changer (www.alobbs.com/macchanger).

Demonstracija jednostavnosti lažiranja MAC adrese

1. Prvi korak je pronalaženje bežične pristupne tačke. Najjednostavnije skeniranje bežičnih mreža je putem alata Network Stumbler. Pomoću ovog alata napadač pronalazi SSID i MAC adresu željene bežične pristupne tačke.

2. Drugi korak je korišćenje analizatora bežične mreže, poput Omni-Peek-a za traženje bežičnih klijenata koji šalju ispitne poruke na opštu adresu mreže ili za traženje bežične pristupne tačke koja odgovara na ispitne poruke.

3. Kada se otkrije MAC adresa legitimnog klijenta na mreži potrebno je promeniti MAC adresu na napadačevom računaru, tako da bude istovetna sa MAC adresom legitimnog klijenta. Treba imati na umu da pristupne tačke, ruteri, svičevi i drugi mrežni uređaji uglavnom poseduju mogućnost da otkriju kada više od jednog klijenta na mreži koristi istu MAC adresu. U tom slučaju potrebno je sačekati da se drugi klijent rasklaci sa mreže ili je potrebno poslati paket za deautentifikaciju legitimnog klijenta.

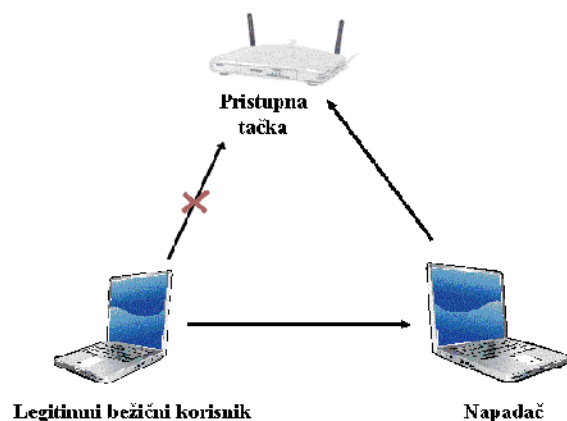
4. Bežični mrežni interfejs na napadačevom računarpu potrebno je podešiti sa odgovarajućim SSID-ijem mreže na koju se želi zakačiti. Ukoliko se na mreži koristi WEP zaštita potrebno je uneti odgovarajuće ključeve. Ovo je korak gde napadač mora koristiti odgovarajuće alate za njihovo pronalaženje.

5. Sledeći korak je dobijanje IP adrese na napadačevom računarpu, bilo dinamički, putem DHCP-a, ili njenim statičkim zadavanjem.

6. Konačno, potrebno je utvrditi da je ostvaren pristup na odgovarajućoj mreži, jednostavnim *ping*-om poznatih klijenata. Tada se napadač uspešno infiltrirao na sistem i dalje može činiti šta mu je volja.

Napad „čoveka u sredini“

Napadom „čoveka u sredini“ (Man-in-the-Middle, MITM) napadač umeće svoj sistem u sredinu komunikacije između bežičnih klijenata i bežične pristupne tačke (Bobar, 2009, pp.80–87). Napad „čoveka u sredini“ izvodljiv je u bežičnim mrežama bez obzira na to da li se u njima koristi WEP, WPA ili WPA2 sigurnosni protokol.



Slika 14 – Napad „čoveka u sredini“
Figure 14 – Man-in-the-Middle attack

Legitimni bežični korisnik biće prevaren pri povezivanju, tako što će biti asociran na napadačev sistem umesto na legitimnu bežičnu pristupnu tačku (slika 14). Tada će napadač moći prisluškivati mrežni saobraćaj, ubacivati nove pakete, menjati njihov sadržaj, preusmeravati saobraćaj, pa čak i u potpunosti obustaviti komunikaciju između klijenata i bežične pristupne tačke. Tok napada „čoveka u sredini“:

1. Napadač pronalazi bežičnog klijenta koji je povezan i koji komunicira sa bežičnom pristupnom tačkom, saznaje njegovu MAC adresu i radio-kanal.

2. Napadač šalje deautifikacionu ili disasocijativnu poruku klijentu, prisiljavajući ga da se raskazi sa pristupne tačke.

3. Napadač aktivira lažnu bežičnu pristupnu tačku, predstavljajući je kao legitimnu, koristeći isti SSID i MAC adresu kao na legitimnoj pristupnoj tački, sa jedinom razlikom što napadačev sistem mora raditi na različitom bežičnom kanalu.

4. Bežični klijent se automatski pokušava povezati sa originalnom bežičnom pristupnom tačkom, samo što će se ovog puta najverovatnije spojiti na napadačev sistem umesto na legitimnu pristupnu tačku.

5. Napadač se povezuje na originalnu bežičnu pristupnu tačku, tako da sada celokupan saobraćaj između bežičnog klijenta i pristupne tačke ide preko napadačevog sistema.

Jedan od alata za ostvarivanje ovakve vrste napada je AirJack (<http://sourceforge.net/projects/airjack>). Pokreće se na Linux platformi izvršavanjem komande `./monkey_jack`. Tako, na primer, ako napadač želi da ubaci svoj sistem između bežičnog klijenta sa MAC adresom `00:0C:AA:BB:CC:DD` i bežične pristupne tačke `00:0C:11:22:33:44` sa SSID-ijem „Wireless” zadaje sledeću komandu:

```
./monkey_jack -b 00:0C:AA:BB:CC:DD -v 00:0C:11:22:33:44 -C 6
-c 1 -I eth0 -e „Wireless”
```

(1)

pri čemu menja bežični kanal sa 6 na 1.

Napad trovanja ARP-a

Napadi trovanja ARP-a (ARP poisoning) takođe predstavljaju napade gde se napadač umeće u sredinu komunikacije između legitimnih klijenata i bežične pristupne tačke. Napadači mogu iskoristiti protokol za razrešenje adresa (Address Resolution Protocol, ARP) ako je pokrenut na mreži. Cilj je da se napadačev sistem predstavi kao legitimni korisnik na mreži. Korišćenjem alata kao što su Dsniff ili Ettercap NG napadač može promeniti ARP tabele na bežičnoj pristupnoj tački i napadnutom klijentu. ARP tabele preslikavaju IP adrese na MAC adrese klijenata. To uzrokuje da napadnuti klijent šalje podatke ka napadaču umesto na pravu destinaciju. Tok napada:

1. Napadač truje ARP tabelu na napadnutom klijentu i na bežičnoj pristupnoj tački, koristeći pomenute alate.

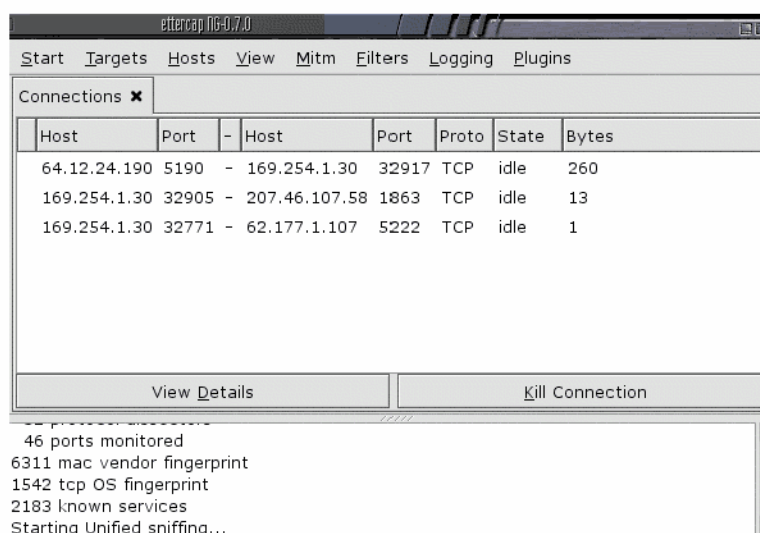
2. Napadnuti klijent asocira MAC adresu napadača sa IP adresom bežične pristupne tačke.

3. Bežična pristupna tačka asocira MAC adresu napadača sa IP adresom napadnutog klijenta.

4. Saobraćaj između napadnutog računara i bežične pristupne tačke šalje se na IP adresu napadača.

5. Napadač snima sav saobraćaj između, a ako je podešen da radi kao ruter šalje podatke na originalnu destinaciju tako da napadnuti klijent i bežična pristupna tačka ne primećuju nikakvu razliku, iako komuniciraju preko napadača.

Jedan od alata za ostvarivanje ARP napada je Ettercap NG (<http://ettercap.sourceforge.net>). Alat je besplatan i pokreće se na Windows ili Linux platformi (slika 15). Tok napada je automatizovan i svodi se na izbor mrežnog interfejsa na kojem će se ostvariti napad. Ettercap NG efikasan je za napade na bežične mreže zaštićene WEP sigurnosnim protokolom.



Slika 15 – Ettercap NG – Lista konekcija

Figure 15 – Ettercap NG – Connections

SNMP

Protokol za upravljanje mrežom (Simple Network Management Protocol, SNMP) koristi se za monitorisanje i upravljanje mrežnim uređajima na ožičenim i bežičnim mrežama. SNMP verzije 1 i 2 ne poseduje sigurnosne mehanizme prilikom upravljanja klijentima. Autentifikacija, šifrovanje i kontrola pristupa dodati su tek u SNMP verziji 3. Da bi napadač utvrdio da li je SNMP pokrenut na nekom mrežnom uređaju dovoljno je da utvrdi da li je na uređaju otvoren UDP port 161. Ukoliko jeste, napadač je u mogućnosti da dobije detaljne informacije o tom sistemu.

Napadi uskraćivanja servisa

Napad uskraćivanja servisa (Denial of Service, DoS) šalje gomilu zlonamernih mrežnih zahteva ili preklapa radio-talase na bežičnom sistemu sa bespotrebnim saobraćajem, sprečavajući adresiranje legitimnih zahteva. Napadi uskraćivanja servisa mogu imati za cilj uskraćivanje mrežnih usluga legitimnim korisnicima ili dalje probijanje unutar mreže.

Napad uskraćivanja servisa na koji su bežične mreže najosetljivije je ometanje radio-frekvencija. Bežični mrežni signali mogu biti poremećeni i zaglavljani kada se pojavi drugi radio-signal koji radi u istom ili bliskom frekventnom opsegu. Normalni radio-frekventni opsezi kod IEEE 802.11 mreža su 2,4 GHz (za 802.11 b i g standarde), odnosno 5 GHz (za 802.11a standard). Noviji 802.11n standard može raditi na oba (2,4 GHz i na manje korišćenom 5 GHz) radio-frekventna opsega. Snažan radio-signal može omesti ili u potpunosti nadvladati postojeće radio-sigale unutar bežične mreže.

Bežične mreže su osetljive na ometanje zbog niske snage rada i relativno uskih radio-kanala (22 MHz po kanalu) koji se koriste za komunikaciju. U zavisnosti od snage dolaznog ometajućeg signala, radio-frekventne smetnje mogu uzrokovati gubitak nekoliko paketa u prenosu ili stvoriti potpuni prekid komunikacije. Radio-frekventno ometanje može biti izazvano nenamerno sa radio-uređaja u okolini ili zlonamerno od strane napadača, čak i sa većih udaljenosti.

Radio-frekventno ometanje može prisiliti bežične klijente da tumaraju raspoloživim frekvencijama tražeći alternativnu bežičnu pristupnu tačku za komunikaciju. Pri tome, oni mogu pronaći i asociirati se na tuđu bežičnu mrežu ili, još gore, na zlonamernu bežičnu pristupnu tačku koju je postavio napadač.

IEEE 802.11 b, g i n bežični mrežni sistemi rade na nelicencnom delu spektra na 2,4 GHz koji je širom sveta namenski rezervisan za industrijske, naučne i medicinske potrebe. Za emitovanje na ovom delu spektra nije potrebna ekskluzivna licenca, pa na njemu, pored uređaja, za bežično umrežavanje funkcionišu brojni elektronski uređaji, kao što su bežični telefoni, bežične kamere za video-nadzor, bluetooth sistemi, teledirigovane igračke, mikrotalasne rene, generatori radio signala i sl. Svi ovi uređaji mogu izazvati ometanje radio-signala unutar bežičnih mreža. U najgorem slučaju njihovom upotrebom možemo izazvati napad uskraćivanja servisa.

Napad uskraćivanja servisa moguć je usled činjenice da bežične pristupne tačke mogu adresirati saobraćaj sve dok im se radna memorija ili procesori ne preoptereće. Iako se donedavno smatralo da je novi sigurnosni protokol WPA2 otporan na napade uskraćivanja servisa, hakerska zajednica je objavila novootkrivene propuste u okviru ovog standarda koji im omogućuju efikasno izvođenje ovih napada na bežičnim mrežama zaštićenim bilo kojim sigurnosnim protokolom.

Asocijacioni i autentifikacioni napadi

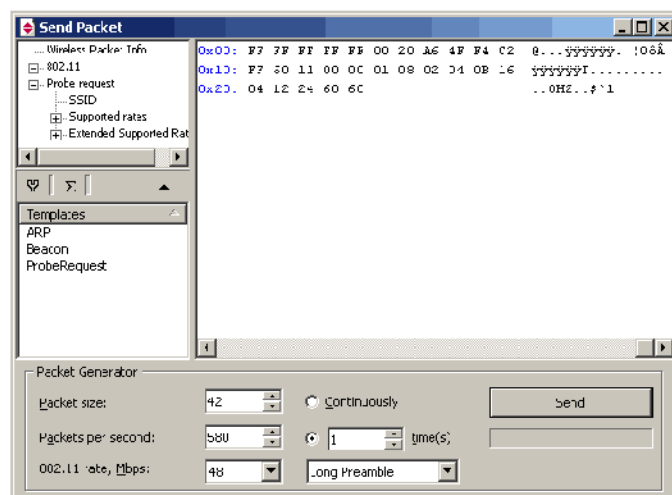
Napadači mogu iskoristiti slabost u načinu na koji bežične pristupne tačke obrađuju dolazne zahteve klijenata, počevši od tabele asocijacionih identifikatora klijenata (Association Identifier, AID). AID tabela je deo memorije na bežičnoj pristupnoj tački koja čuva podatke o povezivanju klijenata. Ona ima na raspolaganju ograničenu količinu memorije, pa može sačuvati samo ograničen broj bežičnih klijentskih konekcija. Nakon što se ova memorija napuni, bežične pristupne tačke više ne prihvataju dolazne zahteve, a moguće je i da potpuno otkazu. Ove vrste napada uskraćivanja servisa koriste jedan od dva metoda:

- asocijacionu poplavu (association flooding),
- autentifikacionu poplavu (authentication flooding).

Oba metoda napada su efikasnija ukoliko je bežična pristupna tačka otvorena za sve konekcije, od strane legitimnih i nelegitimnih klijenata.

CommView for WiFi Packet Generator Tool

Jedan od Windows alata za kreiranje asocijacionih i autentifikacionih napada je CommView for WiFi Packet Generator Tool (www.tamos.com/products/commwifi). CommView for WiFi je generator paketa koji omogućava ponavljanje bilo kog snimljenog paketa, uključujući asocijacione i autentifikacione zahteve, koje je napadač snimio pomoću mrežnog analizatora paketa. Nakon što je napadač snimio saobraćaj, dovoljno je da izabere jedan od paketa za asocijaciju ili autentifikaciju na bežičnu pristupnu tačku i izgeneriše ogroman broj istovetnih paketa (slika 16).



Slika 16 – CommView for WiFi Packet Generator Tool
Figure 16 – CommView for WiFi Packet Generator Tool

Disasocijacioni i deautentifikacioni napadi

Ova vrsta napada pogubnija je od asocijacionih i autentifikacionih napada, jer bežični klijenti za celokupan saobraćaj koji dolazi sa bežične pristupne tačke veruju da je validan. Ovi napadi mogu trajati tokom dužeg perioda, odnosno sve dok napadač ne prekine napad.

Disasocijacioni napad je situacija u kojoj bežična pristupna tačka govori klijentima da ne želi dalju komunikaciju sa njima. Slično može biti inicirano i od bežičnog klijenta ka bežičnoj pristupnoj tački. Prvo napadač pronalazi MAC adresu klijenta ili bežične pristupne tačke koji komuniciraju, i, koristeći jednu od otkrivenih validnih MAC adresa sa svog sistema, šalje disasocijacioni paket ka drugom sistemu. Nakon napada klijent se vraća u stanje u kojem je još uvek autentifikovan na bežičnu pristupnu tačku, ali nije povezan. To ga ostavlja isključenog sa mreže.

Deautentifikacioni napad je efikasniji, jer klijenta stavlja u stanje potpune isključenosti sa mreže. Kod deautentifikacionog napada bežična pristupna tačka govori klijentima da njihova konekcija više nije validna. Kao i kod disasocijacionog napada, deautentifikacioni napad može biti iniciran sa klijentske strane. Napadač prvo snima saobraćaj koristeći bežični mrežni analizator, pronalazi jedan od legitimnih deautentifikacionih paketa, i unosi ga u CommView for WiFi-a Packet Generator Tool. Zatim modifikuje snimljeni paket i menja mu izvorishnu i odredišnu adresu, koja može biti opšta adresa za celokupni mrežni opseg, i pokreće generator paketa. Ova vrsta napada izvodljiva je na bežičnim mrežama zaštićenim WEP ili WPA sigurnosnim protokolom sa tajnim ključem.

Zaključak

U ovom radu analizirani su i obrađeni savremeni metodi napada na IEEE 802.11 bežične mreže. Prikazani su najvažniji alati za napad i način njihovog efikasnog korišćenja za prodiranje u bežične mreže i otkrivanje korisnih informacija.

Metode zaštite podataka pri bežičnom prenosu znatno su napredovale od prvobitne WEP specifikacije. Šifrovanje podataka znatno je jače, a provera integriteta izvodi se kriptografskim algoritmima. Takođe, porasla je procesorska moć mrežne opreme, kao i kompatibilnost među uređajima različitih proizvođača. Korisnici su svesniji o neophodnosti implementacije sigurnosnih mehanizama za zaštitu bežičnih mreža. Algoritmi za generisanje ključeva više nisu statički i predvidljivi. Zahvaljujući snažnom AES šifarskom algoritmu, WPA2 trenutno predstavlja sasvim solidno rešenje za kriptografsku zaštitu podataka u IEEE 802.11 bežičnim mrežama.

Uprkos napretku i dalje postoje slabosti u IEEE 802.11 bežičnim mrežama. Prenosjenje podataka radio-talasima u prostoru osetljivo je na smetnje i

interferenciju. Bežični radio-spektar na 2,4 GHz dostupan je svima i svako u njemu može odašiljati signal. Napadi uskraćivanja servisa isuviše se lako izvode. Širenjem signala na neplanirana područja otvaraju se vrata napadačima koji snimanjem mrežnog saobraćaja dolaze do podataka sa mreže.

IEEE 802.11 bežične mreže predstavljaju rešenje za sve korisnike koji žele jednostavno, jeftino i mobilno umreženje na kojem će pokretati servise za koje mogu dozvoliti blagu nepouzdanost i povremenu nedostupnost. Korišćenje bežičnih mreža u okruženjima gde su sigurnost i dostupnost mreže imperativ ipak nije preporučljiva.

Literatura

Beaver, K., Davis, P., 2005, *Hacking wireless networks for dummies*, Wiley Publishing, Inc., Indianapolis, Indiana, USA,

Bobar, Z., 2009, *Zaštita računarskih mreža Ministarstva odbrane i Vojske Srbije primenom virtuelnog honeyneta*, Vojnotehnički glasnik/Military Technical Courier, Vol. 57, No. 3, pp.80–87.

Cache, J., Wright, J., Liu, V., 2010, *Hacking Exposed Wireless*, Second Edition, The McGraw-Hill Companies, New York, USA,

Earle, A., 2006, *Wireless Security Handbook*, Taylor & Francis Group, New York, USA,

Evseev, S.P., Dorohov, A.V., Korolj, O.G., 2011, *Mehanizmi zaštite informacija u kompjuterskim mrežama i sistemima*, Vojnotehnički glasnik/Military Technical Courier, Vol. 59, No. 4, pp.15–39,

Graves, K., 2010, *CEH: Certified Ethical Hacker Study Guide*, Wiley Publishing, Inc., Indianapolis, Indiana, USA,

Hurley, C., Rogers, R., Thomson, F., 2007, *WarDriving and Wireless Penetration Testing*, Syngress Publishing, Inc.,

Milovanović, I., 2009, *Master rad: Bežične MESH mreže*, Fakultet za informatiku i menadžment, Univerzitet Singidunum, Niš,

Tanenbaum, A., Wetherall, D., 2010, *Computer Networks*, 5th Edition, Prentice Hall, USA,

www.personalmag.rs/blog/ns-wardriving-mapa, posećeno: 25.05.2012.

ATTACKS ON IEEE WIRELESS NETWORKS

FIELD: Computer Sciences, Telecommunications

ARTICLE TYPE: Professional Paper

Summary:

Security of wireless computer networks was initially secured with the WEP security protocol, which relies on the RC4 encryption algorithm and the CRC algorithm to check the integrity. The basic problems of the

WEP are a short initialization vector, unsafe data integrity checking, using a common key, the lack of mechanisms for management and exchange of keys, the lack of protection from the endless insertion of the same package into the network, the lack of authentication of access points and the like. The consequences of these failures are easy attacks against the WEP network, namely their complete insecurity.

Therefore, the work began on the IEEE 802.11i protocol, which should radically improve the security of wireless networks. Since the development of a protocol lasted, the WPA standard was released to offset the security gap caused by the WEP. The WPA also relies on RC4 and CRC algorithms, but brings temporary keys and the MIC algorithm for data integrity. The 802.1X authentication was introduced and common keys are no longer needed, since it is possible to use an authentication server. The length of the initialization vector was increased and the vector is obtained based on the packet serial number, in order to prevent the insertion of the same packet into the network. The weakness of the WPA security mechanism is the use of a common key.

WPA2 (802.11i) later appeared. Unlike the WPA mechanism that worked on old devices with the replacement of software, WPA2 requires new network devices that can perform AES encryption. AES replaces the RC4 algorithm and delivers much greater security. Data integrity is protected by encryption.

Despite progress, there are still weaknesses in wireless networks. Attacks for denial of service are possible as well as spoofing package headers attacks. For now, it is not advisable to use wireless networks in environments where unreliability and unavailability are not tolerated.

Introduction

In the entire history of networking it has never been easier to penetrate the network. One of the biggest problems of today's wireless networks is the lack of effective systems for intrusion detection. Forgetting to cover gaps in wireless network security may result in intrusion into the network by an attacker.

Security in IEEE 802.11 wireless networks

Although the IEEE 802.11 protocol defines security standards, wireless networks are one of the weakest links in the chain of computer networks. The basic security requirements of each computer network are reliable user authentication, privacy protection and user authentication.

Security attacks on IEEE 802.11 wireless networks

Non-technical attacks include a variety of human weaknesses, such as lack of conscience, negligence or over-confidence towards the strangers. Network attacks include a number of techniques that enable attackers to penetrate into the wireless network, or at least to disable it. Apart from the security problems with the IEEE 802.11 protocol, there are vulnerabilities in operating systems and applications on wireless clients.

The methodology of attack

Before testing wireless network security vulnerabilities, it is important to define a formal testing methodology. The first step before the actual attack is footprinting. The second step is the creation of a network map that shows how the wireless system looks. For this purpose, hackers are using specific tools, such as Network Stumbler, Nmap and Fping. When basic information about the wireless network is gathered, more information can be found out through the process of system scanning (enumeration).

Attacks on IEEE 802.11 wireless networks

Social engineering is a technique by which attackers exploit the natural trust of most people.

Radio waves do not respect defined boundaries. If radio waves are broadcasted outside of the boundaries of the defined area, then it is necessary to reduce signal strength on wireless access points. In that way, radio waves travel over shorter distances. Antennas are an integral part of wireless networks. A selected antenna type affects performance, network availability and safety of wireless networks.

Finding default values

CommView for WiFi is a tool for monitoring data flow (sniffer) especially written for wireless networks.

Cain & Abel is a universal tool for the detection of all types of passwords.

If a wireless network uses a protective mechanism of MAC address filtering, then the attacker must collect the IP addresses. To connect to a wireless access point, it is necessary to know its SSID. Contrary to what some people think, SSID is not a password.

Wardriving

Driving a car with a portable computer aimed at the detection of wireless computer networks, onto which connection is later possible, is called wardriving. For wardriving, it is necessary to have an appropriate software tool and a wireless network card or an adapter, on which an external antenna can be added to increase signal strength. It is also possible to use a global positioning device (GPS) to determine the coordinates of the detected wireless access points on a map. The most widely used software tools for wardriving are Network Stumbler, Kismet and MiniStumbler.

Network attacks

Hackers' most usual attack to circumvent the basic access control in wireless networks is masking their own MAC address with an MAC address of a legitimate client on the network (MAC address spoofing).

Man-in-the-Middle attack inserts the attacker's system in the middle between wireless clients and the wireless access point. Legitimate wireless users will be fooled when they try to connect, by being associated to the attacker's system instead of the legitimate wireless access point.

The ARP table poisoning attack inserts the attacker's system in the middle of communication between legitimate clients and the wireless access point. Attackers could use the address resolution protocol if it is running on the network. The aim of this attack is to introduce an attacker as a legitimate user on the network.

The Simple Network Management Protocol (SNMP) is used to monitor and manage network devices. SNMP versions 1 and 2 do not possess security mechanisms when managing clients.

Denial of service attack sends a bunch of malicious network requests which overlap radio waves on a wireless network system with unnecessary traffic, preventing addressing of the legitimate demands. Denial of service attack may be aimed to deny legitimate network services and to allow an attacker further penetration into the network.

Conclusion

In this paper, modern methods of attacks on IEEE 802.11 wireless networks are analyzed and processed. The most important tools for the attacks are presented as well as their effective usage for intrusion into wireless networks and discovery of useful information. The usage of wireless computer networks in environments where security and network availability are imperative is not recommended.

Key words: WLAN, IEEE 802.11, wireless networks, attacks.

Datum prijema članka/Paper received on: 22. 07. 2012.

Datum dostavljanja ispravki rukopisa/Manuscript corrections submitted on: 03. 08. 2012.

Datum konačnog prihvatanja članka za objavljivanje/ Paper accepted for publishing on: 05. 08. 2012.

KARAKTERISTIKE DRUŠTVENO- -GEOGRAFSKIH ČINILACA U ZONI DRINSKO-VELIKOMORAVSKOG STRATEGIJSKOG PRAVCA

Dejan R. Inđić, Zoran M. Krsmanović, Miroslav R. Terzić,
Univerzitet odbrane u Beogradu, Vojna akademija, Beograd

DOI: 10.5937/vojteh61-2289

OBLAST: geonauke, vojna geografija
VRSTA ČLANKA: stručni članak

Sažetak:

U radu je prikazana procena operativno-geografskih karakteristika drinsko-velikomoravskog strategijskog pravca. Zbog obima članka prezentovana je varijanta procene strategijskog pravca kroz njegove društveno-geografske činioce, dok matematičko-geografski i fizičko-geografski činioci, kao i operacijski pravci dejstva nisu razmatrani. U okviru društveno-geografskih činilaca razmotrene su karakteristike stanovništva, komunikacijske mreže i privrede. Geoprostor pravca je nacionalno kompaktan i obezbeđuje, bez posebnog naprezanja, mobilizaciju ratnih jedinica. Saobraćajna mreža nije u potpunosti razvijena, tako da napadaču otežava, a braniocu olakšava izvođenje borbenih dejstava. U zoni pravca postoje značajni tehničko-tehnološki potencijali, ali nisu ravnomerno raspoređeni. Nakon kompleksnog sagledavanja društveno-geografskih činilaca zaključujemo da prikazani strategijski pravac omogućava, bez posebnih ograničenja, uspešno izvođenje borbenih dejstava u dužem periodu.

Ključne reči: komunikacijska mreža, činioci, rukovodioci, instrukcija.

Uvod

U geoprostoru ratišta Republike Srbije (RS), kao njegovi integralni delovi mogu se izdvojiti zone u kojima bi se vodila borbeni dejstva. U isto vreme, one bi se, kao odvojene celine, pod uticajem geografskih faktora, mogle izdvojiti kao strategijski pravci dejstva. Polazeći od različitih varijanti i vrsta agresije i specifičnosti međusobnog uticaja geografskih činilaca, moguće je izdvojiti šest strategijskih pravaca dejstva na ratištu RS: panonsko-šumadijski, slavonsko-vojvođanski, drinsko-velikomoravski, crnogorsko-raški, vardarsko-moravski i balkansko-kosovski (Sekulović, 2011).

Drinsko–velikomoravski strategijski pravac dejstva čine dva operacijska pravca: *seemberijsko–šumadijski* i *glasinačko–zapadnomoravski*.

U postojećoj literaturi nisu u potpunosti obrađivane operativno–geografske karakteristike strategijskih pravaca (SP). Varijanta kompleksne procene strategijskog pravca mogla bi se prikazati kroz njegove matematičko–geografske, fizičko–geografske i društveno–geografske činioce i kroz moguće operacijske pravce dejstva. Zbog obima članka ovde se prikazuje jedna od mogućih varijanti procene drinsko–velikomoravskog SP, kroz njegove društveno–geografske činioce.

U okviru društveno–geografskih činilaca na strategijskom pravcu, u radu su razmotrene karakteristike stanovništva, komunikacijske mreže i privrede.

Sa aspekta Doktrine Vojske Srbije stanovništvo (ljudski resursi) predstavlja odlučujući faktor oružane borbe¹ (*Doktrina Vojske Srbije*, 2010). Vojnogeografska interesovanja vezana za stanovništvo odnose se na kvantitativna obeležja (broj stanovnika, gustina naseljenosti i prostorni ili teritorijalni raspored), kretanja i strukturni sastav (pol, starost, nacionalni sastav, zdravstveno stanje i dr.).

Saobraćaj je značajan pokazatelj kvaliteta geografskog prostora. On ima značaj u svim periodima pripremanja i vođenja operacija. Taj svoj značaj ostvaruje realizacijom funkcije prevoženja žive sile, transportom materijalno–tehničkih sredstava, omogućavanjem brzog narastanja ratnih jedinica u početnom periodu rata. Uloga i značaj saobraćaja najveći su u prelomnim ratnim situacijama kada treba brzo, efikasno i blagovremeno reagovati u pregrupisanju snaga i sredstava.

Privreda je elemenat ratnog potencijala određenog geografskog prostora i, kao takva, ona je osnova materijalnog faktora oružane borbe. Sve to ukazuje na to da je razvijenost privrede i njena sposobnost da proizvodnjom u miru i ratu zadovolji potrebe na određenom geoprostoru, značajan preduslov uspešnog vođenja operacija. Veliki utrošak materijalnih sredstava koji se predviđa u ratu nije moguće obezbediti samo mirnodopskom proizvodnjom i materijalnim rezervama.

U vojnogeografskom pogledu razmatranje značaja privrede ostvaruje se kroz sagledavanje teritorijalnog rasporeda privrednih rejona, centara, objekata i drugih kapaciteta, razmeštaja izvora energije, sirovina, industrije i poljoprivrede, njihovog međusobnog odnosa i mogućnosti funkcionisanja u ratu (Milovanović, 1996).

¹ „Osnovni faktori oružane borbe su: ljudski resursi, materijalni resursi, prostor, vreme i informacije. Ljudski resursi presudno utiču na tok i ishod oružanih sukoba. Ljudski život je neprikosnoven vrednost u oružanoj borbi“. *Doktrina Vojske Srbije*, GŠ VS, Beograd, 2010.

Karakteristike stanovništva i naselja

Na teritoriji Republike Srbije živi 7.350.222 stanovnika (*Opštine u Srbiji – 2009, 2010*), od kojih na prostoru stratejskog pravca 1.956.302 stanovnika (sa opštinama grada Beograda – 3.159.781 stanovnik), odnosno 91 stanovnik na 1 km² (za opštine grada Beograda to je 438 st/km²) ili oko 26,6 % (odnosno 43%) od ukupnog broja stanovnika R.Srbije (tabela 1). Gustina naseljenosti u većim gradovima je: Beograd – 8077, Kragujevac – 209, Čačak – 182, Šabac – 150, Užice 120, itd. Radno sposobno stanovništvo obuhvata 61,93%, a prirodni priraštaj je 1,4⁰/₁₀₀.

Tabela 1

Table 1

Pregled stanovništva i naselja na stratejskom pravcu (po okruzima)
Summary of the population and settlements on the strategic direction (by districts)

Opštine na SP	Naziv upravnog okruga	Površina (km ²)	Broj naselja	Stanovnika		
				Ukupno	Na 1 km ²	Po naselju
8	Mačvanski	3.264	228	313.798	96	1.376
6	Kolubarski	2.474	218	182.015	74	835
11	Podunavski	1250	59	204.442	164	3.465
7	Sumadijski	2.387	175	290.806	122	1.662
6/4 ²	Pomoravski	1.665	136	170.265	102	1.252
10/6 ³	Zlatiborski	3.122	192	185.498	59	966
4	Moravički	3.016	206	216.977	72	1.053
5/2 ⁴	Raški	1.769	106	145.979	95	1.377
6	Rasinski	2.664	296	246.522	93	833
Ukupno SP (bez Beograda)		21.611	1.616	1.956.302	91	1.211
17/14 ⁵	grad Beograd	2.748	149	1.203.479	438	8.077
Ukupno na SP		24.359	1.765	3.159.781	130	1.790

Prostor je nacionalno kompaktan i preko 95% stanovništva čine Srbi (Čajetina – 99%, Ub – 98%, Čačak – 97%, Kragujevac – 96%, Šabac – 95%). Na geoprostoru pravca sa stanovišta etno-demografske strukture nema neuralgičnih područja, što će pozitivno uticati na mobilizaciju i operativni razvoj jedinica u slučaju agresije.

Ono što je posebno značajno, jeste da prostor Bosne i Hercegovine (Republika Srpska) koji se graniči sa Republikom Srbijom (i odakle se očekuje napad neprijatelja), većinski naseljavaju Srbi, što umanjuje osetljivost graničnog prostora, a omogućava pravovremeno otkrivanje veće

² Bez opština Despotovac i Svilajnac (nisu u zoni SP).

³ Bez opština Nova Varoš, Priboj, Prijepolje i Sjenica.

⁴ Bez opština Novi Pazar, Raška i Tušino.

