

ENERGIA

**JOURNAL
OF ENERGY**

ENERGIJA

IZDAVAČ

Hrvatska elektroprivreda d.d., Zagreb

SUIZDAVAČI

Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva
Ministarstvo gospodarstva, rada i poduzetništva

ZA IZDAVAČA

Mr. sc. Ivan Mravak

POMOĆ U IZDAVANJU

Ministarstvo znanosti, obrazovanja i športa

UREĐIVAČKI SAVJET

Mr. sc. Kažimir Vrankić, (predsjednik), Zagreb – doc. dr. sc. Ante Čurković, Zagreb – prof. dr. sc. Igor Dekanić, Zagreb – prof. dr. sc. Danilo Feretić, Zagreb – mr. sc. Nikica Grubišić, Zagreb – prof. dr. sc. Slavko Krajcar, Zagreb – doc. dr. sc. Željko Tomšić, Zagreb – doc. dr. sc. Mladen Zeljko, Zagreb

UREĐIVAČKI ODBOR

Glavni urednik – Mr. sc. Goran Slipac, Zagreb
Glavni tajnik – Mr. sc. Slavica Barta-Koštrun, Zagreb
Lektor – Šimun Čagalj, prof., Zagreb
Metrološka recenzija – Dragan Borojević, dipl. ing., Zagreb
Prijevod – Hrvatsko društvo znanstvenih i tehničkih prevoditelja – Prevoditeljski centar, Zagreb

UREDNIŠTVO I UPRAVA

HEP d.d. – Energija
Ulica grada Vukovara 37, 10000 Zagreb, Hrvatska
Telefoni: +385 (1) 6171291 i 6322641
Telefaks: +385 (1) 6322143
e-mail: goran.slipac@hep.hr; slavica.barta@hep.hr
www.hep.hr

Godišnje izlazi 6 brojeva
Godišnja pretplata bez PDV-a (10 %) iznosi:
– za pojedince 275 kn
– za poduzeća 440 kn
– za studente 65 kn
Žiro račun kod Zagrebačke banke broj:
2360000-1400129978

Godišnja pretplata za inozemstvo iznosi USD 95.
Devizni račun:
Zagrebačka banka broj: 2000006299

Grafičko uređenje omota – mr. sc. Kažimir Vrankić, Zagreb
Grafičko uređivanje – Bestias dizajn, d.o.o., Zagreb
Tisak – Tiskara Zelina d.d., Sv. Ivan Zelina

Naklada – 1 500 primjeraka
Godište 58(2009)
Zagreb, 2009
Broj 1., str.1-104

Oglasi su veličine jedne stranice. Cijena oglasa je 3 000 kn bez PDV (22 %).

ENERGIJA

PUBLISHED BY

Hrvatska elektroprivreda d.d., Zagreb

CO-PUBLISHED BY

University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing
Ministry of Economy, Labour and Entrepreneurship

PUBLISHER'S REPRESENTATIVE

Ivan Mravak, MSc

SUPPORTED BY

Ministry of Science, Education and Sport

EDITORIAL COUNCIL

Kažimir Vrankić, MSc, (Chairman), Zagreb – Assistant Prof Ante Čurković, PhD, Zagreb – Prof Igor Dekanić, PhD, Zagreb – Prof Danilo Feretić, PhD, Zagreb – Nikica Grubišić, MSc, Zagreb – Prof Slavko Krajcar, PhD, Zagreb – Assistant Prof Željko Tomšić, PhD, Zagreb – Assistant Prof Mladen Zeljko, PhD, Zagreb

EDITORIAL BOARD

Editor-in-chief – Goran Slipac, MSc, Zagreb
Secretary – Slavica Barta-Koštrun, MSc, Zagreb
Language Editor – Šimun Čagalj, prof., Zagreb
Metrology – Dragan Borojević, dipl. ing., Zagreb
Translation – Croatian Association of Scientific and Technical Translators – Croatian Translation Agency, Zagreb

HEAD OFFICE AND MANAGEMENT

HEP d.d. – Energija
Ulica grada Vukovara 37, 10000 Zagreb, Hrvatska
Telephone: +385 (1) 6171291 and 6322641
Fax: +385 (1) 6322143
e-mail: goran.slipac@hep.hr; slavica.barta@hep.hr
www.hep.hr

Appears 6 times a year.
Annual subscription fee excl. VAT (10 %):
– for individual subscribers HRK 275
– for companies HRK 440
– for students HRK 65
Number of fyro account whit Zagrebačka Banka:
2360000-1400129978

Annual subscription fee for the overseas: USD 95.
Number of foreign currency account whit Zagrebačka Banka:
2000006299

Cover design – Kažimir Vrankić, MSc, Zagreb
Graphic layout – Bestias Dizajn d.o.o., Zagreb
Printed by – Tiskara Zelina d.d., Sv. Ivan Zelina

Circulation – 1 500 copies
Volume 58(2009)
Zagreb, 2009
No. 1., p. p. 1-104

Ads are the size of the page. The price of an ad is HRK 3 000 excl. VAT (22 %).

SADRŽAJ

Karasalihović Sedlar, D., Dekanić, I., Hrnčević, L.
SIGURNOST OPSKRBE NAFTOM U HRVATSKOJ
(pregledni članak)

Grubišić, N.
DUGOROČNI IZGLED CIJENA NAFTI I PLINA
(prethodno priopćenje)

Klepa, M., Mikuličić, V., Šimić, Z.
MODEL PROIZVODNE JEDINICE S UKLJUČENIM UVJETIMA OKOLINE U MODELU POUZDANOSTI I RASPOLOŽIVOSTI ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA
(prethodno priopćenje)

Hederić, Ž., Barukčić, M., Miklošević, K.
ANALITIČKI PRORAČUN OSOVINSKIH STRUJA KOD MOTORA S HOMOGENEJNIM RAZMOM
(izvorni znanstveni članak)

Škare, J., Mesić, M.
ZAŠTITNI UREĐAJI I SELEKTIVNOST U PODSUSTAVIMA ISTOSMJERNOG RAZVODA I NAPAJANJA
(stručni članak)

Časopis je ubilježen u Ministarstvu znanosti, obrazovanja i športa pod brojem 161 od 12.11.1992.

Časopis je indeksiran u sekundarnom bibliografskom izvoru INSPEC – The Institution of Electrical Engineering, England.

CONTENTS

Karasalihović Sedlar, D., Dekanić, I., Hrnčević, L.
OIL SUPPLY SECURITY IN CROATIA
(review paper)

Grubišić, N.
LONG-TERM PROSPECT OF OIL AND GAS PRICES
(preliminary information)

Klepa, M., Mikuličić, V., Šimić, Z.
PRODUCTION UNIT MODEL WITH ENVIRONMENTAL CONDITIONS INCLUDED IN THE ELECTRO-ENERGETIC SYSTEM RELIABILITY AND AVAILABILITY MODEL
(preliminary information)

Hederić, Ž., Barukčić, M., Miklošević, K.
ANALYTICAL CALCULATION OF SHAFT CURRENTS IN THE MOTORS WITH HOMOGENEOUS YOKE
(original scientific paper)

Škare, J., Mesić, M.
PROTECTION DEVICES AND SELECTIVITY IN DC POWER DISTRIBUTION SUB-SYSTEMS
(professional article)

The journal is registered with the Ministry of Science, Education and Sport under No. 161 since 12.11.1992

The journal is indexed with the secondary reference source of INSPEC – The Institution of Electrical Engineering, England.

01/09

006-013

014-025

026-055

056-075

075-097



UREĐIVAČKA POLITIKA

Časopis Energija znanstveni je i stručni časopis s dugom tradicijom više od 50 godina. Pokriva područje elektroprivredne djelatnosti i energetike. Časopis Energija objavljuje izvorne znanstvene i stručne članke širokoga područja interesa, od specifičnih tehničkih problema do globalnih analiza procesa u području energetike.

U vrlo širokom spektru tema vezanih za funkcioniranje elektroprivredne djelatnosti i općenito energetike u tržišnim uvjetima i općoj globalizaciji, časopis ima poseban interes za specifične okolnosti ostvarivanja tih procesa u Hrvatskoj i njezinu regionalnom okruženju. Funkcioniranje i razvoj elektroenergetskih sustava u središnjoj i jugoistočnoj Europi, a posljedično i u Hrvatskoj, opterećeno je mnogobrojnim tehničko-tehnološkim, ekonomskim, pravnim i organizacijskim problemima. Namjera je časopisa da postane znanstvena i stručna tribina na kojoj će se kritički i konstruktivno elaborirati navedena problematika i ponuditi rješenja.

Časopis je posebno zainteresiran za sljedeću tematiku: opća energetika, tehnologije za proizvodnju električne energije, obnovljivi izvori i zaštita okoliša; korištenje i razvoj energetske opreme i sustava; funkcioniranje elektroenergetskoga sustava u tržišnim uvjetima poslovanja; izgradnja elektroenergetskih objekata i postrojenja; informacijski sustavi i telekomunikacije; restrukturiranje i privatizacija, reinženjering poslovnih procesa; trgovanje i opskrba električnom energijom, odnosi s kupcima; upravljanje znanjem i obrazovanje; europska i regionalna regulativa, inicijative i suradnja.

Stranice časopisa podjednako su otvorene iskusnim i mladim autorima, te autorima iz Hrvatske i inozemstva. Takva zastupljenost autora osigurava znanje i mudrost, inventivnost i hrabrost, te pluralizam ideja koje će čitatelji časopisa, vjerujemo, cijeniti i znati dobro iskoristiti u svojem profesionalnom radu.

EDITORIAL POLICY

The journal Energy is a scientific and professional journal with more than a 50-year tradition. Covering the areas of the electricity industry and energy sector, the journal Energy publishes original scientific and professional articles with a wide area of interests, from specific technical problems to global analyses of processes in the energy sector.

Among the very broad range of topics relating to the functioning of the electricity industry and the energy sector in general in a competitive and globalizing environment, the Journal has special interest in the specific circumstances in which these processes unfold in Croatia and the region. The functioning and development of electricity systems in Central and South East Europe, consequently in Croatia too, is burdened with numerous engineering, economic, legal and organizational problems. The intention of the Journal is to become a scientific and professional forum where these problems will be critically and constructively elaborated and where solutions will be offered.

The Journal is especially interested in the following topics: energy sector in general, electricity production technologies, renewable sources and environmental protection; use and development of energy equipment and systems; functioning of the electricity system in competitive market conditions; construction of electric power facilities and plants; information systems and telecommunications; restructuring and privatization, re-engineering of business processes; electricity trade and supply, customer relations, knowledge management and training; European and regional legislation, initiatives and cooperation.

The pages of the Journal are equally open to experienced and young authors, from Croatia and abroad. Such representation of authors provides knowledge and wisdom, inventiveness and courage as well as pluralism of ideas which we believe the readers of the Journal will appreciate and know how to put to good use in their professional work.

UVOD

INTRODUCTION

Poštovani čitatelji!

Pred Vama je prvi broj časopisa Energija u 2009. godini. Ova je godina počela redukcijom u isporuci prirodnog plina, ponajprije zemljama srednje i jugoistočne Europe, koja je teško pogodila zemlje koje uvoze sve ili gotovo sve potrebne količine prirodnog plina, a nešto manje pogodila je zemlje koje su raspolagale određenim zalihama. U prošlom broju časopisa Energija objavili smo članak koji se odnosio na analizu sigurnosti opskrbe prirodnim plinom u Hrvatskoj. U ovom broju nastavljamo s analizom sigurnosti opskrbe naftom u Hrvatskoj kao i drugim važnim aspektima, kao što su primjerice dugoročni izgled cijene nafte i prirodnog plina. Nadamo se kako će vam ovi članci pomoći u razumijevanju zbivanja na tržištu energenata kao i razumijevanja posljedica koje mogu imati na opskrbu energentima zemalja, kao što je primjerice Hrvatska.

U ovom broju časopisa Energija objavljujemo vrlo zanimljive članke iz različitih područja, od energetskih do specijalističkih područja elektrotehnike:

- Sigurnost opskrbe naftom u Hrvatskoj,
- Dugoročni izgled cijena nafte i plina,
- Model proizvodne jedinice s uključenim uvjetima okoline u modelu pouzdanosti i raspoloživosti elektroenergetskog sustava,
- Analitički proračun osovinskih struja kod motora s homogenim jarmom,
- Zaštitni uređaji i selektivnost u podsustavima istosmjernog razvoda i napajanja.

U prvom članku opisana je koncepcija sigurnosti opskrbe naftom u Hrvatskoj. Polazeći od činjenice kako Hrvatska podmiruje potrebe u primarnim oblicima energije iz tekućih i plinovitih goriva na razini od približno 70 % te kako će udio uvoza ovih oblika energije u budućnosti rasti, autori definiraju potrebu stvaranja infrastrukturnih pretpostavki za formiranje strateških zaliha nafte. Prosudba potrebnih skladišnih kapaciteta izvršena je temeljem projekcije kretanja potrošnje nafte u Hrvatskoj, projekciju proizvodnje nafte u Hrvatskoj te uvoza. Projekcije proizvodnje, uvoza kao i potrošnje nafte i naftnih derivata u Hrvatskoj za razdoblje do 2020. godine preuzete su iz najnovijih projekcija potreba za energijom definiranih u nacrtu Zelene knjige Strategije energetskog razvitka Republike Hrvatske.

U ovom broju imamo još jedan članak koji se bavi aspektima tržišta nafte i prirodnog plina. Naime, pitanje spoznaje budućeg kretanja cijena ovih energenata oduvijek je privlačila pozornost. Specifičnost ovog članka je u tomu što se budući dugoročni izgled cijena nafte i prirodnog plina analizira kroz tržište kapitala, a ne kako je to uobičajeno kroz složene ekonometrijske modele. Autor u članku ističe kako je za sagledavanje budućeg kretanja cijena nafte i prirodnog plina nužno lučiti kratkoročne poremećaje od dugoročnih, odnosno

Dear Readers!

Before you is the first issue of Energija for the year 2009. This year began with a recession in the supply of natural gas, primarily to the countries of west and southeast Europe. This recession had severe repercussions on the countries which import all, or nearly all, necessary quantities of natural gas, and somewhat lesser repercussions on the countries which avail of certain amounts of reserves. In the last issue of Energija, we published an article which addressed natural gas supply security in Croatia. In this issue, we continue with the analysis of oil supply security in Croatia, as well as with other aspects, such as long-term prospects of oil and natural gas prices. We hope these articles will help you understand the events on the world energy sources market, as well as the consequences these events can have on the supply of energy sources of the countries such as, for example, Croatia.

In this issue of Energija we publish very interesting articles from various fields, from energetic to specialist fields of electrical engineering:

- Oil supply security in Croatia,
- Long-term aspects of oil and natural gas prices,
- Production unit model with environmental conditions included in the electric power system reliability and availability model,
- Analytical calculation of shaft currents in homogenous yoke motors,
- Protection devices and selectivity in DC power distribution sub-systems.

The first article describes the concept of oil supply security in Croatia. Starting from the fact that Croatia settles its requirements for primary energy sources from liquid and gas fuels at the level of approximately 70 %, and that the share of import of these forms of energy will grow in the future, the authors establish the need to create infrastructural assumptions for creating strategic oil reserves. The estimate of necessary storage capacities is made based on the projection of oil consumption fluctuations in Croatia, projection of oil production in Croatia and on import. The projections of production, import and of oil and oil derivatives consumption in Croatia for the period until 2020 are taken over from the latest projections of oil requirements defined in the draft of the Green Book of the Energy Development Strategy of the Republic of Croatia.

In this issue we have another article which addresses oil and natural gas market aspects. Namely, the issue of being familiar with future fluctuations of the prices of these energy sources has been attractive. The specificity of this article lies in the fact that the future long-term oil and natural gas prices prospects are analysed through the capital market and not through the usual complex econometric models. The author points out that the consideration of future oil and natural gas prices requires distinguishing short-term from long-term disturbances, that is, determination factors. What is interesting is that as early as in the first half of the year 2008, this author predicted a fall in

faktora determinacije. Kuriozitet je što je ovaj autor još tijekom prve polovine 2008. godine predvidio pad cijena sirove nafte, a što se u ovom članku implicitno i spominje.

Treći članak opisuje rezultate teorijsko-metodološke razrade modela kojim se modelira utjecaj nepovoljnih atmosferskih prilika na raspoloživost i pouzdanost proizvodne jedinice. Model proizvodne jedinice s uključenim uvjetima okoline uz ovisnosti o vremenu u izračun pokazatelja pouzdanosti i raspoloživosti elektroenergetskog sustava uvodi i ovisnost o uvjetima okoline u kojima se jedinica nalazi tijekom izloženosti tim uvjetima. Pod uvjetima okoline kod elektroenergetskih postrojenja najčešće se podrazumijevaju atmosferske prilike koje ih okružuju. Polazeći od ekonomski opravdane i tehničko-tehnološki prihvatljive razine zaštite proizvodne jedinice, a u svezi s traženom razinom raspoloživosti i pouzdanosti elektroenergetskog sustava, primjenom izloženih modela moguće odrediti mjesto i uloge nekih proizvodnih jedinica u pokrivanju potreba za snagom i energijom na način da se time unaprijed djeluje na izloženost proizvodne jedinice nepovoljnim utjecajima iz okoline, ili barem njihovim posljedicama.

Četvrti članak u ovom broju časopisa Energija donosi jednu vrlo specijalističku analizu koja se odnosi na izračun osovinskih struja kod niskonaponskih asinkronih motora s homogenim jarmovima, a koje dovode do kvarova ležajeva. U članku je opisan postupak analitičkog izračuna osovinske struje te je na primjeru jednog četveropolnog asinkronog kaveznog motora za pogon viličara dana usporedba izračuna amplituda nekih značajnih harmonika osovinske struje s mjerenim vrijednostima. Analiza je pokazala da se takvim postupkom mogu izračunati amplitude harmonika osovinske struje s pogreškom manjom od 10 %, što je opet povezano s točnošću ulaznih podataka. Autori sugeriraju važnost ovog izračuna, posebice za niskonaponske asinkrone motore, koji su prema podacima IEC-a motori s najvećom ekspanzijom primjene u industriji i za koje je u radu objašnjen analitički proračun osovinskih struja.

U zadnjem, petom članku opisani su podsustavi istosmjernog razvoda i napajanja koji su bitna sastavnica elektroenergetskih postrojenja budući da omogućavaju izvršavanje vitalnih funkcija postrojenja u normalnom pogonu i u slučaju nestanka mrežnog napona te stoga trebaju biti pouzdan i siguran izvor napajanja električnom energijom. S obzirom da se način prekidanja istosmjerne struje znatno razlikuje od prekidanja izmjenične struje, važno je da se prilikom projektiranja podsustava istosmjernog razvoda i napajanja u elektroenergetskim postrojenjima vodi briga o njihovoj specifičnosti. U očuvanju vitalnih funkcija elektroenergetskih postrojenja veliku ulogu ima selektivnost zaštitnih uređaja u istosmjernom razvodu, kojom se postiže da kvar onemogućuju zaštitni uređaji najbliži mjestu kvara, pri čemu zaštitni uređaji prethodnih razina razvoda i na njih priključeni izvodi ostaju uključeni.

Članke u ovom broju časopisa Energija potpisuju autori iz sveučilišne zajednice, ali i iz prakse, što je, sasvim sigurno, rezultiralo u kvalitetnim člancima.

Glavni urednik
Mr. sc. Goran Slipac

crude oil prices, which is implicitly mentioned in this article.

The third article describes the results of the theoretic-methodological elaboration of the model used to establish the impact of adverse weather conditions on the availability and reliability of the production unit. The production unit model with environmental conditions included, besides the time dependence, also introduces dependence on environmental conditions in which the unit operates during the exposure to those conditions into the calculation of electrical power system reliability and availability indicators. Electric power plant's environmental conditions most usually imply weather conditions which surround it. Starting from the economically justified and technically-technologically acceptable level of production unit protection, and in relation to the required level of electric power system availability and reliability, by applying the presented models, it is possible to determine the location and the roles of certain production units in covering the requirements for power and energy so as to use this to influence to advance the exposure of the production unit to adverse environmental conditions, or at least to their consequences.

The fourth article in this issue of Energija presents a very specialized analysis which relates to the calculation of shaft currents in low-voltage asynchronous motors with homogenous yokes and which result in bearing damage. The article describes the procedure of analytical calculation of shaft currents and, on the example of a four-pole asynchronous squirrel-cage motor for the fork-lift drive, a comparison of calculation of amplitudes of certain significant shaft current harmonics with the measured values is provided. The analysis showed that such a procedure can be used to calculate shaft current harmonics with an error less than 10 %, which, on the other hand, is connected with the accuracy of input data. The authors suggest that this calculation is important especially for low-voltage asynchronous motors which, according to IEC data, are the motors whose application has experienced the greatest expansion in the industry. This work provides the analytic calculation of shaft currents for these motors.

The last, fifth, article describes DC power distribution sub-systems which are a vital component of electric power plants because they enable the performance of vital plant functions during normal operation and in situations of reduction of network voltage, and therefore need to be a reliable and secure source of electric power supply. Due to the fact that the manner of terminating DC current is significantly different from terminating AC current, it is necessary to take into consideration their specificity when designing the DC power distribution sub-systems in electrical power plants. In preserving the vital functions of electrical power facilities, selectivity of protection devices in DC distribution systems plays a large role, and this selectivity enables the fault to be terminated by protection devices closest to the fault location, whereby the protection device at the previous distribution level and those connected to it remain operational.

The articles from this issue of Energija were written by authors from the university community, as well as from practice which surely resulted in high-quality articles.

Editor-in-chief:
Goran Slipac, Msc

SIGURNOST OPSKRBE NAFTOM U HRVATSKOJ OIL SUPPLY SECURITY IN CROATIA

Daria Karasalihović Sedlar – Igor Dekanić – Lidia Hrnčević,
Zagreb, Hrvatska

Zbivanja na globalnom energetsom tržištu, porast tržišne nestabilnosti i sve veća uloga geopolitike u opskrbi energijom, kontinuirano utječu na energetske sigurnost koja predstavlja glavni postulat energetske politike, ali ujedno i kriterij njezine uspješnosti. Osiguranje nesmetane opskrbe naftom i plinom osnovna je zadaća svake nacionalne energetske politike. Mogućnosti i uvjeti dobave primarnih izvora energije, među kojima su nafta i prirodni plin daleko najvažniji energenti s obzirom na njihov udio u potrošnji energije, te s obzirom na njihovu stratešku važnost, predstavljaju temelj za osiguravanje sigurnosti opskrbe naftom i prirodnim plinom u sklopu nacionalne energetike. Sigurnost opskrbe naftom u Hrvatskoj je usmjerena na utvrđivanje kritične energetske infrastrukture sa stajališta energetske sigurnosti, zatim na kreiranje sustava za kontinuirano analiziranje i praćenje sigurnosti opskrbe naftom, reagiranje u slučajevima kritične opskrbe te razradu mjera za sprječavanje i amortizaciju u situacijama ugroženosti energetske sigurnosti.

The occurrences on the global energy market, increased market instability and the increasingly significant role of geopolitics in energy supply, continually impact the energy supply security which represents the main postulate of the energy politics, as well as a criterion of its successfulness. Assurance of an uninterrupted oil and gas supply is the basic task of each national energy policy. Possibilities and conditions of the supply of primary energy sources, among which oil and natural gas are by far the most important energy sources in relation to their share in energy consumption, and as regards their strategic importance, these represent the basis for assurance of oil and natural gas supply security within the national energy supply. Oil supply security in Croatia is directed towards determining the critical energy supply infrastructure from the viewpoint of energy supply security, towards creating a system for continued oil supply security analysis and monitoring, acting in critical supply situations and towards an elaboration of measures for prevention and amortization in cases of endangerment of energy supply security.

**Ključne riječi: energetska sigurnost; sigurnost opskrbe naftom;
strateške zalihe nafte**

Key words: energy supply security; oil supply security; strategic oil reserves



1 UVOD

Analiza geopolitičkih prilika na međunarodnim energetske tržištima, procjena opasnosti od poremećaja opskrbe naftom i prirodnim plinom te predviđanja sustava za ublažavanje posljedica u slučaju poremećaja opskrbe naftom, predstavlja značajan element, kako energetske, tako i ukupne nacionalne sigurnosti [1]. Stoga je analiza sigurnosti opskrbe naftom u RH trajna potreba energetske sigurnosti i nacionalne sigurnosti zemlje. S obzirom na činjenicu da Hrvatska oko 70 % svojih potreba u primarnoj energiji podmiruje korištenjem tekućih i plinovitih goriva, odnosno nafte i plina, iznimno je važno raščlanjivanje potreba, okolnosti i stanja dobave nafte.

2 ANALIZA STANJA U HRVATSKOJ S CILJEM UTVRĐIVANJA KRITIČNIH ELEMENATA U OPSKRBI NAFTOM

Kao ulazna pretpostavka analize stanja dugoročno se predviđa prosječna godišnja stopa porasta domaćeg proizvoda od 4,5 % godišnje do 2020. godine i ista dugoročna dinamika rasta do 2030. godine. S obzirom da su rast bruto domaćeg proizvoda, te proizvodnja i potrošnja energije uzajamno povezani, rast bruto domaćeg proizvoda zahtijeva i povećanje potrošnje energije [2]. Potrošnja tekućih goriva u Hrvatskoj predstavlja glavni izvor energije u našoj zemlji. S obzirom na geografske značajke Hrvatske kao i gospodarsku važnost prometa i turizma za budući razvitak, procjenjuje se kako će uloga tekućih goriva u energetske potrošnji u Hrvatskoj i dalje biti vrlo značajna te da se njihov udio neće znatnije smanjivati u idućem razdoblju do 2020. godine, pa i do 2030. godine. Očekuje se da će između 2020. i 2030. godine udio tekućih goriva u strukturi potrošnje nešto pasti [3].

Prema podlogama za izradu Strategije energetske razvitka Hrvatske, u osnovnom scenariju koji uključuje detaljnu analizu finalne potrošnje energije u industriji, prometu i općoj potrošnji, predviđa se porast potrošnje tekućih goriva u neposrednoj potrošnji od oko 2 % godišnje u razdoblju do 2030. godine i na temelju toga se predviđa potrošnja nafte koja je prikazana u tablici 1 i na slici 1 [4]. Osim toga, procjena je uzela u obzir i dodatne pretpostavke za procjenu potrošnje (gospodarski rast, smanjenje gubitaka u preradi nafte, zamjenu goriva pri obnovi rafinerija, prestanak rada termoelektrana na loživo ulje, osiguravanje dodatnih količina nafte

1 INTRODUCTION

Analysis of geopolitical circumstances on the international energy markets, evaluation of the danger of disruption of oil and natural gas supply and the planning of systems for amelioration of consequences in case of oil supply disruption, represent significant elements both of the energetic and the overall national security. Therefore, the analysis of oil supply security in Croatia is a constant requirement of the energy supply security and the country's national security. Considering the fact that Croatia settles about 70 % of its needs of primary energy by using liquid and gaseous fuels, that is, oil and gas, it is extremely important to analyse the requirements, circumstances and situation in oil supply.

2 ANALYSIS OF THE SITUATION IN CROATIA WITH THE AIM TO DETERMINE CRITICAL OIL SUPPLY ELEMENTS

As the input assumption of situation analysis, in the long-term an average annual growth rate of domestic product is predicted at 4,5 % annually until year 2020, and the same long-term growth dynamics are predicted until year 2030. Considering the fact that the growth of gross domestic product, energy production and consumption are interrelated, growth of gross domestic product also demands increased energy consumption. Consumption of liquid fuels in Croatia represents the main energy source in our country. Considering Croatia's geographic characteristics, as well as the economic importance of traffic and tourism for future development, it is estimated that the role of liquid fuels in energy consumption in Croatia will continue to be very important and that their share will not decrease significantly in the following period until year 2020, and even until 2030. It is expected that between 2020 and 2030 the share of liquid fuels in the consumption structure will fall to a certain extent.

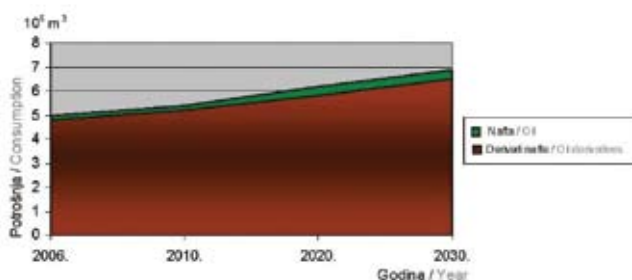
According to the bases for the elaboration of Croatia's Energy Sector Development Strategy, in the basic scenario which includes a detailed analysis of the final energy consumption in industry, traffic and general consumption, a rise in liquid fuels consumption is predicted in direct consumption at about 2 % annually in the period until year 2030 and based on that, fuel consumption as shown in Table 1 and Figure 1 is predicted. Besides that, the estimate took into consideration additional assumptions for estimate of consumption as well (economic growth, decrease of loss in oil processing, exchange of fuels at refineries renovation, termination of operation of fuel oil thermal power plants, provision of additional oil quantities and derivatives for the needs of the

i derivata za potrebe obveznih i strateških zaliha nafte). Na temelju ovih pretpostavki procijenjene su dugoročne potrebe domaćih energetskih tržišta za naftnim derivatima i sirovom naftom [5].

mandatory and strategic oil reserves). Based on these assumptions, long-term needs of domestic energy markets for oil derivatives and crude oil are estimated.

Tablica 1 – Projekcija potrošnje tekućih goriva i potrebe za naftom [4]
Table 1 – Projection of liquid fuels consumption and oil requirements [4]

| Godina / Year | 2006. | 2010. | 2020. | Stopa rasta potrošnje / Consumption growth rate, % | 2030. | Stopa rasta potrošnje / Consumption growth rate 2020.-2030., % |
|---|-------|-------|-------|--|-------|---|
| Derivati / Derivatives 10 ⁶ t | 4,8 | 5,2 | 5,8 | 1,3 | 6,5 | 1,2 |
| Nafta / Oil 10 ⁶ t | 5,0 | 5,4 | 6,2 | 1,6 | 6,9 | 1,1 |



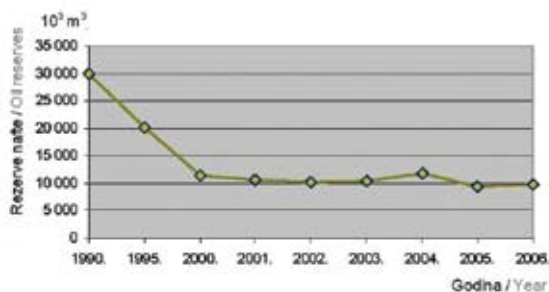
Slika 1 – Projekcija potrošnje tekućih goriva i potrebe za naftom
Figure 1 – Projection of liquid fuels consumption and oil requirements

Proizvodnjom nafte i kondenzata na domaćim eksploatacijskim poljima pokriva se oko 20 % domaćih potreba za sirovom naftom. Kretanja preostalih bilančnih rezervi nafte i kondenzata u Hrvatskoj u razdoblju od 1990. do 2006. godine prikazana su u tablici 2 i slici 2, a proizvodnja na slici 3. One predstavljaju osnovu za procjenu buduće proizvodnje nafte u RH. [3]

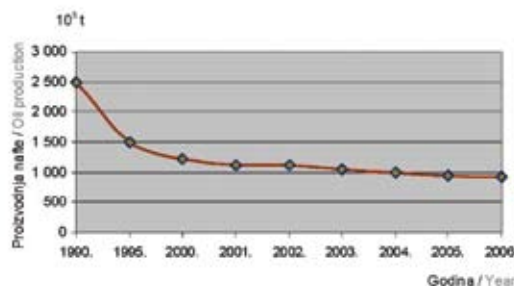
The production of oil and condensates on domestic exploitation fields covers about 20 % of domestic requirements for crude oil. Fluctuations of the rest of the oil and condensates balance reserves in Croatia in the period from 1990 to 2006 are shown in Table 2 and Figure 2, and the production in Figure 3. These represent the basis for the estimate of future oil production in Croatia.

Tablica 2 – Bilančne rezerve i proizvodnja nafte i kondenzata u RH [4]
Table 2 – Oil and condensates balance reserves and production in Croatia [4]

| Nafta i Kondenzat / Oil and condensate | 1990. | 1995. | 2000. | 2001. | 2002. | 2003. | 2004. | 2005. | 2006. |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| Rezerve / Reserves 10 ³ m ³ | 29 950 | 20 044 | 11 474 | 10 622 | 10 153 | 10 356 | 11 794 | 9 331 | 9 691 |
| Proizvodnja / Production 10 ³ t | 2 497 | 1 500 | 1 214 | 1 121 | 1 108 | 1 052 | 1 001 | 946 | 917 |



Slika 2 – Kretanje rezervi nafte u Hrvatskoj
Figure 2 – Oil reserves fluctuation in Croatia



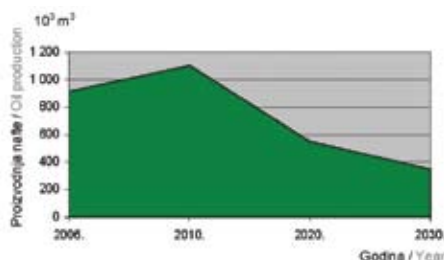
Slika 3 – Proizvodnja nafte u Hrvatskoj
Figure 3 – Oil production in Croatia

Prilikom proračuna projekcija proizvodnje nafte i kondenzata za razdoblje do 2020. godine u obzir je uzeta buduća proizvodnja nafte i kondenzata na postojećim domaćim eksploatacijskim poljima. Nadalje je u obzir uzeta proizvodnja nafte prilikom uporabe metoda za povećanje iscrpka nafte (EOR metode) kao i proizvodnja nafte koja je ocijenjena kao moguća prilikom korištenja novih tehnika i tehnologija. Procjena buduće proizvodnje nafte u RH u razdoblju do 2020. godine prikazana je u tablici 3 i grafički na slici 4.

When estimating the projections of oil and condensates production for the period until 2020, future oil and condensates production on the existing domestic exploitation fields has been taken into consideration. Furthermore, oil production with the use of the Enhanced Oil Recovery Method has been taken into consideration, as well as oil production assessed as possible with using new techniques and technologies. Estimate of future oil production in Croatia in the period until 2020 is shown in Table 3, and graphically in Figure 4.

Tablica 3 – Projekcija proizvodnje nafte u Hrvatskoj [4]
Table 3 – Projection of oil production in Croatia [4]

| Godina / Year | 2006. | 2010. | 2020. | 2030. |
|--|-------|-------|-------|-------|
| Nafta i kondenzat / Oil and condensate 10 ³ t | 917 | 1 100 | 550 | 350 |



Slika 4 – Projekcija proizvodnje nafte u Hrvatskoj
Figure 4 – Projection of oil production in Croatia

3 RAZLOZI ZA STRATEŠKE ZALIHE NAFTE

Na temelju iznesenih procjena, u razdoblju između 2020. i 2030. godine udio domaće proizvodnje u podmirivanju energetske potrebe će i dalje opadati čime će rasti zavisnost gospodarstva Hrvatske o uveznoj nafti, koja će nakon 2020. godine činiti preko 90 % ukupnih potreba za naftom [3]. Nakon 2020. godine osobito važno postaje uključivanje energetske infrastrukture u infrastrukturu neposrednog i šireg okruženja, te diversificiranje opskrbe novim izvorima i osiguranje novih pravaca uvoza. Glavni razlozi za stvaranje strateških zaliha nafte proizlaze iz temeljne potrebe osiguranja dobave nafte u svim mogućim okolnostima, odnosno osiguranja opskrbe domaćeg tržišta čak u slučaju privremenog prekida stalne dobave nafte s međunarodnih tržišta.

Razvijene zemlje uvoznice nafte već nekoliko desetljeća nastoje opasnosti i potencijalne nestabilnosti međunarodnog naftnog tržišta, kao i njihovo djelovanje na nacionalna energetska tržišta i sustave, umanjiti stvaranjem strateških zaliha nafte [6]. Strateške zalihe nafte organizirane su u obliku logističkog i komercijalnog sustava za uskladištenje određenih količina sirove nafte, koji je pod nadzorom državnih institucija ili tvrtki s javnim nadzorom koje omogućuju skladištenje sirove nafte i njezino puštanje na tržište u slučaju poremećaja [5]. Sustavom strateških zaliha nafte se u slučaju prekida ili smanjene opskrbe domaćeg naftnog tržišta, omogućuje dobava dodatnih količina nafte za osiguravanje normalne opskrbe tijekom trajanja tržišnog poremećaja, odnosno poremećaja uvoza nafte redovitim sredstvima i mehanizmima [7]. Dosadašnje iskustvo pokazalo je kako zemlje uvoznice nafte, koje imaju strateške zalihe nafte, zajedno s obveznim zalihama naftnih derivata, imaju visok stupanj sigurnosti opskrbe naftom i to je značajna komponenta energetske, gospodarske i ukupne nacionalne sigurnosti [8].

4 PROCJENA UGROŽENOSTI HRVATSKOG GOSPODARSTVA U POGLEDU MOGUĆIH PREKIDA DOBAVE NAFTE

Hrvatska samo djelomično podmiruje svoje potrebe za energijom proizvodnjom nafte i prirodnog plina, dok veći dio uvozi. Vlastita opskrbljenost ukupnom primarnom energijom je 1988. godine iznosila 65 %, 2000. godine 50 %, a 2005. godine oko 45 %. Prema predviđanjima, prateći dosadašnji trend smanjenja, 2030. godine vlastita opskrbljenost ukupnom primarnom energijom će iznositi svega 21 % do 23 %. S obzirom na na-

3 REASONS FOR STRATEGIC OIL RESERVES

Based on the presented estimates, in the period between 2020 and 2030, the share of domestic production in the settlement of energy requirements will continue to fall and, because of that, the dependence of Croatia's economy on imported oil will grow and constitute over 90 % of total oil requirements after year 2020. After 2020, what becomes especially important is the inclusion of the energy infrastructure into the infrastructure of the direct and wider environment and the diversification of the supply with new sources and provision of new import routes. The main reasons for creating strategic reserves arise from the basic need of insurance of oil supply in all possible circumstances, that is, insurance of supply for the domestic market, even in the case of temporary disruption of continuous oil supply from international markets.

For several decades now, developed oil importing countries have been trying to ameliorate the dangers and potential instabilities of the international oil market, as well as their impact on national energy markets and systems, by creating strategic oil reserves. Strategic oil reserves are organized in the form of a logistic and commercial system for storage of certain quantities of crude oil and the release thereof onto the market in case of disruption. In case of disruption or decreased supply of the domestic oil market, the system of strategic oil reserves enables the supply of additional oil quantities for insurance of normal supply for the duration of market disruption, that is, for the duration of the disruption of oil import by regular means and mechanisms. The experience so far has shown that oil importing countries, which have strategic oil reserves, along with mandatory oil derivatives reserves, also have a high level of oil supply security and that is an important element of the energetic, economic and overall national security.

4 ESTIMATE OF THE ENDANGERMENT OF CROATIA IN VIEW OF POSSIBLE OIL SUPPLY DISRUPTIONS

Croatia settles its requirements for energy sources only partially by oil and natural gas production while it imports the larger part thereof. Own supply of overall primary energy amounted to 65 % in 1988, 50 % in 2000, and about 45 % in 2005. According to the estimates, and following the former decrease trend, in 2030 own supply of overall primary energy will amount to only 21 % to 23 %.

vedena predviđanja, vidljivo je da će Hrvatska sve više ovisiti o uvozu energenata, prvenstveno nafte. Nakon 2015. godine, proizvodnja nafte će značajnije padati, a uvoz intenzivno rasti. Iz sve veće uvozne zavisnosti proizlazi i porast osjetljivosti energetskog sektora i time cjelokupnog gospodarstva RH o zbivanjima i mogućim poremećajima na međunarodnim tržištima energije. Izloženost gospodarstva Hrvatske oscilacijama međunarodnih energetskih tržišta nakon 2015. godine raste, kad se ocjenjuje da će uvoz nafte prijeći 85 % potreba, te posebno nakon 2020. godine, kad će uvoz nafte premašivati 90 % domaćih potreba, te se ocjenjuje da raste i ugroženost gospodarstva u pogledu mogućih prekida doba ve nafte [3].

Za funkcioniranje pouzdanog i održivog energetskog sektora, potrebno je osigurati strateške zalihe nafte i u skladu s time ugovoriti nove količine za dobavu prema postojećim planovima razvoja transportnog sustava i potrošnje, kako bi se u postojećim tržišnim i međunarodnim geopolitičkim prilikama osiguralo maksimalno moguće unaprjeđenje energetske sigurnosti Hrvatske. Cilj je osigurati organizacijske pretpostavke, planove i mjere za razvitak strateških zaliha nafte, pri čemu su tri glavne funkcije strateških zaliha. Sigurnosna, u smislu povećanja sigurnosti opskrbe naftom i podizanja energetske sigurnosti, gospodarska, budući da strateške zalihe stabilizirajuće djeluju na gospodarstvo i njegov položaj u okruženju, te geopolitička, zbog stvaranja konkurentskih prednosti gospodarstva Hrvatske u odnosu na svoje neposredno okruženje.

5 ZAKLJUČAK

U smislu osiguravanja opskrbe naftom u Hrvatskoj je potrebno osposobljavanje energetskog sustava, prvenstveno Hrvatske agencije za upravljanje zalihama naftnih derivata (HANDA) za pripremu, organizaciju i uspostavu sustava za strateške zalihe nafte, te osposobljavanje domaćih kompanija INA, JANAF, i drugih za stvaranje infrastrukturnih pretpostavki formiranja strateških zaliha nafte. Nadalje je potrebna prilagodba organizacijskog i financijskog sustava strateških zaliha u skladu sa zakonskim i drugim propisima.

Prosudba potrebnih skladišnih kapaciteta izvršena je prema projekciji kretanja buduće potrošnje nafte u Hrvatskoj, a uzimajući u obzir minimalno potrebne skladišne kapacitete kao početak razvitka strateških zaliha do razine od 90-dnevne procijenjene godišnje potrošnje nafte. Kako bi se omogućio razvoj strateških zaliha nafte potrebno je osigurati dodatne skladišne kapacite-

Considering the above predictions, it is obvious that Croatia will increasingly depend on the import of energy sources, oil primarily. After year 2015, oil production will fall more significantly, and import will grow intensively. The increasingly extensive dependence on import also gives rise to an increased sensitivity of the energy sector and therefore of the entire economy of Croatia to the events and possible disruptions on international energy markets. Croatia's exposedness to the oscillations of international energy markets after year 2015 rises, when it is estimated that oil import will exceed 85 % of requirements, and especially after 2020, when oil import will exceed 90 % of domestic requirements. Endangerment of the economy in view of possible oil supply disruptions is also estimated as growing.

