

ENERGIA

**JOURNAL
OF ENERGY**

IZDAVAČ

Hrvatska elektroprivreda d.d., Zagreb

SUIZDAVAČI

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

ZA IZDAVAČA

Leo Begović, dipl. ing.

POMOĆ U IZDAVANJU

Ministarstvo znanosti, obrazovanja i športa

UREDIVAČKI 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

UREDIVAČKI 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 – CIKLOPEA, Zagreb

UREDNIŠTVO I UPRAVA

HEP d.d. – Energija, Uredivački odbor
Ulica grada Vukovara 37, 10000 Zagreb, Hrvatska
Telefoni: +385 (1) 632 2531 i 6322641
Telefaks: +385 (1) 632 2143
e-mail: goran.slipac@hep.hr; slavica.barta@hep.hr
www.hep.hrGodišnje 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:
2360000-1400129978Godišnja pretplata za inozemstvo iznosi USD 95.
Devizni račun:
Zagrebačka banka broj: 2000006299Grafičko uređenje omota – mr. sc. Kažimir Vrankić, Zagreb
Grafičko uređenje časopisa – Intergrafika TTZ d.o.o., Zagreb
Tisak – Tiskara Zelina d.o.o., ZelinaNaklada – 1 500 primjeraka
Godište 58(2009)
Zagreb, 2009
Broj 5., str. 449-568

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

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

Leo Begović, dipl. ing.

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 – CIKLOPEA, Zagreb

HEAD OFFICE AND MANAGEMENT

HEP d.d. – Energija, Editorial Board
Ulica grada Vukovara 37, 10000 Zagreb, Hrvatska
Telephone: +385 (1) 632 2531 and 6322641
Fax: +385 (1) 632 2143
e-mail: goran.slipac@hep.hr; slavica.barta@hep.hr
www.hep.hrAppears 6 times a year.
Annual subscription fee excl. VAT (10 %)
– for individuals HRK 275,
– for companies HRK 440,
– for students HRK 65.
Number of giro account with Zagrebačka banka
2360000-1400129978Annual subscription fee for Y overseas: USD 95.
Number of foreign currency account with Zagrebačka banka:
2000006299Cover design – Kažimir Vrankić, MSc, Zagreb
Graphic layout – Intergrafika TTZ d.o.o., Zagreb
Printed by – Tiskara Zelina d.o.o., ZelinaCirculation – 1 500 copies
Volume 58(2009)
Zagreb, 2009
No. 5, pp. 449-568

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

SADRŽAJ

Božić, H., Vuk, B., Novosel, D.
INDIKATORI ENERGETSKE UČINKOVITOSTI
(pregledni članak)*Trontl, K., Pevec, D., Blaće, M.*
ENERGETSKI NEZAVISAN OTOK U HRVATSKOJ
(prethodno priopćenje)*Muharemović, A., Zildžo, H., Turković, I., Matorugu, H.*
MODELIRANJE RASPODJELE ZAŠTITNOG POTENCIJALA
U SISTEMIMA KAŢODNE ZAŠTITE SA GALVANSKIM
ANODAMA KORIŠTENJEM KOMBINIRANE BEM/FEM
METHODE (Izvorni znanstveni članak)*Puharić, M.*
PROMJENA KONCEPCIJE UZEMLJENJA NEUTRALNE
TOČKE SREDNJIJENAPONSKIH MREŽA
(pregledni članak)*Šušnjić, L.*
ELEKTROMAGNETSKI PRORAČUN I KONSTRUKCIJSKA
IZVEDBA BESKONTAKTNOG UZBUDNOG SUSTAVA
(izvorni znanstveni rad)

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

Božić, H., Vuk, B.
ENERGY EFFICIENCY INDICATORS
(review paper)*Trontl, K., Pevec, D., Blaće, M.*
ZERO ELECTRIC ENERGY ISLAND CONCEPT IN CROATIA
(preliminary information)*Muharemović, A., Zildžo, H., Turković, I., Matorugu, H.*
Modeling of the Protection Current/Potential Distribution
in the Cathodic Protection Systems with Galvanic Anode by
using Coupled BEM/FEM Method
(original scientific paper)*Puharić, M.*
(review paper)*Šušnjić, L.*
BRUSHLESS EXCITATION SYSTEM ELECTROMAGNETIC
DESIGN AND ANALYSES
(original scientific paper)

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.

452-479

480-493

494-515

516-549

550-563



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-tehnoškim, 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.

INDIKATORI ENERGETSKE UČINKOVITOSTI ENERGY EFFICIENCY INDICATORS

Helena Božić – Branko Vuk – Dino Novosel, Zagreb, Hrvatska

U radu su opisani indikatori energetske učinkovitosti i indeksi poboljšanja energetske učinkovitosti prema vrsti i namjeni. Namjena indikatora i indeksa je praćenje i uspoređivanje trendova energetske učinkovitosti u zemljama EU-27, Norveškoj i Hrvatskoj, stoga su posebno prikazani trendovi u Hrvatskoj za svaki od sektora potrošnje energije.

This paper describes energy efficiency indicators and indices of energy efficiency improvements according to type and use. The purpose of indicators and indices is the monitoring and comparing of energy efficiency trends in the EU-27 countries, Norway and the Republic of Croatia, therefore the trends in Croatia have been specially presented for each of the energy consumption sectors.

Ključne riječi: energetska učinkovitost; indeks; indikator
Keywords: energy efficiency; index; indicator



1 UVOD

Indikatori energetske učinkovitosti od velike su važnosti za ciljeve energetske politike i politike okoliša. Sadašnja provedba politike u zemljama članicama Europske unije (EU), obveze povezane s klimatskim promjenama, nadziranje bijele knjige Komisije za energetske učinkovitosti i nadziranje politike kogeneracije zahtijevaju sve bolje razumijevanje razlika sektora potrošnje država članica EU, njihovih energetskih sustava i mogućnosti za napredovanje.

Svrha energetskih indikatora je praćenje i usporedba energetske učinkovitosti i političkih trendova u zemljama EU-27 uključujući Norvešku i Hrvatsku. Ne mjere se indikatorima iz analitičke perspektive samo učinci mjera politike energetske učinkovitosti (npr. propisi, ekonomski i fiskalni poticaji, informacije), nego i razni drugi faktori, kao što su utjecaj cijena energije, utjecaj drugih smjernica koje mogu neizravno pridonijeti porastu potražnje za energijom i utjecaj nezavisnog tehničkog napretka. Sintetsko nadziranje smjernica energetske učinkovitosti i njihovih utjecaja, pruža dodatne informacije o najučinkovitijim smjernicama u različitim sektorima potražnje.

Pokazatelji energetske učinkovitosti razmatraju se za sektor neposredne potrošnje energije (u sklopu kojeg se promatraju kućanstva, uslužni sektor i zgradarstvo, poljoprivreda, industrija i promet). Kao pokazatelji, osim neposredne potrošnje energije i bruto dodane vrijednosti (BDV) kao značajki rasta pojedine grupe potrošnje energije, promatraju se i indeks poboljšanja energetske učinkovitosti ODEX, indeks energetske intenzivnosti, odnos primarne i finalne energetske intenzivnosti te strukturni makroekonomski utjecaj na energetske intenzivnosti.

2 INDIKATORI ENERGETSKE UČINKOVITOSTI

Indikatori energetske učinkovitosti imaju nekoliko ciljeva [1]:

- nadzor ciljeva postavljenih na nacionalnim i međunarodnim razinama u energetske učinkovitosti i programima smanjenja CO₂,
- procjena smjernica i programa energetske učinkovitosti. Ministarstva, agencije za energiju ili organizacije zadužene za provedbu programa energetske učinkovitosti moraju osigurati redovne procjene da bi opravdale svoj rad i velike količine proračunskog novca koji je utrošen za potporu tim programima ili za rad agencija energetske učinkovitosti,

1 INTRODUCTION

Energy efficiency indicators are of great importance for the energy and environment policy objectives. Current policy implementation in the EU member states, the climate change commitments, the monitoring of the white paper of the Commission on energy efficiency and the monitoring of the policy on cogeneration all require better understanding of the differences across the EU member states consumption sectors, their energy systems and their potential improvements.

The purpose of the energy indicators is to monitor and compare energy efficiency and policy trends in the EU-27 including Norway and Croatia. Not only the effect of energy efficiency policy measures are measured (e.g. regulations, economic and fiscal incentives, information) from a top-down perspective using indicators, but also various other factors such as the impact of energy prices, the influence of other policies which may contribute indirectly to increasing energy demand and the influence of autonomous technical progress. The bottom-up monitoring of energy efficiency policies and their impacts provides additional information on the most efficient policies in different demand sectors.

Energy efficiency indicators are considered for the direct energy consumption sector (within the scope of which households, the service sector and building construction, agriculture, industry and transport are monitored). As indicators, apart from direct energy consumption and Gross Value Added (GVA) as properties of growth of an individual energy consumption group, the index of energy efficiency progress ODEX, the index of energy intensities, the primary and final energy intensity ratio, and the structural macro-economic influence on energy intensity are also monitored.

2 ENERGY EFFICIENCY INDICATORS

Energy efficiency indicators have several objectives [1]:

- monitoring of the targets set at the national and international levels in energy efficiency and CO₂ abatement programmes,
- evaluation of the energy efficiency policy and programmes. Ministries, energy agencies or organisations in charge of the implementation of energy efficiency programmes need to provide regular evaluations to justify their action and the large amounts of public money that have been spent to support these programmes or to operate the energy efficiency agencies,

- planiranje budućih radnji, uključujući programe istraživanja i razvoja,
- udovoljavanje modelima prognoze energetske potražnje i poboljšanje kvalitete prognoza; tehničko-ekonomski modeli, koje karakterizira visoka razina desegregacije (krajnje uporabe), koriste indikatore energetske učinkovitosti da bi razjasnili buduće promjene energetske učinkovitosti,
- međudržavne usporedbe, ključno pitanje povezano s međunarodnim pregovorima o klimatskim promjenama.
- planning of future actions, including R&D programmes,
- feeding the energy demand, forecasting models and improving the quality of forecasts; techno-economic models, that are characterised by a high level of desegregation (end-uses), make use of energy efficiency indicators to account for future changes in energy efficiency,
- cross-country comparisons, a crucial question in connection with international negotiations on climate change.

Indikatori energetske učinkovitosti podijeljeni su po makro-indikatorima, definiranim na razini gospodarstva kao cjeline, na razini sektora ili pod-sektora (industrijski proces, način transporta ili krajnja uporaba u sektoru kućanstva).

Uzimaju se u obzir tri vrste indikatora sukladno njihovoj ulozi:

- indikatori koji prate trendove energetske učinkovitosti i smanjenja CO₂ po državi: indikatori opisa i objašnjenja,
- indikatori koji uspoređuju razine obavljanja energetske učinkovitosti države s drugim državama,
- indikatori difuzije koji mjere difuziju (tj. prodiranje na tržište) učinkovitih tehnologija i praksi.

2.1 Indikatori koji prate trendove energetske učinkovitosti

Smatra se da četiri vrste indikatora prate trendove energetske učinkovitosti:

- intenziteti energije/ugljika, povezuju potrošnju energije [mjerenu u jedinicama energije: tona ekvivalentne nafte (ten), džul ...], ili emisije CO₂ s indikatorom aktivnosti mjerenim u novčanim jedinicama (bruto domaći proizvod, dodana vrijednost ...),
- tehničko-ekonomski omjeri ili jedinična potrošnja/jedinična emisija CO₂, koji povezuju potrošnju energije ili emisiju CO₂ s indikatorom aktivnosti mjerenim fizičkim mjerilima: (ℓ/100 km za automobile, ten po toni cementa, kWh po hladnjaku, ekvivalent dizela po m² prostora za grijanje u stanu itd.),
- indeks napretka energetske učinkovitosti, zvan ODEX, definiran na razini sektora (industrije, transporta, kućanstava) ili čitavog gospodarstva (svi krajnji potrošači). Indeks se dobiva zbrajanjem promjena jedinične potrošnje na detaljnim razinama, pod-sektorskom ili krajnjom potrošnjom, praćenim tijekom određenog razdoblja. Varijacije jedinične potrošnje mjere se indeksom, što

Energy efficiency indicators are divided on macro-indicators, defined at the level of the economy as a whole, of a sector, or a sub-sector (industrial process, mode of transport, or end-use in the household sector).

Three types of indicators are considered according to their role:

- Indicators to monitor trends in energy efficiency and CO₂ abatement by country: descriptive and explanatory indicators,
- Indicators to compare the energy efficiency performance level of a country with other countries,
- Diffusion indicators to measure the diffusion (i.e. the market penetration) of efficient technologies and practices.

2.1 Indicators to monitor energy efficiency trends

Four types of indicators are considered to monitor energy efficiency trends:

- energy/carbon intensities, relating an energy consumption [measured in energy units: the tonn of oil equivalent (toe), Joule ...], or CO₂ emissions to an indicator of activity measured in monetary units (Gross Domestic Product, value added ...),
- techno-economic ratios or unit consumption/unit CO₂ emission, relating energy consumption or CO₂ emission to an indicator of activity measured in physical terms: (ℓ/100 km for car, toe per ton of cement, kWh per refrigerator, goe per m² for space heating in dwelling etc.),
- index of energy efficiency progress, called ODEX, defined at the level of sectors (industry, transport, households) or of the whole economy (all final consumers). This index is obtained by aggregating the unit consumption changes at detailed levels, by sub-sector or end-use, observed over a given period. The unit consumption variations are measured in terms of index, which enable the use of various units for the detailed indicator (kWh/appliance, toe/m² ...). Using relevant physical parameters, the ODEX

omogućuje korištenje raznih jedinica za detaljni indikator (kWh/aparatu, ton/m², ...). Korištenjem odgovarajućih fizičkih parametara, ODEX indikator daje dobru procjenu napretka energetske učinkovitosti s gledišta političke procjene. ODEX je alternativa skupnim monetarnim energetske učinkovitosti za praćenje trendova energetske učinkovitosti po sektorima, jer intenziteti uključuju mnoge faktore koji nisu izravno povezani s energetske učinkovitosti. Na sličan se način može izračunati indeks CO₂,

- uštede energije/ CO₂ koje izražavaju varijacije ODEX-a, u kategorijama količine uštede energije (Mten) ili uštedenog CO₂ (Mt), u usporedbi sa situacijom bez napretka energetske učinkovitosti.

Ovi se indikatori mogu skupiti u 3 grupe, sukladno njihovoj razini kompleksnosti i mogućnosti objašnjenja praćenih trendova:

- naslovni/opisni indikatori koji većinom opisuju ukupne trendove energetske učinkovitosti s makro-ekonomskog gledišta; ti opisni indikatori izračunavaju se iz redovnih službenih ekonomskih i energetske statistika, kao izravan omjer potrošnje energije i makro-ekonomske varijable,
- indikatori objašnjenja/problema koji idu u veće detalje (krajnja uporaba, način transporta) i kojima je cilj objasniti trendove zabilježene u naslovnim indikatorima; takvi indikatori problema mogu se oslanjati na redovne statistike, ali se također mogu i procijeniti ili poticati iz anketa; obično uključuju izračunske procedure koristeći standardnu metodologiju (izračunati omjeri). Intenziteti postojećih struktura, ODEX ili uštede energije su indikatori objašnjenja.

2.2 Indikatori usporedbe

Predložene su dvije vrste indikatora za usporedbu energetske performansi među zemljama:

- prilagođeni indikatori, prilagođeni su za strukturalne razlike među zemljama da bi omogućili preciznije usporedbe među njima; prilagodbe rade ispravke za razlike u ekonomskim (opća cjenovna razina, ekonomska i industrijska struktura), zemljopisnim ili klimatskim situacijama zemalja. Prosjek EU se obično uzima kao mjerilo za prilagodbe. Prilagodba na istu cjenovnu razinu izrađuje se koristeći paritete kupovne moći (pkm). Da bi imala značaj, usporedba bi se trebala izraditi na temelju posljednje dostupne godine i s važećim paritetima kupovne moći ili s konstantnim paritetima, s recentnom temeljnom godinom (npr. pkm 2000.),

indicator provides a good proxy of the energy efficiency progress from a policy evaluation viewpoint. ODEX is an alternative to the aggregate monetary energy intensities to monitor energy efficiency trends by sector, as intensities include many factors that are not directly linked to energy efficiency. In a similar way, a CO₂ index can be calculated,

- energy/ CO₂ savings, expressing the variations of the ODEX, in terms of amount of energy saved (in Mtoe) or CO₂ saved (in Mt), in comparison to a situation without energy efficiency progress.

These indicators can be gathered in 3 groups, according to their level of complexity and their capacity to explain the trends observed:

- headline/ descriptive indicators that mainly describe overall energy efficiency trends, from a macro-economic point of view; these descriptive indicators are calculated from usual official economic and energy statistics, as a direct ratio between an energy consumption and a macro-economic variable,
- explanatory/issue indicators, that go into more details (end-use, mode of transport) and aims at explaining trends observed for the headline indicators; such issue indicators may rely on usual statistics but also may be estimated or derived from surveys; they usually imply some calculation procedures using a conventional methodology (calculated ratios). Intensities at constant structure, ODEX or energy savings are explanatory indicators.

2.2 Comparison indicators

Two types of indicators are proposed to compare energy performances across countries:

- adjusted indicators, that are adjusted for structural differences between countries to enable more accurate cross-country comparisons; the adjustments correct for differences in the countries' economic (general price level, economic and industry structure), geographic or climatic situations. The EU average is usually taken as the reference for the adjustments. The adjustment to the same price level is done by using power purchasing parities. To be meaningful, the comparison should be made on the most recent year available and at current purchasing power parities (ppp) or at constant power parities, with a recent base year (e.g. at 2000 ppp),
- benchmark or target indicators that indicate for a given country the gap between the actual values of some indicators and benchmark/target

- kriterijski ili ciljni indikatori, koji pokazuju razliku između stvarnih vrijednosti nekih indikatora i polazišnih/ciljnih vrijednosti za određenu zemlju. Izračunavaju se za svaku zemlju s njenim karakteristikama i energetskim performansama ciljnih zemalja (npr. najbolje performanse EU) ili kriterijskim vrijednostima. Razlika između zabilježene vrijednosti nekog indikatora i ciljne/kriterijske vrijednosti može pokazati ostvarivi potencijal za poboljšanje energetske učinkovitosti.

2.3 Indikatori difuzije

Svrha ovih indikatora je dopuna postojećih indikatora energetske učinkovitosti. Njih je, u osnovi, lakše pratiti i češće se ažuriraju od indikatora energetske učinkovitosti koji ovise o dostupnosti podataka o krajnjoj potrošnji.

Razmatrane su tri vrste indikatora:

- prodor učinkovitih tehnologija na tržište: broj prodanih učinkovitih žarulja, % oznake A u novim prodajama električnih uređaja, ...
- difuzija/širenje energetski učinkovitih običaja, % putnika u javnom prijevozu i putnika na ne-motornim sredstvima; % prometa roba željeznicom i kombinirani željezničko-cestovni promet; % učinkovitih procesa u industriji, ...
- prodor na tržište obnovljivih za krajnju uporabu (broj solarnih grijača za vodu, % grijača i bojlera na drva, ...).

Ti indikatori će biti korišteni za dopunu procjene sektorskih trendova energetske učinkovitosti.

Trendovi energetske učinkovitosti i utjecaj političkih mjera u EU-27, uključujući Norvešku i Hrvatsku, ovise o dva sljedeća alata [2]:

- ODYSSEE bazi podataka o indikatorima energetske učinkovitosti, koja je u međuvremenu postala mjerilo za procjenu i praćenje godišnjih performansi energetske učinkovitosti i emisija CO₂ povezanih s energijom za EU kao cjelinu, te za Norvešku i Hrvatsku,
- MURE alatu, koji kombinira bazu podataka o važnim mjerama energetske učinkovitosti primijenjenim u zemljama EU i na razini EU sa simulacijskim alatom za procjenu utjecaja RUE mjera.

Komisija je oba alata koristila za pripremu Direktiva (MURE je, na primjer, pružio važne podatke za Direktivu o energetskim performansama zgrada) i Akcijskog plana za energetske učinkovitost, te se od njih očekuje da pridonese praćenju novijih Direktiva, kao što je Direktiva o energetskim uslugama.

get values. They are calculated for each country with the countries characteristics and the energy performance of target countries (e.g. the best EU performance) or benchmark values. The gap between the observed value for a given indicator and the target/ benchmark value can show a feasible potential of energy efficiency improvement.

2.3 Diffusion indicators

These indicators aim at complementing the existing energy efficiency indicators. They are, in principle, easier to monitor and more rapidly updated than energy efficiency indicators that depend on the availability of data on end-use consumption.

Three types of indicators are considered:

- market penetration of efficient technologies: number of efficient lamps sold, % of label A in new sales of electrical appliance ...
- diffusion of energy efficient practices, % of passenger transport by public modes, by non motorised modes; % of transport of goods by rail by combined rail-road transport, % of efficient process in industry, ...
- market penetration of end-use renewable (number of solar water heaters, % of wood boilers for heating ...).

These indicators will then be used to complement the evaluation of the sectoral trends in energy efficiency.

The trends in energy efficiency that impact policy measures in EU-27 including Norway and Croatia rely on the following two tools [2]:

- The ODYSSEE database on energy efficiency indicators, which has since become a reference for the evaluation and monitoring of annual energy efficiency performances and energy-related CO₂ emissions for the EU as a whole, and for Norway and Croatia,
- The MURE tool, which combines a database on important energy efficiency measures implemented in the EU countries and at the EU level with a simulation tool to evaluate the impact of RUE measures.

Both tools have been used by the Commission to prepare Directives (MURE for example provided important input to the Directive on the energy performance of buildings) and the Energy Efficiency Action Plan or are expected to contribute to the monitoring of recent Directives such as the Energy Service Directive.

Indeksi energetske učinkovitosti (ODEX indikatori) su najnovija vrsta indikatora uvedenih u ODYSSEE i vrlo su inovativne prirode u usporedbi sa sličnim indeksima. Grupiraju trendove iz različitih jedinica potrošnje po pod-sektoru ili krajnjoj uporabi u jedan indeks po sektoru, temeljeno na težini svakog pod-sektora/krajnje uporabe u ukupnoj potrošnji energije sektora. Ti su indeksi alternativa energetskim intenzitetima korištenim za procjenu promjena energetske učinkovitosti na razini sektora ili na razini čitave države, jer ih se ispravlja za razne utjecaje nepovezane s energetskom učinkovitošću, kao što su klimatske fluktuacije, promjene u ekonomskim i industrijskim strukturama, promjene načina života (povećanje stambenog prostora, posjedovanje uređaja). Lako ih se može izraziti kao količine uštedene energije (npr. **Mten** ili **PJ** ušteda/godina).