⁵ Bez opština Surčin, Zemun i Novi Beograd.

koncentracije snaga, sprečava strategijsko i operativno iznenađenje i poboljšava zaštitu i odbranu iz tog pravca.

Polazeći od brojnosti stanovništva u zoni strategijskog pravca sa mobilizacijskim naprezanjem 1% do 5% može se obezbediti od 30.000 do 150.000 ljudi, što je dovoljno za zatvaranje ovog pravca.

Polazeći od gustine naseljenosti u ratu bi pri upotrebi oružja za masovno uništavanje masovne gubitke trebalo očekivati u većim gradovima (Beograd, Kragujevac, Šabac, Loznica, Čačak, Užice).

Imajući u vidu da je strategijski pravac sa tri strane ograničen teritorijom R.Srbije, a samo sa jedne otvoren (prema BiH), to će umnogome olakšati pripremu i izvođenje operacija na ovom geoprostoru.

Naselja utiču na izvođenje b/d svojim značajem, veličinom, oblikom, položajem, urbanističkim rešenjima (protezanjem ulične mreže, postojanjem podzemnih objekata i sl.) i prostornim uređenjem. Manja naseljena mesta sa niskim zgradama, između kojih se nalaze prostrana dvorišta i bašte, znatno manje utiču na izvođenje b/d od gradskih naselja.

U okviru strategijskog pravca ima 1616 (sa Beogradom 1765) naselja, sa prosečnom naseljenošću 1211 (za Beograd 8077) stanovnika po naselju. U pogledu načina izgradnje ističu se sledeća naselja:

- *zbijenog tipa*, obuhvataju gradove i sela u ravninama Mačve, Posavine, Pomoravlja (za njih je karakteristično da imaju prave i dugačke ulice, koje se ukrštaju pod pravim ili ostrim uglom, zbog čega su nepovoljna za zauzimanje),

- *raštrkanog tipa*, obuhvataju seoska naselja u brdsko-planinskim predelima – Tara, Zlatibor, Maljen, Povlen (za ta naselja je značajno da se protežu na prostoru 5 do 6km pored puteva ili dalje od njih),

- *mešovitog tipa*, banjska, rudarska i turistička naselja – Vrnjačka i Jošanička banja, Banja Koviljača, naselja Kolubarskog basena itd.

Na geoprostoru strategijskog pravca dominiraju dva karakteristična tipa gradova:

- *tursko-istočnjački tip* (u većem delu zone pravca), ulice tih gradova su, obično, kratke i vijugave, sa obe strane ulice su kuće, koje su uglavnom grupisane izvan centra grada i

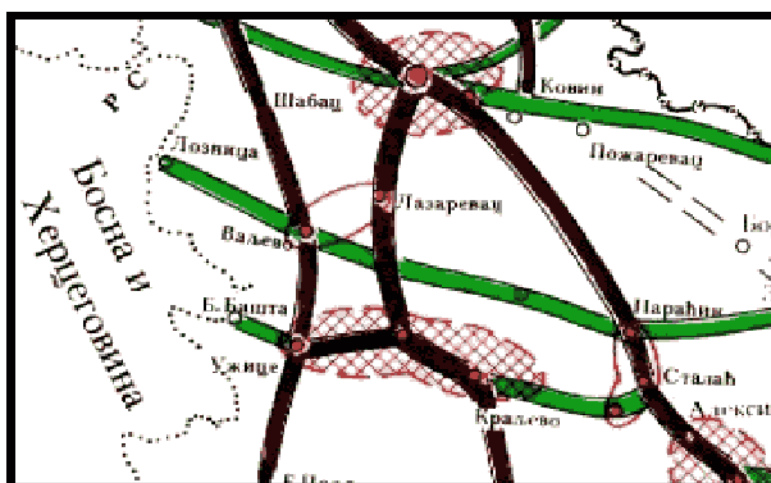
- *panonski tip* (na obalama reka Save i Dunava), gradovi imaju široke ulice koje se seku pod pravim uglom (Šabac, Obrenovac, Beograd, Smederevo).

Posebno je važno istaći da su skoro svi gradovi, na pravcu, locirani na najznačajnijim komunikacijama, u većim dolinama reka, u podnožjima planina, odnosno u geoprostoru koji je prirodno pogodan za vođenje b/d. Takva demografska urbanizacija pozitivno bi se odrazila na mnoge strategijske radnje, posebno na vršenje mobilizacije i na relativno brzu popunu jedinica u ratu. Ti rejon moraju biti štice u PVO smislu, jer su, pored stanovništva, u njima i drugi značajni potencijali i objekti. U eventualnom

NHB ratu morala bi se primenjivati i disperzija stanovništva gradskih naselja u odgovarajućem stepenu.

Prema tome gradovi, a i ostala naselja, imaju sve značajniju ulogu u odbrambenim operacijama na geoprostoru ratišta. Planinski deo strategijskog pravca, s obzirom na kanalisiranost napadnih dejstava i ograničene kapacitete napadnih pravaca može se braniti i znatno manjim i slabije opremljenim snagama.

Karakteristike komunikacijske mreže



LEGENDA:

-  Osa uzdužnog komunikacijskog snopa
-  Osa poprečnog komunikacijskog snopa
-  Komunikacijski čvor
-  Komunikacijsko čvorište

Slika 1 – Komunikacijski snopovi i čvorišta na strategijskom pravcu

Figure 1 – Communication beams and nodes on the strategic direction

Komunikacijska mreža na strategijskom pravcu je slabije razvijena⁶ i ne omogućava uspešan razvoj i ostvarivanje visokog tempa napada savremeno opremljenih oružanih snaga agresora (*Opštine u Srbiji – 2009*,

⁶ Dužina puteva sa savremenim kolovozom (magistralni, regionalni i lokalni) u zoni pravca je oko 9824 km (11242 km sa Beogradom) ili 182 km (odnosno 163 km sa Beogradom) po opštini. Republički zavod za statistiku, *Opštine u Srbiji – 2009*, Beograd, 2010.

2010). Kroz rad su obrađeni snopovi i čvorovi komunikacija (drumski i železnički), rečno-kanalski i vazdušni saobraćaj u zoni pravca.

Preko geoprostora ovog strategijskog pravca dejstva vode dva uzdužna i dva poprečna snopa komunikacija (slika 1).

Uzdužni snopovi komunikacija

Bačko-kosovski

Vodi pravcem: (Subotica–Novi Sad)⁷– Beograd–Kragujevac– (Raška–K.Mitrovica–Priština).

Zaštićen je na geoprostoru pravca. Osetljiv je na rušenje, posebno u Ibarskoj klisuri, čiji je obilazak veoma otežan i zahteva duže vreme. Povezuje zapadnomoravsku prirodnu prohodnu zonu sa Panonskim basenom (na severu) i Kosovom i Metohijom (na jugu). Omogućava pregrupisanje i dovođenje jakih snaga iz dubine ka tim prostorima.

Bačko-crnogorski

Vodi pravcem: (Sombor–Bačka Palanka–S.Mitrovica)–Šabac– Valjevo–Užice– (Bijelo Polje) sa krakom Šabac–Loznica–Bajina Bašta–(Priboj–Nikšić).

Ovaj snop komunikacija je periferan i veoma osetljiv na dejstva sa geoprostora BiH (pored r. Drine). U planinskom delu osetljiv je na rušenje, a uslovi za obilaženje su otežani, pa čak i isključeni. Na celoj dužini postoji veliki broj osetljivih veštačkih objekata (mostovi, vijadukti, tuneli i dr.). Osnovu snopa čine putni i železnički pravac. Omogućava povezivanje pravca sa Panonskim basenom na severu.

Poprečni snopovi komunikacija

Šumadijsko-timočki

Vodi pravcem: Loznica–Valjevo–Kragujevac–Paraćin–(Zaječar) i značajno rasterećuje sremsko-krajinski⁸ snop komunikacija (Mišović, 1998). Ima centralni položaj na strategijskom pravcu, pa je u najvećem delu dobro zaštićen. Manjeg je kapaciteta, jer nije povezan železničkim pravcem, tako da osnovu čini putni komunikacijski pravac. Prolazi kroz više prohodnih zona: Jadar, Tamnavu, Kolubaru i Moravsku udolinu.

⁷ U zagradi su mesta koja nisu u geoprostoru strategijskog pravca.

⁸ Vodi pravcem: Šid–S.Mitrovica–Beograd–Smederevo–Požarevac–Majdanpek–Negotin, sa krakom: Majdanpek–Bor–Zaječar.

Zapadnomoravsko–nišavski

Vodi pravcem: Užice–Čačak–Kraljevo–Kruševac–(Niš–Dimitrovgrad) i ima centralni položaj na našem ratištu, u odnosu na ostale snopove komunikacija uporedničkim smerom. Značaj mu je još izraženiji zbog mogućnosti bržeg prodora savremeno opremljenim oklopno–mehanizovanim snagama zapadnomoravskom (i dalje nišavskom) dolinom, čime bi došlo do presecanja ratišta na dva dela. To bi imalo odlučujući ishod za vođenje operacija na ovom stratezijskom pravcu, a bitno bi uticalo i na vođenje borbenih dejstava (b/d) na čitavom ratištu R.Srbije.

Omogućava uspešno povezivanje stratezijskog pravca sa balkansko-kosovskim stratezijskim pravcem (odnosno povezivanje zapadnog i istočnog dela ratišta RS), a napadaču omogućava uspešan manevar i pregrupisavanje snaga na širem prostoru.

Najznačajnija suženja su Ovčarsko-kablarska i Stalačka klisura, gde su putni i železnički komunikacijski pravci najosetljiviji na rušenje, a otežano je njihovo obilaženje.

Komunikacijski čvorovi

Na geoprostoru stratezijskog pravca izdvajaju se dva značajna čvora komunikacija:

- Paraćin–Stalać–Kruševac i
- Kraljevo–Čačak–Požega.

Takođe, preko pravca prelazi i značajno čvorište komunikacija, a to je šire područje Beograda (Pančevo–Stara Pazova–Obrenovac–Mladonovac–Smederevo–Pančevo).

Komunikacijska mreža na geoprostoru stratezijskog pravca omogućava uspešan manevar i pregupisavanje snaga po frontu i dubini, uspešno izvođenje b/d, uspešna dejstva u pozadini snaga napadača, uspešno izvršenje mobilizacije, uspešan dotur i evakuaciju.

Rečno-kanalski saobraćaj

Na geoprostoru stratezijskog pravca rečno-kanalski saobraćaj ne prati prirodne geografske uslove, tako da praktično nema vojni značaj.

Na stratezijskom pravcu je plovna samo reka Velika Morava, u dužini od 3 km, koja predstavlja i granicu pravca po dubini. Značajnije uređeno pristanište je u Beogradu, koje je takođe na periferiji pravca.

Vazdušni saobraćaj

Male prostorne dimenzije pravca ograničavajuće utiču na razvoj unutrašnjeg vazdušnog saobraćaja.

Opšta karakteristika vazdušnog saobraćaja na strategijskom pravcu je nepovoljan teritorijalni raspored aerodroma. Sa vojnog aspekta najznačajniji su aerodromi Ponikve i Lađevci.

Aerodrom *Ponikve* nalazi se u blizini Užica. Ima poletno-sletnu stazu (PSS) dužine 3085 m i širine 45 m. Pravac protezanja piste je $105^{\circ}/285^{\circ}$. Nadmorska visina aerodroma je: istočna 890 m, a zapadna 920 m. Školski krug je uvek levi, visine 500 m za nadzvučnu avijaciju. Meteorološki minimum⁹ je 4 km i 350 m. Nema ograničenja za poletanje i sletanje za sve tipove avijacije. Prilaz za sletanje u instrumentalnim uslovima je istočni 40 km zbog blizine granice sa BiH.

Aerodrom *Lađevci* nalazi se kod Kraljeva. Ima PSS dužine 2200 m i širine 30 m. Pravac protezanja piste je $140^{\circ}/320^{\circ}$ sa betonskom podlogom. Nalazi se na nadmorskoj visini od 209 m. Školski krug je uvek jugozapadni zbog planine Kotlenik. Meteorološki minimum mu je 4 km i 400 m danju i 5 km i 500 m noću.

Karakteristike privrede

Na razvoj privrede utiče više faktora: prirodni uslovi, sirovine, tehnološko-tehnička razvijenost kapaciteta, radna snaga, tržište, itd. U tako složenom sistemu, ako zakaže bilo koji od pobrojanih elemenata, on izaziva značajne poremećaje u proizvodnji, što se prenosi na životni standard, opremljenost i obučenosť za rat.

Kako su rat i vreme neposredne ratne opasnosti specifični momenti, kada se u prvi plan postavlja neophodnost proizvodnje (a ne profit), to su za vojnogeografsko razmatranje bitna dva pitanja:

- da li postoje sirovine u zoni strategijskog pravca od kojih se mogu proizvesti potrebna sredstva i
- da li postoji tehnološko-tehnička opremljenost da se potrebna sredstva mogu proizvesti.

Dalje razmatranje privrede na ovom strategijskom pravcu biće sagledano kroz:

- vojnogeografske karakteristike prirodnih – privrednih potencijala i
- vojnogeografske karakteristike tehničko-tehnoloških privrednih potencijala.

⁹ Meteorološki minimum izražen je datim veličinama za dnevne i noćne uslove: prvi broj (4 km) označava najmanju vidljivost od piste, a drugi (350 m) označava donju bazu oblaka.

Vojnogeografske karakteristike prirodnih – privrednih potencijala u zoni strategijskog pravca

Sve ono što se „uzima“ od prirode i dalje u tehnološko-tehničkom postupku koristi radi dobijanja željenog proizvoda može se nazvati prirodnim privrednim potencijalom. U radu su težišno obrađena pitanja: poljoprivrednih površina, energetske izvora i rudnih potencijala.

Poljoprivredne površine

Na teritoriji drinsko-velikomoravskog strategijskog pravca ima 1.449.597 ha (oko 28,5% RS), od čega su 898.983 ha (27,5% RS) obradive površine. U tabeli 2 dati su podaci o poljoprivrednim površinama i oranicama na strategijskom pravcu.

Tabela 2
Table 2

Poljoprivredne i obradive površine na strategijskom pravcu
Agricultural land and farmland on the strategic direction

Okrug	Poljopr. površine (u ha)	Oranice i bašte (u ha)
Mačvanski	216.175	174.525
Kolubarski	168.210	101.647
Podunavski	96.876	82.530
Šumadijski	164.902	110.993
Pomoravski	104.028	75.409
Zlatiborski	151.643	41.930
Moravički	171.117	69.445
Raški	72.245	25.144
Rasinski	145.775	92.680
Ukupno na SP (bez Beograda)	1.290.971	774.303
Grad Beograd	158.626	124.680
Ukupno na SP	1.449.597	898.983

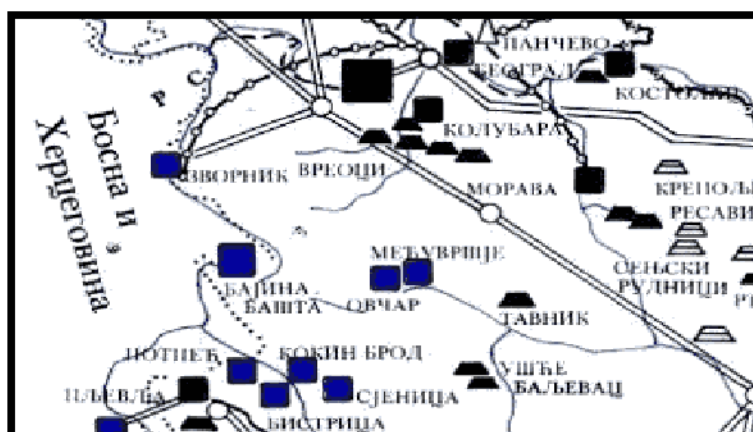
Sa vojnogeografskog gledišta veći deo poljoprivrednih površina nalazi se na semberijsko-šumadijskom operacijskom pravcu (Mačva, Pocešina, Jadar, Šumadija), odnosno gravitira ka periferiji. U zavisnosti od cilja dejstva agresora, zasadi na poljoprivrednim površinama mogu biti ugroženi još u početnom periodu rata, odnosno početnim operacijama na ovom strategijskom pravcu. Posebno bi bili ugroženi zasadi u zapadnom delu pravca (ka granici sa BiH), čijim bi zaposedanjem neprijatelj ugrozio poljoprivrednu proizvodnju, a time i ishranu stanovništva i oružanih snaga u dužim ratnim dejstvima. Poljoprivredne površine u južnom delu pravca mogu u većoj meri biti zaštićene u početnom periodu rata.

Energetski izvori

Na geoprostoru stratejskog pravca značajniji energetski izvori su: vodna snaga i uglj, dok nafta i gas nisu zastupljeni u značajnijem obimu.

Vodni bilans na geoprostoru stratejskog pravca je pozitivan. Prirodni potencijal većih reka na pravcu je: Drina – 10,00/8,00 milijardi kw/h,¹⁰ Morava 5,15/4,80 milijardi kw/h, Sava (donji tok) – 1,60/0,14 milijardi kw/h. Od navedenih rečnih tokova, najveći deo tehnički iskoristive snage nalazi se na perifernim delovima stratejskog pravca.

Sa vojnog stanovišta takav raspored iskoristivog hidropotencijala može negativno uticati na odbranu geoprostora pravca, a stepen uticaja zavisi od stepena iskoristivosti tih prirodnih energetskih izvora – resursa.



LEGENDA:

Kameni uglj	Dalekovod
Mrki uglj	Nalazišta nafte
Lignit	Nalazišta plina
Hidrocentrale	Naftovod
Termocentrale	Gasovod

Slika 2 – Razmeštaj proizvodnih kapaciteta energije

Figure 2 – Types of power generating capacities

Najveću opasnost predstavljao rušenje brana hidroelektrana u zoni pravca kao što su Bajina Bašta i Zvornik. Udami vodeni talas, stvoren pri rušenju brane, izazvao bi katastrofalne posledice u nizvodnom delu reč-

¹⁰ Prvi broj označava hidropotencijal, a drugi tehnički iskoristiv potencijal.

ne doline. Komandanti jedinica koje izvode b/d na operacijskim pravcima moraju znati da je bezopasno ispuštanje vode iz akumulacija veoma dugo, čak i nekoliko meseci, pa se bezbednosne mere moraju pravovremeno preduzeti. Razmeštaj proizvodnih kapaciteta energije prikazan je na slici 2 (Pavlović, 1999).

Ugalj je klasični izvor energije, koji ponovo dobija na značaju kao najpogodniji i najsigurniji izvor raznih oblika energije i kao sirovina u industriji, uključujući i vojnu industriju. Na slici se mogu videti mesta eksploatacije uglja na ovom stratezijskom pravcu. Kameni ugalj se nalazi u Ibarskom basenu – Baljevac i Ušće, ali njegova proizvodnja ne zadovoljava potrebe odbrane zemlje. Lignit se nalazi u Kolubarskom basenu i manje količine u Kraljevačkom basenu (Bajovac). Proizvodnja lignita zadovoljava potrebe.

Najveći potrošači uglja su termoelektrane, koje u ukupnoj proizvodnji elektroenergije učestvuju sa 61,2%. U geoprostoru stratezijskog pravca nalaze se sledeće termoelektrane:

- „Nikola Tesla“ A – Obrenovac (6 generatora, instal. snaga 1650MW),
- „Nikola Tesla“ B1 – Skela (1 generator, instal. snaga 618MW),
- „Nikola Tesla“ B2 – Skela (1 generator, instal. snaga 618MW),
- „Kolubara“ – Veliki Crljeni (5 generatora, instal. snaga 271MW).

Na tečno gorivo i gas radi TE „Beograd“ (3 generatora, instal. snaga 96MW).

U eventualnom ratu ugalj će biti glavni i najpovoljniji izvor energije. Sa njegovom proizvodnjom mora se računati i u najtežim uslovima. Sa gledišta potreba odbrane na ovom stratezijskom pravcu raspored rudnika uglja je povoljan. Da bi se olakšalo snabdevanje ugljem u ratu, neophodne su pravovremene pripreme u miru (na što više mesta izvršiti otkrivke jalovine na površinskim kopovima i pripremne radove na jamskim kopovima). Pored toga, svi rudnici na pravcu predstavljaju objekte operativnog značaja, te treba planirati snage za njihovu zaštitu i odbranu u ratnim operacijama.

Rudni potencijali

Raznovrsnost ruda svih nemetala i metala na stratezijskom pravcu ima neprocenjiv značaj zbog toga što čine osnovu za raznovrsnu proizvodnju sredstava namenjenih za jačanje odbrambene sposobnosti zemlje, odnosno za vođenje dugotrajnog odbrambenog rata. U tom smislu, pored energetskih, posebno su značajne i stratezijske sirovine, rude metala i nemetala.

Rude crnih metala

Osnovne rude gvožđa na stratezijskom pravcu su: limonit, siderit, hematit i magnetit.

Ležišta tih ruda nalaze se u dinarsko-rodopskoj oblasti, odnosno u rejonu Boranje u zapadnoj Srbiji i na Kopaoniku. Rudnici gvožđa nisu

mnogo osetljivi na ratna razaranja. Ukoliko bi bila obezbeđena električna energija, odgovarajuća mehanizacija i ostala oprema, ratna proizvodnja u centralnom delu strategijskog pravca, uz neophodne mere PVD i fizičkog obezbeđenja, mogla bi se odvijati gotovo normalno.

Rude obojenih metala

Po bogatstvu ruda obojenih metala geoprostor pravca je veoma za-
pažen.

Od ruda bakra u zoni strategijskog pravca nalaze se: halkopirit, bro-
nit, halkozin i kuprit. Njihova nalazišta su u rejonu Kopaonika, okolini Kra-
ljeva i oko Valjeva. Olovo i cink podmiruju potrebe na ovom geoprostoru,
a određene količine se i izvoze.

Najperspektivnija eksploatacija ruda olova i cinka je u kopaoničkim i
podrinjskim masivima i u Šumadiji. Najvažniji aktivni rudnici olova i cinka
su: Zajača, Krupanj i Kopaonik. Imajući u vidu da su nalazišta ovih ruda u
unutrašnjosti strategijskog pravca pružaju se povoljni uslovi za njihovu
eksploataciju, zaštitu i odbranu i u toku rata.

Na ovom geoprostoru nalaze se još i rude:

- kalaja (kositerit) – u zapadnoj Srbiji (Cer), Šumadiji (Bukulja) i na-
nosima rečica Lešnice (južno od Cera), Cemice (jugoistočno od Cera), i
Cigankulje (zapadno od Bukulje),
- žive (cinobarit) – eksploatiše se u rudniku „Šuplja stena” pod Avalom,
- titana – Tara, Cer, Bukulja,
- magnezijuma i antimona – Krupanj, Zajača (kod Loznice), Lisa
(kod Ivanjice) i Stolice,
- mangana – Zlatibor, Kopaonik,
- berilijuma – Cer, Bukulja,
- urana – Cer, Bukulja, Golija
- jadarita – dolina reke Jadar (kod Loznice).

Mineralne sirovine plemenitih metala (zlato, srebro, platina) već du-
go se eksploatišu. Minerali ovih metala nalaze se u rudama bakra, olova i
cinka i peskovitim nanosima nekih reka. Zlato se eksploatiše iz masiva
Rudnika i Kopaonika.

Sa vojnog stanovišta, svi rudnici u eksploataciji u zoni strategijskog
pravca predstavljaju značajne objekte koje treba štititi uključivanjem u si-
stem odbrane teritorije u okviru operacijskih pravaca, posebno u PVD
smislu.

Nemetalne mineralne sirovine

Gotovo se ne može zamisliti razvoj bilo koje industrijske grane, pa
samim tim ni vojne industrije, bez nemetala koji se koriste kao osnovni ili
pomoćni materijal.

Na geoprostoru strategijskog pravca najvažniji su:

- magnezit – nalazišta su na Avali (Karagač), Rudniku (Čemernica), Kopaoniku i Zlatiboru,
- sumpor – nalazište je u Gruži,
- sumporna kiselina – dobija se iz pirita i sumpora u hemijskoj industriji u Šapcu i Kruševcu,
- azbest – rezerve se nalaze u Stragarima (podnožje Rudnika),
- glina – ležišta se nalaze kod Arandjelovca i Lazarevca, a vatrostalne gline oko Arandjelovca i u Kolubarskom basenu,
- fosfati – nalaze se u ležištima Šumadije.

Na drinsko-velikomoravskom strategijskom pravcu nalaze se značajne poljoprivredne površine koje omogućavaju poljoprivrednu proizvodnju, kojom se mogu zadovoljiti potrebe stanovništva i operativnih jedinica za artikle hrane. Međutim, većina obradivih površina nalazi se u blizini državne granice (sa BiH), što može dovesti do uništavanja poljoprivrednih proizvoda (pšenica, kukuruz, voće, povrće) na njima, usled podmetanja požara, namerne upotrebe pesticida i bojnih otrova.

Energetski potencijali na pravcu veoma su značajni i ima ih dovoljno. Problem je što se većina HE nalazi na periferiji (posebno Bajina Bašta i Zvornik), te zbog ratnih dejstava može biti otežan ili onemogućen njihov rad. Kao glavno izvoriste energije javlja se ugalj, kojeg na ovom geoprostoru ima dovoljno, a i najveća TE takođe se nalazi na ovom geostrategijskom pravcu.

Ruda minerala na ovom geoprostoru ima u dovoljnim količinama za podmirenje potreba oružanih snaga u ratu, pod uslovom da se mimodopska eksploatacija vrši racionalno. Zato pri eksploataciji potencijala u miru treba razmišljati o njihovom obezbeđenju u ratu, jer se i u ratu moraju proizvoditi sredstva potrebna za odbranu i preživljavanje stanovništva i oružanih snaga.

Vojnogeografske karakteristike tehničko-tehnoloških privrednih potencijala u zoni strategijskog pravca

U ovom poglavlju izložene su najznačajnije karakteristike poljoprivrede i industrije u zoni strategijskog pravca.

Poljoprivreda

U geoprostoru strategijskog pravca, što se tiče *poljoprivrede*, izdvajaju se dve poljoprivredne oblasti:

- *panonska poljoprivredna oblast*, južno od reka Save i Dunava do linije Gučevo–Maljen–Rudnik. U okviru strategijskog pravca nalazi se šumadijsko-pomoravsko poljoprivredno područje koje čine tri poljoprivredna reiona: mačvansko-tamnavski, šumadijski i pomoravski. U ovoj oblasti najbolje uspevaju pšenica i kukuruz, kao strategijske sirovine, koje mogu

zadovoljiti potrebe na ovom geoprostoru. Pored pšenice i kukuruza značajne ratarske kulture na ovom području su i: raž, ječam, ovas i industrijsko bilje (suncokret, šećerna repa, hmelj). Stočarstvo je značajno zastupljeno u ovoj oblasti, posebno u Mačvi, Pocerini, Jadru i Šumadiji.

– *brdsko-planinska poljoprivredna oblast* obuhvata prostor od granice sa panonskom poljoprivrednom oblasti do desne granice strategijskog pravca. U okviru pravca nalazi se zapadnomoravsko poljoprivredno područje koje čine dva poljoprivredna reiona: moravski i župski. Oblast karakteriše nedovoljna poljoprivredna proizvodnja žitarica, tako da u slučaju rata ne bi bilo odgovarajućih uslova za ishranu stanovništva i oružanih sastava u tom području. Voćarstvo je dobro razvijeno, a karakteristično je uzgajanje: šljiva, jabuka, krušaka, višanja, trešanja, kajsija, bresaka, ora-ha i drugog voća. Voće dobro uspeva na stranama pobrđa i niskih planina između 300–700 m nadmorske visine. U strukturi voća preovlađuje šljiva koja uspeva u Šumadiji, dolini reke Zapadne Morave i u zapadnoj Srbiji (Valjevo i Čačak). Vinogradarstvo ima povoljne uslove za svoj razvoj. Najbolji rezultati postignuti su u Rasinskom okrugu (Aleksandrovac). Karakteristično je i intenzivno stočarstvo u brdskim predelima, a po kvalitetnim mlečnim proizvodima izdvaja se područje Zlatibora.

Industrijska proizvodnja

Na strategijskom pravcu izdvajaju se dve industrijske oblasti:

– *panonsko-beogradska*, izdvaja se beogradsko industrijsko područje, a u okviru njega obrenovačko-mladenovački industrijski rejon;

– *centralna industrijska oblast*, izdvaja se dva industrijska područja: timočko-pomoravsko (sa jagodinsko-paraćinskim industrijskim rejonom) i zapadnomoravsko (sa užičko-čačanskim, kragujevačkim i kraljevačkokuševačkim industrijskim rejonom).

U daljem radu industrijska proizvodnja je obrađena kroz oblasti energetike, rudarstva, metalurgije i metalne industrije na strategijskom pravcu.

U oblasti *energetike* najznačajnija je proizvodnja uglja. Na geoprostoru pravca nalazi se najveća termoelektrana u RS („Obrenovac” – Skela), tako da će potrebe za ovim vidom energije biti u potpunosti zadovoljeni.

Rudarstvo je takođe razvijeno, a veći rudnici u zoni strategijskog pravca su:

– Baljevac (kameni uglj), proizvodnja oko 120.000 tona,

– Kolubara (lignit), proizvodnja oko 25 miliona tona, što je više od polovine ukupne godišnje proizvodnje u RS,

– Bajovac – Kraljevo (lignit) proizvodnja oko 7.000 tona.

U oblasti *metalurgije* na strategijskom pravcu izdvajaju se cma i obojena metalurgija.

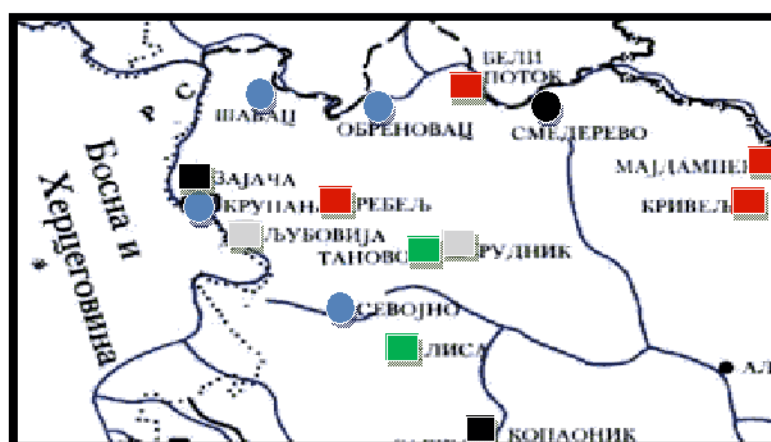
Cma metalurgija zavisi od uvozne rude gvožđa i uvoznog koksa. Gvožđe je osnovni proizvod crne metalurgije. Najznačajniji objekat je že-

ležara u Smederevu. Vojnogeografski položaj železare je nepovoljan, jer je relativno blizu državne granice. Zato u miru treba stvoriti rezerve gvožđa i čelika na pogodnim lokacijama, a razmatrati i mogućnost rada železare, ako nije u zoni b/d.

Obojenu metalurgiju na geoprostoru pravca karakteriše proizvodnja bakra, olova, cinka i antimona – slika 3 (Pavlović, 1999).

Valjaonica i presaonica bakra nalazi se u Sevojnu („Impal–Sevojno“), a kablovi se proizvode u Jagodini („Nov-kabel“).

Rudnici olova i cinka nalaze se u okolini Ljubovije i na planini Rudnik. Proizvodni pogon za prerađu olova nalazi se u Zajači kod Loznice (Koncern „Farmakom MB“), a proizvodni pogon cinka u Šapcu (HK „Zorka“).



LEGENDA:

● Crna metalurgija	■ Rudnik, volfram–uran
■ Rudnik gvozdene rude	■ Rudnik, bakar–pirit
● Obojena metalurgija	
■ Rudnik olova i cinka	
■ Rudnik, boksit/antimon	

Slika 3 – Metalurgija i rudna nalazišta na stratezijskom pravcu
Figure 3 – Metallurgy and mineral deposits on the strategic direction

Antimon se, takođe, proizvodi u Zajači kod Loznice (Koncern „Farmakom MB“) i to za potrebe R.Srbije. Proizvodnja tog metala opada zbog osiromašjenja minerala u rudi.

Proizvodnja olova, cinka i antimona direktno utiče na proizvodnju akumulatora i baterija bez kojih se ne mogu upotrebiti borbena i neborbena vozila, vazduhoplovi, brodovi, sredstva veze i druga sredstva ratne tehnike.

Objekti metalurgije su veoma složeni, skupi, velikih razmera i izgrađeni na otvorenom prostoru, pa su unosni ciljevi dejstva agresora, posebno iz vazdušnog prostora. Njihovo ukopavanje, disperzija i evakuacija nisu ekonomski isplativi. Tehnološki uslovi ne dozvoljavaju gašenje peći u topionicama. Sve to ukazuje na to da mora doći do planske obustave proizvodnje, što utiče na potrebu stvaranja rezervi i njihovu racionalnu potrošnju od prve najave rata.

Metalna industrija je nastavak metalurgije. U okviru geopratora strategijskog pravca izdvajaju se:

- automobilska industrija u Kragujevcu,
- proizvodnja šinskih vozila u Kraljevu,
- brodogradnja u Beogradu,
- elektroindustrija u Čačku, Kragujevcu i Ralji,
- proizvodnja industrijskih mašina u Valjevu,
- vazduhoplovna industrija u Trsteniku.

Od ostalih industrijskih grana značajnije su:

- hemijska industrija u Šapcu, Kruševcu, Užicu, Čačku,
- tekstilna industrija u Beogradu, Smederevskoj Palanci, Užicu,
- industrija kože i obuće u Beogradu,
- mesna industrija u Jagodini i dr.