The functioning of a reliable and sustainable energy sector requires the insurance of strategic oil reserves and, in accordance with that, the contracting of new supply quantities according to the existing plans of development of the transport system and consumption, so as to enable the maximum possible improvement of Croatia's energy supply security in the existing market and international geopolitical circumstances. The objective is to provide organizational assumptions, plans and measures for the development of strategic oil reserves, whereat there are three main functions of strategic reserves. The security function, in the sense of increased security of oil supply and improving the level of energy security; the economic function, because strategic reserves have a stabilizing effect on the economy and its position in the environment; and the geopolitical function, because of creation of competitive advantages of Croatia's economy in relation to its direct environment.

5 CONCLUSION

For the purpose of insuring oil supply in Croatia, it is necessary to capacitate the energy system, primarily the Croatian Agency for Oil Derivatives Reserves Management (HANDA) for the preparation, organization and establishment of a system for strategic oil reserves, and to capacitate domestic companies INA, JANAF, and other for the establishment of infrastructural assumptions for the formation of strategic oil reserves. Furthermore, an adjustment of the organizational and financial strategic reserves system in accordance with legal and other regulations is also necessary.

The estimate of necessary storage capacities has been performed according to the projection of future oil consumption fluctuation in Croatia, and that by taking into consideration the minimum necessary storage capacities as the beginning of the development of strategic reserves up to the

te. Ukupne potrebe za skladišnim kapacitetima procjenjuju se na 1,4 milijuna tona u 2012. godini te oko 1,55 milijuna tona 2020. godine, što odgovara ukupno potrebnim skladišnim kapacitetima oko 1 640 000 m³ 2012. godine, odnosno 1 820 000 m³ 2020. godine.

Također je potrebna izgradnja skladišnih kapaciteta za osiguranje 90-dnevnih potreba Hrvatske do 2012. godine, što uz postojeće skladišne kapacitete od 960 000 m³ ili oko 820 000 tona, nalaže izgradnju kapaciteta za novih 600 000 tona ili 700 000 m³ do 2012. godine, te razvoj dodatnih skladišnih kapaciteta i izgradnju novih skladišta od daljnjih 150 000 tona ili oko 180 000 m³ nakon 2012. do 2020. godine.

Osnivanje značajnijih kapaciteta za strateške залиhe nafte ili za međunarodnu ponudu skladišnih kapaciteta zahtijevala bi obilnije dimenzioniranje skladišta i skladišnih kapaciteta.

level of 90-day estimated annual oil consumption. In order to enable the development of strategic oil reserves, it is necessary to insure additional storage capacities. Total requirements for storage capacities are estimated at 1,4 million tons in 2012, and about 1,55 million tons in 2020, which suits the totally necessary storage capacities of about 1 640 000 m³ in 2012, that is, 1 820 000 m³ in 2020.

The construction of storage capacities for the insurance of 90-day Croatia's requirements up to 2010 is also necessary, and this, along with the existing storage capacities of 960 000 m³ or about 820 000 tons, requires the construction of capacities for another 600 000 tons or 700 000 m³ until 2012, and the development of additional storage capacities and construction of new warehouses of another 150 000 tons or about 180 000 m³ after year 2012 and up to 2020.

Creation of significant capacities for strategic oil reserves or for the international offer of storage capacities would require a more extensive dimensioning of the warehouse and storage capacities.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] ADAMS, N., *Terrorism & Oil*. PennWell, Tulsa, 2002
- [2] DEKANIĆ, I.; KOLJUNDŽIĆ, S.; KARASALIHVIĆ, D., *Stoljeće nafte: Veza između nafte, novca i moći koja je promijenila svijet*. Drugo izmijenjeno i dopunjeno izdanje. Naklada Zadro, Zagreb, 2004.
- [3] Republika Hrvatska, Ministarstvo gospodarstva, rada i poduzetništva, *Energija u Hrvatskoj, Godišnji energetski pregled 2006.*, Zagreb, 2007.
- [4] Ministry of Economy, Labor and Entrepreneurship, *Prilagodba i nadogradnja Strategije energetskog razvitka Republike Hrvatske, Nacrt Zelene knjige*, Zagreb, (2008-07-17)
- [5] Energy Information Administration, *Official Energy Statistics from the U.S. Government*; <http://www.eia.doe.gov/> (2008-09-21)
- [6] BP Statistical Review of World Energy 2008, <http://www.bp.com> (2008-10-12)
- [7] A European Strategy for Sustainable, Competitive and Secure Energy, COM (2006), http://ec.europa.eu/energy/green-paper-energy/index_en.htm (2008-04-28)
- [8] The National Security Strategy of the United States of America, The White House, Washington, March, 2006 <http://whitehouse.gov>. (2006-03-20)

Adrese autora:

Doc. dr. sc. **Daria Karasalihović Sedlar**
daria.karasalihovic-sedlar@rgn.hr
Prof. dr. sc. **Igor Dekanić**
igor.dekanic@rgn.hr
Dr. sc. **Lidia Hrnčević**
lidia.hrncevic@rgn.hr
Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Pierottijeva 6
10000 Zagreb
Hrvatska

Authors' Adresses:

Assistant Prof. **Daria Karasalihović Sedlar**, PhD
daria.karasalihovic-sedlar@rgn.hr
Prof. **Igor Dekanić**, PhD
igor.dekanic@rgn.hr
Lidia Hrnčević, PhD
lidia.hrncevic@rgn.hr
University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum
Engineering
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb
Croatia

Uredništvo primilo rukopis:
2009-01-22

Manuscript received on:
2009-01-22

Prihvaćeno:
2009-02-05

Accepted:
2009-02-05

DUGOROČNI IZGLED CIJENA NAFTE I PLINA LONG-TERM PROSPECT OF OIL AND GAS PRICES

Nikica Grubišić, Zagreb, Hrvatska

Otkad je tržišta, izražen je interes za spoznajom budućeg kretanja cijena. Onaj, čija je spoznaja bila bliža ostvarenju, bio je u višestrukoj prednosti pred drugim sudionicima tržišne utakmice. Kad je riječ o nafti, sve to postaje još zanimljivije. Nafta je vjerni pratilac cikličkog razvoja kapitalizma, a zarade na promjeni cijene nafte postale su veće od zarade na samoj proizvodnji nafte. Stoga je u ovom radu pokušano sagledati dugoročni izgled cijena nafte i plina kroz analizu tržišta kapitala, a ne kroz složene ekonometrijske modele, kako je to uobičajeno.

Ever since the market was formed, people have been interested in the future prices fluctuations. The one whose cognition was closer to the realization had leverage in comparison to other participants of the market competition. When it comes to oil, it becomes all the more interesting. Oil is a loyal companion of the cyclic development of capitalism, and earnings from changes in oil prices have become greater than the earnings from the production itself. Therefore, this paper endeavours to consider the long-term oil and gas prices prospect through capital market analysis rather than through the usual complex econometric models.

Ključne riječi: izgled cijena; nafta; plin; faktori determinacije
Key words: prices prospect; oil; gas; determination factors



Diesel

1 UVOD

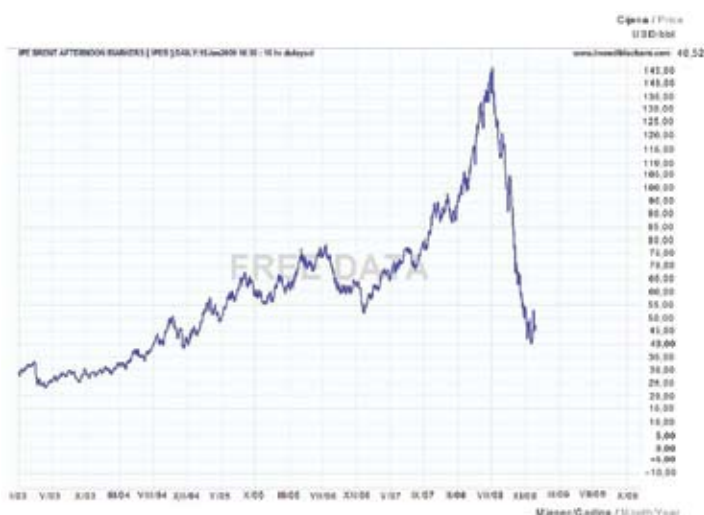
Velike oscilacije cijena nafte na svjetskom tržištu, relativno brže i značajnije od početka sedamdesetih godina, kao bogom su dane za izradu različitih scenarija budućih zbivanja i cijena nafte i plina na svjetskom tržištu.

Autori scenarija, uglavnom američki, gotovo se natječu u pogađanju i griješenju oko očekivanih kretanja cijena nafte (slika 1). To stoga jer je atraktivno (stvar prestiža), ali i nemoguće pogoditi kretanje cijena nafte (zbog neočekivanih faktora utjecaja i problem njihove kvantifikacije), tako da im je bila osigurana dugotrajna i zabavna igra. Razlog tome je što se ne zarađuje samo na proizvodnji nafte, već i na njejoj cijeni. Točnije, na promjeni te cijene. A zarade na promjeni cijene su velike, koji puta veće od zarade na samoj proizvodnji nafte.

1 INTRODUCTION

Significant oscillations of prices on the world market, which are relatively quicker and more significant than they were at the beginning of the seventies, are as if god-given for the elaboration of different scenarios of future events and oil and gas prices on the world market.

Authors of scenarios, mostly Americans, are almost competing in guessing and mistaking the expected prices fluctuations (Figure 1). That is because it is attractive (a matter of prestige) but also impossible to guess the oil prices fluctuations (because of unexpected impact factors and the problem of their quantification), so that they will surely be enjoying a lasting and fun game. The reason for that is the fact that oil production is not the only source of profit, but its price as well. More precisely, the change of that price. And profits from price changes are great, sometimes even greater than the profits from oil production itself.



Slika 1 — Kretanje cijene nafte Brent [2]
Figure 1 — Oil prices fluctuations Brent [2]

Nakon puno godina igranja, promatrači su, izgleda, postali svjesni nemogućnosti točne procjene zbivanja na svjetskom tržištu nafte. Jedan od direktora Agencije za energetiku OECD-a (Georg Lamsden) na pitanje o očekivanoj cijeni barela nafte, sad već davne 1991. godine odgovorio je, kako se točan odgovor može dobiti samo u raj za budale. Osobno bih otišao tako daleko i oprezno se suglasio s najmudrijim stručnjacima koji predviđaju da će se cijene nafte kretati između 20 USD/bbl i 150 USD/bbl.

Unatoč oprečnim mišljenjima o procjenjivanju kretanja cijena nafte, znanstveno je moguće

After years of playing the game, the spectators have apparently become aware of the impossibility to estimate accurately the events on the world oil market. When asked about the expected price of the oil barrel, one of the directors of the International Energy Agency of the OECD (Georg Lamsden), as early as in 1991, replied that the exact answer can only be gained in fool's paradise. I would personally go that far and carefully agree with the wisest experts who predict that oil prices will fluctuate between 20 USD/bbl and 150 USD/bbl.

In spite of contradictory opinions on the estimations of oil prices fluctuations, it is scientifically possible

odrediti granice, unutar kojih se, uz određenu vjerojatnost, može očekivati njeno kretanje. Da bi uz visoku vjerojatnost te granice bile što bolje pogođene (što preciznija procjena), nužno je identificirati i kvantificirati faktore koji determiniraju kretanja cijena nafte, te ekonometrijskim modelima izvršiti procjene.

2 GRANICE RASPONA CIJENE

Minimalna cijena, određena je uvijek (za oskudne resurse) maksimalnim (graničnim) troškovima proizvodnje, uvećanim za profit. Isti zakon vrijedi i za donju granicu cijene nafte. Tu granicu će uvijek određivati troškovi proizvodnje posljednje potrebne, dakle najskuplje, jedinice proizvedene nafte.

Za razliku od minimalne cijene, koja je određena troškovima proizvodnje nafte, maksimalna cijena je određena platežnom spremnošću (sposobnošću) potrošača naftnih derivata, koja se obično iskazuje kroz elastičnost tražnje derivata nafte.

Cijene će se uvijek kretati unutar tih dviju granica. Problem je jedino u tome što su maksimalni troškovi proizvodnje nafte uvijek puno niži od platežne spremnosti potrošača. Upravo zbog veličine te razlike, prisutne su i velike oscilacije cijena. Ta činjenica pospješuje trgovinu s cijenama (ugovorima).

U uvjetima krize dolazi do kontrakcije potrošnje, smanjuje se potražnja, pa se i granična proizvodnja troškovno pomiče naniže. S njome, naniže se pomiče i minimalna cijena. U uvjetima gospodarske ekspanzije, različitim financijskim instrumentima povećava se platežna spremnost potrošača, jača trgovina ugovorima, a s time ekspandira i maksimalna cijena nafte. Dakle, dok je minimalna cijena nafte određena realnim faktorom, troškom, maksimalna cijena nafte određena je tržišnim, špekulativnim parametrima.

Na slici 1 se vidi da su uspostavljene granice fluktuacije cijene nafte između 30 USD/bbl i 150 USD/bbl. U regularnim uvjetima cijena nafte će fluktuirati u tom rasponu. Izvanredne okolnosti u uvjetima krize ili prosperiteta mogu odrediti i širi okvir fluktuacije.

3 FAKTORI DETERMINACIJE

Pri sagledavanju budućeg kretanja cijena nafte (i plina) na svjetskom tržištu nužno je lučiti

to determine the boundaries within which, with a certain probability, their fluctuation can be expected. In order to guess as closely as possible those boundaries with a high level of probability (the most detailed estimate possible), it is necessary to identify and quantify the factors which determine the oil prices fluctuations, and to undertake estimations by virtue of econometric models.

2 BOUNDARIES OF PRICE RANGES

Minimum price is always determined (for scarce resources) by maximum (cut-off) production costs increased by profit. The same rules apply to the lower oil price boundary. That boundary will always be determined by production costs of the last required, that is, of the most expensive unit of the produced oil.

Unlike the minimum price which is determined by oil production costs, the maximum price is determined by the paying capacity of the consumers of oil derivatives, and this capacity is usually shown through the elasticity of demand for oil derivatives.

The prices will always fluctuate between those two boundaries. The only problem is that maximum oil production costs are always significantly lower than the consumers' paying capacity. Exactly due to the extent of that difference, great price oscillations are also present. That fact enhances the price (contract) trade.

In the circumstances of crisis, there occurs a contraction of consumption, demand decreases, and so, in view of costs, the cut-off production also moves downward. And with the cut-off production, the minimum price moves downward as well. In the circumstances of economic expansion, various financial instruments are used to increase the consumers' paying capacity, strengthen the contract trade, and concurrently expand the maximum oil price as well. Therefore, while the minimum price of oil is determined by the real factor - the cost, the maximum price of oil is determined by the market - the speculative parameters.

Figure 1 shows that oil price fluctuation boundaries have been set up between 30 USD/bbl and 150 USD/bbl. In regular conditions, the price of oil will fluctuate within that range. Extraordinary conditions in the circumstances of a crisis or prosperity may determine a wider fluctuation range.

3 DETERMINATION FACTORS

When contemplating the future oil (and gas) price fluctuation on the world market, it is necessary to

kratkoročne poremećaje od dugoročnih faktora determinacije kretanja na svjetskom tržištu nafte (i plina) (slika 2).

Kratkoročne poremećaje čine razni oblici prirodnog ili društvenom podrijetla, lokalnog karaktera, bez mogućnosti značajnijeg utjecaja na globalna zbivanja, na svjetskom tržištu nafte (i plina). Premda kratkoročno mogu dovesti do manjih ili većih poremećaja na svjetskom tržištu nafte (i plina), ti faktori nisu od većeg značenja pri sagledavanju dugoročnih kretanja cijena nafte (i plina).

Dugoročni, tj. faktori determinacije kretanja na svjetskom tržištu su od presudne važnosti za kretanja cijena nafte i plina.

Zapadnim ekonomijama, posebno privredi SAD, imanentni su izraženi ciklusi u razvoju. Američki ekonomisti su, uglavnom prestrukturiranjem privrede, uspijevali prilično dobro rješavati probleme recesije, u prošlom stoljeću.

Kao i više puta prije toga, tijekom 1990. godine, američki ekonomisti su ustanovili prve znakove nadolazeće recesije. Došlo je do pada privredne aktivnosti, rasta nezaposlenosti i inflacije. To je bio dovoljan znak State Departmentu da se mora pozabaviti s vrlo ozbiljnim problemom. Kako je tijekom 80-tih godina već izmijenjena gotovo cjelokupna privredna struktura zemlje, to je ta mogućnost u svrhu oživljavanja privrede, ovaj puta isključena. Vrlo prikladno, međutim, moglo je poslužiti iznalaženje tržišta koje će apsorbirati velike količine industrijskih proizvoda. I krenulo je s tzv. globalizacijom. Mobilnost proizvodnih faktora pogodovala je njihovu seljenju na jeftinija područja, ponajviše u Kinu, Indiju i istočnu Europu.

Ako se uz to ostvari još i jeftina energija, onda je uspjeh siguran. Smanjenjem troškova proizvodnje pridonosi se eliminaciji razornog djelovanja (troškovne) inflacije po razvijene zapadne ekonomije. Tako je i bilo. Stvorena su golema nova potrošačka područja, i kapitalizmu je bilo zagarantirano preživljavanje idućih 1 do 2 krizna ciklusa (8 do 16 godina).

Novi krizni ciklus, uslijedio je 2000. do 2003. godine. Riječ je o tzv. dot-com krizi, i relativno je lako svladana. Novi ciklus gospodarskog rasta vrlo brzo je dosegao prethodne vrhunce. Financijska aktivnost razvila se do neslućenih razmjera. Obilje raspoloživa novca pogodovalo je rastu potražnje, širenju financijske industrije, ali i zapostavljanju realnog sektora gospodarstva. Bila je to klica nove krize.

excrete short-term disturbances from long-term fluctuation determination factors on the world oil (and gas) market (Figure 2).

Short-term disturbances include various forms of natural or social origin and local character, without the possibility of significant impact on global events on the world oil (and gas) market. Although in the short-term they may lead to minor or greater disturbances on the world oil (and gas) market, those factors are not of greater significance when contemplating long-term oil (and gas) prices fluctuations.

Long-term factors, that is, determination factors of world market fluctuations, are of key importance for fluctuations of oil and gas.

Pronounced development cycles are immanent to western economies, especially to the economy of the USA. In the past century, mostly by re-structuring the economy, the American economists have been quite successful in solving the recession problems.

Just as many times before, during 1990, American economists established the first signs of the upcoming recession. There occurred a fall in the economic activity, growth in unemployment and inflation. That was a sign indicative enough for the State Department to realize that they have to deal with a very serious problem. As almost the entire economic structure of the country had been modified during the 80s, that possibility for the purpose of revival of economy is excluded this time. However, finding a market which would absorb great amounts of industrial products could have been very expedient. And the so-called globalization was launched. The mobility of production factors favoured their moving to cheaper regions, mostly to China, India and Eastern Europe.

If cheap energy is also realized along with that, then success is ensured. The reduction of production costs contributes to the elimination of the destructive effect of the (cost) inflation on the western economies. And that is what happened. Enormous new consumer areas were created and capitalism was guaranteed to survive the next 1 to 2 crisis cycles (8 to 16 years).

The new crisis cycle ensued in 2000 to 2003. The matter at hand is the so-called dot-com crisis and it was overcome relatively easily. The new cycle of economic growth reached the peaks of the previous period very quickly. Financial activity developed to unexpected proportions. An abundance of available money favoured the growth of demand, expansion of the financial industry but also the neglecting of the real economy sector. That was the seed of the new crisis.



Slika 2 — Kretanje vrijednosti S&P 500 indeksa [2], [3]
Figure 2 — S&P 500 index value fluctuation [2], [3]

A onda je uslijedila aktualna kriza. Greška u financijskoj sferi (zbog kolapsa hipotekarnog tržišta u SAD-u) dovela je do otkrivanja svih sustavnih slabosti. Bez kvalitativno novih proizvoda, realni sektor ostajao je bez jednog po jednog dijela potražnje, pa je i sam završio u krizi [1].

Gotovo nulte kamate na kratkoročne pozajmice novca američkoj državi ukazuju na prestanak međusobnog financiranja banaka, odnosno gospodarstva od strane banaka. Tek kad počne rasti potražnja za novcem, doći će i do oživljavanja gospodarske aktivnosti u SAD-u, a prva indikacija će biti porast kratkoročnih kamatnih stopa.

And then the present crisis ensued. A mistake in the financial sphere (because of the collapse of the mortgage market in the USA) brought about the uncovering of all system weaknesses. Without qualitatively new products, one by one, the real sector remained without parts of the demand and ended up in crisis itself [1].

Almost zero interest on short-term money loans indicated to USA that the inter-financing of the banks, that is, the financing of the economy by the banks came to a stop. A revival of the economic activity in the USA will not happen before the demand for money starts to increase, and the first indication of this will be the growth of short-term interest rates.



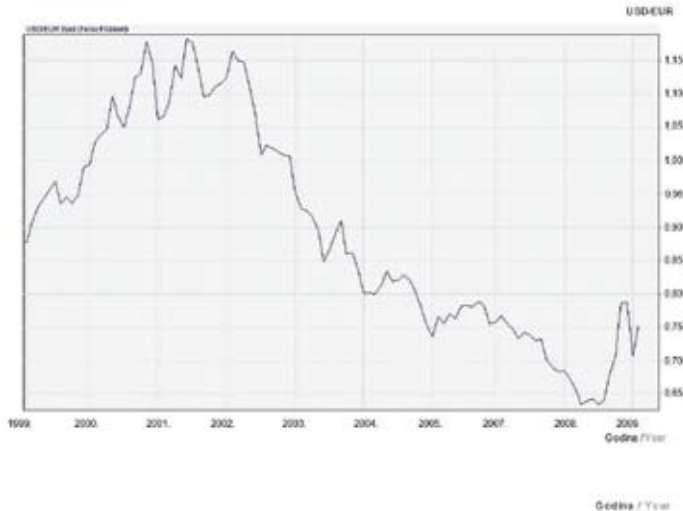
Slika 3 — Kretanje kamatne stope na 3-mjesečne trezorske zapise u SAD [2]
Figure 3 — Fluctuations of interest rates on 3-month treasury securities in USA [2]

Jedan od najznačajnijih faktora determinacije je USD (američki dolar) obračunska i valuta plaćanja u svjetskoj trgovini naftom. Iz ove konstatacije, uočljiva je dihotomija dolara, i to, kao nacionalne valute SAD-a i kao obračunske i valute plaćanja u svjetskoj trgovini naftom.

Dakle, politikom tečaja, SAD preko dolara izravno mogu i utječu na cijenu nafte.

One of the most important determination factors is the USD (American dollar) accounting and payment currency in world oil trade. This fact also reveals the dichotomy of the dollar, and that both as the USA national currency, and as the accounting and payment currency in world oil trade.

Therefore, by virtue of the currency politics, the USA can and do directly influence the price of oil.



Slika 4 — FOREX paritet USD/EUR [2]
Figure 4 — FOREX USD/EUR parity [2]

Primjerice, sredinom prošle godine cijena američkog dolara je pala ispod 0,7 EUR. Na taj način je realna vrijednost nafte bila značajno niža od njene nominalne vrijednosti (u to doba iznad 100 USD/bbl).

Pored svjesne politike vlade SAD-a u ostvarivanju svojih interesa politikom tečaja dolara, na vrijednost dolara, pa dakle i na cijenu nafte, izravno utječu i privredne i budžetske prilike SAD-a.

Zbog učestalog ponavljanja, kao faktor determinacije, može se promatrati i nedisciplina članica OPEC-a u pridržavanju dogovorenih proizvodnih kvota. Upravo to je bio osnovni uzrok učestalog narušavanja odnosa ponude i potražnje nafte s izravnim reperkusijama na ravnotežnu cijenu nafte na svjetskom tržištu.

Rast cijena nafte još tamo, od početkom 70-tih godina, donio je veliki kapital zemljama izvoznicama nafte, ali je doveo i do sve veće supstitucije nafte (u potrošnji) gdje je to bilo moguće (svugdje osim u transportu), pa i do intenziviranja procesa razvoja energetske racionalnijih tehnologija.

Istodobno, rast cijena nafte, omogućio je racionalnu proizvodnju nafte i onim zemljama, izvan

For example, in the middle of last year, the price of the American dollar fell below 0,7 EUR. Thus the real oil value was significantly lower than its nominal value (higher than 100 USD/bbl at that time).

The value of the dollar, and therefore the price of oil as well, is not only influenced by the purposeful politics of the US Government in attainment of their interests by virtue of the dollar currency politics, but these are also directly influenced by economic and budgetary circumstances in the USA.

Because of the frequency of repetition, the lack of discipline of the OPEC member states in complying with the agreed production quotas can also be viewed as a determination factor. This was the very reason of frequent disturbances of the oil offer and demand ratio, with direct repercussions on the balanced oil price on the world market.

Back in the beginning of the 70s, the growth of oil prices brought great capital to the oil exporting states, but it also brought about increasing substitution of oil (in consumption) wherever possible (everywhere except in transport), and even intensified the development process of energetically more rational technologies.

OPEC-a, gdje se to do tada nije isplatilo, zbog visokih troškova eksploatacije.

Osnovni ekonomski interes SAD-a je jaka i sve jača privreda zemlje, s ulogom nosioca svjetskog privrednog razvoja. Za to je nužna stabilnost uvjeta privređivanja, prije svega kroz stabilnu cijenu energije, koju je moguće ostvariti kroz stabilne odnose ponude i potražnje na svjetskom tržištu energenata.

Tom interesu sučeljen je interes dijela zemalja izvoznica nafte. Privredno nerazvijene zemlje, ili manje razvijene zemlje, težile su za samostalnim raspolaganjem nad vlastitim izvorima mineralnih sirovina i profitima od njihove eksploatacije, prije svega od nafte.

Na kraju, svemu tome treba suprotstaviti interese sudionika financijskih tržišta. Obično se u predkriznim vremenima pojačava trgovina ugovorima radi kompenzacije gubitaka iz realnog sektora. Uz hranu, najprikladnija za to je nafta, zbog relativno niske cjenovne elastičnosti potrošnje. Kad kompenzacija ne uspije, ulazi se u krizu. Paralelno s time kontrahira trgovina ugovorima i cijena nafte svodi se na minimalnu, troškovno definiranu.

4 PREDVIDIVI FAKTORI DETERMINACIJE ZA BUDUĆE RAZDOBLJE

Za razliku od ranijih kriza svijet je u 2009. godinu ušao u pratnji dvaju ekonomskih problema, smanjene privredne aktivnosti (recesije) i smanjenja cijena. Kao posljedica tih dvaju faktora javlja se pad zaposlenosti, a sve ozbiljnija postaje i prijetnja deflacije. Za razliku od prethodnih kriznih situacija, s inflacijom, za ovaj slučaj ne postoje isprobani recepti ozdravljenja gospodarstva.

Do sada su već aktivirane gotovo sve kratkoročne mjere (smanjenje kamatnih stopa, emisije novca, državni otkup dugova, državna financijska pomoć bankama i poduzećima) – tek s manjim uspjehom na ublažavanju posljedica gospodarske kontrakcije.

U takvim okolnostima izvjesno je daljnje kontrahiranje gospodarske aktivnosti, pa i potražnje za naftom.

Uz nepromijenjene uvjete gospodarsko oživljavanje moguće je očekivati u idućih 3 do 5 godina, kao posljedicu rasta potražnje za trajnijim robama koje će u međuvremenu biti zamijenjene novima, zbog dotrajalosti.

At the same time, the growth of oil prices enabled more rational oil production in those countries as well, outside of OPEC, where it was formerly unprofitable due to high exploitation costs.

USA's basic interest is a strong, and increasingly stronger, national economy, with the role of the carrier of the world economic development. That requires stable economic conditions, primarily through stable energy prices which can be achieved by stable offer and demand ratios on the world energy sources market.

The said interest is confronted by the interest of a part of the oil exporting states. Economically undeveloped countries or less developed countries strived for an independent disposal of own mineral raw material sources and profits from their exploitation, primarily from oil.

Finally, all of this should be confronted by the interests of the participants of the financial markets. In the pre-crisis periods, the contract trade usually intensifies for the purpose of compensation of losses from the real sector. Besides food, oil is the most suitable instrument for that purpose because of its low consumption price elasticity. When the compensation is unsuccessful, a crisis emerges. Simultaneously, contract trade contracts, and the price of oil drops to the minimum, cost-defined, price.

4 PREDICTABLE DETERMINATION FACTORS FOR THE FUTURE PERIOD

Unlike the former crises, the world entered 2009 accompanied by two economic problems - reduced economic activity (recession) and reduced prices. The consequence of those two factors is a fall in employment, and the threat of deflation is also becoming more serious. Unlike the former crisis situations, with inflation, there are no tested recipes for this case – for the recovery of economy.

So far, almost all short-term measures (reduction of interest rates, money emission, state redemption of debt, state financial aid to banks and companies) have been activated – with only slight success in the amelioration of the consequences of the economic contraction.

In such circumstances, further contraction of economic activity, as well as of oil demand, is certain.

If the conditions do not change, economic revival can be expected in the next 3 to 5 years as a consequence of growth of demand for more durable goods which will be replaced by new ones in the meantime, due to their state of dilapidation.

Alternativa je započinjanje proizvodnje kvalitativno novih dobara. U tom slučaju bi potražnja nastupila odmah, bez odgode. Međutim, kvalitativno novih proizvoda nema, a za eventualni njihov razvoj treba najmanje 3 do 5 godina.

U svakom slučaju za izlazak iz krize, prema sadašnjim okolnostima bit će potrebno 3 do 5 godina. To je razdoblje u kojem, također, nije moguće očekivati značajniji rast potražnje za naftom, pa dakle, niti rast njene cijene.

Kad bi već bilo dotaknuto dno postojeće krize, značilo bi to da je dosegnuta i minimalna cijena nafte, oko 35 USD/bbl.

Međutim, indeks straha – VIX američkog indeksa S&P 500 indicira da je velika vjerojatnost da dno krize još nije dosegnuto (slika 5).

The alternative is to launch the production of qualitatively new goods. However, there are no qualitatively new products and their potential development would require at least 3 to 5 years.

In any case, a solution of the crisis, according to the present circumstances, would require 3 to 5 years. That is also the period in which a more significant growth of oil demand or the growth of its price cannot be expected.

If the bottom of the existing crisis were to be reached, that would mean that the minimum price of oil of about 35 USD/bbl would be reached as well.

However, the fear index - VIX of the S & P American Index indicates that there is great probability that the bottom of the crisis has not been reached yet (Figure 5).



Slika 5 — FIndeks straha – VIX [2]
Figure 5 — Fear Index – VIX [2]

Trenutačno je indeks straha na financijskom tržištu vrlo visok, i nalazi se iznad maksimalne razine, uopće zabilježene, za vrijeme prethodne krize. Tek padom vrijednosti VIX-a ispod 0,17 tehnički će biti potvrđen izlazak iz krize.

Ukoliko doista nije dosegnuto dno aktualne krize, onda nije dosegnuto niti dno cijene nafte.

Eventualnim produblivanjem krize tehnički je za očekivati daljnji pad cijene nafte, sve do 25 USD/bbl (slika 6).

At the moment, the fear index on the financial market is very high and located under the maximum level, ever recorded, of the former crisis. Technically, the end of the crisis will not be confirmed before the VIX value falls below 0,17.

If the bottom of the present crisis has really not been reached, than the bottom of the oil price has not been reached either.

Potential deepening of the crisis could technically bring about a further fall of the oil price all up to the level of 25 USD/bbl (Figure 6).



Slika 6 — Tehnička analiza Kretanje cijene nafte Brent [2]
Figure 6 — Oil Price Fluctuation technical analysis Brent [2]

Nakon dosezanja dna krize, i započinjanja gospodarskog oporavka, uslijedit će i oporavak cijene nafte. Na kraći rok cijena nafte bi mogla porasti do razine oko 50 USD/bbl, odnosno srednjoročno do 70 USD/bbl, otprilike.

Izlaskom iz krize nastupit će ponovno oživljavanje trgovanja cijenama i daljnjeg rasta cijene nafte sve do prethodnih vrhunaca.

Sukladno cikličnosti razvoja američkog gospodarstva vrhunac gospodarskog prosperiteta može se očekivati oko 2017. godine.

5 ZAKLJUČAK

Cijena nafte bila je i ostat će vjerni pratilac zbivanja u svjetskom gospodarstvu. Štoviše, kao jedan od najboljih indikatora zdravlja svjetske ekonomije, napose američke kao vodeće i po veličini i po razvijenosti.

U kraćem dolazećem razdoblju cijena nafte će oscilirati između 25 USD/bbl i 70 USD/bbl, u rastućem trendu. Dugoročno, cijena nafte će biti usmjerena prema 150 USD/bbl.

Može se očekivati da će ponuda nafte na svjetskom tržištu do 2020. godine moći zadovoljiti potražnju. Zalihe i iscrpljivanje plićih i jeftinijih izvora nafte, očekuje se, još uvijek neće značajnije utjecati na razinu postojećih marginalnih troškova proizvodnje. Stoga se ne očekuje niti rast minimalne razine cijena nafte do 2020. godine.

Ocjene kretanja cijena prirodnog plina su ostale u sjeni ocjena kretanja cijena nafte, upravo zbog

After the bottom of the crisis has been reached and the economic recovery has started, the recovery of oil prices will ensue. In the short-term, oil prices might grow up to the level of 50 USD/bbl, that is, to approximately 50 USD/bbl in the middle term.

After the crisis ends, a revival of prices trade and further oil price growth will ensue again all up to the former levels.

Following the cyclicity of the development of the American economy, a peak of the economic prosperity can be expected around 2017.

5 CONCLUSION

The price of oil has always been, and will remain, a loyal companion of the events in the world economy. Moreover, it will remain one of the best indicators of the soundness of world economy, especially American as it is the leading economy both according to size, and to the level of development.

In the shorter upcoming period, price of oil will oscillate between 25 USD/bbl and 70 USD/bbl with an upward trend. In the long-term, the price of oil will move towards 150 USD/bbl.

Oil offer on the world market until 2020 can be expected to successfully meet the demand. Reserves and exploitation of more shallow and cheaper oil sources are not expected to impact significantly the level of existing marginal production costs yet. Therefore, growth of the minimum oil price levels is not expected either until 2020.

toga, jer su cijene prirodnog plina pri međunarodnoj trgovini i razmjeni izravno zavisne o cijenama nafte (derivata nafte). Točnije, o cijeni niskosumpornog loživog ulja, kao derivatu nafte.

Cijene energenata, općenito, nužno moraju biti u međusobnoj korelaciji, kako bi se mjerama ekonomske politike, upravo preko tih cijena, usmjeravala potrošnja pojedinih energenata, ovisno o ciljevima dane ekonomske politike. Takve promjene mogu izazvati samo glavni svjetski potrošači i/ili glavni svjetski proizvođači energenata.

Može se očekivati blago jačanje cijena prirodnog plina prema cijenama nafte, zbog djelovanja niza faktora na rast potražnje za prirodnim plinom, idućih godina. Uz već izgrađenu transportnu infrastrukturu (plinovode), brojnost potrošača i veličinu potrošnje, daljnjem širenju potrošnje pogodovat će i sve veći zahtjevi za energetskom racionalnošću, učinkovitošću i ekološkom uvjetovanošću.

Evaluations of fluctuations of natural gas prices remained in the shadow of the evaluations of fluctuations of oil prices exactly because of the fact that natural gas prices in international trade and exchange directly depend on oil prices (oil derivatives prices). In particular, they depend on the price of low-sulphur fuel oil as the oil derivative. Prices of energy sources in general need to be interrelated in order to use the measures of economic politics to direct the consumption of those sources, exactly by virtue of those prices, depending on the goals of the given economic politics. Such changes can only be caused by main world consumers and/or main world producers of energy sources.

A slight strengthening of natural gas prices towards oil prices can be expected because of the effect of a number of factors on the growth of demand for natural gas in the following years. Further demand expansion will be favoured by not only the already constructed transport infrastructure (gas pipelines), great numbers of consumers and the extent of consumption, but also by increasing demand for energetic rationality, efficiency and ecological conditions.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] Reuters – www.reuters.com
[2] Bloomberg – www.bloomberg.com
[3] Standard & Poor's – www.standardandpoors.com
-

Adrese autora: Authors' Adresses:

| | |
|---|--|
| Mr. sc. Nikica Grubišić nikica.grubisic@ina.hr INA – Industrija nafte d.d. Avenija V. Holjevca 10 10000 Zagreb Hrvatska | Nikica Grubišić , MSc nikica.grubisic@ina.hr INA – Oil Industry, plc Avenija V. Holjevca 10 10000 Zagreb Croatia |
|---|--|

Uredništvo primilo rukopis:
2009-01-21

Manuscript received:
2009-01-21

Prihvaćeno:
2009-01-31

Accepted:
2009-01-31

MODEL PROIZVODNE JEDINICE S UKLJUČENIM UVJETIMA OKOLINE U MODELU POUZDANOSTI I RASPOLOŽIVOSTI ELEKTROENEGETSKOG SUSTAVA POWER PLANT MODEL WITH ENVIRONMENTAL CONDITIONS INCLUDED IN THE ELECTRIC POWER SYSTEM RELIABILITY AND AVAILABILITY MODEL

Mičo Klepo – Vladimir Mikuličić – Zdenko Šimić, Zagreb, Hrvatska

U radu se izlažu rezultati teorijsko-metodološke razrade modela kojim se proizvode jedinice, na čiji rad, odnosno pogonske osobine, a time i raspoloživost i pouzdanost stanje okoline, najčešće nepovoljne atmosferske prilike, uključuju u modele za pouzdanosti i raspoloživosti elektroenergetskog sustava pri operativnim planovima njegova rada. Model proizvodne jedinice s uključenim uvjetima okoline pokraj ovog vremena u izračun pokazatelja pouzdanosti i raspoloživosti elektroenergetskog sustava uvodi i ovisnost o uvjetima okoline u kojima se jedinica nalazi tijekom vremena izlaska iz ovog stanja. U radu se također opisuje i utjecaj ovih uvjeta na pouzdanost i raspoloživost tim uvjetima.

This work presents the results of the theoretical-methodological elaboration of a model by virtue of which the generating units are included in the models for calculation of reliability and availability of the electric power system in the operative plans of its operation. The operation, that is, the operative features of these generating units and therewith also their reliability and availability, are influenced by the state of the environment, mostly by adverse weather conditions. The generating units model with environmental conditions included also introduces into the calculation of indicators of the electric power system reliability and availability, along with the time dependence, the dependence on the environmental conditions which the unit is exposed to during duration of the period of such conditions.

Ključne riječi: dvoparametarski model proizvodne jedinice; model pouzdanosti i raspoloživosti sustava; uvjeti stanja okoline; utjecaj okoline na stanje proizvodne jedinice

Key words: double-parameter generating unit model; system reliability and availability model; environmental state conditions; environmental impact on the state of the generating units



1 UVOD

Opći problem prikupljanja podataka, statističke obrade i izračuna parametara i pokazatelja za uspostavu modela proizvodnih jedinica pri operativnim planiranjima pogona, te načina pristupa i rješenja problema uključivanja proizvodnih jedinica u model pouzdanosti i raspoloživosti elektroenergetskog sustava, do sada su detaljnije obrađeni i izloženi u više radova [1] do [14]. Ovaj rad uvodi uvjete, odnosno stanje okoline kao parametra koji kada prijeđe određenu razinu nepovoljnog utjecaja, ili zbog određenih tehničko-tehnoloških rješenja proizvodnih jedinica, utječe na stanje raspoloživosti i pouzdanosti proizvodne jedinice, a time i raspoloživosti i pouzdanosti elektroenergetskog sustava u cjelini. Uvjeti okoline mogu imati utjecaja na samo jedno proizvodno postrojenje, ali i više njih ako se radi o nepovoljnim atmosferskim prilikama koje zahvaćaju ili djeluju na velikom području. Ipak, pretpostavlja se da je iznimno niska vjerojatnost da nepovoljne atmosferske prilike istodobno zahvate i nepovoljno utječu na veliki broj ili pak sve proizvodne objekte elektroenergetskog sustava.

Pod uvjetima okoline kod elektroenergetskih postrojenja najčešće se podrazumijevaju atmosferske prilike koje ih okružuju. Velik dio opreme, odnosno postrojenja elektroenergetskog sustava, zaštićen je, tj. izoliran od nepovoljnih utjecaja okoline, pogotovo atmosferskih prilika, pa za njih s velikom točnošću vrijedi pretpostavka o konstantnosti učestalosti prijelaza iz stanja u stanje, bez obzira na stanje okoline. Pogotovo to vrijedi za proizvodna i ostala postrojenja smještena u zgradama, podzemnim prostorijama i sl. Međutim, kako su postrojenja pokraj svih zaštitna, a osobito kada tih zaštitna nema, za vrijeme olujnog vremena, grmljavine, padalina s jakim vjetrom, i sl., vrlo često izložena nepovoljnim utjecajima, pretpostavka o konstantnoj učestalosti kvara nije više održiva kada ti nepovoljni utjecaji prijeđu određenu razinu.

2 MODEL JEDNE JEDINICE S UKLJUČENIM UVJETIMA OKOLINE

2.1 Jednostavni model proizvodne jedinice - model bazne jedinice

Model jedinice s dva stanja (slika 1) detaljno je obrađen i izložen u [2], [10] i [12]. To je ujedno i najčešće korišten model budući da pokraj jednostavnosti i potrebnog malog broja podataka najbolje aproksimira neprekidan rad jedinice koja pokriva bazni dio dijagrama opterećenja.

1 INTRODUCTION

So far, the general problem of data collection, statistical analyses and calculations of parameters and indicators for the establishment of the generating unit models in operational planning, and the manner of approaching and solving problems of inclusion of generating units into the electric power system reliability and availability model have been analyzed in more detail and presented in several works [1] to [14]. This work introduces conditions, that is, state of the environment as the parameter which, when it passes the level of adverse impact, or, due to certain technical-technological solutions of generating units, impacts the state of availability and reliability of the generating unit, and therewith the availability and reliability of the electric power system as a whole. Environmental conditions can impact only one generating plant, but also more of them if diverse weather conditions are such that they encompass or affect a wide territory. Still, it is presumed that the probability that adverse atmospheric conditions will simultaneously encompass and negatively impact a large number, or possibly even all the production facilities of the electric power system, is quite low.