Indikatori poput onih razvijenih u ODYSSEE bazi podataka sada se koriste kao mjerila, na razini država i na međunarodnoj razini, jer omogućavaju usklađeno praćenje trendova energetske učinkovitosti među zemljama. Nekoliko međunarodnih organizacija, a posebice Europska komisija, sve ih češće koriste kao mjerilo:

- Glavna uprava za transport i energiju: Komisija je izričito spomenula ODEX indikatore u Direktivi o energetskim uslugama da bi pridonio praćenju direktive s analitičkim pristupom. PET (Promatračnica energetskog tržišta) baza podataka uključuje oko 20 indikatora iz ODYSSEE,
- Glavna uprava za okoliš također je uzela u obzir iskustva stečena s ODYSSEE indikatorima kada je dizajnirala vlastite indikatore za praćenje stakleničkih plinova, te razmišlja o korištenju nekih ODYSSEE podataka i indikatora za praćenje dokazivog napretka u smanjenju stakleničkih plinova unutar svoje radne skupine za klimatske promjene,
- EUROSTAT (Statistički ured Europske unije – The Statistical Office of the European Communities) se također osvrnuo na ODYSSEE indikatore kada je osmišljavao vlastitu listu prioritetnih indikatora, te između EUROSTAT-a i ODYSSEE teče redovna suradnja u obliku razmjene podataka i usklađenih metodologija. Ta suradnja će još ojačati tijekom ESD praćenja,
- EAO (Europska agencija za okoliš): TERM izvješće svake godine koristi set podataka i indikatora preuzetih iz ODYSSEE baze podataka; EAO je također koristila i TERM promatrače, indikatore koji prate integracije u prometu i okolišu Europske unije,
- ODYSSEE indikatori će pripremiti četvrto paneuropsko izvješće procjene okoliša, kao dio procesa Okoliš za Europu unutar okvira Europske komisije Ujedinjenih naroda za Europu,

Energy efficiency indices (ODEX indicators) are the most recent type of indicator to be introduced into ODYSSEE and are quite innovative in nature compared to similar indices. They aggregate trends in the different unit consumptions by sub-sector or end-use into one index by sector based on the weight of each sub-sector/end-use in the total energy consumption of the sector. These indices are an alternative to the energy intensities usually used to assess energy efficiency changes at the sectoral level or at the level of the whole country because they are corrected for various influences that are not linked to energy efficiency, such as climate fluctuations, changes in economic and industry structures, lifestyle changes (increase in dwelling size, appliance ownership). They can easily be expressed as amounts of energy savings (e.g. **Mtoe** or **PJ** saved/year).

Indicators such as those developed in the ODYSSEE database are now used as a reference, both at the level of countries and at the international level, as they make it possible to monitor trends in energy efficiency in a harmonised way among countries. In particular they are increasingly used as a reference by the European Commission as well as by several international organisations:

- DG-TREN: The Commission has made explicit reference to the ODEX indicators in the Energy Service Directive as a way of contributing to monitoring the Directive in a so-called “top-down” approach. The EMOS database (Energy Market Observatory) includes about 20 indicators from ODYSSEE,
- DG-ENV has also taken into account the experiences gained with ODYSSEE indicators when designing its own indicators for GHG monitoring and is also considering using some ODYSSEE data and indicators for monitoring the demonstrable progress in GHG abatement within its climate change task force,
- EUROSTAT has also referred to ODYSSEE indicators when designing its own list of priority indicators and regular cooperation takes place between Eurostat and ODYSSEE in the form of exchanging data and harmonised methodologies. This cooperation will be reinforced during monitoring of the ESD,
- EEA (European Environmental Agency): the TERM report uses a data set and indicators taken from the ODYSSEE database every year; EEA also used TERM monitors indicators tracking transport and environment integration in the European Union,
- ODYSSEE indicators to prepare the fourth pan-European environment assessment report as part of the ‘Environment for Europe’ process in the framework of UNECE,
- JRC Ispra and IPTS are also using ODYSSEE data for different studies for the Commission,

- Centar za zajednička istraživanja Ispra i Institut za buduće tehnološke studije također koriste ODYSSEE u različitim studijama za Komisiju, uključujući i sistem mjerila SRS za praćenje energetske učinkovitosti,
- Međunarodna agencija za energiju: agencija koristi ODYSSEE podatke za sastavljanje vlastitih indikatora za europske zemlje,
- Svjetsko vijeće za energiju i Tajništvo energetske povelje redovno se pouzdaju u te indikatore u objavljenim radovima i radionicama,
- neki modeli koje koristi Europska komisija također upotrebljavaju ODYSSEE podatke, npr. PRIMES i POLES.

MURE baza podataka pruža pregled najvažnijih mjera energetske učinkovitosti po sektorima, kao i presjek smjernica o energetske učinkovitosti za svaku od zemalja članica EU-27 te Norvešku i Hrvatsku. Baza podataka usredotočuje se na stranu potražnje mjera energetske učinkovitosti, koja će utjecati na sljedeće desetljeće. Baza podataka isključuje dugotrajne mjere istraživanja i razvoja, mjere poboljšanja učinkovitosti opskrbe i mjere usredotočene na smanjenje stakleničkih plinova općenito, mjere koje nisu izravno povezane s energetske učinkovitošću.

Podatke o tim mjerama sakupljaju nacionalne agencije za energiju i druge institucije, po usklađenim smjernicama koje su ustanovljene u središtima. Mjere su razvrstane sukladno iscrpnoj skupini parametara koji omogućavaju pristup različitim vrstama informacija (detaljna tipologija mjera, datumi početaka i završetaka, ciljne skupine, čimbenici, stanje – završeno/traje/planirano itd.). Mjere su sažete u detaljnim opisima koji, koliko je dostupno, sadrže i podatke koji se tiču rezultata procjena mjera i metodologije korištene za procjenu.

MURE bazu podataka nadopunjuje alat za simulaciju mjera koji, u svojoj procjeni Nacionalnog akcijskog plana za energetske učinkovitost, trenutno koristi Komisija EU kao pomoć za procjenu mogućnosti štednje.

U okviru Direktive za energetske učinkovitost i energetske usluge, MURE baza podataka bi mogla pružiti sljedeće važne usluge:

- strukturiranje formata za izvješćivanje mjera u okviru Nacionalnog akcijskog plana za energetske učinkovitost koji Komisiji moraju predati zemlje članice EU. To bi omogućilo usklađeno predstavljanje mjera poduzetih od strane zemalja članica. Da bi ostvarila takav zadatak, MURE baza podataka morala bi prilagoditi svoje strukture zahtjevima izvješćivanja, jer oni proizlaze iz rasprava koje su u tijeku,
- predstavljanje mjera po državama na lako pristupačan način na Internetu,

including the reference system SRS for energy efficiency monitoring,

- IEA: ODYSSEE data are used by the IEA to construct their own indicators for European countries,
- WEC (World Energy Council) and the Energy Charter Secretariat regularly rely on these indicators in publications and workshops,
- Some models used by the European Commission also employ ODYSSEE data, such as PRIMES and POLES.

The MURE database provides an overview of the most important energy efficiency measures by sector as well as of cross-cutting energy efficiency policies for each of the EU-27 Member States, Norway and Croatia. The database focuses on the demand side of energy efficiency measures which will have an impact in the coming decade. The database excludes long-term R&D measures, measures to improve supply-side efficiency and measures focusing on greenhouse gas reduction in general which do not have direct links to energy efficiency.

Information about these measures is collected by national energy agencies and other institutions according to harmonised guidelines which have been established centrally. The measures are classified according to a detailed set of parameters which make it possible to retrieve various types of information (detailed measure typology, starting and ending dates, target groups, actors, status - completed/ongoing/planned etc). The measures are summarised in detailed descriptions which, as far as available, also contain information concerning the results of measure evaluations and the methodology used for the evaluation.

The MURE database is complemented by a measure simulation tool which is currently used by the EU Commission as an aid to assess saving potentials when evaluating the National Energy Efficiency Action Plans submitted in 2007.

In the framework of the Directive for Energy Efficiency and Energy Services, the MURE database could provide the following important services:

- structuring the format for reporting measures in the frame of the National Energy Efficiency Action Plans to be submitted to the Commission by the EU Member States. This would allow a harmonised presentation of the measures taken by the Member States. In order to accomplish such a task, the MURE database would have to adapt its structures to the reporting requirements as these emerge from the ongoing discussion,
- presenting the measures by country in an easily accessible way on the Internet,

- predstavljanje detaljnih informacija o procjenama mjera. To je već sad jaka strana MURE baze podataka, no ovoj vrsti informacija moglo bi također trebati i daljnje strukturiranje, s obzirom da je u tijeku rad na razvoju metodologija procjene, kao onaj u projektu Inteligentna energija za Europu Procjena i nadzor za Direktivu EU o učinkovitosti energije za krajnju uporabu i energetske usluge,
- predstavljanje karta mjera, tj. pokazivanje koje mjere su najvažnije za postizanje ciljeva Direktive za energetske učinkovitost.

Neke od inovativnih mjera su [3]:

- tržišno bazirani instrumenti: obveze i izdavanje Bijelih certifikata za nove i postojeće zgrade,
- kućanstva s niskim prihodima (program za manjak goriva, obveza prema kućanstvima s niskim prihodima),
- označavanje auta,
- Bonus-malus sistemi za energetske učinkovite opreme,
- multimedijске reklamne kampanje za više ciljnih skupina (npr. Power one u Irskoj, klima: aktiv u Austriji),
- paketi mjera za energetske intenzivne industrije,
- dobrovoljni dogovori u SMEE i tercijarnim,
- ESCO-i
- mehanizmi financiranja i fondovi (Carbon Trust u UK, Electricity Saving Trust u Danskoj),
- fiskalne mjere (odbitak za ulaganja u energiju u Nizozemskoj),
- javni sektor (program zamjene starih tehnologija, rang održivih domova).

3 INDEKSI I TRENDOVI

Indeks poboljšanja energetske učinkovitosti ODEX sastoji se od agregiranog i tehničkog indeksa. Agregirani indeks promatra utjecaj različitih čimbenika koji utječu na potrošnju energije, ali nisu direktno vezani za energetske učinkovitost poput klimatskih utjecaja, promjena u gospodarskoj i industrijskoj strukturi i promjenama u stilu života (poput povećanja površine kućanstva), dok je tehnički indeks povezan s energetske učinkovitosti.

ODEX indikator je bolji procjenitelj trendova energetske učinkovitosti na skupnoj razini (npr. ukupno gospodarstvo, industrija, domaćinstva, promet, usluge) od uobičajenih energetske intenziteta, jer je rasterećen od strukturnih promjena i ostalih čimbenika nevezanih s energetske učinkovitosti (više uređaja, više automobila ...).

Indeks poboljšanja energetske učinkovitosti ODEX određuje se za pojedine sektore neposredne po-

- presenting detailed information on measure evaluation. This is already a strong point in the MURE database but this type of information might also need further structuring in view of ongoing work on the development of evaluation methodologies such as that being done in the Intelligent Energy for Europe project Evaluation and Monitoring for the EU Directive on Energy End-use Efficiency and Energy Services (EMEEES),
- presenting measure maps, i.e. showing which measures are the most important ones for reaching the targets of the Energy Efficiency Directive.

Some innovative measures are [3]:

- market based instruments: obligation and White certificates Certification of new and existing buildings,
- low income household (fuel poverty scheme, obligation towards low income households),
- car labelling,
- bonus-malus on energy efficient equipments,
- multimedia, multi target advertising campaigns (e.g. Power One in Ireland, Klima: aktiv in Austria),
- packages of measures for energy intensives industries,
- voluntary agreements in SMEEs and tertiary
- ESCOs,
- funding mechanism and funds (Carbon Trust in the UK, Electricity Saving Trust in Denmark),
- fiscal measure (energy investment deduction in the Netherlands).
- public sector (retrofitting program, code of sustainable homes).

3 INDICES AND TRENDS

The index of energy efficiency progress ODEX is comprised of the aggregated and technical index. The aggregated index monitors the influence of various factors which influence energy consumption, but are not directly connected to energy efficiency such as climate influences, changes in economic and industrial structures and changes in lifestyle (such as increase in dwelling size), while the technical index is connected to energy efficiency.

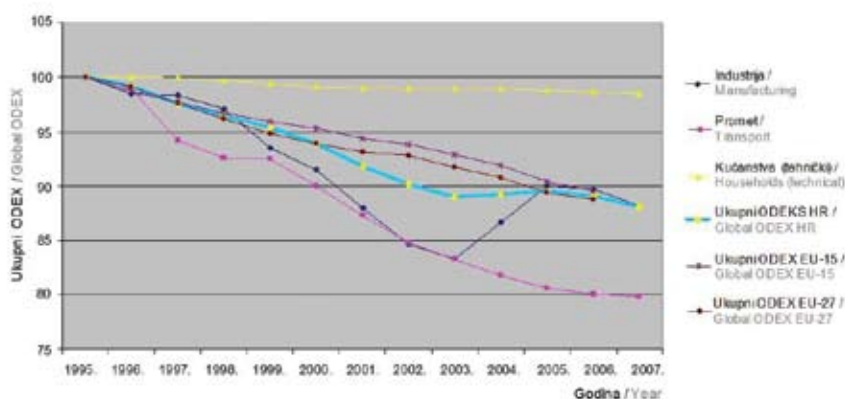
The ODEX-indicator represents a better proxy for assessing energy efficiency trends at an aggregate level (e.g. overall economy, industry, households, transport, services) than the traditional energy intensities, as they are freed from structural changes and as well as other factors not related to energy efficiency (more appliances, more cars...).

trošnje energije (industrija, promet, kućanstva) i za sve finalne potrošače energije promatrane zajedno. Ovaj indeks dobiva se na temelju podataka o promjenama potrošnje energije u pod-sektorima ili prema namjeni potrošnje energije u promatranom vremenskom razdoblju.

Tijekom razdoblja od 1995. do 2007. godine indeks poboljšanja energetske učinkovitosti (ODEX) za neposrednu potrošnju energije u Hrvatskoj smanjio se za 12 %. Ovoj promjeni najviše su pridonijeli sektor industrije (11,8 %) i sektor prometa (20,2 %). Na slici 1 prikazani su indeksi poboljšanja energetske učinkovitosti za pojedine sektore potrošnje i globalni indeks za sve sektore promatrane zajedno. Također su prikazani ukupni indeksi energetske učinkovitosti za sve države u EU-15 i za sve države u EU-27. U državama EU-15 poboljšanje energetske učinkovitosti iznosilo je 10,4 % u razdoblju od 1995. do 2006. godine, odnosno u državama EU-27 to je poboljšanje iznosilo 11,2 %.

The index of energy efficiency progress ODEX is defined for certain sectors of direct energy consumption (industry, transport, households) and for end-use energy consumers monitored as a whole. This index is obtained based on the data on changes in energy consumption in sub sectors or according to the purpose of energy consumption within the monitored timeframe.

During the period from 1995 to 2007, the index of energy efficiency progress (ODEX) for direct energy consumption in Croatia decreased by 12 %. The industry (11,8 %) and transport (20,2 %) sectors contributed most to this change. Figure 1 shows the energy efficiency indices for certain consumption sectors, and a global index for the sectors monitored as a whole. The total energy efficiency indices for all the EU-15 and EU-27 states are also shown. Energy efficiency improvement in the EU-15 states was 10,4 % in the period from 1995 to 2006, and 11,2 % in the EU-27 states.



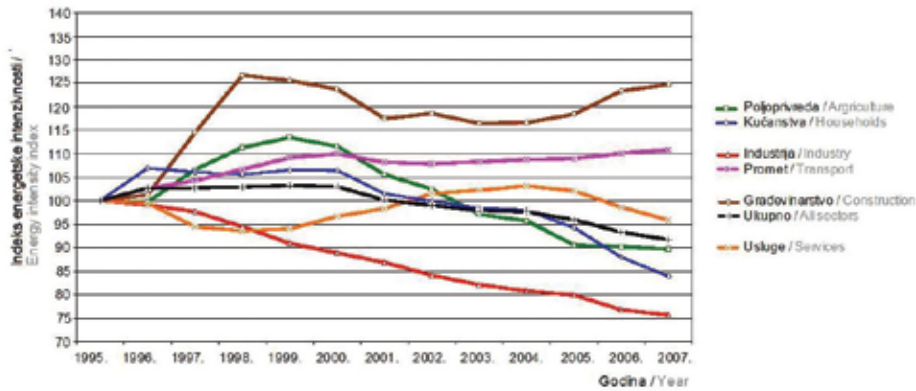
Slika 1 — Indeks poboljšanja energetske učinkovitosti ODEX za sve sektore potrošnje [4]
Figure 1 — Energy efficiency index ODEX for all sectors [4]

Drugi je način prikazivanja učinkovitosti pojedinog sektora potrošnje putem praćenja energetske intenzivnosti, vezane za ekonomske pokazatelje. Energetska intenzivnost prati ukupnu potrošnju energije u pojedinom pod-sektoru te bruto dodanu vrijednost ostvarenu unutar tog pod-sektora (ili ukupni bruto domaći proizvod), a izražava se kao omjer tih vrijednosti u promatranj godini.

Another way of representing the efficiency of a certain consumption sector is by monitoring energy intensity, connected with the economy indicators. Energy intensity monitors the total energy consumption in a certain sub sector, and the Gross Value Added realised within the sub sector (or the total Gross Domestic Product), and is expressed as the ratio of those values in the monitored year.

Za prikaz indeksa energetske intenzivnosti u neposrednoj potrošnji na slici 2, za razdoblje od 1995. do 2007. godine, 1995. godina postavljena je kao referentna. Ti indeksi izražavaju omjer energetske intenzivnosti pojedinog pod-sektora u tekućoj i u referentnoj godini.

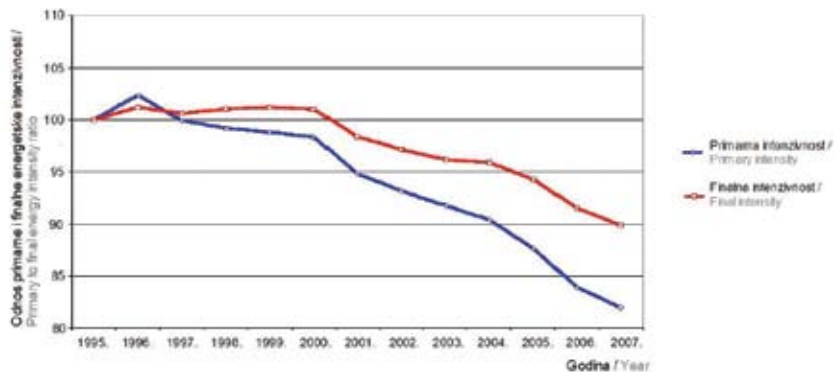
For the overview of the energy intensity index of direct consumption in Figure 2, for the period from 1995 to 2007, the set reference year is 1995. Those indices express the energy intensity ratio of a given sub sector for the current and the reference year.



Slika 2 — Indeksi energetske intenzivnosti u razdoblju od 1995. do 2007. godine [4]
 Figure 2 — Energy intensity indices from 1995 to 2007 [4]

Energetske intenzivnosti mogu se promatrati na razini potrošnje ukupne primarne energije i na razini finalne ili neposredne potrošnje energije. Odnos primarne i finalne energetske intenzivnosti u razdoblju od 1995. do 2007. godine prikazan je na slici 3. I ovdje je kao referentna godina uzeta 1995. te su u odnosu na nju promatrane i primarna i finalna energetska intenzivnost u svim ostalim godinama.

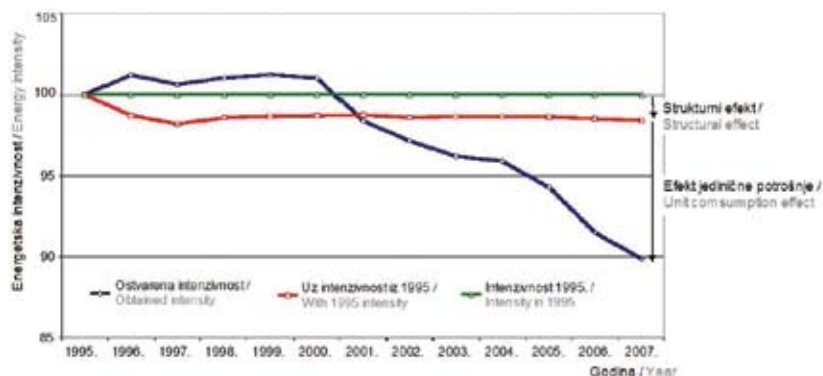
Energy intensities can be monitored on the level of total primary energy consumption and on the level of final or direct energy consumption. The primary and final energy intensity ratio for the period between 1995 and 2007 is shown in Figure 3. The year 1995 was again taken as a reference, so the primary and final energy intensities in all other years have been monitored in reference to it.



Slika 3 — Odnos primarne i finalne energetske intenzivnosti u razdoblju od 1995. do 2007. godine [4]
 Figure 3 — Primary to final energy intensity ratio from 1995 to 2007 [4]

Indeksi energetske intenzivnosti su pokazatelji promjena u korištenju energije po jediničnom proizvodu ili usluzi i promjena uspješnosti u ostvarenju tržišne vrijednosti proizvoda ili usluge, dakle utjecajni su strukturnim efektom i efektom jedinične potrošnje. Pokazatelj energetske intenzivnosti i strukturnog makroekonomskog efekta prikazan je na slici 4.

Energy intensity indices are indicators of changes in energy use by product unit or service, and changes in the successful realisation of the market value of a product or service, therefore they are influenced by the structural effect and the effect of unit consumption. Energy intensity and structural macroeconomic effect indicator is shown in Figure 4.



Slika 4 — Energetska intenzivnost i strukturalni makroekonomski efekat (1995=100) [4]
Figure 4 — Energy intensity and structural macroeconomic effect (1995=100) [4]

Ovdje se uspoređuje ostvarena energetska intenzivnost s intenzivnošću iz 1995. godine, tj. pretpostavljena potrošnja energije u promatranoj godini kakva bi bila postignuta s razinom intenzivnosti iz 1995. godine prema ostvarenom bruto domaćem proizvodu u danoj godini. Time se razlučuje utjecaj strukturalnog efekta, tj. tržišnog pokazatelja, i utjecaj efekta jedinične potrošnje, tj. pokazatelja energetske učinkovitosti.

The realised energy intensity is here compared to the intensity from 1995, i.e. the assumed energy consumption in the monitored year as would have been achieved with the 1995 level of intensity depending on the realised Gross Domestic Product for the given year. This distinguishes the influence of the structural effect, i.e. market indicator, and the influence of the unit consumption effect, i.e. energy efficiency indicators.

4 ENERGETSKA UČINKOVITOST U KUĆANSTVIMA I USLUŽNOM SEKTORU

Specifična potrošnja energije za grijanje po kućanstvu u razdoblju od 1995. do 2007. godine povećavala se (iznimke su 2002. i 2006. godina koje su bile toplije pa je i potrošnja bila manja). Indeks poboljšanja energetske učinkovitosti ODEX u kućanstvima povećan je za oko 10 % za grijanje (s klimatskom korekcijom), odnosno za 19,6 % za toplu vodu, zbog porasta potrošnje energije za grijanje i pripremu tople vode, kao što je prikazano na slici 5. Indeks poboljšanja energetske učinkovitosti za kuhanje smanjio se za 3,8 % u istom razdoblju zbog smanjenja potrošnje energije za kuhanje. Ukupni indeks poboljšanja energetske učinkovitosti ODEX u kućanstvima u razdoblju od 1995. do 2007. godine povećan za 8,8 %, iz čega bi se moglo zaključiti da se energija u kućanstvima troši sve ne učinkovitije. Također je na slici prikazan i tzv. tehnički indeks poboljšanja energetske učinkovitosti u kućanstvima za koji je pretpostavljena konstantna vrijednost tijekom promatranog razdoblja.

Naime, tijekom određenog razdoblja, u ovom slučaju od 1995. do 2007. godine, na razinu potrošnje energije u kućanstvima utječu različiti faktori.

4 ENERGY EFFICIENCY IN HOUSEHOLDS AND THE SERVICE SECTOR

The unit energy consumption for heating per household rose in the period between 1995 and 2007 (exceptions are 2002 and 2006 which were warmer, so consumption was lower). The index of energy efficiency progress ODEX in households has increased by approximately 10 % for heating (with climate correction), or by 19,6 % for hot water, because of the increase in energy consumption for heating and hot water preparation, as shown in figure 5. The index of energy efficiency progress for cooking decreased by 3,8 % in the same period because of the decrease in energy consumption for cooking. The total index of energy efficiency progress ODEX in households for the period from 1995 to 2007 has increased by 8,8 %. From that we can deduce that energy in households is consumed with increased inefficiency. Moreover, the figure shows the so-called technical index of energy efficiency progress in households for which a constant value has been assumed for the duration of the monitoring period.