Zaključak

Na osnovu kompleksnog sagledavanja društveno-geografskih činilaca na drinsko-velikomoravskom strategijskom pravcu dejstva najznačajniji zaključci sastojali bi se u sledećem:

- geoprator pravca je nacionalno kompaktan, što će omogućiti pravovremenu mobilizaciju i popunu ratnih jedinica u toku vođenja b/d;
- polazeći od brojnosti stanovništva sa mobilizacijskim naprezanjem 1% do 5% može se obezbediti od 30.000 do 150.000 ljudi, što je dovoljno za zatvaranje ovog strategijskog pravca;
- u slučaju upotrebe oružja za masovno uništavanje najveći gubici mogu se očekivati u većim gradovima (Beograd, Kragujevac, Šabac, Loznica, Valjevo, Čačak itd.) (Inđić, 2012, pp.275–295);
- komunikacijska mreža na strategijskom pravcu je slabije razvijena i ne omogućava brzo napredovanje savremeno opremljenim snagama agresora, ali omogućava braniocu uspešan manevar i pregrupisanje snaga po frontu i dubini, izvođenje dejstava u pozadini neprijatelja i efikasan dotur i evakuaciju;

– na geoprostoru pravca postoje značajni tehničko-tehnološki potencijali, koji nisu ravnomerno raspoređeni:

- poljoprivredna proizvodnja je u najvećem obimu zastupljena u severnom delu pravca (Mačva, Pocerina, Tamnava) i većim rečnim dolinama;
- proizvodnja hidroenergije težišno je zastupljena u perifernim delovima (Bajina Bašta, Mali Zvornik);
- eksploatacija uglja zastupljena je, u najvećem obimu, u centralnom delu SP (Kolubarski i Ibarski baseni, Kraljevo);
- crna i obojena metalurgija uglavnom je zastupljena na perifernim delovima (Zajača, Smederevo);
- metalna industrija rastresitim razmeštajem i kapacitetima u potpunosti može zadovoljiti potrebe mirnodopske i ratne proizvodnje;
- „namenska proizvodnja” razmeštena je u celoj zoni pravca („Krušik” Valjevo, „Prva Iskra” Barič, „Zastava oružje” Kragujevac, „Milan Blagojević” Lučani, „Prvi partizan” Užice, „Prva petoletka” Trstenik, „14.oktobar” Kruševac).

Literatura

- Doktrina Vojske Srbije*, 2010. GŠ VS, Beograd.
- Indić, D., 2012. *Određivanje mogućnosti odreda za otklanjanje posledica hemijskog udara u zoni odbrane brigade*, Vojnotehnički glasnik/Military Technical Courier, Vol. 60, No. 2, pp.275–295.
- Milovanović, M., 1996. *Pripreme za odbranu zemlje*, CVŠ VJ, Beograd.
- Mišović, S., 1998. *Vojnogeografska procena jugoslovenskog ratišta*, Sektor ŠONID, Beograd.
- Opštine u Srbiji – 2009*, 2010. Republički zavod za statistiku, Beograd.
- Pavlović, M., 1999. *Regionalna vojna geografija*, VIZ, Beograd.
- Sekulović, D., 2011. *Vojna geografija 2*, Medija centar „Odbrana”, Beograd.

CHARACTERISTICS OF THE SOCIO–GEOGRAPHIC FACTORS IN THE DRINA–VELIKAMORAVA STRATEGIC DIRECTION ZONE

FIELD: Earth Sciences, Military Geography
ARTICLE TYPE: Professional Paper

Summary

This paper presents the assessment of the operational – geographic features of the Drina–Velikamorava strategic direction. Due to the scope of the article, a variant of the assessment of the strategic direction is presented through its socio–geographic factors, while the mathemati-

cal-geographical and physical-geographic factors, as well as the operating lines of action are not discussed. Within the socio-geographic factors, the characteristics of the population, economy and communication networks are considered. The geographic area of the direction is nationally compact and provides war mobilization of units with no particular strain. The transportation network is not fully developed which makes combat operations difficult to attackers and facilitates them for the defenders. There are significant technical and technological potentials in the direction of the zone, but they are not evenly distributed. After the consideration of the complex socio-geographical factors, it is concluded that the shown strategic direction enables, without any special restrictions, a successful execution of combat operations in the long run.

Introduction

The Drina-Velikomorava strategic direction of action consists of two operational lines: Semberija-Šumadija and Glasinac-Zapadnamorava. This paper presents a variant of a complex evaluation of the socio-geographic factors in the area of strategic direction. Within the socio-geographic factors in the strategic direction, the characteristics of the population, economy and communication networks are discussed.

Characteristics of the population and settlements

In the geographic strategic direction, there is about 30% of the population of the Republic of Serbia. The highest population density is in major cities (Belgrade, Novi Sad, Šabac, Čačak, etc.). The space is nationally compact, and over 95% of the population are Serbs. In terms of building methods, there are the following types of settlements: compact type (including cities and villages in the plains of Mačva, Posavina, Morava) scattered type (including villages in the mountainous regions – Tara, Zlatibor and Majen, Povlen) and mixed type (spa, mining and tourist resorts). It should be noticed that almost all the towns on the line are located along the most important communication lines, in major river valleys, at mountain foothills, namely in the geographic space naturally suitable for combat operations.

Characteristics of Communication Networks

The communications network on the strategic direction is not developed well and does not provide for a high tempo of well-equipped aggressor attacks. Through this strategic geographic space there are two longitudinal directions (Bačka-Kosovo and Bačka-Crnagora) and two transverse (Šumadija-Timok and Zapadnamorava-Nišava) communication nodes. The communication networks in the geographic direction enable successful maneuvers and regrouping of forces in the front and rear, successful execution of combat operations, timely and successful execution of mobilization and evacuation.

In the geographic strategic direction, the river and canal traffic does not follow the natural and geographic conditions, so it is of no special significance to the military aspect. The general characteristics of

air traffic in the strategic direction is an unfavourable territorial distribution of airports (in the southeast direction).

Characteristics of the economy

The consideration of the economy in this strategic direction is done through the consideration of the military geographic characteristics of natural-economic potential and military geographic characteristics of technical-economic and technological potentials.

The natural economic resources are viewed through: agricultural land, energy resources and mining potential. Much of the farmland is located in the Semberija-Šumadija operating direction (Mačva, Pocerina, Šumadija) that gravitates towards the periphery. In the strategic direction, the major geographic sources of energy are waterpower and coal while oil and gas are not sufficiently represented. The diversity of non-metal ores and metals is of invaluable importance because they form the basis for the production of a variety of funds for strengthening the defense capability of the country.

Technical and Economic Technological resources are exposed through the major characteristics of agriculture and industry in the area of strategic direction. Within the geographic strategic direction, there are two agricultural areas: the Pannonian agricultural area (south of the Sava and the Danube rivers), with wheat and corn as strategic raw materials and the mountainous agricultural area (including the border area of the Pannonian agricultural field to the right border of the strategic direction) with many cultures (especially plums, apples, pears, cherries, apricots, walnuts, etc.). There are two industrial areas set aside the strategic direction: Pannonia-Belgrade (Belgrade allocated industrial area) and the central industrial area (there are two industrial areas: Timok-Morava and Zapadna Morava). Industrial production in the strategic direction is well developed, especially in energy, mining and metal industries.

Conclusion

Based on the complex understanding of the socio – geographic factors in the Drina-Velikamorava strategic direction, it can be concluded that the strategic direction shown enables successful combat operations over an extended period of time. Some problems may occur due to unevenly distributed technical and technological potentials and a potential use of weapons of mass destruction in the vicinity of large cities in the area of strategic direction.

Key words: Communication networks, factors, executives, directive.

Datum prijema članka/Paper received on: 19. 07. 2012.

Datum dostavljanja ispravki rukopisa/Manuscript corrections submitted on: 06. 08. 2012.

Datum konačnog prihvatanja članka za objavljivanje/ Paper accepted for publishing on: 08. 08. 2012.

INŽENJERING BEZBEDNOSTI: FIZIČKE MERE ZAŠTITE ZA OSOBLJE VISOKORIZIČNE BEZBEDNOSTI

Jelena S. Cice, Quality Austria Center, Beograd,
Marko D. Andrejić, Univerzitet odbrane u Beogradu,
Vojna akademija, Beograd,
Nebojša K. Dragović, Ministarstvo odbrane Republike
Srbije, Beograd

OBLAST: inženjering bezbednosti
VRSTA ČLANKA: prikaz

Sažetak:

Dizajn fizičkih mera bezbednosti je specijalizovana tehnička oblast koja ne spada u uobičajene veštine i rezime komandanata, arhitekata, inženjera i menadžera projekta. Ovaj rad daje smernice za sve one čiji je zadatak sprovođenje postojećih i novih zahteva za sisteme fizičke zaštite, kao što su: stvaranje jedinstvenog koda reference za projektovanje i izgradnju fizičkih mera bezbednosti za osoblje, usvajanje višestruko korisnih standardnih preporuka i razmišljanja, moguće povećanje produktivnosti osoblja visokorizične bezbednosti i smanjenje privremenih troškova stanovanja kroz razjašnjenje razloga, smernica za planiranje i pružanje dizajnerskih rešenja, smanjenje troškova projektovanja objekta, bolje performanse modernizovanih objekata, u smislu zaštitne snage, od prvobitnih objekata.

Tokom ovog procesa potrebno je obezbediti: poverljivost (potreba da se zaštite važna dokumenata za planiranje), odgovarajuće odnose sa javnošću (obaveštavanje samo odabranih ljudi, istovremeno obezbeđujući da informacije nisu došle u pogrešne ruke), održivost (uključivanje postojećih sistema gde god je moguće umesto zamene, sprovođenje osnovne bezbednosti, gde je to potrebno, uravnoteženje sistema fizičke zaštite sa operativnim procedurama), usklađenost sa svim industrijskim smernicama i pravnim i regulatornim zahtevima, stalnu kontrolu i reviziju u cilju usvajanja novih okolnosti ili pretnji.

Ključne reči: standard, osoblje visokorizične bezbednosti (OVB), zaštita, infrastruktura, zahtevi, fizička bezbednost, vodič i projektovanje.

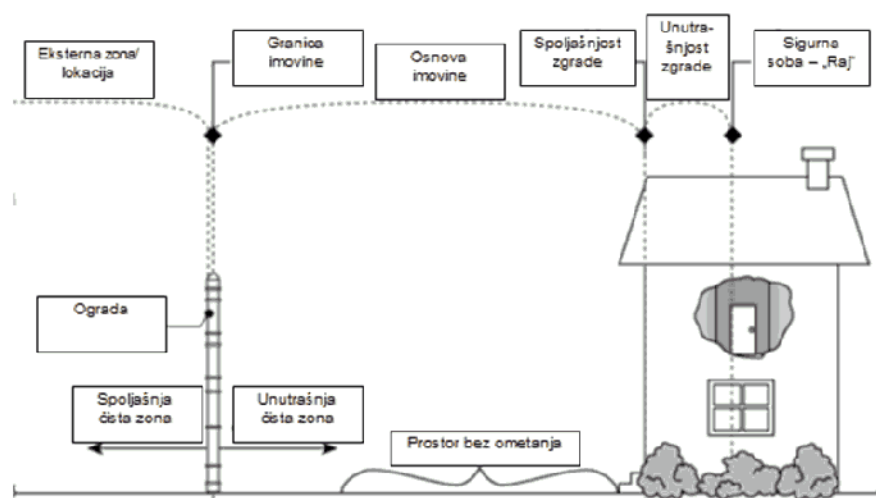
Uvod

Fizička bezbednost je izuzetno široka oblast. To obuhvata uređaje za kontrolu pristupa, kao što su smart kartice, filtraciju vazduha i protivpožarnu zaštitu. Takođe, u velikoj meri se oslanja na infrastrukturu. To znači da mnoge od idealnih fizičkih mera bezbednosti ne mogu biti ekonomski ili fizički izvodljive za postojeće uslove. Mnoge organizacije nemaju opciju da izgrade svoj objekat iz temelja, te mere fizičke bezbednosti time često moraju biti integrisane u postojeću strukturu, što ograničava ukupan skup bezbednosnih mera koje se mogu instalirati. Takođe, postoji aspekt fizičkog obezbeđenja koji se često previdi, a to su ljudi. Pri likom razmatranja plana za poboljšanje fizičke bezbednosti važno je uzeti u obzir motive i situacije koje bi olakšale izvršenje zločina protiv osoblja koje je ugroženo. Vrlo često upravo lica kojima je povereno da vrše bezbednosnu funkciju i pružaju podršku u zaštiti osoblja visokorizične bezbednosti (u daljem tekstu OVB) mogu biti najslabija karika u lancu zaštite. Ovaj rad fokusira se na izgradnju dve vrste objekata: radni prostor OVB i rezidenciju OVB (Department of Defense, 2004). OVB se definiše kao osoblje za koje je velika verovatnoća da će biti mete terorista ili kriminalaca na osnovu njihovog zadatka, pozicije, simboličke vrednosti i ocene za mogućom pretnjom i ranjivošću. Integracija zaštitnih mera mora biti urađena u toku procesa planiranja. Tim za planiranje mora uzeti u obzir sve aspekte projekta, kako bi se obezbedila ravnoteža između bezbednosti i drugih zahteva. Da bi se to postiglo, tim za planiranje treba da se sastoji od ključnih ljudskih resursa, uključujući organizacije za pružanje zaštite (u daljem tekstu OPZ), lica za antiterorizam, obaveštavanje, bezbednost i inženjering objekata. Ovaj tim odgovoran je za identifikovanje zahteva za projekat, čime se olakšava razvoj koji podržava operativne procedure, dobijanje odgovarajućih resursa i propisno podržava sve druge potrebne napore da se promišljeno poboljša zaštita OVB.

Nivoi zaštite

Preporuke sadržane u ovom radu imaju za cilj da prikažu načine za smanjenje mogućnosti da dođe do stradanja OVB u zgradama ili delovima zgrada u kojima rade i žive. Ove preporuke obezbeđuju odgovarajuće mere implementacije za uspostavljanje nivoa zaštite od terorističkih napada kada nije poznato da postoji pretnja od terorističkih aktivnosti u određenom trenutku. Mada bi potpuna zaštita od svih mogućih pretnji koštala previše, namera ovih preporuka može se postići kroz promišljeno glavno planiranje, kupovinu nekretnina, kao i dizajn i građevinsku praksu.

Preporuke koje pružaju sledeći kriterijumi zadovoljavaju prethodno iznetu nameru i uspostavljaju osnove za brzu primenu dodatnih zaštitnih mera u okruženju koje sadrži viši stepen mogućih pretnji. Ovi kriterijumi mogu biti dopunjeni tamo gde su identifikovane dodatne specifične terorističke pretnje, gde se primenjuju još stroži lokalni kriterijumi, gde se to može preporučiti na osnovu urađene procene osetljivosti bezbedonosne zaštite ili gde lokalni komandanti/rukovodioci diktiraju dodatne mere (Department of Defense, 2008).



Slika 1 – Slojevi odbrambenih zona
Figure 1 – Layered defence zones

Ovi kriterijumi odnose se na izgradnju, renoviranje i iznajmljivanje u vezi sa primarnom rezidencijom ili kancelarijom nekog OVB (slika 1). Oni nisu namenjeni za zaštitu OVB u borbenim zonama i na područjima gde su u toku nepredviđene ili ekspedicione operacije i ne ograničava zaštitu OVB zaštitu u tim oblastima.

Fizičke mere bezbednosti

Za označavanje svake od preporučenih fizičkih mera bezbednosti može se koristiti specijalno označavanje, u zavisnosti od nivoa zaštite na koji se odnosi.

Broj oznake

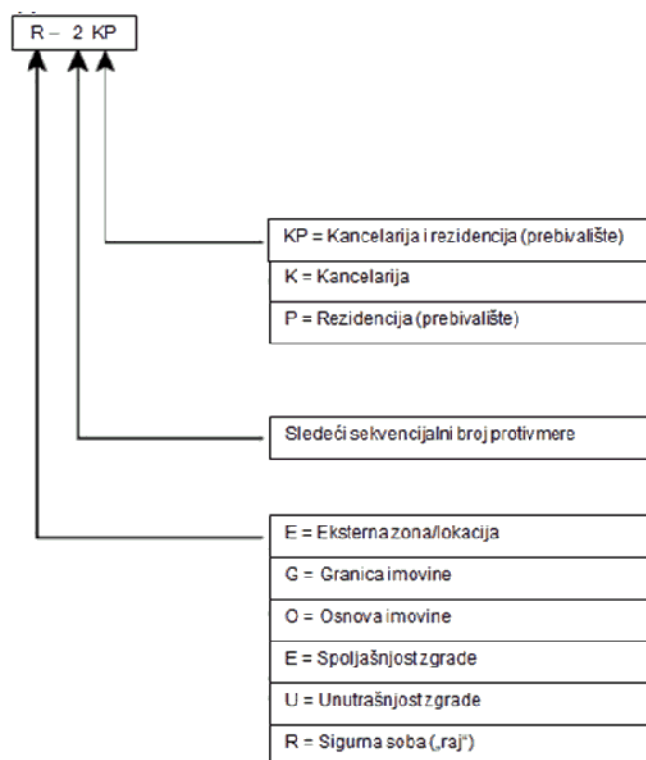
Broj oznake na početku svake fizičke mere bezbednosti (preporuke) jedinstven je i namenjen da bude pomoć u komunikaciji prilikom povezivanja određenog zahteva (preporuke) u ovom radu sa pripadajućim opi-

som (slika 2). Tri karaktera od kojih se sastoji broj oznake koriste sledeću legendu (Department of Defense, 2011a):

- Prvi karakter u broju oznake je skraćenica za sloj odbrambene zone koja je najpogodnija za primenu protivmere: „E“ se koristi za predstavljanje eksterne zone ili lokacije, „G“ za zonu granice imovine, „O“ za predstavljanje problema u odnosu na osnovu imovine, „S“ za predstavljanje problema u vezi sa izgradnjom spoljašnjosti kancelarije ili rezidencije (prebivališta) OVB, „U“ za predstavljanje problema u vezi sa unutrašnjosti zgrade, „R“ za predstavljanje problema u vezi sa sigurnom sobom ili zaštićenom zonom („raj“).

- Drugi karakter u broju oznake predstavlja sekvencijalni broj za protivmeru u određenoj zoni ili preporuku. Ovaj karakter osigurava jedinstveni broj oznake.

- Treći karakter u broju oznake označava da li se kontramera primenjuje u kancelarijama, rezidenciji (prebivalištu) ili u oba dela. „K“ ukazuje na zahtev ili preporuku jedinstvenu za kancelarije, „P“ predstavlja zahtev ili preporuku za rezidenciju (prebivalište), a „KP“ zajednički zahtev ili preporuku koja se primenjuje i u kancelariji i u rezidenciji.



Slika 2 – Legenda – broj oznake
Figure 2 – Caption - Tug number

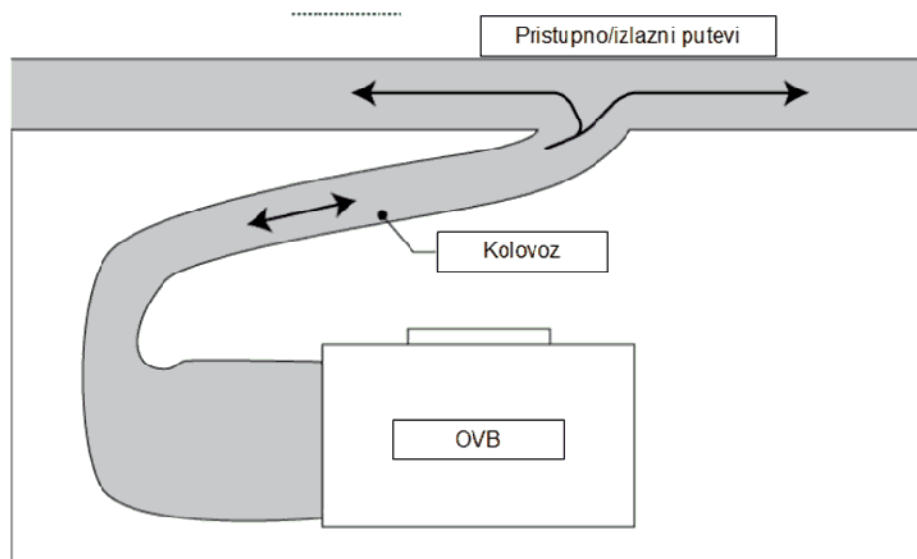
Alternativni i ekvivalentni načini ili metode

Dok navedene fizičke mere bezbednosti mogu biti veoma specifične, namera je da se postigne određeni nivo zaštite za OVB. Ako zahtev može biti ispunjen alternativnim i ekvivalentnim načinima ili metodama, onda varijacije treba prihvatiti kada se može dokazati da obezbeđuju isti nivo zaštite.

Zajedničke preporuke

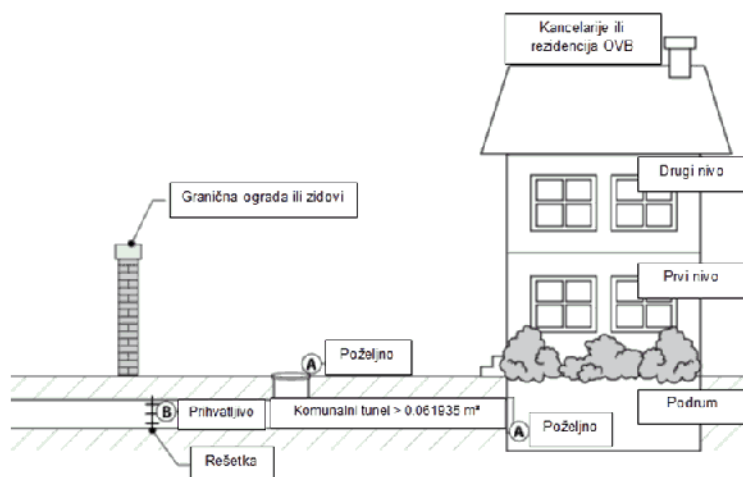
Preporuke u ovom odeljku primenjuju se i na kancelarije i na rezidencije (prebivališta) OVB (Department of Defense, 2011b):

- E-1KP: Prilazni pravci. Lokacija imovine treba da ima najmanje dva ulazna i izlazna puta (slika 3).



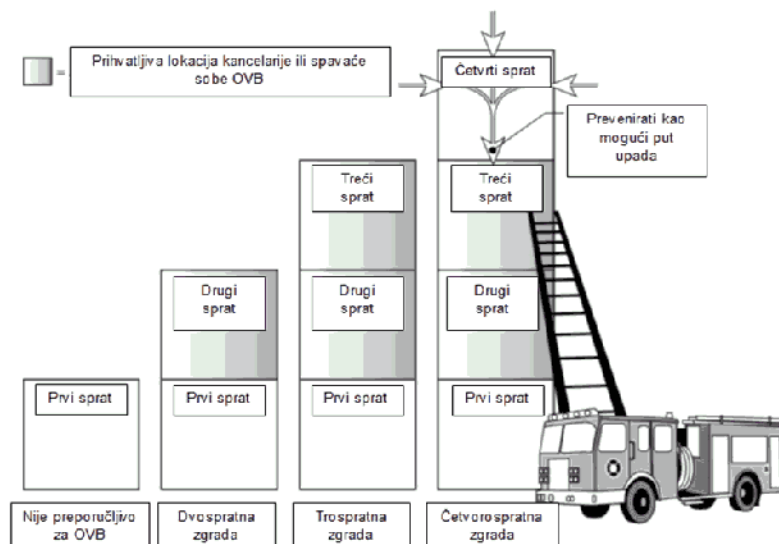
Slika 3 – Prilazni pravci
Figure 3 – Final approach routes

- E-2KP: Parkiranje vozila OVB. Vozila OVB treba da se nalaze na sigurnom mestu kada ih OVB ne koriste.
- E-3KP: Snaga za reagovanje. Preporučuje se da se kancelarija i rezidencija OVB nalaze u okviru 15 minuta vremena za odziv snaga za reagovanje u slučaju ugroženosti OVB.
- E-4KP: Sedište. Primarna rezidencija i kancelarija OVB treba da se nalazi blizu lokacija u vlasništvu vojnih ustanova.
- G-1KP: Podzemni prolazi. Svi podzemni prolazi kroz koje može da prođe čovek, poput komunalnih tunela, treba da se zapečate (slika 4).



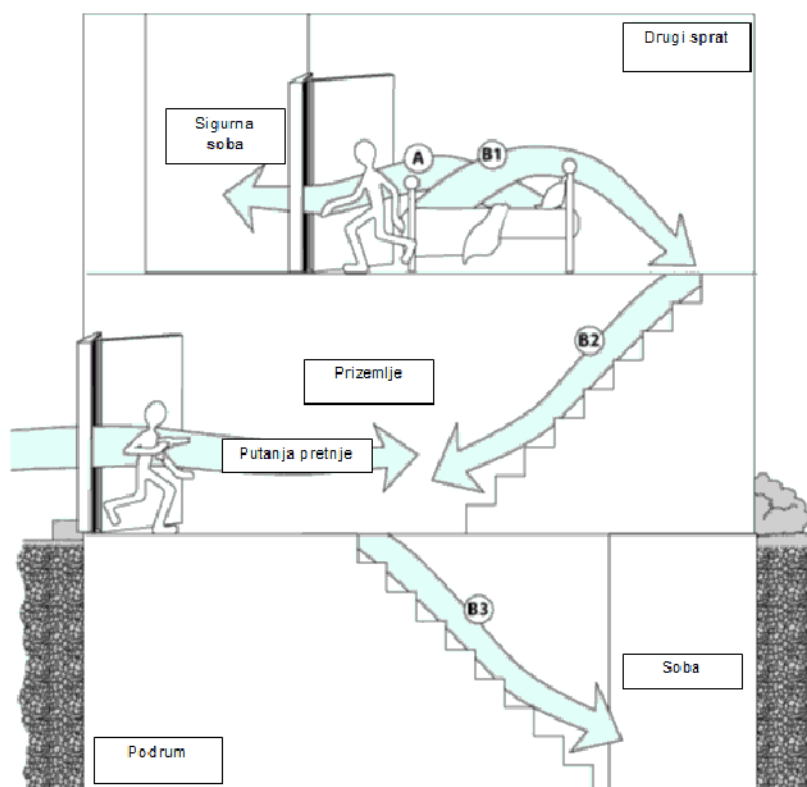
Slika 4 – Zaštita podzemnih otvora
Figure 4 – Protection of subterranean openings

– S-1KP: Broj nivoa. Kancelarije i glavna spavaća soba u rezidenciji OVB treba da se nalaze u zgradama koje su visoke tri ili manje spratova. Kancelarije i glavna spavaća soba u rezidenciji treba da se nalaze na spratu iznad nivoa tla. Kada se nalazi u strukturama više od tri sprata, kancelarije i glavna spavaća soba u rezidenciji OVB ne bi trebalo da bude iznad trećeg sprata, i mora postojati rešenje za sprečavanje upada iz gornjih spratova (slika 5).



Slika 5 – Broj spratova
Figure 5 – Number of levels

- S-2KP: Zaključavanje prozora. Prozori bi trebalo da budu zaključani iznutra.
- S-3KP: Smanjiti broj spoljašnjih vrata. Da bi umanjili moguće tačke upada, potrebno je izabrati zgradu u kojoj se može upravljati brojem spoljašnjih vrata.
- S-4KP: Materijal izrade spoljašnjih vrata. Da bi se poboljšala zaštita pri prinudnom ulasku, neglazirani delovi spoljašnjih vrata do kancelarija i rezidencije OVB treba da budu od čvrstog materijala, kao što su metal ili drvo.
- E-5KP: Otvaranje vrata. Spoljašnja vrata na kancelarijama i rezidenciji OVB trebalo bi da se otvaraju ka spolja.
- S-6KP: Šarke na spoljašnjim vratima. Šarke bi trebalo da budu prilagođene teškim uslovima rada. Protivmere treba sprovesti da bi se minimizirale mogućnosti da vrata budu odvaljena razvaljivanjem šarki.
- S-7KP: Štok na spoljašnjim vratima. Ako materijal od kojeg je izgrađen štok spoljašnjih vrata nije od čvrstog materijala (najmanje 26 mm debljine), potrebno je dodatno ojačati štok kako bi se sprečio nasilni upad.



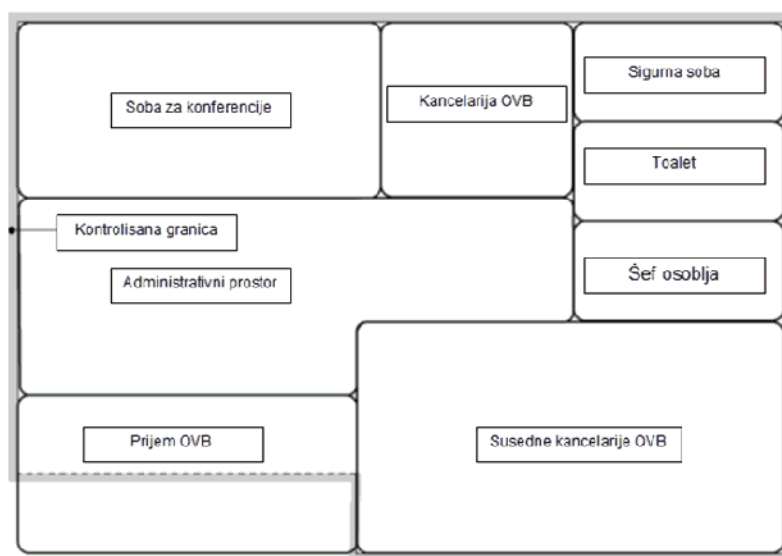
Slika 6 – Sigurna soba
Figure 6 – Safe room

- U-1KP: Svetlarnici. Zbog povećanih rizika od upada u zgradu, trebalo bi izabrati neku kancelariju ili rezidenciju bez krovnih svetlarnika.
- U-2KP: Raspored nameštaja. Potrebno je postaviti nameštaj tako da OVB sedi što dalje od prozora ili mogućeg puta kojim bi leteli stakleni fragmenti i drugi projektili.
- R-1KP: Sigurnost soba. Potrebno je obezbediti sigurno utočište na spratu gde se nalaze kancelarije ili spavaća soba u rezidenciji OVB.
- R-2KP: Slojevi zaštite. Radi veće zaštite preporučuje se da dodatna vrata budu ojačana.
- R-3KP: Sigurnost soba. Za visok nivo zaštite preporučuje se dobro ojačano sigurno utočište (*slika 6*).

Preporuke za kancelariju

Pored zajedničkih preporuka za zgrade u kojima boravi OVB, sledeće dodatne fizičke mere zaštite preporučuju se za kancelarije OVB (Department of Defense, 2012):

- E-5K: Minimalni standardi. Bez obzira na opterećenje zgrade (broj osoba), zgrada u kojoj se nalazi kancelarija OVB treba da zadovolji minimalne zahteve standarda za antiterorizam koji su namenjeni osnovnoj zgradi u kojoj se osoblje okuplja (nizak nivo zaštite).
- U-3K: Interno kontrolisana pristupna zona. Potrebno je smestiti kancelariju OVB u komandni/rukovodeći deo zone sa kontrolom pristupa (*slika 7*).



Slika 7 – Interno kontrolisana pristupna zona
Figure 7 – Internally controlled access area

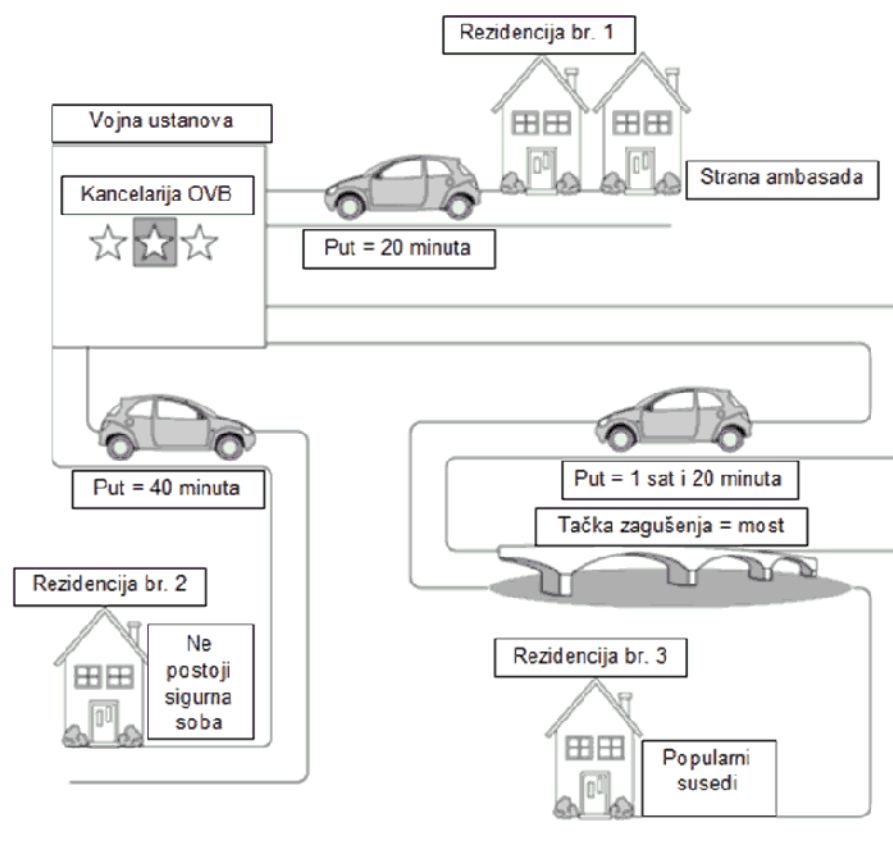
- U–4K: Glavna ulazna vrata. Kancelarija OVB i komandni/rukovodeći deo zone treba da imaju vrata koja su čvrste konstrukcije i koja se otvaraju prema spolja, kako bi se ublažio uticaj nasilnog upada u prostoriju.
- U–5K: Ostala ulazna vrata. Ostala vrata kancelarije OVB, pored glavnih ulaznih vrata, treba da budu obezbeđena programiranom bravom koja omogućava blokiranje vrata u slučaju panike. Ova vrata ne smeju imati spoljašnje brave.
- U–6K: Konstrukcija vrata kancelarije OVB. Sistem štoka na vratima kancelarije i komandne/rukovodeće zone (okvir i brave) treba da bude dovoljno jak da spreči distorzije koje mogu izazvati neispravno povezivanje senzora na vratima sa alarmom, nepravilno zatvaranje vrata ili smanjenje bezbednosti.
- U–7K: Izgradnja kancelarije. Zidovi, podovi i plafoni kancelarije OVB i komandne/rukovodeće zone trebalo bi da budu izrađeni od čvrstih građevinskih materijala. Zidovi treba da se pružaju pod pravim uglom od poda do plafona.
- U–8K: Nadzorne kamere. Potrebno je razmotriti korišćenje sistema nadzornih kamera da bi službe bezbednosti imale uvid u stanje i kretanja u okviru svih delova komandne/rukovodeće zone.