The environmental conditions in electric power plants mostly mean atmospheric conditions which surround it. A large portion of the equipment, that is, of the electric power system plant, is protected, that is, insulated from adverse environmental impacts, atmospheric conditions especially, so the assumption of the constancy of the rate of transition from state to state applies to that portion with great accuracy, regardless of the state of the environment. This applies especially to production and all other plants located in the buildings, underground rooms, etc. However, as the plants, with all the protections and even when there are no protections, during stormy weather, thunder, rainfall with heavy winds, etc., are very often exposed to adverse conditions, the assumption on the constancy of the failure rate is no longer sustainable when those impacts exceed a certain level.

2 THE MODEL OF A UNIT WITH ENVIRONMENTAL CONDITIONS INCLUDED

2.1 Simple generating unit model - basic unit model

The unit model with two states (Figure 1) is analyzed in detail and presented in [2], [10] and [12]. This is also the most frequently used model because with the simplicity and small amount of data necessary it approximates best the perpetual operation of the unit covering the basic part of the load diagram.

Sustav linearnih diferencijalnih jednačbi kojima se opisuje Markovljev proces prema tom jednostavnom modelu u općem obliku glasi:

The system of linear differential equations which describes the Markov process according to that simple model in the general form reads:

$$\begin{aligned} \dot{P}_0(t) &= -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t), \\ \dot{P}_1(t) &= \lambda P_0(t) - \mu P_1(t), \end{aligned} \quad (1)$$

gdje je:

where it is as follows:

$\dot{P}_i(t) = \left(\frac{dP_i(t)}{dt}\right)$ derivacija vjerojatnosti stanja i po vremenu t ,

$\dot{P}_i(t) = \left(\frac{dP_i(t)}{dt}\right)$ derivation of the probability of the state i per time t ,

$P_i(t)$ – vjerojatnost stanja i ($i = 0, 1, 2, \dots, n$).

$P_i(t)$ – probability of the state i ($i = 0, 1, 2, \dots, n$)

Uz pretpostavku da je u $t = 0$ jedinica u ispravnom stanju, početni uvjeti glase:

With the assumption that in $t = 0$ the unit is in sound condition, the initial conditions read:

$$\begin{aligned} P_0(0) &= 1, \\ P_1(0) &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

U svakom trenutku mora biti ispunjen uvjet da se proizvodna jedinica mora nalaziti u jednom od stanja u prostoru stanja, tako da jednačba identiteta glasi:

At all times the condition that the generating unit must be in one of the states in the state space must be fulfilled, so that the identity equation reads:

$$P_0(t) + P_1(t) = 1. \quad (3)$$

Gornji sustav linearnih diferencijalnih jednačbi uz početne uvjete (2) ima sljedeće rješenje:

The above system of linear differential equations with the initial conditions (2) has the following solution:

– raspoloživost $A(t)$:

– availability $A(t)$:

$$A(t) = P_0(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}, \quad (4)$$

– neraspoločivost $N(t)$:

– unavailability $N(t)$:

$$N(t) = P_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}. \quad (5)$$

Prijelazni dio funkcije raspoloživosti vrlo brzo teži k nuli, a vremenski trenutak kada se može zanemariti prijelazni dio funkcije u odnosu na stacionarni

The transient part of the availability function gravitates towards zero very soon, and the moment in time when the transient part of the function can be

dio ovisi o veličini učestalosti popravka μ . Općenito, može se uzeti da prijelazno stanje završava nakon vremena $n = t(\lambda + \mu) = 4$, ($t = \frac{4}{\lambda + \mu}$).

Prijelazno stanje završava i prije ukoliko je $\mu > \lambda$, što je kod proizvodnih jedinica elektroenergetskog sustava redovito ispunjeno. Zbog toga se u svim praktičnim proračunima koriste izrazi za stacionarne vrijednosti raspoloživosti i neraspoločivosti, jer se uz zanemarivu pogrešku postiže znatno pojednostavljenje proračuna. Svi daljnji proračuni u ovom radu bit će vezani i odnosit će se na stacionarne vrijednosti raspoloživosti, odnosno neraspoločivosti općeg oblika:

$$P_0 = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = A(\infty) \quad , \quad (6)$$

$$P_1 = \lim_{t \rightarrow \infty} N(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = N(\infty) \quad . \quad (7)$$

Pritom u svakom trenutku mora biti ispunjen osnovni uvjet iz jednadžbe identiteta:

$$A(t) + N(t) = 1 \quad . \quad (8)$$

Izraz za raspoloživost jedinice može se napisati i u obliku:

$$A(\infty) = \frac{1}{1 + \frac{\lambda}{\mu}} = 1 - \frac{\lambda}{\mu} + \dots \approx 1 - \frac{\lambda}{\mu} \quad , \quad (9)$$

što kod visokoraspoloživih jedinica predstavlja vrlo dobru aproksimaciju raspoloživosti.

Parametri modela bazne jedinice u stacionarnom stanju mogu se izračunati iz podataka o pogonu jedne ili više jedinica tijekom dužeg vremenskog perioda. Tako, uvažavajući podatke o stanjima i pokazateljima pogonskih stanja proizvodne jedinice ([10] i [12]), procijenjene ili izračunate vrijednosti ulaznih parametara za model bazne jedinice (slika 1) jesu:

$$\hat{\mu} = \frac{N}{SK} \quad , \quad (10)$$

$$\hat{\lambda} = \frac{N}{SP} \quad , \quad (11)$$

disregarded in relation to the steady part depends on the repair rate μ . In general, it can be assumed that the transient state ends after the time $n = t(\lambda + \mu) = 4$, ($t = \frac{4}{\lambda + \mu}$).

The transient state ends even before in case of $\mu > \lambda$, which is regularly the case with electric power generating units. Because of that, in all practical calculations, expressions for steady values of availability and unavailability are used because, with negligible error level, a significant simplification of the calculation is obtained. All further calculations in this work will be connected and will relate to the steady values of the availability, that is, unavailability in the general form:

Thereat, the basic condition from the identity equation must be fulfilled at all times.

The expression for unit availability can also be written in the form:

and this, in highly-available units, represents very good availability approximation.

Parameters of the steady state basic unit model can be calculated based on the data on the drive of one or more units through a longer period of time. Thus, taking into consideration the data on the states and indicators of the driving states of generating units ([10] i [12]), the estimated or calculated values of input parameters for the basic unit model (Figure 1) are:

$$\hat{P}_0 = \frac{\frac{N}{SK}}{\frac{N}{SK} + \frac{N}{SP}} = \frac{SP}{SK + SP}, \quad (12)$$

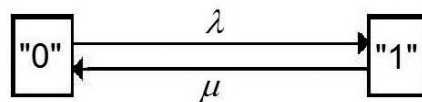
$$\hat{P}_1 = \frac{\frac{N}{SP}}{\frac{N}{SK} + \frac{N}{SP}} = \frac{SK}{SK + SP}, \quad (13)$$

gdje je:

$\hat{\mu}$ – procijenjena ili izračunata vrijednost učestalosti kvara jedinice,
 $\hat{\lambda}$ – procijenjena ili izračunata vrijednost učestalosti popravka jedinice,
 \hat{P}_i – procijenjena vrijednost vjerojatnosti stanja komponente ili sustava i ($i=0, 1, 2, \dots, n$),
 N – broj događaja,
 SK – broj sati ispada iz pogona,
 SP – broj sati pogona.

where it is as follows:

$\hat{\mu}$ – estimated or calculated value of unit failure rate,
 $\hat{\lambda}$ – estimated or calculated value of unit repair rate,
 \hat{P}_i – estimated value of the probability of the state of the component or the system i ($i=0, 1, 2, \dots, n$),
 N – number of occurrences,
 SK – number of hours of outage,
 SP – number of driving hours.



Slika 1 – Shema jednostavnog modela proizvodne jedinice - model bazne jedinice
 Figure 1 – Scheme of the simple production unit model - basic unit model

Oznake:

"0" – stanje spremnosti jedinice za pogon,
 "1" – stanje nespremnosti jedinice za pogon,
 λ – učestalost kvara jedinice,
 μ – učestalost popravka jedinice.

Symbols:

"0" – unit operation condition,
 "1" – unit non-operation condition,
 λ – rate of unit failure,
 μ – rate of unit repair.

Očito je da raspoloživost, odnosno neraspoločivost jedinice prema izrazima (12) i (13) ne ovise o broju ispada iz pogona, tako da se njihove vrijednosti mogu procijeniti direktno iz vremena ostajanja ili zadržavanja u pojedinim stanjima tijekom promatranog vremenskog intervala. U modelu dva stanja vrijeme održavanja uvijek se isključuje iz određivanja rizika ispada iz pogona.

It is obvious that availability, that is, unavailability of the unit according to the expressions (12) and (13) do not depend on the number of outages, so that their values can be estimated directly based on the time of abiding or staying in certain states during the observed time interval. In the two-state model, the maintenance time is always excluded from the determination of the outage risk.

Izraz (13) najčešće se naziva rizikom ispada iz pogona (engl. *Forced Outage Rate* – FOR) i predstavlja procjenu vjerojatnosti ispada iz pogona u bilo kojem slučajno odabranom trenutku. Kvaliteta te procjene najviše ovisi o tipu pogona, tako da statistika pogonskih podataka mora uključivati i vrstu pogona. To dalje znači da bi primjena tog jednostavnog modela

Expression (13) is most usually called Forced Outage Rate and it represents the estimate of the probability of outage at any randomly chosen moment. The quality of such estimate mostly depends on the type of drive, so that the statistics of drive data must include the type of drive as

kod jedinica koje rade u vršnom dijelu dijagrama opterećenja, jedinica koje se češće uključuju i isključuju iz pogona (ciklički rad), jedinica u rezervi ili pripravnosti za pogon, tj. u svim uvjetima koji ne znače kontinuiran pogon pod opterećenjem, dovela do neadekvatne procjene rizika ispada iz pogona.

Međutim, vrlo često neraspoloživost odgovarajućih podataka o pogonu proizvodnih postrojenja potrebnih da bi se izračunalo parametre složenijih modela uvjetuje primjenu upravo tog jednostavnog modela dva stanja, bez obzira što se pogon znatno razlikuje od konstantnog. Jedan od načina da se smanje problemi i netočnosti primjene modela dva stanja koji pritom nastaju jest da se iz promatranja isključe trajanja pripravnosti jedinice za pogon ili stanja rezerve. U tom slučaju sati ispada iz pogona reduciraju se samo na sati ispada iz pogona tijekom vremena potrebe za pogonom. Parametri prema izrazima (10) i (11) računaju se bez sati rezervnog isključenja. Izraz za rizik ispada iz pogona dobiva novi oblik:

well. Furthermore, this means that the application of that simple model in units working in the peak part of the load diagram, units which go on and off from operation more often (cyclic operation), units in standby or state of operation condition, that is, in all the conditions which do not mean a continued operation under load, would bring about an inadequate assessment of outage risk.

However, very often the unavailability of adequate data on the drives of the generating plants necessary for the calculation of the parameters of more complex models conditions the application of exactly that simple two-state model, regardless of the fact that the drive is significantly different from the constant one. One of the ways to decrease the extent of the problems and the inaccuracies in the application of the two-state model which occur thereat is to exclude the durations of the unit's readiness or standby for operation from the observation. In that case, the number of hours of outage is reduced only to the hours of outage during the time when operation is required. Parameters according to the expressions (10) and (11) are calculated without hours of standby shutdown. The expression for forced outage rate assumes a new form:

$$\hat{P}_{1,\text{mod}} = \frac{SK(d/24)}{SP + SK(d/24)}, \quad (14)$$

gdje je $\hat{P}_{1,\text{mod}}$ procijenjena vrijednost rizika ispada iz pogona jedinice samo tijekom sati trajanja potrebe za pogonom.

Prethodni izraz podrazumijeva 24-satni ciklus potrebe za pogonom, tj. d sati potrebe za pogonom svaka 24 sata. Općenito, za bilo koji ciklus vrijedit će izraz:

whereat $\hat{P}_{1,\text{mod}}$ is the estimated value of the unit's forced outage rate only during the hours of necessity for operation.

The above expression implies a 24-hour cycle of necessity for operation, that is d hours of necessity for operation every 24 hours. Generally, for any cycle, the following expression will apply:

$$\hat{P}_{1,\text{mod}} = \frac{k \cdot (SK)}{SP + k \cdot (SK)}, \quad (15)$$

gdje je:

$k = d/(d + v)$ – faktor korekcije,
 d – sati potrebe za pogonom tijekom ciklusa koji traje $d + v$ sati,
 v – vrijeme koje jedinica provede u rezervi između perioda potrebe za pogonom.

Faktor korekcije k uvodi se kako bi se pri proračunu parametara uvažila pretpostavka da ispad jedinice iz pogona, tj. njezin kvar može započeti samo tijekom vremena opterećenja jedinice.

where it is as follows:

$k = d/(d + v)$ – correction factor,
 d – hours of necessity for operation during the cycle which lasts $d + v$ hours,
 v – time unit spent standby between the periods of necessity for operation.

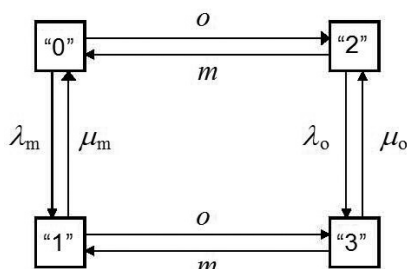
The correction factor k is introduced so as to take into consideration, when estimating the parameters, the assumption that the outage of the unit, that is, its failure may only begin during the time of unit loading.

2.2 Uključivanje utjecaja uvjeta okoline u jednostavni model proizvodne jedinice

Model prikazan na slici 2 dvoparametarski je model proizvodne jedinice kojim se pokraj ovisnosti o vremenu u izračun pokazatelja raspoloživosti i pouzdanosti elektroenergetskog sustava uvodi i ovisnost o uvjetima okoline u kojima se jedinica nalazi tijekom vremena.

2.2 Inclusion of the impact of environmental conditions into the simple generating unit model

The generating unit model shown in Figure 2 is a two-parameter generating unit model by virtue of which, beside the dependency on time, the dependency on environmental conditions of the unit during time is also inserted into the calculation of electric power system availability and reliability indicators.



Slika 2 – Model proizvodne jedinice s uključenim uvjetima okoline
Figure 2 – Generating unit model with environmental conditions included

Oznake:

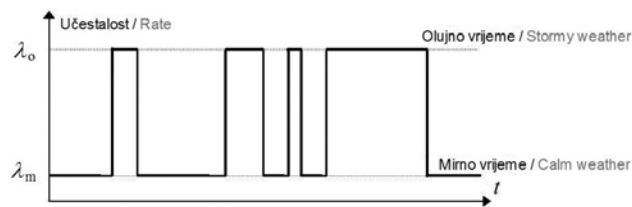
- "0" – stanje pogonske spremnosti jedinice u mirno vrijeme,
- "1" – stanje kvara jedinice u mirno vrijeme,
- "2" – stanje pogonske spremnosti jedinice u olujno vrijeme,
- "3" – stanje kvara jedinice u olujno vrijeme,
- λ_m – učestalost kvara jedinice tijekom mirnog vremena,
- μ_m – učestalost popravka jedinice tijekom mirnog vremena,
- λ_o – učestalost kvara jedinice tijekom olujnog vremena,
- μ_o – učestalost popravka jedinice tijekom olujnog vremena,
- m – učestalost prijelaza olujnog vremena u mirno vrijeme,
- o – učestalost prijelaza mirnog vremena u olujno vrijeme.

Symbols:

- "0" – unit's operation condition during calm weather,
- "1" – state of unit failure during calm weather,
- "2" – unit's operation condition during stormy weather,
- "3" – state of unit failure during stormy weather,
- λ_m – rate of unit failure during calm weather,
- μ_m – rate of unit repair during calm weather,
- λ_o – rate of unit failure during stormy weather,
- μ_o – rate of unit repair during stormy weather,
- m – rate of transition of stormy weather to calm weather,
- o – rate of transition of calm weather to stormy weather.

Za jedinice kod kojih učestalosti kvarova rastu s pogoršanjem prilika u okolini nužno je u model uključiti te nepovoljne utjecaje. Općenito, učestalost kvara kontinuirana je funkcija vremena koja se zbog jednostavnosti prikazuje određenim brojem diskretnih stanja. Najjednostavniji je slučaj da se uvedu dvije različite učestalosti kvara jedinice za dva striktno odijeljena stanja okoline, jedna za mirno ili normalno, a druga za olujno vrijeme, koje se tijekom vremena smjenjuju kako se smjenjuju trajanja odnosnih vremenskih uvjeta. Osnovu prikaza vremenskih stanja čini kronološki profil (slika 3). Uvođenjem većeg broja diskretnih stanja modeli postaju praktički nerješivi.

For the units in which failure rate grows with the aggravation of environmental conditions, it is necessary to include those adverse conditions into the model. Generally, the rate of failure is a continuous time function which, for the purpose of simplicity, is presented with a certain number of discrete states. The simplest case is to introduce two different rates of unit failure for two strictly separated environmental states, one for calm or normal, the other for stormy weather, and these alternate through time as the durations of the relevant weather conditions alternate. The chronological profile constitutes the basis for the presentation of weather conditions (Figure 3). By introducing a larger number of discrete states, the models become practically unsolvable.



Slika 3 – Dvoparametarski model pogona i kvara proizvodne jedinice
Figure 3 – Two-parameter model of operation and failure of generating unit

Veliki problem predstavlja nemogućnost da se prepoznaju i evidentiraju odjelita stanja vremenskih uvjeta, pogotovo kada ih je više. Naime, trajanja vremenskih uvjeta mogu se promatrati kao slučajni procesi koji imaju svoje očekivane vrijednosti, učestalosti pojave i frekvencije. Osnova za razvrstavanje kvarova jesu prevladavajući vremenski uvjeti tijekom njihova trajanja.

Sljedeća pretpostavka kojom se omogućuje primjena Markovljevog modela u određivanju vjerojatnosti stanja u tom posebnom slučaju jest da su razdoblja trajanja normalnih i olujnih vremenskih prilika slučajne varijable s eksponencijalnom ili približno eksponencijalnom razdiobom, a to dalje znači konstantnom učestalosti pojave mirnog i olujnog vremena. Učestalost prijelaza olujnog u mirno vrijeme, odnosno mirnog u olujno vrijeme može se odrediti iz odgovarajućeg broja prijelaza i trajanja zadržavanja u pojedinom stanju. Dakle:

The impossibility to recognize and record separate states of weather conditions, especially when there are more of them, is a great problem. Namely, the durations of weather conditions can be viewed as random processes which have their expected values, rates of occurrence and frequencies. The bases for failure classification are dominant weather conditions during their abidance.

The next assumption which enables the application of the Markov model in the determination of the probability of the state in that special case is that periods of duration of normal and stormy weather conditions are random variables with exponential or nearly exponential division, and that further means, with a constant rate of occurrence of calm and stormy weather. The rate of transition from stormy to calm weather, that is, calm to stormy weather, can be determined from an adequate number of transitions and durations of abiding in a certain state. Therefore:

$$m = \frac{N_m}{O}; \quad o = \frac{N_o}{M}, \quad (16)$$

gdje je:

N_m – broj prijelaza olujnog u mirno vrijeme,
 N_o – broj prijelaza mirnog u olujno vrijeme (uz uvjet $N_m = N_o$),
 O – ukupno trajanje olujnog vremena,
 M – ukupno trajanje mirnog vremena.

where it is as follows:

N_m – number of transitions of stormy to calm weather,
 N_o – number of transitions of calm to stormy weather (with the condition $N_m = N_o$),
 O – total duration of stormy weather,
 M – total duration of calm weather.

Sustav linearnih diferencijalnih jednadžbi Markovljeva modela jedinice kad su uključeni i uvjeti okoline ima oblik:

The system of linear differential equations of the Markov unit model when environmental conditions are included has the form:

$$\begin{aligned} \dot{P}_0(t) &= -(\lambda_m + o)P_0(t) + \mu_m P_1(t) + mP_2(t), \\ \dot{P}_1(t) &= \lambda_m P_0(t) - (\mu_m + o)P_1(t) + mP_3(t), \\ \dot{P}_2(t) &= oP_o(t) - (\lambda_o + m)P_2(t) + \mu_o P_3(t), \\ \dot{P}_3(t) &= oP_1(t) + \lambda_o P_2(t) - (\mu_o + m)P_3(t). \end{aligned} \quad (17)$$

Početne uvjete određuje pretpostavka da je u trenutku $t=0$ jedinica u stanju pogonske spremnosti i da je okružuju uvjeti mirnog vremena:

Initial conditions are determined by the assumption that at the moment of $t=0$ the unit is in the state of operation condition and it is surrounded by calm weather conditions.

$$\begin{aligned} P_0(0) &= 1, \\ P_1(0) &= 0, \\ P_2(0) &= 0, \\ P_3(0) &= 0. \end{aligned} \tag{18}$$

Stacionarno rješenje određuje se uz uvjet:

Steady solution is determined under the condition:

$$\begin{aligned} \dot{P}_n(t) &= 0 \\ n &= 0, 1, 2, 3. \end{aligned} \tag{19}$$

Budući da se traži stacionarno rješenje, sustav jednačbi (17) uz (19) poprima sljedeći oblik:

Since a steady solution is searched for, the equation system (17) and (19) assumes the following form:

$$\begin{aligned} 0 &= -(\lambda_m + o)P_0(t) + \mu_m P_1(t) + mP_2(t), \\ 0 &= \lambda_m P_0(t) - (\mu_m + o)P_1(t) + mP_3(t), \\ 0 &= oP_0(t) - (\lambda_o + m)P_2(t) + \mu_o P_3(t), \\ 0 &= oP_1(t) + \lambda_o P_2(t) - (\mu_o + m)P_3(t). \end{aligned} \tag{20}$$

Da bi se sustav riješio, kao dodatna jednačba u sustav se uključuje jednačba identiteta:

In order to solve the system, the identity equation is introduced into the system as an additional equation:

$$P_0 + P_1 + P_2 + P_3 = 1. \tag{21}$$

Stacionarno rješenje sustava (20) i (21) jest:

Steady system solution (20) and (21) is:

$$\begin{aligned} P_0 &= \frac{m\mu_m(\mu_o + m) + m(\lambda_o\mu_m + \mu_o o)}{\Delta}, \\ P_1 &= \frac{m\lambda_m(\mu_o + m) + m\lambda_o(\lambda_m + o)}{\Delta}, \\ P_2 &= \frac{o\mu_m(\mu_o + m) + o\mu_o(\lambda_m + o)}{\Delta}, \\ P_3 &= \frac{o\lambda_o(\lambda_m + o) + o(m\lambda_m + \lambda_o\mu_m)}{\Delta}, \\ \Delta &= (m + o)[(\lambda_o + \mu_o)(\lambda_m + \mu_m) + m(\lambda_m + \mu_m) + o(\lambda_o + \mu_o)]. \end{aligned} \tag{22}$$

Stacionarne vrijednosti raspoloživosti i nerasploživosti jedinice određene su sumom vjerojatnosti stanja "0" i "2", odnosno "1" i "3":

Steady values of unit availability and unavailability are determined by the sum of state probability "0" and "2", that is, "1" and "3".

$$\begin{aligned}
 A = P_0 + P_2 &= \frac{(m+o)(m\mu_m + o\mu_o + \mu_o\mu_m) + m\mu_m\lambda_o + o\mu_o\lambda_m}{\Delta}, \\
 N = P_1 + P_3 &= \frac{(m+o)(m\lambda_m + o\lambda_o + \lambda_m\lambda_o) + m\lambda_m\mu_o + o\lambda_o\mu_o}{\Delta},
 \end{aligned}
 \tag{23}$$

gdje je:

Δ – kao u izrazu (22).

Kad bi se zanemarili uvjeti olujnog vremena, što znači da se vjerojatnost izlaska iz mirnog vremena uzima jednaka nuli ($o\Delta t = 0$), model bi se sveo samo na dva stanja kao na slici 1, dakle uz vrijednosti parametara $m = 1$, $o = 0$ i $\lambda_o = 0$, izrazi za vjerojatnosti stanja, te raspoloživost i neraspoloživost bili bi približno jednaki izrazima (6) i (7). Dakle:

where it is as follows:

Δ – as in the expression (22).

If stormy weather conditions were to be disregarded, which means that the probability of coming out of calm weather is taken as equal to zero ($o\Delta t = 0$), the model would be reduced to only two states as in Figure 1, so, with the values of the parameters $m = 1$, $o = 0$ and $\lambda_o = 0$, the expressions for the state probability of the state, and the availability and unavailability would be equal to the expressions (6) and (7). Therefore:

$$\begin{aligned}
 P_0 &\approx \frac{\mu_m}{\mu_m + \lambda_m} \approx A, \\
 P_1 &\approx \frac{\lambda_m}{\mu_m + \lambda_m} \approx N, \\
 P_2 &\approx 0, \\
 P_3 &\approx 0.
 \end{aligned}
 \tag{24}$$

Budući da se pretpostavlja eksponencijalna razdioba vremena trajanja popravaka, kako za mirno tako i za olujno vrijeme, te da se srednja očekivana vremena trajanja popravaka malo razlikuju, može se s dovoljnom točnošću uzeti da je funkcija učestalosti popravka neovisna o uvjetima okoline ($\mu_o = \mu_m = \mu$), što predstavlja znatno pojednostavljenje modela. Popravci jedinice zapravo se poduzimaju samo tijekom mirnog vremena, odnosno započinju završetkom olujnog vremena koje traje znatno kraće od mirnog vremena.

Za analizu ostaje, dakle, najvažniji parametar modela, a to je učestalost kvara jedinice. Da bi se odredila učestalost kvara jedinice koja vrijedi i za mirno i za olujno vrijeme, dakle prosječna vrijednost učestalosti kvara potrebno je najprije odrediti srednje vrijeme do kvara jedinice. Dakle, potrebno je početi od matrice učestalosti prijelaza stanja u prostoru stanja koja ima sljedeći oblik:

Since the exponential division of time of repair duration is assumed, both for calm and stormy weather, and since the average times of expected repair duration differ only slightly, it can be taken with sufficient accuracy that the function of repair rate is independent of the environmental conditions ($\mu_o = \mu_m = \mu$), which means significant model simplification. Unit repairs are actually undertaken only during calm weather, that is, they start after the end of stormy weather which lasts significantly less than calm weather.

The analysis thus remains to be performed only on the most significant model parameter, and that is the unit failure rate. In order to determine the unit failure rate which applies both for calm and stormy weather, that is, the average failure rate value, it is necessary to determine the average time to unit failure first. Therefore, it is necessary to start from the matrix of the state transition rate in the state space which has the following form:

$$A = \begin{bmatrix}
 -(\lambda_m + o) & \lambda_m & o & 0 \\
 \mu_m & -(\mu_m + o) & 0 & o \\
 m & 0 & -(\lambda_o + m) & \lambda_o \\
 0 & m & \mu_o & -(\mu_o + m)
 \end{bmatrix}
 \tag{25}$$

Budući da su stanja "1" i "3" stanja kvara, dakle i apsorbirajuća stanja, ispušta ih se iz matrice učestalosti prijelaza koja poprima novi oblik:

Since "1" and "3" are failure states, and thus also absorbing states, they are released from the transition rate matrix which assumes a new form:

$$A = \begin{bmatrix} -(\lambda_m + o) & o \\ m & -(\lambda_o + m) \end{bmatrix}. \quad (26)$$

Sada je potrebno odrediti inverznu matricu matrice (26), a ona glasi:

Now it is necessary to determine the inverse matrix of the matrix (26) and it reads:

$$A^{-1} = \begin{bmatrix} -(\lambda_m + o) & o \\ m & -(\lambda_o + m) \end{bmatrix}^{-1} = \frac{-1}{\lambda_m \lambda_o + o \lambda_o + m \lambda_m} \begin{bmatrix} (\lambda_o + m) & o \\ m & (\lambda_m + o) \end{bmatrix}. \quad (27)$$

Elementi matrice A^{-1} jesu vremena boravka u pojedinim stanjima prije ulaska u apsorbirajuća stanja. Budući da je ukupno vrijeme do kvara određeno izrazom:

Matrix elements A^{-1} are periods of abiding in certain states before entry into absorbing states. Since the total time to failure is determined by the expression:

$$T_\Psi = \sum_{i=1}^n T(i), \quad (28)$$

a da izraz za određivanje srednjeg očekivanog vremena T do kvara ima oblik:

and since the expression for determination of the average expected time T until failure has the form:

$$T = -P_\Psi(0)A_\Psi^{-1}, \quad (29)$$

gdje A_Ψ^{-1} predstavlja inverznu matricu učestalosti prijelaza između stanja,

where A_Ψ^{-1} represents the inverse matrix of rate of transition between states,

srednje vrijeme do kvara, određeno kao suma vremena boravaka u svim stanjima osim apsorbirajućih, određuje se kao produkt vektora početnih vjerojatnosti stanja (18) i inverzne matrice učestalosti prijelaza između stanja (27), te iznosi:

average time to failure, defined as the sum of times of abiding in all states except for the absorbing states, is determined as the product of the vectors of initial probabilities of the states (18) and of the inverse matrix of rate of transition between states (27) and it amounts to:

$$T_0 = \frac{\lambda_o + m + o}{\lambda_m \lambda_o + o \lambda_o + m \lambda_m}, \quad (30)$$

Promatra li se samo mirno vrijeme, srednje vrijeme do kvara jest:

If only calm weather is considered, average time to failure is:

$$T_0 = \frac{1}{\lambda_m}. \quad (31)$$

Učestalost kvara jedinice ako se zanemari vrijeme trajanja popravaka, koje je znatno kraće od sred-

If the duration of repairs, which is significantly shorter than the average time to component failu-

njeg vremena do kvara komponente, što podrazumijeva učestalost kvara ne uključujući utjecaj popravaka, može se odrediti inverzijom izraza (31). Dakle:

$$\lambda = \frac{1}{T_0} = \frac{\lambda_m \lambda_o + o \lambda_o + m \lambda_m}{\lambda_o + m + o}, \quad (32)$$

Budući da općenito vrijedi:

$$\begin{aligned} \lambda_o \lambda_m &\ll o \lambda_o + m \lambda_m \\ \text{i / and} & \\ \lambda_o &\ll m + o, \end{aligned} \quad (33)$$

približna vrijednost prosječne učestalosti kvara jedinice bit će:

$$\lambda \approx \frac{o \lambda_o}{m + o} + \frac{m \lambda_m}{m + o} = \frac{O \lambda_o}{M + O} + \frac{M \lambda_m}{M + O} = \frac{O \lambda_o + M \lambda_m}{M + O}, \quad (34)$$

gdje je:

M – ukupno trajanje mirnog vremena,
 O – ukupno trajanje olujnog vremena.

Tako izračunate učestalosti odgovarale bi vrijednostima koje bi se dobile iz podataka o pogonu kada se ne bi vodilo računa o uvjetima okoline.

Parametri modela računaju se iz sljedećih podataka pogonske statistike:

c – broj kvarova u razdoblju mirnog vremena,
 c' – broj kvarova u razdoblju olujnog vremena,
 p – ukupni broj popravaka za vrijeme trajanja mirnog vremena,
 p' – ukupni broj popravaka za vrijeme trajanja olujnog vremena,
 T_{pm} – ukupno trajanje popravaka tijekom mirnog vremena,
 T_{po} – ukupno trajanje popravaka tijekom olujnog vremena.

Naravno, ukupan broj kvarova treba biti jednak ukupnom broju popravaka ($c + c' = p + p'$), trajanje ciklusa jednako je sumi ukupnih vremena trajanja mirnog i olujnog vremena ($M + O$), a ukupno trajanje svih popravaka jednako je sumi popravaka tijekom mirnog i olujnog vremena ($T_p = T_{pm} + T_{po}$). Procijenjene vrijednosti odgovarajućih učestalosti promjena stanja jesu:

re, is disregarded, which implies the rate of repair not including the influence of repairs, unit failure rate can be determined by inversion of the expression (31). Therefore:

Since the following generally applies:

where it is as follows:

M – total duration of calm weather,
 O – total duration of stormy weather.

Rates calculated in such way would fit the values which might be obtained from the data on the drive if the environmental conditions were not taken into account.

Model parameters are calculated from the following drive statistics data:

c – number of failures in calm weather period,
 c' – number of failures in stormy weather period,
 p – total number of failures for the duration of calm weather,
 p' – total number of failures for the duration of stormy weather,
 T_{pm} – total duration of repairs for the duration of calm weather,
 T_{po} – total duration of repairs for the duration of stormy weather,

Of course, total number of failures must be equal to the total number of repairs ($c + c' = p + p'$), duration of the cycle is equal to the sum of total durations of abidance of calm and stormy weather ($M + O$), and the total duration of all repairs equals the sum of repairs during calm and stormy weather ($T_p = T_{pm} + T_{po}$). Estimated values of relevant state transition rates are:

$$\begin{aligned}
\hat{\lambda}_m &= \frac{c}{M}, \\
\hat{\lambda}_o &= \frac{c'}{O}, \\
\hat{\lambda} &= \frac{c+c'}{M+O} = \frac{M\hat{\lambda}_m + O\hat{\lambda}_o}{M+O}, \\
\hat{\mu}_m &= \frac{p}{T_{pm}}, \\
\hat{\mu}_o &= \frac{p'}{T_{po}}, \\
\hat{\mu} &= \frac{p+p'}{T_p} = \frac{p+p'}{T_{pm}+T_{po}} = \frac{p+p'}{\frac{p}{\hat{\mu}_m} + \frac{p'}{\hat{\mu}_o}} \approx \frac{M\hat{\lambda}_m + O\hat{\lambda}_o}{\frac{M}{\hat{\mu}_m} + \frac{O}{\hat{\mu}_o}}.
\end{aligned} \tag{35}$$

S druge strane, ako su poznati podaci o ukupnom broju kvarova ($c + c'$), trajanja razdoblja mirnog i olujnog vremena (M i O) i udio kvarova koji se javljaju tijekom olujnog vremena ($\zeta = c'/(c + c')$), tada se mogu izračunati učestalosti kvarova za mirno i olujno vrijeme:

On the other hand, if data on the total number of failures ($c + c'$), durations of the periods of calm and stormy weather (M and O) and the share of failures which occur during stormy weather ($\zeta = c'/(c + c')$) are known, then the rates of failures for calm and stormy weather can be calculated.

$$\begin{aligned}
\hat{\lambda}_m &= (1-\zeta) \frac{M+O}{M} \hat{\lambda}, \\
\hat{\lambda}_o &= \zeta \frac{M+O}{O} \hat{\lambda}
\end{aligned} \tag{36}$$

Tako izračunate učestalosti pojave iskazuju se kao broj kvarova u godini po vremenskom uvjetu u kojem su se dogodili, a ne kao broj kvarova u kalendarskoj godini.

Thus calculated rates of occurrence are presented as number of failures in the year per weather condition in which they occurred, and not as the number of failures in the calendar year.

Tablica 1 prikazuje primjer utvrđenih ulaznih parametara modela stanja proizvodne jedinice, s uključenim uvjetima okoline, za mirno i olujno vrijeme, odnosno samo mirno vrijeme. Tablica 2 prikazuje rezultat izračuna, tj. vjerojatnosti stanja u modelu stanja proizvodne jedinice za ulazne parametre iz tablice 1.

Table 1 shows the example of determined input parameters of the generating unit state model, with environmental conditions included, for calm, that is, for stormy weather only. Table 2 shows the calculation result, that is, the probabilities of the state in the generating unit state model for input parameters from Table 1.

3 MODEL DVIJE JEDINICE S UKLJUČENIM UVJETIMA OKOLINE

3 TWO-UNIT MODEL WITH ENVIRONMENT CONDITIONS INCLUDED

3.1 Model sustava s dvije jedinice

3.1 Two-unit system model

Model prikazan na slici 4 jednostavan je model prostora stanja dvije različite jedinice, od kojih svaka može biti ili u stanju spremnosti za pogon, dakle ispravna, ili u stanju nespremnosti za pogon, dakle u kvaru. Model je obrađen radi ilustracije i utvrđivanja načela izgradnje modela pouzdanosti najjednostavnijih sustava. Osnovna pretpostavka svih razmatranja jest da se isključuje mogućnost

The model shown in Figure 4 is a simple state space model of two different units, of which each can be either in operation condition, that is, in operative condition, or in non-operation condition, that is, in the state of failure. The model is analyzed for the purpose of illustration and determination of the principles for the construction of the reliability model of the simplest systems. The basic

Tablica 1 – Parametri modela stanja proizvodne jedinice, s uključenim uvjetima okoline
 Table 1 - Parameters of the generating unit state model, with environmental conditions included

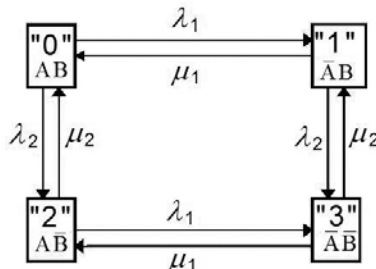
| | Slučaj 1 / Case 1 – Mirno i olujno vrijeme / Calm and stormy weather | Slučaj 2 / Case 2 – Samo mirno vrijeme / Calm weather only |
|--|--|--|
| M [h] | 8 493 | 8 493 |
| N_m | 26 | 26 |
| m [1/h] | 0,097 38 | 1 |
| O [h] | 267 | 267 |
| N_o | 26 | 26 |
| o [1/h] | 0,003 06 | 0 |
| c | | 14 |
| c' | | 8 |
| p | | 20 |
| p' | | 2 |
| T_{pm} | | 247 |
| T_{po} | | 45 |
| λ_m (procjena) / (estimation) | 0,001 65 | 0,001 65 |
| μ_m (procjena) / (estimation) | 0,080 97 | 0,080 97 |
| λ_o (procjena) / (estimation) | 0,029 96 | 0 |
| μ_o (procjena) / (estimation) | 0,044 44 | 0 |
| T_o [h], izraz / expression (30) | 432,32 | |
| λ , izraz / expression (32) | 0,002 31 | |
| λ , procjena po izrazu / estimation by the expression (35) | 0,002 51 | |
| μ , procjena po izrazu / estimation by the expression (35) | 0,075 34 | |

Tablica 2 – Vjerojatnosti stanja proizvodne jedinice, s uključenim uvjetima okoline
 Table 2 - Probabilities of the production unit states, with environmental conditions included

| | Slučaj 1 / Case 1 – Olujno i mirno vrijeme / Calm and stormy weather | Slučaj 2 / Case 2 – Samo mirno vrijeme / Calm weather only |
|---|--|--|
| P_o | 0,944 32 | 0,980 05 |
| P_1 | 0,025 20 | 0,019 95 |
| P_2 | 0,024 71 | |
| P_3 | 0,005 77 | |
| Raspoloživost jedinice / Unit availability, $A = P_o + P_2$ | 0,969 03 | 0,980 05 |
| Neraspoloživost jedinice / Unit unavailability, $N = P_1 + P_3$ | 0,030 97 | 0,019 95 |

istodobnog zbivanja dvaju ili više događaja, zbog čega se u modelu isključuju mogućnosti direktnih prijelaza između stanja "0" i "3", odnosno "1" i "2".

assumption of all the considerations is the exclusion of the possibility of simultaneous occurrence of two or more events, and because of that the model excludes the possibilities of direct transitions between the states "0" and "3", that is, "1" and "2".



Slika 4 – Model sustava koji čine dvije proizvodne jedinice
Figure 4 – Two-unit system model

Oznake:

- A – prva jedinica,
- B – druga jedinica,
- "0" – jedinice A i B u stanju pogonske spremnosti,
- "1" – jedinica A u kvaru, a B spremna za pogon,
- "2" – jedinica A spremna za pogon, a B u kvaru,
- "3" – jedinice A i B u kvaru,
- λ_1 – učestalost kvara jedinice A,
- μ_1 – učestalost popravka jedinice A,
- λ_2 – učestalost kvara jedinice B,
- μ_2 – učestalost popravka jedinice B.

Symbols:

- A – first unit,
- B – second unit,
- "0" – units A and B in operation condition,
- "1" – failure of unit A, unit B ready for operation,
- "2" – unit A ready for operation, failure of unit B,
- "3" – failure of units A and B,
- λ_1 – unit A failure rate,
- μ_1 – unit A repair rate,
- λ_2 – unit B failure rate,
- μ_2 – unit B repair rate.

Sustav linearnih diferencijalnih jednadžbi modela prema slici 4 ima sljedeći oblik:

System of linear differential model equations according to Figure 4 has the following form:

$$\begin{aligned}
 \dot{P}_0(t) &= -(\lambda_1 + \lambda_2)P_0(t) && + \mu_1 P_1(t) && + \mu_2 P_2(t) , \\
 \dot{P}_1(t) &= \lambda_1 P_0(t) && - (\mu_1 + \lambda_2)P_1(t) && + \mu_2 P_3(t) , \\
 \dot{P}_2(t) &= \lambda_2 P_0(t) && - (\lambda_1 + \mu_2)P_2(t) && + \mu_1 P_3(t) , \\
 \dot{P}_3(t) &= \lambda_2 P_1(t) && + \lambda_1 P_2(t) && - (\mu_1 + \mu_2)P_3(t) .
 \end{aligned}
 \tag{37}$$

Početne uvjete određuje pretpostavka da su u trenutku $t = 0$ obje jedinice u stanju pogonske spremnosti, dakle da je sustav na početku u stanju "0". Dakle:

Initial conditions are determined by the assumption that at the moment of $t = 0$ both units are in operation condition, that is, that at the beginning the system is in "0" state. Therefore:

$$\begin{aligned}
 P_0(0) &= 1, \\
 P_1(0) &= 0, \\
 P_2(0) &= 0, \\
 P_3(0) &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{38}$$

Kao i u svim prethodnim slučajevima, traži se stacionarno rješenje sustava (37) koje je određeno uvjetom:

As in all other previous cases, a steady system solution (37), determined by the following condition, is searched for:

$$\begin{aligned} \dot{P}_n(t) &= 0 \\ n &= 0, 1, 2, 3. \end{aligned} \quad (39)$$

Dakle, sustav (37) poprima oblik.