During a certain time period, in this case from 1995 to 2007, different factors influence the level of

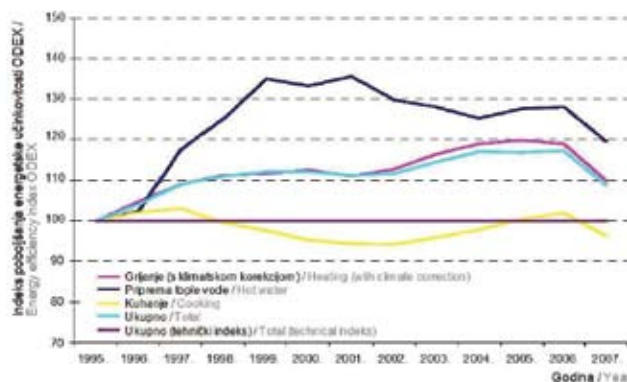
Efikasnije zgrade, efikasniji uređaji za grijanje prostora i efikasniji električni uređaji u kućanstvima doprinose smanjenju potrošnje energije. Na smanjenje potrošnje energije utjecaj mogu imati i procesi supstitucije pojedinih goriva (ugljena, ogrjevnog drva, loživog ulja, ...) s drugim oblicima energije (prirodni plin, daljinsko grijanje, električna energija, ...). S druge strane porast životnog standarda koji, između ostalog, rezultira povećanjem površine stanova, većom grijanom površinom stanova, većom temperaturom u stanovima, većim brojem uređaja u kućanstvima itd., ima za posljedicu povećanje potrošnje energije u kućanstvima. Iz slike 5 je očito da su u Hrvatskoj faktori koji utječu na povećanje potrošnje energije u kućanstvima bili dominantni u odnosu na faktore koji doprinose smanjenju potrošnje.

Iz navedenih razloga, za države u kojima vladaju takve prilike, uvodi se tehnički indeks poboljšanja energetske učinkovitosti, koji pretpostavlja učinkovitost korištenja energije u kućanstvima barem na razini početne godine promatranja, te se koristi u izračunu indeksa energetske učinkovitosti za ukupnu neposrednu potrošnju. Korištenje realnog indeksa učinkovitosti u kućanstvima stvorilo bi u takvim slučajevima potpuno pogrešnu sliku o efikasnosti korištenja finalne energije.

Na slici 6 prikazana je specifična potrošnja uku-

energy consumption in households. More efficient buildings, space heating appliances and electric appliances in households contribute to the decrease in energy consumption. The substitution processes of certain fuels (coal, wood, fuel oil ...) with other forms of energy (natural gas, district heating, electric power ...) can also influence the decrease in energy consumption. On the other hand, the improved standards of living which, among other things, result in the increase of dwelling size, a larger heated surface of dwellings, a higher temperature in dwellings, a higher number of appliances in households, etc., consequentially increase the energy consumption in households. In figure 5 it is obvious that in Croatia the factors which influence the increase of energy consumption in households were dominant in relation to the factors which contribute to the decrease of consumption.

For those reasons, for countries in similar circumstances, a technical index of improvements in energy efficiency is being introduced. It assumes efficiency in energy use in households, at least on the level of the initial monitoring year, and it is used in calculating energy efficiency indices for total direct consumption. The use of the actual efficiency index in households would, in such cases, create a completely inaccurate picture of the efficient use of final energy.



Slika 5 — Indeks poboljšanja energetske učinkovitosti ODEX u kućanstvima [4]
Figure 5 — Energy efficiency index ODEX for households [4]

pne energije po kućanstvu, specifična potrošnja energije za grijanje (s klimatskom korekcijom u jedinicama **ten/kućanstvu**) i specifična potrošnja električne energije (za kućanske uređaje, hlađenje i rasvjetu u jedinicama **kWh/kućanstvu**).

Jedinična potrošnja kućanstava po boravištu najčešći je indikator mjerenja poboljšanja energetske učinkovitosti u stambenim prostorima. Međutim, promjene tog indikatora ne odražavaju samo utjecaj bolje izolacije ili učinkovitijih uređaja, nego i po-

Figure 6 shows the unit consumption of total energy by household, the unit consumption of heating energy (with climate correction in units **toe/household**) and the unit consumption of electric power (for household appliances, air conditioning and lighting in units **kWh/household**).

Unit consumption of households per dwelling is the most usual indicator considered to measure energy efficiency improvements in dwellings. However, changes in this indicator do not only reflect

tiču iz različitih faktora:

- istinskih poboljšanja energetske učinkovitosti (od učinkovitijih zgrada, uređaja za grijanje prostora ili električnih uređaja) s jedne strane,
- te boljeg životnog standarda (veći stambeni prostori, više uređaja, veća udobnost grijanja, itd) s druge,
- zamjene među energijama s različitim učinkovitošću za krajnju uporabu (npr. prijelaz s ugljena na centralno grijanje, struju ili plin).

Jedinična potrošnja za grijanje prostora s klimatskim ispravljanjem povezuje potrošnju energije sektora kućanstava za grijanje prostora s brojem stalno naseljenih stambenih prostora. Jednaka je jediničnoj potrošnji grijanja prostora po stambenom prostoru ili m^2 podijeljeno s brojem stupanj-dana.

Jedinična potrošnja po stambenom prostoru za rasvjetu, klimatizaciju i električne uređaje izračunava se dijeljenjem potrošnje struje za sve uređaje, klima uređaje i rasvjetu, s brojem stalno naseljenih stambenih prostora.

Jedinična potrošnja se mijenja kroz vrijeme pod utjecajem četiri faktora:

- više kućanstava opremljenih sa svim uobičajenim električnim uređajima (faktor ponašanja), tj. porast vlasništva uređaja u kućanstvima,
- promjene u tehnologiji, tj. u energetske učinkovitosti tih uređaja (tehnički faktor),
- promjene u veličini (trend prema manjim kućanstvima) i svojstvima uređaja (više kombiniranih hladnjaka u usporedbi s jednostavnim hladnjacima, TV u boji umjesto crno-bijeloga, itd.), (faktori ponašanja),
- promjene u intenzitetu korištenja, većinom perilica rublja, TV, ali također i zamrzivača ili perilica za suđe (faktori ponašanja).

Prosječni porast specifične potrošnje ukupne energije po kućanstvu u promatranom razdoblju bio je 1,3 %, za grijanje 1,6 % i za netoplinu potrošnju električne energije 2,3 %. Porast potrošnje električne energije za kućanske uređaje, hlađenje i rasvjetu uzrokovan je povećanim brojem kućanskih uređaja i uređaja za hlađenje prostora. Razlozi su povećanja specifične potrošnje energije za grijanje u kućanstvima bolji životni standard i povećanje udjela centralno grijanih kućanstava.

the influence of better insulation or more efficient appliances, but result from different factors:

- genuine energy efficiency improvements, from more efficient buildings, space heating appliances or electrical appliances, on the one hand,
- better living standards (larger dwellings, more appliances, greater comfort of heating, etc), on the other hand,
- substitutions between energies with different end-use efficiencies (e.g. switch from oil or coal to district heating, electricity, or gas).

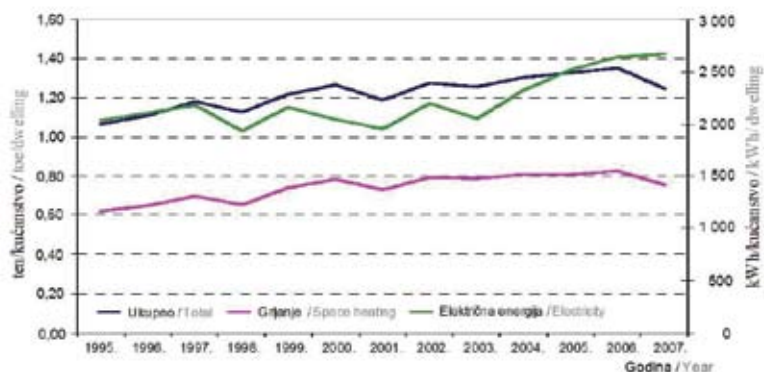
Unit consumption for space heating with climate correction relates the energy consumption of the household sector for space heating to the number of permanently occupied dwellings. It is equal to the unit space heating consumption per dwelling or m^2 divided by the number of degree-days.

This unit consumption per dwelling for lighting, air conditioning and electrical appliances is calculated by dividing the electricity consumption for all appliances, air conditioning and lighting, by the number of permanently occupied dwellings.

This unit consumption is changing over time under the influence of four factors:

- more households equipped with each of the usual electrical appliances (behavioural factor), i.e. increase in the household ownership of appliances,
- changes in the technology, i.e. in the energy efficiency of these appliances (technical factor),
- changes in the size (trend to smaller households) and characteristics of appliances (more combo-refrigerator compared to simple refrigerators, colour instead of black and white TV, etc), (behavioural factors),
- changes in the intensity of use, mainly for washing machines, TV and also for freezers or dish-washers (behavioural factors).

The average increase in unit consumption of total energy by household during the monitored period was 1,3 %, for heating 1,6 %, and for non-thermal consumption of electric power 2,3 %. The increase in electric power consumption for household appliances, air conditioning and lighting was caused by the increase in the number of household appliances and air conditioning units. The reasons for the increase in unit consumption of heating energy in households are the improved standards of living and the increase in the numbers of households with central heating.



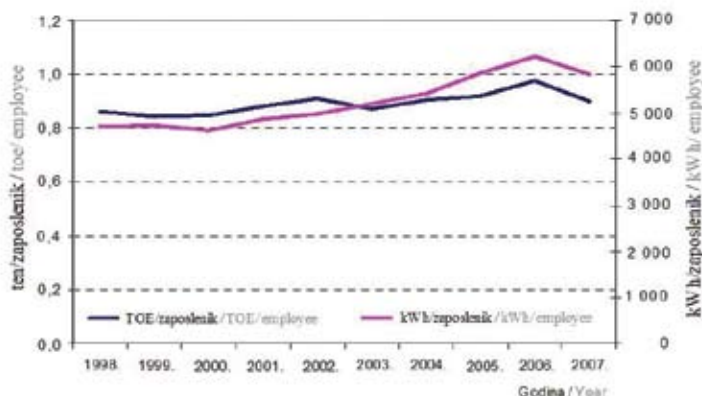
Slika 6 — Specifična potrošnja energije u kućanstvima (ukupna i za grijanje s klimatskom korekcijom (ten/kućanstvu) i potrošnja električne energije za uređaje, hlađenje i rasvjetu (kWh/kućanstvu) [4]
Figure 6 — Unit consumption of households (total and space heating with climate correction (toe/dwelling) and electrical appliances, air conditioning, and lighting (kWh/dwelling) [4]

Na slici 7 prikazana je specifična potrošnja ukupne energije i električne energije po zaposlenom u uslužnom sektoru (u razdoblju od 1998. do 2007. godine). Specifična potrošnja uslužnog sektora izračunava se kao omjer konačne potrošnje energije ili potrošnje struje u sektoru i broja zaposlenih.

Specifična potrošnja ukupne energije po zaposlenom rasla je s prosječnom godišnjom stopom od 0,5 % u razdoblju od 1998. do 2007. godine, dok je specifična potrošnja električne energije po zaposlenom rasla na 2,4 % u istom razdoblju.

Figure 7 shows the unit consumption of total energy and electric power per employee in the service sector (for the period between 1998 and 2007). The unit consumption of the service sector is calculated as the ratio between the final energy consumption or electricity consumption of the sector and the number of employees.

The unit consumption of total energy per employee grew with an average yearly rate of 0,5 % in the period between 1998 and 2007, while the unit consumption of electric power per employee grew by 2,4 % in the same period.



Slika 7 — Specifična potrošnja energije po zaposlenom u uslužnom sektoru (s klimatskom korekcijom) [4]
Figure 7 — Energy consumption per employee in services (with climate correction) [4]

5 ENERGETSKA UČINKOVITOST U INDUSTRIJI

Razvoj potrošnje energije u industriji, odnosno razvoj povećanja učinkovitosti potrošnje energije u industriji prati se i analizira vrlo detaljno. Razlog za to taj što je potrošnja energije u industriji značajna, potrošnja energije ostvaruje se u vrlo različitim industrijskim granama, odnosno za vrlo različite tehnološke procese, a i raspoloživost podataka potrebnih za analizu energetske učinkovitosti relativno je dobra. Primjena modernih tehnoloških procesa u pojedinim industrijskim granama omogućuje postizanje dobrih rezultata u poboljšanju učinkovitog korištenja energije, odnosno značajne uštede energije.

Temeljno polazište za analizu poboljšanja učinkovitosti potrošnje energije u industriji je razvoj strukture i potrošnje energenata u proteklom razdoblju. Potrošnja energije prati se po sljedećim granama industrije:

- Hrana, piće i duhan (NACE 15-16),
- Tekstil, odjeća, koža (NACE 17 + 18 + 19),
- Drvo, drveni proizvodi (NACE 20),
- Papir, celuloza i tiskarski proizvodi (NACE 21 - 22),
- Celuloza i papir (NACE 21),
- Kemikalije (NACE 24),
- Nemetalni minerali (NACE 26),
- Čelik (NACE 27.1 + 27.2 + 27.3 + 27.51+27.52),
- Ne-željezni metali (NACE 27.4+27.53+27.54),
- Strojevi i proizvodi od metala (NACE 28 - 33),
- Obradeni metali (NACE 28),
- Oprema za transport (NACE 34 - 35),
- Ostala proizvodnja (NACE 25+33+36+37),
- Guma i plastika (NACE 25),
- Ne-energetsko rudarstvo (NACE 13 - 14),
- Građevinarstvo (NACE 45).

Osim po navedenim industrijskom granama potrošnja energije prati se i za proizvodnju energetski intenzivnih proizvoda kao što su:

- Cement,
- Staklo (NACE 26.1),
- Aluminij,
- Legure željeza.

Na slici 8 prikazana je razvoj potrošnje energije u pojedinim industrijskim granama. Prosječna godišnja stopa porasta potrošnje energije u prerađivačkoj industriji u razdoblju od 1995. do 2007. godine iznosila je 1,6 %. Porast potrošnje energije ostvaren je u većini industrijskih grana, ali je u industriji željeza i čelika kao i u tekstilnoj industriji došlo do smanjenja potrošnje energije. Trend porasta potrošnje energije u pojedinim industrijskim granama imao je vrlo različit intenzitet pa su se

5 ENERGY EFFICIENCY IN INDUSTRY

The development of energy consumption in industry, or the development of increased efficiency in energy consumption is monitored and analysed in detail. That is because energy consumption in industry is significant. Energy consumption is realised in very diverse industrial sub sectors, that is, for very diverse technological processes, and the availability of data needed for the analysis of energy efficiency is good. The application of modern technological processes in certain industrial sub sectors enables the achievement of good results in the improvement of efficient energy use, and significant energy savings.

The starting point for the analysis of improvements in energy consumption efficiency in industry is the development of energy source structure and consumption in the last period. Energy consumption is monitored in the following industrial sub sectors:

- Food, beverage and tobacco (Nace 15 - 16),
- Textiles, clothing, leather (Nace 17 +18+ 19),
- Wood, wood products (Nace 20),
- Paper, pulp and printing products (Nace 21 - 22),
- Pulp and paper (Nace 21),
- Chemicals (Nace 24),
- Non metallic minerals (Nace 26),
- Steel (Nace 27.1 + 27.2 + 27.3 + 27.51+27.52),
- Non ferrous metals (Nace 27.4+27.53+27.54),
- Machinery and metals products (Nace 28-33),
- Fabricated metals (Nace 28),
- Transport equipment (Nace 34-35),
- Other manufacturing (Nace 25+33+36+37),
- Rubber and plastics (Nace 25),
- Non-energy mining (Nace 13 - 14),
- Construction (Nace 45).

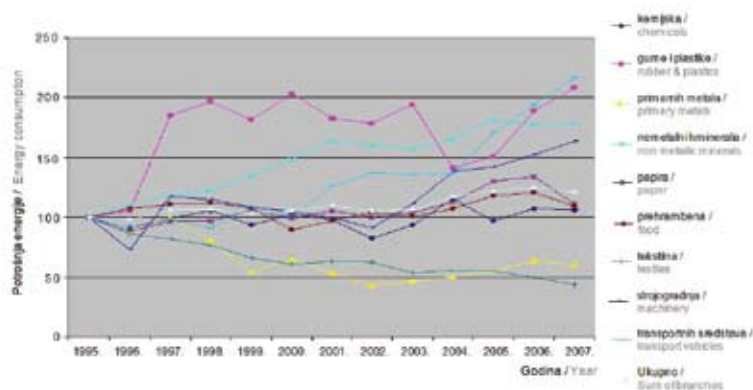
Except in the given industrial sub sectors, energy consumption is also monitored for the manufacture of energy-intensive products such as:

- Cement,
- Glass (Nace 26.1),
- Aluminium,
- Ferroalloys.

Figure 8 shows the development in energy consumption in certain industrial sub sectors. The average yearly growth rate of energy consumption in the processing industry for the period from 1995 to 2007 was 1,6 %. The growth of energy consumption was realised in most industrial sub sectors, but in the iron and steel industries, as well as the textile industry, energy consumption has been reduced. The growth trend of energy consumption in certain industrial sub sectors had a very varied intensity,

tako stope porasta potrošnje energije kretale od 0,5 % za kemijsku industriju, do 6,6 %, koliko je iznosila prosječna godišnja stopa porasta potrošnje energije u industriji transportnih sredstava.

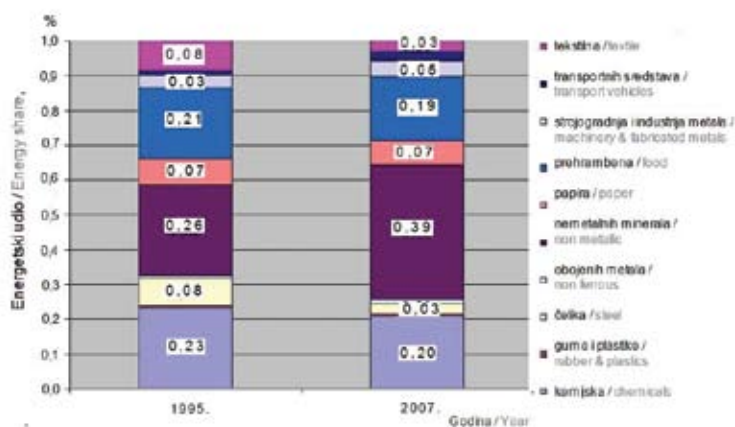
so the growth rates of energy consumption fluctuated from 0,5 % for the chemical industry to 6,6 %, the average yearly growth rate of energy consumption in the transport vehicles industry.



Slika 8 — Potrošnja energije u pojedinim industrijskim granama [5]
Figure 8 — Energy consumption in industry and subsectors [5]

Navedeni razvoj porasta potrošnje energije u pojedinim industrijskim granama imao je za posljedicu značajne strukturne promjene udjela pojedinih industrijskih grana u ukupnoj potrošnji energije u prerađivačkoj industriji. Na slici 9 prikazani su udjeli pojedinih industrijskih grana u početnoj i konačnoj godini promatranog razdoblja.

The consequences of the given growth development of energy consumption in certain industrial sub sectors were significant structural changes of the shares of certain industrial sub sectors in the total energy consumption of the processing industry. Figure 9 shows the shares of certain industrial sub sectors in the starting and final year of the monitored period.



Slika 9 — Udjeli industrijskih grana u ukupnoj potrošnji energije u industriji [5]
Figure 9 — Share of industrial subsectors in total energy consumption in industry [5]

Najveća potrošnja energije u hrvatskoj industriji ostvaruje se u industriji nemetalnih minerala, a udio joj je u promatranom razdoblju povećan od 26 % na 39 %. Vrlo je značajna i kemijska industrija kojoj je udio smanjen od 23 % na 19 % te prehrambena industrija kojoj je udio također smanjen od 21 %

The most significant energy consumption in Croatian industry is realised in the non metallic minerals industry, and its share in the monitored period has increased from 26 % to 39 %. Two other very significant industries are the chemical industry, with its share reduced from 23 % to 19 %, and the

na 19 %. Udjeli ostalih industrijskih grana znatno su manji, a treba još spomenuti industriju papira, strojogradnju i industriju metala, industriju željeza i čelika te tekstilnu industriju. Udio industrije papira nije se promijenio, udio industrije željeza i čelika i tekstilne industrije je smanjen dok je udio strojogradnje i proizvodnje metala povećan.

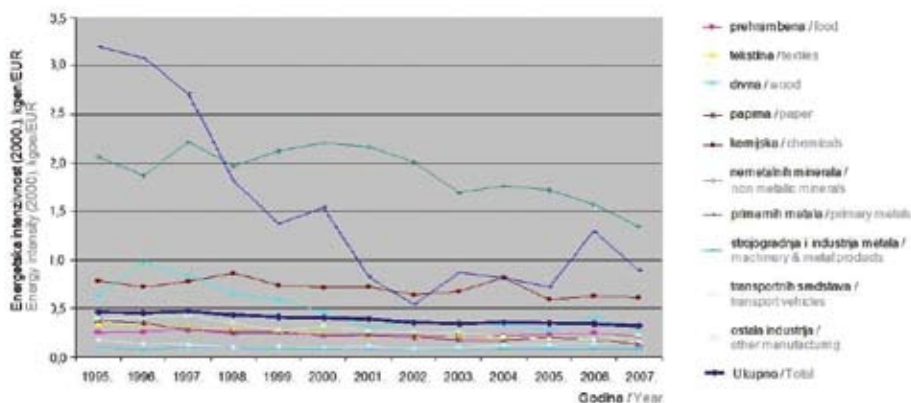
Za određivanje i praćenje razvoja učinkovitosti potrošnje energije u industriji, osim potrošnje energije potrebno je poznavati i druge veličine koje imaju utjecaj ili su povezane razinom potrošnje energije. To su prije svega ostvarena dodana vrijednost u pojedinim industrijskim granama, indeks obujma industrijske proizvodnje te za energetske intenzivne proizvode i njihova fizička proizvodnja.

Dodana vrijednost i indeks obujma industrijske proizvodnje prati se po onim istim industrijskim granama po kojima se prati i potrošnja energije. Ako se u odnos stavi ostvarena potrošnja energije u pojedinim industrijskim granama i pripadajuća dodana vrijednost određena je energetska intenzivnost koja pokazuje koliko je potrebno utrošiti energije da bi se ostvarila jedinica dodane vrijednosti. Razvoj energetske intenzivnosti u pojedinim industrijskim granama prikazan je na slici 10. Može se uočiti trend smanjenja energetske intenzivnosti u svim industrijskim granama pa se tako ukupna intenzivnost u promatranom razdoblju smanjivala s prosječnom godišnjom stopom od 3 %. Odnosno energetska intenzivnost prerađivačke industrije u 2007. godini bila je manja za 30,7 % u odnosu na energetska intenzivnost u 1995. godini, što znači da je za toliko manje trebalo utrošiti i energije za ostvarenje jedinice dodane vrijednosti. Međutim, energetska intenzivnost nije najbolji pokazatelj učinkovitosti korištenja energije u industriji, jer različite industrijske grane imaju vrlo različitu razinu energetske intenzivnosti tako da je na kre-

food industry, whose share has also been reduced from 21 % to 19 %. The shares of other industrial sub sectors are significantly smaller, and we have yet to mention the paper industry, the engineering and metal industry, the industry of iron and steel, and the textile industry. The share of the paper industry remains unchanged, the share of the industry of iron and steel, and the textile industry has been reduced, while the share of the engineering and metal industry has increased.

To determine and monitor the development of efficiency in energy consumption in industry, other values must be known, apart from energy consumption, which influence or are connected with the level of energy consumption. They are above all: the realised added value in certain industrial sub sectors, the volume index of industrial production and, for energy intensive products, their physical manufacturing.