Preporuke za rezidenciju (prebivalište)

Pored zajedničkih preporuka za zgrade OVB, dodatne fizičke mere zaštite preporučuju se za rezidencije (prebivalište) OVB.

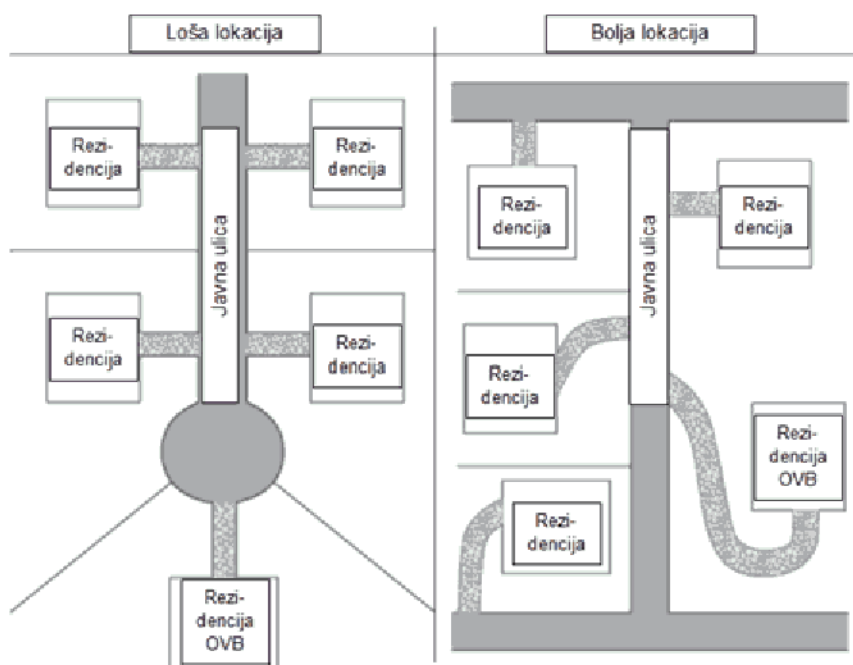
Mnoge od preporuka zasnivaju se na pretpostavci da se boravak OVB ne nalazi u vojnoj zoni (Philpott, Einstein, 2006):

- E–6P: Okruženje. Rezidencija OVB ne bi trebalo da se nalazi u blizini poznatih i popularnih lokacija ili organizacija koje bi mogle privući nasilnu političku aktivnost ili demonstracije.
- E–7P: Izgled zgrade. Arhitektura i nivoi osvetljenja zgrade treba da se uklape u okolinu. Napadači ne bi trebalo da izaberu zgradu samo zbog njenog izgleda, tj. upadljivog odstupanja od okoline.
- E–8P: Rute kretanja. Da bi smanjili dodatnu ranjivost tokom kretanja OVB, treba pronaći prebivalište na lokaciji koja neće znatno povećati vreme kretanja u okolini kancelarije OVB ili izloženost pretnjama duž puteva do i od lokacije kancelarije (*slika 8*).



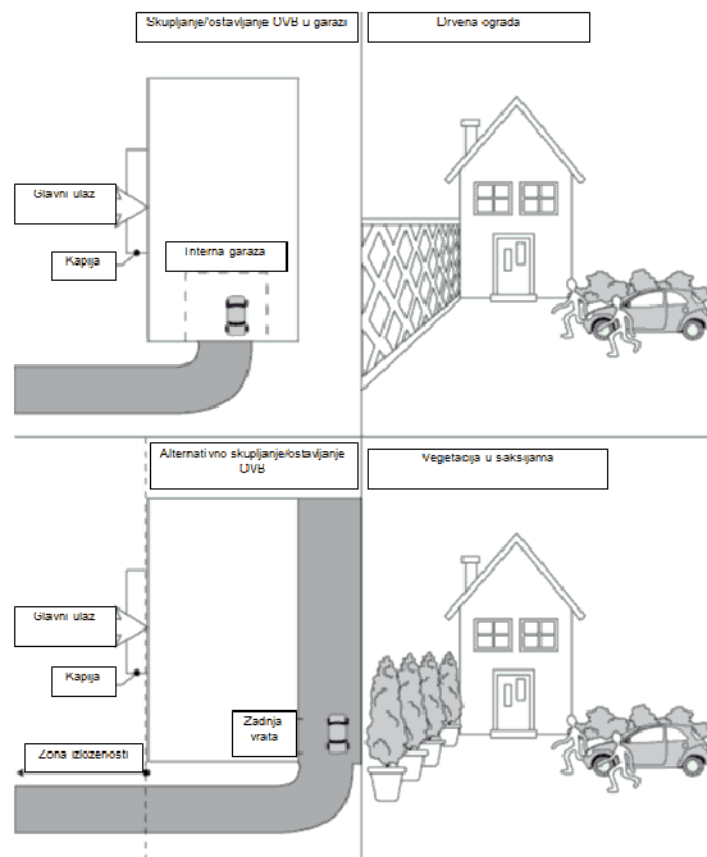
Slika 8 – Rute kretanja
Figure 8 – Commute route

- E-9P: Hitne službe. Rezidencija treba da se nalazi na lokaciji koja u susedstvu ima dobru zaštitnu uslugu u hitnim slučajevima (kao što je policija, vatrogasci i zdravstvene ustanove). Vreme odziva od poziva hitnoj službi treba da bude manje od 15 minuta.
- E-10P: Zona kriminala. Potrebno je izabrati rezidenciju u oblasti sa dokazanim niskim nivoom kriminala u prošlosti.
- E-11P: Transportni pristupi. Izaberite rezidenciju na lokaciji koja nema nesmetani pristup vozila direktno prema prebivalištu OVB (slika 9).
- G-2P: Obod na granici imovine. Da bi granice imovine bile zaokružene, rezidencija OVB treba da na obodu bude oivičena fizičkom barijerom, poput drvene ograde, ivičnjaka ili vegetacije da bi granica imovine bila jasno označena i utvrđeni uslovi prolaza. Pretpostavlja se da je pristupni kolovoz otvoren. Viši nivo zaštite bilo bi postavljanje ograde ili zida od najmanje dva metra i prilazni kolovoz sa kapijom.



Slika 9 – Transportni pristupi
Figure 9 – Vehicular approaches

- G–3P: Pregled izlaznih puteva. Potrebno je uspostaviti uslove da se pregledaju izlazni putevi iz rezidencije pre samog izlaska.
- G–4P: Pristupne tačke za vozila. Broj pristupnih tačaka za vozila u prebivalište OVB treba svesti na najmanju neophodnu meru.
- G–5P: Kamere za nadzor na obodu. Treba razmisliti o postavljanju kamera za nadzor oko rezidencije kako bi osoblje moglo da proceni bezbednosne pretnje oko rezidencije i na obodu.
- G–6P: Senzori za detekciju upada. Potrebno je razmisliti o dodavanju senzora za detekciju upada na obodu rezidencije, kako bi bilo obezbeđeno najranije moguće otkrivanje i obaveštenje o upadu na posjed.
- O–1P: Udaljenost nadzornika. Udaljenost nadzornika od zaštićene rezidencije treba da ispunji zahteve standarda kada postoji vrlo nizak nivo zaštite (Pollack, 2004).
- O–2P: Povoljne tačke. Zona skupljanja/ispuštanja OVB i prozori visoke vidljivosti treba da budu skriveni ili prekriveni tako da budu nedostupni za zloupotrebu preko spoljnih povoljnih tačaka (slika 10).



Slika 10 – Protivmere na povoljnim tačkama
Figure 10 – Vantage point countermeasures

- O-3P: Parking za privatna vozila OVB. Parking za vozila OVB u privatnom vlasništvu treba da bude u kontrolisanom prostoru.
- O-4P: Bezbedonosno osvetljenje. Potrebno je obezbediti osvetljenje za bezbednost oko spoljašnjosti rezidencije. U najmanju ruku, treba da se obezbede svetiljke na svim ulazima i izlaznim tačkama.
- O-5P: Neometan prostor. Smetnje u okviru 10 metara u rezidenciji OVB ne smeju da omoguće skrivanje predmeta visine 15 cm ili više.
- O-6P: Kontrolne tačke pristupa. Pošto se nivo pretnji ili bezbednosne potrebe mogu povećati, poželjan je prostor za kabinu ili stražarsku kućicu koja može da prati i kontroliše pristup rezidenciji.
- O-7P: Parking za posetioce. Kada ne postoji mera spoljne kontrole, parkiranje posetilaca ne bi trebalo da bude bliže rezidenciji OVB od 10 metara.

- S–8R: Spoljne brave. Spoljašnja vrata treba da imaju najmanje dve brave, kao što su brava sa ključem i brava sa blokadom (najmanje jedna u 26 mm).
- S–9P: Prozori. Prozori bi trebalo da budu u skladu sa standardom za naseljene zgrade.
- S–10P: Podzemna kontrola pristupa. Podzemni tuneli, komunalni tuneli i drugi načini za pristup podzemlju treba da budu kontrolisani ili zapečaćeni.
- S–11P: Pristup preko krova. Pristup sa krova treba kontrolisati u skladu sa standardom za okolinu zgrade.
- S–12P: Poštansko sanduče. Ako je poštansko sanduče deo spoljašnjeg dela zgrade, kao što je otvor u vratima, prorez za poštu mora biti zatvoren kako bi bio sprečen ulazak stranih objekata. Poštansko sanduče treba da se nalazi na najmanje 10 metara od rezidencije.
- S–13P: Posude za otpad. Ove posude treba da budu pozicionirane na razumnoj udaljenosti od prebivališta.
- U–9P: Sistem protivpožarne zaštite. Treba obezbediti sistem za zaštitu od požara za prebivališta OVB, kao što sledi: prskalice (prskalice su obaveza za novogradnju i preporučuju se pri renoviranju), alarm za dim (obezbediti alarm za dim, koji treba da bude povezan sa bezbednosnim panelom).
- U–10P: Sistem za detekciju provala može se obezbediti na sledeće načine: nizak nivo zaštite (prati sva spoljašnja vrata preko senzora, obezbeđuje alarm u spavaćoj sobi OVB, u sigurnoj sobi i kancelariji OVB u rezidenciji), srednji nivo zaštite (nizak nivo zaštite plus sistem za detekciju provala unutar rezidencije) i visok nivo zaštite (srednji nivo zaštite plus još dva dodatna načina za komunikaciju sistema za detekciju provala i dispečerskog centra).

Zaključak

U iznalaženju optimalnog nivoa zaštite OVB izazov je dvostruk. Prvi je da se postigne dogovor da nešto treba da se uradi, što podrazumeva promenu načina razmišljanja, stvaranje konsenzusa i dobijanje podrške sa vrha. Drugi izazov je u razvoju i sprovođenju efikasnog i poverljivog plana integrisane fizičke bezbednosti. Ovaj plan sastoji se od tri međusobno podržavajuća elementa – fizičkih mera bezbednosti, operativnih procedura i politike. Fizičko obezbeđenje pokriva sve uređaje, tehnologije i materijale za opsežnu, spoljnu i unutrašnju zaštitu. Ono pokriva sve od senzora i kamera za nadzor, do barijera, osvetljenja i kontrole pristupa kancelarijama i rezidenciji (prebivalištu) OVB (Security PACE Book 2, 2012).

Na osnovu svega predloženog, sve mere služe za ublažavanje negativnih uticaja. To su temelji na kojima svaki plan integrisane fizičke bezbednosti mora biti izgrađen:

- Sprečavanje – pruža protivmere, kao što su politike, procedure i tehnički uređaji i kontrola za odbranu OVB koje se štiti.

- Detekcija – monitori za potencijalne havarije u zaštitnim mehanizmima koji bi mogli dovesti do narušavanja sigurnosti.

- Usporavanje – predviđa mere koje u slučaju upada uljeza mogu da ih zadrže dovoljno dugo da omoguće bezbednosnom timu da ih uhapsi pre nego što ostvare svoj cilj.

- Odgovor – procedure i aktivnosti za reagovanje na upad. Pošto je gotovo nemoguće postići potpunu bezbednost, bezbednosni programi koji ne uključuju detekciju i usporavanje su nepotpuni. Da bi bili efikasni, sva tri koncepta moraju biti elementi ciklusa koji kontinuirano rade zajedno.

- Oporavak – plan da se nastavi poslovanje i aktivnosti koliko god je moguće uobičajeno nakon incidenta.

- Ponovna procena – presudna u toku procesa. Pre primene bilo kakve izmene, potrebno je ponovo osigurati, kroz strateški plan, da će ciljevi biti ispunjeni. Kad god se menjaju okolnosti ili kada se identifikuju nove pretnje, ponovo treba revidirati strateški plan i sprovesti ponovnu procenu da bi se utvrdile potrebne dodatne mere, ako ih ima.

Osoblje visokorizične bezbednosti (OVB) štiti se u mestu i pokretu, u mestu rasporeda, života i rada i u „pretpolju”¹, a obim zaštite zavisi od procene ugroženosti ovih ličnosti.

Fizička zaštita osoblja visokorizične bezbednosti (OVB) obuhvata mere, aktivnosti i politike² koje se preduzimaju radi sprečavanja narušavanja zaštite OVB i brzog uspostavljanja potrebnog nivoa zaštite ukoliko se ona naruši.

Problemi zaštite OVB su loše strukturirani problemi, višekriterijumskog karaktera.

Njihovo rešavanje podrazumeva više aspekata: fizički, tehnički i organizacioni i dr., a rešenje kao misaoni proizvod treba sadržati prostornu,³ vremensku⁴ i organizaciono-tehnološku komponentu.

¹ Sve je deo celine i celina delova, sve je deo igre i igra delova (dinamika pojava).

² Po svom obliku predstavlja skup svih načelnih odluka, smernica, kriterijuma, stavova, pravila ponašanja, principa i postupaka – procedura (jedinstvenih i standardnih) kojih se moraju, u toku planiranja, odlučivanja i realizacije odluka u vezi sa zaštitom OVB, držati svi subjekti u sistemu (grupe i pojedinci), kako bi se osiguralo njihovo usklađeno delovanje (koordinirano sadejstvo) i jedinstveno postupanje (homogena akcija), usmereno na postizanje projektovanih ciljeva.

³ S obzirom na to da je višedimenzionog karaktera, ima smisla govoriti o prostornom ambijentu.

⁴ Na primer, interval bezbednosne održivosti (strpljivosti) OVB, vreme izlaganja konkretnom riziku, vreme otkrivanja opasnosti i upozorenja, vreme odziva snaga za reagovanje ili vreme reagovanja snaga za podršku i pružanje usluga (zdravstvo, zaštita od požara, raščišćavanje ruševina, prepreka na komunikaciji i sl.).

Svako organizaciono rešenje zaštite karakterišu određena *brzina, cena i kvalitet*. Prilikom odlučivanja za varijantu rešenja treba znati da je nemoguće istovremeno zadovoljiti sve zahteve, tako da je jedan od njih uvek neispunjen.

U realnom sistemu nemoguće je naći rešenje koje je najbolje po svim kriterijumima.

U procesu planiranja zaštite OVB vrlo je važno, kroz projektovanje rešenja zaštite, vršiti racionalizaciju zahteva u pojavljivanju i preventivnim promišljanjem otkloniti uzroke koji kasnije dovode do pada nivoa zaštite OVB.

Na primer, izborom adekvatne lokacije (npr. u zaštićenoj, povoljnoj ili „vojnoj zoni“) objekta za rad i stanovanje, izborom lokacije za radne i druge prostore u izabranoj zgradi itd., moguće je racionalizovati brojne zahteve po pitanju fizičke zaštite.

Moguće opcije su izbor lokacije objekata i izbor objekta ili uklapanje u postojeći infrastrukturni ambijent odnosno infrastrukturnu realnost i oblikovanje zaštitnog ambijenta prema potrebama. Svako rešenje ima prednosti i nedostatke i, pre svega, cenu.

U iznalaženju optimalnog rešenja ide se na povećanje nivoa sinergije kombinovanjem različitih mera, procedura (postupaka) i aktivnosti, uz stalno insistiranje na visokom nivou odgovornosti.

U iznalaženju optimalnog nivoa zaštite OVB primenjuje se i sistemski i situacioni pristup, precizno definišu indikatori stanja zaštite osoblja i njihova težina i značajnost, primenjuju adekvatni principi zaštite, uvažavaju težišta, prioriteti i postupnost.

Literatura

- Department of Defense. 2004. Antiterrorism Handbook, O.2000.12-H.USA.
- Department of Defense. 2008. Designation and Physical Protection of DoD High Risk Personnel (HRP), Instruction O-2000.22.USA.
- Department of Defense. 2011a. Security Engineering Facilities Planning Manual, UFC 4-020-01.USA.
- Department of Defense. 2011b. Security Engineering: Physical Security Measures for HRP, UFC 4-010-03.USA.
- Department of Defense. 2012. Minimum Antiterrorism Standards for Buildings, UFC 4-010-01.USA.
- Philpott, D., & Einstein, S. 2006. The Integrated Physical Security Handbook.USA.
- Pollack, D. 2004. Using passive environmental cues to enhance physical Security.USA: SANS Institute.
- Security PACE Book 2 - Physical Security Concepts. 2012. Preuzeto sa <http://www.simplexgrinnell.com/SiteCollectionDocuments/Training/PACEBook2.pdf> 2012 Apr 29.

SECURITY ENGINEERING: PHYSICAL SECURITY MEASURES FOR HIGH-RISK PERSONNEL

FIELD: Security Engineering
ARTICLE TYPE: Review

Summary:

The design of physical security measures is a specialized technical area that does not fall in the normal skill record and resume of commanders, architects, engineers, and project managers. This document provides guidance to those parties tasked with implementing existing and emerging physical protection system requirements:

- *Creation of a single-source reference for the design and construction of physical security measures for high-risk personnel (HRP).*
- *Promulgation of multi-service standard recommendations and considerations.*
- *Potential increase of productivity of HRP and reduced temporary housing costs through clarification of considerations, guidance on planning, and provision of design solutions.*
- *Reduction of facility project costs.*
- *Better performance of modernized facilities, in terms of force protection, than original facilities.*

Throughout this process you must ensure: confidentiality, appropriate Public Relations, sustainability, compliance with all industrial guidelines and legal and regulatory requirement, constant review and revision to accommodate new circumstances or threats.

Introduction

Physical security is an extremely broad topic. It encompasses access control devices such as smart cards, air filtration and fireproofing. It is also heavily reliant on infrastructure. This means that many of the ideal physical security measures may not be economically or physically feasible for existing sites. Many businesses do not have the option of building their own facility from the ground up; thus physical security often must be integrated into an existing structure. This limits the overall set of security measures that can be installed. There is an aspect of physical security that is often overlooked; the humans that interact with it. Humans commit crime for a number of reasons.

The document focuses on two building types: the HRP office and the HRP residence. HRP are personnel who are likely to be terrorist or criminal targets based on their grade, assignment, symbolic value, criticality, and threat and vulnerability assessment.

Levels of protection

The recommendations contained in this criterion are intended to minimize the possibility of HRP casualties in buildings or portions of buildings in which they work and live. These recommendations provide appropriate and

implementable measures to establish a level of protection against terrorist attacks where no known threat of terrorist activity currently exists. While complete protection against all potential threats is cost prohibitive, the intent of these recommendations can be achieved through prudent master planning, real estate acquisition, and design and construction practices.

Tag number

The tag number at the beginning of each physical security measure (recommendation) is unique and is intended to be a communication aid when linking the requirement (recommendation) to the supporting text or commentary. The three-character tag number uses the following legend. Tag Number First Character - The first character is an abbreviation for the defense zone layer that is most applicable for the countermeasure. "S" is used to represent site or external zone issues. "P" is used to represent the perimeter zone. "G" is used to represent issues relative to the property grounds. "E" is used to represent issues associated with the building exterior of the HRP office or residence. "I" is used to represent issues associated with the building interior. "H" is used to represent issues associated with the safe room or safe haven. Tag Number Second Character - The second character is a sequential number for countermeasures in a given zone - a requirement or a recommendation. This number ensures a unique tag number. Tag Number Third Character- The third character indicates whether the countermeasure is applicable to offices, residences, or both (common). "O" indicates a requirement or recommendation unique to offices. "R" represents a requirement or recommendation to residences. "C" represents a common requirement or recommendation applicable to offices and residences.

Alternate and equivalent means or methods

While listed physical security measures may be very specific, the intent is to achieve a certain level of protection for the HRP. If a requirement can be met by alternate and equivalent means or methods, then that variance should be accepted when proven to provide the equivalent level of protection.

Common recommendations

The recommendations in this section apply to both HRP offices and residences - S-1C: Final Approach Routes, S-2C: HRP Vehicle Parking, S-3C: Response Forces, S-4C: DoD Compound, P-1C: Subterranean Openings, E-1C: Number of Levels, E-2C: Window Locks, E-3C: Minimize Number of Exterior Doors, E-4C: Exterior Door Material, E-5C: Door Swing, E-6C: Exterior Door Hinges, E-7C: Exterior Door Jambs, I-1C: Skylights, I-2C: Furniture Layout, H-1C: Safe Room/Haven.

Office recommendations

In addition to the common recommendations for HRP buildings, the following additional physical protection measures are recommended for HRP offices - S-5O: Minimum Standards, I-3O: Internal Controlled Access

Area, I-40: Primary Access Door, I-50: Other Access Doors, I-60: HRP Office Door Frame Construction, I-70: Office Construction, I-80: CCTV.

Residence recommendations

In addition to the common recommendations for both HRP buildings, additional physical protection measures are recommended for HRP residences. Many of the recommendations are based on the assumption that the HRP residence is not located on a military installation- S-6R: Neighborhood, S-7R: Building Appearance, S-8R: Commute Route, S-9R: Emergency Services, S-10R: Crime Area, S-11R: Vehicular Approaches, P-2R: Perimeter Boundary, P-3R: Egress Route Viewing, P-4R: Vehicle Access Points, P-5R: Perimeter CCTV, P-6R: Perimeter IDS, G-1R: Standoff Distance, G-2R: Vantage Points, G-3R: HRP POV Parking, G-4R: Security Lighting: Provide security lighting around the residential exterior, G-5R: Unobstructed Space, G-6R: Access Control Point, G-7R: Visitor Parking, E-8R: Exterior Door Locks, E-9R: Windows, E-10R: Under-building Access Control, E-11R: Roof Access, E-12R: Residential Mailbox Guidelines, E-13R: Trash Receptacles, I-9R: Fire Protection System, I-10R: Intrusion Detection System (IDS).

Conclusion

The challenge is twofold. The first challenge is to reach an agreement that something needs to be done. This involves altering mindsets, building consensus and getting senior management support. The second challenge is in developing and implementing an effective and tailor-made integrated physical security plan. This plan consists of three mutually supporting elements – physical security measures, operational procedures and policies. Physical security covers all the devices, technologies and specialist materials for perimeter, external and internal protection. This covers everything from sensors and closed-circuit television to barriers, lighting and access controls for HRP offices and residences.

The following crucial elements must be taken into account – deterrence, detection, delay and response and then recovery and re-assessment. All are mitigation measures. These are the foundations on which any integrated physical security plan must be built.

Key words: standards, high-risk personnel, protection, infrastructure, requirements, physical security, guidance and designing.

Datum prijema članka/Paper received on: 08. 08. 2012.

Datum dostavljanja ispravki rukopisa/Manuscript corrections submitted on: 10. 09. 2012.

Datum konačnog prihvatanja članka za objavljivanje/ Paper accepted for publishing on: 12. 09. 2012.

РАЗБОР КНИГИ „АЭРОДИНАМИКА ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ“ АВТОРОВ: ЛЕОНИДА ИВАНОВИЧА ГРЕЧИХИНА, А. А. ЛАПЦЕВИЧА И Н. Г. КУЦЬА

Небойша Н. Гачеша, Министерство обороны Республики
Сербия, Управление по связям с общественностью,
Военно-технический вестник, Белград

ОБЛАСТ: аэродинамика
ВИД СТАТЬИ: разбор книги

Краткое содержание:

В настоящей книге на современном уровне развития физических представлений о взаимодействии движущегося тела с неподвижной атмосферой континуальная теория д’Аламбера-Эйлера и ударная теория Ньютона объединены в единую теорию, которая позволила правильно описать полет существующих летательных аппаратов и установить, что полет летательных аппаратов в атмосфере Земли представляет собой тепловой насос. В результате предсказана возможность полета летательных аппаратов с овальным крылом, а в бортовом энергетическом комплексе применить тепловые насосы.

Ключевые слова: аэродинамика, летательные аппараты, овальное крыло, тепловой насос.

В 2012 г. издательским предприятием «Право и экономика» при НАН Белоруси, г. Минск, Республика Белоруссия выпущена книга «Аэродинамика летательных аппаратов» Л.И. Гречихина члена Редколлегии Военно-технического вестника), А.А. Лапцевича и Н.Г. Куцья (Гречихин, Лапцевич, Куць, 2012).

Авторы книги на протяжении многих лет занимались развитием вооружения войск противовоздушной обороны СССР. Сейчас занимаются беспилотными летательными аппаратами и обосновывают возможность полета летательных аппаратов с овальным крылом с применением тепловых насосов. Создают новые тянущие винты с поверхностью Мёбиуса. Рассматривают возможность применения на борту летательного аппарата тепловых насосов. Создают научную базу разных нанотехнологий.



Авторы книги на протяжении многих лет занимались развитием вооружения войск противовоздушной обороны СССР. Сейчас занимаются беспилотными летательными аппаратами и обосновывают возможность полета летательных аппаратов с овальным крылом с применением тепловых насосов. Создают новые тянущие винты с поверхностью Мёбиуса. Рассматривают возможность применения на борту летательного аппарата тепловых насосов. Создают научную базу разных нанотехнологий.

С интенсивным развитием беспилотной малоразмерной авиации остро встала проблема правильного описания полета таких летательных аппаратов. В результате авторы книги обратились "как всегда" к экспериментальной аэродинамике, которая в принципе не дает правильного описания полета в неподвижной среде. Применение теоретической вихревой аэродинамики, развитой Жуковским, Прандтлем, Карманом и др., а также континуального обтекания д'Аламбера-Эйлера и различные другие их модификации не позволяют правильно описать аэродинамику полета разных типов летательных аппаратов, т.к., учитывают только тангенциальную составляющую потока воздуха. При этом полностью забыли корпускулярную теорию Ньютона, которая учитывает не только тангенциальную, но и нормальную составляющую в аэродинамике полета летательных аппаратов сложной формы (Гречихин, 2007).

В настоящей книге на современном уровне развития физических представлений о взаимодействии движущегося тела с неподвижной атмосферой континуальная теория д'Аламбера-Эйлера и ударная теория Ньютона объединены в единую теорию, которая позволила правильно описать полет существующих летательных аппаратов и установить, что полет летательных аппаратов в атмосфере Земли представляет собой тепловой насос. В результате предсказана возможность полета летательных аппаратов с овальным крылом, а в бортовом энергетическом комплексе применить тепловые насосы.

Книга состоит из следующих разделов:

Введение, где дается краткое описание истории развития авиации.

Раздел 1 посвящен краткому введению в математику, механику и термодинамику, используемых при анализе аэродинамики летательных аппаратов.

Раздел 2 содержит анализ разных агрегатных состояний и дано обоснование 5-му агрегатному состоянию, которое необходимо учитывать при анализе полета самолетов разных типов.

Раздел 3 «Движение различных тел в газе» посвящен процессам взаимодействия движущегося твердого тела в активной и пассивной газовой среде.

Раздел 4 «Лобовое сопротивление и подъемная сила крыла самолета» посвящен применению молекулярно-кинетической теории для обоснования возникновения подъемной силы и лобового сопротивления крыла самолета и на этой основе показана возможность полета самолета с овальным крылом, а сам полет самолета при взаимодействии с неподвижной воздушной средой представляет собой тепловой насос.

Раздел 5 «Гребные винты в авиации» содержит анализ существующих гребных винтов в авиации и обоснованию гребного винта с поверхностью Мёбиуса, который при соответствующей механизации переходит в режим работы теплового насоса.

Раздел 6 «Аэродинамика механизированного крыла самолета» посвящен обоснованию возникновения срывных течений, которые являются основной причиной формирования теплового насоса.

Раздел 7 «Аэродинамика элементов, управляющих полетом самолета» также посвящен анализу возникновения срывных течений и как на их основе реализуются воздушные тепловые насосы.

Раздел 8 «Аэродинамическое качество самолетов разных типов» содержит более глубокое обоснование полета самолета с овальным крылом.

Раздел 9 «Двигатели летательных аппаратов» посвящен анализу принципов работы разных типов двигателей, применяемых в авиации с обоснованием перехода от углеводородного топлива на воду и применение тепловых насосов электродинамического типа.

Раздел 10 «Гибридные и открытые транспортные энергосистемы» обосновывает переход в авиации на электротягу с эффективным применением тепловых насосов разных типов.

Раздел 11 «Беспилотные летательные комплексы в авиации» посвящен анализу основных принципов, учет которых необходимо учитывать при создании беспилотных разведовательно-ударных комплексов.

Книга содержит 285 страниц и 113 библиографий.

Презентация книги была осуществлена:

На научно-технической конференции «Гражданская авиация XXI века» в Ульяновском высшем авиационном училище Гражданской авиации 12 апреля 2012 г., г. Ульяновск, Россия.

На V-м Всемирном конгрессе «Авиация в XXI столетии» 25-27 сентября 2012 г. в Национальном авиационном университете, г. Киев, Украина.

По разным аспектам этой проблемы опубликовано авторами в разных научных журналах и в трудах конференций начиная с 2005 г. более 30 статей и докладов, которые отражены в библиографии данной книги.

Literatura/References:

Гречихин, Л.И., Лапцевич, А.А., & Куць, Н.Г. 2012. *Аэродинамика летательных аппаратов*. г. Минск, Республика Белоруссия: «Право и экономика» при НАН Белоруси.

Гречихин, Л.И. 2007. Современная аэродинамика полета летательных аппаратов и возможности компьютерного моделирования. У: Материалы VIII Международной конференции «АВИА-2007», г. Киев., стр. 33-104.

PRIKAZ KNJIGE „AERODINAMIKA LETELICA“ AUTORA LEONIDA IVANOVIČA GREČIHINA, A. A. LAPCEVIČA I N. G. KUČA

Nebojša N. Gaćeša,
Ministarstvo odbrane Republike Srbije, Uprava za odnose sa javnošću,
„Vojnotehnički glasnik“, Beograd

OBLAST: aerodinamika
VRSTA ČLANKA: prikaz

Sažetak:

U izdanju izdavačke kuće „Pravo i ekonomika“ iz Minska, Belorusija, 2012. godine objavljena je knjiga „Aerodinamika letelica“, autora Leonida Ivanoviča Grečihina (člana Uredivačkog odbora „Vojnotehničkog glasnika“), A. A. Lapceviča i N. G. Kuča (Гречихин, Лапцевич, Куць, 2012).

Sa intenzivnim razvojem malih bespilotnih letelica sve češće se postavlja i pitanje pravilnog definisanja njihovog kretanja (letenja). Kako bi došli do određenih spoznaja autori su obično kretali od eksperimentalne

aerodinamike, koja u principu ne može dati pravilnu definiciju kretanja bespilotne letelice u statičkoj sredini. Primenom teoretske aerodinamike, kojom su se bavili Žukovski, Prantl i Karman (generisanje uzgona na cilindru, pri njegovom opstrujavanju sa fluidom sa cirkulacijom), kao i principa nestatičke aerodinamike D'Alembert–Ojlera, a takođe i drugih njihovih metoda, ne može se dobiti tačna definicija aerodinamike kretanja različitih tipova letelica, pošto svi ti modeli uzimaju u obzir samo tangencijalnu komponentu strujanja vazduha. Pri tome, u potpunosti se zaboravilo na Njutna i njegovu korpuskularnu teoriju, koja obuhvata ne samo tangencijalnu komponentu, već i normalnu komponentu u aerodinamici leta bespilotnih letelica složene konstrukcije (Гречихин, 2007).

U ovoj knjizi, primenom savremenih fizičkih dostignuća o međusobnom dejstvu pokretnog tela sa nepokretnom atmosferom, kontinualna teorija D'Alembert–Ojler i korpuskularna teorija Njutna objedinjene su u jednu teoriju, koja je omogućila da se pravilno definiše kretanje letelica, kao i da se dođe do zaključka da se kretanje letelica u atmosferi Zemlje odvija na principu termičke pumpe. Upravo zbog toga autorima je pružena mogućnost da u budućnosti predvide letelice sa ovalnim krilima, kod kojih će se, u pogledu energetskog sistema, primenjivati princip termičke pumpe.

Ključne reči: aerodinamika, letelice, ovalno krilo, termička pumpa.

REVIEW OF THE BOOK 'AIRCRAFT AERODYNAMICS' BY LEONID IVANOVICH GRECHIHIN, A. A. LAPCEVICH AND N. G. KUCH
(ЛЕОНИД ИВАНОВИЧ ГРЕЧИХИН, А. А. ЛАПЦЕВИЧ И Н. Г. КУЦЬ)

Nebojša N. Gaćeša,
Ministry of Defence of the Republic of Serbia, Military Technical Courier,
Belgrade

FIELD: Aerodynamics
ARTICLE TYPE: Review

By applying the achievements of modern physics in the field of the interaction of moving bodies with the stationary atmosphere, this book combines the continuous theory of D'Alembert-Euler with Newton's corpuscular theory into a theory leading to a correct definition of aircraft movement as well as to a conclusion that the aircraft movement in the Earth atmosphere follows the heat pump operating principle. The authors, therefore, have got the possibility to foresee future aircraft with oval wings which will apply the heat pump principle in their energy systems.

Key words: aerodynamics, aircraft, oval wing, heat pump

Дата получения работы/Paper received on: 13. 03. 2013.