So, system (37) assumes the form:

$$\begin{aligned} 0 &= -(\lambda_1 + \lambda_2)P_0(t) + \mu_1 P_1(t) + \mu_2 P_2(t), \\ 0 &= \lambda_1 P_0(t) - (\mu_1 + \lambda_2)P_1(t) + \mu_2 P_3(t), \\ 0 &= \lambda_2 P_0(t) - (\lambda_1 + \mu_2)P_2(t) + \mu_1 P_3(t), \\ 0 &= \lambda_2 P_1(t) + \lambda_1 P_2(t) - (\mu_1 + \mu_2)P_3(t). \end{aligned} \quad (40)$$

Kao dodatna jednačba u sustav se uključuje jednačba identiteta:

As an additional equation, an identity equation is introduced into the system:

$$P_0 + P_1 + P_2 + P_3 = 1 \quad (41)$$

Stacionarno rješenje sustava (40) i (41), tj. stacionarne vjerojatnosti stanja jesu:

Steady system solutions (40) and (41), that is, steady state values, are:

$$\begin{aligned} P_0 &= \frac{\mu_1 \mu_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} \\ P_1 &= \frac{\lambda_1 \mu_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} \\ P_2 &= \frac{\mu_1 \lambda_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} \\ P_3 &= \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} \end{aligned} \quad (42)$$

Budući da je već ranije pokazano da izrazi:

As it has been shown earlier that the expressions:

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) &= \frac{\mu}{\lambda + \mu} = A(\infty) = A \\ \lim_{t \rightarrow \infty} N(t) &= \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = N(\infty) = N \end{aligned} \quad (43)$$

predstavljaju stacionarnu raspoloživost, odnosno neraspoločivost jedne jedinice, to se stacionarne vjerojatnosti stanja u slučaju sustava koji čine dvije jedinice mogu napisati kako slijedi:

represent steady availability, that is, unavailability of one unit, then the steady probabilities of the state in case of a two-unit system can be written as follows:

$$\begin{aligned} P_0 &= A_1(\infty)A_2(\infty) = A_1A_2 \\ P_1 &= N_1(\infty)A_2(\infty) = N_1A_2 \\ P_2 &= A_1(\infty)N_2(\infty) = A_1N_2 \\ P_3 &= N_1(\infty)N_2(\infty) = N_1N_2 \end{aligned} \quad (44)$$

Iz toga se izvodi bitno načelo za daljnju razradu modela pouzdanosti. Ono glasi: ako se zna općeniti izraz za stacionarne vrijednosti raspoloživosti i nerasploživosti svake jedinice u sustavu pojedinačno, može se odmah napisati izraz za stacionarne vjerojatnosti stanja, tj. stacionarne vrijednosti raspoloživosti i nerasploživosti sustava koristeći pritom osnovne modele pouzdanosti [1], [2] i [10]. Radi provjere, u razmatranje se uzimaju dva najjednostavnija modela, serijski i paralelni.

Kod paralelnog modela sustava, u slučaju kada sustav čine neovisne jedinice ili komponente, stacionarna raspoloživost sustava određena je sljedećim izrazom:

From that, an important principle for further elaboration of the reliability model is derived. It reads: if the general term for steady values of availability and unavailability of each unit separately in the system is known, the term for steady state values, that is, for steady values of availability and unavailability of the system can immediately be written, using thereat the elementary reliability models [1], [2] and [10]. For the purpose of a test, two simplest models are taken into consideration, the serial and the parallel ones.

In the parallel system model, in the case when the system is composed of independent units or components, steady system availability is determined by the following expression:

$$A_S(\infty) = A_1(\infty)A_2(\infty)A_3(\infty)\dots A_i(\infty)\dots A_n(\infty) = \prod_{i=1}^n A_i(\infty) , \quad (45)$$

iz čega slijedi:

and from this it follows:

$$A_S(\infty) = A_1(\infty)A_2(\infty) = P_0 = \frac{\mu_1\mu_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} . \quad (46)$$

Po definiciji serijski sustav je nerasploživ ako je nerasploživa bilo koja od jedinica koje ga čine. To znači da u prostoru stanja treba odrediti vjerojatnost unije događaja koji znače nerasploživost bilo koje od jedinica, dakle stanja "1", "2" i "3". Nakon toga, raspoloživost sustava određuje se na sljedeći način:

By definition, a serial system is unavailable if any of the units it is composed of are unavailable. That means that in the state space the probability should be determined of the union of events which mean unavailability of any of the units, that means states "1", "2" and "3". After that, the availability of the system is determined in the following way:

$$\begin{aligned} A_S(\infty) &= 1 - N_S(\infty) = 1 - (P_1 + P_2 + P_3) = 1 - (N_1A_2 + A_1N_2 + N_1N_2) = \\ &= 1 - \frac{\lambda_1\mu_2 + \mu_1\lambda_2 + \lambda_1\lambda_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} = \frac{\mu_1\mu_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} = A_1A_2 \end{aligned} \quad (47)$$

Izrazi (46) i (47) identični su. Frekvencija kvara serijskog sustava jednaka je frekvenciji napuštanja stanja "0", odnosno iznosi:

Expressions (46) and (47) are identical. Serial system failure frequency equals the frequency of leaving the "0" state, that is, it amounts to:

$$f_s = \sum_{i=1}^2 f_i \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^2 A_j(\infty) = f_1A_2 + f_2A_1 , \quad (48)$$

gdje je:

where it is as follows:

f_1, f_2 – frekvencije kvara jedinica 1 i 2.

f_1, f_2 – frequency of failures of units 1 and 2.

Srednje vrijeme trajanja kvara serijskog sustava određeno je sljedećim izrazom:

Average time of serial system failure duration is determined by the following expression:

$$\bar{p}_s = \frac{N_s(\infty)}{f_s} = \frac{N_1 A_2 + A_1 N_2 + N_1 N_2}{f_1 A_2 + f_2 A_1} \quad (49)$$

Kod paralelnog modela sustava, kojeg čine neovisne jedinice ili komponente, stacionarna raspoloživost sustava određena je sljedećim izrazom:

In the parallel system model, composed of independent units or components, steady system availability is determined by the following expression:

$$A_p(\infty) = 1 - N_1(\infty)N_2(\infty)N_3(\infty)\dots N_i(\infty)\dots N_n(\infty) = 1 - \prod_{i=1}^n N_i(\infty) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - A_i(\infty)) = A_1(\infty) + A_2(\infty) + A_3(\infty) + \dots + A_i(\infty) + \dots + A_n(\infty) - \sum_{i=1}^{j=n-1} \sum_{j=i+1}^n A_i(\infty)A_j(\infty) + \dots + (-1)^{n-1} [A_1(\infty)A_2(\infty)A_3(\infty)\dots A_i(\infty)\dots A_n(\infty)] \quad (50)$$

Neraspoloživost paralelnog sustava određena je izrazom:

Unavailability of the parallel system is determined by the expression:

$$N_p(\infty) = N_1(\infty)N_2(\infty)N_3(\infty)\dots N_i(\infty)\dots N_n(\infty) = \prod_{i=1}^n N_i(\infty), \quad (51)$$

iz čega slijedi:

and from this it follows:

$$A_p(\infty) = 1 - N_1(\infty)N_2(\infty) = 1 - P_3 = 1 - \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} = \frac{\mu_1 \mu_2 + \lambda_1 \mu_2 + \mu_1 \lambda_2}{(\lambda_1 + \mu_2)(\lambda_2 + \mu_2)} \quad (52)$$

S druge strane, sustav je raspoloživ ako je raspoloživa barem jedna jedinica, te će vjerojatnost toga događaja prema modelu na slici 4 biti jednaka sumi vjerojatnosti stanja "0", "1" i "2", tj.:

On the other hand, the system is available if at least one unit is available, and the probability of that event, according to the model in Figure 4, will be equal to the sum of the probability of the states "0", "1" and "2", that is:

$$A_p(\infty) = P_0 + P_1 + P_2 = A_1 A_2 + N_1 A_2 + A_1 N_2 = \frac{\mu_1 \mu_2 + \lambda_1 \mu_2 + \mu_1 \lambda_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)}, \quad (53)$$

Izrazi (52) i (53) identični su. Frekvencija kvara određena je sljedećim izrazom:

Expressions (52) and (53) are identical. Failure frequency is determined by the following expression:

$$f_p = N_p(\infty) \sum_{i=1}^2 \mu_i = \prod_{i=1}^2 N_i(\infty) \sum_{i=1}^2 \mu_i = P_3(\mu_1 + \mu_2) = N_1 N_2 (\mu_1 + \mu_2) = f_1 N_2 + f_2 N_1 \quad (54)$$

Srednje vrijeme trajanja kvara paralelnog sustava, odnosno popravka jedinice iznosi:

Average time of parallel system failure duration, that is, duration of unit repair, amounts to:

$$\bar{P}_p = \frac{N_p(\infty)}{f_p} = \frac{N_1 N_2}{f_1 N_2 + f_2 N_1} = \frac{1}{\frac{f_1}{N_1} + \frac{f_2}{N_2}} = \frac{1}{\frac{1}{P_1} + \frac{1}{P_2}} = \frac{P_1 P_2}{P_1 + P_2} = \frac{1}{\mu_1 + \mu_2}, \quad (55)$$

gdje je P_1, P_2 - trajanja kvara jedinica 1 i 2.

where P_1, P_2 is the duration of failures of units 1 and 2.

Prema modelu sustava s dvije različite jedinice frekvencija pojedinog stanja može se odrediti bilo kao produkt vjerojatnosti stanja i sume učestalosti napuštanja tog istog stanja, bilo kao produkt sume učestalosti ulazaka u stanje i vjerojatnosti stanja iz kojeg se dolazi. Frekvencije su iste promatrane od strane izlazaka, kao i od strane ulazaka. Prema prvome frekvencije stanja jesu:

According to the system model with two different units the frequency of certain state can be determined either as a product of the probability of the state and of the sum of the rate of leaving such state, or as the product of the sum of the rate of entry into the state and the probability of the state of origin. The frequencies are the same observed from the exit side as from the entry side. According to the first, the frequencies of the state are:

$$\begin{aligned} f_{"0"} &= P_0(\lambda_1 + \lambda_2) = A_1 A_2 (\lambda_1 + \lambda_2) = f_1 A_2 + f_2 A_1 \\ f_{"1"} &= P_1(\mu_1 + \lambda_2) = N_1 A_2 (\mu_1 + \lambda_2) = f_1 A_2 + f_2 N_1 \\ f_{"2"} &= P_2(\lambda_1 + \mu_2) = A_1 N_2 (\lambda_1 + \mu_2) = f_1 N_2 + f_2 A_1 \\ f_{"3"} &= P_3(\mu_1 + \mu_2) = N_1 N_2 (\mu_1 + \mu_2) = f_1 N_2 + f_2 N_1 \end{aligned} \quad (56)$$

Vrijeme boravka u svakom pojedinom stanju jednako je recipročnoj vrijednosti sume učestalosti napuštanja tog istog stanja. Prema tome, odgovarajući izrazi jesu:

Period of abidance in each particular state is equal to the reciprocal value of the sum of the rate of leaving that same state. Therefore, the relevant expressions are:

$$\begin{aligned} T_{"0"} &= \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} \\ T_{"1"} &= \frac{1}{\mu_1 + \lambda_2} \\ T_{"2"} &= \frac{1}{\lambda_1 + \mu_2} \\ T_{"3"} &= \frac{1}{\mu_1 + \mu_2} \end{aligned} \quad (57)$$

Slična razmatranja mogu se primijeniti na bilo koji broj neovisnih jedinica koje su povezane u bilo kakav funkcionalni sustav poznate strukture, čiji se rad u potpunosti može prikazati nizom stanja prostora stanja, odnosno modelom stanja i prijelaza između tih stanja. Uz navedeno, jedini je još uvjet da su poznate stacionarne raspoloživosti i neraspoločivosti jedinica, ili, točnije, stacionarne vjerojatnosti stanja svake od jedinica. Stacionarne vjerojatnosti stanja, raspoloživosti ili neraspoločivosti sustava izvode se direktno iz stacionarnih vjerojatnosti stanja, raspoloživosti i neraspoločivosti jedinica, već prema stanjima jedinica, te kombinaciji ili grupi stanja sustava koja u prostoru stanja

Similar observations can be applied to any number of independent units connected in any kind of functional system of a familiar structure, the operation of which can be fully depicted with a series of states of the state space, that is, by the model of the state and transition between those states. Apart from the above, the only other condition is to be familiar with steady availabilities and non-availabilities of the units, or, more precisely, steady probabilities of the states of each of those units. Steady probabilities of the states, availabilities or non-availabilities of the system are derived directly from steady probabilities of the state, availability or unavailability of the units, according to

znači raspoloživost ili neraspoločivost sustava. To znači da se uvijek mora voditi računa o specifičnoj građi sustava i njegovim funkcionalnim karakteristikama, jer je samo tako moguće u prostoru svih mogućih stanja iste izdvajati i grupirati prema određenim kriterijima, npr. kriterijima uspješnog rada.

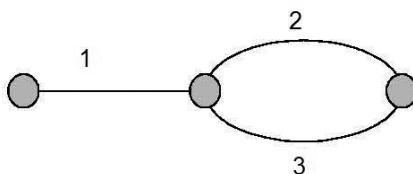
Kako je to već ranije utvrđeno, izrazi za stacionarne raspoloživosti i neraspoločivosti sustava ekvivalentni su onima za pouzdanost i nepouzdanost, što znači da se mogu dobiti tako da se u odgovarajućim izrazima jednostavno zamijene varijable pouzdanosti varijablama raspoloživosti, a varijable nepouzdanosti varijablama neraspoločivosti, kako sustava tako i jedinica.

Kao ilustracija svega što je prethodno navedeno poslužit će jednostavan primjer sustava od tri jedinice čiji je model pouzdanosti prikazan na slici 5.

the states of the units, and the combination or group of the system states which means system availability or unavailability in the state space. That means that what should always be taken into consideration is the specific structure of the system and its functional characteristics because in the space of all possible states it is the only possible way of sorting out and grouping the above according to certain criteria, for example, criteria of successful operation.

As has been determined earlier, expressions for steady system availabilities and non-availabilities are equivalent to those for reliability and non-reliability, which means that they can be obtained so as to simply exchange the variables of reliability with variables of availability in the relevant expressions, and to exchange the variables of unreliability with the variables of unavailability both of the system and the units.

The simple example of the three-unit system, the reliability model of which is shown in Figure 5 will serve as an illustration of all that has been mentioned above.



Slika 5 – Serijsko-paralelni model sustava od tri jedinice
Figure 5 – The three-unit system

Stacionarne vrijednosti raspoloživosti i neraspoločivosti jedinica jesu:

Steady values of the units' availability and unavailability are:

| Jedinica 1 | Jedinica 2 | Jedinica 3 | |
|---|---|---|------|
| $A_1(\infty) = \frac{\mu_1}{\lambda_1 + \mu_1}$ | $A_2(\infty) = \frac{\mu_2}{\lambda_2 + \mu_2}$ | $A_3(\infty) = \frac{\mu_3}{\lambda_3 + \mu_3}$ | (58) |
| $N_1(\infty) = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \mu_1}$ | $N_2(\infty) = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \mu_2}$ | $N_3(\infty) = \frac{\lambda_3}{\lambda_3 + \mu_3}$ | |

Vjerojatnosti stanja sustava u prostoru stanja dana su u tablici 3.

Probabilities of the states of the system in the state space are given in Table 3.

Tablica 3 – Stanja sustava, stanja jedinica, vjerojatnosti i frekvencije stanja sustava prema slici 5
 Table 3 – System states, units' states, probabilities and frequencies of system states according to Figure 5.

| Redni broj / Number | Stanje sustava / System state | Stanja jedinica / Units' states (*) | | | Vjerojatnosti sustava / Probabilities of system states | Frekvencije stanja sustava / System state frequencies |
|---------------------|-------------------------------|-------------------------------------|---|---|--|---|
| | | 1 | 2 | 3 | | |
| 1. | "0" | 1 | 1 | 1 | $P_{0^n} = A_1 A_2 A_3$ | $f_{0^n} = f_1 A_2 A_3 + f_2 A_1 A_3 + f_3 A_1 A_2$ |
| 2. | "1" | 0 | 1 | 1 | $P_{1^n} = N_1 A_2 A_3$ | $f_{1^n} = f_1 A_2 A_3 + f_2 N_1 A_3 + f_3 N_1 A_2$ |
| 3. | "2" | 1 | 0 | 1 | $P_{2^n} = A_1 N_2 A_3$ | $f_{2^n} = f_1 N_2 A_3 + f_2 A_1 A_3 + f_3 A_1 N_2$ |
| 4. | "3" | 1 | 1 | 0 | $P_{3^n} = A_1 A_2 N_3$ | $f_{3^n} = f_1 A_2 N_3 + f_2 A_1 N_3 + f_3 A_1 A_2$ |
| 5. | "4" | 0 | 0 | 1 | $P_{4^n} = N_1 N_2 A_3$ | $f_{4^n} = f_1 N_2 A_3 + f_2 N_1 A_3 + f_3 N_1 N_2$ |
| 6. | "5" | 0 | 1 | 0 | $P_{5^n} = N_1 A_2 N_3$ | $f_{5^n} = f_1 A_2 N_3 + f_2 N_1 N_3 + f_3 N_1 A_2$ |
| 7. | "6" | 1 | 0 | 0 | $P_{6^n} = A_1 N_2 N_3$ | $f_{6^n} = f_1 N_2 N_3 + f_2 A_1 N_3 + f_3 A_1 N_2$ |
| 8. | "7" | 0 | 0 | 0 | $P_{7^n} = N_1 N_2 N_3$ | $f_{7^n} = f_1 N_2 N_3 + f_2 N_1 N_3 + f_3 N_1 N_2$ |

* 1 – jedinica u stanju pogonske spremnosti / unit in the state of operation condition
 0 – jedinica u stanju kvara / unit in the state of failure

Budući da se radi o sustavu čije su komponente neovisne, izraz za pouzdanost sustava glasi:

As the matter at hand is a system whose components are independent, the expression for system reliability reads:

$$R_S(t) = P[x_1(x_2 + x_3)] = P(x_1 x_2 + x_1 x_3) = P(x_1 x_2) + P(x_1 x_3) - P(x_1 x_2 x_3) . \quad (59)$$

$$= P(x_1)P(x_2) + P(x_1)P(x_3) - P(x_1)P(x_2)P(x_3)$$

Prema tome, za uspješan rad sustava nužni su uspješan rad prve jedinice i uspješan rad barem jedne od dviju preostalih jedinica. Jednostavnom zamjenom oznaka za pouzdanost oznakama za raspoloživost u izrazu (59) dobije se izraz za stacionarnu raspoloživost sustava:

According to that, successful operation of the system requires successful operation of the first unit and successful operation of at least one of the other two units. By simple exchange of the symbols for reliability with symbols for availability in the expression (59), the expression for steady availability of the system is obtained:

$$A_S(\infty) = A_1(\infty)A_2(\infty) + A_1(\infty)A_3(\infty) - A_1(\infty)A_2(\infty)A_3(\infty) =$$

$$= \frac{\mu_1 \mu_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} + \frac{\mu_1 \mu_3}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_3 + \mu_3)} - \frac{\mu_1 \mu_2 \mu_3}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)(\lambda_3 + \mu_3)} = \quad (60)$$

$$= \frac{\mu_1 \mu_2 \mu_3 + \mu_1 \lambda_2 \mu_3 + \mu_1 \mu_2 \lambda_3}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)(\lambda_3 + \mu_3)}$$

S druge strane, analiza prostora stanja (tablica 1) pokazuje da je za uspješan rad sustava potrebno da se ostvari barem jedan od događaja, odnosno stanja sustava "0", "2" ili "3". Vjerojatnost u tom slučaju iznosi:

On the other hand, analysis of the state space (Table 1) shows that successful system operation requires the realization of at least one of the events, that is, the states of the system "0", "2" or "3". The probability in that case amounts to:

$$\begin{aligned}
A_3(\infty) &= P_0(\infty) + P_2(\infty) + P_3(\infty) = A_1 A_2 A_3 + A_1 N_2 A_3 + A_1 A_2 N_3 = \\
&= \frac{\mu_1 \mu_2 \mu_3}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)(\lambda_3 + \mu_3)} + \frac{\mu_1 \lambda_2 \mu_3}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)(\lambda_3 + \mu_3)} + \\
&\frac{\mu_1 \mu_2 \lambda_3}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)(\lambda_3 + \mu_3)} = \frac{\mu_1 \mu_2 \mu_3 + \mu_1 \lambda_2 \mu_3 + \mu_1 \mu_2 \lambda_3}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)(\lambda_3 + \mu_3)}
\end{aligned} \tag{61}$$

Naravno, izrazi (60) i (61) identični su.

Of course, the expressions (60) and (61) are identical.

3.2 Model sustava s dvije proizvodne jedinice s uključenim uvjetima okoline

Na slici 6 prikazan je model sustava koji čine dvije neovisne jedinice s uključenim uvjetima okoline, ili bolje rečeno prostor stanja sustava dviju jedinica u različitim uvjetima stanja okoline. Osnovna mu je namjena razrada modela dvostrukih kvarova.

Model čine četiri niža stanja ("0", "1", "2" i "3"), koja predstavljaju stanja sustava u uvjetima normalnog, tj. mirnog vremena, i četiri viša stanja ("4", "5", "6" i "7") koja predstavljaju stanja sustava u uvjetima olujnog vremena. Općenito se pretpostavlja da su izgledi za kvarove, pogotovo dvostruke i višestruke, puno veći tijekom olujnog vremena nego tijekom mirnog vremena. Kada se kvarovi pojave tijekom olujnog vremena, traju do pojave mirnog vremena, jer se popravci poduzimaju samo tijekom trajanja mirnog vremena. Učestalost mirnog vremena puno je veća od učestalosti kvara jedinice, a učestalost olujnog vremena puno je manja od učestalosti popravka jedinice. Sve to znači da se zbog izuzetno male vjerojatnosti ostvarenja neki prelasci među stanjima mogu zanemariti, a da pritom model ne izgubi puno na točnosti. S druge strane dobiva se mogućnost da se problem uopće može riješiti. Nakon pojednostavljenja može se uzeti da se model sustava s dvije neovisne jedinice ponavlja, jednom za uvjete mirnog vremena, a drugi put za uvjete olujnog vremena, pri čemu su ti uvjeti neovisni o kvarovima i popravcima jedinica. Pojednostavljenja i pretpostavke koji se uvode u model imaju sljedeće oblike:

3.2 Model of a system with two generating units with environmental conditions included

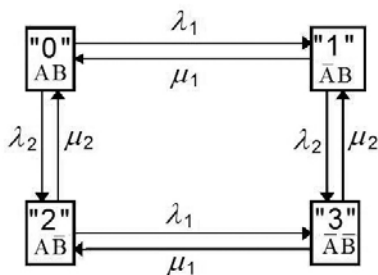
Figure 6 shows the model of the system composed of two independent units with environmental conditions included, or, better said, the space of the states of the two-unit system in different environmental state conditions. Its basic intention is to elaborate the model of double failures.

The model consists of four lower states ("0", "1", "2" and "3") which represent states of the system in the conditions of normal, that is, calm weather, and four higher states ("4", "5", "6" and "7") which represent states of the system in the conditions of stormy weather. It is generally assumed that the prospects for failures, especially double and multiple, are much greater during stormy weather than during calm weather. When failures occur during stormy weather, they last until occurrence of calm weather because the repairs are undertaken only for the duration of calm weather. The rate of calm weather is much greater than the rate of unit failure, and the rate of stormy weather is much smaller than the rate of unit repair. All of this means that because of extremely small probability of realization, certain transitions between states can be disregarded without the model losing much of its accuracy in the process. On the other hand, the possibility arises for the problem to be completely unsolvable. After the simplification, it can be assumed that the model of the system with two independent units repeats, once for calm weather conditions, and the second time for the stormy weather conditions, whereat those conditions are independent of unit failures and repairs. Simplifications and assumptions introduced into the model have the following forms:

$$\begin{aligned}
\lambda_1 &= \lambda_2 \approx 0, \\
\mu_1' &= \mu_2' \approx 0, \\
m &\gg \lambda_1', \lambda_2', \\
o &\ll \mu_1, \mu_2, \\
P_0 + P_4 &\approx 1.
\end{aligned} \tag{62}$$

Sustav linearnih diferencijalnih jednažbi Markovljeva procesa prema slici 6 glasi:

The system of linear differential equations of the Markov process according to Figure 6 reads as follows:



Stika 6 – Model sustava koji čine dvije proizvodne jedinice s uključenim uvjetima okoline
Figure 6 – Model of a system with two generating units with environmental conditions included

Oznake:

- A – prva jedinica,
- B – druga jedinica,
- m – učestalost pojave mirnog vremena,
- o – učestalost pojave olujnog vremena,

Symbols:

- A – first unit
- B – second unit
- m – rate of occurrence of calm weather
- o – rate of occurrence of stormy weather

– stanja jedinica i učestalosti tijekom mirnog vremena:

- "0" – jedinice A i B spremne za pogon,
- "1" – jedinica A spremna za pogon, a B u kvaru,
- "2" – jedinice A i B u kvaru,
- "3" – jedinica A u kvaru, a B spremna za pogon,
- μ_A – učestalost popravka jedinice A,
- μ_B – učestalost popravka jedinice B,

– states of the units and rates during calm weather:

- "0" – units A and B ready for operation,
- "1" – unit A ready for operation, failure of unit B,
- "2" – units A and B in state of failure,
- "3" – failure of unit A, unit B ready for operation,
- μ_A – rate of repair of unit A,
- μ_B – rate of repair of unit B,

– stanja jedinica i učestalosti tijekom olujnog vremena:

- "4" – jedinice A i B spremne za pogon,
- "5" – jedinica A spremna za pogon, a B u kvaru,
- "6" – jedinice A i B u kvaru,
- "7" – jedinica A u kvaru, a B spremna za pogon,
- λ'_A – učestalost kvara jedinice A,
- λ'_B – učestalost kvara jedinice B.

– states of the units and rates during stormy weather:

- "4" – units A and B ready for operation,
- "5" – unit A ready for operation, failure of unit B,
- "6" – failure of units A and B,
- "7" – failure of unit A, unit B ready for operation,
- λ'_A – rate of failure of unit A,
- λ'_B – rate of failure of unit B.

$$\begin{aligned}
 \dot{P}_0(t) &= -oP_0(t) & + \mu_2 P_1(t) & + \mu_1 P_3(t) & + mP_4(t) , \\
 \dot{P}_1(t) &= -(\mu_2 + o)P_1(t) & + \mu_1 P_2(t) & + mP_5(t) , \\
 \dot{P}_2(t) &= -(\mu_1 + \mu_2 + o)P_2(t) & + mP_6(t) , \\
 \dot{P}_3(t) &= \mu_2 P_2(t) & - (\mu_1 + o)P_3(t) & + mP_7(t) , \\
 \dot{P}_4(t) &= oP_0(t) & - (m + \lambda'_1 + \lambda'_2)P_4(t) , \\
 \dot{P}_5(t) &= oP_1(t) & + \lambda'_2 P_4(t) & - (m + \lambda'_1)P_5(t) , \\
 \dot{P}_6(t) &= mP_2(t) & + \lambda'_1 P_5(t) & - mP_6(t) & + \lambda'_2 P_7(t) , \\
 \dot{P}_7(t) &= oP_3(t) & + \lambda'_1 P_4(t) & - (\lambda'_2 + m)P_7(t) .
 \end{aligned} \tag{63}$$

Početak uvjete određuju pretpostavke da su u trenutku $t = 0$ obje jedinice u stanju pogonske spremnosti i da ih u okolini okružuju uvjeti mirnog vremena (stanje "0"). Iz toga slijedi:

Initial conditions are determined by the assumption that at the moment of $t = 0$ both units are in operation condition and that they are surrounded by calm weather conditions ("0" state). From this it follows:

$$\begin{aligned} P_0(0) &= 1, \\ P_1(0) &= 0, \\ P_2(0) &= 0, \\ P_3(0) &= 0, \\ P_4(0) &= 0, \\ P_5(0) &= 0, \\ P_6(0) &= 0, \\ P_7(0) &= 0. \end{aligned} \tag{64}$$

Traži se stacionarno rješenje sustava (63), dakle uzima se da vrijedi.

A steady solution of the system (63) is being searched for and therefore the following is taken to apply:

$$\begin{aligned} \dot{P}_n(t) &= 0, \\ n &= 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7. \end{aligned} \tag{65}$$

Uz uvjet (65) sustav (63) poprima oblik:

With the condition (65), the system (63) assumes the form:

$$\begin{aligned} 0 &= -oP_0(t) + \mu_2 P_1(t) + \mu_1 P_3(t) + mP_4(t), \\ 0 &= -(\mu_2 + o)P_1(t) + \mu_1 P_2(t) + mP_5(t), \\ 0 &= -(\mu_1 + \mu_2 + o)P_2(t) + mP_6(t), \\ 0 &= \mu_2 P_2(t) - (\mu_1 + o)P_3(t) + mP_7(t), \\ 0 &= oP_0(t) - (m + \lambda'_1 + \lambda'_2)P_4(t), \\ 0 &= oP_1(t) + \lambda'_2 P_4(t) - (m + \lambda'_1)P_5(t), \\ 0 &= mP_2(t) + \lambda'_1 P_5(t) - mP_6(t) + \lambda'_2 P_7(t), \\ 0 &= oP_3(t) + \lambda'_1 P_4(t) - (\lambda'_2 + m)P_7(t). \end{aligned} \tag{66}$$

Jednadžba identiteta glasi:

The identity equation reads:

$$P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 = 1. \tag{67}$$

Rješenje sustava (66), tj. približne stacionarne vjerojatnosti stanja sustava uz uvjete (62) jesu:

The solution of the system (66), that is, approximate steady values of the system state, with the conditions (62) are:

$$\begin{aligned}
P_0 &\approx \frac{mmm\mu_1\mu_2(\mu_1 + \mu_2)}{\Delta} \\
P_1 &\approx \frac{mmo\mu_1\lambda'_2(\mu_1 + \mu_2)}{\Delta} \\
P_2 &\approx \frac{2mo\mu_1\mu_2\lambda'_1\lambda'_2}{\Delta} \\
P_3 &\approx \frac{mmo\mu_2\lambda'_1(\mu_1 + \mu_2)}{\Delta} \\
P_4 &\approx \frac{mmo\mu_1\mu_2(\mu_1 + \mu_2)}{\Delta} \\
P_5 &\approx \frac{mo\mu_1\mu_2\lambda'_2(\mu_1 + \mu_2)}{\Delta} \\
P_6 &\approx \frac{2o\mu_1\mu_2\lambda'_1\lambda'_2(\mu_1 + \mu_2)}{\Delta} \\
P_7 &\approx \frac{mo\mu_1\mu_2\lambda'_1(\mu_1 + \mu_2)}{\Delta} \\
\Delta &\approx mm(m+o)\mu_1\mu_2(\mu_1 + \mu_2)
\end{aligned} \tag{68}$$

Računanje s prosječnim učestalostima kvara i popravka kada su uključeni uvjeti okoline ograničeno je samo na jednostruke kvarove. Vjerojatnost dvostrukih i višestrukih kvarova, odnosno kvarova dviju ili više jedinica kada su uključeni uvjeti okoline, mogu se izračunati s prosječnim učestalostima samo ako se uvede pretpostavka da su jedinice podvrgnute vremenskim uvjetima koji su neovisni jedan o drugome. Naravno, ovdje su upravo interesantni uvjeti kada su dvije i više jedinica podvrgnuti istim uvjetima okoline, pogotovo stanja i vjerojatnosti stanja kada su obje jedinice u kvaru, prvenstveno onom tijekom trajanja olujnog vremena, dakle u stanju 6. Do vjerojatnosti stanja 6 može se doći i na drugi način. Naime, vjerojatnost jednostrukog kvara tijekom olujnog vremena određena je izrazom (22). Uvažavajući činjenicu da se može pokvariti bilo koja od dviju istovrsnih jedinica znatno pojednostavljen izraz može se napisati u obliku:

Calculation with average failure and repair rates, when environmental conditions are included, is limited to single failures. The probability of double and multiple failures, that is, failures of two or more units, when environmental conditions are included, can be calculated with average rates only if the assumption is introduced that the units are subjected to weather conditions which are mutually independent. Of course, those conditions when two or more units are subjected to the same environmental conditions is exactly what is interesting here, especially as regards the states and probabilities of the state when both units are in the state of failure, primarily failure during stormy weather, that is, state 6. The probability of state 6 can also be reached in a different way. Particularly, probability of single failure during stormy weather is defined by expression (22). Taking into consideration the fact that any of the two units of the same type can break down, a significantly simplified expression can be written in the form:

$$P_{5,7} \approx 2 \frac{o}{m(m+o)} \lambda' = 2O \frac{O}{M+O} \lambda' \tag{69}$$

gdje je:

$$\begin{aligned}
\frac{o}{m+o} = \frac{O}{M+O} & \text{ - vjerojatnost pojave olujnog vremena,} \\
\lambda_0 & \text{ - učestalost kvara jedinice tijekom trajanja olujnog vremena,} \\
\frac{1}{m} = O & \text{ - srednje trajanje olujnog vremena.}
\end{aligned}$$

where it is as follows:

$$\begin{aligned}
\frac{o}{m+o} = \frac{O}{M+O} & \text{ - probability of occurrence of stormy weather} \\
\lambda_0 & \text{ - rate of unit failure during stormy weather,} \\
\frac{1}{m} = O & \text{ - average duration of stormy weather.}
\end{aligned}$$

Kada se već pojavio jedan kvar, drugi kvar tijekom olujnog vremena može se pojaviti s učestalošću λ' ,

When failure has already occurred, the other failure during stormy weather can occur at the rate λ' ,

tako da će frekvencija tog događaja biti:

so that the frequency of that event will be:

$$f_6 = P_{5,7}\lambda' \approx \frac{2(\lambda'O)^2}{M+O} \cdot \quad (70)$$

Vjerojatnost stanja kvara dviju neovisnih jedinica tijekom trajanja olujnog vremena iznosi:

The probability of the state of failure of two independent units during stormy weather amounts to:

$$P_6 \approx \frac{2(\lambda'O)^2}{M+O} \cdot O \cdot \quad (71)$$

Kod sustava koji čini više jedinica srednje vrijeme do kvara određuje se polazeći od prostora stanja sustava, odnosno odgovarajuće matrice učestalosti prijelaza između stanja, ispuštajući stanja kvara kao apsorbirajuća stanja. Stanja kvara određuju se prema modelu pouzdanosti sustava o kojem se radi.

In systems composed of several units, average time to failure is determined starting from the system state space, that is, the relevant state transition rate matrix, excluding states of failure as absorbing states. States of failure are determined according to the relevant system reliability model.

Za sustav s dvije identične jedinice od kojih obje moraju biti ispravne da bi sustav bio ispravan, čime se podrazumijeva serijski model pouzdanosti, srednje vrijeme do kvara iznosi:

For the system with two identical units of which both need to be in sound condition in order for the system to be in sound condition, which implies a serial reliability model, average time to failure amounts to:

$$T_0 = \frac{2\lambda' + m + o}{2(2\lambda'\lambda + m\lambda + o\lambda')} \cdot \quad (72)$$

Uz pretpostavku da se promatraju samo uvjeti mirnog vremena, srednje vrijeme do kvara iznosi:

With the assumption that only calm weather conditions are being observed, average time to failure amounts to:

$$T_0 = \frac{1}{2\lambda} \cdot \quad (73)$$

Za sustav kojeg čine tri identične jedinice, pri čemu je za ispravan rad sustava potrebno da sve tri jedinice ispravno rade srednje vrijeme do kvara iznosi:

For the system composed of three identical units, whereat the proper operation of the system requires that all three units work properly, average time to failure amounts to:

$$T_0 = \frac{3\lambda' + m + o}{3(3\lambda'\lambda + m\lambda + o\lambda')} \cdot \quad (74)$$

Zanemare li se uvjeti olujnog vremena, srednje vrijeme do kvara u uvjetima mirnog vremena bit će:

If stormy weather conditions are disregarded, average time to failure in calm weather conditions will be:

$$T_0 = \frac{1}{3\lambda} \cdot \quad (75)$$

Tablica 4 prikazuje primjer utvrđenih ulaznih parametara modela stanja dvije proizvodne jedinice, s uključenim uvjetima okoline, za mirno i olujno vrijeme. Primjena modela provedena je za tri slučaja, i to:

- **slučaj 1** – dviju identičnih proizvodnih jedinica (ključni parametri modela kako su prikazani u tablici 1),
- **slučaj 2** – dviju proizvodnih jedinica od kojih je druga više izložena kvarovima za olujnog vremena, i
- **slučaj 3** – dviju proizvodnih jedinica od kojih je druga manje izložena kvarovima za olujnog vremena.

Tablica 5 prikazuje rezultat izračuna, tj. vjerojatnosti stanja u modelu stanja proizvodne jedinice za ulazne parametre iz tablice 4.

Table 4 shows the example of determined input parameters of the state model of two generating units, with environmental conditions included, for calm and stormy weather. The application of the model is implemented in three cases, and that being:

- **case 1** - in two identical generating units (key model parameters as they are shown in Table 1),
- **case 2** - in two identical productions units of which the second one is more exposed to failures during stormy weather, and
- **case 3** - in two identical productions units of which the second one is less exposed to failures during stormy weather.

Table 5 shows the calculation result, that is, the probabilities of the state in the generating unit state model for input parameters from Table 4.

Tablica 4 – Parametri modela stanja dvije proizvodne jedinice, s uključenim uvjetima okoline
Table 4 – Parameters of the state model of two generating units, with environmental conditions included

| | Slučaj 1 / Case 1 | Slučaj 2 / Case 2 | Slučaj 3 / Case 3 |
|---------------|---|--|---|
| | Dvije identične jedinice, jednako izložene kvarovima / Two identical units, equally exposed to failures | Druga jedinica više izložena kvarovima za olujnog vremena / Second unit more exposed to failures during stormy weather | Druga jedinica manje izložena kvarovima za olujnog vremena / Second unit less exposed to failures during stormy weather |
| M, h | 8 493 | | |
| N_m | 26 | | |
| $m, 1/h$ | 0,097 38 | | |
| σ, h | 267 | | |
| N_O | 26 | | |
| $\sigma, 1/h$ | 0,003 06 | | |
| c | 14 | | |
| c' | 8 | | |
| p | 20 | | |
| p' | 2 | | |
| T_{pm} | 247 | | |
| T_{po} | 45 | | |
| λ'_1 | 0,029 96 | 0,029 96 | 0,029 96 |
| μ_1 | 0,080 97 | 0,080 97 | 0,080 97 |
| λ'_2 | 0,029 96 | 0,034 46 | 0,025 47 |
| μ_2 | 0,080 97 | 0,068 83 | 0,093 12 |

Tablica 5 – Vjerojatnosti stanja dvije proizvodne jedinice, s uključenim uvjetima okoline
 Table 2 - Probabilities of the states of two production units, with environmental conditions included

| | Slučaj 1 / Case 1 | Slučaj 2 / Case 2 | Slučaj 3 / Case 3 |
|--|----------------------|----------------------|----------------------|
| P_0 | 0,922 86 | 0,916 67 | 0,928 11 |
| P_1 | 0,010 74 | 0,014 43 | 0,007 98 |
| P_2 | 0,003 30 | 0,004 08 | 0,002 63 |
| P_3 | 0,010 74 | 0,010 66 | 0,010 80 |
| P_4 | 0,029 01 | 0,028 82 | 0,029 18 |
| P_5 | 0,008 93 | 0,010 20 | 0,007 63 |
| P_6 | 0,005 49 | 0,006 28 | 0,004 70 |
| P_7 | 0,008 93 | 0,008 87 | 0,008 98 |
| Pogreška zbog pojednostavljenja u modelu / Error due to simplification in the model | 5,06 % | 5,77 % | 4,46 % |
| Obje jedinice spremne za pogon / Both units ready for operation | 0,951 88 | 0,945 49 | 0,957 29 |
| Barem jedna jedinica u kvaru / At least one unit failed | 0,048 12 | 0,054 51 | 0,042 71 |
| Barem jedna jedinica spreman za pogon / At least one unit ready for operation | 0,991 20 | 0,989 65 | 0,992 68 |
| Obje jedinice u kvaru / Both units failed | 0,008 80 | 0,010 35 | 0,007 32 |

4 ZAKLJUČAK

Razvijeni su i izloženi modeli za izračun parametara i pokazatelja pouzdanosti i raspoloživosti elektroenergetskog sustava za slučajeve kada su proizvodne jedinice izložene uvjetima okoline, posebno nepovoljnim atmosferskim prilikama koji djeluju na učestalosti pojava njihova kvara ili popravka, bilo zbog nedovoljne ili nedostatne zaštite proizvodnih jedinica od takvih nepovoljnih utjecaja iz okoline, bilo zbog moguće iznimne snage takvih nepovoljnih utjecaja iz okoline. Naime, iako se proizvodne jedinice nastoje štititi od svih mogućih predvidljivih utjecaja iz okoline, pa tako i svih predvidljivih nepovoljnih atmosferskih utjecaja, ipak se dimenzioniranje svih zaštitnih mjera i sustava provodi podrazumijevajući određene vjerojatnosti pojave i težina posljedica takvih pojava i utjecaja. Dakako, niti je ekonomski opravdano niti je tehnički moguće da zaštitne mjere ili sustavi u potpunosti i za sve moguće negativne pojave i utjecaje iz okoline zaštite proizvodno postrojenje.

Dakako, ako se očekuju negativne posljedice utjecaja iz okoline, onda ih je bez obzira na složenost postupka i analize nužno uključiti u model proizvodne jedinice, odnosno u odgovarajući izračun pokazatelja pouzdanosti i raspoloživosti elektroenergetskog sustava, kako je to izloženo u ovom radu.

I obrnuto, polazeći od ekonomsko opravdane i tehničko-tehnološke prihvatljive razine zaštite proizvodne jedinice, a u svezi tražene razine raspoloživosti i pouzdanosti elektroenergetskog sustava, primjenom izloženih modela moguće odrediti mjesto i uloge nekih proizvodnih jedini-

4 CONCLUSION

The presented models for the calculation of parameters and indicators of reliability and availability of the electric power system have also been developed for the cases when generating units are exposed to environmental conditions, especially adverse weather conditions which affect the rate of occurrence of their failures or repairs, either due to insufficient or deficient protection of generating units from such adverse environmental impacts, or due to possible exceptional intensity of those adverse environmental impacts. Namely, although there is an effort to protect the generating units from all possible predictable environmental impacts, and thus also from predictable weather conditions, the dimensioning of all protective measures and systems is still being sized, presuming certain probabilities of occurrence and intensities of the consequences of such occurrences and impacts. Of course, it is neither economically justified nor technically possible for the protection measures or systems to protect the generating plant fully and from all possible negative events and environmental impacts.