The added value and the volume index of industrial production are monitored in the same industrial sub sectors as energy consumption. If we compare the realised energy consumption in certain industrial sub sectors with the related added value, we will determine the energy intensity which shows how much energy must be spent to realise a unit of added value. The development of energy intensities in certain industrial sub sectors is shown in figure 10. We can notice the decreasing trend in energy intensity in all industrial sub sectors because the total intensity in the monitored period decreased by an average yearly rate of 3 %. That is to say, the energy intensity of the processing industry in 2007 was 30,7 % lower in relation to the energy intensity in 1995, which means that that much less energy needed to be spent to produce a unit of added value. However, energy intensity is not the best indicator of the efficiency of energy use in industry because



Slika 10 — Energetska intenzivnost u industrijskim granama [5]
Figure 10 — Energy Intensity in industrial subsectors [5]

tanje ukupne intenzivnosti značajan utjecaj ima promjena strukture industrijskih grana. Dodatni problem predstavlja još i izračun dodane vrijednosti primjenom pariteta kupovne moći.

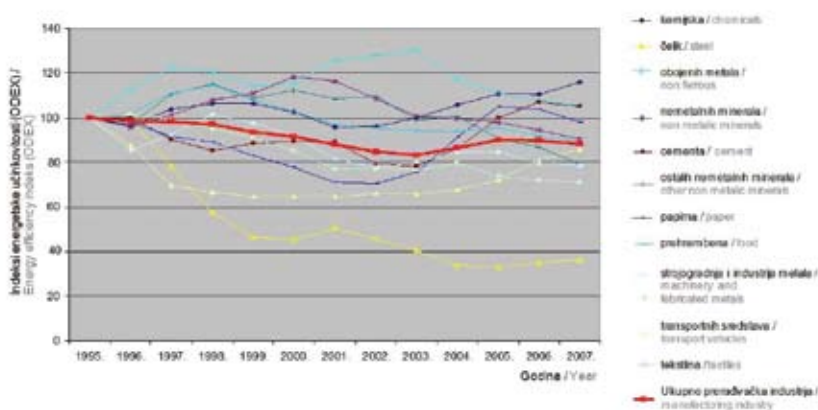
Da bi se izbjegao utjecaj strukturnog efekta, odnosno da se odredi što je moguće realniji pokazatelj razvoja učinkovitosti potrošnje energije u industriji, koji bi se mogao uspoređivati s drugim sektorima, odnosno i s drugim područjima razvijen je tzv. indeks energetske učinkovitosti ODEX. Za svaku industrijsku granu određuje se jedinična potrošnja energije te se takva jedinična potrošnja svodi na indeks pri čemu se u referentnoj godini (1995.) indeks stavlja jednak 100. Prednost ovakvog pristupa je u tome što se jedinične potrošnje mogu izražavati u različitim jedinicama nakon čega se pretvaraju u indekse. Na slici 11 prikazan je razvoj indeksa energetske učinkovitosti u pojedinim granama industrije i u ukupnoj prerađivačkoj industriji. Za industriju željeza i čelika, industriju cementa i industriju papira jedinična potrošnja energije određena je po jedinici proizvoda, tj. po kilogramu proizvedenog čelika, cementa i papira. Za sve ostale industrijske grane jedinična potrošnja energije određena je u odnosu na indeks fizičkog obujma proizvodnje u pojedinim industrijskim granama. Ukupni agregirani indeks energetske učinkovitosti za prerađivačku industriju određen je na temelju indeksa pojedinih industrijskih grana i težinskih faktora koji predstavljaju udjele pojedinih grana industrije u ukupnoj potrošnji energije u prerađivačkoj industriji.

Iz rezultata prikazanih na slici 11 proizlazi da je poboljšanje energetske učinkovitosti u prerađivačkoj industriji Hrvatske, u razdoblju od 1995. do 2007. godine iznosilo 11,2 %. Drugim riječima, poboljšanje energetske učinkovitosti u industriji

different industrial sub sectors have a very different level of energy intensity, so the change of structure of industrial sub sectors significantly influences the flow of total intensity. The calculation of added value by applying purchasing power parities presents an additional problem.

The so-called index of energy efficiency ODEX was developed to avoid the influence of the structural effect, and for the indicator of the development of efficiency in energy consumption in industry to be as realistic as possible in order to be comparable with other sectors or other areas. A unit consumption of energy is determined for each industrial sub sector, and such unit consumption is reduced to an index, whereat the reference year (1995) index is equalled to 100. The advantage of such an approach is in expressing the unit consumptions in different units, after which they are turned into indices. Figure 11 shows the development of the energy efficiency index in certain industrial sub sectors and in the whole processing industry. For the iron and steel industry, the cement industry and the paper industry, the unit consumption of energy was determined per product unit, i.e. by kilogram of manufactured steel, cement and paper. For all other industrial sub sectors, the unit consumption of energy was determined in relation to the index of the physical volume of production in certain industrial sub sectors. The total aggregated energy efficiency index for the processing industry was determined on the basis of indices from certain industrial sub sectors, and weight factors representing the shares of certain industrial sub sectors in the total energy consumption for the processing industry.

From the results shown in figure 11, it follows that the improvement of energy efficiency in the Croatian processing industry, for the period from 1995 to 2007, amounted to 11,2 %. In other words, the



Slika 11 — Indeksi energetske učinkovitosti (ODEX) u industriji [5]
Figure 11 — Energy efficiency index (ODEX) in industry [5]

u promatranom razdoblju odvijalo se s prosječnom godišnjom stopom od 1,05 %. Na temelju određenog ODEX-a za prerađivačku industriju također je moguće izravno odrediti uštedu energije koja je rezultat učinkovitijeg korištenja.

6 ENERGETSKA UČINKOVITOST U PROMETU

Sektor prometa je u pogledu energetske učinkovitosti vrlo specifičan s obzirom na tekuće gorivo kao primarni energent, uz električnu energiju u uglavnom željezničkom i javnom gradskom prometu te uz ukapljeni plin u cestovnom prometu. Potencijali učinkovitosti ovog sektora su uglavnom u većem iskorištenju kapaciteta, što učinkovitijim motorima i vozilima te kod odgovarajućeg režima vožnje. U ovom sektoru je u 2007. godini zabilježen porast potrošnje energije od 7,2 %, no energetska intenzivnost je zadržala istu razinu.

Osnovni pokazatelj energetske učinkovitosti u prometu je svakako struktura pojedinih oblika prijevoza pa je, primjerice, veći udio prijevoza tereta željeznicom pokazatelj višeg stupnja energetske učinkovitosti u prijevozu tereta.

Struktura tona kilometara u prijevozu tereta (slika 12) pokazuje da je u Hrvatskoj primaran cestovni prijevoz, iako je sama struktura pojedinih oblika prijevoza još uvijek povoljnija u odnosu na EU-27 [6].

Potrebno je naznačiti da je iz promatranja izuzet pomorski i obalni prijevoz koji daje donekle iskrivljenu sliku jer zbog velike prijeđene udaljenosti u međunarodnom brodskom prijevozu dolazi do velikog udjela tona kilometara.

I u strukturi putničkih kilometara (procjena za cestovni prijevoz osobnim vozilima u Hrvatskoj na temelju broja registriranih osobnih vozila, prosječne godišnje prijeđene udaljenosti i prosječne popunjenosti vozila) (slika 13), sukladno očekivanjima, prevladava cestovni prijevoz osobnim vozilima [7].

Udio cestovnog prijevoza osobnim vozilima je nešto viši nego u slučaju EU-27, ali na račun nižeg udjela zračnog prijevoza u odnosu na EU-27. Nadalje, udio javnog gradskog prijevoza je nešto viši u EU-27, dijelom i zbog udjela novih zemalja članica u kojima je zbog povijesnih razloga udio javnog gradskog prijevoza tradicionalno bio viši nego u zemljama članicama EU-15 (iako je u navedenim zemljama u posljednjih nekoliko godina također iskazan izuzetno snažan porast broja osobnih vozila i porast udjela kamionskog prijevoza).

improvement of energy efficiency in industry during the monitored period took place at an average yearly rate of 1,05 %. Based on a certain ODEX for the processing industry, it is also possible to directly determine the energy savings which will result from more efficient use.

6 ENERGY EFFICIENCY IN TRANSPORT

The transport sector is very specific concerning energy efficiency because liquid fuel is the primary energy source, with electric power mostly in railway and public city transport, and liquid gas in road transport. The efficiency potentials of this sector lie mostly in the greater usage of capacities, more efficient engines and vehicles, and a suitable driving mode. This sector has recorded an energy consumption increase of 7,2 % in 2007, but energy intensity maintained the same level.

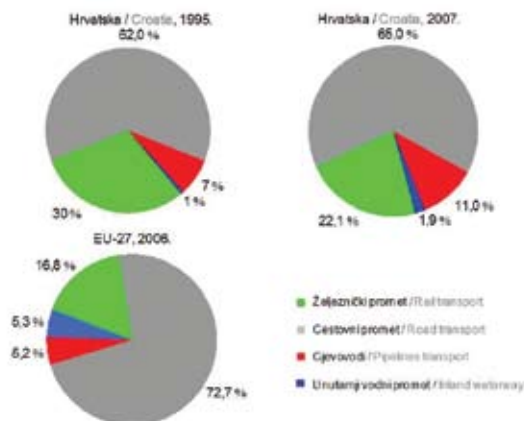
The basic indicator of energy efficiency in transport is surely the structure of certain modes of transport so, for example, a bigger share of railway cargo transport is an indicator of a higher level of energy efficiency in cargo transport.

The structure of tonne kilometres in cargo transport (Figure 12) shows that road transport is primary in Croatia, although the structure of certain modes of transport is still more favourable than in the EU-27 [6].

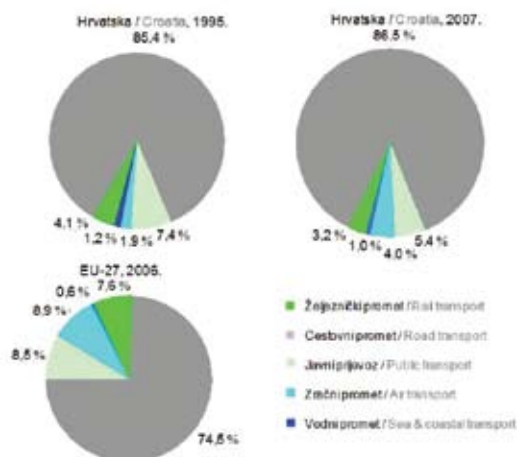
It is necessary to note that maritime and coastal transport has been omitted from the monitoring because it somewhat distorts the picture with the great distances covered in international naval transport which gives a large share of tonne kilometres.

In the structure of passenger kilometres (evaluation for the road transport of personal vehicles in Croatia based on the number of registered personal vehicles, the average yearly distance travelled, and the average vehicle occupancy) (Figure 13), as expected, road transport in personal vehicles also prevails [7].

The share of road transport in personal vehicles is somewhat higher than in the EU-27, but on account of the lower share of air transport in comparison to the EU-27. Furthermore, the share of public city transport is somewhat higher in the EU-27, partly because of the shares of the new Member States, in which the share of public city transport was, for historical reasons, traditionally higher than in the EU-15 states (although in the past several years, an extremely strong increase in the number of personal vehicles and the increase of shares of truck transport has occurred in the said countries).



Slika 12 — Struktura tona kilometara u transportu tereta u Hrvatskoj 2007. i EU-27 2006. [6]
 Figure 12 — The structure of tonne kilometres in cargo transport in Croatia in 2007 and EU-27 in 2006 [6]



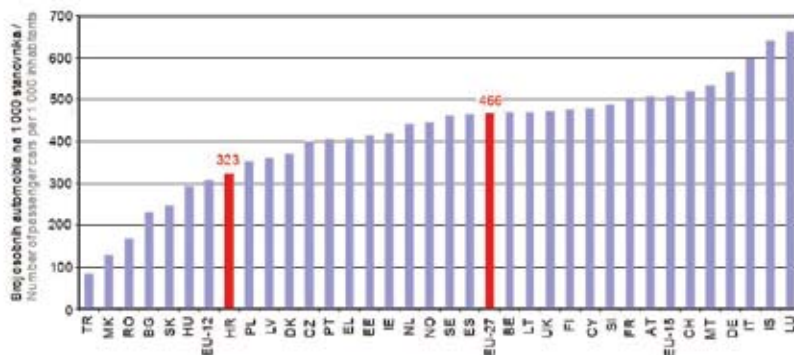
Slika 13 — Struktura putničkih kilometara u prijevozu putnika u Hrvatskoj 2007. godine i EU-27 2006. [7]
 Figure 13 — The structure of passenger kilometres in passenger transport in Croatia in 2007 and EU-27 in 2006 [7]

U razdoblju od 1995. godine do 2007. godine zabilježeno je u Hrvatskoj gotovo konstantno povećanje broja svih vozila s prosječnom godišnjom stopom rasta od 5,7% (slika 14). Broj registriranih osobnih vozila u 1995. godini iznosio je 817 229, dok je krajem 2007. godine dostigao brojku od 1 500 585 (što predstavlja približno 323 osobnih vozila na 1 000 stanovnika, odnosno približno svaki treći stanovnik Hrvatske posjeduje osobno vozilo).

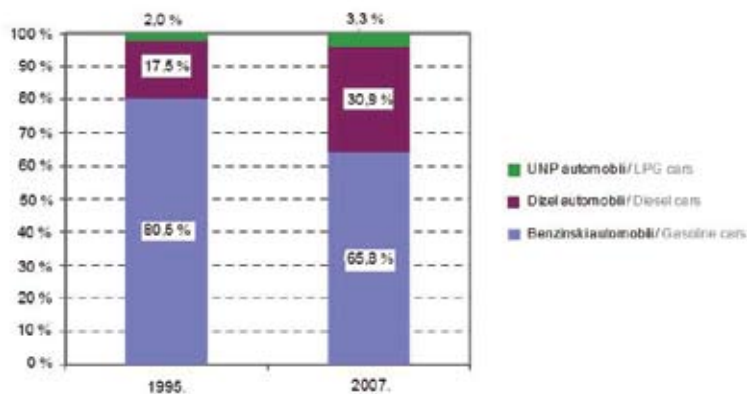
U Hrvatskoj je u promatranom razdoblju (1995. do 2007. godine) ostvareno značajno povećanje udjela dizel automobila u ukupnom broju osobnih vozila, pri čemu se zadržava daljnji pozitivan trend (ukupno povećanje broja dizel automobila iznosilo je čak 219%). U strukturi ukupnog broja osobnih vozila (slika 15), udio benzinskih automobila smanjio se s 80,5% u 1995. godini na 65,8% u 2007. godini, dok je u tom istom razdoblju udio dizel automobila porastao sa 17,5% na 30,9%. Udio vozila s

In the period between 1995 and 2007 a near constant increase in the numbers of all vehicles was recorded in Croatia, with an average yearly growth rate of 5,7% (Figure 14). The number of registered personal vehicles in 1995 was 817 229, while it reached the number of 1 500 585 by the end of 2007 (which is nearly 323 personal vehicles per 1 000 inhabitants, or nearly every third resident of Croatia owns a personal vehicle).

A significant increase in the share of diesel cars in the total number of personal vehicles was realised in Croatia in the monitored period (1995 to 2007), and the positive trend continues (the total increase of the number of diesel cars was an impressive 219%). In the structure of the total number of personal vehicles (Figure 15), the share of gasoline cars decreased from 80,5% in 1995 to 65,8% 2007, while in the same period the share of diesel cars grew from 17,5% to 30,9%. The share of Liquefied



Slika 14 — Broj osobnih vozila na 1 000 stanovnika u pojedinim zemljama Europe 2006. godine [8]
 Figure 14 — Number of personal vehicles per 1 000 inhabitants in European countries in 2006 [8]



Slika 15 — Struktura osobnih vozila prema vrsti pogonskog goriva [8]
 Figure 15 — Personal vehicles structure per fuel type [8]

pogonom na ukapljeni naftni plin (UNP) porastao je s 2,0 % u 1995. godini na 3,3 % u 2007. godini te se ukupan broj UNP vozila procjenjuje na oko 61 000 [8].

U strukturi dizel automobila, najveći udio tijekom promatranog razdoblja zauzimaju vozila u kategoriji od 1,3 litre do 2 litre, unatoč najbrže rastućoj kategoriji dizel vozila zapremine motora iznad 2,0 litre. Glavinu strukture benzinskih otto automobila također čine oni iz kategorije 1,3 litre do 2,0 litre zapremine motora, što predstavlja ujedno najbrže rastuću kategoriju ovih automobila.

Navedena struktura upućuje na evidentne promjene u navikama kupaca u pogledu potrebe za sve većim i jačim vozilima, dok se istovremeno relativno dobro udovoljavaju kriteriji nabave energetski učinkovitijih vozila, kroz sve veći udio dizelskih automobila. Mehanizam pozitivne strukturalne promjene utemeljen je isključivo na tržišnim principima i to preko povoljnije cijene dizelskog goriva

petroleum gas (LPG) fuelled vehicles grew from 2,0 % in 1995 to 3,3 % in 2007, and the total number of LPG vehicles is estimated at around 61 000 [8].

In the structure of diesel cars, vehicles in the 1,3 litre to 2,0 litre category had the biggest share in the monitored period, despite the fastest growing category of diesel vehicles being the ones with a cubic capacity of over 2,0 litres. The majority of the structure of gasoline otto cars is also comprised by those from the 1,3 litre to 2,0 litre cubic capacity category, which is also the fastest growing category for these cars.

The said structure points to obvious changes in customer habits and their need for bigger and more powerful vehicles, while at the same time the criteria for the procurement of more energy efficient vehicles are relatively well met through an increasing share of diesel cars. The mechanism of positive structural change is based exclusively on market principles through a favourable price of

tijekom promatrano razdoblja, dakle bez posebnih poticajnih mjera.

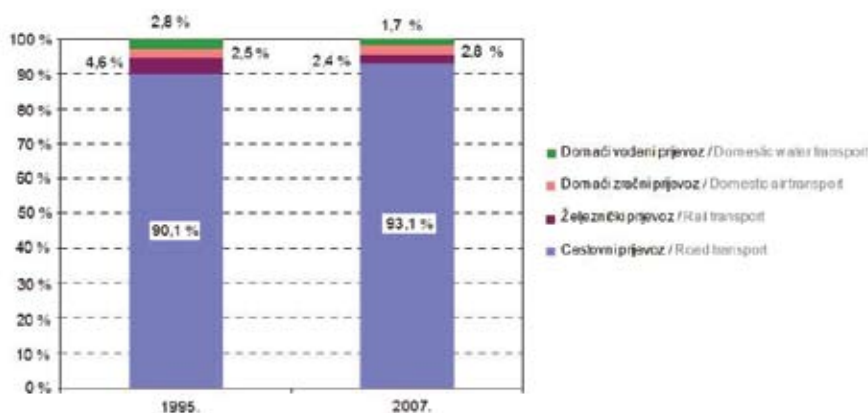
Ukupna potrošnja energije u prometu u 1995. godini (slika 16) iznosila je 1,121 Mten, a u 2007. godini taj je iznos porastao na 2,192 Mten. Time je ostvaren ukupan porast potrošnje od 95 % u promatranom razdoblju s prosječnim godišnjim povećanjem od 5,2 %.

U cestovnom prijevozu je u 1995. godini ostvareno 90,1 % od ukupne potrošnje energije u prometnom sektoru, dok je taj udio u 2007. godini porastao na 93,1 %. Također je porastao udio potrošnje goriva u domaćem zračnom prijevozu s 2,5 % na 2,8 %. Istovremeno se potrošnja energije smanjivala u željezničkom prijevozu s 4,6 % na 2,4 % te u domaćem vodenom prijevozu s 2,8 % na 1,7 %.

diesel fuel during the monitored period, therefore without special incentive measures.

Total energy consumption in transport in 1995 (Figure 16) was 1,121 Mtoen, and in 2007 the number grew to 2,192 Mtoe. That realised the total increase of consumption of 95 % in the monitored period with an average yearly growth of 5,2 %.

Road transport realised 90,1 % of total energy consumption of the transport sector in 1995, while that share grew to 93,1 % in 2007. The consumption share of fuel for domestic air transport also grew from 2,5 % to 2,8 %. Contemporaneously, energy consumption in railroad transport decreased from 4,6 % to 2,4 %, and in domestic water transport from 2,8 % to 1,7 %.



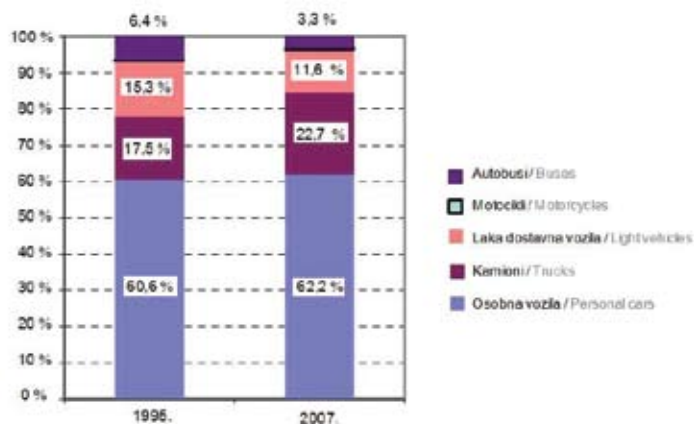
Slika 16 — Struktura ukupne potrošnje goriva po pojedinom obliku prijevoza [5]
Figure 16 — The structure of total fuel consumption per mode of transport [5]

U ukupnoj potrošnji energije cestovnog prijevoza (slika 17), porastao je udio potrošnje osobnih vozila s 60,6 % u 1995. godini na 62,2 % u 2007. godini, kao i udio potrošnje kamiona koji je porastao sa 17,5 % u 1995. godini na 22,7 % u 2007. godini. Smanjenje udjela u ukupnoj potrošnji cestovnog prijevoza zabilježeno je u kategoriji autobusa sa 6,4 % na 3,3 % te lakih dostavnih vozila s 15,3 % na 11,6 %.

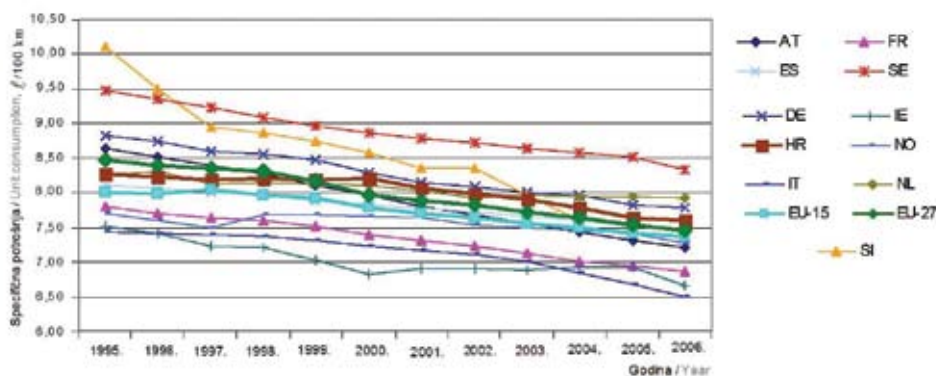
Specifična potrošnja osobnih vozila u Hrvatskoj (slika 18) sustavno se smanjivala tijekom promatranog razdoblja (1995. do 2007. godine) s prosječnom godišnjom stopom od 0,89 %, dok je u slučaju EU-15 iznosila 0,76 % godišnje, a u EU-27 čak 1,17 % godišnje [5]. Glavni pokretač tog pozitivnog trenda je sustavna zamjena postojećeg voznog parka s novim i tehnološko naprednijim vozilima čija je prosječna godišnja stopa nabave u Hrvatskoj (1995. do 2007. godine) iznosila 15,4 %.