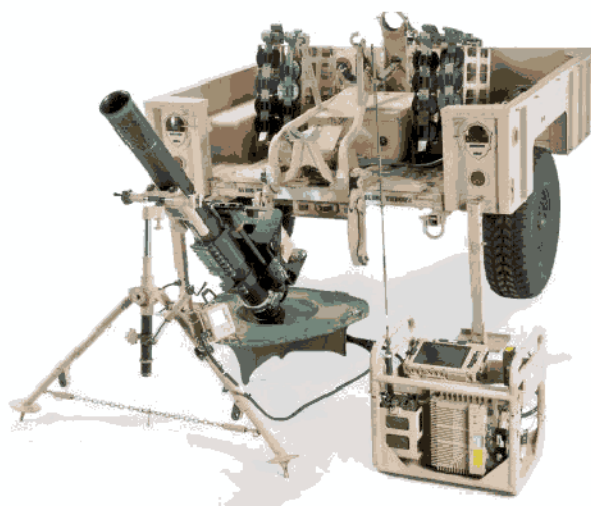
Дата получения исправленной версии работы/Manuscript corrections submitted on: 19. 03. 2013.

Дата окончательного согласования работы /Paper accepted for publishing on: 21. 03. 2013.

SAVREMENO NAORUŽANJE I VOJNA OPREMA MODERN WEAPONS AND MILITARY EQUIPMENT

Poboljšani EMTAS kompjuterski sistem za kontrolu minobacačke vatre iz Mistral Inc.¹

Komanda kopnene vojske SAD je, početkom marta 2013. godine, zatražila od kompanije Mistral Inc. u Betezdi, Merilend (Bethesda, Maryland) da njihovi stručnjaci za pešadijsko naoružanje i municiju razviju kompjuterizovani sistem za kontrolu vatre i preciznu municiju za minobacače 120 mm EMTAS (Enhanced Mortar Targeting System). Zadatak se realizuje preko američkog vojnog istraživačkog i razvojnog centra Pikantini arsenal (The Picatinny Arsenal) kod istoimenog jezera u državi Nju Džer-si. Prema specifikacijama za razvoj, sistem EMTAS treba da obezbedi da standardni minobacači pogađaju cilj sa velikom preciznošću na daljinama oko četiri milje (od 7 do 8 km). Usavršeni sistem EMTAS treba da omogući dejstvo standardnih minobacača 120 mm po ciljevima na daljinama do 8 km, u bilo kom pravcu u punom krugu od 360 stepeni, ispaljujući projektele sa razmakom od 30 s. Sistem, pored toga, treba da obezbeđuje automatsku kontrolu elemenata za gađanje po visini i pravcu, uz istovremeno programiranje dejstva na nekoliko različitih ciljeva, bez premeštanja vatrenog položaja.



Pokušaj da se klasični minobacač učini efikasnijim, korišćenjem savremenog sistema za upravljanje i kontrolu vatre pomoću takvog sistema skinutog sa vozila „hamvej“

¹ Military & aerospace electronics, March 12, 2013: Army orders Improved EMTAS computerized mortar fire-control systems from Mistral Inc.; Posted by John Kelera

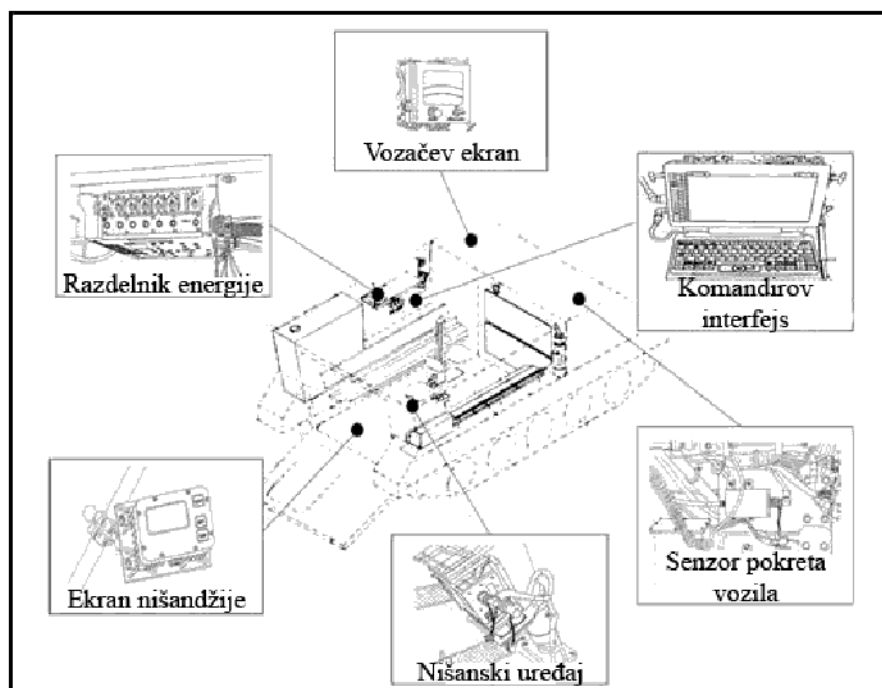
Komanda je navedenoj kompaniji odobrila 14 miliona dolara za poboljšanje postojećeg minobacačkog kompjuterskog sistema.

Poboljšani EMTAS mora biti kompatibilan sa prethodno razvijenim nišanskim sistemima, kakve poseduje minobacački lanser RMS6L, koji se koristi sa motornih vozila M1129 „strajker” i samohodnih oklopnih borbenih vozila. Na postojećim minobacačima integrisan je taktički nišanski sistem MFCS-D sa računarom, koji obezbeđuje dejstvo na temperaturama od -20 do +60 stepeni Celzijusa. Sistem može da izdrži uticaj prašine, peska, snega i vetra.

U taktičko-tehničkim specifikacijama koje je postavila Komanda američke KoV zahteva se da se računar napaja NSN standardnim baterijama, preko pretvarača priključenih na klasične priključnice električne energije ili preko hamvejevog (HMMVV) napojnog kabla za agregate.

Obaveza kompanije „Mistral” je da kompjuterski usavršeni nišanski sistem EMTAS, za minobacače 120 mm, završi, proveri i dobije atest za upotrebu, do novembra 2014.

U američkim kopnenim snagama, angažovanim u Avganistanu i Iraku, za kontrolu i upravljanje vatrom koristi se sistem MFCS-D, razvijen 2010. godine u Pikantili arsenalu, za minobacače M150/M151. Sistem ima povećanu brzinu izračunavanja elemenata za otvaranje vatre po ciljevima, a koristi se na minobacačima koji su postavljeni na samohodna vozila tipa strajker (the M1064 Self-Propelled mortar and the Stryker mortar carrier).



Sastavni delovi automatizovanog sistema za upravljanje i kontrolu vatre u minobacačkom vozilu „strajker”

Nakon što se pokušalo sa korišćenjem ovog sistema, skinutog sa samohodnog vozila, na standardnom minobacaču, uočena je potreba za njegovim usavršavanjem i ugradnjom savremenijeg kompjutera koji će upravljati sistemom. Ispitivanje mogućnosti za korišćenje ovog sistema za nišanje, obavljeno je u Centru za inženjering i razvoj naoružanja (ARDEC). Ovaj sistem je omogućio ispaljivanje projektila sa razmakom od dva min, dok je prethodnom bilo potrebno 12 min za izračunavanje elemenata i njihovo prenošenje na nišanske sprave minobacača. Sistem za nišanje MFCS-D ima balistički kompjuter koji precizno izračunava azimut i visinu, kao i GPS komponentu koja omogućava precizno izračunavanje podataka o cilju.

Računar izračunava elemente gađanja za određenu vrstu municije. Međutim, podaci se ne prenose automatski na nišanske uređaje minobacača, već ih nišandžija čita sa ekrana računara. Ispitivanje je obavljeno sa minobacačem na kružnom postolju, koje omogućava dejstvo u krugu od 360 stepeni. Inače se minobacač prevozi na prikolici M1101 koju vuče vozilo hamvej (HMMVV), i lako se skida. Za nišanje se koriste piketi udaljeni 50 do 100 m od vatrenog položaja.

U martu 2011. godine sistem MFCS-D je postavljen na minobacač 120 mm, koji se nalazi u jedinicama kopnene vojske. U isto vreme počelo se eksperimentisati sa mogućnošću korišćenja tog sistema na standardnim minobacačima. Nakon što su minobacači sa sistemom za nišanje MFCS-D korišćeni na Havajima, tokom 2010. godine pri intervenciji američke vojske, u Komandi KoV odlučeno je da se sve kopnene jedinice popune ovim sistemima do 2016. godine.

Nikola Ostojić

Otkazan nastavak projekta vojnog balona LEMV

Kompanija Nortrop Gruman, glavni nosilac realizacije projekta balona LEMV (*Long Endurance Multi-Intelligence Vehicle* – vozilo za višenamensku obaveštajnu delatnost velike izdržljivosti), saopštila je početkom 2013. godine da je dalji rad na tom projektu otkazan pošto je Ministarstvo odbrane SAD donelo odluku o gašenju programa.



Kad je balon LEMV poleteo u svom prvom eksperimentalnom letu 2011. godine, činilo se kao da stara Žil-Vernova ideja o velikim vazдушnim lađama vaskrsava

LEMV predstavlja balonsku platformu za velike visine, na kojoj bi se nalazila osmatračka, telekomunikaciona i druga obaveštajno-izviđačka oprema. Namijenjena je za američku kopnenu vojsku, obaveštajne i druge agencije, kao i telekomunikacione i ostale kompanije.

Balon LEMV je, u stvari, hibridna vazдушna lađa proizvedena po najnovijim naučnim i tehnološkim standardima za ovakve vrste letelica. Pogon omogućuje kretanje na velikim visinama, a poseduje i sistem za stabilizaciju leta u složenim atmosferskim uslovima. U nju je ugrađena najnovija tehnologija, elektronika i mehanika, koje su trebale da obezbede sigurnost leta, određene manevarske sposobnosti, kao i višenamensku funkcionalnost. Projekat je ostvarivan u nadležnosti Komande američke vojske za vazduhoplovstvo i raketnu odbranu u Strategijskoj komandi konenih snaga (U.S. Army Space and Missile Defense Command/Army Forces Strategic Command). Prvobitno je osmišljen da podrži operativne potrebe u Avganistanu u proleće 2012, ali se sa njegovom realizacijom kasnilo zbog problema sa tehničkim performansama i ograničenim materijalnim i finansijskim resursima.

Projekti decenije

Novije ideje o korišćenju velikih balona za vojne potrebe razmatraju se unazad desetak godina. Američki tim iz Jugozapadnog istraživačkog centra (Southwest Research Institute - SwRI) 2005. godine prikazao je vazдушnu balonsku letelicu Hi-Sentinel, odnosno stratosferski balon, koji može da lebdi na visini od 74 kilometra. Projekat je pokrenuo razvojni tim Međunarodne istraživačke laboratorije vazduhoplovnih snaga (Aerostar International, the Air Force Research Laboratory - AFRL), a realizuje se u fiskalnom periodu do 2012. godine. Sistem je proveravan i testiran od marta do maja 2011. godine i pokazao je stabilnost vazdušne balonske platforme, kao i uspostavljenih veza putem releja na toj platformi. Težište testiranja bilo je na analizi oblika vazdušnog broda, da bi se on redizajnirao prema uslovima koji vladaju u stratosferi. Međutim, najviše pažnje posvećeno je uređaju za stabilizaciju i sistemu za upravljanje letom (kormilo). Taj vazdušni brod poleteo je iz Rozvela, testiranje je trajalo pet sati, pri čemu je proverena stabilnost leta, upravljivost i sve ostale karakteristike koje treba da omoguće praktičnu upotrebu ovog vazdušnog broda. Balonska letelica dugačka je 146 m, nosi 60 kg opreme, a poseduje pogonski sistem koji omogućuje let u stratosferi. Testiranje je počelo tako što je polunaduvan balon počeo da se uzdiže i pri tome puni helijumom. Prireme su trajale šest meseci pod nadzorom američke Komande kosmičkih i raketnih odbrambenih snaga (U.S. Army Space and Missile Defense Command).

Američka Odbrambena agencija za usavršene projekte i istraživanja DARPA, 2006. godine obezbedila je, takođe, i sredstva za razvoj još jednog vazdušnog broda, odnosno balonske letelice Aerokraft ML866. Projekat je dobio naziv „Visokomobilni sistem za aktivnosti unutrašnje bezbednosti“, a realizator je firma Aeros iz Montabela, u Kaliforniji. Već novembra 2007. godine završen je projektantski deo istraživanja, koji se odnosio na COSH sistem (Control of Static Heaviness system), sklop koji automatski kontroliše statičnu težinu, odnosno proračunava odnos mase letelice i mogućnosti da ona nosi određeni teret. Test sistema bio je uspešan i DARPA je angažovala kompaniju „Nortrop Gruman“.

Kada se analizira koji su činioci doprineli da se razmišlja o upotrebi balona u vojsci, valja uzeti u obzir i to da je britanska Kompanija hibridnih vazduhoplovnih vozila, 2007. godine, otvorila perspektivu za komercijalno korišćenje vazdušnih balona za prevoz ljudi i robe svojim balonskim sistemom HAV (High altitude - vehicle – letelica za visoke letove). Balon je izrađen od polukrutih materijala, - napunjen helijumom, a pokretali su ga vektorski podešeni motori. Brzina leta je 185 km/h. Vazdušni potisak za dizanje čini samo 40 odsto mase balona, a ostatak otpada na potisnu snagu motora, koji, koristeći velike ravne površine, obezbeđuju uzdizanje, letenje i spuštanje. Kao i na starijim tipovima balona, s donje strane se nalazi platforma za teret, kao i sistem za prizemljenje.

Balon HAV može da ostane u vazduhu 21 dan, koliko ima zalihe goriva za - motore, a nesi teret od 200 t. Američka vojska ga je koristila za prevoza tereta do Avganistana i Iraka tokom 2011. i 2012. godine.



Balonska platforma HAV366

Balonska platforma HAV366

Američko Ministarstvo odbrane poverilo je i kompaniji „Lokid Martin“ da, za 400 miliona dolara, razvije „vazdušni brod za velike visine“ (HAA – High altitude Airship). Reč je o bespilotnom, daljinski kontrolisanom balonu, koji bi bio sta-

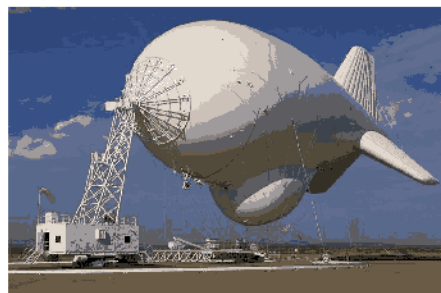
cioniran u stratosferi, na geostacionarnoj poziciji. Prvo testiranje obavljeno je već 2011. godine, na visini od 21 kilometar, a autonomni let je trajao 90 dana. Sledeće godine provereni su uređaji koji skeniraju područje prečnika 970 kilometara, kao i vazdušni prostor. Uz to, ugrađen je translacioni telekomunikacioni relej, meteorološki uređaji, kao i sistemi za kontrolu funkcionisanja svih uređaja na platformi balona. Nakon što postane operativan, posle svih proveravanja, testiranja opreme i konstrukcije, planirano je da se balon upotrebljava u Avganistanu i Iraku.

U projektu upotrebe sistema balona HAA razmena i verifikacija podataka o situaciji na tlu obavljala bi se preko sistema AVAKS, a stanje u vazдушnom prostoru upoređivalo bi se sa podacima iz sistema JSTARS.

Hibridni dirizabli LEMV

Projekat LEMV, hibridnog dirizabla, odnosio se na balon koji bi leteo do visine 6 km sa velikim radijusom delovanja, u vazduhu bi mogao da ostane tri nedelje, a poletao bi i sletao na različite terene nezavisno od postojanja piste. Ova letelica bi se koristila višekratno, po planu i za potrebe obaveštajno-izviđačkih organa američke vojske. „Northrop Grumman” je za osnovu iskoristio balonsku platformu HAV366 koju je proizvela kompanija „Vazдушna hibridna vozila” u Cranfildu, Velika Britanija. Materijal za balonsku oplatu bio je proizvod firme „Vorvick Mills” iz Novog Ipsviča, delove za upravljanje letom proizvodi preduzeće KMP Dover u Kentu, koje je i konstruktor, sredstva i sistemi za osmatranje i nadzor, kao i izgradnja stanica za distribuciju informacija potiču iz firme Tekstron (sastavni deo AAI Corp u mestu Hunt Valej, Merilend-nedaleko Baltimora u SAD), dok je SAIC u McLeanu, Vašington, SAD, dobavljač bezbednosne i zaštitne opreme.

Platforma LEMV ima obaveštajnu, osmatračku i izviđačku namenu (Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance – ISR), a planirano je da se na nju postave radari raznih vrsta, elektro-optički uređaji, komunikacioni releji, uređaji za prisluškivanje sistema veza i praćenje signala, kao i za sprovođenje određenih protiv elektronskih mera. Leteo bi izvan vizuelnog dometa protivnika, a zaštićen odgovarajućim premazima bio bi nevidljiv za radarske signale. Bio bi povezan sa nizom zemaljskih stanica za prijem podataka. Prednost bi bila što ne bi imao posadu, svi uređaji bi funkcionisali autonomno ili bi bili kontrolisani iz bazne zemaljske stanice. Mogao bi se premeštati po visini i pravcu pomoću motora, ali bi koristio i vazдушna strujanja radi uštede u gorivu. Planirano je da gomja oplata balona bude od materijala u koji su utkani fotosenzori koji bi obezbeđivali napajanje uređaja električnom energijom. Pored toga, ova platforma bi mogla da ponese i određenu vrstu energetskog ili raketnog oružja, kako za neposrednu odbranu, tako i za dejstvo po ciljevima u vazдушnom prostoru ili na zemlji.



Daljinski radarski sistem TARS

Proračuni pokazuju da je upotreba balona mnogo jeftinija od satelita, u čije lansiranje treba uračunati ne samo cenu rakete, goriva i drugih pratećih troškova, već i troškove njihovog održavanja, popravku u slučaju kvara i dr. Racionalnost upotrebe balonskog sistema obrazložena je i proračunom da su letovi izviđačkih aviona skupi, odnosno da sat leta košta do 20.000 dolara. Sa tog aspekta nešto su povoljniji helikopteri, ali njihova visina leta nije odgovarajuća za obaveštajna izviđanja na većoj površini. Cena korišćenja osmatračkog balona, kako u trupi, tako i za operativne i stratejske potrebe, mnogo je manja, čak i za deset puta. Pored toga, ovakav balon može da preveze do sedam tona tereta, na daljinu preko 5.000 kilometara, brzinom većom od 60 km na sat.

Prema planu realizacije, kompanija Nortrop Gruman je u junu 2010. godine testirala balon na poligonu Juma u pustinji Arizone. Planirano je da se, nakon toga, testira u Avganistanu tokom 2011. i 2012. godine. Međutim, u novembru 2011. godine prvi protoip je pokazao određene probleme, pa je testiranje pomerenom na početak 2012. Prvi let LEMV izveden je 7. avgusta 2012. u bazi Lakehurst, Nju Džersi. Let je trajao 90 min, sa posadom na brodu. Primarni cilj tokom tog testiranja bio je da se proverí bezbedno poletanje i stabilnost u vazduhu, dok je sekundarni cilj bio da se proverí mogućnost upravljanja i funkcionisanje kontrolnih sistema. Izvedena su i dodatna ispitivanja letnih karakteristika i ponašanje u vazдушnom prostoru u odnosu na meteorološku situaciju. Svi ciljevi su ispunjeni tokom prvog leta. To je nadležne u Komandi vazduhoplovnih i raketnih snaga uverilo da je ova leteća lađa spremna da se početkom 2013. godine rasporedi na borbeni položaj u Avganistanu. Međutim, dva meseca posle probnog leta, Komanda kopnene vojske postavila je pitanje slanja ovog diržabla, - uzevši u obzir bezbednost, prevoz do ratišta, kao i vremenski okvir za raspoređivanje. Zatim su, 14. februara 2013. godine, nadležni u Komandi kopnene vojske potvrdili da se odustalo od daljeg razvoja LEMV, navodeći tehničke razloge i nerešena pitanja tehničkih i letnih performansi, kao i ograničene (finansijske) resurse.

NAZIV PROJEKATA AEROSTATA I VAZDUŠNIH BRODOVA DO JUNA 2012.

Ime	Namena	Broj - jedinica	Planirana sredstva u periodu 2007-2012. (u mil \$)	Status
AEROSTAT				
Istraživanje geostacionarne platforme – vazdušnog broda (GARP)	Testiranje platforme za obaveštajno-izviđačko-osmatračku delatnost (ISR)	2	9,4	Postavljeno
Sistem za neprekidni nadzor teritorije (PGSS)	Obezbeđuje ISR podršku	59	1,508.0	Postavljeno
Sistem za detekciju neposrednih pretnji (PTDS)	Obezbeđuje ISR podršku	66	1,717.1	Postavljeno
Aerostat za automatsko praćenje početnog raspoređivanja (RAID)	Obezbeđuje stalan nadzor za specijalne zaštitne snage	21	127.1	Postavljeno
Aerostatska platforma za brzo reagovanje (REAP)-XL B	KoV: obezbeđenje stalnog nadzora/RM: prošireni komunikacioni sistem	3	5.3	Postavljeno
Usidreni aerostat sa radarskim sistemom (TARS)	Podrška Ministarstva odbrane u akcijama sprečavanja krijumčarenja droge, duž južne granice SAD	8	213.5	Postavljeno

VAZDUŠNI BRODOVI				
Napredna letela laboratorija (AAFL, nazvana i MZ-3A)	Testiranje platforme za ISR i komunikacije	1	14.1	Postavljeno
„Plavi đavo” Blok 2 (avganistanski superšpijun)	Prikaz multi-obaveštajnih mogućnosti ISR	1	243.6	Prekinuto
Platforma za testiranje izdržljivosti na velikim nadmorskim visinama (HALE-D)	Prikaz mogućnosti ISR na velikim nadmorskim visinama	1	36.3	Završeno
HiSentinel	Prikaz mogućnosti ISR na velikim nadmorskim visinama	2	11.2	Završeno
Starlajt („Zvezdana svetlost”)	Dirižabl za prikaz letne izdržljivosti na velikim nadmorskim visinama	1	2.1	Prekinut
U TOKU RAZVOJA				
AEROSTAT				
Zajednički sistem za odbranu od krstarećih raketa sa dnevno-noćnim senzorima (JLENS)	Za otkrivanje i praćenje kretanje preko terena, određujući mesto napada krstareće rakete	2	2,222.3	Razvoj u toku
VAZDUSNI BRODOVI				
Integrirani senzori u strukturi dirižabla (ISIS)	Razvoj i predstavljanje radara i senzora integrisanih u strukturu stratosferskog dirižabla	1	471.4	Razvoj u toku
Multiobaveštajna letelica velike izdržljivosti (LEMV)	Razvoj i predstavljanje hibridnog prototipa vazdušnog broda za dugotrajan boravak i podršku ISR	1	275.9	Razvoj u toku
Projekt „Pelikan”	Razvoj, testiranje i predstavljanje hibridnog prototipa dirižabla, sa krutom unutrašnjom strukturom; Kontrola tehnologije za upravljanje, Namerjen za logističku podršku	1	42.4	Razvoj u toku

Izvor: Vlada SAD, Kancelarija Ministarstva odbrane za analizu podataka

Drugi programi

Pored programa LEMV, američka vojska i policija, za kontrolu granice koriste (*Persistent Border Security 420K Aerostat System*) američke vazduhoplovne snage, odnosno daljinski radarski sistem (*Tethered Aerostat Radar System – TARS*), a pešadija sistem za neposrednu borbenu podršku (*Persistent Combat Support*). Od 2010. godine u Avganistanu i Iraku koristi se sistem TAS (*Tactical Air Surveillance – taktičko vazdušno osmatranje*), nazvan PTDS (*Persistent Threat Detection Systems – Stalni sistem za otkrivanje potencijalnih opasnosti*) koji se zasniva na balonskoj platformi nazvanoj 74K „Aerostat”. Realizuju se i programi stratosferske balonske platforme ISIS (dirižabl sa integrisanim radarom i senzorskim sistemima u trupu letućeg broda (*Integrated Sensor is Structure – integrisani senzori u strukturi dirižabla*)).

Prema studiji američkog Pododbora za iznenadne pretnje i mogućnosti odbrane Komiteta za oružane službe američkog senata iz 2012. godine,² u američ-

² United States Government Accountability Office: Subcommittee on Emerging Threats and Capabilities, Committee on Armed Services, U.S. Senate; October 2012.

koj vojsci se od 2007. godine realizuje 15 projekata balonskih sistema za osmatranje, izviđanje i uzbunjivanje o iznenadnim opasnostima. Tri od četiri projekta, koji su u fazi razvoja, uključujući projekat koji je raskinut u junu 2012. godine, imali su problema sa ugradnjom visokosofisticirane opreme za elektronsko osmatranje i izviđanje, zbog njene glomaznosti, kao i poteškoće sa integracijom softvera i njegovom nekompatibilnošću sa postojećim sistemima za komunikaciju i integrisanje u jedinstveni obaveštajno-osmatračko-izviđački sistem.

Sve to zahtevalo je dodatne troškove i angažovanje stručnjaka više nego što je planirano. Američko Ministarstvo odbrane obezbedilo je ograničen nadzor nad svim projektima kako bi osiguralo saradnju između svih službi, agencija i vojnih struktura koje koriste aerostatske osmatračke sisteme. Namera je bila da se obezbedi integracija u strategiji razvoja, s obzirom na to da ranije nije imao uvida u realizaciju ovakvih projekata. Imenovan je i visoki vojni funkcioner odgovoran za nadzor i koordinaciju razvoja i korišćenja programa balonskih osmatračkih sistema.

Imajući u vidu novu organizaciju i koordinaciju, kao i značaj koji ima korišćenje balonskih sistema, čini se da će pod udar doći i drugi projekti, neposredno povezani sa razvojem osmatračko-izviđačke, komunikacione i druge opreme, koja je činila sastavni deo ovih 15 projekata. Ali, to može i značiti objedinjavanje projekata u jedan, perspektivan i dugoročan, koji u skladu sa projektom razvoja američke vojske do 2025. godine može predstavljati okosnicu balonskih sistema za osmatranje i izviđanje. U 2012. godini za ovakve projekte planirano je 1,3 milijarde dolara. Valja imati u vidu da je prošle godine istekao petogodišnji rok za realizaciju 15 pomenutih projekata.

Od 15 programa razvoja aerostata i dirizabla koji su u toku ili su pokrenuti 2007. godine, deo je ostao u planu finansiranja, neki su završeni ili prekinuti. Tokom proteklih šest godina sveukupne investicije su porasle, a procenjeno je da bi za dalju realizaciju ovih projekata Ministarstvo odbrane trebalo da izdvoji još 7 milijardi dolara.

Pored toga, dešavalo se da, čak i prilikom predstavljanja ovih letelica, dođe do kvarova. Tako se balonska platforma za velike visine HALE-D, prilikom prezentacije u Ohaju 2011. godine, kada je balon dostigao visinu od 32 kilometra, iz neutvrđenih razloga (komisija je zaključila da su uzrok atmosferske anomalije), izduvao se i pao na zemlju. Oštećen je i deo opreme. Inače je bilo predviđeno da se balon dignu na visinu od 60 kilometara. To je doprinelo da se u projekat uvedu novi materijali i usavršene tehnologije. Takvi slučajevi poskupljuju dalji razvoj.

Iz tabele se vidi da su do 2012. godine tri projekta imala prioritet, a verovatno i perspektivu. To potvrđuje činjenica da je više od 90 odsto svih investicija uloženo u programe JLENS, PGSS i PTDS, te da je korišćenje ovih balonskih platformi predviđeno u Avganistanu i Iraku. Kada je 2012. godine usvajan budžet, za projekte balonskih platformi do 2016. godine, prioritet su imali projekti JLENS i LEMV.

		Planirani iznos sredstava (u mil \$)			
FISKALNA GODINA		2013.	2014.	2015.	2016.
NAZIV PROJEKTA	JLENS	187	92	31	23
	ISIS	0	0	0	0
	LEMV	26	28	26	0
	Project Pelikan	0	0	0	0

Može se pretpostaviti da je program LEMV obustavljen da bi se nastavio neki od projekata koji su trenutno značajniji za nacionalnu bezbednost i protivterorističku borbu, i time dobiju šansu da se realizuje u narednom periodu, zbog ograničenja finansijskih sredstava u planiranom budžetu.

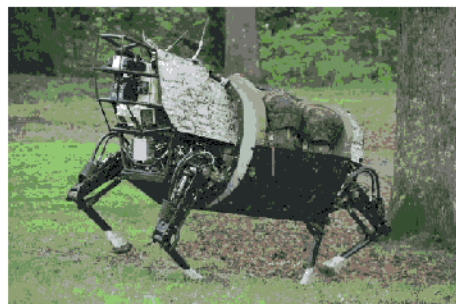
Nikola Ostojić

Projekat MULE (LS3)

Četvoronožni roboti izvršavaju glasovne komande

Ekipa stručnjaka agencije DARPA završila je, u decembru 2012. godine, još jednu fazu razvoja sistema nazvanog MULE (Multifunction Utility/Logistics and Equipment, odnosno višenamensko saobraćajno sredstvo upotrebljivo za logistiku i opremu). Projekat MULE obuhvata seriju robotizovanih vozila sa istom platformom, kod koje se razlikuju vrste pogona – da li je točkaš, guseničar ili četvoronožni robot. Tokom 2012. godine prijekat četvoronožnog robota nazvan je BigDog (veliki pas). Međutim, tokom kasnijeg razvoja projekta ustalio se naziv LS3 „hodajući sistem za podršku” (Legged Support Sistem). Ovaj deo projekta, u kojem je ugrađen modul za prepoznavanja glasa, obezbedio je da se ovim robotima komanduje rečima – *komandama*.

Testiranje sposobnosti i mogućnosti ovakvog robota izvedeno je na četiri prototipa, 19. decembra 2012. godine, u Fort Piketu (Virdžinija, SAD). Predstavljen je napredak u autonomiji robota, pokretljivost po različitom terenu i mogućnosti komandovanja glasom. U stvari, stručnjaci agencije DARPA su, uz pomoć inženjera Bobbene laboratorije Mornaričkog korpusa (Marine Corps Varfighting laboratory – MCVL), pokazali unapređenja u kontroli robota, njegovu pokretljivost i stabilnost, uključujući i „Lider Follov” odlučivanje (sposobnost da se sledi vodič). Takođe, predstavljena je sposobnost za samostalnu dijagnostiku sistema i njegov oporavak u slučaju kvara, preciznost kojom robot bira gde će stati stopalom u odnosu na konfiguraciju (neravnog) terena (što je veoma bitno ne samo sa aspekta održavanja ravnoteže već i u odnosu na osobine tla – klizava ili travnata površina, tlo prekriveno lišćem i dr.). S obzirom na to da su danas u fokusu interesovanja vojnih stručnjaka i sposobnosti robota u urbanim dejstvima, jedan deo testa odnosio se i na sposobnost manevarisanja (promene smera) u urbanoj sredini. Međutim, čini se da je najveća pažnja ipak poklonjena sposobnosti ovog robota da izvršava verbalne komande.



Postignut je napredak u autonomiji robota LS3, koji se odnosi na pokretljivost po različitom terenu i mogućnosti komandovanja glasom

Hodajući sistem za podršku

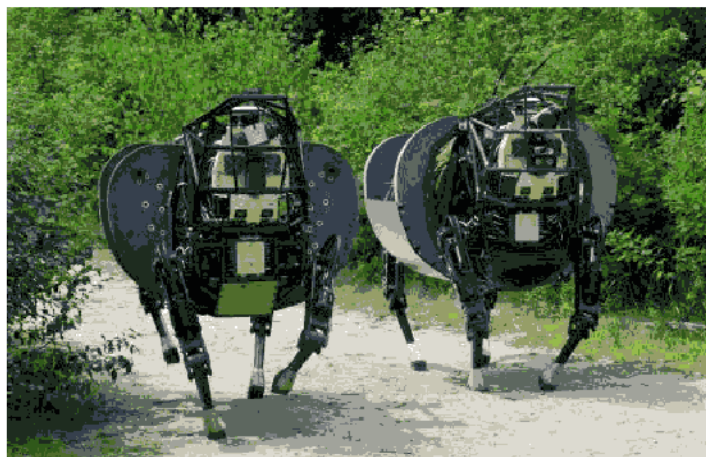
Inače, višenamenska platforma na četiri noge predstavljena je i septembra 2012. godine, u okviru drugih projekata daljinski upravljanih ili samostalnih (robotizovanih) višenamenskih platformi za prevoz (prenošenje) tereta. Projekat LS3 pripada porodici ovih vozila, sa tom razlikom što model LS3 ima noge umesto točkova ili gusenica. Od 2010. godine razvija ga američka kompanija „Boston dajnamiks” (Dynamics). Kad je ovaj robot prestavljen rečeno je da bi trebalo da zameni tovarnu životinju, mulu ili magarca na koje podseća robot tog tipa. Robot izgleda kao čelična kutija dužine metar i visine 75 cm, sa dva para nogu sličnih prednjim nogama magarca. Noge su okrenute jedne prema drugima. U njega je ugrađeno

daljinsko upravljanje koje se, inače, koristi za upravljanje vozilima namenjenim pešadiji (Unmanned ground combat vehicle – UGCV), čime je obezbeđeno korišćenje postojeće taktičke komunikacione mreže u oružanim snagama SAD.

Model LS3 može poneti tri puta više opreme u odnosu na vojnika na bojištu. Sto kilograma opreme, koliko je izračunato da bi iznosio celokupan borbeni komplet savremenog pešadinca, vojnik teško može da nosi duže vreme. Zbog toga je smanjenje opterećenja vojnika jedan od glavnih prioriteta istraživanja koja finansira američka odbrambena agencija DARPA, a koja se odvijaju u više pravaca. Jedan od projekata odnosi se na upotrebu egzoskeleta, što mu omogućava da nosi do 180 kg opreme, ali ga to može ometati u neposrednoj borbenoj situaciji. Drugi projekti odnose se na smanjenje mase i težine naoružanja, municije i drugih delova opreme, u čemu se koriste najsavremenija tehnologija u razvoju nanomaterijala. Naravno, u upotrebi se nalaze i odgovarajući četvorotočkaši, odnosno guseničari, koji vuku za sobom prikolice sa delom vojničke opreme, ali oni ne mogu da se kreću po svakom zemljištu, posebno van puteva. Za razliku od tih vozila, platforma koja može da ponese deo borbenog kompleta, i koja može da sledi vojnika u stopu, na svakom terenu, osnovna je zamisao projektanta. To što je u platformu LS3 (MULE) ugrađena robotska tehnologija omogućava održavanje ravnoteže na neravnom terenu, kretanje na strminama gde nijedno vozilo ne bi moglo da se koristi, programiranje kretanja po GPS koordinatama, kao i, najnovije, komandovanje glasom umesto korišćenja džojstika i upravljačkog pulta.