Of course, if negative consequences of environmental impacts are expected, then, regardless of the complexity of the procedure or analysis, it is necessary to include them in the generating unit model, that is, in the relevant calculation of indicators of electric power system reliability and availability, as presented in this work.

And vice versa, starting from the economically justified and technically-technologically acceptable generating unit protection, and in connection with the demanded level of availability and reliability of the electric power system, by application of presented models, it is possible to determine the place and the roles of certa-

ca u pokrivanju potreba za snagom i energijom na način da se time unaprijed djeluje na izloženost proizvodne jedinice nepovoljnim utjecajima iz okoline, ili barem njihovim posljedicama. Sljedeći korak svakako bio bi povećanje, odnosno dogradnja razine zaštitnih mjera i sustav proizvodne jedinice za postizanje tražene razine raspoloživosti i pouzdanosti elektroenergetskog sustava u cjelini.

in generating units in covering the requirements for power and energy in such a way as to impact in advance the exposure of the generating unit to adverse environmental impacts, or at least to their consequences. The next step would surely be the increase, that is, upgrade of the level of protective measures and generating unit system for the purpose of achievement of the necessary level of availability and reliability of the electric power system as a whole.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] MIKULIČIĆ, V., Matematički modeli pouzdanosti i raspoloživosti u elektroenergetskom sustavu, Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Elektrotehnički fakultet, Zagreb, 1981.
- [2] MIKULIČIĆ, V., Matematički model pouzdanosti komponente, Elektrotehnika EKT TBV24(1981)1, 1981.
- [3] JÖZSA, L., Primjena metode pouzdanosti u izgradnji proizvodnih kapaciteta u sustavu hidro i termoelektrana, Elektrotehnika EKT TBV24, 1981.
- [4] Studie Systemzuverlässigkeit, Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft, R.W.T.H. ACHEN, 1982
- [5] BILLINTON, R., ALLAN, R. N., Reliability Evaluation of Power Systems, New York, 1984
- [6] JÖZSA, L., Analitički model pouzdanosti akumulacijskih hidroelektrana, I i II dio, Elektrotehnika ELTHB2 28, 1985.
- [7] BILLINTON, R., ALLAN, R. N., Reliability Assessment of Large Electric Power Systems, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1988
- [8] INVERNIZZI, A., MANZONI, G., RIVOIRO, A., Probabilistic Simulation of Generating System Operation Including Seasonal Hydro Reservoirs and Pumped-Storage Plants, Electric Power & Energy Systems, Vol. 10, No. 1, 1988
- [9] BILLINTON, R., LI, W., Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods, New York, 1994
- [10] KLEPO, M., Pouzdanost i raspoloživost elektroenergetskog sustava pri operativnim planiranjima rada, Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 1996.
- [11] KLEPO, M., Model neizvjesnosti pojave opterećenja u modelu pouzdanosti i raspoloživosti elektroenergetskog sustava, Energija, god.46(1997), br. 3.
- [12] KLEPO, M., Modeli proizvodnih jedinica u modelu pouzdanosti i raspoloživosti elektroenergetskog sustava – model bazne jedinice, Energija, god.46(1997), br. 4.
- [13] KLEPO, M., MIKULIČIĆ, V., ŠIMIĆ, Z., Model crpno-akumulacijske (reverzibilne) hidroelektrane u modelu pouzdanosti i raspoloživosti elektroenergetskog sustava, Energija, god. 57(2008), br. 1.
- [14] MIKULIČIĆ, V., ŠIMIĆ, Z., Modeli pouzdanosti, raspoloživosti i rizika u elektroenergetskom sustavu, I. dio, Udžbenik Sveučilišta u Zagrebu, Svibanj 2008.

Adrese autora: Authors' Adresses:

Dr. sc. **Miće Klepo**,
mklepo@hera.hr
Hrvatska energetska regulatorna agencija (HERA)
Ulica grada Vukovara 14
10000 Zagreb, Hrvatska
Prof. dr. sc. **Vladimir Mikuličić**
vladimir.mikulicic@fer.hr
Doc. dr. sc. Zdenko Šimić
zdenko.simic@fer.hr
Sveučilište u Zagrebu,
Fakultet elektrotehnike i računarstva
Unska 3, 10000 Zagreb, Hrvatska

Miće Klepo, PhD
mklepo@hera.hr
Croatian Energy Regulatory Agency (HERA)
Ulica grada Vukovara 14, 10000 Zagreb Croatia
Prof. **Vladimir Mikuličić**, PhD
vladimir.mikulicic@fer.hr
Assistant prof. Zdenko Šimić, PhD
zdenko.simic@fer.hr
University of Zagreb,
Faculty of Electrical Engineering and Computing
Unska 3, 10000 Zagreb
Croatia

Uredništvo primilo rukopis:
2009-02-09

Manuscript received:
2009-02-09

Prihvaćeno:
2009-03-09

Accepted:
2009-03-09

ANALITIČKI PRORAČUN OSOVINSKIH STRUJA KOD MOTORA S HOMOGENIM JARMOM ANALYTICAL CALCULATION OF SHAFT CURRENTS IN THE MOTORS WITH HOMOGENEOUS YOKE

Željko Hederić – Marinko Barukčić – Krešimir Miklošević,
Osijek, Hrvatska

U literaturi koja se bavi problemom osovinskih struja uglavnom su obrađivane metode dijagnostike motora, koje samo promatraju i analiziraju frekvencije harmonika karakterističnih za osovinske struje. Analitički proračun amplituda tih struja nije dosad obrađivan za motore s homogenim jarmom, a da bi se mogle provesti pravilne mjere zaštite, bitno je odrediti točno parametre koji utječu na te struje. Osovinske struje su bitna komponenta struja koje električki oštećuju ležajeve i obično predstavljaju dominantan doprinos. Osobito je to važno za niskonaponske asinkrone motore, koji su prema podacima IEC-a motori s najvećom ekspanzijom primjene u industriji i za koje je u radu objašnjen analitički proračun osovinskih struja.

Literature dealing with the matter of shaft currents mostly elaborates on the methods of motor diagnostics which only observe and analyse harmonics frequencies characteristic for shaft currents. The analytic calculation of the amplitudes of those currents has not been analysed so far for homogenous yoke motors and, in order for correct protection measures to be undertaken, it is necessary to determine exactly the parameters which influence those currents. Shaft currents are an important component of the currents which electrically damage the bearings and usually represent the dominant contribution. This is especially important for low-voltage induction motors which, according to IEC's data, are the motors with the widest application range in the industry. In this work, the analytic calculation of shaft currents is explained for those motors.

Ključne riječi: analitički proračun; asinkroni motor; homogeni jaram;
osovinska struja

Key words: analytical calculation; induction motor, homogenous yoke;
shaft current



1 UVOD

Suvremene analize pouzdanosti asinkronih motora pokazuju da većinu kvarova predstavljaju kvarovi na ležajevima. Električni uzročnici oštećenja ležajeva su struje koje teku kroz ležajeve i dovode do njihove erozije. One se razlikuju, kako po načinu nastanka, tako i prema njihovom trajanju tijekom rada motora i mogu biti: osovinske struje (induktivne) i ležajne struje (kapacitivne). Kapacitivne struje karakterizirane su probojima izolacije maziva ležaja, kratko traju i imaju velike iznose, te stvaraju oštećenja u obliku nasumičnih kratera po obodu ležajne košuljice (u praksi poznata pod engl. nazivom: *pitting*). Induktivne struje su relativno puno manjeg iznosa u odnosu na kapacitivne, ali su trajno prisutne u radu motora. Njihovim djelovanjem javljaju se oštećenja u obliku zarezata, koji su pravilno raspoređeni po obodu ležajne košuljice (u praksi poznata pod engl. nazivom: *fluting*). Oba tipa struja djeluju erozivno na ležajnu košuljicu, zbog čega dolazi do mehaničkog oštećenja ležajnih kuglica ili valjaka, čije raspadanje uzrokuje pojavu povećanih vibracija i daljnjeg oštećenja ostalih dijelova motora.

Teorijske postavke nastanka osovinskih struja, kod asinkronih motora s homogenim statorskim jarmovima (bez zračnih raspora), u literaturi koja se bavi tim problemom nisu do kraja objašnjene. Uglavnom su obrađene metode dijagnostike motora s kojima se promatraju i analiziraju frekvencije harmonika karakterističnih za osovinske struje, te se samo ukazuje na stupanj oštećenja ležaja [1]. Da bi se mogle provesti pravilne mjere zaštite, bitno je odrediti točno parametre koji utječu na osovinske struje. S tim je ciljem objašnjen postupak analitičkog proračuna osovinskih struja za dva osnovna uzroka osovinskih struja: magnetska nesimetrija i ekscentrični položaj rotora u provrtu statora (statička i dinamička ekscentričnost i ovalnost). Pri tome nije pravljena razlika između kaveznih ili kliznokolutnih motora, jer se izvor osovinske struje prvenstveno tražio u djelovanju statorskog namota.

2 UZROCI NASTAJANJA OSOVINSKIH STRUJA

Uzroci nastajanja struja koje teku kroz osovinu i osovinskih električnih napona su različiti [2], [3], [4] i [5] mogu se podijeliti u nekoliko osnovnih grupa: magnetske nesimetrije, kružni magnetski tok u jarmu, elektrostatski naboji i naponi na rotorskom namotu. Pojave osovinskih napona, te struja kroz ležajeve i druge dijelove u dodiru s osovinom postaju to kompliciranije i opa-

1 INTRODUCTION

Up-to-date analyses of induction motor's reliability show that defects on the bearings are the most usual defects. Electrical causes of bearings defects are currents which flow through the bearings and cause their erosion. These differ both according to the source of their occurrence and their duration during motor operation, and they can be: shaft currents (inductive) and bearing currents (capacitive). Capacitive currents are characterized by ruptures of the insulation of bearing lubricants, they have short durations and high rates, and cause damages in the form of sporadic craters along the rim of the bearing sleeve (known in the practice under the English name: *pitting*). Inductive currents are relatively of much lesser rates in relation to the capacitive ones, but they are constantly present in engine operation. Their impact causes damages in the form of cuts regularly spread along the rim of the bearing sleeve (known in practice under the English name: *fluting*). Both current types have erosive effects on the bearing sleeve which causes mechanic damage of bearing balls and cylinders, the disintegration of which causes the occurrence of increased vibrations and further damage to the other motor parts.

Theoretical postulates about the occurrence of shaft currents in induction motors with homogenous stator yokes (without air gaps) are not fully explained in the literature concerned with that problem. The main subject of such literature are motor diagnostics methods used to observe and analyze harmonic frequencies characteristic for shaft currents, and it only points to the level of bearing damage [1]. In order to be able to implement appropriate protection measures, it is necessary to determine accurately the parameters influencing shaft currents. With that in mind, the procedure has been explained of shaft currents analytical calculation for two main causes of shaft currents: magnetic asymmetry and eccentric rotor position in the stator bore (static and dynamic eccentricity and ovality). Thereat no difference is made between squirrel-cage and slip-ring motors because the source of the shaft current was searched for in the impact of the stator winding.

2 CAUSES OF OCCURRENCE OF SHAFT CURRENTS

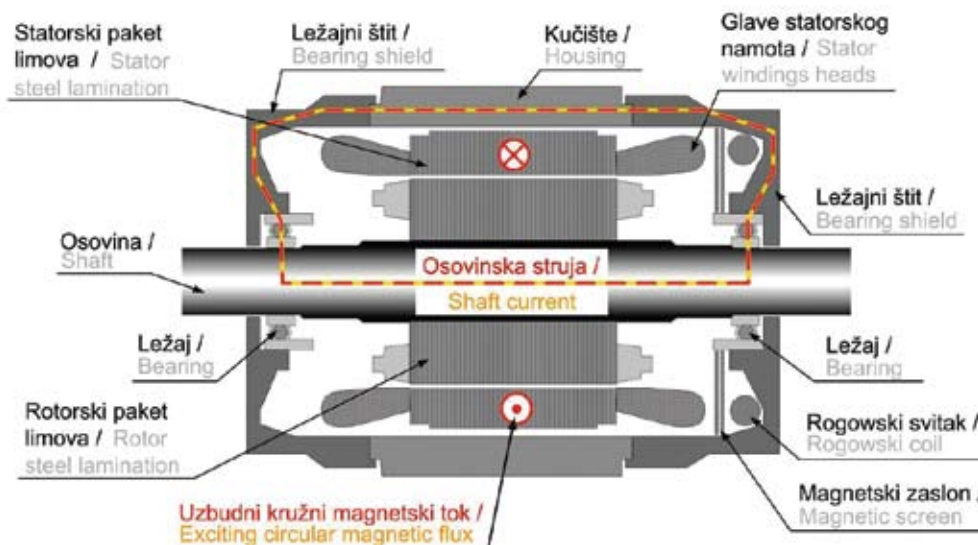
The causes of the occurrence of currents flowing through the shaft and of the shaft electric voltages are different [2], [3], [4] and [5] and can be divided into several main groups: magnetic asymmetries, circular magnetic flux in the yoke, electrostatic charges and voltages on the rotor winding. Occurrences of shaft tensions and currents through the bearings and other parts touching the shaft become all the more complicated and dangerous as power and di-

snije što se više povećavaju snaga i dimenzije elektromotornog pogona. Napone na osovini, ili bolje rečeno uzduž osovine, može prouzrokovati promjenljiv (izmjenični) magnetski tok koji obuhvaća osovinu, magnetski tok kroz samu osovinu, te protjecanje struje kroz osovinu.

Za pojavu kružnog magnetskog toka koji obuhvaća osovinu, te dovodi do nastajanja osovinskih struja, kod asinkronih motora s homogenim statorskim jarmovima i sinusnim napajanjem, veliki doprinos daje mehanička ekscentričnost rotora u statoru (nejednak zračni raspor po obodu), a nužan uvjet je nelinearnost krivulje magnetiziranja željeza. Na slici 1 prikazan je strujni krug kojim se zatvaraju osovinske struje: osovina – prvi ležaj – prvi ležajni štit – kućište – drugi ležajni štit – drugi ležaj – osovina. Osovinska struja prolazi kroz oba ležaja i oštećuje ih. Za mjerenje osovinskih struja koristi se svitak Rogowskog koji se smješta u ležajni štit motora, koncentrično oko osovine. Radi sprječavanja pogreške mjerenja uslijed rasipnih magnetskih tokova glava statorskih namota, između svitka Rogowskog i glava namota postavlja se magnetski zaslon [6].

mensions of the electromotor drive increase. Tensions on the shaft or, better yet, along the shaft, can be caused by changeable (alterative) magnetic flux which encompasses the shaft, magnetic flux through the shaft itself and the flow of the current through the shaft.

A great contribution to the occurrence of the circular magnetic flow which encompasses the shaft and brings about the occurrence of shaft currents in induction motors with homogenous stator yokes and sinuous power supply is provided by the mechanic eccentricity of the rotor in the stator (unequal air gap along the rim) and a required condition is the non-linearity of the magnetization curve for iron. Figure 1 shows the electric circuit in which shaft currents are closed: Shaft - first bearing - first bearing shield - bearing box - second bearing shield - second bearing - shaft. The shaft current passes through both bearings and damages them. For the measurement of shaft currents, a Rogowski coil is used which is placed in the motor bearing shield, concentrically around the shaft. For the purpose of preventing measurement errors due to magnetic fluxes leakage of the heads of stator windings, between the Rogowski coil and the winding heads, a magnetic screen is placed [6].



Slika 1 – Prikaz strujnog kruga zatvaranja osovinskih struja
Figure 1 – Presentation of the electrical circuit of shaft current closure

3 POSTUPAK ANALITIČKOG IZRAČUNA OSOVINSKIH STRUJA

Postupak analitičkog izračuna osovinskih struja treba započeti određivanjem magnetske indukcije u zračnom rasporu, čemu jasno prethodi

3 PROCEDURE OF ANALYTIC CALCULATION OF SHAFT CURRENTS

Procedure for the analytic calculation of shaft currents should be initiated by determining the magnetic induction in the air gap, which is clearly con-

poznavanje struje magnetiziranja. Ako se pretpostavi κ -ti harmonik magnetske indukcije u zračnom rasporu:

ditioned by knowing the magnetization current. If the κ -harmonic of magnetic induction in the air gap is assumed:

$$b_{\kappa}(x, t) = B_{\kappa} \cos(\kappa x - \omega_{\kappa} t - \varphi_{\kappa}), \quad (1)$$

gdje je:

b_{κ} – harmonik magnetske indukcije u zračnom rasporu, T,
 B_{κ} – amplituda harmonika magnetske indukcije u zračnom rasporu, T,
 κ – oznaka harmonika,
 x – obodni kut kojim je definiran položaj na obodu zračnog raspora, rad,
 ω_{κ} – kružna frekvencija harmonika, s⁻¹,
 φ_{κ} – fazni kut harmonika, rad,

on uzrokuje, pod pretpostavkom da se silnice zatvaraju preko jarma statora, κ -ti harmonik magnetske indukcije u jarmu statora:
 gdje je:

where it is as follows:

b_{κ} – magnetic induction harmonic in the air gap, T,
 B_{κ} – amplitude of magnetic induction harmonics in the air gap, T,
 κ – harmonics symbol,
 x – circumferential angle which defines the position on the rim of the air gap, rad,
 ω_{κ} – circular harmonics frequency, s⁻¹,
 φ_{κ} – harmonics phase angle, rad,

it causes, under the assumption that magnetic field lines close through the stator yoke, κ -harmonic of magnetic induction in the stator yoke:
 where it is as follows:

$$b_{y\kappa}(x, t) = B_{y\kappa} \cos(\kappa x - \omega_{\kappa} t - \varphi_{\kappa}), \quad (2)$$

b_{κ} – harmonik magnetske indukcije u zračnom rasporu, T,
 y – oznaka za jaram.

Integriranjem poluvala harmonika magnetske indukcije u zračnom rasporu (b_{κ}) dobiva se amplituda κ -tog harmonika magnetske indukcije u jarmu:

b_{κ} – magnetic induction harmonic in the air gap, T,
 y – yoke symbol.

By integrating the semi-wave of the magnetic induction harmonic in the air gap (b_{κ}) the amplitude of the κ -harmonic of magnetic induction in the yoke is obtained:

$$B_{y\kappa} = \frac{R}{h_y} \int_{\frac{\pi p}{2\kappa}} b_{\kappa}(x, t) dx, \quad (3)$$

gdje je:

$B_{y\kappa}$ – amplituda κ -tog harmonika magnetske indukcije u jarmu, T,
 R – srednji radijus jarma statora, m,
 h_y – visina jarma statora, m,
 p – broj pari polova.

Omjer p / κ u granicama integrala je zbog toga što svaki harmonik ima drugi broj pari polova, odnosno periodu. Na osnovi postupka objašnjenog u [2], može se definirati funkcija κ -tog harmonika jakosti polja u jarmu u ovisnosti o κ -tom harmo-

where it is as follows:

$B_{y\kappa}$ – amplitude of κ -harmonic of magnetic induction in the yoke, T,
 R – average stator yoke radius, m,
 h_y – stator yoke height, m,
 p – number of pole pairs.

Ratio p / κ is within the limits of the integral because each harmonic has a different number of pole pairs, that is, different periods. Based on the procedure explained in [2], the function of the κ -harmonic of field intensity in the yoke depending

niku magnetske indukcije i rezultatne permeabilnosti:

on the κ -harmonic of magnetic induction and resulting permeability can be defined.

$$h_{y\kappa}(x, t) = \frac{b_{y\kappa}(x, t)}{\mu_{res}(x, t)}, \quad (4)$$

gdje je:

where it is as follows:

$h_{y\kappa}$ – harmonik jakosti polja u jarmu, A/m,
 μ_{res} – rezultatna permeabilnost, Vs/Am.

$h_{y\kappa}$ – yoke field intensity harmonic, A/m,
 μ_{res} – resulting permeability, Vs/Am.

Pri tome se rezultatna permeabilnost rotora mora računati iz rezultatne indukcije u jarmu i iz karakteristike magnetiziranja željeza paketa limova motora.

Thereat the resulting rotor permeability must be calculated from the resulting induction in the yoke and from the magnetizing curve of electrical steel of the motor stack lamination.

Rezultatna magnetska indukcija u jarmu predstavlja sumu svih harmonika:

Resulting magnetic induction in the yoke represents the sum of all harmonics:

$$b_{yres}(x, t) = \sum_v B_{yv} \sin(vx - \omega_v t - \phi_v) \quad (5)$$

gdje je: v – oznaka harmonika.

where it is as follows: v – harmonics symbol.

Sljedeći korak je aproksimacija krivulje magnetiziranja željeza paketa limova motora polinomom, odnosno definiranje rezultatne jakosti magnetskog polja kao funkcije rezultatne magnetske indukcije preko polinoma koji ima samo neparne potencije:

The next step is the approximation of the magnetizing curve of motor stack lamination by polynomial, that is, the definition of resulting intensity of the magnetic field as a function of the resulting magnetic induction through the polynomial which has odd exponents only:

$$h_{yres}(x, t) = \frac{1}{\mu_1} b_{yres}(x, t) + \frac{1}{\mu_3} b_{yres}^3(x, t) + \frac{1}{\mu_5} b_{yres}^5(x, t) + \dots, \quad (6)$$

pri čemu koeficijenti polinoma ($1 / \mu_i$) prema [6] moraju biti pozitivni realni brojevi.

whereat the polynomial coefficients ($1 / \mu_i$) according to [6] have to be positive real numbers.

Ako se funkcija rezultatne jakosti polja podijeli s rezultatnom magnetskom indukcijom, na desnoj strani se dobiva polinom, čiji su koeficijenti numerički jednaki koeficijentima polinoma koji aproksimira krivulju magnetiziranja:

If the function of the resulting field intensity is divided by the resulting magnetic induction, on the right side a polynomial is obtained and its coefficients are numerically equal to the coefficients of the polynomial which approximates the magnetization curve:

$$\frac{1}{\mu_{res}} = \frac{h_{yres}(x, t)}{b_{yres}(x, t)} = \frac{1}{\mu_1} + \frac{1}{\mu_3} b_{yres}^2(x, t) + \frac{1}{\mu_5} b_{yres}^4(x, t) + \dots \quad (7)$$

Budući da (7) mora vrijediti i za ukupno polje i za svaki pojedini harmonik, slijedi:

Since (7) needs to be valid both for the overall field and for each particular harmonic, it follows:

$$h_{y\kappa}(x,t) = B_{y\kappa} \sin(\kappa x - \omega_\kappa t - \varphi_\kappa) \cdot \left\{ \frac{1}{\mu_1} + \frac{1}{\mu_3} \left[\sum_v B_{yv} \sin(vx - \omega_v t - \varphi_v) \right]^2 + \frac{1}{\mu_5} \left[\sum_v B_{yv} \sin(vx - \omega_v t - \varphi_v) \right]^4 + \dots \right\}. \quad (8)$$

Ovako opisana aproksimacija omogućava da se poznavanjem harmonika indukcije u zračnom rasporu, može vrlo jednostavnim polinomom izračunati harmonike jakosti polja u jarmu statora.

Za procjenu da li κ -ti harmonik magnetskog polja uzrokuje osovinski napon, mora se detaljnije proučiti linijski integral protjecanja:

Approximation described as above makes it possible, by knowing the induction harmonic in the air gap, to calculate, by virtue of a very simple polynomial, the field intensity harmonics in the stator yoke.

In order to assess whether the κ -harmonic of the magnetic field causes the shaft voltage, the line integral of the magnetomotive force should be examined:

$$\Theta_\kappa = R \int_0^{2\pi} h_{y\kappa}(x,t) dx. \quad (9)$$

Da bi postojala osovinska struja jasno je da protjecanje mora biti različito od nule, tj. mora postojati kružni magnetski tok. Ako se pretpostavi linearna magnetska karakteristika, za koeficijente polinoma vrijedi: $\mu_3 = \mu_5 = \dots = \infty$, odnosno za bilo koju vrijednost od κ uvijek vrijedi $\Theta \equiv 0$. S druge strane, prema zakonu protjecanja slijedi da $\Theta \neq 0$ uvjetuje postojanje kružne komponente protjecanja u zračnom rasporu provrta.

Ovakvo razmatranje potvrđuje prethodnu konstataciju da je magnetska nesimetrija, kod motora s homogenim jarmom, nužan uvjet postojanja kružnog toka, a time i osovinske struje. Nakon što se odredi protjecanje, množenjem s vodljivošću jarma, dobiva se kružni magnetski tok koji inducira osovinski napon (Faradayev zakon). Tada je, određivanje impedancije strujnog kruga, kojim se može zatvoriti osovinska struja, posljednji problem koji se javlja u postupku određivanja osovinske struje.

Za pravilan analitički izračun osovinskih struja potrebno je izvesti doprinos svih nesimetrija: geometrijskih i magnetskih. Geometrijske nesimetrije uzrokovane su nesavršenošću kružnog oblika ležaja, provrta statora i oboda rotora, kao i izobličenjem osovine. Ovisno o stupnju nesavršenosti definiraju se pojmovi ekscentričnosti i ovalnosti. Nadalje je opisan pojednostavljen izvod utjecaja ekscentričnog položaja centričnog rotora u centričnom statoru.

U [5] se pojam statičke ekscentričnosti definira uz pojavu kada se os rotora ne poklapa sa osi provrta statora (na slici 2 označena sa M) i mi-

It is obvious that the occurrence of the shaft current requires the magnetomotive force to be different than zero, that is, there has to be a circular magnetic flux. If a linear magnetic characteristic is assumed, the following applies for the polynomial coefficients: $\mu_3 = \mu_5 = \dots = \infty$, that is for any value of κ , $\Theta \equiv 0$ always applies. On the other hand, according to the Ampere law it follows that $\Theta \neq 0$ conditions the existence of a circular flux component in the air gap of the bore.

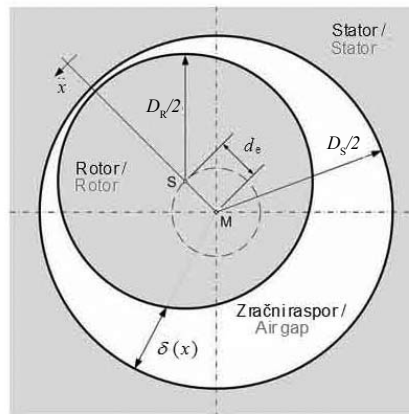
This kind of consideration proves the previous conclusion that magnetic asymmetry in motors with homogenous yoke is a required condition for the existence of a circular flux, and thus of a shaft current. After the determination of the flow, by multiplication with yoke conductivity, a circular magnetic flux is gained and it induces the shaft voltage (the Faraday Law). Then the determination of the impedance of electrical circuit in which shaft current can be closed, is the last problem which occurs in the process of determination of the shaft current.

For a correct analytic calculation of shaft currents, it is necessary to derive the contribution of all asymmetries: geometrical and magnetic. Geometric asymmetries are caused by the imperfection of the round shape of the bearing, stator bore and rotor rim, as well as by the disfigurement of the shaft. Depending on the level of imperfection, the notions of eccentricity and ovality are defined. A simplified derivation of the impact of the centric rotor's eccentric position in the centric stator is further described.

In [5], the notion of static eccentricity is defined for the event when the rotor axis does not overlap the stator bore axis (marked with M in Figure 2) and re-

ruje u provrtu statora, odnosno rotor se vrti oko točke koja je fiksna u prostoru (na slici 2 označena sa S). U koliko se točka S vrti oko točke M (slika 2) ovisno o vremenu, tada se definira pojam dinamičke ekscentričnosti. U slučaju statičke ekscentričnosti širina zračnog raspora je isključivo funkcija obodnog kuta (x), dok je u slučaju dinamičke ekscentričnosti ona funkcija i obodnog kuta (x) i vremena (t).

sts in the stator bore, that is, the rotor spins around a point which is fixed in space (marked with S in Figure 2). If point S spins around point M (Figure 2) depending on time, then the notion of dynamic eccentricity is defined. In case of static eccentricity, the width of the air gap is exclusively a function of the circumferential angle (x), while in case of dynamic eccentricity, it is a function both the circumferential angle (x) and time (t).



Slika 2 – Prikaz ekscentričnog pomaka rotora u provrtu statora
Figure 2 – Presentation of the eccentric rotor shift in the stator bore

Pri pisanju izraza za vodljivost zračnog raspora za ekscentrični rotor, obično se zanemaruje utjecaj nazubljenja paketa i zasićenja u željezu paketa. Općenito se za veličinu zračnog raspora može napisati funkcija:

When writing expressions for the air gap conductivity for the eccentric rotor, the impact of the serration of the stack and the stack iron saturation is usually disregarded. In general, the function can be written for the size of the air gap:

$$\delta(x, t) = \delta_a [1 + \varepsilon \cdot \cos(x - \omega_e t - \varphi_e)] , \quad (10)$$

gdje je:

where it is as follows:

δ – veličina zračnog raspora, m,
 δ_a – srednja vrijednost zračnog raspora, m,
 ε – ekscentricitet.

δ – air gap size, m,
 δ_a – mean value of air gap size, m,
 ε – eccentricity.

Pri tome je srednja vrijednost zračnog raspora:

Thereat, mean value of air gap size is:

$$\delta_a = \frac{D_S - D_R}{2} , \quad (11)$$

dok za ekscentricitet vrijedi:

while the following applies for eccentricity:

$$\varepsilon = \frac{d_e}{\delta_a}, \quad (12)$$

gdje je:

d_e – ekscentrični pomak rotora, m (razmak točaka S i M na slici 2),
 D_S – promjer statora motora, m,
 D_R – promjer rotora motora, m.

Kružna frekvencija (ω_p) veličine zračnog raspora ovisna je o tome radi li se o statičkom ekscentricitetu ($\omega_e = 0$ ili o dinamičkom ekscentricitetu ($\omega_e = (1 - s) \omega/p$), tj. ovisna je o broju pari polova (p) i o klizanju (s), odnosno o brzini vrtnje rotora. Općenito se vodljivost zračnog raspora definira kao omjer permeabilnosti zraka i veličine zračnog raspora:

where it is as follows:

d_e – eccentric rotor shift, m (distance between the points S and M in Figure 2),
 D_S – motor stator diameter, m,
 D_R – motor rotor diameter, m.

Circular frequency (ω_p) of the air gap size depends on whether it is about static eccentricity ($\omega_e = 0$) or dynamic eccentricity ($\omega_e = (1 - s) \omega/p$), that is, it depends on the number of pole pairs (p) and the slip (s), that is, on the rotor spinning speed. Generally, the conductivity of the air gap is defined as the ratio of air permeability and air gap size:

$$\lambda(x, t) = \frac{\mu_0}{\delta(x, t)}, \quad (13)$$

gdje je:

λ – vodljivost zračnog raspora, Vs/Am²,
 μ_0 – permeabilnost zraka, Vs/Am.

Uz pojednostavljenje, prikladniji oblik vodljivosti zračnog raspora određen je prema [5]:

where it is as follows:

λ – air gap conductivity, Vs/Am²,
 μ_0 – air permeability, Vs/Am.

With a simplification, a more adequate form of conductivity of air gap is determined according to [5]:

$$\lambda(x, t) = A_0 \left[1 + \sum_{\gamma=1,2,\dots}^{\infty} k_{\gamma} \cdot \cos [\gamma(x - \omega_e t - \varphi_e)] \right], \quad (14)$$

gdje se vodljivost idealnog zračnog raspora A_0 , Vs/Am² i koeficijent ekscentričnosti (k_{γ}) računaju preko sljedećih izraza:

where the conductivity of the ideal air gap A_0 , Vs/Am² and the eccentricity coefficient (k_{γ}) are calculated through the following expressions:

$$A_0 = \frac{\mu_0}{\delta_a} \frac{1}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}}, \quad (15)$$

$$k_{\gamma} = 2 \frac{(1 - \sqrt{1 - \varepsilon^2})^2}{\varepsilon^{\gamma}}. \quad (16)$$

Pošto se magnetska indukcija računa množenjem protjecanja s vodljivošću zračnog raspora, vidljivo je iz izraza za vodljivost (14) da će tako dobivena indukcija imati veliki broj harmonika.

Since the magnetic induction is calculated by multiplying the magnetomotive force with the conductivity of the air gap, the conductivity expression (14) reveals that induction achieved in that way will have a large number of harmonics.

Radi jednostavnijeg objašnjenja na primjeru motora s $p=1$ pari polova, bit će ukratko opisan postupak izvođenja harmonika za različite vrste geometrijske nesimetrije (ekscentričnost i ovalnost). Prema [6], vodljivost zračnog raspora pri statičkoj i dinamičkoj ekscentričnosti, može se definirati kao:

For the purpose of a simpler explanation, the procedure of derivation of harmonics for different types of geometric asymmetries (eccentricity and ovality) will be briefly described on the example of the motor with $p=1$ pole pairs. According to [6], air gap conductivity at static and dynamic eccentricity can be defined as:

$$\lambda(x,t) = A_0 [1 + k_{se} \cos(x - x_{os}) + k_{de} \cos(x - \omega(1-s) - x_{od})], \quad (17)$$

gdje prema (16) izvedeni koeficijenti imaju indekse:

where according to (16) the derived coefficients have indices:

se – statička ekscentričnost,
de – dinamička ekscentričnost.

se – static eccentricity,
de – dynamic eccentricity.

Početna vrijednost obodnih kutova za statičku i dinamičku ekscentričnost označena je indeksima:

Initial value of circumferential angles for static and dynamic eccentricity is marked by indices:

os – statička ekscentričnost,
od – dinamička ekscentričnost.

os – static eccentricity,
od – dynamic eccentricity.

Harmonik protjecanja (za jednopolni stroj) uz amplitudu prema (9) ima izraz:

Magnetomotive force harmonic (for a one-pole machine) with the amplitude according to (9) has the expression:

$$\mathcal{F}_1(x,t) = \mathcal{F}_1 \cos(x - \omega t - \varphi_1), \quad (18)$$

pa uz statički ekscentricitet:

so with static eccentricity:

$$\lambda_{se}(x,t) = A_0 [1 + k_{se} \cos(x - x_{os})], \quad (19)$$

slijedi izraz za harmonik ($\nu=p=1$) magnetske indukcije uslijed statičke ekscentričnosti:

the expression for the magnetic induction harmonic ($\nu=p=1$) due to static eccentricity follows:

$$b_{1se} = \mathcal{F}_1 \lambda_{se} = \mathcal{F}_1 A_0 [\cos(x - \omega t - \varphi_1) + k_{se} \cos(x - x_{os}) \cos(x - \omega t - \varphi_1)], \quad (20)$$

gdje je indeks 1 oznaka za harmonik. Doprinos statičkog ekscentriciteta harmoniku magnetske indukcije predstavlja drugi član zagrada, te slijedi:

where index 1 is the symbol for the harmonic. The contribution of the static eccentricity to the magnetic induction harmonic represents the second term in the brackets, and it follows:

$$b_{1ss} = \mathcal{F}_1 A_0 \frac{k_{se}}{2} [\cos(xt + \varphi_1 - x_{os}) + \cos(2x - \omega t - \varphi_1 - x_{os})]. \quad (21)$$

Prema [2] za harmonike vrijedi:

According to [2], the following applies for the harmonics:

$$\kappa = 2 \cdot g \cdot v, \quad (22)$$

gdje je koeficijent g predstavlja cijele brojeve:

where the coefficient g represents whole numbers:

$$g = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (23)$$

Sada iz argumenta protjecanja ($x - \omega t$) prema izrazu (5) slijedi:

Now, from the magnetomotive force operator ($x - \omega t$) according to the expression (5) it follows:

$$v = 1 \rightarrow \omega_v = \omega, \quad (24)$$

a iz doprinosa statičkog ekscentriciteta harmoniku magnetske indukcije ($2x - \omega t$) slijedi:

and from the static eccentricity contribution to the magnetic induction harmonic ($2x - \omega t$), it follows:

$$\kappa = 2 \rightarrow \omega_\kappa = \omega. \quad (25)$$

Iz (22), uvrštavanjem vrijednosti harmonika ($v = 1, \kappa = 1$), slijedi da je $g = 1$, pa se nadalje, prema [2], računa kružna frekvencija harmonika uslijed statičke ekscentričnosti:

From (22), by inserting the harmonics value ($v = 1, \kappa = 1$), follows that $g = 1$, therefore according to [2], the circular harmonic frequency due to static eccentricity is further calculated:

$$|\omega_o| = |\omega_\kappa - 2 \cdot g \cdot \omega_v| = |-\omega| = \omega. \quad (26)$$

Analognim postupkom, za dinamički ekscentricitet prema izrazu (17) određuje se vodljivost zračnog raspora:

By analogous procedure, for dynamic eccentricity according to the expression (17), air gap conductivity is determined:

$$\lambda_{de}(x, t) = \lambda_o [1 + k_{de} \cos(x - \omega(1-s) - x_{od})]. \quad (27)$$

Kružna frekvencija harmonika uslijed dinamičke ekscentričnosti prema izrazu (26) je:

Circular harmonics frequency due to dynamic eccentricity according to the expression (26) is:

$$|\omega_o| = s\omega. \quad (28)$$

Treba naglasiti da je, za razliku od kružne frekvencije harmonika uslijed statičke ekscentričnosti, kružna frekvencija harmonika zbog dinamičke ekscentričnosti ovisna o klizanju, odnosno o brzi-

It should be pointed out that, unlike the circular harmonics frequency due to static eccentricity, circular harmonics frequency due to dynamic eccentricity depends on the slip, that is, on the

ni vrtnje motora. Na osnovi prethodnog izvoda mogu se izvesti harmonici magnetske indukcije u zračnom rasporu koji zbog geometrijske nesimetrije uzrokuju pojavu osovinskih struja. Detaljniji pregled izraza za vodljivosti i protjecanja, te izvodi harmonika za najčešće oblike geometrijske nesimetrije (ekscentričnost, ovalnost), kao i pregledne tablice usporedbi s mjerenjima dani su u [5].

U tablicama 1 i 2 dani su prikazi raspodjele harmonika magnetske indukcije po uzrocima nastajanja za motor sa $p=2$ pari polova, na kojem su vršena mjerenja. Za svaku vrstu geometrijske nesimetrije, u prvim stupcima su brojevi pojavljivanja najutjecajnijih harmonika, a u trećim stupcima su harmonici čije se amplitude mogu zanemariti. U posljednja tri stupca je zbirni doprinos, prema kojem su harmonici i sortirani.

motor rotation speed. Based on the above derivation, magnetic induction harmonics in the air gap, which cause the occurrence of shaft current because of the geometric asymmetry, can be derived. A more detailed overview of the expressions for conductivity and magnetomotive force, as well as the derivations of harmonics for the most usual forms of geometric asymmetry (eccentricity, ovality), as well as the overview tables which show comparisons with measurements, are provided in [5].

Tables 1 and 2 provide presentations of the distribution of magnetic induction harmonics according to the occurrence patterns for the motor, on which measurements were done, with $p=2$ pole pairs. For each type of geometric asymmetry, numbers of occurrence of the most influential harmonics are in the first columns and harmonics, the amplitudes of which can be ignored, are in the third columns. The aggregate contribution according to which the harmonics are sorted is in the last three columns.