In the total road transport energy consumption (Figure 17), the share of personal vehicle consumption rose from 60,6 % in 1995 to 62,2 % in 2007, as did the share of truck consumption from 17,5 % in 1995 to 22,7 % in 2007. The reduction of shares in total road transport consumption has been recorded in the category of busses from 6,4 % to 3,3 %, and light delivery vehicles from 15,3 % to 11,6 %.

Unit consumption of personal vehicles in Croatia (Figure 18) systematically decreased during the monitored period (1995 to 2007) by an average yearly rate of 0,89 %, while in the case of the EU-15 it amounted to 0,76 % per year, and in the EU-27 even 1,17 % per year [5]. The main instigator of the positive trend was the systematic replacement of the existing vehicle fleets with new and technologically more advanced vehicles whose average yearly rate of procurement in Croatia (1995 to 2007) was 15,4 %.



Slika 17 — Struktura ukupne potrošnje goriva po vrsti vozila u cestovnom prijevozu [5]
Figure 17 — The structure of total fuel consumption per vehicle type in road transport [5]



Slika 18 — Specifična potrošnja osobnih vozila [5]
Figure 18 — Unit consumption of personal vehicles [5]

Struktura i zastupljenost pojedinih transportnih oblika (kamioni, vlakovi, brodovi, avioni) u prijevozu tereta uvelike utječe na finalnu energetska učinkovitost teretnog transporta.

Tako zemlje poput Italije, Njemačke, Poljske, Austrije, itd. u kojima u prijevozu tereta dominira željeznički prijevoz, kao najučinkovitiji kopneni oblik transporta, imaju znatno nižu ukupnu specifičnu potrošnju energije po ostvarenom tona kilometru. Ukupnoj učinkovitosti prometnog sustava također doprinosi zastupljenost pojedine kategorije kamiona. Naime, veća zastupljenost kamiona većih i najvećih nosivosti (kategorije iznad 7,5 tona nosivosti) znatno utječe na ukupno povećanje učinkovitosti u prijevozu tereta.

Unatoč dominantnoj zastupljenosti manjih dostavnih vozila u kategoriji < 3,5 t nosivosti (78 % u ukupnom broju registriranih teretnih vozila u Hrvatskoj u 2007. godini), učinkovitost teretnog prometa Hrvatske u posljednjih se nekoliko godina pribli-

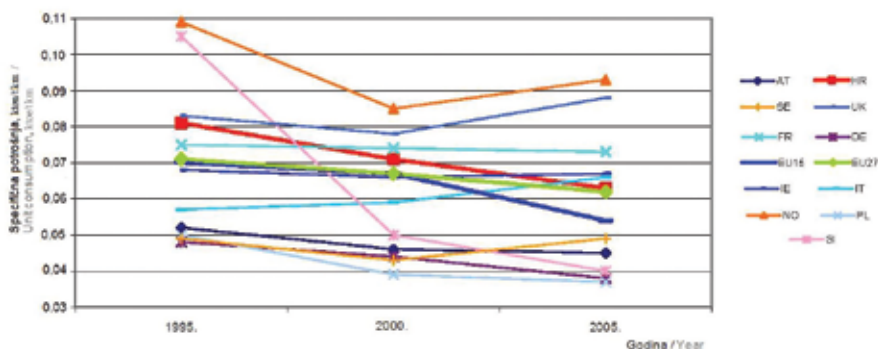
The structure and presence of certain modes of transport (trucks, trains, ships, airplanes) in cargo transport greatly influences the final energy efficiency of cargo transport.

Therefore, countries like Italy, Germany, Poland, Austria, etc., where railway transport dominates in cargo transport as the most efficient form of land transport, have a significantly lower total unit consumption of energy per realised tonne kilometre. The presence of a certain truck category also contributes to the total efficiency of the transport system. Namely, an extensive presence of trucks of large and largest bearing capacities (categories above 7,5 tonnes of bearing capacity) significantly influences the total increase in cargo transport efficiency.

Despite the dominant presence of smaller delivery vehicles in the category < 3,5 tonnes of bearing capacity (78 % of the total number of registered cargo vehicles in Croatia in 2007), the efficiency of

žila prosjeku zemalja članica EU-27 s 0,063 kilotona ekvivalentne nafte po toni tereta i kilometru (0,063 kten/t km) (slika 19).

cargo transport of Croatia has neared the average of the EU-27 Member Countries in the last several years with 0,063 ktoe/tonne kilometre of cargo (0,063 kteo/t km) (Figure 19).



Slika 19 — Specifična potrošnja ukupnog cestovnog teretnog prijevoza [5]

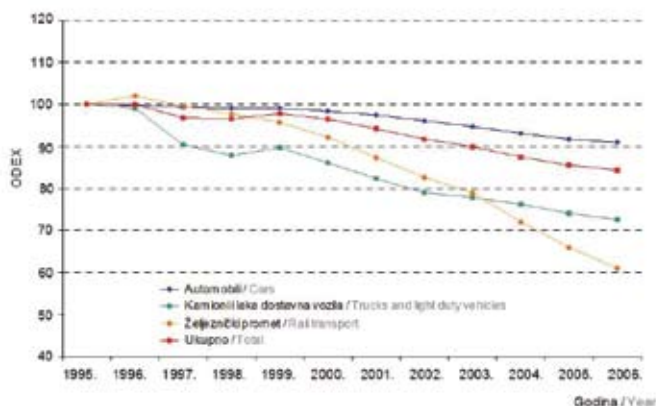
Figure 19 — Unit consumption of total road cargo transport [5]

U razdoblju od 1995. do 2007. godine indeks energetske učinkovitosti (ODEX) za cjelokupan prometni sektor (slika 20) smanjio se za 16,4 %. Najveći napredak ostvaren je u sektoru željezničkog prometa i to poglavito u putničkom prometu zbog vrlo intenzivnog povećanja stupnja popunjenosti, čemu je znatno pridonijelo gotovo dvostruko poskupljenje goriva u promatranom razdoblju (odluka putnika o prelasku na jeftiniji oblik prijevoza). U cestovnom prometu ostvarena je najveća učinkovitost u kategoriji kamiona i lakih dostavnih vozila te je iznosila 28,2 %, dok se u kategoriji osobnih vozila ODEX smanjio za 9,7 %. Argument koji ide u prilog relativno velikom ostvarenju energetske učinkovitosti u kategoriji teretnih vozila jest činjenica da upravo taj sektor bilježi najveće stope rasta u pogledu novo nabavljenih, tehnološki naprednijih vozila (prosječna godišnja stopa rasta u iznosu od 6,1 %).

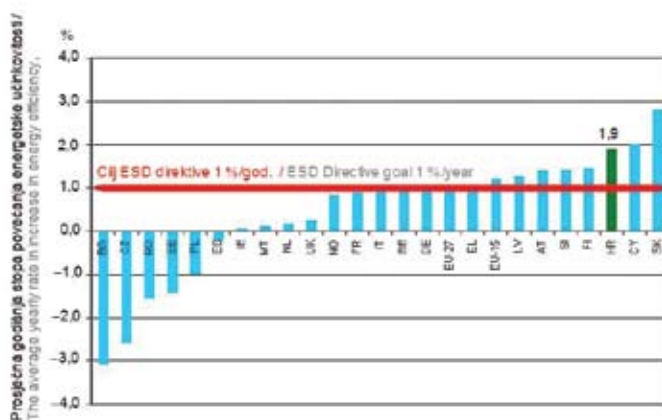
U razdoblju od 2000. do 2006. godine, prosječna godišnja stopa ostvarene energetske učinkovitosti u prometnom sektoru Hrvatske (slika 21) iznosila je 1,9 % godišnje. Ostvarena učinkovitost gotovo je dvostruko veća od minimalno deklarirane godišnje stope energetske učinkovitosti na razini ukupne potrošnje koja bi prema Direktivi o energetske učinkovitosti i energetske uslugama (2006/32/EC), u razdoblju od 2009. do 2016. godine trebala iznositi 1 % godišnje u svim zemljama članicama EU-a.

In the period from 1995 to 2007 the energy efficiency index (ODEX) for the entire transport sector decreased by 16,4 % (Figure 20). The largest progress has been made in the railway transport sector and mainly in passenger transport because of a very intensive increase in the degree of occupancy. A significant contribution to that effect is the near doubling of fuel prices in the monitored period (passenger decision of transferring to the cheaper mode of transport). The largest efficiency in road traffic has been realised in the category of trucks and light delivery vehicles, and it amounted to 28,2 % t, while in the category of personal vehicles ODEX decreased by 9,7 %. The argument which favours the relatively large realisation of energy efficiency in the category of cargo vehicles is the fact that it is a sector which records the largest growth rates in newly acquired, and technologically more advanced vehicles (the average yearly growth rate being 6,1 %).

In the period from 2000 to 2006, the average yearly rate of realised energy efficiency in the transport sector of Croatia was 1,9 % per year (Figure 21). The realised efficiency is almost double from the minimally declared yearly energy efficiency rate on the level of total consumption which should, according to the Directive for Energy Efficiency and Energy Services (2006/32/EC), be 1 % per year in all EU Member States for the period between 2009 and 2016.



Slika 20 — Indeks poboljšanja energetske učinkovitosti ODEX u prometnom sektoru Hrvatske [1]
 Figure 20 — Index of energy efficiency progress ODEX in the transport sector of Croatia [1]



Slika 21 — Prosječna godišnja stopa povećanja energetske učinkovitosti u prometu u razdoblju od 2000. do 2006. [10]
 Figure 21 — The average yearly rate of increase in energy efficiency in transport for the period between 2000 and 2006 [10]

8 ZAKLJUČAK

Indikatori poput onih razvijenih u ODYSSEE bazi podataka sada se koriste kao mjerila, na razini država i na međunarodnoj razini, jer omogućavaju praćenje trendova energetske učinkovitosti među zemljama. Nekoliko međunarodnih organizacija, a posebice Europska komisija, sve ih češće koriste kao mjerilo.

Indeksi energetske učinkovitosti (ODEX indikatori) su najnovija vrsta indikatora uvedenih u ODYSSEE i vrlo su inovativne prirode u usporedbi sa sličnim indeksima. Grupiraju trendove iz različitih jedinica potrošnje po pod-sektoru ili krajnjoj uporabi u jedan indeks po sektoru, temeljeno na težini svakog pod-sektora/krajnje uporabe u ukupnoj potrošnji energije sektora.

8 CONCLUSION

Indicators such as those developed in the ODYSSEE database are now used as a reference, both at the level of countries and at the international level, as they make it possible to monitor trends in energy efficiency in a harmonised way among countries. In particular, they are increasingly used as a reference by the European Commission as well as several international organisations.

Energy efficiency indices (ODEX indicators) are the most recent type of indicator that has been introduced into ODYSSEE and are quite innovative in nature compared to similar indices. They aggregate trends in the different unit consumptions by sub-sector or end-use into one index by sector based on the weight of each sub-sector/end-use in the total energy consumption of the sector.

MURE baza podataka pruža pregled najvažnijih mjera energetske učinkovitosti po sektorima, kao i presjek smjernica o energetske učinkovitosti za svaku od zemalja članica EU-27 te Norvešku i Hrvatsku. Baza podataka usredotočuje se na stranu potražnje mjera energetske učinkovitosti, koja će utjecati na sljedeće desetljeće. Baza podataka isključuje dugotrajne mjere istraživanja i razvoja, mjere poboljšanja učinkovitosti opskrbe i mjere usredotočene na smanjenje stakleničkih plinova općenito, mjere koje nisu izravno povezane s energetske učinkovitošću.

The MURE database provides an overview of the most important energy efficiency measures by sector as well as of cross-cutting energy efficiency policies for each of the EU-27 Member States, Norway and Croatia. The database focuses on the demand side of energy efficiency measures which will have an impact in the coming decade. The database excludes long-term R&D measures, measures to improve supply-side efficiency and measures focusing on greenhouse gas reduction in general and these are not directly linked to energy efficiency.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] Definition of Energy Efficiency Indicators in ODYSSEE Database, Training Workshop, Paris, Feb 2006
- [2] Evaluation and Monitoring of Energy Efficiency in the New Member Countries and the EU-25, ADEME Editions, Paris, 2007
- [3] BOSSEBOEUF, D., LAPILLONNE, B., BOŽIĆ, H., Energy Efficiency in the EU-27, The ODYSSEE-MURE Experience, 17th Forum Energy Day in Croatia, Zagreb, 2008
- [4] Energija u Hrvatskoj 2007, Ministarstvo gospodarstva, rada i poduzetništva, Zagreb, 2008.
- [5] ODYSSEE/MURE Database, www.odyssee-indicators.org
- [6] DZS, Directorate-General for Energy and Transport, EUROSTAT
- [7] Directorate-General for Energy and Transport, EUROSTAT, (Energetski institut Hrvoje Požar, Državni zavod za statistiku, Zagreb)
- [8] Baza podataka Ministarstva unutarnjih poslova o ukupnom broju registriranih vozila u RH za razdoblje od 1995. do 2008. godine, Energetski institut Hrvoje Požar, Zagreb, 2009.
- [9] DRIL, A.W.N., ARKEL, W.G., DOUGLE, P.G., JEENINGA, H., KROON, P., Uyterlinde, M.A., Energy Efficiency Indicators in the Netherlands, ECN, Dec 1998
- [10] Energy Efficiency: A Worldwide Review, Indicators, Policies, Evaluation – A Report of the World Energy Council in Collaboration with ADEME, WEC, July 2004
- [11] Energy Use in the New Millennium – Trends in IEA Countries, Energy Indicators, OECD/IEA, 2007
- [12] Energy and Environment in the European Union – Tracking progress Towards Integration, EEA Report No. 8, European Environment Agency, 2006
- [13] DOUKAS, H., PAPADOPOLUOU, A.G., PSARRAS, J., RAGWITZ, M., SCHLOMANN B., Sustainable Reference Methodology for Energy End-Use Efficiency Data in the EU, Renewable & Sustainable Energy Reviews No. 12, 2008

Adrese autora: Authors' Addresses:

Dr. sc. Helena Božić hbozic@eihp.hr	Helena Božić , PhD hbozic@eihp.hr
Dr. sc. Branko Vuk Dino Novosel , dipl.ing.	Branko Vuk , PhD Dino Novosel , M.M.E.
Energetski institut Hrvoje Požar Savska cesta 163 10001 Zagreb Hrvatska	Energy Institute Hrvoje Požar Savska cesta 163 10001 Zagreb Hrvatska

Uredništvo primilo rukopis:
2009-09-11

Manuscript received on:
2009-09-11

Prihvaćeno:
2009-11-03

Accepted on:
2009-11-03

KONCEPT ELEKTROENERGETSKI NEZAVISNOG OTOKA U HRVATSKOJ – PRELIMINARNA STUDIJA OTOKA VISA ZERO ELECTRIC ENERGY ISLAND CONCEPT IN CROATIA – PRELIMINARY STUDY FOR THE ISLAND OF VIS

Krešimir Trontl – Dubravko Pevac – Mile Baće, Zagreb, Hrvatska

Hrvatski otoci, s jakim prirodnim potencijalom vjetra i Sunca, moguće su lokacije za intenzivnu uporabu obnovljivih izvora energije. U ovom su radu predstavljeni rezultati preliminarnog istraživanja mogućnosti izvedbe koncepta električno nezavisnog otoka uporabom isključivo obnovljivih izvora energije. Istraživanje je provedeno za otok Vis.

Croatian islands, with strong natural wind and solar potential, are possible locations for extensive usage of renewable energy sources. This paper presents the results of the preliminary investigation of the applicability of renewable energy sources for the zero-energy island concept on Croatian islands, in particular for the central Dalmatian island of Vis.

Ključne riječi: električno nezavisni otok; energija Sunca; energija vjetra; obnovljivi izvori energije; pumpna hidro pohrana
Keywords: pumped hydro storage; renewable energy sources; solar energy; wind energy; zero energy island



1 UVOD

Ministarstvo gospodarstva, rada i poduzetništva Republike Hrvatske nedavno je predstavilo nacrt zelene knjige, odnosno strategiju energetskog razvoja Republike Hrvatske s ciljem definiranja energetske politike i strategije energetskog razvoja Republike Hrvatske do 2020. godine [1]. Detaljna analiza trenutanih zahtjeva za električnom energijom te predviđanja porasta potrošnje električne energije, uz odgovarajuće proceduralne korake, rezultirala je s tri razvojna scenarija izgradnje novih energetskih postrojenja. Jedna od osnovnih pretpostavki sva tri scenarija je:

“Do 2020. godine predviđa se proizvodnja dodatnih 4 000 GWh iz obnovljivih izvora energije (OIE) s 1 545 MW nove instalirane snage. Pretpostavljeno je da se od 2011. do 2020. godine kapacitet u OIE povećava linearno (154,5 MW/god.)”

U pregledu do 2030. godine strategija sugerira udvostručenje kapaciteta postrojenja koja koriste obnovljive izvore energije (OIE) u odnosu na kapacitet 2020. godine (snaga od 3 000 MW s godišnjom proizvodnjom od 8 000 GWh).

Ciljevi za pojedine obnovljive izvore do 2020. godine, odnosno 2030. godine dani su u tablici 1.

1 INTRODUCTION

Recently, the Croatian Ministry of Economy, Labour and Entrepreneurship introduced the Energy Strategy Green Paper for the Republic of Croatia with the purpose of defining energy policy and future plans for the energy development of the Republic of Croatia by the year 2020 [1]. The comprehensive analysis of the current demands for electric energy, the presumed annual growth rate of electricity demands and the following of numerous guidelines, all resulted in three development scenarios for the construction of new power generation facilities. One of the fundamental building blocks of all the scenarios is the following presumption:

“A further production of 4 000 GWh is expected by 2020 from renewable energy sources (1 545 MW new electricity-generating capacity). It is assumed that between 2011 and 2020 capacities of renewable energy sources (RES) will increase linearly (154.5 MW/god.)”

In an overview up to the year 2030, the strategy suggests that the installed electricity-generating capacities using renewable energy sources (RES) will be doubled in comparison to 2020 (approximately 3 000 MW, and electricity generation of 8 000 GWh).

The objectives for particular sources of renewable energy by the year 2020, as well as 2030 are given in Table 1.

Tablica 1 – Ciljevi za pojedine obnovljive izvore do 2020. godine, odnosno 2030. godine prema Nacrtu zelene knjige [1]
Table 1 – The objectives for particular sources of renewable energy by the year 2020 and 2030 as indicated in the Draft of the Green Paper [1]

Obnovljivi izvor energije / Renewable energy source	Snaga / Power Godina / Year 2020., MW	Snaga / Power Godina / Year 2030., MW
Energija vjetra / Wind	1 200	2 000
Energija biomase / Biomass	140	420
Komunalni otpad / Waste-to-energy plants	40	60
Geotermalna energija / Geothermal	20	30
Energija Sunca / Solar	45	250
Male hidroelektrane / Small hydro	100	140
Ukupno snaga (energija) / Total power (energy)	1 545 MW (4,1 TWh)	2 900 MW (8,0 TWh)

Strategija također utvrđuje i potrebne preduvjete za povećanje iskorištenja obnovljivih izvora energije, razvoj prijenosne i distribucijske mreže, te donošenje odgovarajućih zakonskih propisa. Iz svega navedenog slijedi da je u skoroj budućnosti moguće očekivati intenziviranje uporabe obnovljivih izvora energije za proizvodnju električne energije. Hrvatski otoci, s jakim prirodnim potencijalom energije Sunca i vjetra, izgledne su lokacije za intenzivnu uporabu obnovljivih izvora energije. Do sada je proveden

The strategy also establishes guidelines for approaching two aspects that are particularly important for the increase of renewable energy sources exploitation, the development of the transmission and distribution networks, as well as the establishment of an appropriate legislative and regulatory framework. Therefore, it is obvious that a strong boost of utilization of renewable energy sources for electricity production is to be expected in the near future.

cijeli niz studija s ciljem istraživanja mogućnosti uporabe OIE u Hrvatskoj, posebice na otocima.

Većina studija usmjerena je k općoj analizi primjenljivosti OIE [2], odnosno na analizu malih OIE sustava koji nisu spojeni na mrežu [3]. Provedene su i vrlo interesantne studije hibridnih vodik-OIE sustava za otoke [4] i [5]. U zadnje navedenoj studiji detaljno je analizirana mogućnost zadovoljenja zahtjeva za električnom energijom isključivo iz OIE za otok Mljet. Koncept električno nezavisnog otoka koji sve potrebe za električnom energijom zadovoljava iz OIE, istraživana je za različite lokacije i u svijetu [6] i [7].

Cilj je ovoga rada predstaviti rezultate preliminarnih istraživanja mogućnosti primjene koncepta električno nezavisnog otoka u Hrvatskoj, točnije primjena takvog režima na srednje dalmatinski otok Vis. Vodik se kao sredstvo pohrane energije ne razmatra, već se računa s ostalim načinima pohrane energije. Prema, nama dostupnim, informacijama prethodne studije primjenljivosti OIE na hrvatskim otocima djelomično su zanemarile pitanje jakih fluktuacija otočke populacije zbog turističkih aktivnosti. Stoga u radu naglašavamo važnost procjene broja turista.

Gruba procjena zahtjeva za električnom energijom otoka Visa dana je u drugom poglavlju. U trećem poglavlju analizirani su potencijali obnovljivih izvora energije na otoku. Važnost pohrane energije diskutirana je u četvrtom poglavlju, dok se u petom poglavlju diskutiraju rezultati analize i iznose opći zaključci.

2 ZAHTJEVI ZA ELEKTRIČNOM ENERGIJOM

Ukupna potrošnja električne energije u Hrvatskoj je 2006. godine iznosila 15 061 GWh [8] i [9]. U tablici 2 dana je struktura potrošnje po različitim sektorima.

Croatian islands, with their strong natural wind and solar potential, are possible locations for an extensive usage of renewable energy sources. A number of studies have been conducted in the past with the aim of investigating the possibility of RES usage in Croatia or, specifically, on Croatian islands. Most of the studies were focused on analysing RES applicability in general [2] or on small scale off-grid RES applications [3]. Interesting investigations of hybrid hydrogen-RES systems have also been performed for Croatian islands [4] and [5]. In the latter study, a scenario leading to a 100% RES supply of the electric energy demand of the island of Mljet was carefully investigated. The idea of setting up a zero-energy island based exclusively on renewable energy sources was investigated for islands in different parts of the world as well [6] and [7].

It is the aim of this paper to present the results of the preliminary investigation of the applicability of the RES zero-energy island concept on Croatian islands, in particular the central Dalmatian island of Vis, excluding hydrogen as a means of energy storage, but rather considering other energy storage options. To the best of our knowledge, previous studies of RES applicability on Croatian islands did not thoroughly address the issues of strong population fluctuations throughout the year due to tourism activities. Therefore, we stress the importance of estimating the number of tourists visiting the island.

A rough estimate of the electricity demands on the island of Vis is given in Section 2. In Section 3, renewable energy resources of the island are analyzed. The importance of energy storage is discussed in Section 4. Discussions on the results of the analysis, as well as general conclusions, are given in Section 5.

2 ELECTRICITY DEMANDS

According to [8] and [9] the final demand for electricity in Croatia in the year 2006 was 15 061 GWh. Table 2 lists electricity consumption by different sectors.

Tablica 2 – Potrošnja električne energije po sektorima, u Hrvatskoj 2006. godine [8]
Table 2 – The electricity consumption by different sectors in Croatia for the year 2006 [8]

Sektor / Sector	Potrošnja električne energije / Electricity consumption, GWh
Industrija / Industry	3 455
Promet / Transport	302
Kućanstva (stanovništvo) / Residential (households)	6 520
Usluge / Services	4 455
Poljoprivreda / Agriculture	68
Graditeljstvo / Construction	261
Ukupno / Total	15 061

Uzimajući u obzir broj stanovnika [10] slijedi da je direktna potrošnja električne energije iznosila godišnje 1,5 MWh po stanovniku, odnosno da je ukupna potrošnja električne energije po stanovniku iznosila godišnje približno 3,4 MWh.