Pogon MULE UGV (Unmanned Ground Vehicle) robota je hibridni električno/dizel motor. Dizel motor daje pogon generatoru koji stvara struju. Eksperimentiše se i benzinskim motorom, ali i drugim alternativnim vrstama goriva. Svaki točak posebno pokreće električni motor. Kod četvoronožne varijante električni motori pokreću hidraulični sistem za kretanje. Kako kažu konstruktori, na robotu MULE biće ugrađeno još i desetak različitih alata za samodijagnostiku sistema, održavanje instalacije i mehaničkih delova.

Kompjuter se na početku sastojao od tri seta delova: jedan za autonomni navigacioni sistem (ANS), drugi za upravljanje vozilom (VMS) i treći za upravljanje vatrom (Battle Command system). Nakon poslednjih izmena tu su i podsistemi za komunikaciju i glasovne komande.



Roboti LS3 prate svoje vodiče u stopu po svakom terenu

Novi konjovoci

Program LS3 ima za cilj da pokaže koliko su korisni mali, veoma pokretni, poluautonomni robotski sistemi, koji se kreću na nogama, i mogu da ponesu do 400 kg opreme, prate jedinicu kroz neravan teren i nalaze se u aktivnoj interakciji sa vodičem. Pri tome se podržava prirodan način na koji obučena životinja sledi svog vodiča. To može značiti i da će se uskoro u jedinicama naći i neki novi „konjovodci“ (koji postoje u planinskim jedinicama gde se koriste konji i mule za nošenje opreme). Naravno, demonstracija je predstavila i sposobnosti tog robota da noću manevriše između stabala u šumi. Pored toga, on ima još jednu, veoma praktičnu osobinu, koju životinje nemaju. Naime, zahvaljujući precizno definisanoj snazi pogonskog sistema i drugih karakteristika, veoma je lako proračunati koju težinu opreme može da ponesu, kako ju je najbolje rasporediti da bi se održavala ravnoteža pri kretanju i, pored toga, daju vodiču i podatke sa svojih senzora o prostoru kojim se kreću. Stručnjaci su istakli da su na ovu MULE ugradili više priključaka na koje se može uključiti i kabl za pomoćno napajanje senzorskih, radio ili mobilnih komunikacionih uređaja za vreme kretanja.

Poligon za ispitivanje predstavljao je raznolik teren: rovovi, šumovite i stenovite padine, klizavo i peskovito tlo, simulirana urbana sredina, ledena površina... A predstavljena je još jedna mogućnost robota – na situacionoj karti LS3 kretao se prema programiranoj putanji, poluautonomno, praćen od operatera za upravljačkom konzolom. Naravno, predviđeno je da sa Upravom za obuku u Pentagonu budu planirane vežbe na kojima će se ovi roboti koristiti.

Demonstracija sposobnosti LS3, decembra 2012. godine, predstavljala je uvod u niz sledećih testiranja u Fort Picketu, koja će se nastaviti tokom prve polovine 2014. godine, radi usavršavanja ovog robota. Predviđeno je da se u tom periodu testiraju maskirni sistemi i uređaji za zaštitu od optoelektronskih sistema, otkrivanje biološke, hemijske ili radiološke opasnosti i korišćenje u različitim vremenskim uslovima, pod veoma visokim ili ekstremno niskim temperaturama. Osnovni komplet posedovao bi i sistem za samogašenje, ventilaciju i izolaciju, kao i opremu za balističku zaštitu. Modularnost ovog robota bila bi proširena, pa se on ne bi koristio samo za prenošenje opreme (naoružanje, namirnice i voda, municija), već i sa opremom za osmatranje sa više senzora, radio-komunikacionim sistemima, pa i oružjem kojim bi se autonomno ili po komandi operatera dejstvovalo po protivniku u iznenadnoj zasednoj borbi. Vodič bi imao šlem, koji sadrži digitalni i magnetni kompas, slušalice, noćne naočare, jedan modul infracrvenog prijemnika i ugrađen ekran za proširnu realnost. Ekran na viziru šlema pružio bi koamdiru tima (voda, odeljenja) sveobuhvatnu sliku terena, podatke dobijene preko mreže za taktičko komandovanje o položaju protivnika i njegovom naoružanju (oruđima i sensorima kojima se ta oruđa koriste za dejstva), kao i informacije koje primaju senzori na robotizovanoj „muli“.

Početak i uspešna premijera

Sam projekat platforme MULE počeo se ostvarivati 2001. godine i, kao takav, svoju premernu upotrebu doživeo je 2008. godine, iako je do tada realizovano samo 80 odsto projekta. U razvoju, od 2009. godine učestvovalo je i Odeljenje za robote izraelske avionske industrije, deo diviziona Lahav (IAI's robotics

department, part of the LAHAV division). Njihovi inženjeri razvijali su platformu MULE, nazvanu REX koja ima četiri točka, mase 150 kg, a može da nosi 250 kg tereta. Izraelski robot ima goriva da obezbedi podršku pešadijskim jedinicama do 72 časa, odnosno da sa jednim punjenjem goriva pređe 100 km.



Platforma robotizovanog vozila MULE sa točkovima (FCS MULE UGV)

Prva američka platforma MULE, mase 2,5 t, testirana je od 2010. do 2012. godine na poligonu Velika prerija nedaleko od Dalasa (Teksas, SAD). Vozilo ima šasiju nalik na manje oklopno vozilo sa šest točkova. Svaki točak ima svoj pogon, što omogućava kretanje po različitim vrstama zemljišta. Na šasiji su senzorski uređaji, sistem za globalno pozicioniranje (GPS) i drugi eksperimentalni uređaji. Vozilom upravlja operater, preko bežične veze. On nosi šlem sa viziorom na kojem se projektuje slika koju dostavljaju senzori i kamere na vozilu. Uređaji za upravljanje, u obliku konzole za kompjuterske igrice, smešteni su u komandno vozilo. Sve se kontroliše preko Xbox 360 kontrolera, povezanim na kompjuter sa snažnim procesorom (u ovom slučaju tipa Pentium Intel i3). Inače, Xbox je firma koja proizvodi veoma kvalitetne bežične kontrolere za kompjuterske igrice. Program je izrađen na Linux platformi. U komandnom vozilu nalaze se uređaji kojima se može zumirati slika sa kamera, njima se može odrediti daljina do cilja i navoditi artiljerijska vatra na pokretne ciljeve – ako postoji optička vidljivost.

Kompjuter autonomno kontroliše kretanje, servo uređaje i brojne senzore. Kontrolni sistem tog robota upravlja pokretima nogu, balansom tela, orijentacijom u prostoru i na zemljištu, i reguliše racionalnu potrošnju energije. Senzori za kretanje prate celokupan položaj tela robota, silu koja se koristi za hodanje, dodir sa tlom, raspored i pokrete tereta. Stereo sistem osmatranja prati konfiguraciju zemljišta, a laserski žiroskop brine se o ravnoteži. Drugi senzori prate položaje tela u odnosu na spoljno okruženje, upravljaju hidrauličnim delovima, ostali mere temperaturu, kapacitet baterija i druge podatke, neophodne za njegovo funkcionisanje.

Ne čekajući da se projekat MULE završi, kopnena vojska SAD i Korpus mornaričke pešadije su, još 2010. godine, naručili 6.000 takvih vozila za korišćenje u Iraku i Avganistanu. Borbeni deo projekta za Irak i Avganistan nazvan je Kopneno vozilo bez vozača (Unmanned ground vehicles - UGVs). Tri takva robota, među kojima je i model SWORDS (Special Weapons Observation Remote Direct-Action System ili sistem specijalnog naoružanja koje se, na osnovu osmatranja, koristi za direktno dejstvo) isporučena su juna 2008. godine snagama u Iraku. Ovi roboti na gusenicama naoružani su mitraljezom M249. Prvo vatreno krštenje doživeo je robot koji je dodeljen Trećem armijskom pešadijskom divizionu za osmatranje u mirovnim i zaštitnim operacijama. Sličan robot nazvan „Gladijator“ ispušten je Korpusu mornaričke pešadije angažovanom u Iraku.

Taktička primena

Američki vojni stručnjaci pomno prate kako se koriste platforme MULE na ratištu, izučavajući način na koji ovi roboti doprinose razvoju taktičkih postupaka u frontalnom i urbanom ratovanju. Zbog toga je DARPA uvrstila robotska vozila tipa MULE i u projekat Urbani izazov (DARPA Urban Challenge). Od 2010. godine projekat robotskih vozila tipa MULE nastavlja se sa razvojem senzora sa softverom za prepoznavanje (rekogniciju) objekata na bojištu – vozila, zemljišta, drveća, ljudi, zgrada i naoružanja. U tom pravcu razvija se i 3D LADAR (Laser-Radar) sistem, koji treba da omogući trodimenzionalni prikaz bojišta, a povezan je sa uređajem za određivanje koordinata stalne tačke pomoću GPS. U trodimenzionalnom pregledu površine zemljišta koja se osmatra daje detaljne vizuelne topografske podatke i geografsku mikropoziciju objekata.

Pored borbene postoje još dve druge varijante: transportno i MULE vozilo za protivminsku borbu. Protivminski MULE robot ima radar koji detektuje mine u zemlji (ground-penetrating radar) i može da neutrališe minske elektronske komponente. U projektu je i varijanta lakog jurišnog robota MULE (Assault Light) za protivtenkovsku borbu. On bi bio naoružan protivtenkovskim raketama, ali i lakim mitraljezom za dejstvo protiv pešadije koja prati tenkove.

Zanimljivo je i to da je razrađena borbena upotreba robota MULE u obezbeđivanju pokreta jedinica. Ispred svake kolone kretao se, daljinski vođen, robot tipa MULE. Tako je ta vrsta robota, još od 2008. godine, postala glavni činilac upravljanja pokretima kolona vozila, s obzirom na to da su svim vozačima u koloni dostupni podaci koje robot dobije preko svojih senzora. Time svaki vozač ima isti realni pregled stanja na putu i širem okruženju, kao i operator na robotu MULE.

Puno nade polaže se u projekat robota MULE kada on, za narednih šest godina, bude u operativnoj upotrebi, naravno u velikom broju od najmanje 6.000, posebno u neposrednim taktičkim i urbanim dejstvima. Za sada su u četi po dva takva borbeni robota. Nije razrađena opcija koliko bi



Izviđačka jedinica u čijoj pratnji je robotizovano vozilo tipa MULE

se u četi nalazilo četvoronožnih robota LS3, ali je najverovatnije da bi svako odeljenje ili borbena grupa bili podržani jednim ovakvim robotom.

Operativci u kopnenim snagama američke vojske u Iraku i Avganistanu smatraju da je robot MULE već sada spreman za borbenu upotrebu, jer je borbene testove prošao bez problema, usprkos nekompletnosti elektronske, optosenzorske i neke druge opreme. Svojom primenom on donosi značajne novine kojima se borbena dejstva kopnenih snaga, posebno na nivou osnovne borbene jedinice, čine efikasnijim. Zbog toga komandanti snaga u Iraku zanemaruju fine se kojima inženjeri, koji su stvarali tog robota, žele da završe i kompletiraju projekat. Međutim, inženjerima je veoma važno i to da finaliziraju komandno vozilo, kao i sve aspekte upravljanja robotom putem radio-veze, komandama glasom, pa i mimikom (pokretima ruku) vodiča. Interesantno je da su ti roboti veoma dobro prihvaćeni među američkim vojnicima u Iraku i Avganistanu.

Nikola Ostojić

Projekat „Gladijus“ – nemački sistem vojnika budućnosti

Početkom 2013. godine nemačko Ministarstvo odbrane dodelilo je kompaniji Rajnmetal Grupa (Rheinmetall Group) 84 miliona evra (112 miliona američkih dolara) za projektovanje i izradu elemenata sistema vojnika budućnosti „Gladijus“. Ovaj sistem najavljen je kao jedan od najnaprednijih sistema takve vrste, još od 2008. godine. U ugovoru je reč o isporuci 60 „Gladijus sistema vojnika budućnosti“ za nemačke Savezne odbrambene snage (Bundesver).³



„Gladijus“ predstavlja modularni sistem, koji sačinjava visokotehnološka zaštitna oprema vojnika (odeća i balistički pancir), naoružanje, podsistem za komunikaciju, navigaciju i umrežavanje, kao i odgovarajuća informatička oprema i programi koji će podržavati funkcionisanje svih elemenata sistema. Ovaj sistem namenjen je za dva kontingenata nemačkih trupa koje su angažovane u Avganistanu, u sastavu multinacionalnih snaga.

Sistem, čiji je početni originalni naziv bio „Vojnik budućnosti – poboljšani sistem“ (IdZ-ES - Infanterist der Zukunft-Erweitertes System), najnovijim nazivom asocira na oštricu mača (gladius latinski znači mač), a objedinjava najnovija svetska saznanja u oblasti projektovanja vojničke opreme i naoružanja sa napretkom moderne tehnologije, posebno u nemačkoj industriji. Ugovor najavljuje drugu fazu usavršavanja programa vojnika budućnosti i nosi skraćeni naziv IdZ2.

Naravno, pre nego što su potpisani ugovori o finansiranju i realizaciji projekta, najpre su definisani kriterijumi koje taj sistem mora da zadovolji. Prema njima, on treba da omogući vojniku punu slobodu kretanja, kako na bojištu, tako i u mirovnim i drugim operacijama ili pri pružanju (doturaju i obezbeđenju) humanitarne pomoći.

Naravno, pre nego što su potpisani ugovori o finansiranju i realizaciji projekta, najpre su definisani kriterijumi koje taj sistem mora da zadovolji. Prema njima, on treba da omogući vojniku punu slobodu kretanja, kako na bojištu, tako i u mirovnim i drugim operacijama ili pri pružanju (doturaju i obezbeđenju) humanitarne pomoći.

³ Izvor: Rheinmetall (Press release): Bundeswehr führt „Gladius“-Soldatenausstattung ein - Rheinmetall mit 60 weiteren Systemen im Wert von 84 MioEUR beauftragt, 08.02.2013

Pri tome treba da smanji rizik po ličnu opasnost vojnika. Draga njegova bitna karakteristika je smanjenje težine naoružanja i opreme, odnosno njihova minijaturizacija. Komunikaciona oprema mora da omogući neprekidnu vezu u odeljenju (deset vojnika i komandir) i vezu sa pretpostavljenim starešinom, kao i sa oklopnim vozilima pešadije koja su im na raspolaganju. Srce sistema treba da predstavlja računar, koji će kontrolisati radio-uređaj, napajanje kao i GPS modul. Pored toga, modularnost treba da obezbedi dalju nadogradnju sistema ili zamenivost komponenti.

Zaštitni prsluk, kao i druge komponente fizičke zaštite tela vojnika, moraju da obezbede otpornost na udar (blast), kao i na spoljnu visoku temperaturu (koja nastaje pri eksploziji), ventilaciju i smanjivanje vlažnosti delova tela koji se najviše znoje (pomoću izolacionih slojeva koji stabilizuju temperaturu organizma). Najveći deo kriterijuma odnosi se na pancir koji, pored zaštite, služi i za nošenje municije i druge opreme i uređaja.

Šlem treba da bude izrađen prema najnovijim standardima fizičke zaštite glave, da bude ergonomski prilagođen i lak za nošenje. Uz to, sastavni deo šlema su digitalni (i magnetni) kompas, slušalice, noćne naočare, jedan modul sa infracrvenim prijemnikom i ugrađen ekran za proširenu realnost. Vizir ekrana treba da pruži komandiru i vojnicima sveobuhvatnu sliku terena i raspored otkrivenih položaja neprijatelja, protivničke elektronske i druge opreme i naoružanja. Oprema, a posebno naoružanje vojnika, mora biti tako prilagođena da se, bez posebnih problema, na njega mogu postaviti termovizijske kamere, laserski nišani ili označivači cilja. Uz to, oprema mora da sadrži i detektor ozračavanje od osmatračke i nišanske opreme protivnika. Definisano je da sistem modularne promene opto-elektronskih dodataka i senzora uključuju jurišnu pušku G36, bacač granata AG36, puškomitraljez MP7, pušku G82 i laki mitraljez MG4.

Za komandovanje stareljini jedinice namenjen je ručni VHF radio i prenosivi računar za pripremu, odnosno kontrolu izvršavanja zadatka i primanje podataka u mreži komandovanja.



Sastavni delovi nemačkog sistema IdZ2 (vojnik budućnosti)

Bundesver je program definisao 2012. godine, a prvi komplet od trideset sistema, od ukupno 600 koliko je naručeno, treba se isporučiti sredinom 2013.

U svom teorijskom prilazu koncipiranju vojničke opreme vojnika u pešadijskim jedinicama (Nemci je nazivaju i laka pešadija), stručnjaci polaze od stava da kopnene snage imaju centralnu ulogu. Najobimniji deo kopnenih snaga je pešadija, koja će u savremenim ratovima imati odlučujuću ulogu u borbenim dejstvima. Zbog toga pešadija mora posedovati veliku mobilnost (pokretljivost), sposobnost kretanja po složenom i raznolikom terenu, ali i u urbanoj sredini.

Posebnu ulogu pešadija ima u tzv. asimetričnim dejstvima, odnosno u okršajima sa terorističkim snagama ili diverzantskim grupama. Podrazumeva se da se takvi zadaci mogu izvršavati i pod najekstremnijim vremenskim, odnosno klimatskim uslovima i okolnostima.

Upotreba pešadije predviđena je i uz pomoć i podršku vazduhoplovnih snaga (helikoptera, jedrilica, padobrana...), ostalih rodova i službi, a njihovo angažovanje u specijalnim operacijama zahteva i kompatibilnost opreme i naoružanja pešadinca sa opremom drugih rodova i vidova. Svemu tome najveći doprinos treba da daju napredne tehnologije, od kojih, kako kažu nemački vojni stručnjaci, zavisi efikasna upotrebljivost poboljšane opreme i naoružanja, opstanak (izdržljivost) jedinica i pojedinaca na bojištu, sposobnost komandovanja, pokretljivost i borbeni efikasnost. To je moguće ukoliko su vojnici pešadije naoružani odgovarajućim i provereno funkcionalnim naoružanjem i opremljeni sistemom za obaveštavanje o situaciji, kao pouzdanim načinom komunikacije. Naglašenu ulogu ima načelo modularnosti, koje omogućava dalje usavršavanje u skladu sa napretkom nauke, tehnike i tehnologije. Pored toga, vojni stručnjaci od inženjera i projekatara zahtevaju i razvijen autonomni sistem za samodektaciju kvarova i kontrolu opreme pod složenim radnim (borbenim, ratnim) uslovima. Tako stručnjaci nemačkog Ministarstva odbrane naglašavaju da modularni dizajn obezbeđuje fleksibilnost pešadijskih jedinica da se prilagode novim situacijama i okolnostima u borbenim dejstvima, ali i da omogući korišćenje i drugim oblastima oružanih snaga.

Jedan od bitnih elemenata celokupnog sistema nemačkog vojnika budućnosti jeste visoka pokretljivost, koju treba da obezbede oklopna vozila zaštićena (od oštećenja i uništenja) protivoklopnim sistemima (Luftverlustbares Fahrzeug). Ovako definisan celokupni sistem IdZ2 treba da poveća preživljavanje vojnika, uz poboljšan ubojni efekat naoružanja.⁴

Prethodni nemački programa, označen kao IdZ, obuhvatio je i testiranje savremene opreme u jedinicama Bundesvera 2002. godine na Kosmetu. U Prizrenu je tada bio raspoređen jedan bataljon u kojem je proveravana, u to vreme nova oprema i naoružanje, u saradnji sa Pešadijskom školom Hamelburgu. Ta verzija opreme i naoružanja korišćena je i u nemačkoj jedinici angažovanoj 2003. godine u Avganistanu, u okviru savezničkih snaga. Međutim, desetogodišnje iskustvo, kao i nova saznanja i tehnologije dostupne u vojnoj industriji, doprinele su spoznaji da postojeći sistem naoružanja i vojne opreme mogu znatno da se unaprede i postanu efikasniji, a da zadovolje nove savremene kriterijume.

I druge armije razvijaju svoje sisteme za vojnike budućnosti. U Velikoj Britaniji to je program FIST - Future Infantry Soldier Technology (tehnologija pešadinca budućnosti), američki projekat ima naziv Land Warrior - Integrated Modular Fig-

⁴ Defense Industry Daily: Infantry-21: Germany's IdZ-ES, Mar 02, 2011.

hting System (vojnici kopnenih snaga – integrirani modularni borbeni sistem), kod francuza je nazvan FELIN (Fantassin à Équipements et Liaisons Intégrés – francuski budući vojnički sistem za pešadinca), Austrija, Francuska, Nemačka, Finska, Portugal, Španija i Švedska rade na zajedničkom programu CEDS (The programme *Combat Equipment for Dismounted Soldier – program zamenjive borbene opreme vojnika*), Švedska, pored toga, razvija i projekat MARKUS: Serving the Three Block War (oprema za treći svetski rat). U Kini postoji program za specijalne snage i za kopnenu vojsku (Futuristic Soldier of Chinese Special Operations Force – vojnici budućnosti kineskih specijalnih snaga) u koji je uloženo tri milijarde dolara. Rusija je krajem prošle godine testirala svoj projekat oprema za vojnika budućnosti „Ratnik“ (Russian Armed Forces high-tech equipment for future soldiers – visokotehnološka oprema vojnika budućnosti ruskih oružanih snaga).

Poznati su još i programi drugih zemalja: 21st Century soldier (Češka), Advanced Combat Man System (Singapur), African Warrior (Južna Afrika), COBRA COmbatente BRAsileiro (Brazil), Combatiente Futuro - COMFUT (Španija), F-INSAS (Indija), IMESS (Švicarska), Individual Fighting System (Rumunija), Integrated Soldier System Project (Kanada), Land 125 (Australija), NORMANS (Norveška), Projekt TYTAN (Poljska), Soldado do Futuro (Portugal), Soldato Futuro (Italija), Soldier Modernisation Program - SMP (Holandija), TEKER Modernization (Turska), FUTURE soldier Program Ambitions (Pakistan)...

Još u vreme JNA, kasnije oružanih snaga SCG, u našoj vojsci projektovan je sličan sistem modernizacije vojnika – znatno usavršenije naoružanje (puška M21, novo snajpersko oružje, bacač granata), oprema, odeća i obuća, sredstva veze i druge vojničke komponente. Prema listi prioriteta definisanoj u nacrtu Strateškog pregleda odbrane za period od 2010. godine bilo je predviđeno da se usavrše komandno-informacioni sistemi taktičkog nivoa za KoV i nove vrste naoružanja sa vođenim projektilima visoke preciznosti (protivoklopni sistem bumbar). Planirana je i nabavka elektronskih sistema za izviđanje, prikupljanje, obradu i distribuciju obavешtajnih podataka, individualna zaštitna sredstva i razna sredstva za specijalne jedinice. U Vojsci Srbije Uprava za planiranje i razvoj (J-5) u Generalštabu Vojске Srbije⁵ izrađuje predlog srednjoročnog plana opremanja, s težištem na nabavci složenih borbenih sistema, kojima se postiže pravovremeni razvoj operativnih i funkcionalnih sposobnosti.

Nikola Ostojić

Odeća za zaštitu od osmatračkih uređaja bespilotnih letelica

Neuobičajeno je da modni kreator izradi, a zatim javno predstavi seriju odeće koja bi trebalo da zaštiti ljude od osmatračkih uređaja i senzora na bespilotnim letelicama. Adam Harvi, koji živi i radi u Njujorku, predstavio je seriju odeće za koju se tvrdi da predstavlja „ogrtač nevidljivosti“ za ljude koji žele da izbegnu radoznale oči kojima bespilotne letelice pretražuju teren ili identifikuju određene osobe. Ova odeća prikazana je na sajmu mode, kao posebna kolekcija u Londonu (Velika Britanija) koja je trajala od 4. do 31. januara 2013. godine, pod motom „Nosite stelt kapuljaču“.

⁵ Intervju načelnika Uprave za planiranje i razvoj VS, „Odbrana“ 15. 9. 2012.



Informacija je zanimljiva sa više aspekata. Ideja nije samo plod mašte, već se propagandna kampanja za prodaju ovakve odeće zasniva na više činjenica.

Još juna 2011. godine objavljena je nova Američka protivteroristička strategija, zasnovana na „laserski preciznim udarima po terorističkim liderima” pomoću nove i sve više korišćene tehnologije naoružanih bespilotnih letelica – dronova. Takve letelice navode se na ciljeve iz posebnih operativnih centara na periferiji Vašingtona ili sa drugih lokacija pogodnih za nesmetano kontrolisanje leta ubistvenog drona. Među brojnim akcijama tih letelica, navođenom raketom iz jednog drona okončan je talibanski prepad na kabulski hotel „Interkontinental” (maj 2011), pri čemu je likvidirana druga ličnost u komandnoj hijerarhiji „Hakani mreže”, zajedno sa nekoliko terorista. Akcija je izvedena na avganistanskoj strani pograničnog područja. Slučajnom ili nekom drugom podudarnošću, u isto vreme, nekoliko hiljada kilometara južnije, u Somaliji, drugi dron je za metu imao dvojicu lidera lokalne filijale Al Kaide. Somalija je tako, pored Avganistana, Pakistana, Libije, Iraka i Jemena, postala šesta zemlja u kojoj SAD koriste robote –letelice za uklanjanje terorističkih vođa.

Naoružani predatori

Tokom 2012. godine objavljen je i podatak da je lider Al Kaide, Osama Bin Laden, otkriven kada je CIA analizirala obaveštajne podatke o njegovim mogućim skrovištima u Pakistanu, koristeći jedan od njenih novih stela dronova, RK-170 „Sentinel”, kojima se upravljalo iz baze u Kandaharu.

Iz brojnih svakodnevnih vesti o korišćenju dronova za likvidaciju nepoželjnih osoba, pretežno čelnika terorističkih organizacija, analitičari su izradili statistiku njihove upotrebe u nekoliko proteklih godina. Tako je zabeleženo da je od juna 2010. godine do prve polovine 2011. godine u Pakistanu izvedeno 84 napada letelicom „Predator”. Procenjuje se da su američki obaveštajni organi samo u Pakistanu, od 2006. godine, likvidirali, na ovaj način, približno 2.000 osumnjičenih terorista i talibanskih pobunjenika (ali i veliki broj civila). Ubijeno je bar dve trećine visokih komandanta Al Kaide. Do početka 2013. godine akcijama dronova likvidirano je 3.000 do 4.500 ljudi u Pakistanu, Avganistanu, Iraku, Somaliji i Jemenu.

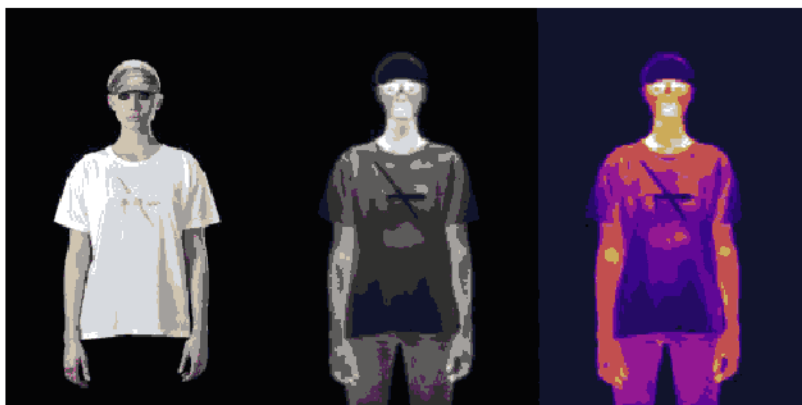
Pored američkih specijalnih snaga, različite vrste bespilotnih letelica, sa sofisticiranom osmatračkom opremom, poseduju mnoge druge države, među kojima su Rusija, Kina, Izrael... Na vazduhoplovnoj izložbi u Kini 2012. godine, kao dostignuće vlastite vojne industrije prikazan je model naoružane bespilotne letelice na mlazni pogon. Ona nosi oznaku WJ-600, a uz nju je prikazano i desetak drugih modela dronova – aviona robota.

Ovi, kao i drugi podaci, govore da bespilotne letelice često krstare nebom radi nadzora i osmatranja određenih teritorija, dok se naoružani dronovi sve više koriste za tzv. protivterorističke i druge akcije značajne za nacionalnu bezbednost.

Kako tvrdi Harvi, njegovi ogrtači, naočare, kese za mobilni telefon i dr. smanjuju efikasnost osmatračkih uređaja i senzora na bespilotnim letelicama. Naravno, ova odeća je odmah ponuđena za reklamnu prodaju. Šta su njene osnovne karakteristike? Najpre, ona blokira signal mobilnog telefona ako se uređaj nalazi u posebnoj kesi. To, dakle, ne obezbeđuje samo privatnost vlasnika mobilnog telefona, već i onemogućuje senzore da ga lociraju i da se telefon koristi kao izvor signala za navođenje naoružane bespilotne letelice. U kompletu su kapuljače, marame koje blokiraju termalni odraz lica, odnosno burke, koje se nose u arapskim zemljama. Tu je i XX-košulja, koja blokira rendgensko zračenje, sa posebnim džepom na odeći za nošenje mobilnog telefona, koji potpuno blokira telefonski signal.

Savremena maskirna odeća

Treba imati u vidu da u svim vojskama sveta postoji maskirna odeća, koja uz nekoliko senzora i detektora, ima više funkcija. Najpre spečava termalni odraz vojnika koji je nosi i umanjuje mogućnost korišćenja kamera i nišanskih uređaja sa infracrvenim sistemom. Senzori i detektori na odeći predstavljaju sistem za upozoravanje o približavanju protivnika, kao i o pravcu ispaljivanja snajperskih metaka, o izloženosti ozračivanju pomoću laserskog označivača ili nišana. Takvi senzori mogu biti višenamenski, odnosno modularni i sve su manjih dimenzija, tako da se jednostavno uklope u neki deo odeće, od šlema do prsluka ili obuće. Postoje i cerade za maskiranje vozila koje, pored toga što omogućavaju stapanje boje vozila s okolinom, smanjuju i termalni odraz.



Jedan od novijih sistema za termičku zaštitu vojnika na bojištu je Blučerov „duh sistem“ za višespektralno maskiranje vojnika i vozila (Blučer je nemačka firma koja proizvodi vojnu odeću – Blucher Systems GmbH, Nettetal, Germany). Ta odeća pruža antitermalnu zaštitu, odnosno ometa detekciju vojnika optoelektronskim uređajima (termo i IC kamera), a predstavljena je 19. aprila 2011. godine na izložbi vojne opreme. Materijal, nazvan spektralno platno (spectralflag), koristi metalizirana vlakna koja menjaju vidljivi odraz vojnika koji ga nosi, „pretvarajući ga u duha“, koji se jedva nazire na ekranima ovih uređaja. Ovaj materijal može da se ugrađuje i u cerade za vojna vozila, od njega mogu da se izrađuju maskime mreže, kao i delovi vojničke odeće ili plašt (sličan kabanici, odnosno pelerini). Predviđen je za odeću u pešadiji, gde smanjuje toplotni odraz u ultraljubičastom, toplotnom i infracrvenom spektru. Od njega se prave delovi odeće za sve rodove i službe koje svoje zadatke izvode na terenu, gde njihove pokrete mogu zabeležiti i senzori na bespilotnim letelicama.

Ovu tkaninu predstavila je Odbrambena revija (DefenseReview) u svom aprilskom broju 2011. godine. Masa tkanine je 55 g/m², a predstavljene su jakne i pantalone, navlake za šlem i obuću, za zaštitu ličnog ili kolektivnog naoružanja, agregata i drugih uređaja sa jačim termalnim odrazom. Zaštitne mreže od ovog materijala su dvodimenzionalne, obojene i sprečavaju termalni odraz. Predstavljena je i protivtermalna „šminka“ (pasta za ruke i lice). Ova odeća predviđena je za specijalne snage, snajperiste, izviđače i osmatračke, kao i za druge sastave čije prisustvo na bojištu treba sakriti od brojnih senzora i detektora.

Naravno, to je samo jedna od brojnih oprema na kojima rade stručnjaci za maskiranje u vojnoistraživačkim centrima. Tkaninu nazvanu blučer saratoga koriste američki vojnici u Avganistanu, vojnici nemačkog Bundesvera u mirovnim i drugim misijama, a sastavni je deo programa „pešadinac budućnosti“. U američkim laboratorijama, još od 2000. godine, razvija se RTO-TM-SCI-096 – višespektralni maskirni vojnički sistem (Multispectral Camouflage for the Soldier System), namenjen kako kanadskim, britanskim, australijanskim oružanim snagama i policiji, tako i drugim članicama NATO-a. Belgijski stručnjaci istražuju i razvijaju tkaninu sejnteks (SEYNTEX NV) koja bi imala i balistička svojstva itd.

Nikola Ostojić

Ruske padobranske jedinice naoružavaju se jurišnim robotom MRK-27 BT

Početkom januara 2013. godine iz komande Vazduhoplovnih snaga Rusije stiglo je obaveštenje da se padobranske jedinice naoružavaju višenamenskim jurišnim robotima MRK-27 BT. (Многофункциональный робототехнический комплекс МРК-27 БТ - Боевая точка). Ista robotska platforma uvedena je i u rusku momaricu decembra 2012. godine, a testirani su u Centru za vanredne situacije „Lider“. Ovakav tip robota pogodan je za spuštanje iz aviona i helikoptera, što mu je, pored borbenih i manevarskih sposobnosti, preimućstvo nad drugim tipovima takvih borbenih mašina.