Tablica 1 – Raspodjela harmonika kružnog toka prema doprinosu amplitudi osovinske struje za Y spoj motora
Table 1 – Distribution of circular magnetic flux harmonics according to contribution to the shaft currents amplitude for Y motor connection

| Frekvencija [Hz] Frequency | Harmonik Harmonic | Statička ekscentričnost Static eccentricity | | | Dinamička ekscentričnost Dynamic eccentricity | | | Statička ovalnost Static ovality | | | Dinamička ovalnost Dynamic ovality | | | Suma harmonika Sum of harmonics | | |
|-------------------------------|----------------------|--|---|---|--|---|---|-------------------------------------|---|---|---------------------------------------|---|---|------------------------------------|---|----|
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 50,0 | ω | 3 | 3 | 3 | | | | 5 | 4 | 9 | | | | 8 | 7 | 14 |
| 1,4 | $s\omega$ | | | | 3 | 3 | 5 | | | | 2 | 1 | 5 | 5 | 4 | 10 |
| 150,0 | 3ω | | | | | | | 6 | 2 | 4 | | | | 6 | 2 | 4 |
| 295,8 | $(6-3s)\omega$ | | | | | | | | | | 4 | 1 | | 4 | 1 | 0 |
| 550,0 | 11ω | 2 | | | | | | 4 | | | | | | 0 | 6 | 0 |
| 4,2 | $3s\omega$ | | | | | | | | | | 2 | 1 | | 2 | 1 | 0 |
| 598,6 | $(12-s)\omega$ | | | | 2 | | | | | | 2 | | | 0 | 4 | 0 |
| 450,0 | 9ω | | | | | | | 3 | | | | | | 0 | 3 | 0 |
| 250,0 | 5ω | 1 | | | | | | 2 | | | | | | 0 | 3 | 0 |
| 350,0 | 7ω | 1 | | | | | | 2 | | | | | | 0 | 3 | 0 |
| 650,0 | 13ω | 1 | | | | | | 2 | | | | | | 0 | 3 | 0 |
| 850,0 | 17ω | 1 | | | | | | 2 | | | | | | 0 | 3 | 0 |
| 950,5 | 19ω | 1 | | | | | | 2 | | | | | | 0 | 2 | 0 |
| 750,0 | 15ω | | | | | | | 2 | | | | | | 0 | 2 | 0 |
| 298,6 | $(6-s)\omega$ | | | | | 1 | | | | | 1 | | | 0 | 2 | 0 |
| 301,4 | $(6+s)\omega$ | | | | | 1 | | | | | 1 | | | 0 | 2 | 0 |
| 595,8 | $(12-3s)\omega$ | | | | | | | | | | 2 | | | 0 | 2 | 0 |
| 601,4 | $(12+s)\omega$ | | | | | 1 | | | | | 1 | | | 0 | 2 | 0 |
| 898,4 | $(18-s)\omega$ | | | | | 1 | | | | | 1 | | | 0 | 2 | 0 |
| 901,4 | $(18+s)\omega$ | | | | | 1 | | | | | 1 | | | 0 | 2 | 0 |
| 304,2 | $(6+3s)\omega$ | | | | | | | | | | 1 | | | 0 | 1 | 0 |
| 604,2 | $(12+3s)\omega$ | | | | | | | | | | 1 | | | 0 | 1 | 0 |
| 895,8 | $(18-3s)\omega$ | | | | | | | | | | 1 | | | 0 | 1 | 0 |

Tablica 2 – Raspodjela harmonika kružnog toka prema doprinosu amplitudi osovinske struje za D spoj motora
 Table 2 – Distribution of circular magnetic flux harmonics according to contribution to the shaft currents amplitude for D motor connection

| Frekvencija [Hz] Frequency | Harmonik Harmonic | Statička ekscentričnost Static eccentricity | | | Dinamička ekscentričnost Dynamic eccentricity | | | Statička ovalnost Static ovality | | | Dinamička ovalnost Dynamic ovality | | | Suma harmonika Sum of harmonics | | |
|-------------------------------|----------------------|--|---|---|--|---|---|-------------------------------------|----|---|---------------------------------------|----|---|------------------------------------|----|----|
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1,5 | $s\omega$ | | | | 5 | 6 | 5 | | | | 9 | 10 | 9 | 14 | 16 | 14 |
| 50,0 | ω | 5 | 6 | 5 | | | | 9 | 10 | 9 | | | | 14 | 16 | 14 |
| 298,5 | $(6-s)\omega$ | | | | 6 | 2 | | | | | 14 | 4 | | 20 | 6 | 0 |
| 250,0 | 5ω | 6 | 2 | | | | | 12 | 4 | | | | | 18 | 6 | 0 |
| 350,0 | 7ω | 4 | 2 | | | | | 8 | 4 | | | | | 12 | 6 | 0 |
| 150,0 | 3ω | | | | | | | 10 | 6 | 4 | | | | 10 | 6 | 4 |
| 301,5 | $(6+s)\omega$ | | | | 4 | 2 | | | | | 4 | 4 | | 8 | 6 | 0 |
| 4,5 | $3s\omega$ | | | | | | | | | | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 450,0 | 9ω | | | | | | | | | | | | | 4 | 6 | 0 |
| 295,5 | $(6-3s)\omega$ | | | | | | | | | | 6 | 2 | | 6 | 2 | 0 |
| 550,0 | 11ω | | 3 | | | | | | 6 | | | | | 0 | 9 | 0 |
| 601,5 | $(12+s)\omega$ | | | | | 3 | | | | | | 6 | | 0 | 9 | 0 |
| 650,0 | 13ω | | 3 | | | | | | 6 | | | | | 2 | 6 | 0 |
| 595,5 | $(12-3s)\omega$ | | | | | | | | | | 2 | 6 | | 0 | 7 | 0 |
| 598,5 | $(12-s)\omega$ | | | | | 3 | | | | | | 4 | | 2 | 2 | 0 |
| 304,5 | $(6+3s)\omega$ | | | | | | | | | | 2 | 2 | | 0 | 3 | 0 |
| 750,0 | 15ω | | | | | | | | 3 | | | | | 0 | 3 | 0 |
| 850,0 | 17ω | | 1 | | | | | | 2 | | | | | 0 | 3 | 0 |
| 898,5 | $(18-s)\omega$ | | | | | 1 | | | | | | 2 | | 0 | 3 | 0 |
| 901,5 | $(18+s)\omega$ | | | | | 1 | | | | | | 2 | | 0 | 3 | 0 |
| 950,0 | 19ω | | 1 | | | | | | 2 | | | | | 0 | 3 | 0 |
| 604,5 | $(12+3s)\omega$ | | | | | | | | | | | 2 | | 0 | 2 | 0 |
| 895,5 | $(18-3s)\omega$ | | | | | | | | | | | 1 | | 0 | 1 | 0 |

4 PRIMJER ANALITIČKOG IZRAČUNA I USPOREDBA S REZULTATIMA MJERENJA

Na temelju prethodno izvedenog analitičkog proračuna osovinskih struja za motore s homogenim jarmom, na primjeru jednog četveropolnog kaveznog asinkronog motora za pogon viličara napravljen je ogledni primjer analitičkog izračuna nekih frekvencija harmonika osovinske struje. Za izračun je potrebno da se uz osnovne parametre motora (nazivni napon, frekvencija, broj pari polova, broj utora statora i rotora, faktor skraćivanja namota) poznaju dimenzije motora i krivulja prvog magnetiziranja magnetskog lima paketa statora i rotora, kao i čelika osovine. Podaci motora su: spoj statorskog namota u trokut, nazivni napon 22,5 V, nazivna struja 115 A, nazivni faktor snage 0,749, nazivna frekvenci-

4 EXAMPLE OF THE ANALYTIC CALCULATION AND COMPARISON WITH THE MEASUREMENT RESULTS

Based on the analytic calculation of shaft currents for homogenous yoke motors derived above, a sample example of the analytic calculation of certain frequencies of shaft current harmonics is created on the example of a four-pole squirrel-cage induction motor for the forklift drive. The calculation requires knowing not only the basic motor parameters (nominal voltage, frequency, number of pole pairs, number of stator and rotor slots, winding shortening factor) but also motor dimensions and the magnetizing curve of electrical steel of the stack lamination of stator and rotor. Motor data are: stator winding connection in a delta configuration, nominal voltage 22,5 V, nominal current 115 A, nominal power factor

ja 50 Hz, nazivna brzina vrtnje 1 455 min⁻¹, nazivni moment 31,5 Nm, broj utora statora 36, broj utora rotora 48, zračni raspor 0,4 mm.

Postupak proračuna osovinske struje treba započeti izračunom struje magnetiziranja na osnovi poznatih izraza iz teorije strojeva. Analitički je izračunata vrijednost od $I_{sm} = 98,85 \text{ A}$, iz čega slijedi da je, u odnosu na mjerenu vrijednost struje motora u praznom hodu: $I_{sm,mj} = 92,31 \text{ A}$, relativna pogreška izračuna 7,25 %. Slijedi određivanje harmonika magnetske indukcije u zračnom rasporu.

Na temelju razmatranja u prethodnom poglavlju i rezultata prikazanih u tablici 2, odabrana su za izračun samo tri harmonika: glavni harmonik, treći i peti. Njihove analitički dobivene vrijednosti su: $B_{1p} = 1,043 \text{ T}$, $B_{3p} = 0,049 57 \text{ T}$, $B_{5p} = 0,029 23 \text{ T}$.

Ako se definira da je ovaj proračun namijenjen za spljoštenu (nesinusnu) krivulju raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu, za rezultat se u treći harmonik, koji dolazi iz sustava istosmjernih struja, prema [6] mora uvesti dodatni korektivni faktor ovisno o karakteristikama magnetiziranja. Sad se mogu definirati harmonici indukcije u zračnom rasporu:

0,749, nominal frequency 50 Hz, nominal rotation speed 1 455 min⁻¹, nominal moment 31,5 Nm, number of stator slots 36, number of rotor slots 48, air gap 0,4 mm.

The procedure of shaft current calculation should be initiated by calculating the magnetization current on the basis of known expressions from the machine theory. The value of $I_{sm} = 98,85 \text{ A}$, was analytically calculated, and from that it follows that, in relation to the measured current value of the idle running motor: $I_{sm,mj} = 92,31 \text{ A}$ the relative calculation error is 7,25 %. Next is determination of the magnetic induction harmonics in the air gap.

Based on the considerations from the following chapter and the results shown in table 2, only three harmonics have been chosen for calculation: the main harmonic, the third and the fifth. Their analytically derived values are: $B_{1p} = 1,043 \text{ T}$, $B_{3p} = 0,049 57 \text{ T}$, $B_{5p} = 0,029 23 \text{ T}$.

If it is defined that this calculation is intended for the flat (non-sinusoidal) curve of the magnetic induction distribution in the air gap, for the result, in the third harmonic, which comes from the direct current system, according to [6] an additional corrective factor must be inserted depending on the magnetization characteristic. Now the magnetic induction harmonics in the air gap can be determined.

$$\begin{aligned} b_2(x,t) &= B_2 \sin(2x - \omega t - \varphi_m), \\ b_6(x,t) &= B_6 \sin(6x - 3\omega t - 3\varphi_m), \\ b_3(x,t) &= B_3 \sin(3x - \omega t - \varphi_m), \\ b_{10}(x,t) &= B_{10} \sin(10x - \omega t - \varphi_m), \end{aligned} \quad (29)$$

gdje indeksi magnetske indukcije (indeksi: 2, 6, 10) predstavljaju harmonike: v/p . Pojavljuje se i treći harmonik (indeks 3), koji je uzrokovan istosmjernim sustavom napajanja i zasićenjem željeza [6].

Za definiranje doprinosa statičke ekscentričnosti ili ovalnosti, iznose indukcije u zračnom rasporu treba množiti s vodljivošću koja u sebi sadrži doprinos geometrijske nesimetrije. Prema postupku određivanja harmonika osovinske struje definiranim u poglavlju 3 mogu se izvesti izrazi koji ukazuju koliko te geometrijske nesimetrije doprinose harmonicima osovinske struje. U tablici 3 prikazane su kombinacije koje daju tri osnovna harmonika osovinske struje (ω , 3ω , 5ω).

where magnetic induction indices (indices: 2, 6, 10) represent the harmonics: v/p . A third harmonic also appears (index 3) which is caused by the direct current system of power supply and iron saturation [6].

For the definition of the static eccentricity or ovality contribution, the rates of induction in the air gap should be multiplied with the conductivity which contains in it the contribution of geometric asymmetry. According to the procedure for determining the shaft current harmonics defined in Chapter 3, expressions can be derived which show how much those asymmetries contribute to the shaft current harmonics. Table 3 shows combinations which give three basic shaft current harmonics (ω , 3ω , 5ω).

Tablica 3 – Pregled amplituda harmonika osovinske struje prema doprinosu određenih harmonika indukcije
 Table 3 – An overview of the shaft currents harmonic amplitudes to contribution of certain magnetic induction harmonics

| Statička ekscentričnost / Static eccentricity | | | | |
|---|--|---|---|--|
| ω | ω | 5ω | | |
| $B_2 \cdot \frac{k_\epsilon B_2}{2}$ | $B_6 \cdot \frac{k_\epsilon B_2}{2}$ | $B_{10} \cdot \frac{k_\epsilon B_6}{2}$ | | |
| Statička ovalnost / Static ovality | | | | |
| ω | ω | ω | 3ω | 5ω |
| $B_{10} \cdot \frac{k_o B_6}{2}$ | $\frac{k_o B_{10}}{2} \cdot \frac{k_o B_2}{2}$ | $\frac{k_o B_6}{2} \cdot \frac{k_o B_2}{2}$ | $\frac{k_o B_6}{2} \cdot \frac{k_o B_6}{2}$ | $\frac{k_o B_{10}}{2} \cdot \frac{k_o B_6}{2}$ |

Pri tome je:

k_ϵ – koeficijent statičke ekscentričnosti,
 k_o – koeficijent statičke ovalnosti.

Uz zadane vrijednosti: $\epsilon = 0,25$ i $A_\epsilon = 1$ Vs/Am², koeficijenti k_ϵ i k_o računaju se prema (16) što daje: $k_\epsilon = 0,008\ 07$, $A_o = 2$ Vs/Am² i $k_o = 0,032\ 27$.

Amplitude indukcije u jarmu dobivaju se integriranjem indukcije u zračnom rasporu prema izrazu (3). Pri tome treba prvo prema tablici 3 zbrojiti sve doprinose za svaki pojedini harmonik. Kao konačan rezultat za amplitude harmonika indukcije u jarmu dobiva se: $B_{y1p} = 1,625$ T, $B_{y3p} = 0,060\ 17$ T, $B_{y5p} = 0,009\ 19$ T.

Prema izrazu (6) određuje se jakost polja u jarmu uporabom izraza za aproksimaciju krivulje magnetiziranja prema [7], a dobiveni polinom ovisnosti o magnetskoj indukciji je: $h(b) = 146,629 \cdot b + 17,112 \cdot b^{11}$ A/m

Iz tablice 2 je očito da najveći doprinos osovinskoj struji daje harmonik B_6 , pa će se daljnji proračun pojednostaviti i uzet će se samo dominantni član jakosti polja (h_{y6}). Iz (8) slijedi:

Thereat it is as follows:

k_ϵ – static eccentricity coefficient,
 k_o – static ovality coefficient.

With given values: $\epsilon = 0,25$ and $A_\epsilon = 1$ Vs/Am², coefficients k_ϵ and k_o are calculated according to (16) which gives the following: $k_\epsilon = 0,008\ 07$, $A_o = 2$ Vs/Am² and $k_o = 0,032\ 27$.

Induction amplitudes in the yoke are obtained by integrating induction in the air gap according to the expression (3). Thereat, according to Table 3, all the contributions for each particular harmonic need to be summed up first. As the final result for harmonic induction amplitudes in the yoke, the following is derived: $B_{y1p} = 1,625$ T, $B_{y3p} = 0,060\ 17$ T, $B_{y5p} = 0,009\ 19$ T.

According to the expression (6), the the field intensity in the yoke is determined by using the expression for the approximation of the magnetization curve according to [7], and the obtained polynomial of dependency on magnetic induction is: $h(b) = 146,629 \cdot b + 17,112 \cdot b^{11}$ A/m

Table 2 clearly shows that the greatest contribution to the shaft current is given by the harmonic B_6 , so that further calculation will be simplified and only the dominant term of field intensity (h_{y6}) will be taken. From (8) the following ensues:

$$h_{y6}(x, t) = B_{y6} \sin(6x - 3\omega t - 3\varphi_m) \left\{ \frac{1}{\mu_1} + \frac{1}{\mu_{11}} \left[\sum_v B_{yv} \sin(vx - \omega_v t - \varphi_v) \right]^{10} \right\}, \quad (30)$$

pri tome vrijedi:

thereat it is as follows:

$$\sum_v B_{yv} \sin(vx - \omega_v t - \varphi_v) = B_{y2} (2x - \omega t - \varphi_m) + B_{y6} \sin(3x - \omega t - \varphi_m) + B_{y6} \sin(6x - 3\omega t - 3\varphi_m) + B_{y10} \sin(10x - \omega t - \varphi_m) \quad (31)$$

Kao rješenje integrala (9) pojavljuju se samo harmonici jakosti polja koji imaju frekvenciju $(6x)$, jer svi ostali zbog periodičnosti daju rezultat jednak nuli. To znači da se iz polinoma (30) može izostaviti prvi član $(1 / \mu_r)$, kao i svi članovi zagrade koji nemaju frekvenciju $(6x)$. Uporabom Fourierovog integrala za određivanje koeficijenata Fourierovog reda za amplitudu jakosti polja iz (30) slijedi:

$$H_{y6} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \left[\sum_v B_{yv} \sin(x - \omega_v t - \varphi_v) \right]^{10} \cdot \sin(6x - 3\omega t - 3\varphi_m) dx, \quad (32)$$

pri čemu se promatra položaj u neutralnoj zoni između polova u jarmu, pa se uz $\omega t - \varphi_m = \pi / 2$ izraz u zagradi u (30) može reducirati u oblik nepreglednog polinoma (b_{y6}) , koji je funkcija amplituda harmonika magnetske indukcije u jarmu statora. Za jakost polja u jarmu (u neutralnoj zoni između polova u jarmu) iz izraza (30) i (32) slijedi:

$$h_{y6}(x, t) = B_{y6} \sin(6x - 3\omega t - 3\varphi_m) \cdot b'_{y6} = H_{y6} \sin(6x - 3\omega t - 3\varphi_m). \quad (33)$$

U uvodu je definirano da je bitno imati mogućnost uvida u to koji parametri najviše utječu na pojavu osovinskih struja, odnosno koji harmonici magnetske indukcije u zračnom rasporu. Jasno da se uporabom računala, numerički rezultat integriranja iz (32), odnosno vrijednost koeficijenta (b_{y6}) u izrazu (33), koji je potreban za daljnji proračun, može bez problema izračunati.

Prema izrazu (9) mogu se odrediti amplitude harmonika protjecanja, odnosno za amplitude harmonika kružnog magnetskog toka po jedinici površine jarma statora vrijedi izraz:

$$\Phi'_v = \Theta_v \cdot \mu_0 \mu_r \cdot \frac{2R\pi}{S_y}, \quad (34)$$

gdje je:

S_y – poprečni presjek jarma, m^2 ,
 $2R\pi$ – srednja duljina jarma, m ,
 μ_r – relativna permeabilnost koja se dobiva iz polinoma aproksimacije krivulje magnetiziranja za uvrštenu vrijednost amplitude h_{y6} .

As the solution of the integral (9), only field intensity harmonics appear with $(6x)$ frequency because all others, due to their periodicity, give results equal to zero. That means that the first term $(1 / \mu_r)$, as well as all the terms of the brackets which have no frequency $(6x)$ can be omitted from the polynomial. By using the Fourier integral for the determination of the Fourier series coefficient for the field intensity amplitude from (30) it follows:

whereat the position is observed in the neutral zone between the poles in the yoke, so with $\omega t - \varphi_m = \pi / 2$, the expression in the brackets in (30) can be reduced in the form of the illegible polynomial (b_{y6}) which is a function of the amplitudes of the magnetic induction amplitudes in the stator yoke. For the field intensity in the yoke (in the neutral zone between the poles in the yoke) from the expressions (30) and (32) it follows:

The introduction defines that it is necessary to have the possibility of insight into the parameters which have the greatest influence on the occurrence of shaft currents, that is, the magnetic induction harmonics in the air gap. It is clear that, by using a computer, the numerical integration results from (32), that is, the value of the coefficient (b_{y6}) in the expression (33), which is necessary for further calculation, can be calculated without difficulty.

According to the expression (9), flux harmonics amplitudes can be determined, that is, for the amplitudes of harmonics of circular magnetic flux per unit of stator yoke surface the following expression applies:

where it is as follows:

S_y – yoke cross cut [m^2],
 $2R\pi$ – average yoke length [m],
 μ_r – relative permeability derived from the polynomial of the magnetization curve approximation for the inserted amplitude value h_{y6} .

Budući da su poznate sve numeričke vrijednosti, može se izračunati iznos kružnog magnetskog toka u jarmu:

Since all numeric values are known, the amount of circular magnetic flux in the yoke can be calculated:

$$\phi(t) = \Phi_{1p} \sin(\omega_{1p}t) + \Phi_{3p} \sin(\omega_{3p}t) + \Phi_{5p} \sin(\omega_{5p}t), \quad (35)$$

gdje su amplitude harmonika kružnog magnetskog toka u jarmu:

$$\Phi_{1p} = 0,00325 \text{ Vs}, \Phi_{3p} = 0,00012 \text{ Vs}, \Phi_{5p} = 1,838 \cdot 10^{-5} \text{ Vs}.$$

where the amplitudes of the harmonic of the circular magnetic flux in the yoke are:

$$\Phi_{1p} = 0,00325 \text{ Vs}, \Phi_{3p} = 0,00012 \text{ Vs}, \Phi_{5p} = 1,838 \cdot 10^{-5} \text{ Vs}.$$

Za izračun amplitude harmonika osovinske struje upotrebom izraza:

For the calculation of the shaft current harmonics amplitudes by using the expression:

$$I_v = \frac{\omega_v \Phi_v}{Z_v}, \quad (36)$$

potrebno je poznavati impedanciju strujnog kruga kojim se zatvara osovinska struja. Ovisno o konstrukciji motora taj podatak se može računski izvesti, ali je jednostavnije provesti mjerenja impedancije. U [6] su predloženi rezultati mjerenja za promatrani motor u kojima se impedancija zanemarivo mijenja s frekvencijom, odnosno može se aproksimirati radnim otporom iznosa $0,7 \Omega$.

it is necessary to know the impedance of the electrical circuit in which shaft current can be closed. Depending on the motor construction, that data can be derived by computation, but it is simpler to undertake measurements of impedance. [6] presents the measurement results for the observed motor and in those results the impedance is insignificantly exchanged by frequency, that is, it can be approximated by ohmic resistance at the rate of $0,7 \Omega$.

Konačno se za harmonike osovinske struje dobivaju sljedeće vrijednosti: $I_{1p} = 1,031 \text{ A}$, $I_{3p} = 0,1146 \text{ A}$, $I_{5p} = 0,0292 \text{ A}$, što za efektivnu vrijednost osovinske struje daje $0,734 \text{ A}$. U odnosu na izmjerenu vrijednost, gdje je efektivna vrijednost osovinske struje $0,690 \text{ A}$, relativna pogreška izračuna je $6,37 \%$, što je vrlo dobar rezultat s obzirom da je u proračun uključeno samo nekoliko harmonika.

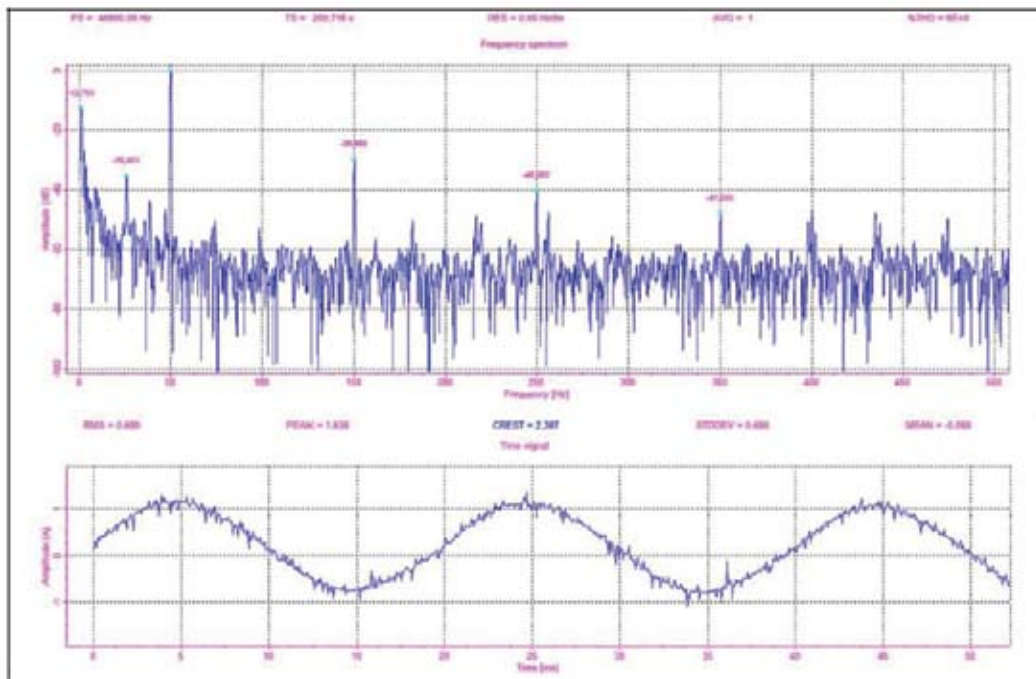
Finally, for the shaft current harmonics, the following values are derived: $I_{1p} = 1,031 \text{ A}$, $I_{3p} = 0,1146 \text{ A}$, $I_{5p} = 0,0292 \text{ A}$, which gives $0,734 \text{ A}$ for the effective value of the shaft current. In relation to the measured value, where the effective value of the shaft current is $0,690 \text{ A}$, the relative calculation error is $6,37 \%$, which is a very good result considering that only a few harmonics are included in the calculation.

Mjerenja osovinskih struja na četveropolnom niskonaponskom asinkronom motoru su vršena pomoću svitka Rogowskog, koji je bio smješten oko osovine na rotoru (slika 2) pri napajanju iz mreže [8]. Za mjerenja osovinskih struja korišten je svitak Rogowskog standardnih karakteristika AmpFLEX A100 20/200A, a za prikupljanje podataka iz svitka Rogowskog korištena je AD kartica NI-DAQPad-6015.

Measurements of shaft currents on a four-pole low-voltage induction motor were done by virtue of a Rogowski coil which was placed around the rotor axis (Figure 2) with power supply from the network [8]. For the measurements of the shaft currents, the Rogowski coil of AmpFLEX A100 20/200A standard characteristics was used, and for the collection of data from the Rogowski coil, the AD NI-DAQPad-6015 card was used.

Na slici 3 je prikazan frekvencijski spektar osovinske struje i vidljivo je da su najizraženiji harmonici upravo frekvencije: ω , 3ω i 5ω . Međutim, u spektru se mogu uočiti i drugi harmonici iz tablice 2. Vremenski signal prikazan je u donjem dijelu slike 3, a predstavlja amplitudno filtriran signal. Detaljnije objašnjenje pravilnog postupka mjerenja i obrade mjerenog signala osovinske struje dano je u [8] i [9].

Figure 3 shows the frequency spectre of the shaft current and it is evident that the most prominent harmonics are exactly the following frequencies: ω , 3ω and 5ω . However, other harmonics from Table 2 can also be seen in the spectre. Time signal is shown in the lower part of Figure 3 and it represents the amplitudinally filtered signal. A more



Slika 3 — Frekventijski spektar i vremenski dijagram mjerenja osovinske struje
 Figure 3 — Frequency spectre and time diagram of shaft current measurements

5 ZAKLJUČAK

Pri napajanju niskonaponskih asinkronih motora s homogenim jarmovima mogu nastati osovinske struje, koje dovode do kvarova ležajeva. Uzrok tim strujama je uglavnom ekscentrični položaj rotora u statoru, a nužni uvjet za nastajanje je nelinearnost krivulje magnetiziranja magnetskih limova. U članku je opisan postupak analitičkog izračuna osovinske struje, te je na primjeru jednog četvepolnog asinkronog kaveznog motora za pogon viličara dana usporedba izračuna amplituda nekih značajnih harmonika osovinske struje s mjerenim vrijednostima, koja je pokazala da se takvim postupkom mogu analitički računati amplitude harmonika osovinske struje s pogreškom manjom od 10 %, što je jasno povezano s točnošću ulaznih podataka.

Međutim, nameće se zaključak da se pri projektiranju motora, ovakvim proračunom mogu definirati svi važniji harmonici osovinske struje, te se mogu izračunati njihove amplitude pri različitim stupnjevima oštećenja ležaja. Na taj način je moguće napraviti detaljni prikaz harmonika, koji se trebaju tražiti u harmonijskom spektru osovinske struje, kao i struje faza motora, te definirati na koji stupanj oštećenja ukazuju iznosi njihovih amplituda. Time se može poboljšati i dijagnostika motora.

detailed explanation of the correct measurement procedure and the analysis of the measured shaft current signal are given in [8] and [9].

5 CONCLUSION

In the supply of low-voltage induction motors with homogenous yoke, shaft currents may appear which cause damage to the bearings. The cause of those currents is mostly the eccentric position of the rotor in the stator, and a necessary condition for the occurrence of those currents is the non-linearity of the magnetic tin magnetization curve. The article describes the procedure of the analytical calculation of the shaft current, and on the example of a four-pole squirrel-cage induction motor for the forklift drive, a comparison is given of the calculation of the amplitudes of certain important shaft current harmonics with the measured values and it shows that by virtue of such a procedure, shaft current harmonics amplitudes can be analytically calculated with an error less than 10 %, which is clearly connected with the accuracy of input data.

However, the conclusion is evoked that this procedure can be used to define all important shaft current harmonics during the design of engineering motors, and their amplitudes can be calculated at different levels of bearing damage. In that way, it

is possible to make a detailed presentation of the harmonics which should be searched for in the harmonic spectre of the shaft current, as well as of the motor phases current, and the level of damage, indicated by the rates of their amplitudes, can be defined. In that way, motor diagnostics can also be improved.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] BLODT M., GRANJON P., RAISON B., ROSTAING G., Models for Bearing Damage Detection in Induction Motors Using Stator Current Monitoring, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, April 2008, Volume: 55, Issue: 4, pp. 1813–1822
 - [2] SEINSCH H. O., Lagerströme bei Drehstrom Induktions-maschinen, Ursachen und Methoden ihrer Unterdrückung, Conti Elektro-Berichte 15, Jan/Juni 1969., pp. 43–51
 - [3] ŠTEFANKO S., BOGUT M., KURTOVIĆ I., KOVAČEVIĆ M., MOMIĆ M., The origins of Shaft Currents in Squirrel-cage Low-voltage Induction Machines, Automatika, 46 (2005), 3-4, str. 109–111
 - [4] FREISE W., JORDAN H., Die Ermittlung von Wellenspannung und Lagerstrom in elektrischen Maschinen unter Berücksichtigung der magnetischen Spannung im Eisen, Elektrotechnik und Maschinenbau (E&M) 80, 1963, pp. 80–84
 - [5] PALJAN D., Analiza utjecaja nesimetričnog zračnog raspora na elektromagnetska i akustička svojstva asinhronog motora, doktorska disertacija, FER, Zagreb, 1990.
 - [6] HEDERIĆ Ž., Proračun osovinskih struja niskonaponskih asinkronih motora, doktorska disertacija, ETF, Osijek, 2008.
 - [7] SCITOVSKI R., Krivulja magnetiziranja, Elektrotehnika 31(1988), str 31–35
 - [8] ŠTEFANKO S., HEDERIĆ Ž., HADŽISELIMOVIĆ M., ZAGRADIŠNIK I., Analyses of Shaft Currents in Low-voltage Induction Motor for Forklift Drive with Electronic Equipment, Informacije MIDEM, Ljubljana, 2007., vol 37, part 3, pp. 152–157
 - [9] ONG R., DYMOND J. H., FINDLAY D., SZABADOS B., Shaft Current in AC Induction Machine-An Online Monitoring System and Prediction Rules, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 37, No. 4, July/Aug. 2001, pp. 1189–1196
-

Adrese autora:

Dr. sc. **Željko Hederić**
hederic@etfos

Mr. sc. **Marinko Barukčić**
Krešimir Miklošević, dipl. inž.
Sveučilište J. J. Strossmayer u Osijeku
Elektrotehnički Fakultet Osijek
Kneza Trpimira 2b
31000 Osijek
Hrvatska

Authors' Addresses:

Željko Hederić, PhD
hederic@etfos

Marinko Barukčić, MSc
Krešimir Miklošević, dipl. ing.
J. J. Strossmayer University of Osijek
Faculty of Electrical Engineering
Kneza Trpimira 2b
31000 Osijek
Croatia

Uredništvo primilo rukopis:
2009-01-20

Manuscript received on:
2009-01-20

Prihvaćeno:
2009-02-09

Accepted:
2009-02-09

ZAŠTITNI UREĐAJI I SELEKTIVNOST U PODSUSTAVIMA ISTOSMJERNOG RAZVODA I NAPAJANJA PROTECTION DEVICES AND SELECTIVITY IN DC POWER DISTRIBUTION SUB-SYSTEMS

Javor Škare – Miroslav Mesić, Zagreb, Hrvatska

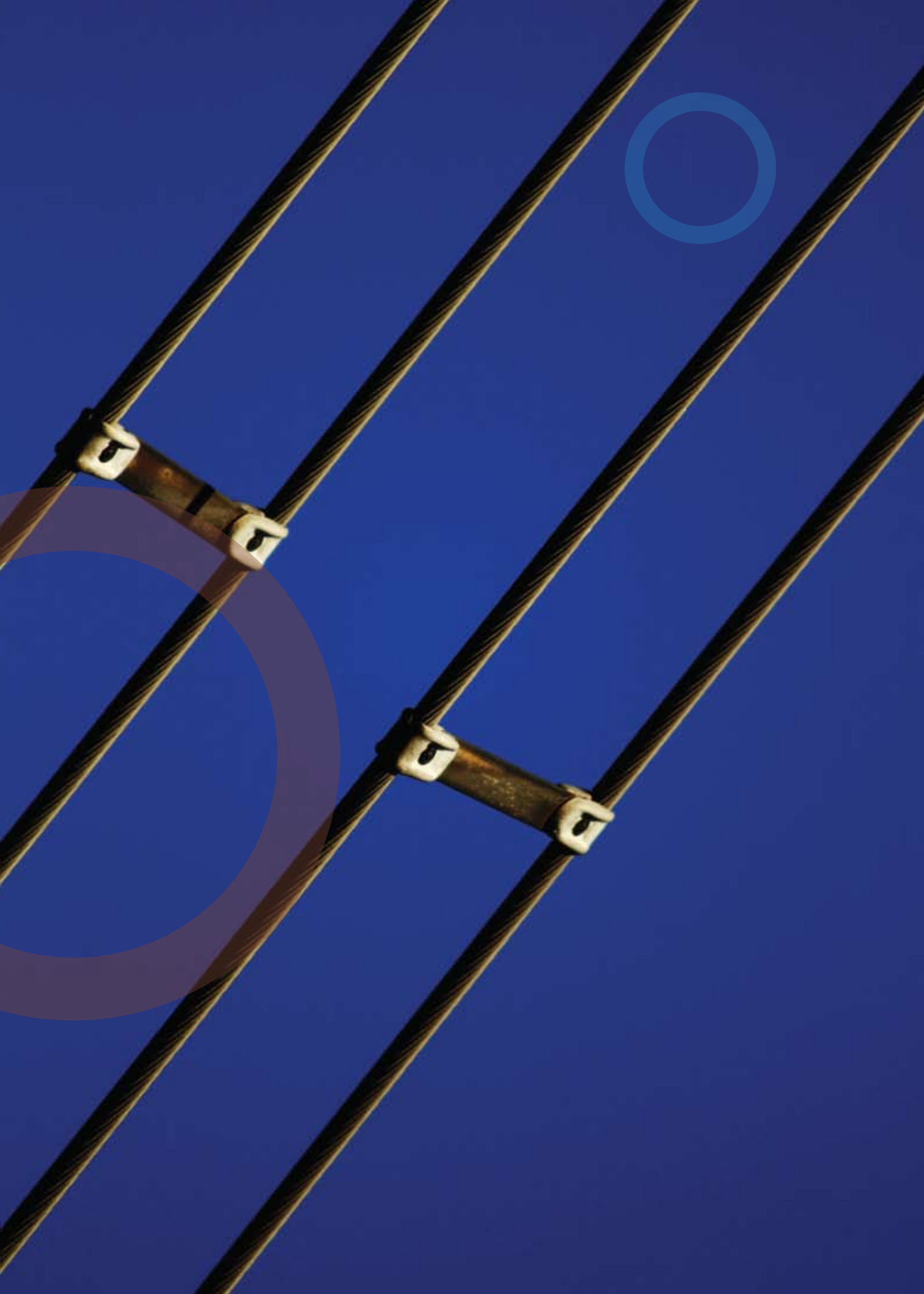
Podsustavi istosmjernog razvoda i napajanja bitne su sastavnice elektroenergetskih postrojenja budući da omogućavaju izvršavanje vitalnih funkcija postrojenja u normalnom pogonu i u slučaju nestanka mrežnog napona te stoga trebaju biti pouzdan i siguran izvor napajanja električnom energijom.

S obzirom da se način prekidanja istosmjerne struje znatno razlikuje od prekidanja izmjenične struje, važno je da se prilikom projektiranja podsustava istosmjernog razvoda i napajanja u elektroenergetskim postrojenjima vodi briga o njihovoj specifičnosti. Dobrim odabirom zaštitnih uređaja (niskonaponskih rastalnih osigurača i prekidača) i njihovim pravilnim rasporedom po zaštitnim razinama razvoda postiže se selektivnost zaštite. U ovom radu su prezentirani osnovni tipovi zaštitnih uređaja i mogućnost njihove upotrebe u podsustavima istosmjernog razvoda i napajanja te načini postizanja selektivnosti zaštite.

DC power distribution sub-systems are essential components of electrical power facilities since they allow the carrying out of vital facility functions in normal operation even in the event of a collapse in grid voltage. Therefore, such systems should be a reliable and safe source of electrical power. When taking into consideration that the manner of terminating DC current is significantly different from terminating AC current, it is important that, when designing DC power distribution sub-systems in electrical power facilities, care be taken concerning their characteristics. A proper selection of protection devices (low-voltage fuses and circuit breakers) and their proper allocation according to distribution protection levels achieves protection selectivity. This paper presents the basic types of protection devices and their possible uses in DC power distribution sub-systems and the manner of achieving protection selectivity.

Ključne riječi: elektroenergetsko postrojenje; niskonaponski prekidač; niskonaponski rastalni osigurač; podsustav istosmjernog razvoda i napajanja; selektivnost zaštitnih uređaja

Key words: DC power distribution sub-system; electrical power facility; low-voltage circuit breaker; low-voltage fuses; protection device selectivity



1 UVOD

Vitalni dijelovi i komponente elektroenergetskih postrojenja koji trebaju funkcionirati u normalnom pogonu te u slučaju kvara ili poremećaja pogona elektroenergetskog sustava trebaju imati kontinuirano i pouzdano napajanje električnom energijom u svim pogonskim režimima, a to omogućuje pod-sustav istosmjernog razvoda i napajanja.

Zbog postizanja dovoljne raspoloživosti sustava istosmjernih napajanja nije prihvatljivo da svi zaštitni uređaji kroz koje se zatvara struja kratkog spoja u isto vrijeme prekinu struju kratkog spoja. Zaštitni uređaji koji se nalaze najbliže mjestu kvara trebali bi prekinuti prvi, a zaštitni uređaji svih prethodnih razina trebaju ostati uključeni. Na taj način se postiže brza izolacija mjesta kvara i omogućuje da sva ostala instalacija koja se napaja preko niskonaponskih prekidača prethodnih razina razvoda ostane uključena te da vitalne funkcije postrojenja ostanu sačuvane.

Odabirom pravilne vrste i rasporeda zaštitnih uređaja po zaštitnim razinama razvoda postiže se selektivnost zaštite.

Selectivnost između dva zaštitna uređaja može biti potpuna (područje od struja malih preopterećenja pa do struje koja odgovara graničnoj prekidnoj moći prekidača) i djelomična (područje od struja malih preopterećenja do granične vrijednosti prekidne struje kratkog spoja).

U podsustavima istosmjernog razvoda i napajanja elektroenergetskih postrojenja kao zaštitni uređaji najčešće se koriste niskonaponski rastalni osigurači i niskonaponski prekidači.

2 ELEKTRIČNI ZAŠTITNI UREĐAJI U ISTOSMJERNIM RAZVODIMA

2.1 Niskonaponski rastalni osigurači

Niskonaponski rastalni osigurači (u daljem tekstu NN osigurači) električki su zaštitni uređaji koji prekidaju strujni krug taljenjem svojih rastalnih elemenata u slučaju kada kroz njih prolazi kvadrat struje tereta u dovoljno dugom vremenskom intervalu (Joulov integral $\int i^2 dt$) (slika 1).

Rastalni elementi najčešće su bakar, ili srebro. Osigurači malih nazivnih struja imaju često samo jedan rastalni element, a oni većih nazivnih struja mogu imati i više od sto rastalnih paralelno spojenih elemenata unutar jednog osigurača. Radi nadziranja mjesta na kojemu se prekida kratki spoj,

1 INTRODUCTION

The vital parts and components of the electrical power facility that should function during normal operation and in the event of a fault or anomaly in the operation of the electrical power system should have a continual and reliable power supply in all operational modes. This is enabled by the DC power distribution sub-system.

Due to gaining adequate availability of the DC power supply system, it is unacceptable that all protection devices, through which the short circuit current closes, terminate the short circuit current at the same time. The protection devices that are found closest to the fault location should be terminated first, while the protection devices at all previous levels should remain connected. In this manner, a rapid isolation of the fault location is achieved allowing the remaining installation powered through the low-voltage circuit breaker at the previous distribution levels to remain connected and vital functions of the facility to remain intact.

In choosing the correct type and positioning of protection devices at the distribution protection levels, protection selectivity is achieved.

Selectivity between two protection devices can be complete (from small current overloads to currents that meet the maximum terminating ability of the circuit breaker) and partial (small current overloads to the maximum values for termination of the short circuit current).

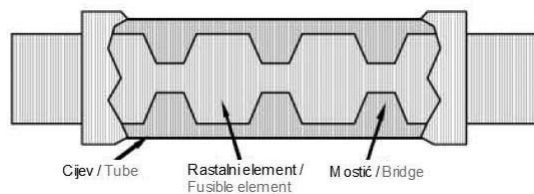
In direct current distribution and power supply for electrical power facilities, protection devices most often use low-voltage fuses and low-voltage circuit breakers.

2 ELECTRICAL PROTECTION DEVICES IN DIRECT CURRENT DISTRIBUTION SYSTEMS

2.1 Low-voltage Fuses

Low-voltage fuses (hereinafter: LV fuses) are electrical protection devices that terminate a short circuit by melting its fusible elements when a load current square passes through them for an adequately long time interval (Joul's integral $\int i^2 dt$) (Figure 1).

The fusible elements are most often copper or silver. Fuses with small rated currents often have only one melting component, while the larger rated current types may have more than a hundred melting elements connected in parallel within a single fuse. In order to supervise the location where the short circuit is to be terminated, each fusi-



Slika 1 — Poprečni presjek NN osigurača
Figure 1 — Perpendicular cross-section of the LV fuse

svaki rastalni element ima nekoliko mostića – mjesta suženja vodljivog puta. Budući da mostići imaju veći otpor od ostalog dijela rastalnog elementa, oko njih se stvara i viša temperatura nego oko ostalih dijelova.

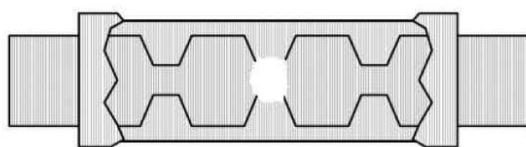
U vremenu dok je struja koja prolazi kroz osigurač niža od njegove nazivne struje osigurač se ponaša kao vodič i na njemu se zbog unutrašnjeg otpora osigurača stvara mali pad napona (nekoliko mV). Kada, zbog preopterećenja ili kratkog spoja, dođe do pregaranja jednog ili više mostića, kroz njih se zatvori električni luk (slika 2). Pad napona na osiguraču je tada približno jednak zbroju napona električnih lukova koji se stvaraju na mostićima. Nakon što osigurač prekine struju na njemu se pojavi nazivni napon podsustava istosmjernog razvoda i napajanja.

Broj mostića spojenih u seriju unutar jednog rastalnog elementa obično se odabire tako da pad napona tijekom prekidanja struje kratkog spoja na jednom mostiću ne bude veći od 150 V kod osigurača namijenjenih za primjenu pri izmjeničnom napajanju, te od 100 V kod osigurača za istosmjerna napajanja [1].

ble element has a number of bridges – places with a narrower conduction path. Since the bridges have a greater resistance than other parts of the fusible element, higher temperatures are created around the bridges than in other parts.