Sektor komercijalnih i javnih usluga, s približnom godišnjom potrošnjom od 1 MWh po stanovniku, moguće je dodatno podijeliti na podsektore: restorani, trgovine, uredi i ostalo. Kako je Vis turistička lokacija sektor komercijalnih i javnih usluga prvenstveno se sastoji od dva podsektora – restorana i trgovina. Stoga se u predstojećoj analizi pretpostavlja da je potrošnja električne energije u sektoru komercijalnih i javnih usluga 60 % prosječne potrošnje za taj sektor [6].

Struktura potrošnje električne energije u domaćinstvima na otoku ponešto se razlikuje od strukture potrošnje na kopnu. Detaljni podaci potrošnje energije na hrvatskim otocima dostupni su za 1996. godinu. Otok Vis tada je imao 4 338 stanovnika u 1 477 domaćinstava, a ukupna potrošnja energije u domaćinstvima iznosila je godišnje 73,06 TJ [11]. Struktura energetske potrošnje bila je sljedeća: toplinska energija 60,69 TJ (grijanje 43,45 TJ, topla voda 6,07 TJ; kuhanje 11,17 TJ), ne-toplinska energija 12,11 TJ i hlađenje 0,26 TJ.

Udio električne energije iznosio je 36 % (relativno visoki udio električne energije posljedica je intenzivne uporabe struje za ispunjenje toplinskih zahtjeva), odnosno 26,30 TJ ili 1,68 MWh po stanovniku godišnje. Ukupna hrvatska potrošnja električne energije u domaćinstvima je 1996. godine iznosila 4 898 MWh. Prema [12] Hrvatska je 1996. godine imala približno 4,2 milijuna stanovnika, iz čega slijedi da je prosječna godišnja potrošnja električne energije po stanovniku iznosila 1,17 MWh. Uz pretpostavku istog omjera potrošnje električne energije (1,68 MWh po stanovniku na otoku i 1,17 MWh po stanovniku u Hrvatskoj), prosječna potrošnja električne energije po stanovniku na otoku 2006. godine iznosila je 2,15 MWh. Prema [10] broj stalnih stanovnika otoka Visa je 3 600, no pretpostavljajući porast populacije zbog općeg razvitka otoka, u predstojećoj je analizi pretpostavljeno 5 000 stalnih stanovnika otoka, što rezultira potrošnjom električne energije u domaćinstvima od 10 750 MWh godišnje.

Neke studije [13] sugeriraju da samo u gradu Visu postoji gotovo 1 000 tzv. vikend stanovnika. Kako bi se u predstojećoj analizi uzelo u obzir i moguće povećanje zahtjeva za električnom energijom, pretpostavljeno je da na cijelom otoku postoji 2 000 tzv. vikend stanovnika. Također je pretpostavljeno da takvi stanovnici borave na otoku svaki drugi vikend, odnosno 52 dana godišnje. Stoga je godišnje povećanje potrošnje električne energije, pri čemu je kalkulacija bazirana na dnevnom prosjeku po-

Taking into account the Croatian population [10], the simple calculation indicates that the residential electricity consumption per capita is approximately 1,5 MWh/year, while the total electricity consumption per capita is roughly 3,4 MWh/year.

The sector of commercial and public services, with electricity consumption per capita of approximately 1 MWh/year, can be further divided into restaurants, retail facilities, offices and others. As a tourist location, the commercial sector of the island of Vis is mostly comprised of restaurants and retail facilities. Therefore, the assumption that the per capita electricity consumption of the commercial sector amounts to 60 % of the average consumption for this sector has been used in the proceeding analysis [6].

The structure of energy consumption in households on the islands is somewhat different than the one on the mainland. Detailed energy consumption data for Croatian islands are available for the year 1996 when the island of Vis had 4 338 residents in 1 477 households with the total energy consumption in households of 73,06 TJ per year [11]. The structure of energy consumption was as follows: thermal 60,69 TJ (heating 43,45 TJ; hot water 6,07 TJ; cooking 11,17 TJ), non-thermal 12,11 TJ and cooling 0,26 TJ.

The electricity share in overall consumption was 36 % (relatively high due to intensive usage of electricity for thermal purposes) resulting in the total electricity consumption of 26,30 TJ, or 1,68 MWh per capita. The overall national household electricity consumption in the year 1996 was 4 898 MWh. The Croatian population in the year 1996 can be estimated at around 4,2 million [12], resulting in national average electricity consumption of 1,17 MWh per capita. If the same ratio of electricity consumption (1,68 MWh to 1,17 MWh) is used on data for the year 2006, the household electricity consumption for the island of Vis can be estimated at 2,15 MWh per year per capita. The current population of the island can be estimated at 3 600 permanent residents [10], however to account for a possible increase of population as a result of the island's development in general, an assumption of 5 000 residents was used in the proceeding analysis, resulting in total household electricity consumption of 10 750 MWh per year.

Some researches [13] suggest that up to a 1 000 of so-called weekend residents exist in the town of Vis only. To account for a possible increase in electricity demand, the following assumption was used: the number of weekend residents for the entire island was estimated at 2 000. It was also presumed that they visit the island every other weekend resulting in 52 days spent on the island. The annual increase of electricity consumption

trošnje, izraženo kao

$$2\,000 \cdot 2.15 \cdot \frac{52}{365} \approx 613 \text{ MWh}.$$

Otok Vis pripada kategoriji slabo razvijenih otoka [11]. Stoga ni potrošnja električne energije u industriji (djelomično aktivna tvornica za preradu ribe, zatvorena tekstilna tvornica, aktivno samo 20 % industrije vina), prometu, poljoprivredi i graditeljstvu nije posebice izražena. Niti je za očekivati veliki porast potrošnje električne energije u navedenim sektorima. 1996. godine ukupna potrošnja električne energije u industriji otoka Visa iznosila je 12,23 TJ dok je potrošnja električne energije u kućanstvima iznosila 26,30 TJ. Stoga je pretpostavljeno da bi 10 % povećanje ukupne potrošnje električne energije u svim ostalim sektorima trebalo biti dovoljno za zadovoljenje industrijskih potreba za električnom energijom u budućnosti.

Otok Vis snažno je turističko središte pa je stoga nužna procjena turističke potrošnje električne energije. Turistička sezona, praktično, počinje 15. lipnja i traje do 15. rujna s vrhuncem u periodu 1. do 15. kolovoza. Broj turista na otoku Visu teško je posve precizno procijeniti iz dva osnovna razloga. Prvi je tzv. sivi turizam, odnosno broj turista koji neprijavljeni borave na otoku, a drugi je veliki broj, nekad vojnih, objekata za koje se očekuje prenamjena u turističke svrhe. Kako je ovo preliminarna i relativno gruba analiza mogućnosti izvedbe koncepta električno nezavisnog otoka sa stajališta prirodnih otočkih resursa, broj turista slobodno je procijenjen: za vrhunac turističke sezone pretpostavljen je dvostruki broj turista u odnosu na broj stalnih stanovnika otoka, dok je za preostali period turističke sezone pretpostavljeno da je broj turista identičan broju stalnih stanovnika. Stoga je dodatni zahtjev za električnom energijom, pri čemu je kalkulacija također bazirana na dnevnom prosjeku potrošnje, izražen kao:

$$10\,000 \cdot 2.15 \cdot \frac{15}{365} + 5\,000 \cdot 2.15 \cdot \frac{75}{365} \approx 3\,100 \text{ MWh}.$$

Ukupna potrošnja električne energije može se izraziti kao:

10 750 MWh (potrošnja stalnih stanovnika) + 613 MWh (potrošnja vikend stanovnika) + 3 100 MWh (turistička potrošnja) + 4 000 MWh (potrošnja u sektoru usluga) = 18 463 MWh.

Uzimajući u obzir pretpostavku potrošnje električne energije u industriji (povećanje od 10 %) i ugrađenu rezervu (također povećanje od 10 %) ukupna godišnja potrošnja električne energije procijenjena je na 22,2 GWh. Na godišnjoj razini ta potrošnja odgovara zahtjevu za snagom od 2,5 MWh. Me-

was calculated based on average daily electricity consumption as:

$$2\,000 \cdot 2.15 \cdot \frac{52}{365} \approx 613 \text{ MWh}.$$

The island of Vis belongs to the category of poorly developed islands [11]. The industry (partially active fish factory, closed textile factory, only 20 % of wine industry active), transport, agriculture and construction electricity consumption is not particularly emphasized and the high increase of consumption is not expected in the future. In the year 1996 the total industry energy consumption on the island of Vis was 12,23 TJ with the electricity share of 24 % or 817 MWh (2,94 TJ) [11]. Taking into account the electricity consumption of 26,30 TJ in households in the year 1996, a 10 % increase of the estimated total consumption demand in all other sectors should be adequate to cover the industry electricity demands in the future.

The island of Vis is a strong tourist centre, which requires an estimation of tourist electricity consumption. The tourist season basically starts on June 15, and ends on September 15, with a peak from August 1 till August 15. The number of tourists on the island of Vis is hard to estimate precisely for two main reasons. The first is the so-called grey tourism, i.e. the tourists that are not officially registered, and the second is a large number of former military facilities on the island that are expected to be transformed into tourist facilities in the future. Since this is a preliminary and rough analysis of the zero-energy island concept feasibility from the standpoint of natural resources, we took the liberty of estimating the number of tourist as double the projected number of permanent residents in the peak of the season and equal to the number of residents throughout the rest of the tourist season. That estimation, also based on daily average electricity consumption, results in additional electricity consumption of:

$$10\,000 \cdot 2.15 \cdot \frac{15}{365} + 5\,000 \cdot 2.15 \cdot \frac{75}{365} \approx 3\,100 \text{ MWh}.$$

Therefore, the electricity consumption becomes:

10 750 MWh (permanent residents consumption) + 613 MWh (weekend residents consumption) + 3 100 MWh (tourist consumption) + 4 000 MWh (services electricity consumption) = 18 463 MWh.

Taking into account the industry consumption (10%) and built-in reserve (10 %), one can roughly estimate the total annual electricity consumption to be approximately 22,2 GWh. That consumption corresponds to the power of approximately 2,5 MWh on an annual base. However, due to expected extreme fluctuation of the required power, especially dur-

đutim, zbog očekivanih ekstremnih fluktuacija u zahtjevu za snagom, posebice za vrijeme turističke sezone, proračun potrebne snage baziran na prosječnoj godišnjoj potrošnji nije zadovoljavajući za dizajn sustava električno nezavisnog otoka.

Za očekivati je da će najveća potrošnja električne energije biti tijekom vrhunca turističke sezone. Najveću dnevnu potrošnju u tom periodu moguće je procijeniti temeljem sljedećih pretpostavki:

- broj stalnih stanovnika: 5 000,
- broj vikend stanovnika: 2 000,
- broj turista: 10 000.

Uzimajući u obzir prosječnu dnevnu potrošnju električne energije po stanovniku, uključujući potrošnju sektora usluga od 7,5 kWh, procijenjena ukupna dnevna potrošnja električne energije za vrijeme vrhunca turističke sezone iznosi 127,5 MWh, što u dnevnom prosjeku odgovara snazi od 5,3 MW. Kako je dnevna potrošnja električne energije tijekom ljeta veća od godišnjeg prosjeka, pretpostavljen je faktor opterećenja od 70 % [6], što odgovara maksimalnoj snazi od 7,6 MW. Uz, već prije spomenute, pretpostavke o 10 % povećanju za potrebe industrije i 10 % povećanju zbog rezerve, procijenjen je maksimalni zahtjev za snagom od približno 9 MW.

Za ostatak turističke sezone, uporabom iste proračunske procedure i uz pretpostavku o 5 000 turista, maksimalni zahtjev za snagom procijenjen je na 6,4 MW. Za preostali dio godine snaga od 2,6 MW trebala bi biti dovoljna.

Pregled procijenjenih zahtjeva za snagom tijekom različitih perioda godine dan je na slici 1. Važno je napomenuti da je provedena analiza zahtjeva za električnom snagom i energijom, bazirana na dnevnim prosjecima, relativno gruba, no adekvatna za preliminarnu fazu istraživanja. Do-

ing the tourist season, the annual average power calculated based on the electricity consumption is not an applicable parameter for the zero-energy island system design.

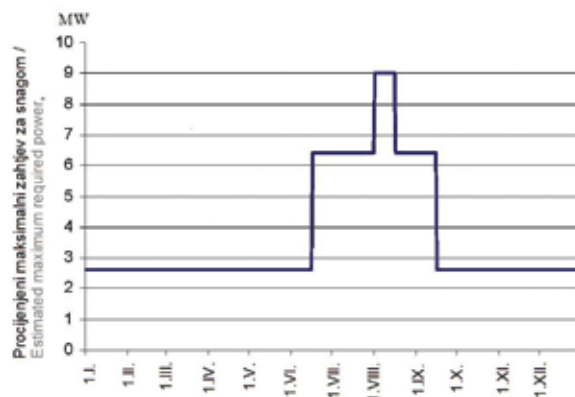
The peak electricity consumption is to be expected during the peak of the tourist season. Daily consumption in that period can be estimated based on following assumptions:

- number of residents is 5 000,
- number of weekend residents is 2 000,
- number of tourists is 10 000.

Taking into account the daily average residential electricity consumption on the island, including the services consumption, of approximately 7,5 kWh per capita, the total daily electricity consumption in the peak is estimated to be 127,5 MWh, corresponding to the power of 5,3 MW on a daily base. Since the daily electricity consumption during the summer is higher than the year's average, the load factor of 70 % has been assumed [6] resulting in a peak of 7,6 MW. Taking into account the industry (10 %) and built-in reserve (10 %), one can roughly estimate the required peak power to approximately 9 MW.

Based on the same calculative procedure as used previously for the peak tourist season period, the required power during the rest of the tourist season, using the assumption of 5 000 tourists on the island, is estimated to be approximately 6,4 MW. Throughout the non-tourist season 2,6 MW should be enough.

The estimated required power for different periods throughout the year is graphically depicted in Figure 1. It is important to emphasize that the performed analysis of the electric energy and power requirements, based on average daily values, is rather rough, but adequate for preliminary stage of investigation. However, the obtained values give a good insight into



Slika 1 — Procijenjeni zahtjevi za maksimalnom snagom tijekom godine
Figure 1 — Estimated maximum required power throughout the year

bivene vrijednosti upućuju na važnost odgovarajućeg modeliranja autonomnog OIE sustava i veliku fleksibilnost koju taj sustav mora posjedovati.

3 POTENCIJAL OBNOVLJIVIH IZVORA OTOKA VISA

Površina otoka Visa (slika 2) iznosi 90,3 km², dok mu je duljina obale 77 km. Smješten je na približno 42°2' sjeverne zemljopisne širine i 16°10' istočne zemljopisne dužine. Ima blagu mediteransku klimu s prosječnom temperaturom od 8,8 °C u siječnju i 24 °C u srpnju.

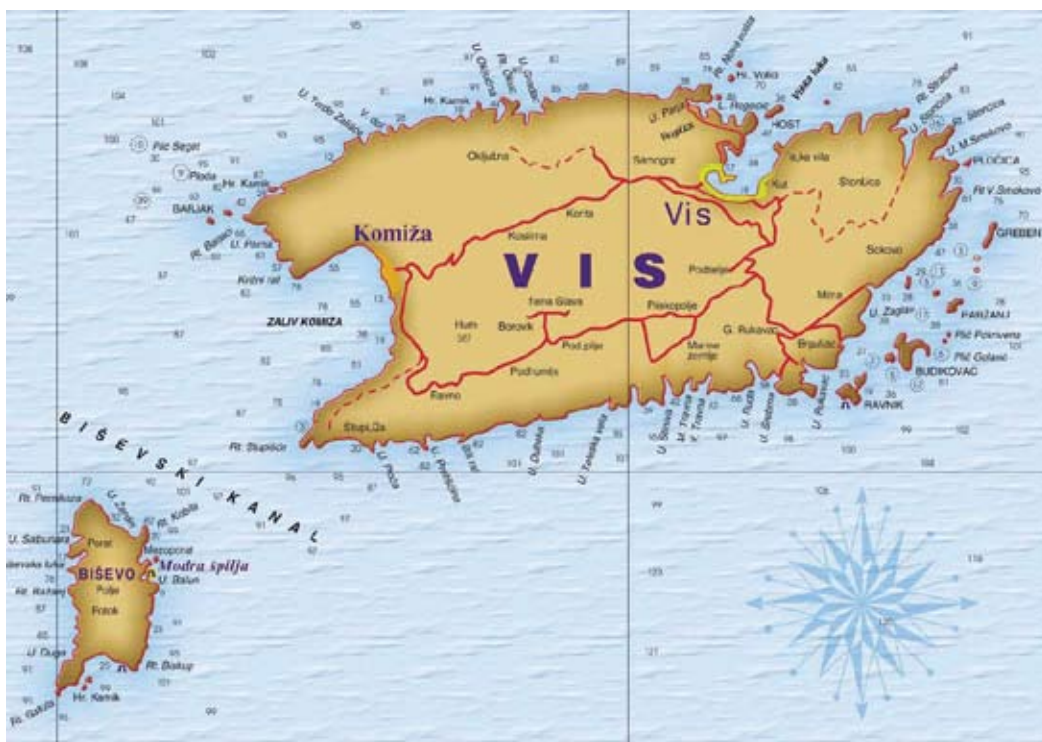
U predstojećoj analizi razmatrana je samo energija Sunca i energija vjetera. Iako je, teoretski, i ostale OIE moguće uzeti u obzir pri modeliranju otočkog OIE sustava, praktično, samo prije spomenute energije Sunca i vjetera imaju adekvatan potencijal.

the importance of proper modelling of the potential self-sustainable RES system, and high flexibility that would be required from such a system.

3 RENEWABLE ENERGY RESOURCES OF THE ISLAND OF VIS

The island of Vis (Figure 2) has an area of 90,3 km², and its coastline is 77 km long. In terms of latitude and longitude the island is located at approximately 43°2' N and 16°10' E. It has a mild Mediterranean climate with an average temperature of 8,8 °C in January and 24 °C in July.

In the proceeding analysis only solar and wind energy shall be discussed in detail. Although, in theory, other RES could be utilized in modelling the island's RES system, in practice only the aforementioned renewable energy sources (solar and wind) have adequate potential.



Slika 2 — Karta otoka Visa
Figure 2 — Map of the island of Vis

3.1 Energija Sunca

Za procjenu otočkog potencijala energije Sunca nužno je poznavanje sunčevog ozračenja. Prema podacima dostupnima za otoke Hvar i Lastovo [14] i [15] procijenjena je mjesečna raspodjela sunčevog ozračenja za otok Vis (tablica 3).

3.1 Solar energy

To estimate the potential of the solar energy available on the island, it is necessary to know the solar irradiation. According to the available information for the islands of Hvar and Lastovo [14] and [15], the monthly distribution of solar irradiation for the island of Vis was estimated (Table 3).

Tablica 3 – Procijenjeno trajanje sijanja Sunca i sunčevo ozračenje za otok Vis
 Table 3 – Estimated sunshine duration and solar irradiation for the island of Vis

Mjesec / Month	Procijenjeno trajanje sijanja Sunca / Estimated average sunshine duration, h/mjesec / h/month	Procijenjeno prosječno dnevno sunčevo ozračenje na optimalno nagnutu plohu okrenutu prema jugu / Estimated average daily solar irradiation on an optimally positioned south oriented surface, kWh/m ²
Siječanj / January	118,7	3,05
Veljača / February	141,4	4,05
Ožujak / March	183,4	4,70
Travanj / April	224,5	5,56
Svibanj / May	279,1	6,30
Lipanj / June	315,5	7,18
Srpanj / July	362,3	7,25
Kolovoz / August	326,1	6,43
Rujan / September	257,2	5,57
Listopad / October	208,7	4,77
Studeni / November	123,6	3,22
Prosinac / December	111,2	2,74
Prosjeak / Average	221,0	5,07
Ukupno godišnje / Total per year	2 651,5	1 849

Iako nedavno objavljene studije sugeriraju da je uporabom novih tehnologija moguće postići efikasnost solarnih ćelija veću od 42 % [16], efikasnost dostupnih solarnih ćelija kreće se od 5 % do 20 %. U predstojećoj analizi pretpostavljena je efikasnost solarnih ćelija od 15 %, kao vrijednost za standardne fotonaponske panele od monokristalnog silicija [6]. Jednostavan proračun pokazuje da je prosječna godišnja snaga koju je moguće postići po kvadratnom metru solarnih ćelija na otoku Visu 32 W/m²:

$$\frac{1\ 849 \cdot 0,15}{24 \cdot 365} \approx 32 \text{ W/m}^2.$$

No, za dizajn autonomne električne mreže, važnija je raspodjela prosječne mjesečne snage koju je moguće postići, odnosno potrebna površina solarnih ćelija za zadovoljenje zahtjeva prikazanih na slici 1, uz pretpostavku da se upotrebljavaju samo solarne ćelije koje su optimalno pozicionirane i okrenute k jugu. Zanimari li se efikasnost DC/AC konverzije, za zadovoljenje zahtjeva za maksimalnom snagom za vrijeme vrhunca turističke sezone u kolovozu (9 MW), približno je potrebna površina od 0,225 km², pri čemu je proračun baziran na podacima danima u tablici 3.

Stoga bi za uspostavu mreže bazirane isključivo na energiji Sunca bila potrebna površina od približno 475 m x 475 m. U ostatku godine u sustavu bi postojao višak snage.

Although recent studies show that by using novel technologies, solar cell efficiency of more than 42 % can be achieved [16], the currently commercially available solar cells have the efficiency of approximately 5 % to 20 %. As suggested in [6], a 15 % solar cell conversion efficiency has been assumed in the following analysis, as a reasonable efficiency of standard photovoltaic monocrystalline silicon panels. A simple calculation indicates that an average power of approximately 32 W/m² can be obtained per solar cell square meter on the island of Vis:

$$\frac{1\ 849 \cdot 0,15}{24 \cdot 365} \approx 32 \text{ W/m}^2.$$

However, a distribution of average obtainable power per month and the solar cell surface necessary to fulfil the requirements presented in Table 3 (with the assumption that only solar energy is used and that the optimally angled solar cells are facing South) are more important for the design of a self-sustainable grid. To meet the estimated maximum power requirement during the peak tourist season (9 MW) in August, the calculation based on data given in Table 3, without taking into account the efficiency of DC/AC conversion, indicates that approximately 0,225 km² of solar panels are necessary.

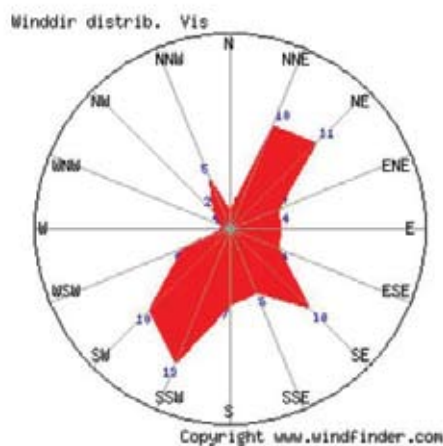
Establishing the grid only on solar energy would therefore require the surface of approximately 475 m x 475 m. During the rest of the year excess power would exist in the system.

3.2 Energija vjetra

Na slici 3 prikazana je godišnja ruža vjetrova otoka Visa, dok su u tablici 4 dani nautički podaci mjesečne brzine vjetra [17]. Prevladavajući su sjeveroistočni i jugozapadni vjetrovi s godišnjom prosječnom brzinom od 3,6 m/s.