Inače, prve informacije o ovim robotima pojavile su se u novembru 2009. godine, kada je prototip prikazan na sajmu naoružanja u Moskvi (Interpolitex-2009 arms exhibition). Kasnije, u okviru rasprava o osavremenjavanju ruske vojske robotizovanim i informatički naprednim sistemima, MRK-27 BT je spominjan kako najperspektivnije robotizovano borbeno sredstvo. Ovaj „robotski vojnik“

razvijen je u Laboratoriji za primenjenu robotiku Bauman, na Moskovskom državnom tehničkom univerzitetu. Platformu i upravljačke sisteme razradili su inženjeri i stručnjaci za robotiku u Istraživačkom institutu za tehniku, robotiku i kibernetiku (RTC) u Petersburgu. Sisteme naoružanja na robotu osmislili su vojni stručnjaci Akademije ruskih oružanih snaga, na Katedri za oružane sisteme u Omsku. Robot poseduje savremene kontrolne sisteme, autonomni sistem za programiranje funkcija i mogućnost da ponese više vrsta naoružanja i drugu borbenu i neborbenu opremu. Pokreće ga električni motor. Namena ovakvog, naoružanog sistema je višestruka. Naime, pored sposobnosti da precizno dejstvuje po protivničkim snajperistima i mitraljeskim gnezdim, predviđena je i upotreba protiv naoružanih terorista.



Višenamenski robotizovani sistem MRK-27 BT

Za postavljanje platforme sa sistemom naoružanja korišćen je princip modularnosti, što znači da se za različite borbene zadatke na platformu mogu postaviti brojni borbeni sistemi ili oružja. Ovaj robot može istovremeno da dejstvuje iz tri različita oružja, odnosno da se koristi u protivpešadijskim dejstvima, za uništenje bunkera ili utvrđenih vatrenih tačaka ili u borbi protiv tenkova i oklopljenih borbenih vozila. Kaže se da je koncipiran za borbu umesto vojnika, u situacijama

kada su ugroženi njihovi životi, pa je nazvan „robotski vojnik“. Tvrdi se da je varena snaga robota MRK-27 BT uporediva sa borbenim sposobnostima lakog tenka. Može da bude naoružan sa dva bacača plamena „šmelj“, dva raketna bacača granata RShG-2 (rocket-propelled grenade), mitraljezom „pečeneg“ i 6 bacača sa po 100 patrona dimnih bombi. Oružje ne treba da se podešava prema robotu, pošto postoji unificirano postolje, na koje se svako oružje može lako postaviti. Postolje se može okretati više od 100 stepeni i pokretati po visini oko 45 stepeni.



Sistem naoružanja na unificiranom postolju

Kontrola i upravljanje robotom obavlja se pomoću nekoliko džojstika, na taktičkoj udaljenosti od 200-500 metara (može se naći i podatak da se njime upravlja i sa udaljenosti od jednog kilometra). Manevarske sposobnosti, kao i težište ovog robota, veoma su dobro izbalansirani i može da se kreće u različitim pravcima i po neravnom zemljištu. Vozilo je uspešno savladivalo snežne i močvarne površine i precizno dejstvovalo iz raznih pozicija, pošto ima stabilizator poput oruđa na tenkovima. Procenjuje se da će se korišćenjem ovog robota u jedinicama ostvariti ušteda od 75 milijardi rubalja (2,4 milijarde dolara) u periodu 2012-2014. godina.

Mogućnosti ovog robota javno su predstavljene krajem 2012. godine u Centru za spasavanje u visokorizičnim situacijama „Lider“ (Центр „Лидер“ МЧС). Rečeno je i to da gusenice mogu da izdrže eksploziju mine od 800 g. Iako u njega nije instaliran GPS sistem, daljim usavršavanjem ovaj robot će dobiti i mnoge druge savremene elektronske i optoelektronske uređaje.

Pored borbene opreme, tokom demonstracije mogućnosti ovog robota, na njega su postavljeni i sistemi za gašenje požara Jel-10, Jel-4, a robot sa sistemom LUF-60 već je korišćen za gašenje požara u jednom skladištu municije, zbog čega je dobio i nadimak „mobilni vatrogasac“. Pretpostavlja se da će prva borbena provera verovatno biti izvedena u Čečeniji, za razminiranje minskih polja. U toku je i razrada taktike upotrebe ovakvih robota u borbi, na Akademiji vojnih nauka.

Ratna mornarica Rusije zainteresovana je za robotsko vozilo domaće proizvodnje, na osnovu ove platforme, s obzirom na to da koristi samostalnu podvodna vozila „Gavia“, proizvedena u islandskoj kompaniji Hafmind. „Gavia“ izgleda kao konvencionalni torpedo, a koristi se za otkrivanje i uništavanje podvodnih mina, kao i za podmorsko osmatranje i patroliranje oko ratnih brodova. Modifikovan za podvodnu upotrebu, ovaj robot bi mogao da ima i više funkcija od robota koji se sada koristi.

Inače, u ruskom vojnom vrhu razmišlja se o stvaranju Fonda za usavršena istraživanja (FPI), koji bi bio organizovan kao američka agencija DARPA, gde bi se nastavilo sa razvojem sličnih borbenih robotskih sistema. Angažovan je i Roskosmos, gde su, inače, razvijali robote za kosmičke programe. Ministarstvo od-

brane razmatra i nabavku civilne robotske opreme, kao što su specijalna vozila za savlađivanje snega i močvara.

Strani vojni komentatori upoređuju ovog ruskog borbenog robota sa američkim sistemom SWORDS (Special Weapons Observation Remote Direct-Action System), kako po mobilnosti, tako i po naoružanju. Inače, robot SWORDS američke vojne snage koriste u Iraku od 2007, a u Avganistanu od 2008. godine

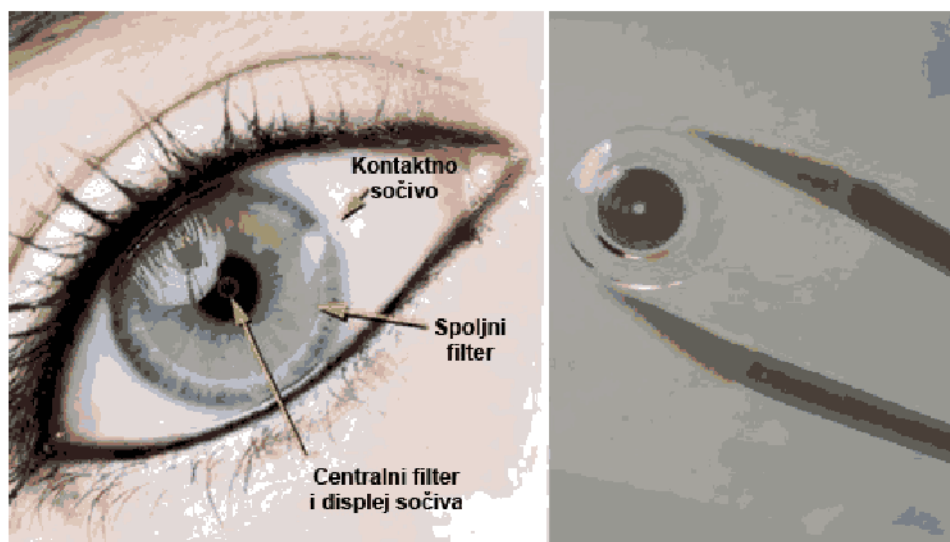
Nikola Ostojić

Očno sočivo umesto naglavnog displeja za proširenu stvarnost

Još sredinom 2012. godine firma Inovega (Inovega Optiks co. Seattle, Wa) prvi put je predstavila očno sočivo sa dvostrukim fokusom (IOptik displej sistem). Ono omogućava da korisnik, istovremeno, gleda udaljene ili bliže predmete, bez menjanja naočara ili sočiva, što je ljudima koji koriste dvoje ili više naočara (jedne za čitanje i potpisivanje, a druge za gledanje TV i vožnju automobila) komplikovano.

Ideja dvostrukog fokusa omogućila je stručnjacima da tu sposobnost iskoriste za izradu sočiva koje može da se koristi kao sistem za korišćenje podataka u proširenoj stvarnosti, odnosno da istovremeno vidi i okolinu i podatke (sinhronizirane sa slikom) koji se odnose na objekte obuhvaćene slikom. Kao što je poznato, sistem proširene stvarnosti koristi kameru (ili više njih), a slika se uparuje (sinhronizira) sa podacima koji se emituju preko informatičke mreže. To omogućava da se mogu koristiti preko računara, mobilnog telefona ili naglavnog displeja.

Stručnjaci koji su razvili ovo sočivo kažu da je korisnikov vid usmeren na dva nivoa (p)osmatranja okoline, u isto vreme. Više mu neće biti potreban poseban monokular, vizir ili naočare za proširenu stvarnost.



Rešenje u sočivu sa dva fokusa doprinelo je da se smanji veličina uređaja sa sistemom virtuelne realnosti (konkretnije proširene stvarnosti) i da slika bude mnogo bliža oku

U razvoju projekta koriste se najnovija dostignuća u oblasti nanokompjuteru i nanostakla. Jedan od prethodnih programa kompanije Inovega, takođe razvijan u saradnji sa američkom agencijom za usavršena vojna istraživanja DARPA od 2011. godine, sastojao se od veoma malog monokularnog ekrana koji se nosio u visini jednog oka (ultra Small Form-factor Head-Up Display - HUD). Na HUD-u su se prikazivali i podaci emitovani u sistemu proširene stvarnosti, sinhronizovani sa slikom. Uređaj je razvijen u okviru projekta „Vojnički kompjuterski kontrolisan fotouređaj za prikaz slike” (DARPA's Soldier Centric Imaging via Computational Cameras - SCENICC)⁶. Naglavni displej omogućavao je superpoziciju predstavljene slike (povećavanje i izoštravanje detalja).

Zatim su stručnjaci došli na ideju da naglavni displej HUD koriste zajedno sa modifikovanim kontaktnim sočivom. Pokazalo se da ovakva modifikacija ima određene prednosti. Testiranje sistema izvedeno je na opremi pilota lovačkog aviona, gde se proširena stvarnost koristi i za nišanje na protivničke letelice. Uređaj im je omogućavao da, gledajući u naglavni displej, piloti imaju pregled upravljačke i nišanske konzole, a da ne spuštaju pogled na instrumente ispred sebe. Međutim, pokazalo se da je uređaj glomazan i da nije pogodan za korišćenje u vazduhoplovnoj borbi ili pri dejstvu po ciljevima na zemlji.

Ipak, istražujući dalje, uz pomoć savremene tehnologije novih materijala, kroz program SCENICC, dobijen je dovoljno mali, lagan i dovoljno kvalitetan višenamenski uređaj, koji omogućava vojniku da osmatra prostor i beleži sliku, ostvaruje nadzor nad terenom ispred sebe i uočava promene koje se dešavaju na bojištu. Naravno, vojni stručnjaci su odmah saopštili da to povećava vojničku snalažljivost, sigurnost i preživljavanje na bojištu.



Kratkovidnost pogađa oko 30% ljudi u Evropi i SAD, te čak 80% ljudi u Aziji. Rešenje je i kontaktno sočivo

⁶ Broad Agency Announcement: Soldier Centric Imaging via Computational Cameras (SCENICC), Defense Sciences Office (DSO) DARPA-BAA-11-26, December 22, 2010

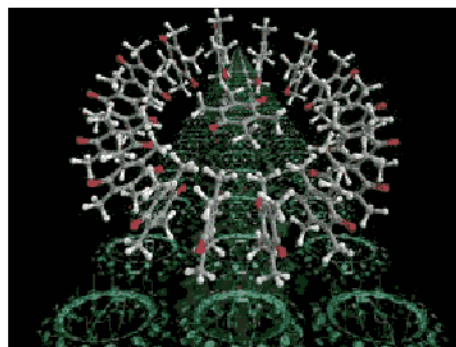
Međutim, najnovije rešenje u sočivu sa dva fokusa doprinelo je da se smanji veličina šlemova (ili naočara) koji su se koristili sistemom virtuelne realnosti (konkretnije – proširene stvarnosti) i da slika bude mnogo bliža oku. Ugrađene optičke mikrokomponeute unutar kontaktnog sočiva skreću svetlost koju emituje HUD ka sredini zenice, dok se svetlost iz okruženja šalje ka obodu sočiva. Mrežnjača registruje obe slike istovremeno i u fokusu.

Pored toga, stručnjaci IOptics su u ram sočiva ugradili minijaturne projektore na obe strane. Ovi projektori rade nezavisno, odnosno mogu se lako koristiti da, pored prikazivanja podataka u oblaku proširene realnosti, projektuju i 3D video snimak. Najnovija rešenja predstavljena su na sajmu CES 2013 (The Consumer Electronics Show) u Las Vegasu, SAD, pod nazivom „providni noseći displej” (Wearable Transparent HUD).

Međutim, time proces razvoja još nije u potpunosti završen. Proizvodnja naočara i sočiva sa dva fokusa nastaviće se, a procenjuje se da će projekat biti završen krajem 2014. godine. Klinička ispitivanja obavljaju se pod nadzorom američke Agencije za ishranu i lekove (Food and Drug Administration), a dostupni podaci ukazuju da je proces odobravanja za korišćenje već u toku. Interes postoji, a procenjuje se da će ovu inovaciju, pored vojske, koristiti i industrija uređaja za kompjuterske igrice, turistički vodiči, pa i školski sistemi, instituti i istraživačke laboratorije u raznim oblastima. Velika prednost ovakve opreme predviđa se u medicini, naročito kod tehničara koji održavaju složene sisteme (avione, brodove, nuklearne i električne centrale i dr). Ovaj sistem, u svojoj perspektivi, omogućava i gledanje trodimenzionalnih filmova sa prevodom na odabrani jezik, komunikaciju preko sistema proširene stvarnosti, dostupnost uvida u sadržaje interneta, kao i mogućnost razmene podataka i slika.

Razvoj ovog tipa kontaktnih sočiva je podmakao i stručnjaci su omogućili da se na sočivu generiše realna slika okruženja. Međutim, kako napreduje nauka i razvoj informatičke tehnologije, elektronska kola će uskoro biti u stanju da ponude i mogućnost prikazivanja video-materijala u boji visoke definicije (HQ). Korišćenje ovakvih kontaktnih sočiva je veoma jednostavno, iako postoji razlika u fokusiranju slike sa sinhronizacijom teksta i simbola. Međutim, u toj oblasti će se koristiti najnovija iskustva video i filmske tehnike o mapiranju prostora. S druge strane, kontakt sočiva sa okom predstavlja dodatni rizični faktor zbog kojeg je neophodno izvršiti brojna klinička ispitivanja da bi se svi problemi otklonili. Zbog toga su istraživači oprezni kada je u pitanju sama primena, jer je taj deo finalizacije sočiva izuzetno bitan ukoliko bude dobio široku komercijalnu primenu.

S druge strane, početkom 2013. godine međunarodna grupa naučnika je, na uzorku od oko 45.000 ispitanika, identifikovala 24 gena povezana sa kratkovidnošću. Rezultati, objavljeni u naučnom časopisu *Prirodna genetika* (Nature Genetics), zasnovani su na analizi podataka prikupljenih



Kvartni nanoprocesor

za potrebe 32 prethodne studije. Oni ukazuju da će nova saznanja biti značajna kada se preporučuje korišćenje kontaktnog sočiva, pre svega da bi se unapredile metode prevencije i korekcije kratkovidnosti. Tu elektronsko dvofokalno sočivo može da odigra značajnu ulogu, posebno ukoliko stručnjaci budu uspeli i da reše problem automatskog prilagođavanja promenama koje nastaju u oku i u vezi sa vidom. Procenjuje se da kratkovidnost pogađa oko 30% ljudi u Evropi i SAD, a čak 80% ljudi u Aziji. Među identifikovanim genima su i oni koji utiču na signalne procese između mozga i oka, te na strukturu i razvoj oka. Neki od ovih gena povezani su i sa 10 puta većim izgledima za kratkovidnost.

To ukazuje da tehnološko rešenje, samo po sebi, ne može da utiče na biološki proces koji se događa kod ljudi. Da bi se izbegle kontraindikacije pri korišćenju ovakvih sočiva potreban je multidisciplinarni pristup koji, pre svega, zahteva da ergonomija i druge nauke (uključujući nanotehnologiju i razvoj novih materijala) kažu svoju reč o ovakvim proizvodima. Tu je i problem korišćenja nanokompjuteru u elektronskom kontaktnom sočivu sa dve fokusne daljine. S druge strane, primena ovakvog sočiva je jednostavnija nego ugradnja bioničkog oka, gde je potrebna mikrohiruska intervencija, koja je veoma složena i zahteva povezivanje elektronskih komponenti sa nervima u oku. U vojnim okolnostima veoma mali broj ljudi bi pristao da im se ugrade bioničke oči, dok one, kao provereni proizvod, ne postanu dostupne na tržištu bioničkih uređaja.

Na osnovu dostupnih informacija treba imati u vidu činjenicu da projekte zasnovane na razvoju tzv. kvantnog stakla ne sprovodi samo američka vojska pod nadzorom agencije DARPA. Pošto je reč o veoma komercijalnim tehnologijama, ove programe razvijaju i kompanija Apple, koja je 2012. godine predstavila prototip nazvan „nanokompjuter iLens“, tu je Guglov otvoreni program „Google staklo“ (*Google Glass Project*), a i Majcrosoft se uključuje u trku sa svojim prototipom nanostakla za korišćenje u konceptu izmenjene realnosti (*Microsoft Augmented Reality Glass*). Reč je o savitljivom staklu koje, uz nanokompjuter, može da zameni smartfon ili računar sa tastaturom. Svi ovi projekti nude mogućnost korišćenja izmenjene stvarnosti, uključujući i korišćenje podataka za globalno pozicioniranje, gledanje video materijala, kao i korišćenje umesto mobilnog telefona. Kvantna struktura ovog stakla omogućuje korišćenje molekularne elektronike i osobenosti kvantne fizike, s obzirom na to da se većina osnovnih procesa molekularne elektronike odvija u kvantnom domenu. Zbog toga, uskoro, možemo očekivati i snažan nanokompjuter ugrađen u kontaktno sočivo. Kako bi se njime komandovalo, postoje različite teorije – upravljanje električnim impulsima misli, glasom, pokretima oka ili na neki drugi način.

Za ilustraciju napretka razvoja nanokompjuteru može da posluži i podatak da je francuska kompanija Kalrai, sa sedištem u predgrađu Pariza (Orsai), krajem 2012. godine saopštila da je izradila MPPA 256 procesor u tehnologiji od 28 nanometara (nm), koji može da se ugradi u računare koji se koriste za obradu signala i grafike. Ovaj procesor može da se kombinuje za upravljanje informatičkim komponentama u kvantnom staklu. Pored američkih istraživača, ovu tehnologiju razvijaju i u Belgiji, na Institutu „Lomonosov“ u Moskvi, u Kini, kao i u drugim zemljama.

Nikola Ostojić

Zašto se gasi program Global Hawk Block 40⁷

Global Hawk je jednom bio omiljeno čedo američkog ratnog vazduhoplovstva, prva bespilotna letelica koja je bila namenjena za prikupljanje obaveštajnih podataka. Danas, nakon više od deset godina upotrebe u ratovima, vodeći ljudi vazduhoplovstva su na putu da ugase program *Northrop Grumman* letelice.

Vodeći zvaničnici vazdušnih snaga prećutno su se složili da verzija letelice *Block 40* bude žrtvovana u nastupajućoj budžetskoj godini.

Gašenje modela *Block 40*, koja se još nije pojavila u operativnoj verziji, predstavljalo bi najnoviji udarac firmi *Northrop Grumman*. Gašenje programa moraju odobriti čelnici vazdušnih snaga, Ministarstvo odbrane i na kraju Kongres.

Ovakva ocena verzije *Block 40* stiže samo godinu dana nakon što je verzija *Block 30* letelice takođe odbijena.



S obzirom na to da predlog vojnog budžeta stiže do Kongresa tek u martu ove godine, ima još vremena za agresivno lobiranje kompanije *Northrop* za spasavanje verzije *Block 30*. Ta verzija je bila projektovana za sakupljanje obaveštajnih informacija putem elektro-optičkih i infracrvenih uređaja za posmatranje, dok je sledeća verzija opremljena radarskim senzorom veličine 0,45 X 1,2 metra (*MPRTIP Multi-Platform Radar Technology Insertion Program*) koji je namenjen za praćenje pokretnih zemaljskih meta i prenošenje podataka vojnicima na bojištu u realnom vremenu.

Ove dve verzije letelica predstavljale su okosnicu potencijalne transformacije u okviru obaveštajne aktivnosti vazduhoplovnih snaga na velikim visinama koja se još od pedesetih godina prošlog veka, od pojave špijunskog aviona U 2, nalazila u rukama pilota.

Od letelice *Global Hawk* očekivalo se smanjenje troškova prikupljanja obaveštajnih podataka uz dva puta duže trajanje leta i, naravno, uz eliminaciju rizika za pilote.

⁷ Aviation Week & Space Technology February 25 to March 1 2013.

Program je dobio veliku finansijsku infuziju nakon terorističkih napada 11. septembra kada je vazduhoplovstvo velikom brzinom ubacivalo prve prototipove letelica u operativnu upotrebu nad Irakom i Avganistanom. *Global Hawk* je sakupljao podatke sa svih mogućih vrućih mesta, od Haitija nakon zemljotresa 2010 godine, Japana nakon zemljotresa 2011. godine, za vreme ustanka nazvanog „Arapsko proleće“ i na kraju je prikupljao podatke i za vreme sukoba u Maliju.

Nije moguće kriviti samo Pentagon za potencijalno gašenje projekta *Global Hawk Block 40*. Milijarde dolara koje su se slile u program iznedrile su nerealna očekivanja. Novi zahtevi uključivali su veću platformu i veći podvesni teret. U okviru toga razvijane su nove podvarijante letelice.

To je rezultiralo nerealnim očekivanjima da letelica može sve da radi i za račun svakoga, a sve to uz manje troškove nego U -2. Na kraju su razvojni troškovi, naročito tokom 2005. i 2011. godine prevazišli sva očekivanja.

Nisu samo budžetske restrikcije uticale na prizemljenje *Global Hawk*-a već su one primorale vazduhoplovne snage da naprave izbor. Nerealno je bilo očekivati da letelica može u potpunosti zameniti U -2. Odluka o tome da se ne izabere jači motor radi omogućavanja većeg kapaciteta nosivosti letelice bila je fatalan potez.

Ukoliko *Block 40* bude bio ugašen, to bi značilo povlačenje letelice iz upotrebe samo nekoliko meseci nakon što bi bila uvedena u operativnu upotrebu u Avganistanu. To bi uništilo program bez mogućnosti provere aparata u borbenim uslovima.

Program letelice *Global Hawk* i dalje se nalazi u fazi evaluacije. Evaluacija uključuje dve letelice opremljene aktivnim radarom sa elektronskim skeniranjem. Od njih se očekuju letovi dugog trajanja. Biće, takođe, testirani piloti letelice, operatori senzora i osoblje odgovorno za održavanje u operativnom okruženju.

Kompanija *Northrop Grumman* dugo je očekivala ovaj program i radi toga uložila velike napore radi prevazilaženja teškoća pri razvijanju, kalibriranju radarskog uređaja. Radarski uređaj je u međuvremenu izdržao 454,9 sati testiranja.

Prve evaluacije radarskog sistema nisu predviđene pre maja 2014. godine i uključice samo neke od planiranih načina rada, kao što su praćenje pokretnih zemaljskih ciljeva, prikupljanje radarskih slika i – ono što je jedinstveno radarskom sistemu – obavljanje oba načina rada istovremeno, bez prekida kontakta sa metom.

Egzotičniji načini rada, kao što je visoka rezolucija koja omogućava precizno merenje ciljeva odbačeni su za vreme razvoja programa, jer su smatrani previše ambicioznim za upotrebu u bliskoj budućnosti. Za ove načine rada sistema najranija mogućnost finansiranja ne može biti pre fiskalne 2016. godine.

Pentagon je, sa druge strane, već finansirao određene slične programe, kao što su *Joint Stars aircraft* i kompanija *Northrop Grumman*, koji je montiran na avion *Boeing 707*, ali se podaci prikupljeni ovim sistemom distribuiraju samo kopnenoj vojsci SAD, a ne i vazduhoplovnim snagama.

Northrop Grumman isporučio je osam od naručenih jedanaest letelica *Block 40*. Šesnaest letelica *Block 30* od planiranih 31 je isporučeno, a ostatak je planiran za 2014. godinu.

Kongres se opredelio za nastavak razvoja programa *Block 30* i tokom 2014. godine, uprkos predlogu vazduhoplovnih snaga. Letelice poleću sa mesta blizu *Al Dhafra AB* u Ujedinjenim arapskim emiratima i to od 2001. godine nakon terorističkih napada 11. septembra.

Ukoliko program *Block 40* bude ugašen, vazduhoplovne snage SAD imaće samo šest letelica *Block 20* od kojih je četiri opremljeno borbenim vazduhoplovnim komunikacionim čvorištem predviđenim za poboljšanje centralnog komunikacionog sistema.

U međuvremenu, dok traje rad NATO snaga na razvoju programa savezničkog zemaljskog nadzora u toku je i program američke mornarice za opremanje platforme *Global Hawk* sa sistemima za nadzor morskih površina.

Očekuje se da će NATO kupiti 5 do 8 letelica modela *Block 40* sa radar-skim sistemom RTIP koji će imati i dodatne modove rada sa sintetičkim radarom. Postoji mogućnost da osam aparata vazduhoplovnih snaga bude prebačeno u NATO arsenal ukoliko dođe do gašenja sistema *Block 40*.

Nemačka je nabavila jednu letelicu *Global Hawk* radi dobavljanja domaćih obaveštajnih podataka. Ministarstvo odbrane Nemačke moglo bi da kupi još četiri takve letelice.

Dragan Vučković

*Veoma brze letelice sa vertikalnim poletanjem i sletanjem*⁸

U vezi svog programa VTOL – X (*Vertical taking off and landing* – vertikalno poletanje i sletanje) DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency* – Agencija za napredne odbrambene istraživačke projekte) ne želi ponuđače koji će ponuditi slične stare koncepte koji kombinuju velike brzine aviona sa fiksnim krilima sa pokretljivošću helikoptera.

Dosadašnja iskustva u vezi sa VSTOL letelicama pokazuju da je do sada postojalo čak 45 različitih koncepata koji su na razne načine isprobani. Samo tri se mogu smatrati uspešnim – *Hawker Harrier*, *Zakovlev Zak-38* i *Bell Boeing V-22* (a četvrti je *Lockheed Martin F-35*, ali do njegove realizacije ima još mnogo vremena).

Program-menadžer programa VTOL-X *Ashish Bagai* tvrdi da bi rešenje moglo biti u „mudrijoj integraciji“ isprobanih koncepata.



⁸ Aviation Week & Space Technology February 25 to March 1 2013.

Bagai je pre stupanja u redove DARPA bio glavni inženjer u kompaniji *Sikorsky*, odgovoran za razvoj lopatica rotora na demonstratoru tehnologije *X2*. Demonstrator *X2*, kao i *S-97 Raider*, dobar su primer „mudrije“ integracije tehnologije koja je prvo primenjena na letelici *Sikorsky XH-59 Advanced Blade Concept Demonstrator*.

XH-59 je dostigao brzinu od 263 čvora, ali mu je bilo potrebno četiri motora i četiri ruke da bi leteo, a pritom se tresao kao kovački čekić. Demonstrator *X2* prestigao je 260 čvorova sa samo jednim motorom, jednim pilotom i vibracijama koje nisu veće od onih koje postiže helikopter *Black Hawk* pri brzini od 150 čvorova. Ovo je postignuto sinergističkom integracijom čvrstih rotora, propulsora, kompjuterizovanim komandama leta, aktivnom kontrolom vibracija i upotrebom drugih tehnologija.

Bagai vidi mogućnost integracije drugih koncepata koji su isprobani ranije, ali su odbačeni. Danas postoje mnoge tehnologije koje omogućuju upotrebu prethodno odbačenih ideja. Nove alatke za projektovanje i tehnologije podsistema predstavljaju veliki potencijal za novu hibridizaciju.

VTOL-X program usmeren je na izradu eksperimentalne letelice koja bi, poredeći se sa konvencionalnim helikopterom, bila sposobna da: leti brže (preko 300 čvorova), da lebdi efikasnije (75% ili još bolje), da krstari efikasnije (odnos dizanja/prevlačenja 10 ili bolji) i da nosi koristan teret od 40% svoje težine. Ova letelica imala bi masu od oko 4,5 tone, a veličinu sličnu veličini letelice *Sikorsky S-97 Raider*.

Koliko je sve to realno videće se pri poređenju sa svim propalim projektima. Naime, *Sikorsky X-wing* projekat ugašen je 1988. i to pre nego što je poleteo, *Boeing X-50 A Dragonfly* ugašen je 2006. nakon što se umanjeni model srušio, a nakon toga srušena su još dva dodatna umanjena modela. Takođe, i koncept *Goen Heliplane žiroplan* ugašen je 2008. godine.

Veruje se da će DARPA ovog puta imati više sreće.

Dragan Vučković

Iran otkriva nove protivvazduhoplovne sisteme⁹

Iranska vojska otkrila je nekoliko novih protivvazduhoplovnih sistema za vreme manevara „*Velayat 4*“ tokom perioda od 11. do 15. novembra.

Vežbe su održane na teritoriji koja pokriva skoro 950.000 km², a nalazi se u istočnom Iranu. Na vežbi su učestvovali jedinice iranske armije i islamske revolucionarne garde, dok je ratno vazduhoplovstvo bilo u ulozi napadača.

Novi sistemi identifikovani su kao *Ya Zahra 3 (YZ3)* – protivvazduhoplovni sistem za gađanje ciljeva raketama na malim visinama, *Ghader* – mobilni raketni sistem za dejstvovanje na ciljeve koji lete na srednjim visinama i raketni sistem *Shalamcheh*.

Raketni sistem *Ya Zahra* prvi put je prikazan 2002. godine i ličio je na kineski *FM-80* koji je inače potekao od francuskog sistema *Crotale*. Godine 2010. potvrđeno je da je Iran došao u posed sistema *FM-80* iako su iranski mediji tvrdili da je sistem modernizovan nakon što je pristigao iz Kine. Na fotografijama je bio prikazan sistem *FM-80* sa elektro-optičkim uređajima smeštenim odmah pored radarske antene.

Najnoviji *YZ3* vrlo je sličan kineskom *FM-80*, iako upotrebljava malo izmenjenu lansirnu platformu.

⁹ IHS Jane's Defence Weekly 28 November 2012.



Novi sistem *Ghader* ili *Qadar* je, u stvari, mobilna verzija sistema *Mersad* koja predstavlja kopiju američkog raketnog sistema HAWK koji je Iran kupio još sedamdesetih godina. Montiran na civilni kamion, *Ghader* koristi mali vučni transporter za postavljanje raketa na šine lansera. Radarski sistemi za podršku smešteni su na sličnom vozilu.

Iranski mediji izvestili su da je *Shalamcheh* modernizovana verzija rakete *Shahin* koju ispaljuje sistem *Mersad*. Ova raketa je uspešno presrela bespilotnu leteću metu *Karrar*.

Takođe, bilo je izveštaja da je testiran i modernizovani sistem S-200 (SA-5 *Gammon*) za presretanje ciljeva na velikim visinama. Snimak je pokazao lansiranje rakete i navodno uništavanje leteće mete.

Prikazan je i radar velikog dometa koji je svoju premijeru doživeo tokom vojne parade 2010. godine. Mediji su izvestili da se radi o sofisticiranom VHF radaru tipa 11.119 *Nebo-SVU* koji može otkrivati i nevidljive letelice.

Iran, takođe, radi na otkrivanju novih načina detekcije neprijateljskih aviona koji se ne oslanjaju na aktivni radar kojim odaju svoju lokaciju i koji se može ometati.

Potvrđeno je da je protivavionski sistem *Ghader* opremljen uređajima za elektro-optičko otkrivanje i presretanje ciljeva, kao i da su pridodata dva nova pasivna sistema za otkrivanje, *Sayyad 40* – mobilni sistem za presretanje komunikacija i *Rased 32* sa elektro-optičkim uređajima podignutim na jarbol.

Dragan Vučković

Kineski transportni avion Y-20 na svom prvom letu¹⁰

Strateški transportni avion Y-20 kompanije *X'ian Aircraft Corporation* (XAC) 26. januara je obavio svoj prvi let sa aerodroma *Zanliang* u blizini pogona XAC.

Let je trajao oko 40 minuta tokom kojih je avion napravio nekoliko krugova oko aerodroma. Slike i snimak ukazuju da se radi o avionu sa četiri turbo-ventilatorska motora sa jasnim uticajem ruskog, ukrajinskog i američkog dizajna.

¹⁰ IHS Jane's Defense Weekly 6 February 2013.



Poznato je da su ruski i ukrajinski inženjeri radili kao konsultanti u oblasti projektovanja, a njihov uticaj se vidi po spuštenoj i nagnutoj konfiguraciji prednjeg dela aviona, sličnog avionu An-70.

Američki uticaj najviše se primećuje po vertikalnim i horizontalnim stabilizatorima koji veoma liče na Boingov C-17 *Globalmaster III*. Moguće je da podaci o ovim delovima potiču od bivšeg inženjera Boinga Grega Čanga koji se nalazi u zatvoru zbog špijunaže još od 2010. godine.

Na jednom snimku kineske televizije vidi se uvijanje horizontalnog stabilizatora prilikom sletanja, što bi moglo značiti da je potrebno ojačati materijal na tom delu. Visoko postavljena krila odražavaju rusko iskustvo prilikom projektovanja aviona *Ilyshin Il-76 Candid*, što omogućava neometan pristup tovarnom prostoru. Za razliku od Boingovog C-17 flapsovi na krilima Y-20 su vrlo slični onima na ruskom Il-76, što je verovatno i uticalo na izbor motora *Soloviyov D-30KP* sa potiskom od 12 tona.

Kina je navodno kupila 239 D-30KP-2 turbo-ventilatorskih motora, od kojih će više od 100 biti upotrebljeno za proizvodnju 50 bombardera XAC H-6K, a ostatak za transportne avione Y-20. Međutim, postoje indicije da Kina razvija bajpas turbo-ventilatorske motore, kao što je WS-20 sa potiskom od 13 tona. Taj motor je prvi put prikazan na aero-mitingu *Zhuai* 2012. godine, a očekuje se da bi taj motor mogao postići potisak od svih 20 tona.

Ovakav razvoj motora znači da bi fabrike XAC mogle uskoro izbaciti mnogo efikasnije modele aviona Y-20.