During the time a current passes through the fuse which is lower than the rated current value, the fuse behaves as a conductor and it experiences, due to the internal resistance of the fuse, a small reduction in voltage (a few mV). When, due to overloading or a short circuit, there occurs a burn-out of one or more of the small bridges, an electric arc closes over them (Figure 2). A voltage reduction at the fuse is then approximately equal to the sum of voltages of the electric arcs created at the bridges. Once the fuse terminates the current, a rated voltage occurs at the fuse of the DC power distribution system.

The number of bridges connected in series within a single fusible element is ordinarily chosen so that a fall in voltage during termination of short circuit current on one bridge will not be greater than 150 V for fuses intended for use during AC powering, and 100 V for fuses used in DC powering [1].



Slika 2 — Pregaranje NN osigurača zbog malog preopterećenja
Figure 2 — Burning a LV fuse due to a small overload

Pri prekidanju struje malog preopterećenja često se dogodi da pregori samo jedan mostić. Na njemu se tada razvije električni luk koji povećava pad napona na osiguraču i smanji struju preopterećenja. Kada kroz osigurač prolazi izmjenična struja, ona u intervalima od jedne poluperiode (10 ms) prolazi kroz nulu pa se u tom trenutku ugasi i električni luk koji se stvorio na pregorjelom mostiću i osigurač prekine struju preopterećenja.

When interrupting the current at small overloads, it often occurs that only a single bridge burns out. An electrical arc occurs on the bridge which further decreases in voltage at the fuse and reduces the load current. When AC current passes through the fuse, it passes in intervals of a half-period (10 ms) zero state and at that moment it extinguishes, while the electric arc formed at the burnt-out bridge and the fuse terminates the current load.

Kada, međutim, kroz osigurač prolazi istosmjerna struja, ona, za razliku od izmjenične struje, ne mijenja periodički iznos i ne prolazi kroz nulu pa je električni luk potrebno ugaziti za vrijeme dok kroz njega prolazi struja vrijednosti različite od nule. Energija električnog luka je proporcionalna naponu luka, induktivitetu strujnog kruga i kvadratu trenutačne vrijednosti struje $E_a \approx U_a \cdot L \cdot I^2$. Što je energija električnog luka veća, to će sposobnost osigurača da prekine istosmjernu struju biti manja. Stoga je potrebno uvesti pojam vremenske konstante istosmjernog kruga $T = L / R$, ms, koja karakterizira brzinu porasta istosmjerne struje.

Povećanjem induktiviteta L , H proporcionalno raste i vremenska konstanta istosmjernog kruga T kao i energija električnog luka E_a , W. Na temelju navedenoga može se zaključiti da će se u tom slučaju smanjiti i sposobnost osigurača da prekine istosmjernu struju, odnosno da je sposobnost prekidanja istosmjerne struje obrnuto proporcionalna veličini vremenske konstante istosmjernog kruga T .

Kod istosmjerne struje može se također pretpostaviti da napon izvora ima približno konstantnu vrijednost te da će prekidanje istosmjerne struje kratkog spoja približno započeti tek nakon što napon električnog luka U_a poraste do vrijednosti više od napona izvora. Zbog toga dolazi do povećanja dužine električnog luka na pregorjelom mostiću, što dodatno povećava pad napona i snižava struju, tako da ostali mostići ne mogu pregorjeti. Ako se taj električni luk ne uspije dovoljno brzo ugaziti, doći će do eksplozije osigurača.

Važno je također naglasiti da su malo preopterećenje i velika vremenska konstanta istosmjernog kruga vrlo kritični za osigurače koji se primjenjuju u istosmjernim razvodima, posebno ako se za tu namjenu koriste osigurači za izmjeničnu struju.

Prekidanje velikih struja kratkog spoja kod NN osigurača nije kritično kao prekidanje malih struja kratkog spoja, budući da je u tom slučaju zagrijavanje rastalnog elementa tako brzo da više mostića pregori u istom trenutku stvarajući pritom više serijskih električnih lukova koji dijele ukupni pad napona na osiguraču. Kada je pad napona na osiguraču jednak ili veći od nazivnog napona podsustava istosmjernog razvoda i napajanja, dolazi do gašenja električnih lukova i pregaranja osigurača.

Pri velikim strujama kratkog spoja pregaranje NN osigurača najčešće se dogodi prije nego što struja kratkog spoja dostigne maksimalan iznos, pa se smatra da osigurači ograničavaju struju kratkog spoja.

When, however, the DC current passes through the fuse, contrary to the AC current, it does not change the periodic value and does not pass the zero state, hence the electric arc should be extinguished when the current with values not equal to zero passes through it. The energy of an electric arc is proportional to the voltage arc, to the inductivity of the circuit and to the square of the momentary current value $E_a \approx U_a \cdot L \cdot I^2$. The greater the energy of the electric arc, the smaller the ability of the fuse to interrupt the AC current. Therefore, it is necessary to introduce the concept of time constants for AC circuits $T = L / R$, ms, characterising the rate of increasing the AC current.

By increasing inductivity L , H , the time constant T for the DC circuit increases proportionally as does the power of the electrical arc E_a , W. Based on what has been mentioned, it can be concluded that in this case the ability of the fuse to interrupt the DC current will be reduced, and that the ability to interrupt the DC current is inversely proportional to the size of the DC circuit time constant T .

For the DC current, it can also be assumed that the source voltage has approximately the same constant value and that interrupting the short circuit DC current will begin only approximately after the voltage of the electric arc U_a increases to a value greater than the source voltage. Consequently, there occurs an increase in the length of the electric arc on the burned bridge, further increasing the fall in voltage and reducing the current, so that the other bridges cannot melt. If this electric arc is not extinguished quickly enough, the fuse will explode.

It is also important to emphasise that a small load and a large time constant for the DC circuit are very critical for fuses that are used in DC distribution systems, especially if an AC fuse is used for this purpose.

Interruption of large short circuit currents for low-voltage fuses is not as critical as when interrupting small short circuit currents, since in this case heating of the disintegrating element is so rapid that a number of bridges will burn out at the same time creating subsequently a multiple series of electric arcs that share the total voltage reduction in the fuse. When the voltage reduction in the fuse is the equal or greater than the rated voltage of the DC power distribution sub-system, the electrical arc is extinguished and the fuse burns out.

For large short circuit currents, burning out of the low-voltage fuse most often occurs before the short circuit current reaches the maximum value, hence we say the fuse limits the short circuit current.

Besides unreliability when interrupting small overloads and large inductive loads, low-voltage fuses

Pored nepouzdanosti kod prekidanja malih preopterećenja i velikih induktivnih tereta, NN osigurači imaju i druge nedostatke:

- točka prekidanja se mijenja u ovisnosti o temperaturi okoline, a tolerancija isklopa može biti i preko 50 %,
- potrebno je zamijeniti rastalni element nakon svakog pregaranja,
- daljinska signalizacija pregaranja osigurača je znatno složenija i nepouzdanija nego kod prekidača te se često i ne ugrađuje,
- prekidna moć osigurača za domaćinstvo (tip D i DO) je samo 8 kA pri 250 V, što nije dovoljno za većinu istosmjernih razvoda u velikim elektroenergetskim postrojenjima,
- prilikom povremenih preopterećenja postoji mogućnost da osigurač ne prekine struju, ali da mu rastalni element djelomično izgori te da, nakon što bude ponovo opterećen, potpuno preporegori i tada pri manjoj struji od očekivane izazove neselektivan isklon u razvodu,
- u pogonskim uvjetima čest je slučaj da se nakon pregaranja rastalni elementi osigurača zamijene neodgovarajućim, što također može izazvati neselektivan isklon i gubitak pouzdanosti istosmjernog razvoda, a projektantski to nije moguće spriječiti.

Navedeni nedostaci glavni su razlozi zbog kojih se u modernim podsustavima istosmjernog razvoda i napajanja u elektroenergetskim postrojenjima NN osigurači, kao električni zaštitni uređaji, rijetko koriste.

Zbog specifičnosti istosmjernih strujnih krugova danas se za primjenu u istosmjernim razvodima proizvode i specijalni osigurači punjeni materijalima za brzo gašenje električnog luka i rastalnim elementima s povećanim brojem serijski spojenih mostića. Međutim, njihova primjena je ipak najčešća u električnim transportnim postrojenjima, gdje su nazivni istosmjerni naponi vrijednosti i do 1 200 V.

2.2 Niskonaponski prekidači

Niskonaponski prekidači električki su zaštitni uređaji koji u normalnim pogonskim prilikama uklapaju, vode i isklapaju električnu struju, a mogu i pouzdano uklopiti i (ili) prekinuti strujni krug pri preopterećenju i kratkom spoju [2].

Niskonaponski prekidači (NN prekidači) mogu se razvrstati prema različitim kriterijima. Tako ih se prema načinu mehaničke izvedbe može podijeliti na zračne, kompaktne i male prekidače. Osim toga postoje podjele i prema ugrađenim isklonim jedinicama, načinu ugradnje u ormare razvoda, načinu gašenja električnog luka, i dr.

have other inadequacies:

- the interruption point changes depending on the temperature of the surroundings, while the de-energization tolerance can be over 50 %,
- it is necessary to replace the fusible element following each burn-out,
- remote signalisation of a burnt-out fuse is significantly more complex and less reliable than at a circuit breaker and is often not installed,
- the fuse interruption capacity for households (type D or DO) is only 8 kA at 250 V, which is inadequate for most DC distribution systems in large electrical power facilities,
- during temporary overloading, there exists the possibility that the fuse will not interrupt the current, and that its fusible elements only partially burn out, and that after it is loaded again, it will completely burn out and then for currents smaller than expected events a non-selective de-energization in the distribution system,
- in operational conditions, often the case is that once it has burned out, the fusible element is replaced by an inappropriate fuse, which can also lead to non-selective de-energization and loss of reliability in the DC distribution system, while in terms of design, this cannot be avoided.

The stated inadequacies are the main reasons due to which, in modern DC power distribution sub-systems located in electrical power facilities, the low-voltage fuses acting as electrical protection devices are rarely used!

Due to the specifics of the DC circuit, today, special fuses, filled with materials for quick extinguishing of the electric arc, are used in DC distribution products, as well as fusible elements with an increased number of serially connected bridges. However, their use occurs most frequently in electrical transport facilities, where the rated DC voltages are up to 1 200 V.

2.2 Low-Voltage Circuit Breakers

Low-voltage circuit breakers are electrical protection devices which, in normal operating conditions, activate, manage and interrupt the electrical current, and are able to reliably activate and (or) interrupt the circuit during loads and short circuits .

Low-voltage circuit breakers (LV circuit breakers) can be categorised according to various criteria. Hence, they can be, based on their mechanical construction, divided into air, moulded case and miniature circuit breakers. Also, there exist divisions according to installed trip units, the manner of installation into distribution cabinets, and the manner of extinguishing the electrical arc, and so on.



Slika 3 — Zračni NN prekidač namijenjen za prekidanje istosmjerne struje
Figure 3 — Low-voltage DC air circuit breaker

Zračni prekidači (slika 3) su NN prekidači koji se proizvode za velike nazivne struje, od 800 A do 6 300 A. Kako bi izdržali snažne mehaničke sile i veliko zagrijavanje koje se javlja pri prekidanju velikih struja kvara izvedeni su mehanički vrlo robusno. Za razliku od manjih, malih i kompaktnih prekidača, pogodni su za održavanje, budući da se sklapaju od više sastavnih dijelova koje je tijekom održavanja radi neispravnosti moguće jednostavno zamijeniti. Osim skraćenice ACB (naziv prema IEC-u) za ovu vrstu NN prekidača upotrebljavaju se i skraćenice ICCB (engl. *Insulated Case Circuit Breaker*) i PCB (engl. *Power Circuit Breaker*).

Air circuit breakers (Figure 3) are low-voltage circuit breakers that are manufactured for large rated currents, ranging from 800 A to 6 300 A. In order to withstand the strong mechanical forces and extensive heating occurring during interruption of large fault currents, they are mechanically constructed very robust. In comparison to the smaller circuit breakers, the smaller and module case circuit breakers, they are suitable for maintenance since they are comprised of multiple integral parts that may be simply replaced during maintenance due to faults. Besides the abbreviations ACB (designation according to IEC) for this type of LV circuit breaker, the abbreviations ICCB (Insulated Case Circuit Breaker) and PCB (Power Circuit Breaker) are also used.

2.2.2 Kompaktni prekidači ili MCCB (engl. *Moulded Case Circuit Breakers*)

2.2.2 Moulded Case Circuit Breakers (MCCB)



Slika 4 — Kompaktni NN prekidač
Figure 4 — LV Moulded case circuit breaker

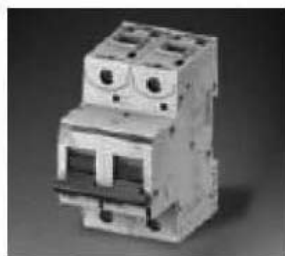
Kompaktni prekidači (slika 4) su NN prekidači smješteni u kompaktna kućišta od izolacijskog materijala, nisu poput zračnih prekidača pogodni za održavanje i popravljanje te je u slučaju neispravnosti bilo kojeg dijela potrebno zamijeniti cijeli prekidač. Kućište onemogućuje neposredan dodir dijelova pod naponom. Kompaktni prekidači imaju uklopnu ručicu s tri položaja (uklopljeno – isključeno zbog prorade zaštite – isključeno), a proizvode se za nazivne struje od 16 A do 3 200 A.

The moulded case circuit breakers (Figure 4) are low-voltage circuit breakers located in a compact housing made of insulation materials; they are not completely like air circuit breakers, are not suitable for maintenance and repairs and in the event of a fault in any part, it is necessary to replace the whole circuit breaker. The housing does not permit direct contact with the parts under voltage. The moulded case circuit breakers have a switching handle with three positions (switched – switched off due to activation of protection – and deactivated/switched off).

2.2.3 Mali niskonaponski prekidači ili MCB (engl. *Miniature Circuit Breakers*)

They are manufactured for rated currents ranging from 16 A to 3 200 A.

2.2.3 Miniature Circuit Breakers (MCB)



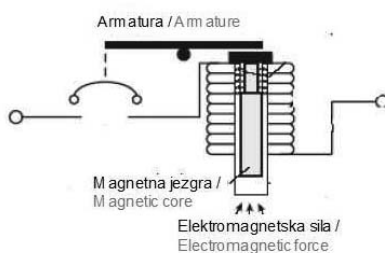
Slika 5 – Mali istosmjerni nn prekidač
Figure 5 – LV DC miniature circuit breaker

Mali niskonaponski prekidači (slika 5) su prekidači malih dimenzija, za montažu na DIN-nosač, s TM-okidačima ugrađenim fiksno u prekidaču (okidači nisu odvojivi od malih prekidača kao što je najčešći slučaj kod ACB i MCCB). Mali prekidači se proizvode za struje od 0,5 A do 100 A, u potpunosti su bez održavanja i mogućnosti popravka.

2.2.4 Podjela niskonaponskih prekidača prema ugrađenim isklonim jedinicama
Niskonaponske prekidače prema ugrađenim isklonim jedinicama može se podijeliti na hidro-magnetske, termo-magnetske, magnetske (bez termičke zaštite) ili trenutačne i prekidače s mikroprocesorskim okidačima.

Miniature low-voltage circuit breakers (Figure 5) are small-dimensioned circuit breakers used for installing on DIN-carriers, with TM-trip units installed in a fixed manner in the circuit breaker (trip units are not separable from small circuit breakers as is most often the case with ACBs and MCCBs). Miniature circuit breakers are devices for currents ranging from 0,5 A to 100 A, with no possibility of maintainance or repair.

2.2.4 Categories of Low-Voltage Circuit breakers based on Installed trip units
Low-voltage circuit breakers based on installed trip units may be divided into hydromagnetic, thermo-magnetic, magnetic (with no thermal protection) or momentary and those with microprocessor trips.



Slika 6 – Presjek hidro-magnetskog okidača
Figure 6 – Cross section of a hydromagnetic trip unit

Prekidači s hidro-magnetskim okidačima (slika 6) se koriste kao posebna izvedba malih NN prekidača. Kod ovog tipa prekidača magnetska se sila, koja se javlja zbog protjecanja struje kvara, ne koristi samo za isklapanje struje kratkog spoja već i za isklapanje pri preopterećenju. Prilikom preopterećenja vrijeme prorade se regulira korištenjem tekućine koja se nalazi unutar cijevi zajedno s magnetskom jezgrom. Brzinu pomicanja magnetske

Circuit breakers with hydromagnetic trip units (Figure 6) are used as special versions of miniature LV circuit breakers. For this type of circuit breaker, the magnetic force, appearing due to the release of a fault current, is not used just for interrupting short circuit current but also for interruption during overloads. During overloads, the activation time is regulated by the use of fluid found within the tube together with the magnetic core. The

jezgre unutar cijevi određuje viskozitet tekućine. Promjenom viskoziteta tekućine postižu se različite vremenske karakteristike prekidanja pri preopterećenju, prilagođene vrsti trošila koja se napajaju preko određenog NN prekidača. Kada nastupi kratki spoj (približno $6 \cdot I_n$), prorada okidača je neovisna o viskozitetu tekućine, budući da okidač trenutačno privuče armaturu i izvrši isklon prekidača. Hidro-magnetski prekidači ne omogućavaju postizanje selektivnosti u više od dvije razine razvoda i namijenjeni su za prekidanje struja u podsustavima niskih istosmjernih napona te se najčešće koriste u podsustavima istosmjernog razvoda i napajanja za telekomunikacije (nazivni istosmjerni naponi do 60 V).

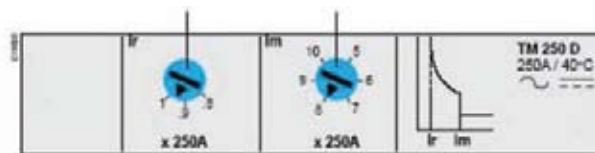
speed of movement of the magnetic core within the tube is determined by the viscosity of the fluid. With changes to the viscosity of the liquid, various time characteristics of interruption during overloading are achieved, adapted to types of loads that are supplied with power through a certain LV circuit breaker. When a short circuit occurs (approximately $6 \cdot I_n$), activation of the trip unit is independent of the liquid viscosity, since the trip unit momentarily pulls the contact and completes the circuit breaker switch. Hydromagnetic circuit breakers do not allow selectivity at more than two distribution levels and are intended for interrupting the current in low DC voltage sub-systems and most often used in the DC power distribution system for telecommunications (rated DC voltage up to 60 V).



Slika 7 — Mikroprocesorski okidač
Figure 7 — Microprocessor trip unit

S obzirom na činjenicu da imaju velike mogućnosti podešavanja zaštite, upravljanja i prijenosa podataka, danas se vrlo često primjenjuju NN zračni i kompaktni prekidači opremljeni mikroprocesorskim (elektroničkim) okidačima (slika 7). Međutim, mikroprocesorski okidači za nadzor struje najčešće koriste strujne transformatore. Budući da strujni transformatori nisu primjenjivi u istosmjernim razvodima, mikroprocesorski okidači do sada najčešće nisu bili namijenjeni za upotrebu u istosmjernim strujnim krugovima. Tek odnedavno su se na tržištu pojavili prvi prekidači s mikroprocesorskim okidačima namijenjeni za upotrebu u istosmjernim razvodima (slika 3).

Considering the fact that they have great possibilities to configure the protection, management and data transfer, today LV air and moulded case circuit breakers are very often equipped with microprocessor (electronic) trip units (Figure 7). However, the microprocessor trip unit for monitoring the current is mostly used by current transformers. Since current transformers are not applicable in DC distribution systems, microprocessor trip units up until now were most often not intended for use in DC circuits. Only recently have the first circuit breakers with microprocessor trip units intended for use in DC circuits appeared on the market (Figure 3).



Slika 8 — Termo-magnetski okidač
Figure 8 — Thermomagnetic trip unit

U istosmjernim razvodima se najčešće koriste NN kompaktni i mali prekidači s termo-magnetskim (TM) okidačima (slike 8 i 9) čija je tipična krivulja prekidanja struje predočena na slici 10. Danas proizvođači prekidača s TM okidačima najčešće

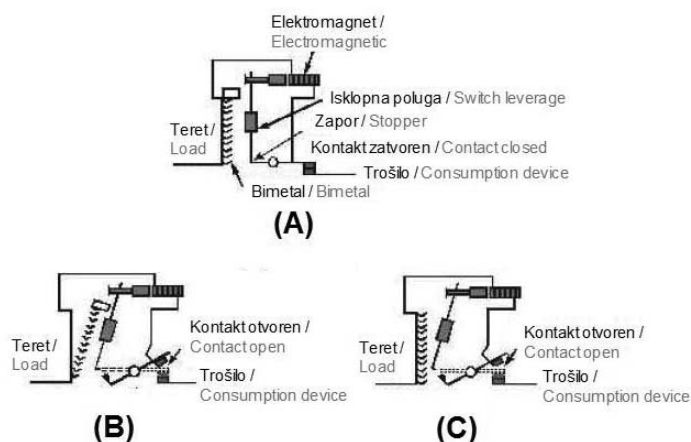
In DC distribution systems, most often the LV moulded case and miniature circuit breakers with thermomagnetic (M) trip units are used (Figure 8 and 9), the typical current termination curve of which is shown in Figure 10. Today, manufactu-

u katalogzima prilažu krivulje prekidanja za izmjeničnu struju, a za ugradnju u istosmjernu strujne krugove definiraju faktore pomaka krivulje u odnosu na izmjeničnu struju.

Zbog toga je potrebno usporediti ponašanje prekidača s TM okidačima pri prekidanju izmjenične i istosmjernu struje (slika 9).

ers of the circuit breaker with TM trip units most often show in catalogues the termination curve for the AC current, whereas a curve displacement factor is defined with respect to the AC current for installation into DC circuits.

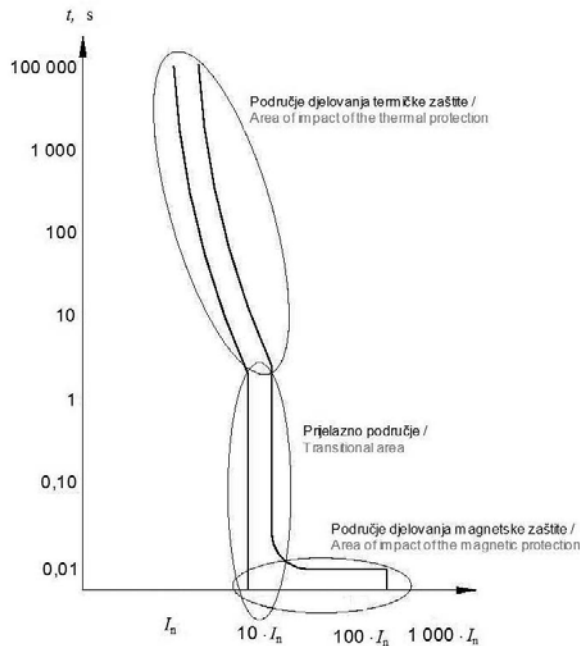
Consequently, it becomes necessary to compare the behaviour of circuit breakers with TM trip units when terminating AC and DC currents (Figure 9).



Slika 9 – Princip okidanja termo-magnetskih okidača
Figure 9 – The triggering principle in thermomagnetic trip unit

Iz slike 10 je vidljivo da se isklonka karakteristika prekidača s TM okidačima može podijeliti u tri dijela. Područje djelovanja termičke zaštite počinje od nazivne struje prekidača (I_n) do struja vrijednosti približno $3 \cdot I_n$ do $12 \cdot I_n$. U tom dijelu karakteristike na isklonku prekidača djeluje bimetal smješten u termičkom okidaču (slika 9B). Dok struja prolazi kroz bimetal on se grije i rasteže. Kada se bimetal dovoljno zagrije, mehanički će djelovati na isklonku polugu, koja će zatim izvršiti otvaranje kontakata i isklonku prekidača. Prorada termičkog okidača proporcionalna je s integralom kvadrata struje ($\int i^2 dt$), tj. s kvadratom struje i trajanjem vremena kvara. Budući da je nazivna vrijednost izmjenične struje definirana kao struja koja na otporniku stvara isto zagrijavanje kao odgovarajuća istosmjerna struja, isklonka karakteristika u području prorada termičke zaštite identična je za izmjeničnu (nazivna vrijednost struje) i istosmjernu struju [3].

In Figure 10 it is evident that the de-energization characteristic of the circuit breaker with the TM trip unit can be divided into three parts. The area of activity by the thermal protection begins from the circuit breaker rated current (I_n) to the current value being approximately $3 \cdot I_n$ to $12 \cdot I_n$. In this part of the characteristics, the bimetal situated in the thermal trip unit (Figure 9b) impacts the circuit breaker de-energization. While the current passes through the bimetal, it heats up and expands. When the bimetal heats up enough, it mechanically impacts the switch leverage, which will thereafter open the contact and de-energize the circuit breaker. Activation of the thermal trip unit is proportional to the integral of the current squared ($\int i^2 dt$), i.e. with the current squared and the length period of the fault. Since the rated value of the AC current is defined as the current which creates the same heat at the resistor as the respective DC current, the de-energization characteristic in the area of thermal protection activation is identical to the AC (rated current value) and DC current.



Slika 10 — Tipična krivulja prekidanja TM prekidača
Figure 10 — Typical TM circuit breaker termination curve

U dijelu krivulje gdje završava djelovanje termičke zaštite i počinje djelovanje magnetske zaštite nalazi se prijelazno područje. Vrijeme isklopa u tom području nije moguće točno odrediti budući da je tolerancija prorade magnetskog okidača $\pm 20\%$ oko srednje vrijednosti struje prorade. Magnetska sila koja nastaje kada kroz zavojnicu prolazi struja izaziva proradu magnetske zaštite (slika 9C). Magnetska sila je proporcionalna kvadratu trenutačne vrijednosti struje. Budući da je maksimalna vrijednost izmjenične struje sinusnog oblika za 1,41 puta veća od njezine nazivne vrijednosti, a maksimalna vrijednost istosmjerne struje identična nazivnoj vrijednosti, kod primjene prekidača s TM okidačima pri prekidanju istosmjerne struje dolazi do pomaka struje prorade magnetske zaštite, odnosno do produljenja područja djelovanja termičke zaštite. Taj pomak kod malih prekidača iznosi otprilike $1,4 \cdot I_m$ (najviša vrijednost sinusne funkcije, pri čemu je I_m nazivna izmjenična struja kod koje dolazi do prorade magnetske zaštite). Za razliku od malih prekidača, robusniji kompaktni i zračni prekidači, nakon što struja kvara stvori graničnu magnetsku silu isklapanja, ne mogu trenutačno izvršiti proradu magnetskog okidača. Zbog toga je kod njih pomak krivulje prorade magnetskog okidača manji i iznosi između $1,1 \cdot I_m$ do $1,4 \cdot I_m$.

U trećem dijelu krivulje predočene na slici 10 nalazi se područje djelovanja magnetske zaštite. U tom području struja ima dovoljno visoku vrijednost da sila koja djeluje na elek-

The curve section where activation of thermal protection ceases and magnetic protection begins is the transitional area. The de-energization period in this area cannot be exactly determined since the tolerance for activation of the magnetic trip unit is $\pm 20\%$ of the median activation current. The magnetic force occurring when current passes through the coil causes the activation of magnetic protection (Figure 9c). The magnetic force is proportional to the square of the momentary current value. Since the maximum value of the AC current for the sinusoidal shape is 1,41 times greater than its declared value, and the maximum AC current value is identical to the rated value, when using a circuit breaker with TM trip units during interruption of the DC current, there occurs a movement of the activation current in the magnetic protection, and a larger area of operation for thermal protection. This shift for small circuit breakers amounts to around $1,4 \cdot I_m$ (highest value of the sinusoidal function, whereby I_m is the rated AC current causing activation of magnetic protection). In comparison to small circuit breakers, in the more robust compact and air circuit breakers, once the fault current produces maximum termination magnetic force, these circuit breakers are not able to momentarily activate the magnetic trip unit. Consequently, the activation curve for the magnetic trip unit shifts less and amounts to between $1,1 \cdot I_m$ and $1,4 \cdot I_m$.

In the third section of the curve shown in Figure 10, there are operational areas for magnetic protection. In this area, the current has a suitably high value so

tromagnet isklopi prekidač u vrlo kratkom vremenu, nedovoljno dugom da se bimetal značajnije zagrije. Ukoliko vremenska konstanta istosmjernog kruga nije veća od **10 ms**, nema bitne razlike u vremenu prekidanja istosmjerne struje u odnosu na izmjeničnu struju u tom dijelu *I-t* krivulje.

Osim izmjeničnih prekidača s TM okidačima, koji se mogu koristiti i za prekidanje istosmjernih struja, danas se proizvode i prekidači s TM okidačima predviđeni isključivo za prekidanja istosmjernih struja. Kod njih su karakteristike prekidanja već definirane za istosmjerne struje i nije potrebno provoditi korekciju krivulja zbog pomicanja mjesta prorade magnetske zaštite.

Posebno su zanimljivi mali prekidači deklarirani samo za istosmjernu struju. Naime, svi mali prekidači ograničavaju struje kratkog spoja, pa su u stanju i prekinuti istosmjernu struju. Međutim, pri višim naponima za prekidanje istosmjernih struja potrebno je u seriju povezati veliki broj polova prekidača (oko **60 V/polu**). Zbog toga se izrađuju posebni prekidači za istosmjerne struje s dodatnim permanentnim magnetom koji je tako polariziran da pri kratkom spoju izaziva produljenje električnog luka, te na taj način pospješuje njegovo gašenje. Takvi prekidači su u stanju prekinuti istosmjernu struju s naponima **120 V/polu** do **250 V/polu**. Mali prekidači deklarirani za istosmjerne struje trebaju se kod ugradnje u istosmjerni razvod priključiti tako da kroz njih struja prolazi propisanim smjerom. U slučaju priključka na razvod na pogrešni smjer istosmjerne struje permanentni magnet prekidača će se pogrešno polarizirati i umjesto produljenja izazvat će skraćenje električnog luka. Na taj način, umjesto pospješivanja prekidanja, dogodit će se sprječavanje prekidanja električnog luka i uništenje NN prekidača.

NN prekidači s magnetskim ili trenutačnim okidačima imaju magnetsku isklonnu jedinicu identičnu kao TM okidači, samo što ne sadrže bimetal. Ti prekidači štite krugove istosmjernog razvoda i napajanja samo od kratkog spoja te zaštitu od preopterećenja treba riješiti nekim drugim zaštitnim uređajem u strujnom krugu. Ovi prekidači se, također, ponekad koriste u istosmjernim razvodima.

2.2.5 Ostale podjele niskonaponskih prekidača

Osim do sada navedenih postoje i druge podjele niskonaponskih prekidača. Tako na primjer postoji podjela na izvlačive, utične (engl. *plug-in*) i fiksne prekidače, prema načinu njihove ugradnje u ormare razvoda. Također postoji i podjela na prekidače za zaštitu kabela, prekidače za zaštitu motora, prekidače za zaštitu transformatora, prekidače za zaštitu kondenzatorskih

that the force acts on the electromagnetic de-energization of the circuit breaker in a very short interval, not long enough for the bimetal to significantly heat up. Inasmuch as the time constant for the DC circuit is not greater than **10 ms**, there are no significant differences in the interruption time for the DC current with respect to the AC current in that *I-t* area of the curve.

Besides the AC circuit breakers with TM trip units, which can be used also for interrupting the DC current, today's circuit breakers with TM trip units are produced exclusively for interrupting the DC current. For these circuit breakers the interruption characteristics are already defined for the DC current and it is not necessary to carry out curve corrections due to the shift in activation points of magnetic protection.

Especially interesting are the miniature circuit breakers declared only for DC currents. Namely, all small circuit breakers limit short circuit currents, hence they are capable of interrupting the DC current. However, at higher voltages, interrupting the DC current requires linking in series a large number of circuit breaker poles (around **60 V/polu**). Therefore, a special circuit breaker is constructed for the DC current with an additional permanent magnet which is polarised so that during short circuits it causes an extension to the electric arc, and in this way improves its extinguishing. These circuit breakers are able to interrupt the DC current at voltages of **120 V/polu** to **250 V/polu**. Miniature circuit breakers declared for use with DC currents should, when installed into DC distribution systems, be connected so that current flows through them in the prescribed direction. In the event that the connection to the distribution is in the wrong DC current direction, the permanent magnet circuit breaker will be incorrectly polarized and instead of extending the electrical arc it will cause the electrical arc to be shortened. In this way, instead of improving interruption, what will happen is prevention of the electrical arc terminating and destruction of the LV circuit breaker.

LV circuit breakers with magnetic or instantaneous trip units possess a magnetic trip unit identical to the TM trip unit, only without bimetal. These circuit breakers protect circuits in DC power distribution systems only against short circuiting and protection against overloading should be resolved by other protection devices in the circuit. These breakers are also sometimes used in DC distribution systems.

2.2.5 Other Divisions of Low-Voltage Circuit Breakers

Besides the above stated there exist other categories of low-voltage circuit breakers. Hence for example, there is the division on withdrawable, plug-in and fixed circuit breakers, according to the manner of their installation in the distribution cabinet. Also, there are categories of circuit breakers for cable pro-

baterija, prekidače za ugradnju u brodovima te podjela na prekidače za zaštitu poluvodiča, prema namjeni za koju su proizvedeni.

Zanimljiva je također i podjela na NN prekidače koji velike struje kratkog spoja prekidaju pri prolazu struje kroz nulu i prekidače koji ograničavaju struju kratkog spoja [4]. Karakteristika je NN prekidača koji struje kratkog spoja prekidaju pri prolazu struje kroz nulu da pri kratkom spoju gašenje električnog luka nastupi nakon što NN prekidač propusti vršnu vrijednost struje kratkog spoja. U izmjeničnim mrežama se za prekidanje struje koristi trenutak prolaska struje sinusnog oblika kroz nulu, pa se za njih koristi i engleski naziv (engl. *current-zero cut off breaker*). Nedostaci ovih prekidača su sljedeći:

- niska prekidna moć, što je posebice izraženo pri prekidanju istosmjernje struje zbog znatno složenijeg principa gašenja luka (izuzetak su zračni NN prekidači robusne mehaničke izvedbe),
- otežano postizanje selektivnosti s nekoliko prekidača klasične izvedbe u seriji.

Danas se još kao current-zero cut off breaker proizvode najčešće zračni NN prekidači koji spadaju u tzv. kategoriju B prekidača. Takvi prekidači mogu osigurati vremensku selektivnost pri velikim strujama kratkog spoja, jer mogu određeno vrijeme (podesivo do nekoliko stotina milisekundi) voditi struju kratkog spoja, te je potpuno prekinuti tek nakon isteka toga vremena.

Moderni kompaktni i mali prekidači ograničavaju struju kratkog spoja, tj. prekidaju struju kratkog spoja prije nego što ona postigne vršnu vrijednost. Ograničavanjem struje skraćuje se i trajanje kratkog spoja, te kratki spoj traje kraće nego u slučaju primjene prekidača kod kojih ne postoji ograničavanje.

Prednosti ograničavanja struja kratkog spoja:

- znatno manje dimenzije prekidača i veća prekidna moć,
- sličan princip prekidanja struja kratkog spoja za istosmjernu i izmjeničnu struju,
- smanjenje elektromagnetskih i termičkih utjecaja koji se javljaju prilikom kratkog spoja na opremi koju štite, te opremi koja se nalazi u njihovoj neposrednoj blizini,
- smanjenje mehaničkih sila koje se javljaju pri kratkom spoju na štitičnim uređajima.

Navedene prednosti imale su za posljedicu činjenicu da se u najnovijim podsustavima istosmjernih razvoda i napajanja uglavnom koristi ova vrsta niskonaponskih prekidača.

tection, motor protection, transformer protection, protection of shunt capacitors, circuit breakers for installing in boats and categories of circuit breakers for semiconductor protection, based on the uses for which they are manufactured.

What is also interesting is the category of LV circuit breakers which interrupt large short circuit currents during the passing of currents through zero state and circuit breakers that limit short circuit current connections [4]. A characteristic of LV circuit breakers interrupting short circuit currents when current passes through zero is that during short circuits, extinguishing the electric arc occurs after the LV circuit breaker releases the peak value of the short circuit current. In AC grids, interruption of current is performed using the momentary passing of a sinusoidal current wave through zero, hence the English term is used current-zero cut off circuit breaker. The inadequacies of these circuit breakers are the following:

- low interrupting capacity, which is especially present during the interruption of the DC current due to the significantly more complex principle of extinguishing the arc (exceptions are the LV air circuit breakers incorporating a robust mechanical construction),
- difficulties in achieving selectivity with a number of circuit breakers classically constructed in a series.

Today, the most frequently manufactured LV air circuit breaker is the current-zero cut off circuit breaker which belongs to the so called B category of circuit breakers. These circuit breakers can ensure time selectivity during large short circuit currents, because, during a certain time, they can (configurable up to a few hundreds of a millisecond) manage short circuit currents, and completely interrupt currents only after the expiration of this time.

Modern compact and miniature circuit breakers limit short circuit current, i.e. interrupt short circuit current before it reaches the peak value. In limiting the current, the time period of the short circuit is reduced, and the short circuit lasts less than in the case of using a circuit breaker without limitation.

The advantages of limiting short circuit current are:

- significantly smaller size circuit breakers and greater interrupting capacity,
- similar principle for interrupting short circuit current for DC and AC currents,
- reduction of electromagnetic and thermal influences that appear during short circuits on equipment that is protected, and equipment that is located in their direct vicinity,
- reduction in mechanical forces that appear during short circuits on protected devices.

3 SELEKTIVNOST ISKLOPA ZAŠTITNIH UREĐAJA

3.1 Općenito

Analizu selektivnosti u istosmjernim razvodima otežava činjenica što isklonke karakteristike ($I-t$) zaštitnih uređaja, koje se obično definiraju za izmjenični napon i frekvenciju 50 Hz ne odgovaraju u potpunosti i za istosmjerne razvode. Štoviše, one se pri velikim strujama kratkog spoja međusobno bitno razlikuju, i trebaju se posebno preračunavati za svaku različitu vremensku konstantu ($T = L / R$) istosmjernog kruga [3], [5] i [6].

Postoji više različitih načina ostvarivanja selektivnosti između dvaju zaštitnih uređaja u niskonaponskim istosmjernim i izmjeničnim razvodima. Najčešće se koriste:

- vremenska selektivnost,
- blokiranje isklopa prethodne razine ili zonska selektivnost,
- strujna selektivnost,
- energetska selektivnost i selektivno ograničenje ili SELIM i dr.

3.2 Vremenska selektivnost

Vremenska selektivnost se provjerava usporedbom $I-t$ krivulja prekidanja zaštitnih uređaja smještenih u raznim razinama zaštite [3].

Najčešće se koristi kod međusobne provjere potpune selektivnosti između glavnih prekidača (zračnih, kategorija B) kao i između tih prekidača i kompaktnih ili malih prekidača (prekidača kategorije A), te NN osigurača smještenih u istosmjernim razvodima. Prekidači kategorije A i NN osigurači prekidaju struje kratkog spoja u vremenu manjem od 10 ms, a vrijeme isklopa struja kratkog spoja glavnih prekidača je podeseveno i može se postaviti na vrijednost i do nekoliko stotina milisekunda.

Uspoređuju se pripadajuće isklonke $I-t$ krivulje, koje su predočene na slici 10, a zaštitni uređaj sljedeće razine, uzimajući u obzir i propisima definirana moguća odstupanja krivulja, u cijelom opsegu struja od 0 do I_{ks} treba brže iskloniti od prekidača prethodne razine (slika 11).

The stated advantages result in the fact that these types of LV circuit breakers are used in the newest DC power distribution sub-systems.

3 DE-ENERGIZATION SELECTIVITY IN PROTECTION DEVICES

3.1 In General

Analysis of selectivity in DC distribution systems is hindered by the fact that de-energization characteristics ($I-t$) which are ordinarily defined for AC voltages at a frequency of 50 Hz are not fully suitable for DC distribution. Furthermore, for larger short circuit currents these greatly differ from one another, and should be specially calculated for each different DC circuit time constant ($T = L / R$) [3], [5] and [6].

There are various ways to achieve selectivity between two protection devices in LV DC and AC distribution systems. Those most frequently used are:

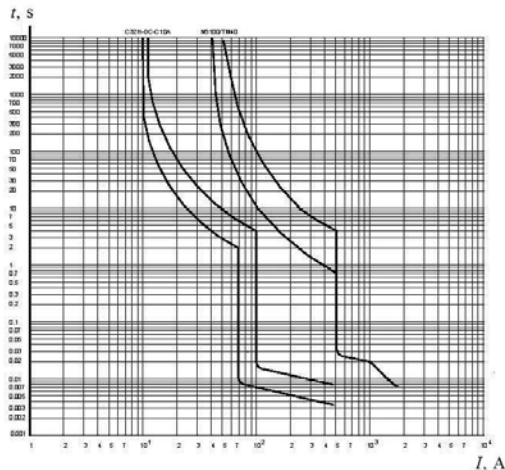
- time selectivity,
- blocking de-energization at the previous level or zone selectivity,
- current selectivity,
- power selectivity and selective limitation of SELIM and so on.

3.2 Time Selectivity

Time selectivity is verified by comparing the $I-t$ curve for terminating a protection device located in various protection levels [3].

It is most frequently used for comparisons of full selectivity between the main circuit breaker (air, category B) and between these circuit breakers and compact or miniature circuit breakers (category A circuit breakers), and LV fuses located in DC distribution systems. Category A circuit breakers and LV fuses terminate short circuit currents in time periods of less than 10 ms, while the de-energization period for short circuit currents in main circuit breakers is configurable and can be set to values up to a few hundred milliseconds.

Respective de-energization $I-t$ curves are compared, shown in Figure 10, while the protection device for the next level, taking into account also possible deviations of the curves prescribed by regulations in the whole current range from 0 to I_{ks} , should be de-energized more quickly than the circuit breaker at the previous level (Figure 11).



Slika 11 — Isklopna $I-t$ krivulja dvaju međusobno selektivnih prekidača
Figure 11 — Termination $I-t$ curve of two mutually selective breakers

Ovaj način provjere koristi se i u kombinaciji s nekim drugim načinima provjere selektivnosti za NN prekidače kategorije A, tako da se vremenskom selektivnošću potvrđuje postojanje selektivnosti samo do struja koje predstavljaju malo preopterećenje za prekidače više razine, a za veće struje radi provjere selektivnosti koriste se druge metode.