3.2 Wind energy

The annual wind rose for the island of Vis is given in Figure 3, while in Table 4 nautical values for average monthly wind speeds are given [17]. The prevailing wind directions are NE and SW with the annual average speed of 3,6 m/s.



Slika 3 – Godišnja ruža vjetrova otoka Visa
Figure 3 – Annual wind rose for the island of Vis

Tablica 4 – Prosječna mjesečna brzina vjetra na otoku Visu (nautički podaci)
Table 4 – Monthly averaged wind speed for the island of Vis (nautical values)

Mjesec / Month	Prosječna brzina vjetra / Average wind speed, m/s
Siječanj / January	3,6
Veljača / February	3,6
Ožujak / March	4,1
Travanj / April	3,6
Svibanj / May	4,1
Lipanj / June	3,1
Srpanj / July	3,1
Kolovoz / August	3,1
Rujan / September	3,6
Listopad / October	3,6
Studeni / November	4,1
Prosinac / December	3,6

Na nekim su lokacijama na otoku brzine vjetrova veće i stoga su te lokacije pogodnije za iskorištenje energije vjetra.

The average wind speeds are higher on some locations on the island, which are therefore more suitable for wind turbine electricity production.

S obzirom na mogućnost eksploatacije energije vjetra, dvije su lokacije na otoku detaljno istraživane (Široko brdo i Hum) [18] i [19]. Za obje su lokacije analizirani različiti scenariji. Prema jednom od analiziranih scenarija za lokaciju Široko

Two locations on the island (Široko brdo and Hum) have been thoroughly studied [18] and [19] regarding possible wind energy exploitation. For both locations, a number of different scenarios has been analysed. On the location of Široko brdo, situated

brdo, smještenoj na sjeverozapadnoj strani otoka, s prosječnom brzinom vjetra od 8,3 m/s na 10 m iznad tla, šest vjetro-turbina svaka snage 1,5 MW, godišnje bi mogle proizvesti približno 30 GWh električne energije. Na lokaciji Hum, smještenoj na zapadnoj strani otoka s prosječnom brzinom vjetra od 7,8 m/s na 10 m iznad tla, prema jednom od analiziranih scenarija pet vjetro-turbina svaka snage 15 MW godišnje bi mogle proizvesti približno 25 GWh električne energije. Iako su oba scenarija izrazito optimistična s predviđanjem 30 % raspoloživosti vjetroagregata, ipak sugeriraju da na otoku postoji adekvatni prirodni potencijal vjetra za zadovoljenje potreba nametnutih konceptom električno nezavisnog otoka.

Bitno je napomenuti da je Vlada Republike Hrvatske 2004. godine donijela Uredbu o uređenju i zaštiti zaštićenog obalnog područja mora, prema kojoj na otocima nije dopušteno planiranje i izgradnja građevina za iskorištavanje snage vjetra za električnu energiju [20]. Stoga eventualno iskorištenje energije vjetra za proizvodnju električne energije na otoku Visu zahtijeva i odgovarajuće promjene važećih pravilnika i propisa.

4 POHRANA ENERGIJE

Podaci dani u prethodnim poglavljima sugeriraju da na otoku Visu postoje adekvatni prirodni potencijali za razmatranje mogućnosti uspostave koncepta električno nezavisnog otoka. Iako je teoretski moguće uspostaviti autonomni OIE sustav bez sredstava pohrane energije, zbog varijabilne karakteristike sunčevog i vjetro potencijala, takav bi sustav bio izrazito nestabilan. Bez obzira na rezervu ugrađenu u sustav, on ne bi bio pouzdan. Stoga je važno razmotriti i pitanje pohrane energije.

Već je spomenuto da je hibridni vodik-OIE sustav pomno razmatran za moguću primjenu na hrvatskim otocima. Glavna je prednost takvog sustava gustoća energije vodika i njegova primjenljivost za druge namjene, osim proizvodnje električne energije (grijanje i promet). S druge pak strane, glavni je nedostatak tehnologije vodik-gorive ćelije ukupna efikasnost od približno 30 % do 40 %, kao i visoka cijena.

Nedavno je provedena detaljna analiza različitih tehnologija pohrane energije koje je moguće primijeniti za autonomnu otočku električnu mrežu [21]. Za otoke Egejskog arhipelaga u Grčkoj analizirano je šest različitih sustava pohrane energije (pumpna hidro pohrana – PHP, pohrana energije komprimiranim zrakom, pohrana energije zamašnjacima, akumulatorska pohrana energije, baterijska pohrana energije i vodikove gorive ćelije

on the NW side of the island with the average wind speed of 8,3 m/s measured 10 m above the ground, in one of the analysed scenarios six 1,5 MW wind turbines could produce approximately 30 GWh of electricity per year. On the location of Hum, situated on the W side of the island with the average wind speed of 7,8 m/s measured 10 m above the ground, in one of the analysed scenarios five 15 MW wind turbines could produce approximately 25 GWh of electricity per year. Although both scenarios are rather optimistic, with a wind turbine capacity factor of more than 30 %, they indicate that adequate wind potential to fulfil the requirements of the zero electric energy island concept exists on the island.

It is important to emphasize that, in the year 2004, the Croatian government adopted a regulation on the protection of the coastal region [20]. According to that particular regulation, planning and construction of structures for harvesting wind energy and its utilization in electricity production is forbidden. Therefore, wind energy exploitation for electricity production on the island of Vis would require changes in current legislative and regulatory framework.

4 ENERGY STORAGE

Data given in previous paragraphs indicate that there is adequate renewable energy potential on the island of Vis to discuss the possibility of a zero electric energy island concept. Although, it is theoretically possible to set up a self-sustainable RES system without energy storage, such a system would be highly unstable due to the intermittent character of solar and wind potential. Regardless of the reserve built into the system it would still be unreliable. Therefore, it is important to discuss the issue of energy storage.

As mentioned earlier, hybrid hydrogen-RES systems have been analysed for possible application on Croatian islands. The main advantages of such systems are a high energy density of hydrogen, and its applicability for purposes other than electricity production (heating and transport). The main disadvantages of hydrogen fuel cell technology are the overall efficiency rate, which is approximately 30 % to 40 %, as well as its price.

Recently, a detailed study of different storage technologies that could be applied for setting up an autonomous island energy network has been conducted [21]. Six storage systems (pumped hydro storage – PHS, compressed air energy storage, flywheels energy storage, battery energy storage, flow batteries, and hydrogen fuel cells) have been analysed for the Aegean Archipelago

je). Otoci su klasificirani u četiri grupe u ovisnosti o zahtjevima za energijom i snagom, te je provedena analiza različitih tehnologija pohrane energije za dva scenarija udjela energije pohranjene energije u ukupno utrošenoj energiji (50 % i 100 %).

Godišnji energetska zahtjev (22,2 GWh), odnosno zahtjev za snagom (9 MW) svrstavaju otok Vis u kategoriju otoka sa srednje velikom električnom mrežom. Za oba je analizirana scenarija, u slučaju srednje velike električne mreže, sa stajališta ekonomske isplativosti najprihvatljivija pumpna hidro pohrana, a slijedi pohrana u Na – S baterijama za slučaj 50 % udjela, odnosno pohrana komprimiranim zrakom za slučaj 100 % udjela. Najskuplje opcije su tehnologije vodik – gorive ćelije i akumulatorska (olovo-kiselina) pohrana.

Na prvi pogled topografija otoka Visa omogućava ozbiljno razmatranje pumpne hidro pohrane. Preliminarni konzervativni proračuni sugeriraju da bi sustav s rezervoarima približnog kapaciteta od milijun kubičnih metara (10^6 m^3) vode, s visinskom razlikom od 100 m i pretpostavljenom efikasnosti od 85 % trebao biti više nego dovoljan za 24 satnu rezervu u vrhuncu turističke sezone. Detaljni tehnički dizajn PHP-OIE sustava koji bi zadovoljio otočke energetske i ekološke zahtjeve te njegova optimizacija prelaze okvire ovog rada, ali su planirani za skorašnju budućnost.

5 ZAKLJUČAK

U ovom su radu predstavljeni rezultati preliminarnog istraživanja mogućnosti izvedbe koncepta električno nezavisnog otoka uporabom isključivo obnovljivih izvora energije. Istraživanje je provedeno za otok Vis. Provedena je analiza otočke populacije u odnosu na broj turista i pokazano je da na otoku postoje adekvatni prirodni potencijali obnovljivih izvora energije za zadovoljenje energetske zahtjeva. Svaki od analiziranih obnovljivih izvora energije (Sunce i vjetar) ima zasebno dovoljan potencijal za zadovoljenje zahtjeva za električnom energijom. Međutim, uzimajući u obzir distribuciju potencijala OIE tijekom godine (više Sunca ljeti – više vjetra tijekom zime i proljeća), kao i fluktuaciju broja stanovnika zbog turizma, može se pretpostaviti da je kombinacija solarnih panela i vjetroagregata u prednosti u usporedbi s uporabom samo jednog OIE.

Za uspostavu autonomne i pouzdane otočke električne mreže nužna je i pohrana energije. Naglašeno je da su s ekonomskog stajališta najprihvatljivije pumpna hidro pohrana i pohrana uporabom Na-S baterija, te pohrana komprimiranim zrakom.

islands in Greece. The islands were categorized in four groups depending on energy and power requirements, and different storage systems were compared for two scenarios of energy storage system contribution to the total energy consumption (50 % and 100 %).

The annual energy (22,2 GWh) and power (9 MW) requirements of the island of Vis place the island in the category of medium sized electrical networks. For both analysed scenarios, in the case of a medium size electrical grid, from economical standpoint of view, pumped hydro storage is the best option, followed by Na-S batteries in the case of 50 % storage contribution, and compressed air energy storage in the case of 100 % storage contribution to total energy consumption. Hydrogen fuel cells and lead acid batteries storage options are the most expensive ones.

At a first glance of the island of Vis topography, pumped hydro storage (PHS) system should be taken into serious consideration for energy storage. First hand, conservative calculation suggests that a reservoir of approximately one million cubic meters (10^6 m^3) of water, placed 100 m above the turbines, with presumed efficiency of 85 % should be adequate for more than a 24 hour backup during the peak of the tourist season. A detailed technical design of the PHS-RES system that could satisfy the island's electricity consumption requirements, as well as the environmental requirements and its optimization are beyond the scope of this paper, but are planned for the near future.

5 CONCLUSION

This paper presents the results of the preliminary investigation of the applicability of a RES zero-energy island concept on Croatian islands, in particular the central Dalmatian island of Vis. The analysis of the population on the island depending on the number of tourists is performed, and it is shown that adequate RES potential exists to fulfil all the requirements for electricity. Each analysed renewable energy source (solar, wind) has the potential to fulfil the electricity demand on a stand-alone basis. However, taking into account the RES potential distribution over the year (more solar during summer – more wind during winter and spring), as well as population fluctuations due to tourism, one can assume that a combination of solar panels and wind turbines is most likely in advantage compared to single RES use.

In order to set up an autonomous and reliable electrical network of the island, energy storage has to be implemented. It is stressed that, from

Optimalni dizajn PHP-OIE autonomnog sustava koji bi zadovoljio otočke energetske zahtjeve prelaze okvire ovog rada, ali su planirani za skorajšnju budućnost.

an economical standpoint, pumped hydro storage (PHS), followed by Na-S batteries and compressed air storage are the best energy storage options.

An optimized design of a PHS-RES autonomous island system that could satisfy the electricity consumption requirements was beyond the scope of this paper, but is planned for the near future.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] Ministry of Economy, Labour and Entrepreneurship and United Nations Development Programme (UNDP): Update/Upgrade of the Energy Strategy and of the Implementation Programme of the Republic of Croatia, Green Paper, Draft, 2008
- [2] FERETIĆ, D., et al, N., Feasibility Analysis of Wind-Energy Utilization in Croatia. Energy 24,1999
- [3] RAKIĆ, M., et al, Potential for Off-Grid PV Applications on Croatian Islands, Energy and the Environment, 2006
- [4] VUJČIĆ, R., Modeling of Hydrogen Energy System for Adriatic Island, Symposium on Operations Research, SOR96, Braunschweig, Germany, September 4-6, 1996
- [5] KRAJAČIĆ, G., et al, Hydrogen As an Energy Vector in The Islands' Energy Supply, International Journal of Hydrogen Energy 33, 2008
- [6] BAGCI, B., Towards a Zero Energy Island, Renewable Energy 34, 2009
- [7] Hydroelectric Power to Make Canary Island Become 100% Renewable Energy Powered, <http://www.renewableenergymagazine.com>, Accessed on December 10. 2008
- [8] Ministry of Economy, Labour and Entrepreneurship, Energy in Croatia 2006 – Annual Energy Report, Zagreb, 2007
- [9] Electricity/Heat in Croatia in 2006, <http://www.iea.org>, Accessed on December 11. 2008.
- [10] Republic of Croatia – Central Bureau Of Statistics, The Census of Population, Households and Dwellings 31st March 2001
- [11] KINDERMAN LONČAREVIĆ, A., Report on Energy System and Waste Management on Croatian Islands, www.europeanislands.net, Accessed on December 19. 2008.
- [12] GELO, J., Ratni učinci na promjene demografskih struktura u Hrvatskoj, Društvena istraživanja 5-6 (43-44), 8,1999.
- [13] SAMOKOVLJA DRAGIČEVIĆ, J., Pročišćavanje otpadnih voda i kanalizacijski sustav grada Visa, Građevinar 57, 2005.
- [14] HRASTNIK, B., et.al., SUNEN Program korištenja energije Sunca prethodni rezultati i buduće aktivnosti, Energetski institut Hrvoje Požar, Zagreb, 1998.
- [15] MATIĆ, Z., Sunčevo zračenje na području Republike Hrvatske – Priručnik za energetske korištenje sunčevog zračenja, Energetski institut Hrvoje Požar, Zagreb, 2007.
- [16] From 40,7 to 42,8 % Solar Cell Efficiency, <http://www.renewableenergyworld.com>, Accessed on December 19. 2008
- [17] Windstatistic_Vis, <http://www.windfinder.com/windstats/windstatistic>, Accessed on December 20. 2008
- [18] HORVATH, L., et.al., ENWIND Program korištenja energije vjetra - prethodni rezultati i buduće aktivnosti, Energetski institut Hrvoje Požar, Zagreb, 1998.
- [19] HORVATH, L., et.al., ENWIND Program korištenja energije vjetra – nove spoznaje I provedba, Energetski institut Hrvoje Požar, Zagreb, 2001.
- [20] Vlada Republike Hrvatske, Uredba o uređenju i zaštiti zaštićenog obalnog područja mora, Narodne novine 128/2004
- [21] KALDELLIS, J.K., et al, Techno-Economic Comparison of Energy Storage Systems for Island Autonomous Networks, Renewable and Sustainable Energy Review 13, 2009

Adrese autora:

Authors' Adresses:

Dr. sc. **Krešimir Trontl**
kresimir.trontl@fer.hr
Prof. dr. sc. **Dubravko Pevec**
dubravko.pevec@fer.hr
Prof. dr. sc. **Mile Baće**
mile.bace@fer.hr
Sveučilište u Zagrebu
Fakultet elektrotehnike i računarstva
Unska 3, 10000 Zagreb, Hrvatska

Krešimir Trontl, PhD
kresimir.trontl@fer.hr
Prof. **Dubravko Pevec**, PhD
dubravko.pevec@fer.hr
Prof. **Mile Baće**, PhD
mile.bace@fer.hr
University of Zagreb
Faculty of Electrical Engineering and Computing
Unska 3, 10000 Zagreb, Hrvatska

Uredništvo primilo rukopis:
2009-10-05

Manuscript received on:
2009-10-05

Prihvaćeno:
2009-10-28

Accepted on:
2009-10-28

MODELIRANJE RASPODJELE ZAŠTITNOG POTENCIJALA U SUSTAVIMA KATODNE ZAŠTITE S GALVANSKIM ANODAMA KORIŠTENJEM KOMBINIRANE BEM/FEM METODE MODELLING OF PROTECTION CURRENT/POTENTIAL DISTRIBUTION IN CATHODIC PROTECTION SYSTEMS WITH A GALVANIC ANODE BY USING THE COUPLED BEM/FEM METHOD

Alija Muharemović – Hamid Zildžo – Irfan Turković – Halid Matoruga,
Sarajevo, Bosna i Hercegovina

U radu je prezentirano korištenje numeričkih metoda za proračun raspodjele zaštitnih struja/potencijala u sustavima katodne zaštite s galvanskim anodama. Analizirana je kombinirana metoda BEM/FEM, tj. kombinacija metode rubnih i konačnih elemenata. Sustav katodne zaštite je vrlo učinkovit sustav za zaštitu podzemnih metalnih objekata od korozije. Optimalno i tehnički korektno definiranje raspodjele zaštitne struje predstavlja najvažniju fazu kod projektiranja sustava katodne zaštite. Određivanje raspodjele zaštitnih struja/potencijala u sustavima katodne zaštite temelji se na rješavanju Laplaceove jednadžbe uz korištenje adekvatnih, prethodno definiranih rubnih uvjeta. Ovi uvjeti su definirani preko analitičkih izraza za funkcionalne odnose između gustoća zaštitnih struja i potencijala na elektrodnim površinama, odnosno na granicama elektroda/elektrolit. Na istom objektu za kojeg su urađeni numerički proračuni izvršena su i mjerenja raspodjele zaštitnih potencijala tijekom vremena eksploatacije. Eksperimentalni podaci, koji su dobiveni tijekom puštanja sustava u funkciju te namjenski pravljenih periodičnih mjerenja tijekom održavanja sustava uspoređeni su s numerički dobivenim vrijednostima.

The use of numerical methods for calculation of protection current/potential distribution in cathodic protection systems with galvanic anodes is presented in this paper. The coupled BEM/FEM method has been analysed, i.e. a combination of the Boundary Element Method (BEM) and the Finite Element Method (FEM). The cathodic protection system is a very efficient system for the protection of underground metal structures from corrosion. The most important phase of the projecting of the cathodic protection system is the optimally and technically correct defining of protection current distribution.. The calculation of protection current/potential distribution in cathodic protection systems is based on solving Laplace's equation using adequate, previously defined, boundary conditions. These conditions are defined by using analytical expressions for the functional relationship between protection current and potential on electrode surfaces, or the electrode/electrolyte boundary. On the same structure for which the numerical calculations were made, measurements of protection potential distribution during the time of exploitation have been taken.

Experimental data acquired during the start of system operations, together with intentional periodical measurements during system maintenance, are compared with data acquired by numerical calculations.

Ključne riječi: Galerkinova metoda težinskih ostataka; katodna zaštita; metoda graničnih elemenata; metoda konačnih elemenata; metoda sukcesivnih podrelaksacija; zaštitna struja/potencijal
Keywords: boundary elements method; cathodic protection; finite elements method; galerkin's method of weighted residuals; protection current/potential, successive under relaxations method



1 UVOD

U radu su dani rezultati numeričke raspodjele zaštitnih struja/potencijala na konkretnom objektu armirano betonskog cjevovoda s prenapregnutom armaturom kod funkcioniranja sustava katodne zaštite s galvanskim anodama.

Kod numeričkog rješavanja raspodjele zaštitnih struja u katodnoj zaštiti (CP) većina autora polazi od analiziranja metode graničnih elemenata (BEM metoda) [1]. Ova metoda se zasniva na diskretizaciji rubnih linija ili površina te je tako pogodna za rješavanje polja u domenama u kojima dominiraju beskonačne ili polubeskonačne regije.

Orazem i ostali [2] i [3] koriste 3D BEM metodu za proračun zaštitnih potencijala vrlo dugačkih cjevovoda s manjim ili većim oštećenjima izolacije. Riemer i Orazem su konstatirali da za duge cjevovode (> 6,0 km), kod oštećenja izolacije treba uzeti u obzir i pad potencijala u samom cjevovodu, odnosno atenuaciju koja nije ravnomjerna na cijeloj dužini. Adey [4] je primijenio potpuni 3D model za proračun potencijala uključujući i susjedne objekte koji imaju spojeve s anodama. Aoki i ostali [5] kao i DeGiorgi [6] su se bavili više zaštitom brodskih čelika.

Metoda konačnih elemenata je modularna i može se primijeniti u mnogim oblastima za rješavanje koji su opisani npr. Laplaceovom jednačinom. Danas postoji veliki broj programskih paketa opće namjene za rješavanje problema u elektromagnetizmu koji se mogu nabaviti na tržištu.

Doprinos ovog rada je korištenje kombinirane metode BEM/FEM za odgovarajuće proračune. Primjena ove metode bit će objašnjena u nastavku.

2 MATEMATIČKI MODEL

Za proračun raspodjele struje/potencijala u sustavu katodne zaštite korištena je metoda konačnih elemenata (FEM), metoda rubnih elemenata (BEM) i kombinirana metoda (BEM/FEM). Na slici 1 prikazana je principijelna shema sustava katodne zaštite s naznačenim metodama koje su korištene u pojedinim oblastima. Direktna metoda rubnih elemenata (BEM metoda) pogodna je za rješavanje jednačbi stacionarnih elektroprovodnih polja u elektrolitu s beskonačnim granicama, tako da je ova metoda korištena za proračune zaštitnog potencijala u elektrolitu. S druge strane, FEM metoda je pogodna za rješavanje polja unutar ograničenih prostora pa je ista korištena za proračune unutar metalnih površina (elektro-

1 INTRODUCTION

In this paper, the results of numerical distribution of the protection current/potential on the specific object, reinforced concrete pipeline with pre-stressed armature, when the CP system with galvanic anodes is applied, are given.

When the numerical calculation of protection current distribution in cathodic protection system (CP) is concerned, most authors begin with analysing the Boundary Element Method (BEM method) [1]. This method is based on discretization of boundary lines or surfaces and therefore is useful when solving the field in the domains where infinite or semi-infinite regions are dominant.

Orazem et al. [2] and [3] use the 3D BEM method for the calculation of protection potentials for very long pipelines with smaller or greater isolation damage. Riemer and Orazem concluded that for long pipelines (> 6,0 km) with damaged isolation, a voltage drop in the pipeline itself should be considered because the potential attenuation is not uniform on the whole length of the pipeline. Adey [4] applied the full 3D model for the calculations of the potential including the nearby objects connected with anodes. Aoki et al. [5] like DeGiorgi [6] were more interested in protection of ship steels.

The Finite Element Method is modular and can be applied for solving problems in many areas that are described with Laplace's equation. Today, a large number of software packages that can be used to solve problems in electromagnetism can be found on the market.

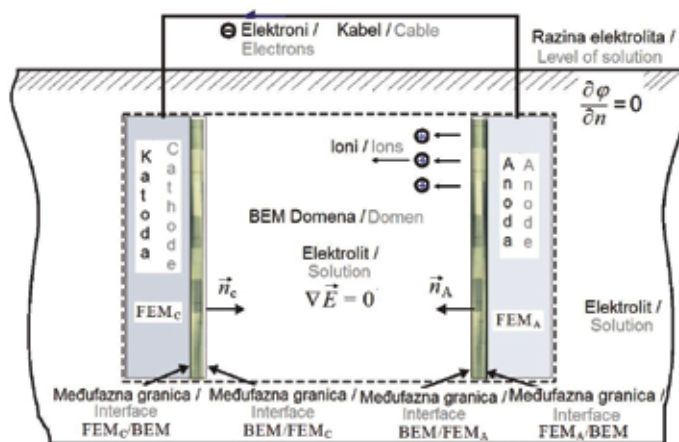
The contribution of this paper is the use of the coupled BEM/FEM method for appropriate calculations. The use of this method will be explained later in the text.