Kineski izvori su 2007. godine objavili da bi Y-20 mogao da ponese i svih 60 tona, dok koristan teret modela snabdevenih motorima D-30KP iznosi oko 50 tona.

Dragan Vučković

Kompanija *Rheinmetall* izvršila je uspešnu probu visokoenergetskog lasera¹¹

U Švajcarskoj su, tokom novembra 2012. godine, na test-poligonu kompanije *Rheinmetall*, vršena testiranja sa visokoenergetskim laserom snage 50 kW. Testiranja su obuhvatila različite situacije. Dva lokacijski razdvojena oružna sistema ozračila su jednu metu koristeći tehnologiju *BSI Beam Superimposing Technology*. Radi se, pojednostavljeno rečeno, o susretanju/preklapanju dva laserska zraka sa dva različita mesta na jednoj meti.

Pedesetkilovatni demonstrator tehnologije sastojao se od dva funkcionalna elementa. Prvi je bila oružna stanica snage 30 kW, integrisana na kupolu protivavionskog topa *Oerlikon Revolver Gun*, umrežena sa kompjuterizovanim dnevno/noćnim sistemom za upravljanje vatrom *Oerlikon Skyguard* i druge oružne stanice snage 20 kW koja je bila integrisana u stariju kupolu protivavionskog topa prve generacije *Oerlikon*.

¹¹ IHS International Defence Review February 2013.

Za vreme testa čelični nosač debljine 15 mm presečen je na daljini od 1000 m, dok je nekoliko vazdušnih meta u poniranju oboreno na daljini od preko 2000 m dok su letele brzinom od preko 50 m/s.

Dolazeće mete detektovane su sistemom za upravljanje vatrom *Skyguard*, a zatim predate visokoenergetskom laseru od 30 kW koji je upotrebio podatke iz kompjutera za praćenje mete. Optički sistem za praćenje na jedinicama za formiranje snopa pojedinačnih laserskih oružanih modula izvršio je precizno zahvatanje bespilotne vazdušne mete onog trenutka kada je ušla u programirani sektor vatre, a zatim su laserski oružani moduli otvorili vatru i uništili letelicu.

Treća demonstracija sistema sastojala se u presretanju čelične lopte prečnika 82 mm koja je predstavljala minobacačku minu. Oružni sistemi presreli su metu koja je letela brzinom od oko 50 m/s i uništili je.

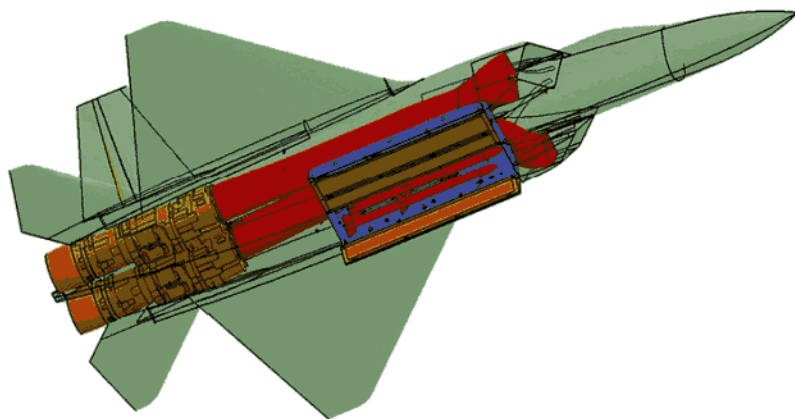
Kompanija *Rheinmetall* vidi visokoenergetski laser kao komplementarni sistem postojećem sistemu *Skyshield* 35 mm koji se nalazi u operativnoj upotrebi u nemačkom ratnom vazduhoplovstvu pod nazivom *Mantis*.

Kompanija, takođe, planira povećanje snage visokoenergetskih lasera i to dva puta u okviru istih gabariteta. Testiranja su, takođe, pokazala da sistem radi i u uslovima snežnih padavina, kiše, leda i jakog sunčevog osvetljenja.

Postoji mogućnost razvijanja visokoenergetskih lasera i za upotrebu na kopnu. Visokoenergetski laser od 1 kW integrisan je i testiran na starom lakooklopljenom vozilu TM-170 4X4. U budućnosti će biti moguće integrisati ovakav sistem i na druga oklopna vozila.

Dragan Vučković

Novi dizajn za indijski napredni srednji borbeni avion¹²



Indija je otkrila veoma tajni sa novog modernizovanog dizajna za svoj koncept lovca pete generacije nazvanog napredni srednji borbeni avion - *Advanced Medium Combat Aircraft (AMCA)*.

¹² Aviation week 11-15 march 2013.

Prezentacije lovca često su menjane tokom poslednjih nekoliko godina, ali ovaj model u srazmeri 1:8, koji je prikazan tokom poslednjeg aero-mitinga Aero India 2013. u gradu *Bengaluru* predstavlja finalnu konfiguraciju i onu na osnovu koje se program nastavlja.

Dvomotorni, nevidljivi, višenamenski lovac je prvi put otkriven tokom aero-mitinga Aero India 2009. u obliku metalne makete u vazdušnom tunelu. Tokom aeromitinga 2011. godine, novi oblik makete je podsećao na F-22.

Finalni dizajn ili bar onaj koji su konstruktori prikazali ove godine podseća na prototip naprednog taktičkog lovca kompanije *Lockheed* YF-22 iz 2001. godine koji je kasnije prerastao u F-22.

Konstrukcija AMCA je skupljena, sa simetričnim trapezoidnim krilima, upadljivo bez vodećih ekstenzija na napadnim delovima krila koji su nekada bili sastavni deo prethodnog modela. Letelica će imati unutrašnji prostor za oružje i sadržaćće domaće streljane tehnologije koje su u toku razvoja, uključujući boju za upijanje radarskog ozračenja i kompozitne materijale.

To je svakako u planu. Međutim, s obzirom na zaostajanje programa *Tejas Light Combat Aircraft* – lakog borbenog aviona (LCA), postoji opravdani skepticizam u indijskom vazduhoplovstvu u vezi sa ulaganjem sredstava u domaću platformu pete generacije, naročito onda kada će više od 10 milijardi dolara biti uloženo u program lovca *Hindustan Aeronautics (HAL) Sukhoi T-50*. Međutim, ova vrsta zabrinutosti nije stala na put ulaganju ogromnih resursa i finansiranja u AMCA program i u sastavljanje liste želja tehnologija za konstrukciju letelice koje ni u kom slučaju neće imati svoj prvi let pre početka sledeće deкаде.

Indijski oficiri vazduhoplovnih snaga kažu da će konstrukcija letelice biti identična onoj koju Rusi već koriste u probnim letovima. Oni insistiraju da će maksimum izmena u projektu HAL biti uvođenje nekoliko novih sistema koje Indija odabere i da će se projekat maksimalno osloniti na MKI, odnosno na dvosred *Su-30* koji Suhoj razvija za Indiju.

Oni insistiraju na tome da je za Indiju prevashodno važno da gleda unapred i da počne razvijati tehnologije i platforme, kao što je AMCA, radi prestanka kupovine aviona koje su drugi razvijali, a koji su na osnovu licence sklapani u Indiji.

Indijski naučnik u Direktoratu projekta AMCA rekao je da Indija već ima sposobnost proizvodnje četvrte generacije letelice, ali da tehnologije koje se razvijaju za AMCA predstavljaju sam vrh nauke. Po njemu to mora biti u potpunosti indijski program, jer nijedna država neće razmeniti nijednu od osetljivih tajnih tehnologija u vezi sa nevidljivošću.

Kratka lista ambicioznih tehnologija kojima se Indijska aeronautička agencija za razvoj nada da će opremiti AMCA uključuje i panoramski aktivno-matrični displej u kokpitu, trostruku *fly-by-wire* arhitekturu sa digitalnim kompjuterizovanim letačkim kontrolama povezanim optičkim kablovima i uvijenim usisnicima za vazduh radi umanjenja radarskog odraza.

U razvoju ovog aviona vrlo aktivno će učestvovati i indijski privatni sektor, a indijski zvaničnici su naveli da su i poznati proizvođači aviona kao što su *SAAB*, *Dassault* i *EADS* izrazili volju za konsultacijama sa agencijom ADA u vezi sa konceptom AMCA. Moguće je da se formalna selekcija mogućih stranih tehnologija obavi tokom ove godine.

Dragan Vučković

Odobrena proizvodnja serije novog E-2D Hawkeye¹³

Pentagon je odobrio proizvodnju novog aviona *Northrop Grumman E-2D Advanced Hawkeye*, namenjenog za rano upozoravanje i kontrolu vazdušnog prostora (*early warning and control AEW&C*).

Ova odluka je usledila nakon desetomesečnih testova i evaluacije koju je sprovedla američka mornarica. Do sada je kompanija *Northrop Grumman* isporučila 9 letelica E-2D američkoj mornarici, dok je još 11 spremno ili će biti uskoro spremno za testiranja.

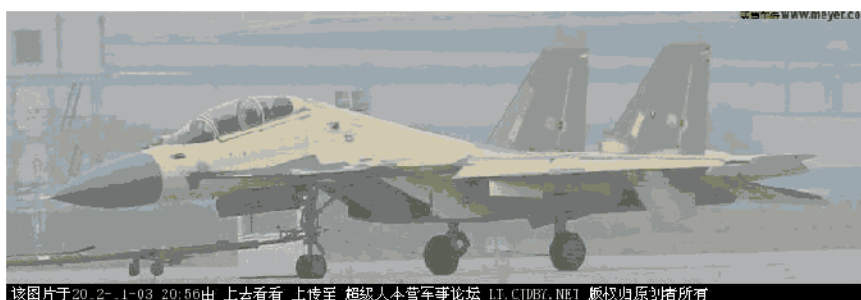
E-2D je najnovija verzija letelice za rano upozoravanje i kontrolu vazdušnog prostora koja se nalazi u službi američke mornarice još od šezdesetih godina. Modernizacija uključuje snažniji aktivni radar sa mehaničkim i elektronskim skeniranjem AN/APY 9 koji obezbeđuje pokrivanje ciljeva kao što su neprijateljski avioni i krstareći projektili u radijusu od 360 stepeni.



Francuska je u ovom trenutku zainteresovana za zamenu svojih letelica E-2C novim E-2D, a još nepotvrđeni izvori navode da i Japan ima sličan interes. Indija je, takođe, u fazi evaluacije aviona E-2D za potrebe svoje mornarice. Zvaničnici kompanije *Northrop Grumman* kažu da su proizvodne linije kompanije u mogućnosti da pokriju sva potraživanja.

Dragan Vučković

Probni let kineskog mornaričkog lovca dvoseda J-15¹⁴



Kompanija *Shenyang Aircraft Corporation (SAC)* testirala je dvosedu varijantu mornaričkog lovca J-15 po prvi put.

Letelica ima oznaku J-15S, s tim da je S skraćenica od kineske reči tandem, a takođe je poznata i kao „crna ajkula” ili „leteća ajkula”. Letelica će se pri-

¹³ IHS Jane's Defence Weekly 06 February 2013.

¹⁴ IHS Jane's Defence Weekly 11 November 2012.

družiti grupi jednosedih lovaca J-15, koji će zajedno učestvovati u obuci na nosaču *Liaoning*, prvog nosača aviona mornarice kineske oslobodilačke armije.

Još je nejasno da li će borbeni verzija J-15S biti priključena letачkoj grupi na kineskom nosaču aviona, ali je ovaj avion idealno sredstvo za operacije preciznih udara, za poslove ranog upozoravanja i kontrole ili protiv podmorničke borbe.

J-15S predstavlja već peti klon Suhojevih aviona koji se proizvodi u *Shenzang-u*. On se pridružio grupi koja je sastavljena od J-11B, J-11BS, J-15 i J-16. Svi imaju iste motore *Shenyang-Liming WS-10A Taihang*, što ukazuje na povećan stepen poverenja u ovaj program.

Odabir dvosede/tandem varijante za J-15S omogućuje kompaniji *Shenyang* da izjednači svoje investicije u dvosedu varijantu J-11BS, iako će biti potreban radikalni redizajn J-15 zbog planirane upotrebe na nosaču aviona.

Sa druge strane, Rusija, čije su letelice Su-27 i Su-33 predstavljale osnov za proizvodnju J-11 i J-15, odabrala je opciju dvoseda, u kojem piloti sede jedan pored drugog, a ne u tandem konfiguraciji, što je zahtevalo malo širu konstrukciju aviona pod nazivom Su-33KUB.

Dragan Vučković

Ruski koreni u kineskom Z-10¹⁵



Sergei Mikheyev, generalni projektant projektanskog biroa *Kamov*, otkrio je da je ruska helikopterska kompanija tajno projektovala osnove verzije kineskog borbenog helikoptera Z-10 tokom devedesetih godina.

¹⁵ Aviation week 11-15 march 2013.

Dvosedi helikopter imao je svoj prvi nastup u javnosti tokom aero-mitinga u gradu *Zhuai* 2012. godine u Kini, nakon intenzivnih testiranja koja je sproveda kineska oslobodilačka vojske tokom prethodnih nekoliko godina. Iako je helikopter spolja ličio na helikopter *AgustaWestland A 129 Mangusta*, što je izazvalo mnogo komentara, niko nije ni pomislio na *Kamov* sve do izjave *Mikheyv*-a prilikom konvencije *Heli-Expo*, održane 6. marta ove godine.

Komentarišući tokom informisanja o proizvodima *Kamova*, *Mikheyv* je rekao da je odluka o otkrivanju uloge ruske kompanije u projektovanju helikoptera Z-10 doneta nakon njegovog prikazivanja u Kini tokom prošle godine.

Kamov je radio na osnovnom dizajnu na zahtev Kine tokom 1995. godine. To je iz razumljivih razloga držano u tajnosti, ali je *Kamov* projektovao helikopter koji je Kina prihvatila. Osnovni dizajn helikoptera, interno nazvan „projekat 941“, prihvaćen je i dalje razvijan. Sve do danas verovalo se da je letelicu projektovala Kina i da je jedini uticaj sa strane predstavljala pogonska grupa.

Razvoj Z-10 bio je izrazito kontroverzan. Pet letelica je snabdeveno motorima *Pratt&Whitney Canada PT6C-67C* sa potpuno digitalizovanim kontrolama. Motore je razvila kompanija *Hamilton Sundstrand*. Nakon istrage koju su pokrenule federalne agencije, kompanija kćer *United Technologies Corp.* kažnjena je sa 75 miliona dolara zbog lažnih izjava u vezi sa ilegalnim izvozom vojnog softvera američkog porekla u Kinu.

Nakon dokaza izvedenih pred sudom ispostavilo se da je Kina kupila motore pod izgovorom da su joj potrebni za proizvodnju civilne transportne letelice. Od tada se pretpostavljalo da je proizvođač Z-10 *Changhe Aircraft Industries Corporation* morao da upotrebi slabiji lokalno proizvedeni motor za helikopter i to tako što će znatno smanjiti težinu letelice dok novi jači motor ne postane dostupan.

Kamov je inače poznatiji po svojim koaksijalnim projektima, kao što su transportni helikopter *Ka-32*, kao i borbeni helikopter *Ka-50/52*. Kompanija proizvodi i *Ka-62* transportni helikopter.

Mikheyv je poželeo uspeh helikopteru.

Dragan Vučković

Satcom na izraelskim F 15¹⁶

Izraelsko ratno vazduhoplovstvo opremilo je jedan (još uvek tajni) broj svojih lovaca F-15 *Eagle* satelitskim komunikacionim sistemom (*Satellite communications SATCOM*) radi održavanja komunikacija za vreme udarnih operacija po ciljevima na velikoj udaljenosti.

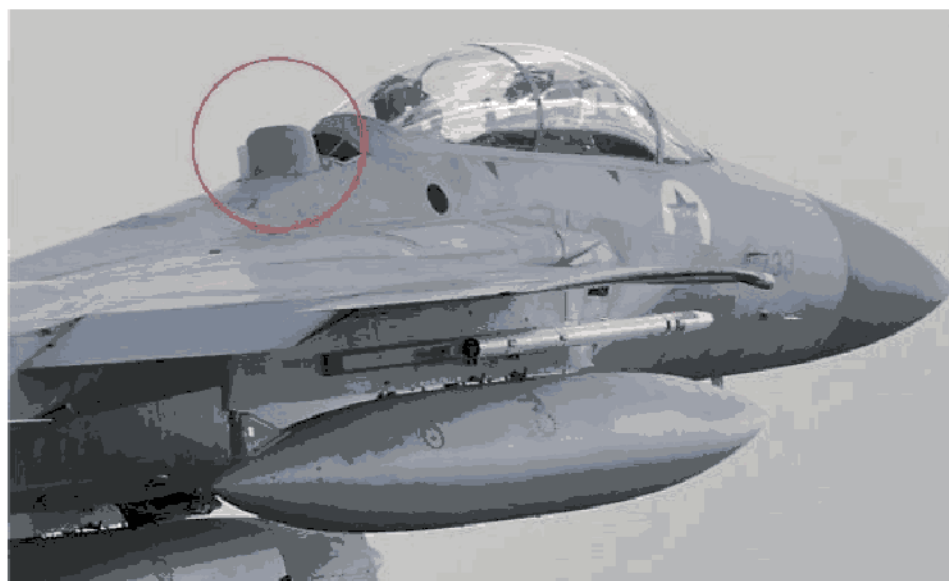
Fotografije su izrađene još 2010. godine, ali su tek nedavno objavljene. Na slikama se vide dvosedi lovci F-15D *Akef* i F-15I *Ra'am* opremljeni antenama SATCOM na zadnjem delu kokpita.

Ova antena mogla bi da pripada SATCOM jedinici EL/K-1891 namenjenoj za komunikaciju van horizonta. Ovaj sistem omogućava dvodirekcionalnu ko-

¹⁶ IHS Jane's Defence Weekly 28 November 2012.

munikaciju putem prenosa komprimovanih podataka na osnovu čega je moguća glasovna i video komunikacija između više aviona ili između aviona i zemaljskih stanica. Zvučna i video komunikacija odvija se u realnom vremenu, a prenos ide preko geostacionarnih komercijalnih satelita i omogućava neograničen dolet.

Tokom nedavnih godina flota izraelskih F-15D prošla je kroz proces modernizacije radi omogućavanja napada na zemaljske ciljeve, ali još nije potpuno jasno koja je uloga dodavanja SATCOM uređaja.



U tom kontekstu, tokom 2010. godine, u vremenu kada su fotografije snimljene, veruje se da su izraelski borbeni avioni učestvovali u napadima na ciljeve u Siriji i Sudanu. Iako izraelska vlada nije ni potvrdila ni demantovala učestvovanje izraelskih snaga u bilo kojem od napada, a kamoli pružila informaciju koji su tipovi aviona učestvovali u pomenutim akcijama, postoje indicije da su to bile letelice F-15, ali je pitanje da li su bili opremljeni SATCOM uređajima još uvek u domenu spekulacija.

Interesantnije je pitanje kako bi modernizovanje aviona pomenutim uređajem moglo uticati na izraelske planove o udarima protiv iranskih nuklearnih objekata. Izraelski avioni morali bi leteti oko 1.500 km radi dolaska do ciljeva u Iranu, daleko van dometa svih konvencionalnih načina prenošenja podataka putem radio-uređaja ili data linka.

Iako radio-uređaji visoke frekvencije teoretski mogu omogućiti komunikaciju na ovoj daljini, pouzdanost takve komunikacije zavisila bi od atmosferskih pojava i profila leta aviona. SATCOM uređaji mogu se koristiti u bilo kom delu sveta.

Dragan Vučković

Pripreme za opitovanje opsežnih modifikacija strategijskih bombardera B-1B¹⁷

Pripadnici 337. opitnog i evaluacionog skvadrona Ratnog vazduhoplovstva SAD (USAF 337th Test and Evaluation Squadron) koji je baziran u vazduhoplovnoj bazi Dajes, u saveznoj državi Teksas, započeli su pripreme za opitovanje modifikacija strategijskih bombardera B-1B *Lancer* u okviru programa modernizacije SB-16. Radi se o najvećem paketu modifikacija u operativnoj istoriji bombardera ovog tipa. Upravo zbog sveobuhvatnosti projekta, pripadnici 337. eskadrile prošli su i dodatne preobuke kako bi, pored opitovanja novih sistema, razvili i potrebne taktike koje bi omogućile da se postigne potpuna iskorišćenost nove opreme i softvera.

Modernizacijski paket SB-16 podrazumeva ugradnju potpuno integrisanog data-linka FIDL, centralnointegrisanog sistema provere i nadgradnju prikazivača vertikalne situacije (VSDU). Pored toga, na aparatima B-1B biće modernizovani i navigacijski sistemi, radar i dijagnostika.

VSDU podrazumeva da se u pilotskoj kabini sa četiri višenamenska prikazivača u boji zamene dosadašnja dva zastarela crnobela (monohromatska) prikazivača, čime bi se pilotu i kopilotu omogućilo lakše praćenje podataka. I zadnja kabina dobiće višefunkcionalne prikazivače u boji sa pokretnim mapama i intuitivnim simbolima, kao deo nove digitalne avionike u okviru FIDL-a, koji uključuje i dodavanje data-linka „Link 16” postojećem protokolu JREAP.



Paket CITS obuhvata zamenu postojećeg računara koji služi letačkom i zemaljskom vazduhoplovnotehničkom osoblju da neprekidno prati performanse letelice, otkriva i identifikuje anomalije na sistemima vazduhoplova.

¹⁷ www.airforcesdaily.com/2013/02/337th-test-gear-up-for-major-b-1b-modification/ posećeno: 3. 2. 2013.

Pomenute modifikacije samo su deo jednog šireg plana poznatog kao *Integrated Battle Station*, koji će biti realizovan do 2019. godine. Modernizacija treba da omogući posadama bombardera B-1 da lakše prate situaciju oko sebe, da za razmenu podataka koriste brže i bezbednije digitalne data-linkove, te da povećaju efikasnost zahvaljujući mnogo pouzdanijem kokpitu.

Planirano je da razvojna opitovanja paketa SB-16 otpočnu u aprilu ove godine u vazduhoplovnoj bazi Edwards, u saveznoj državi Kalifornija, dok bi prvi potpuno modifikovani aparat B-1 337. skvadrone bio predat krajem godine, do kada pripadnici ove jedinice treba da pripreme mrežu Link-16 za upotrebu u vazdušnom prostoru koji će biti korišćen za opitovanja. Pored toga, jedinica ima zadatak i da pripremi plan preobuke posada i letnih opitovanja modifikovanog aviona.

Pored letaća, i vazduhoplovnotehnička služba moraće da se pripremi za prijem modifikovanih aparata, pa će tehničari 337. skvadrona i 7. tehničke grupe proći preobuku koja će se održavati u vazduhoplovnim bazama Edwards i Tinker.

Zahvati bi trebalo da budu „toliko dramatični“ da bi posade koje su do sada letele na B-1, prema vazduhoplovima opremljenim IBS-om, trebalo da se ophode kao prema potpuno novim avionima. Cilj programa jeste da omogući integraciju i sadejstvo ovih bombardera sa celokupnim vazduhoplovnim, kopnenim, mornaričkim, pa i sajber arsenalom Sjedinjenih Država.

Mladen Tišma

Uspešna provera integracije avio-bombe GBU-53/B na jurišnik F-35¹⁸

Ratno vazduhoplovstvo SAD i kompanija Rajteon (*Raytheon*) početkom marta ove godine potvrdili su da su uspešno završena ispitivanja kojima se proveravalo da li avio-bomba malog prečnika tipa GBU-53/B SDB II odgovara unutrašnjem spremniku za naoružanje (tzv. luk – bay) novog američkog jurišnika F-35 *Lightening II*. Tokom ispitivanja, četiri gabaritno-težinska modela ovih avio-bombi podvešana su zajedno sa jednom raketom v-v tipa AMRAAM, a instrumenti su potvrdili da je zazor između avio-bombi i rakete, te naoružanja i vrata spremnika odgovarajući.

Prema zvaničnicima kompanije Rajteon, završetak pomenute provere značajan je zbog toga što je dodatno potvrdio kompatibilnost avio-bombe SDB II (*Small Diameter Bomb II*) sa avionom F-35, što će omogućiti i početak njene proizvodnje. Integracija ovog ubojnog sredstva trebalo bi da omogući avionu sposobnost „bez presedana“ da precizno napada brze pokretne mete u složenim meteorološkim uslovima i kroz dimne zavese.

Avio-bomba SDB II projektovana je za potrebe borbenih aviona četvrte i pete generacije, uključujući lovce-bombardere F-15E, F-16C/D, lovce F-22 i jurišnike F-35A iz sastava Ratnog vazduhoplovstva SAD, avione F-35C i F/A-18E/F američke Ratne mornarice i varijantu JSF-a za marince, odnosno F-35B.

¹⁸ www.airforcesdaily.com/2013/01/gbu-53b-small-diameter-bomb-ii-f-35-ii-check/ posećeno: 2. 2. 2013.



Američki Sekretarijat odbrane (*U.S. Department of Defense – DoD*) označio je ovaj tip avio-bombe kao „kritičnu potrebu” za američke ratne avione, što i ne čudi, budući da je samo DoD do ovog trenutka uložio preko 700 miliona američkih dolara u ovaj projekat.

Kada su u pitanju karakteristike ovog ubojnog sredstva, navodi se da je u stanju da pogodi metu u radijusu većem od 74 kilometra, te da je bojeva glava dovoljno snažna da uništi oklopne mete, a da pritom kolateralna šteta bude svedena na minimum. Proizvođač i američka vojska, pored toga, tvrde i da se radi o izuzetno preciznom sredstvu koje pilotu omogućava promenu mete nakon odbacivanja, budući da poseduje data-link. Pored toga, Rajtheon je za ovu avio-bombu proizveo i integrisani 3-modni tragač, koji objedinjuje milimetarskotalasni radar, nehlađene infracrvene i poluaktivne laserske senzore, što bi trebalo da obezbedi pomenutu primenjivost ovog ubojnog sredstva u svim meteorološkim uslovima.

Mladen Tišma

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 intervidovsku 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. Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja 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 2012. godinu:

za oblast **osnovna istraživanja**:

– na listi časopisa za matematiku, računarske nauke i mehaniku: kategorija naučni časopis nacionalnog značaja (M₅₂),

za oblast **tehnološki razvoj**:

– na listi časopisa za materijale i hemijske tehnologije: kategorija naučni časopis nacionalnog značaja (M₅₂),

– na listi časopisa za elektroniku, telekomunikacije i informacione tehnologije: kategorija naučni časopis (M₅₃),

– na listi časopisa za mašinstvo: kategorija naučni časopis (M₅₃).

Usvojene liste domaćih časopisa za 2012. godinu mogu se videti na sajtu Vojnotehničkog glasnika, stranica Kategorizacija časopisa.

Detaljnije informacije mogu se pronaći i na sajtu Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

Podaci o kategorizaciji mogu se pratiti i na sajtu KOBSON-a (Konzorcijum biblioteka Srbije za objedinjenu nabavku).

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).

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.

Radovi se predaju putem onlajn sistema za elektronsko uređivanje ASEESTANT, koji je razvio Centar za evaluaciju u obrazovanju i nauci (CEON).

Pristup i registracija za servis vrše se na sajtu www.vtg.mod.gov.rs, preko stranice SCINDEKS, opcija ASEESTANT (aseestant.ceon.rs/index.php/vtg).

Detaljno uputstvo o registraciji i prijavi za servis nalazi se na sajtu www.vtg.mod.gov.rs, stranica Uputstvo za e-Ur: Elektronsko uređivanje – ASEESTANT.

Vojnotehnički glasnik objavljuje članke na srpskom, engleskom, ruskom, nemačkom ili francuskom jeziku (arial, srpska latinica, veličina slova 11 pt, prored Single).

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 oko jednog autorskog tabaka (16 stranica formata A4 sa proredom Single), a najviše 24 stranice.

Članak treba da bude napisan na obrascu za pisanje članka, koji se u elektronskoj formi može preuzeti sa sajta na stranici Obrazac za pisanje članka.

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 sa strane 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 koliciju (godina, volumen, sveska, početna i završna stranica). Naslovi časopisa i članka mogu se dati u skraćenom obliku.

Ime autora

Navodi se puno ime i prezime (svih) autora. Veoma je poželjno da se navedu i srednja slova autora. Imena i prezimena 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, Univerzitet u Beogradu, Vojna akademija, Katedra prirodno-matematičkih nauka, 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 stranici sajta 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 osnove 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, da bi redakcija izvršila proveru i lekturu.

Ključne 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.

Sistem ASEESTANT u tu svrhu koristi specijalnu alatku KWASS: automatsko ekstrahovanje ključnih reči iz disciplinarnih tezaurusa/rečnika po izboru i rutine za njihov odabir, tj. prihvatanje odnosno odbacivanje od strane autora i/ili urednika.

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.

Tabelami 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.

Vojnotehnički glasnik za referenciranje (citiranje i navođenje literature) primenjuje Harvardski sistem referenci, odnosno Harvardski priručnik za stil (Harvard Referencing System, Harvard Style Manual). U samom tekstu, u običnim zagradama, na mestu na kojem se vrši pozivanje, odnosno citiranje literature nabrojane na kraju članka, obavezno u običnoj zagradi napisati prezime citiranog autora, godinu izdanja publikacije iz koje citirate i, eventualno, broj stranica. Npr. (Petrović, 2012, pp.10–12).

Detaljno uputstvo o načinu citiranja, sa primerima, dato je na stranici sajta Uputstvo za Harvardski priručnik za stil. Potrebno je da se pozivanje na literaturu u tekstu uradi u skladu sa pomenutim uputstvom.

Sistem ASEESTANT u svrhu kontrole navođenja (citiranja) u tekstu koristi specijalnu alatku CiteMatcher: otkrivanje izostavljenih citata u tekstu rada i u popisu referenci.

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 ne prevode na jezik rada i nabrajaju se u posebnom odeljku na kraju članka.

Vojnotehnički glasnik, kao način ispisa literature, primenjuje Harvardski sistem referenci, odnosno Harvardski priručnik za stil (Harvard Referencing System, Harvard Style Manual).

Literatura se nabraja po abecednom redosledu, navodeći najpre prezimena autora, bez numeracije.

Detaljno uputstvo o načinu popisa referenci, sa primerima, dato je na stranici sajta Uputstvo za Harvardski priručnik za stil. Potrebno je da se popis literature na kraju članka uradi u skladu sa pomenutim uputstvom.

Nestandardno, nepotpuno ili nedosledno navođenje literature u sistemima vrednovanja časopisa smatra se dovoljnim razlogom za osporavanje naučnog statusa časopisa.

Sistem ASEESTANT u svrhu kontrole pravilnog ispisa liste referenci koristi specijalnu alatku RefFormatter: kontrola oblikovanja referenci u skladu sa Harvardskim priručnikom za stil.

Propratno pismo

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, broj lične karte 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 honoriraju se prema važećim propisima.

Adresa redakcije: Vojnotehnički glasnik, 11000 Beograd, Braće Jugovića 19.
E-mail: vojnotehnicki.glasnik@mod.gov.rs.

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 Technical Courier* for the year 2012

in the **field fundamental research**:

– on the list of periodicals for mathematics, computer sciences and mechanics: category: scientific periodical of national interest (M₅₂),

in the **field technological development**:

– on the list of periodicals for materials and chemical technology, category: scientific periodical of national interest (M₅₂),

– on the list of periodicals for electronics, telecommunications and IT, category: scientific periodical (M₅₃),

– on the list of periodicals for mechanical engineering, category: scientific periodical (M₅₃).

The approved lists of national periodicals for the year 2012 can be viewed on the *Military Technical Courier* website, page Journal categorization.

More detailed information can be found on the website of the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia.

The information on the categorization can be also found on the website of KOBSON (Consortium of Libraries of Serbia for Unified Acquisition).

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 Education, Science and Technological Development.

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.

Manuscripts are submitted online, through the electronic editing system ASEESTANT, developed by the Center for Evaluation in Education and Science – CEON.

The access and the registration are through the Military Technical Courier site <http://www.vtg.mod.gov.rs/index-e.html>, on the page SCINDEKS, option ASEESTANT (aseestant.ceon.rs/index.php/vtg).

The detailed instructions about the registration for the service are on the website <http://www.vtg.mod.gov.rs/index-e.html>, on the page Instructions for e-Ur: Electronic Editing - ASEESTANT.

The Military Technical Courier publishes articles in Serbian, English, Russian, German or French, using Arial and a font size of 11pt with Single 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 24 pages of A4 paper format.

The article should be formatted following the instructions in the Article Form which can be downloaded from Article form.

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 List of referees.

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.

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.

For this purpose, the ASEESTANT system uses a special tool KWASS for the automatic extraction of key words from disciplinary thesauruses/dictionaries by choice and the routine for their selection, i.e. acceptance or rejection by author and/or editor.

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 stated 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. The Military Technical Courier applies the Harvard Referencing System given in the Harvard Style Manual. When citing sources within your paper, i.e. for in-text references of the works listed at the end of the paper, place the year of publication of the work in parentheses and optionally the number of the page(s) after the author's name, e.g. (Petrovic, 2012, pp.10-12). A detailed guide on

citing, with examples, can be found on Military Technical Courier website on the page Instructions for Harvard Style Manual. In-text citations should follow its guidelines.

For checking in-text citations, the ASESESTANT system uses a special tool CiteWatcher to find out quotes left out within papers and in reference lists.

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 are not translated to the language of the article.

In compiling the reference list and bibliography, the Military Technical Courier applies the Harvard System – Harvard Style Manual. All bibliography items should be listed alphabetically by author's name, without numeration. A detailed guide for listing references, with examples, can be found on Military Technical Courier website on the page Instructions for Harvard Style Manual. Reference lists at the end of papers should follow its guidelines.

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 covering letter

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.
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 2013. 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. 2013. 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
Dobriša Miletić, profesor
e-mail: dobriša.miletic@mod.gov.rs

Prevod na engleski
Jasna Višnjić, profesor
e-mail: jasnavisnjic@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

Prevod na francuski
Dragan Vučković
e-mail: draganvuckovic@kbcnet.rs

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: 480 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
Dobriša Miletić BA
e-mail: dobriša.miletic@mod.gov.rs

English translation and polishing
Jasna Višnjić BA
e-mail: jasnavisnjic@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

French translation and polishing
Dragan Vučković
e-mail: draganvuckovic@kbcnet.rs

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 480 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, Belgrade