3.3 Zonska selektivnost

Zonska selektivnost, ili blokiranje isklopa prethodne razine, ostvaruje se modernim NN prekidačima opremljenim mikroprocesorskim okidačima. Ovaj način postizanja selektivnosti razvijen je s ciljem da se ograniče termički gubici u kratkom spoju koji se događaju kada se u glavnom razvodu koriste prekidači s fiksno podešenim vremenskim kašnjenjem [7].

Okidači prekidača, čim prepoznaju struju kratkog spoja, šalju signal prekidačima smještenim na prethodnim razinama, te blokiraju proradu njihovih okidača. Vrijeme prekidanja glavnih prekidača, ako se kvar dogodi u području njihovog djelovanja, bit će značajno kraće nego ako se koristi vremenska selektivnost s ugrađenim fiksnim zatezanjem prekidanja prekidača pri velikim strujama kratkog spoja, kako je opisano u točki 3.2, te se na taj način ograničavaju termička naprezanja u kratkom spoju.

Korištenje zonske selektivnosti uglavnom je ograničeno na glavne izmjenične razvode opremljene velikim zračnim NN prekidačima s mikroprocesorskim okidačima i najčešće je neprimjenjivo za istosmjerne sustave, budući da su se tek odnedavno na tržištu pojavili prvi zračni prekidači opremljeni mikroprocesorskim okidačima pogodnima i za korištenje u istosmjernim strujnim krugovima.

This verification method is also used in combination with other forms of selectivity verification for category A LV circuit breakers, so that time selectivity confirms the existence of selectivity only for currents that represent small loads for higher-level circuit breakers, while for larger currents in verifying selectivity other methods are used.

3.3 Zone Selectivity

Zone selectivity or blocking de-energization at the previous level, is achieved using modern LV circuit breakers equipped with microprocessor trip units. This manner of achieving selectivity was developed for the purpose of limiting thermal losses in short circuits which occur when circuit breakers with fixed time delay settings are used in the main distribution system.

Breaker trip units, having recognised a short circuit current, send a signal to the circuit breakers located at the previous level, and block the activation of the trip units. The interruption time of the main circuit breakers, if the fault occurs within their operational area, will be significantly shorter than if time selectivity with in-built fixed tension circuit breaker interruption is used during large short circuit currents, as described in point 3.2, and in this way thermal tension is limited in the short circuit.

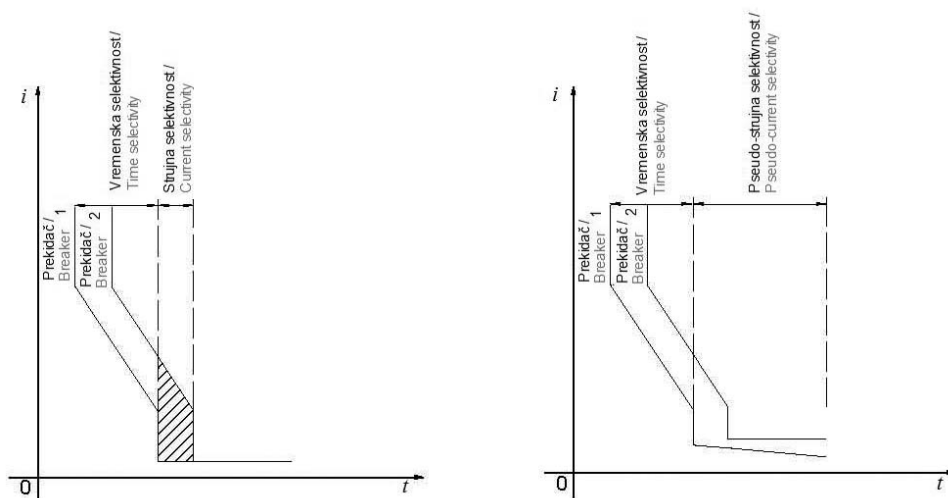
Use of zone selectivity is mainly limited to main AC distributions equipped with large LV air circuit breakers containing microprocessor trip units and is most often unusable for DC systems, since recently on the market the first air circuit breakers equipped with microprocessor trip units suitable for use in DC circuits have appeared.

3.4 Strujna selektivnost

Strujna selektivnost koristi se isključivo za provjeru selektivnosti između NN prekidača i to u području malih preopterećenja koje je ograničeno strujama prorade magnetskih okidača dvaju prekidača. Provjera se obavlja usporedbom $I-t$ krivulja prekidanja prikazanih na slici 12 [7], [8] i [9].

3.4 Current Selectivity

Current selectivity is used exclusively for verification of selectivity between LV circuit breakers and in the area of small overloads which is limited by activation currents in the magnetic trip units of two circuit breakers. Verification is performed by comparing the $I-t$ termination curve as shown in Figure 12 [7], [8] i [9].



Slika 12 — Strujna i pseudo (prividno)-strujna selektivnost
Figure 12 — Current and pseudo (apparent) – current selectivity

Kod NN prekidača koji ograničavaju struju kratkog spoja strujna selektivnost se može proširiti i do najviših struja kratkog spoja i u tom slučaju se naziva prividna ili pseudo-strujna selektivnost. Pritom je potrebno odgovoriti na pitanje koliko treba prekidač ograničiti struju kratkog spoja i u kojem vremenu struju treba u potpunosti prekinuti da ne bi isklonio prekidač prethodne razine, odnosno da bi se postigla prividna-strujna selektivnost?

Ukupno vrijeme prekidanja struje kratkog spoja NN prekidača sastoji se od:

- vremena trajanja naloga potrebnog za početak procesa prekidanja po isteku kojega se prekidanje više ne može zaustaviti,
- vremena potrebnog za okidanje magnetskog okidača, tj. za oslobađanje energije pohranjene u opružnom mehanizmu,
- vremena razvijanja električnog luka nakon otvaranja kontakata,
- vremena gašenja električnog luka.

Prividna-strujna selektivnost će postojati samo ako je ukupno vrijeme prekidanja prekidača određene razine manje od vremena trajanja naloga prekidača prethodne razine.

For LV circuit breakers that limit short circuit currents, current selectivity can be extended to the larger short circuit currents and in this instance is called pseudo-current selectivity. Additionally, it is necessary to answer the question as to the degree to which the circuit breaker should limit the short circuit current and in what period should it be completely terminated in order not to de-energize the circuit breaker at the previous level, that is, to achieve pseudo-current selectivity.

The total time to interrupt a short circuit connection in a LV circuit breaker comprises:

- necessary activation time period for initiating the interruption process upon expiration which interruption cannot be halted,
- time required for triggering the magnetic trip unit, i.e. for releasing the energy in the spring mechanism,
- time to create the electric arc after opening the contact,
- time to extinguish the electric arc.

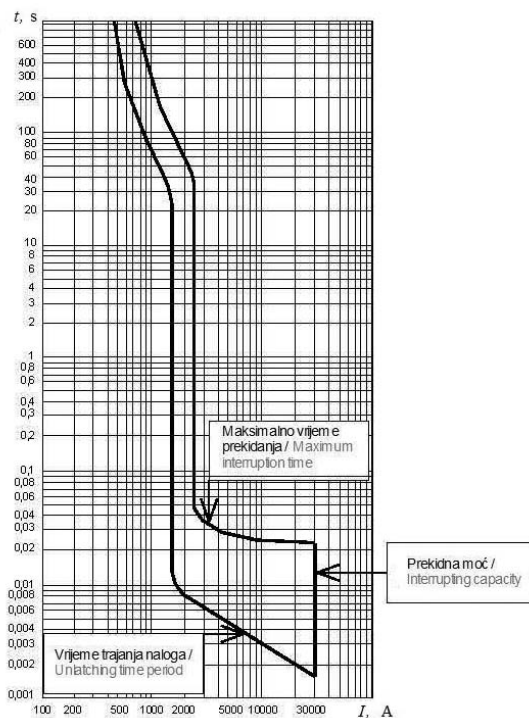
Pseudo-current selectivity will occur only if the total circuit breaker interruption period for a certain level is less than the time duration for initiating the circuit breaker at the previous level.

Potrebno vrijeme trajanja naloga (eng. *unlatching time, delatching time, pulse tripping ili command time*) ovisno je o struji kratkog spoja.

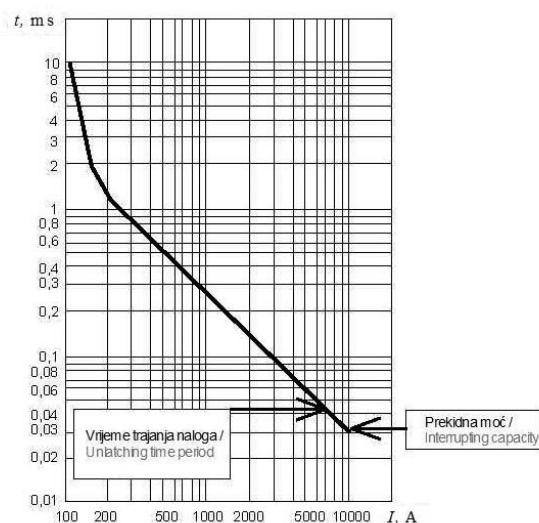
The necessary time duration for initiation (unlatching time, delatching time, pulse tripping or command time) depends on the short circuit current.

Na slikama 13 i 14 može se očitati njegova vrijednost za primjer jednog kompaktnog 400 A prekidača te jednog malog prekidača 20 A (C-karakteristika prema IEC).

In Figures 13 and 14, the values can be read for the example of a single compact 400 A circuit breaker and a small 20 A circuit breaker (C-characteristics according to IEC).



Slika 13 — $I-t$ krivulja kompaktnog 400 A prekidača i vrijeme trajanja naloga
Figure 12 — $I-t$ curve for a 400A compact breaker and the unlatching time period



Slika 14 — Vrijeme trajanja naloga malog prekidača 20 A (C-karakteristika)
Figure 14 — Unlatching time period for a small 20A breaker (C-characteristics)

Međutim, funkcija vremena trajanja naloga u ovisnosti o struji kratkog spoja najčešće nije dostupna u standardnim podacima NN proizvođača te je treba posebno zatražiti od proizvođača.

Tijekom korištenja ove metode javlja se problem trajanja naloga ovisno o visini struje, a struja neposredno nakon nastajanja kratkog spoja naglo, eksponencijalno raste, pa iz krivulja predočenih na slikama 13 i 14 nije moguće jednostavno očitati potrebno vrijeme trajanja naloga.

Neki proizvođači, definiraju minimalno vrijeme trajanja naloga (engl. *minimal command time*), a to je najkraće vrijeme trajanja naloga koje vrijedi za vrlo velike struje kratkog spoja kod kojih dolazi do zasićenja magnetske jezgre i armature magnetskog okidača, pa magnetska sila i trajanje naloga više ne ovisi o daljnjem porastu struje kratkog spoja.

Ako je ukupno vrijeme isklopa prekidača 2, kod struje čija je vrijednost jednaka struji prorade magnetskog okidača prekidača 1, kraće od minimalnog vremena trajanja naloga prekidača 1 postojat će potpuna selektivnost između prekidača 1 i prekidača 2 iz slike 12. Na ovaj način se, uz dosta sigurnosne zalihe, može jednostavno provjeriti lažna-strujna selektivnost.

3.5 Energetska selektivnost i selektivno ograničenje (SELLIM)

Energetska selektivnost prvenstveno se koristi za provjeru selektivnosti između NN osigurača [7], [10] i [11].

Selektivnost između NN osigurača se postiže kada posljednji osigurač u nizu propusti ukupno manji kvadrat struje tijekom pregaranja ($I^2 t_{total}$) od kvadrata struje potrebnog za taljenje prethodnih nn osigurača ($I^2 t_{prearcing}$) (slika 15).

However, the command time function depending on the short circuit current is most often not accessible in standard data provided by LV manufacturers and most often it is necessary to seek such information from the manufacturer.

During the use of this method, there appears the problem of time duration depending on the current value, while current directly following the occurrence of a short circuit spontaneously, exponentially grows, hence from the curves shown in Figures 13 and 14 it is not possible to simply identify the necessary unlatching time period.

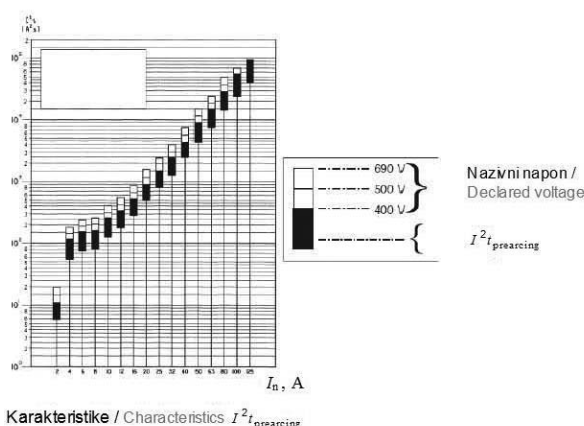
Some manufacturers define the minimal command time and this is the shortest command time that is valid for large short circuit currents where there occurs a saturation of the magnetic core and magnetic trip unit contact, hence the magnetic force and command time no longer depends on a further increase in the short circuit current.

If the total de-energization period for circuit breaker 2, for current values equal to activation currents in magnetic trip unit in circuit breaker 1, is shorter than the minimum command time for circuit breaker 1, full selectivity will occur between circuit breaker 1 and circuit breaker 2 as shown in Figure 12. In this manner, with adequate safety reserves, the false current selectivity can be verified.

3.5 Energy Selectivity and Selective Limitation

Energy selectivity is primarily used for verifying selectivity between LV fuses [7], [10] and [11].

Selectivity between LV fuses can be achieved when the last fuses in series passes less current squared during blow-out ($I^2 t_{total}$) than the current squared necessary for melting of the previous LV fuses ($I^2 t_{prearcing}$) (Figure 15).



Slika 15 — Karakteristike $I^2 t$ NN rastalnih osigurača tip gG prema IEC 60269
Figure 15 — Characteristics $I^2 t$ of LV fuse type gG based on IEC 60269

Ovaj način provjere se koristi i kada je u višoj razini smješten NN osigurač, a u nižoj razini NN prekidači. Tada NN prekidači ne smiju propustiti tijekom prekidanja veći kvadrat struje pregaranja od kvadrata struje potrebnog za taljenje prethodnih NN osigurača.

Selektivno ograničenje ili SELLIM (engl. *selective limitation*) nudi brojne prednosti pred ostalim vrstama selektivnosti i obično je konstrukcijski razrađena od strane proizvođača NN prekidača sa ciljem da se postigne selektivnost između različitih tipova NN prekidača, ali i da se osigura kaskadnost te smanje mehanička i termička naprezanja u instalaciji.

Ovo je poseban oblik prividno-strujne selektivnosti (oba prekidača su ograničavači) i koristi se pri velikim strujama kratkog spoja. Pod pojmom velike struje kratkog spoja podrazumijevaju se sve struje kratkog spoja koje su veće od $2I_m$, gdje je I_m struja prorade magnetskog okidača prekidača više razine. Sve ostalo su male struje kratkog spoja.

Selektivno ograničenje se temelji na principu energetske selektivnosti, tj. posljednji NN prekidač u nizu propusti ukupno manji kvadrat struje tijekom prekidanja ($I^2d t_{total}$) od kvadrata struje potrebnog za aktiviranje prethodnih NN prekidača ($I^2d t_{unlatch}$).

Kod ove vrste selektivnosti NN prekidač 1 iz slike 16 izveden je s produljenim vremenom trajanja nalogu. Ako je u sljedećoj razini ugrađen obični prekidač-ograničavač, koji će prekinuti veliku struju kratkog spoja već u prvoj poluperiodi (< 10 ms) i propustiti mali kvadrat struje ($I^2d t_{total}$), selektivnost će se postići.

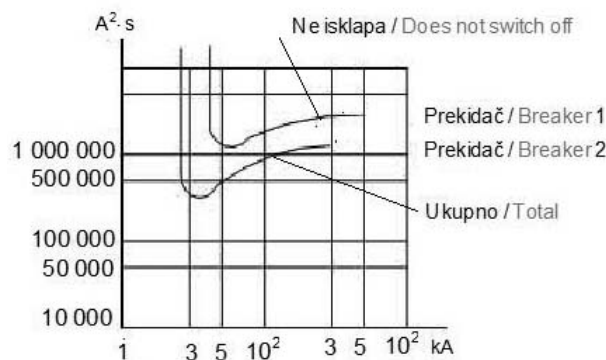
This manner of verification used when an LV fuse is installed at a higher level, while an LV circuit breaker is at a lower level. The LV circuit breaker must not allow the passing of larger blow-out current squared during interruption than the current squared necessary for melting the previous LV fuse.

Selective limitation or SELLIM offers many advantages compared to the types of selectivity and ordinarily is designed by the manufacturer of the LV circuit breaker with the aim of achieving selectivity between two various types of LV circuit breakers, and also ensures cascading as well as smaller mechanical and thermal tensions in the installation.

This is a special form of apparent current selectivity (both circuit breakers are limitators) and are used for large short circuit currents. The term of large short circuit currents include all short circuit currents greater than $2I_m$, where I_m is the activation current for the magnetic trip unit in the circuit breaker at a higher level. Everything else is considered to be smaller short circuit current.

Selective limitation is based on the principle of energy selectivity, i.e. the last LV circuit breaker in series passes less total current squared during interruption ($I^2d t_{total}$) than the current squared necessary for activation of the previous LV circuit breaker ($I^2d t_{unlatch}$).

For these types of selectivity, the LV circuit breaker 1 in Figure 16 is used with an extended command time. If, at the next level, a standard circuit breaker-limitator is installed, which will terminate large short circuit currents already in the first half-period (< 10 ms) and pass small currents squared ($I^2d t_{total}$) selectivity will be achieved.



Slika 16 — Usporedba I^2t dvaju NN prekidača
Figure 16 — Comparison of I^2t for two LV breakers

Pri tom prekidač 1, bez obzira što nije isklonio, zbog mehaničkih sila koja se tijekom prekidanja velikih struja pojave među kontaktima, kratkotrajno odvaja glavne kontakte (dođe do tzv. repulzije ili odbijanja kontakata) te s tim dodatno ograniči struju kratkog spoja. Dodatno ograničenje velikih struja kratkog spoja od strane prekidača 1 omogućuje da prekidač 2 ima i manju prekidnu moć od proračunske struje kratkog spoja na mjestu kvara. To svojstvo se naziva kaskadnost zaštite, a razinu kaskadnosti između različitih tipova prekidača (uz selektivnost) definiraju proizvođači.

4 ZAKLJUČAK

Podsustavi istosmjernog razvoda i napajanja bitni su za pogon elektroenergetskih postrojenja u normalnim uvjetima i posebice u slučaju nestanka mrežnog napona te stoga trebaju biti pouzdani i sigurni.

U očuvanju vitalnih funkcija elektroenergetskih postrojenja veliku ulogu ima selektivnost zaštitnih uređaja u istosmjernom razvodu, kojom se postiže da kvar isključuju zaštitni uređaji najbliži mjestu kvara, pri čemu zaštitni uređaji prethodnih razina razvoda i na njih priključeni izvodi ostaju uključeni.

U niskonaponskim istosmjernim i izmjeničnim strujnim krugovima za prekidanje struje u slučaju kvara najčešće se koriste niskonaponski prekidači koje se prema različitim kriterijima i namjeni može razvrstati u više grupa.

Zbog brojnih prednosti u modernim podsustavima istosmjernog razvoda i napajanja najčešće se primjenjuju kompaktni i mali prekidači koji prekidaju struju kratkog spoja prije nego ona dosegne vršnu vrijednost.

Selektivnost zaštite postiže se pravilnim odabirom vrsta i rasporeda zaštitnih uređaja po razinama razvoda. Za ostvarivanje selektivnosti između dvaju zaštitnih uređaja u krugovima istosmjernog napona koriste se različiti načini postizanja selektivnosti. Tako je na primjer za provjeru selektivnosti između NN prekidača pri malim istosmjernim strujama kratkog spoja najpogodnija primjena vremenske selektivnosti. Za provjeru selektivnosti između kompaktnih i malih NN prekidača pri velikim strujama kratkog spoja moguće je kod istosmjernih, kao i kod izmjeničnih razvoda, koristiti provjeru prividno-strujne ili energetske selektivnosti.

Današnji proizvođači u katalozima NN prekidača prilažu tablice koje određuju granice selektivno-

Therefore, circuit breaker 1, regardless of not de-energizing, due to mechanical forces which, during interruption of large currents, appears between the contacts, separates the main contacts for a short period (the so-called repulsion or contact repelling occurs), and this leads to additional limiting of short circuit currents. Additional limitation of large short circuit currents by circuit breaker 1 allows circuit breaker 2 to possess a smaller interruption capacity than the calculated short circuit current at the fault location. This property is called cascade protection and the cascade level between various types of circuit breakers (with selectivity) is defined by manufacturers.

4 CONCLUSION

DC power distribution sub-systems are important for the operation of electrical power facilities in normal conditions especially in the event of the failure of grid voltage and therefore should be reliable and safe.

In preserving the vital functions of electrical power facilities, selectivity of protection devices in DC distribution systems plays a large role, and this selectivity enables the fault to be terminated by protection devices closest to the fault location, whereby the protection device at the previous distribution level and those connected to it remain operational.

In low-voltage DC and AC circuits, for interrupting the current in the event of a fault, low-voltage circuit breakers are most often used and according to various criteria and purpose, may be categorised into higher groups.

Due to the numerous advantages in modern DC power distribution systems, most often the moulded case and miniature circuit breakers are used which interrupt short circuit currents before reaching peak value.

Selectivity protection is achieved by correctly choosing the type and arrangement of protection devices at various distribution levels. For achieving selectivity between two protection devices in DC voltage circuits, various ways of achieving selectivity are used. Hence for example, in order to verify selectivity between LV circuit breakers during small DC short circuit currents, the most appropriate application is time selectivity. In order to verify selectivity between moulded case and miniature LV circuit breakers during large short circuit currents, it is possible for DC systems, as well as for AC distribution, to use verification of apparent current or energy selectivity.

Today's manufacturers in LV circuit breaker catalogues include tables that define the selectivity limit between various types of LV circuit breakers, but these tables are most often intended for verifying

sti između različitih tipova NN prekidača, ali su te tablice, najčešće, namijenjene za provjeru selektivnosti u izmjeničnim razvodima. Tablice selektivnosti prekidača, koje vrijede za izmjenične struje kratkog spoja, primjenjive su za približnu računsku provjeru selektivnosti i u istosmjernim razvodima elektroenergetskih postrojenja za određene kombinacije NN prekidača. Međutim, tablice selektivnosti ne smiju se, ni u tim slučajevima, koristiti kao sigurna potvrda postojanja selektivnosti, već je stvarno postojanje selektivnosti u realnim istosmjernim razvodima potrebno potvrditi primarnim ispitivanjima selektivnosti u elektroenergetskim postrojenjima.

selectivity in AC distribution systems. The circuit breaker selectivity tables, applicable for AC short circuit currents, are used for approximate calculation verification of selectivity also in AC power distribution facilities for certain combinations of LV circuit breakers. However, the selectivity tables must not, even in these instances, be used as a certain verification of the existence of selectivity, but the actual existence of selectivity in real DC distribution systems is to be verified using primary testing of selectivity in electrical power facilities.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] MARTINČIČ et al., Short circuit Protection in DC
- [2] ŠKARE, J., LOVEI, A., Problemi zaštite od kratkog spoja u istosmjernim razvodima postrojenja za prijenos i distribuciju, *Energija*, god. 49(2000), broj 2
- [3] ŠKARE, J., Analiza dinamike sustava istosmjernog napajanja u elektroenergetskim postrojenjima, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Magistarski rad, Zagreb, 2006.
- [4] ŠTEFAN, S., Doprinos proračunu i analizi procesa prekidanja struje u ograničavačima, doktorska disertacija, 1994.
- [5] SKOK, S., Selektivnost zaštita u sustavima istosmjernih razvoda, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Doktorska disertacija, Zagreb, 2004.
- [6] SKOK, S., Sustavi istosmjernih razvoda u elektroenergetskim postrojenjima, Kigen d.o.o., Zagreb, 2007.
- [7] NEREAU, J.P., Discrimination with LV power circuit-breakers, *E/CT* 201, 2001.
- [8] MOREL, R., LV circuit-breaker breacking techniques, *E/CT* 164, 2000
- [9] BUSSMANN, Selective Coordination
- [10] RÉMOND, C., From current discrimination to energy discrimination, *J3E Special Merlin Gerin*, 1994
- [11] SERPINET, M., MOREL, R., Energy-based discrimination for low-voltage protective devices, *E/CT* 167, 1994

Adrese autora:

Mr. sc. **Javor Škare**
jskare@koncar-inem.hr
KONČAR-Elektronika i informatika d.d.
Fallerovo šetalište 22
10000 Zagreb
Hrvatska
Miroslav Mesić, dipl.ing.
miroslav.mesic@hep.hr
HEP Operator prijenosnog sustava d.o.o.
Kupska 4
10000 Zagreb
Hrvatska

Authors' Adresses:

Javor Škare, MSc
jskare@koncar-inem.hr
KONČAR – Electronics and Informatics Inc.
Fallerovo šetalište 22
10000 Zagreb
Croatia
Miroslav Mesić, dipl. ing.
miroslav.mesic@hep.hr
HEP Transmission System Operator Ltd.
Kupska 4
10000 Zagreb
Croatia

Uredništvo primilo rukopis:
2008-12-01

Prihvaćeno:
2009-03-03

Manuscript received on:
2008-12-01

Accepted on:
2009-03-03

UPUTE AUTORIMA

UPUTSTVO ZA RUKOPIS

1. Časopis Energija objavljuje članke koji do sada nisu objavljeni u nekom drugom časopisu.
2. Radovi se pišu na hrvatskom ili engleskom jeziku, u trećem licu, na jednoj stranici papira, počinju s uvodom i završavaju sa zaključkom. Stranice se označavaju uzastopnim brojevima.
3. Radovi u pravilu ne mogu biti dulji od 14 stranica časopisa Energija (oko 9000 riječi).
4. Ime i prezime autora, znanstvena ili stručna titula, naziv i adresa tvrtke u kojoj autor radi i e-mail adresa navode se odvojeno.
5. Iznad teksta samoga rada treba biti sažetak od najviše 250 riječi. Sažetak treba biti zaokružena cjelina razumljiva prosječnom čitatelju izvan konteksta samoga rada. Nakon sažetka navode se ključne riječi.
6. Članci se pišu u Word-u sa slikama u tekstu ili u posebnim file-ovima u tiff formatu, 1:1, rezolucije namanje 300 dpi.
7. Članci se pišu bez bilješki na dnu stranice.
8. Matematički izrazi, grčka slova i drugi znakovi trebaju biti jasno napisani s dostatnim razmacima.
9. Literatura koja se koristi u tekstu navodi se u uglatoj zagradi pod brojem pod kojim je navedena na kraju članka. Korištena literatura navodi se na kraju članka redom kojim je spomenuta u članku. Ako rad na koji se upućuje ima tri ili više autora, navodi se prvi autor i potom et al. Nazivi časopisa navode se u neskrćenom obliku.

Časopis

[1] FRAZIER, L., FODOR, J. D., *The sausage machine: A new two-stage parsing model*. *Cognition*, 6 (1978)

Knjiga

[2] NAGAO, M., *Knowledge and Inference*, Academic Press, Boston, 1988

Referat

[3] R. L. WATROUS, L. SHASTRI *Learning phonetic features using connectionist networks: An experiment in speech recognition*. Presented at the Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, (1987) San Diego, CA

Neobjavljeno izvješće/teza

[4] J. W. ROZENBLIT *A conceptual basis for model-based system design*, PhD. Thesis, Wayne State University, Detroit, Michigan, 1985

10. Članak je prihvaćen za objavljivanje ako ga pozitivno ocijene dva stručna recenzenta. U postupku recenzije članci se kategoriziraju na sljedeći način:
 - izvorni znanstveni članci – radovi koji sadrže do sada još neobjavljene rezultate izvornih istraživanja u potpunom obliku,
 - prethodna priopćenja – radovi koji sadrže do sada još neobjavljene rezultate izvornih istraživanja u preliminarnom obliku,
 - pregledni članci – radovi koji sadrže izvoran, sažet i kritički prikaz jednog područja ili njegova dijela u kojem autor i sam aktivno sudjeluje – mora biti naglašena uloga autorovog izvornog doprinosa u tom području u odnosu na već objavljene radove, kao i pregled tih radova,
 - stručni članci – radovi koji sadrže korisne priloge iz struke i za struku, a ne moraju predstavljati izvorna istraživanja.
11. Članci se lektoriraju i provodi se metrološka recenzija.
12. Članci se dostavljaju u elektroničkom obliku i 1 primjerak u tiskanom obliku na adresu:
Hrvatska elektroprivreda d.d.
N/r tajnika Uređivački odbor – mr. sc. Slavica Barta-Koštrun
Ulica grada Vukovara 37, 10000 Zagreb, Hrvatska
Tel.: +385 (1) 632 2641
Faks: +385 (1) 6322143
e-mail: slavica.barta@hep.hr

KOREKTURA I AUTORSKI PRIMJERC I

1. Autori su dužni izvršiti korekturu svoga rada prije objavljivanja. Veće promjene teksta u toj fazi neće se prihvatiti.
2. Autori dobivaju besplatno 5 primjeraka časopisa u kojemu je objavljen njihov članak. Naknada za objavljeni članak obračunava se prema Odluci o visini autorskih honorara časopisa Energija.

AUTORSKO PRAVO

1. Autorsko pravo na sve objavljene materijale ima časopis Energija.
2. Autori moraju telefaksom dostaviti popunjeni obrazac o autorskom pravu nakon prihvaćanja članka.
3. Autori koji žele koristiti materijale koji su prethodno objavljeni u časopisu Energija trebaju se obratiti izdavaču.

MANUSCRIPT REQUIREMENTS

- 1 Energy journal publishes articles never before published in another periodical.
- 2 Articles are written in Croatian or English, in the third person, on one paper side, beginning with an introduction and ending with a conclusion. Pages are numbered consecutively.
- 3 As a rule articles cannot exceed 14 pages of the *Energija* journal (about 9 000 words).
- 4 The name of the author and his/her academic title, the name and address of the company of the author's employment, and e-mail address, are noted separately.
- 5 The text of the article is preceded by a summary of max. 250 words. The summary is followed by the listing of the key words.
- 6 Article are written in MS Word with pictures embedded or as separate TIFF files, 1:1, min. 300 dpi.
- 7 Articles are written without bottom of page footnotes.
- 8 Mathematical expressions, Greek letters and other symbols must be clearly written with sufficient spacing.
- 9 The sources mentioned in the text of the article are only to be referenced by the number, in the square brackets, under which it is listed at the end of the article. References are listed at the end of the article in the order in which they are mentioned in the text of the article. If a work referenced has three or more authors, the first author is mentioned followed by the indication et al. Names of journals are given in full.

Journal

- [1] FRAZIER, L., FODOR, J. D., *The sausage machine: A new two-stage parsing model*, *Cognition*, 6 (1978)

Book

- [2] NAGAO, M., *Knowledge and Inference*, Academic Press, Boston, 1988

Paper

- [3] R. L. WATROUS, L. SHASTRI *Learning phonetic features using connectionist networks: An experiment in speech recognition*. Presented at the Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, (1987) San Diego, CA

Unpublished report/theses

- [4] J. W. ROZENBLIT *A conceptual basis for model-based system design*, PhD. Thesis, Wayne State University, Detroit, Michigan, 1985

- 10 An article will be accepted for publishing if it is positively evaluated by two reviewers. In the review, articles are categorized as follows:
 - original scientific papers – works containing hitherto unpublished full results of original research,
 - preliminary information – works containing hitherto unpublished preliminary results of original research,
 - review papers – works containing the original, summarised and critical review from the field or from a part of the field in which the author of the article is himself/herself involved – the role of the author's original contribution to the field must be noted with regard to already published works, and an overview of such works provided,
 - professional articles – works containing useful contributions from the profession and for the profession not necessary derived from original research.
- 11 Articles will undergo language editing and metrological reviews will be language-edited and reviewed for metrology.
- 12 Article are to be submitted in a machine-readable form plus one printout to the following address: electronic form along with 1 hard copy to :
HEP d.d. – Energija
Attn. Secretary to Editorial Board – Slavica Barta-Koštrun, MSc
Ulica grada Vukovara 37, 10000 Zagreb, Hrvatska
Tel.: +385 (1) 632 2641
Fax: +385 (1) 6322143
e-mail: slavica.barta@hep.hr

CORRECTIONS AND FREE COPIES FOR AUTHORS

1. Authors are required to make the corrections in their works prior to publication. Major alterations of the text at the stage of publication will not be accepted.
2. The authors will receive 5 free copies of the *Journal* in which their respective articles APPEAR. The fee for an article published will be calculated in accordance with the Decision on the Fees for the Authors of the *Energija* journal.

COPYRIGHT

1. The copyright on all the materials published belongs to the *Energija* journal.
 2. Authors must fax in a filled out copyright form when their articles have been accepted.
 3. Authors wishing to use the materials published in the *Energija* journal need to contact the publisher.
-

INSTRUCTIONS TO AUTHORS

18. FORUM



Poziv autorima referata

Zagreb, 20. studenog 2009.

DAN ENERGIJE U HRVATSKOJ

QUO VADIS ENERGIJA U VREMENU KLIMATSKIH PROMJENA?



World Energy Council
CONSEIL MONDIAL DE L'ENERGIE

18. FORUM

U protekloj 2008. godini energija je bila u središtu pozornosti. Postala je i političkim sukobom između Rusije i Ukrajine, najviše zbog visokog rasta cijena nafte te plinske krize. Nakon tih događaja u javnosti su se nametnula sljedeća pitanja: cijena energije, raspoloživost fosilnih goriva, sigurnosti opskrbe, korištenje obnovljivih izvora i povećanje energetske učinkovitosti.

Spomenuta pitanja nisu nova, ona su u fokusu stručne i ostale javnosti već jedno desetljeće, ali su se najčešće postavljala u kontekstu klimatskih promjena i očuvanja klime.

Ako se rezimiraju političke, znanstvene i gospodarske aktivnosti onda nema nikakvog spora oko nekih temeljnih odrednica buduće energetske politike kao što su: povećati energetske učinkovitost, smanjiti emisije stakleničkih plinova, povećati korištenje obnovljivih izvora energije, unaprijediti tehnologije korištenja fosilnih izvora energije, reafirmirati korištenje nuklearne energije itd. Ono što je sporno je implementacijskog karaktera: kada, koliko, na koji način i koliki će biti troškovi svega toga.

Energija je realna ekonomska kategorija, pogodna za političke i poslovne špekulacije. Karakterizira ju nejednako raspoređena primarna proizvodnja, potrošnja u uskoj korelaciji s bogatstvom i siromaštvom te nejednakim mogućnostima i sposobnostima u razvoju i korištenju novih tehnologija. Ove karakteristike određuju i u budućnosti će određivati proizvodnju i potrošnju energije.

Protokol iz Kyota naznačio je interese međunarodne zajednice o potrebi za promjenama u energetske sektoru kako bi se usporio i zaustavio tijek klimatskih promjena, međutim bez značajnijih rezultata. Razdoblje nakon 2012. godine trebalo bi otvoriti potpuno novu stranicu i to ne samo na deklaracijskoj razini. Kako dizajnirati energetske sektor u vremenu klimatskih promjena veliki je izazov za sve, pa i za sudionike 18. Foruma.





U SREDIŠTU POZORNOSTI FORUMA SU SLJEDEĆE TEME:

- ◆ Dugoročni ciljevi smanjenja emisija i njihov utjecaj na razvoj proizvodnje i potrošnje energije
- ◆ Tehnološki razvoj u funkciji dugoročnih ciljeva očuvanja klime
- ◆ Mehanizmi ostvarenja dugoročne energetske politike i politike očuvanja klime
- ◆ Cijena energije i njezin utjecaj na ostvarivanje dugoročne politike
- ◆ Sigurnost opskrbe
- ◆ Razvoj tržišta energije
- ◆ Politička dimenzija ostvarivanja ciljeva zaštite klime i razvoja energetskeg sektora



www.hed.hr

Poziv autorima referata

TERMINSKI PLAN:

Prijava referata do 15. srpnja 2009. godine.

Pri prijavi treba naznačiti naziv referata, ime autora, adresu i telefonski broj, te priložiti sažetak referata. Autori će biti obaviješteni o primitku referata do 31. kolovoza 2009. godine.

Gotove referate treba poslati do 20. listopada 2009. godine u sjedište HED-a.

Referat može imati do osam stranica teksta s priložima. Napominjemo da naslov i sažetak referata trebaju biti prevedeni na engleski jezik. Referat se dostavlja u jednom tiskanom primjerku i na cd-u. Iscrpne upute autorima za pisanje referata bit će dostavljene zajedno s obavijesti o primitku referata.

Za sve informacije možete se obratiti na:

tel: (01) 60 40 609

faks: (01) 60 40 610

E-mail: hed@eihp.hr, mmoric@eihp.hr

Forum će se održati 20. studenog 2009. godine u 9 sati, u Maloj dvorani "Vatroslav Lisinski", u Zagrebu, Trg Stjepana Radića 4.

Predviđa se da će 18. Forum trajati jedan dan, od 9 do 18 sati, i to u četiri bloka, s predviđenim stankama i odmorom za ručak.

Vrijeme prezentacije referata bit će ograničeno i ovisit će o broju pristiglih referata.

Tijekom održavanja 18. Foruma bit će dopuštena prezentacija proizvoda, prema dogovoru zainteresiranih tvrtki i HED-a kao organizatora 18. Foruma.

ORGANIZATOR:

HRVATSKO ENERGETSKO DRUŠTVO
Savska cesta 163
10000 Zagreb

Predsjednik: dr. sc. Goran Granić
Tajnik: dr. sc. Branka Jelavić

Članovi Upravnog odbora:
Ivo Čović, dipl.ing.
Dr. sc. Tomislav Dragičević
Prof. dr. sc. Bernard Franković
Dr. sc. Vladimir Jelavić
Mr. sc. Ivan Mravak
Dr. sc. Stevo Kolundžić
Prof. dr. sc. Vladimir Mikuličić
Prof. dr. sc. Miljenko Šunić

Priopćenje za javnost

Nove hrvatske norme na hrvatskome jeziku

Hrvatski zavod za norme izdao je nove hrvatske norme niza [HRN EN 62305](#), pod zajedničkim naslovom Zaštita od munje, a sastoje se od sljedećih dijelova:

HRN EN 62305-1:2008, Zaštita od munje – 1. dio: Opća načela

HRN EN 62305-2:2008, Zaštita od munje – 2. dio: Upravljanje rizikom

HRN EN 62305-3:2008, Zaštita od munje – 3. dio: Materijalne štete na građevinama i opasnost za život

HRN EN 62305-4:2008, Zaštita od munje – 4. dio: Električni i elektronički sustavi unutar građevina

Norma HRN EN 62305-1:2008 utvrđuje opća načela koja treba primjenjivati radi zaštite od munje za građevine sa svim njihovim instalacijama i sadržajem te osobljem i za opskrbe vodove koji ulaze u građevine. Prema ovoj normi ne razmatraju se sljedeći objekti: željeznički sustavi, vozila, brodovi, zrakoplovi, morske platforme, podzemni visokotlačni cjevovodi, cjevovodi, te elektroenergetski i telekomunikacijski vodovi koji nisu spojeni na razmatranu građevinu.

Norma HRN EN 62305-2:2008 utvrđuje upravljanje rizikom i može se upotrebljavati za procjenu rizika za građevinu ili opskrbe vodove zbog udara munja u tlo. Namjena ove norme jest opis postupka za proračun takvih rizika. Kad se odabere gornja dopuštena granica nekog rizika, opisanim je postupkom moguće odabrati odgovarajuće zaštitne mjere kako bi se taj rizik smanjio na prihvatljivu granicu ili ispod nje. Uz normu se isporučuje i IEC-ov Kalkulator SIRAC na CD ROM-u.

Norma HRN EN 62305-3:2008 određuje zahtjeve za zaštitu građevina od materijalnih šteta uz pomoć sustava zaštite od munje (LPS) i za zaštitu od ozljeda živih bića zbog dodirnog napona i napona koraka u blizini sustava zaštite od munje (LPS). Ova je norma primjenjiva za: projektiranje, ugradnju, nadzor i održavanje sustava zaštite od munje (LPS) građevina bez ograničenja glede njihove visine i ostavljanje mjera zaštite od ozljeda živih bića zbog dodirnog napona i napona koraka.

Norma HRN EN 62305-4:2008 daje obavijesti o projektiranju, izvedbi, pregledu, održavanju i ispitivanju mjera zaštite od elektromagnetskog udarnog vala munje (LEMP) i sustava zaštitnih mjera protiv LEMP-a za električne i elektroničke sustave unutar građevine, uz pomoć kojih se može smanjiti rizik trajnih kvarova zbog udarnih elektromagnetskih valova.

Hrvatske tekstove norma pripremio je tehnički odbor HZN/TO E81, Zaštita od munje.

Predstavljanje novih hrvatskih norma održat će se u prostorijama Hrvatskoga zavoda za norme u ponedjeljak, 18. svibnja 2009. godine. Prijave i više o tome uskoro na www.hzn.hr

Kontakti za dodatne obavijesti:

Hrvatski zavod za norme:

Stanka Miljković

tel: +385 1 610 60 65

faks: +385 1 610 93 21

e-pošta: pr@hzn.hr

web: www.hzn.hr

Hrvatski zavod za norme (HZN) je nacionalno normirno tijelo Republike Hrvatske osnovano radi ostvarivanja ciljeva normizacije: povećanja razine sigurnosti proizvoda i procesa, čuvanja zdravlja i života ljudi te zaštite okoliša, promicanja kakvoće proizvoda, procesa i usluga, osiguravanja svrsishodne uporabe rada, materijala i energije, poboljšanja proizvodne učinkovitosti, ograničenja raznolikosti, osiguranja spojivosti i zamjenjivosti te otklanjanja tehničkih zapreka u međunarodnoj trgovini. Osnovna djelatnost HZN-a je priprema, prihvaćanje i izdavanje hrvatskih norma i drugih dokumenata iz područja normizacije. HZN pruža informacije o nacionalnim, europskim i međunarodnim normama cjelokupnoj javnosti, a posebno hrvatskom gospodarstvu.