2 MATHEMATICAL MODEL

For the calculation of the current/potential distribution in the CP system the Finite Element Method (FEM), the Boundary Elements Method (BEM/FEM) and the coupled method (BEM) have been used. Figure 1 shows the principle of the CP system. The used methods in some areas have been noted in Figure 1. The Direct Boundary Elements Method (BEM method) is appropriate for solving stationary fields of electrical current in electrolyte with infinite boundaries, therefore this method has been used for calculation of protection potential in electrolyte. On the other hand, the FEM method is appropriate for solving the field

da). Raspodjela potencijala na međufaznoj granici (engl. interface) između elektroda i elektrolita rješavana je kombiniranom BEM/FEM metodom. Iterativno su proračunavani primjenom tzv. unaprijeđenog sekvencijalnog Dirichlet-Neumannovog postupka sukcesivnih podrelaksacija.

within limited areas and therefore this method has been used for calculations within the metal surfaces (electrodes). Potential distribution at the electrode/electrolyte boundary (interface) was calculated using the coupled BEM/FEM method. It was calculated iteratively using the so-called advanced sequential Dirichlet-Neumann procedure of successive under relaxations.



Slika 1 — Principijelna shema sustava katodne zaštite
Figure 1 — Principle scheme of cathodic protection system

2.1 Metoda konačnih elemenata

Metoda konačnih elemenata podrazumijeva diskretizaciju promatrane domene fizikalnog sustava (u danom slučaju to su elektrode) na konačan broj elemenata volumena određene geometrije. Rješavanje jednačbi polja obavlja se na nivou svakog konačnog elementa. Laplaceova parcijalna diferencijalna jednačba stacionarnog strujnog polja u određenoj domeni dana je kao:

2.1 The Finite Element Method

In the Finite Element Method the observed domain of the physical system (in this case, the electrodes) is divided into a finite number of elements of a certain geometry. The Solving of the field equations is made for each finite element. Laplace's Partial Differential Equation (LPDE) of stationary current field in observed domain is:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\gamma \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) = 0, \quad (1)$$

gdje je:

φ – nepoznata funkcija raspodjele potencijala, V,
 γ – specifična električna vodljivost, S/m.

whereat it is as follows:

φ – unknown function of potential distribution, V,
 γ – specific electrical conductivity, S/m.

Poslije primjene Galerkinove metode težinskih ostataka za raspodjelu potencijala može se pisati sljedeći sustav linearnih algebarskih jednačbi u matricnom obliku:

After Galerkin's weighted residuals procedure for the calculation of potential distribution is applied, the following system of linear algebraic equation can be written in the matrix form:

$$\mathbf{H}^{\text{FEM}} \cdot \boldsymbol{\varphi}^{\text{FEM}} = \mathbf{Q}^{\text{FEM}}, \quad (2)$$

gdje je:

$\boldsymbol{\varphi}^{\text{FEM}}$ – jednostupčana matrica nepoznatih električnih potencijala,
 \mathbf{H}^{FEM} – dvodimenzionalna matrica koeficijenata napisana za jedan 3 – D element čiji je opći član dan kao:

whereat it is as follows:

$\boldsymbol{\varphi}^{\text{FEM}}$ – column vector matrix of unknown potentials,
 \mathbf{H}^{FEM} – two-dimensional matrix of coefficients written for one 3 – D element where the common term is given by:

$$h_{ij}^{\text{FEM}} = \sum_{e=1}^{n_e} \left[\gamma \int_{V_e} \left(\frac{\partial N_i^e}{\partial x} \frac{\partial N_j^e}{\partial x} + \frac{\partial N_i^e}{\partial y} \frac{\partial N_j^e}{\partial y} + \frac{\partial N_i^e}{\partial z} \frac{\partial N_j^e}{\partial z} \right) dV_e \right], \quad (2a)$$

$i = 1, 2, \dots, n_f, j = 1, 2, \dots, n_f,$

gdje je:

V^e – volumen e -tog konačnog elementa,
 n_e – ukupan broj konačnih elemenata,
 n_f – ukupan broj čvorova konačnih elemenata u kojima se obavlja interpolacija potencijala,
 $N^e(x, y, z)$ – probna funkcija kojom se obavlja interpolacija potencijala na e -tom elementu na sljedeći način:

whereat it is as follows:

V^e – volume of the e th finite element,
 n_e – total number of finite elements,
 n_f – total number of finite element nodes in which interpolation of potential is made.
 $N^e(x, y, z)$ – shape functions that are used for interpolation of potential on the e th element in the following way:

$$= \sum_{j=1}^{n_f} N_j^e \cdot \varphi_j^e, \quad (2b)$$

φ_j^e – vrijednost potencijala u čvorovima konačnog elementa,
 \mathbf{Q}^{FEM} – jednostupčana matrica slobodnih članova čiji je opći član dan kao:

φ_j^e – value of potential in the nodes of the finite element,
 \mathbf{Q}^{FEM} – column vector matrix of the free terms where the common term is given by:

$$q_i^{\text{FEM}} = - \sum_{e=1}^{n_e} \left[\sum_{j=1}^{n_f} \left(\int_{S_{\Delta}^e} \gamma N_i^e \cdot N_j^e \cdot \frac{\partial \varphi_j^{\text{FEM}}}{\partial n} dS_{\Delta}^e \right) \right], \quad (2c)$$

S_{Δ}^e – granična površina e -tog elementa,

$\frac{\partial \varphi_j^{\text{FEM}}}{\partial n}$ – Neumannov granični uvjet.

Rješavanjem sustava Galerkinovih jednadžbi težinskih ostataka, uzimajući u obzir granične uvjete, dobiju se vrijednosti potencijala u čvorovima mreže konačnih elemenata. Matrica koeficijenata \mathbf{H} je rijetko popunjena matrica, pa je za rješavanje matricnog sustava jednadžbi (2) pogodno primijeniti Croutovu ili Dolittleovu metodu faktorizacije i

S_{Δ}^e – boundary surface of e th finite element,

$\frac{\partial \varphi_j^{\text{FEM}}}{\partial n}$ – Neumann boundary condition.

Solving the Galerkin's weighted residuals system of equations, taking into consideration the boundary conditions, gives the values of potential in the nodes of the finite element mesh. The coefficient matrix \mathbf{H} is a seldom filled matrix and therefore, in order to solve the matrix system of equations, the use of Crout's or Dolittle's factor-

algoritam zamjene naprijed – nazad uz primjenu tehnike rijetko popunjenih matrica.

ization method and the forward-backward switch algorithm together with the technique of rarely filled matrices is useful.

2.2 Direktna metoda rubnih elemenata

Metoda rubnih elemenata, koja se još naziva i metoda momenata, pogodna je za rješavanje polja u beskonačnim ili polubeskonačnim područjima. Matematički model direktne metode rubnih elemenata zasniva se na Greenovom simetričnom identitetu i jednadžbama kontinuiteta s kojima se unose granični uvjeti na granicama između domena s različitim medijima.

Neka se promatraju dva posebna slučaja proračuna 3-D elektroprovodnih polja, i to:

- slučaj kada se točka promatranja Q nalazi unutar proračunske domene V , i
- slučaj kada se točka promatranja Q nalazi na granici domene.

Neka se promatra volumen V koji je ograničen površinom S . Neka se u točki P nalazi izvor polja sa potencijalom $\varphi(P)$, a u točki Q se promatra funkcija potencijala $\varphi(Q)$.

Opća formula potencijala unutar, na granici i izvan proračunske domene, dana je izrazom:

2.2 The Direct Boundary Element Method

The Boundary Element Method, also known as method of moment, is appropriate for solving the field in infinite or semi-infinite domains. Mathematical model of the direct BEM method is based on Green's symmetrical identity as well as equations of continuity. These equations serve to apply boundary conditions on the boundaries between different media. Let us consider two different cases of calculating 3D stationary currents fields:

- the case when the observed point Q falls into domain V ,
- the case when the observed point Q falls on boundary media.

Volume V , which is bounded with surface S is observed. Field source with potential $\varphi(P)$ is at the point P , and at the point Q the function of potential $\varphi(Q)$ is observed.

The general formula for potential calculation inside, on the boundary, and outside of the domain is given with:

$$C(Q) \cdot \varphi(Q) + \int_S T(P, Q) \cdot \varphi(P) \cdot dS_P = \int_S G(P, Q) \cdot \frac{\partial \varphi(P)}{\partial n_P} \cdot dS_P \quad (3)$$

gdje je:

- $G(P, Q)$ – Greenova funkcija, odabrana ovisno o vrsti koordinatnog sustava,
- $T(P, Q)$ – derivacija Greenove funkcije u pravcu vektora vanjske normale \vec{n}_P na graničnu površinu,
- $\varphi(Q)$ – funkcija potencijala u točki promatranja Q ,
- $\varphi(P) + \frac{\partial \varphi(P)}{\partial n}$ – funkcija potencijala i njena normalna derivacija u točki izvora P ,
- $C(Q)$ – konstanta koja ima različite vrijednosti i to:

$$C(Q) = \begin{cases} 1 & \text{unutar domene } V \text{ (Poissonova formula)} \\ \frac{1}{2} & \text{na glatkoj granici u 3D domeni} \\ \frac{\alpha_{3-D}}{4\pi} & \text{na diskretnoj granici prostornog ugla } \alpha_{3-D} \\ 0 & \text{izvan domene } V \end{cases}$$

- dS_P – elementarna površina graničnog elementa diskretizacije izvora polja $\varphi(P)$ i $\frac{\partial \varphi(P)}{\partial n}$
- S – granična površina promatrane domene.

whereat it is as follows:

- $G(P, Q)$ – Green's function, chosen depending on the type of the coordinate system,
- $T(P, Q)$ – derivative of Green's function in direction of outward normal vector \vec{n}_P to boundary surface,
- $\varphi(Q)$ – function of potential in observed point Q ,
- $\varphi(P) + \frac{\partial \varphi(P)}{\partial n}$ – function of potential and its normal derivation in point of source P ,
- $C(Q)$ – constant that can acquire different values:

$$C(Q) = \begin{cases} 1 & \text{inside domain } V \text{ (Poisson formula)} \\ \frac{1}{2} & \text{on smooth boundary in 3-D domain} \\ \frac{\alpha_{3-D}}{4\pi} & \text{on discrete boundary of areal angle } \alpha_{3-D} \\ 0 & \text{outside of domain } V \end{cases}$$

- dS_P – elementary surface of boundary element of field source discretization $\varphi(P)$ and $\frac{\partial \varphi(P)}{\partial n}$
- S – boundary surface of observed domain.

Primjenom metode kolokacije u točki, uzimajući za težinsku funkciju Diracovu delta funkciju, u kolokacijskim točkama koje su odabrane da se nalaze u čvorovima Q_i rubnih elemenata (tj. u točkama promatranja potencijala $\varphi(Q_i)$) može se izbjeći integriranje funkcije težinskih ostataka, ali se mora napisati sustav od n jednažbi za n čvorova rubnih elemenata.

Nakon odgovarajućeg matematičkog postupka dobije se sljedeći sustav linearnih algebarskih jednažbi:

The integration of weighted residuals function can be avoided by using the collocation point procedure. Dirac's delta function in this procedure is the weighted function. Collocation points are at nodes Q_i of boundary elements (i.e. at points where potential $\varphi(Q_i)$ is observed). But a system of n equations for n nodes of boundary elements must be written.

After the appropriate mathematical procedure is applied, we get the following system of algebraic equations:

$$\mathbf{H}^{\text{BEM}} \cdot \boldsymbol{\varphi}^{\text{BEM}} = \mathbf{G}^{\text{BEM}} \cdot \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{n}} \right)^{\text{BEM}}, \quad (4)$$

gdje su:
 φ^{BEM} i $\left(\frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{n}} \right)^{\text{BEM}}$ – jednostupčane matrice promjenljivih varijabli.
 \mathbf{H}^{BEM} – dvodimenzionalna matrica koeficijenata koji su sastavljeni od dva dijela i čiji je opći član definiran kao:

whereat it is as follows:
 φ^{BEM} and $\left(\frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{n}} \right)^{\text{BEM}}$ – vector column matrix of variables,
 \mathbf{H}^{BEM} – two-dimensional coefficients of matrix, which are composed from two parts, where general term is defined by:

$$h_{i,j}^{\text{BEM}} = \sum_{e=1}^{n_e} \int N_j^e \cdot T_{i,j}^e \cdot dS_p + \delta_{i,j} \cdot C_i, \quad i = 1, 2, \dots, n_j, \quad j = 1, 2, \dots, n_e, \quad (4a)$$

\mathbf{G}^{BEM} – dvodimenzionalna matrica koeficijenata čiji je opći član definiran kao:

\mathbf{G}^{BEM} – two-dimensional coefficient matrix with general term defined by:

$$g_{i,j}^{\text{BEM}} = \sum_{e=1}^{n_e} \int N_j^e \cdot G_{i,j}^e \cdot dS, \quad i = 1, 2, \dots, n_j, \quad j = 1, 2, \dots, n_e \quad (4b)$$

δ_{ij} – Dirackova delta funkcija definirana kao
 $\int_V \delta(r) dV = \begin{cases} 1 & \text{za } r \in V \\ 0 & \text{za } r \notin V \end{cases}$
 V – volumen promatranog domena ograničen graničnom površinom promatrane domene S ,
 i – index koji se odnosi na točku promatranja Q ,
 j – index koji se odnosi na točku izvora P .

δ_{ij} – Dirack's delta function defined as
 $\int_V \delta(r) dV = \begin{cases} 1 & \text{za } r \in V \\ 0 & \text{za } r \notin V \end{cases}$
 V – volume of the observed domain bounded by the surface S ,
 i – index related to observed point Q ,
 j – index related to point of source P .

2.3 Kombinirana metoda BEM/FEM

Na granici elektrolit/zrak ili elektrolit/izolator (kada se radi o granici elektrolita s drugim elektrolitom velikog otpora) tzv. čistoj granici BEM domene, poznata je vrijednost jedne od promjenljivih (ili potencijala φ ili njegovog normalnog izvoda $\partial\varphi/\partial n_p$). Na primjer, na granici elektrolit/zrak

2.3 The Coupled Method BEM/FEM

On solution/air or solution/dielectric (when it is a boundary of solution and another solution with high resistivity) boundary, so called boundary of the BEM domain, only one variable value (potential φ or its derivative $\partial\varphi/\partial n_p$) is known. For example, on the solution/air (earth surface) boundary

(površina zemlje), zadan je homogeni Neumannov uvjet, tj. $\partial\varphi/\partial n_p = 0$ pa se računa φ .

Na granici FEM/BEM (granice elektrolit/anoda i elektrolit/cathoda) nepoznate su i φ i $\partial\varphi/\partial n_p$. U tom slučaju piše se sustav jednačbi uz uvažavanje Dirichletovih i Neumannovih rubnih uvjeta. Pišu se i dodatne jednačbe kontinuiteta za φ i $\partial\varphi/\partial n_p$, koje vrijede na granici FEM/BEM.

U ovom radu korišten je unaprijeđeni sekvencijalni Dirichlet – Neumannov algoritam BEM/FEM, koji se sastoji iz sljedećih koraka:

- podjela proračunske domene na BEM i FEM poddomene,
- zadavanje početnih vrijednosti potencijala na BEM/FEM granicama,
- započinjanje iterativnog ciklusa koji traje do zadovoljenja uvjeta konvergencije.

2.3.1 Rješavanje polja u BEM domeni

Na granici BEM domene, osim na samoj granici BEM/FEM, zadani su Dirichletovi ili Neumannovi granični uvjeti. U ovom slučaju matricni sustav (4), može se pisati u sljedećem obliku uzimanjem u obzir nepoznatih φ ili $\partial\varphi/\partial n_p$ s obje strane granice (BEM)/(BEM/FEM):

the homogenous Neumann's condition is given $\partial\varphi/\partial n_p = 0$, so φ is calculated.

In this case an equation system is made for each boundary of the domain, taking into consideration Dirichlet's and Neumann's boundary conditions. On the FEM/BEM boundary, additional equations of continuity for φ or $\partial\varphi/\partial n_p$ are written.

In this paper, the advanced sequential Dirichlet-Neumann BEM/FEM algorithm is used. This algorithm consists of the following steps:

- partitioning of the whole domain into BEM and FEM domains,
- defining initial potential values on the BEM/FEM boundary,
- starting the iterative procedure which lasts until the set convergence condition is fulfilled.

2.3.1 Calculation of the electric field in the BEM domain

Dirichlet or Neumann boundary conditions are set for boundary of the BEM domain, except on the boundary between the BEM and FEM domains. In this case the matrix system (4), considering variables φ or $\partial\varphi/\partial n_p$ on both boundary sides (BEM)/(BEM/FEM), could be written in the following form:

$$\mathbf{H}^{\text{BEM}} \begin{pmatrix} \varphi_{n+1}^{\text{BEM}} \\ \varphi_{n+1}^{\text{BEM/FEM}} \end{pmatrix} - \mathbf{G}^{\text{BEM}} \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial\varphi}{\partial n}\right)_{n+1}^{\text{BEM}} \\ \left(\frac{\partial\varphi}{\partial n}\right)_{n+1}^{\text{BEM/FEM}} \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (5)$$

gdje je:

$\mathbf{0}$ – jednostupčana nul-matrica.

U sustavu (5) potrebno je uzeti u obzir Dirichletove i Neumannove granične uvjete uključujući i vrijednosti potencijala na granici BEM/FEM iz prethodnog koraka iteracije. Rješavanjem sustava (5) dobit će se vrijednosti normalne komponente polja na granici BEM/FEM:

whereat it is as follows:

$\mathbf{0}$ – column nul – matrix.

In the system (5) it is necessary to take into account the Dirichlet and Neumann boundary conditions including the potential values at the BEM/FEM boundary from the previous iteration step. By calculating the system (5), the normal components of the electric field at the BEM/FEM boundary will be found:

$$\left(\frac{\partial\varphi}{\partial n}\right)_{n+1}^{\text{BEM/FEM}} \quad (6)$$

2.3.2 Primjena jednačbi kontinuiteta na granici BEM/FEM

Na granici površina rubnih i konačnih elemenata $S_{\text{BEM}} - S_{\text{FEM}}$ moraju biti zadovoljeni uvjeti kontinuiteta:

$$\begin{aligned} \gamma^{\text{FEM}} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{n}} \right)_{n+1}^{\text{FEM/BEM}} &= -\gamma^{\text{BEM}} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{n}} \right)_{n+1}^{\text{BEM/FEM}} \Rightarrow \\ \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{n}} \right)_{n+1}^{\text{FEM/BEM}} &= -\frac{\gamma^{\text{BEM}}}{\gamma^{\text{FEM}}} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{n}} \right)_{n+1}^{\text{BEM/FEM}} . \end{aligned} \quad (7)$$

Za katodnu i anodnu površinu uzimaju se u obzir polarizacijske krivulje, kako slijedi:

2.3.2 Calculation of the Continuity Equation at the BEM/FEM Boundary

On the interface between the finite and boundary elements $S_{\text{BEM}} - S_{\text{FEM}}$, the equation of continuity must be satisfied:

Polarization curves are considered for the anode and cathode surfaces, as follows:

$$j_{\text{totalC}} = \gamma \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{n}} \right)_{n+1}^{\text{BEM/FEM}} ; \quad j_{\text{totalA}} = \gamma \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{n}} \right)_{n+1}^{\text{BEM/FEM}} , \quad (8)$$

gdje je:

j_{totalC} – ukupna gustoća struje na katodi, mA/m^2 ,
 j_{totalA} – ukupna gustoća struje na anodi, mA/m^2 .

whereat it is as follows:

j_{totalC} – total current density on the cathode, mA/m^2 ,
 j_{totalA} – total current density on the anode mA/m^2 .

Kao rezultat se dobiju Neumannovi granični uvjeti, koji važe u pravcu normale na FEM strani interfejsa FEM/BEM na anodi i katodi. (Nije mi rečenica jasna pa Vas molim obratite pozornost i uskladite sa stručnom terminologijom, ako treba. Lektor)

As result we get the Neumann boundary conditions that are applicable in the direction of the normal vector on the FEM side of the BEM/FEM interface at the anode and the cathode.

2.3.3 Rješavanje polja u FEM domeni

U ovom koraku obavlja se rješavanje polja u FEM domeni. Na granici FEM domene, osim na samoj granici FEM/BEM, zadani su Dirichletovi ili Neumannovi granični uvjeti. U ovom slučaju matični sustav (2) može se pisati u sljedećem obliku s uzimanjem u obzir nepoznatih φ i $\partial \varphi / \partial n_p$ s obje strane granice (FEM)/(FEM/BEM):

2.3.3 Calculation of the Electric Field in the FEM Domain

In this step the electric field in the FEM domain is calculated. The Dirichle or Neumann boundary conditions are set for the FEM domain boundary except for the FEM/BEM boundary itself. Therefore, considering the variables φ or $\partial \varphi / \partial n_p$ on both boundary sides (FEM)/(FEM/BEM), the matrix system (2) can be written in the following form:

$$\mathbf{H}^{\text{FEM}} \cdot \begin{pmatrix} \varphi_{n+1}^{\text{FEM}} \\ \varphi_{n+1}^{\text{FEM/BEM}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{Q}_{n+1}^{\text{FEM}} \\ \mathbf{Q}_{n+1}^{\text{FEM/BEM}} \end{pmatrix} , \quad (9)$$

gdje se elementi matrice $\mathbf{Q}_{n+1}^{\text{FEM}}$ izračunavaju primjenom izraza :

where the matrix elements $\mathbf{Q}_{n+1}^{\text{FEM}}$ are calculated using the expression:

$$q_i^{\text{FEM}} = -\sum_{e=1}^{n_e} \left[\sum_{j=1}^{n_f} \left(\int_{S_{\alpha}^e} \gamma \cdot N_i^e \cdot N_j^e \cdot \frac{\partial \varphi_j^{\text{FEM}}}{\partial n} \cdot dS \right) \right] . \quad (9a)$$

Kao rezultat se dobije potencijal $\varphi_n^{\text{FEM/BEM}}$ na sučelju FEM/BEM.

The outcome of the calculation are potentials $\varphi_n^{\text{FEM/BEM}}$ at the FEM/BEM interface.

2.3.4 Korekcija proračunatih potencijala na granici BEM/FEM

U ovom koraku obavlja se korekcija proračunatih potencijala na granici BEM/FEM iz prethodnog koraka. Korekcija se obavlja primjenom metode sukcesivnih podrelaksacija:

2.3.4 The Correction of Calculated Potentials at the BEM/FEM Boundary

In this step, the correction of the potentials calculated in the previous step at the FEM/BEM boundary is performed. The correction is made by using the successive under-relaxation method:

$$\varphi_{n+1}^{\text{BEM/FEM}} = (1-\theta) \cdot \varphi_n^{\text{BEM/FEM}} + \theta \cdot \varphi_{n+1}^{\text{FEM/BEM}}, \quad (10)$$

gdje je:

θ – faktor podrelaksacije koji se uzima u intervalu od 0 do 1.

whereat it is as follows:

θ – under-relaxation factor whose value is in the range from 0 to 1.

2.3.5 Provjera konvergencije iterativnog ciklusa i zaustavljanje kada se postigne odgovarajuća točnost

Napravljen je računarski program CP_Zildžovski_2009.f90 u kojem je korištena opisana kombinirana metoda konačnih i rubnih elemenata. Kompletan proračun je oblikovan u navedenom programu.

2.3.5 The Verification of the Convergence of the Iterative Cycle and Shutting Down When the Required Accuracy Is Reached

Computer software, CP_Zildžovski_2009.f90, was created for CP calculation. The described coupled method of finite and boundary elements was implemented in this program. The complete calculation was made using this program.

3 GRANIČNI UVJETI NA POVRŠINI ANODE I KATODE

Parcijalne elektrokemijske reakcije, koje se odvijaju istodobno na površini katode, a koje su interesantne za koroziju čelika, dane su u sljedećim jednadžbama:

- $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ parcijalna anodna reakcija,
- $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$ reakcija redukcije kisika,
- $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$ parcijalna reakcija razvijanja vodika.

Ove reakcije se odvijaju istodobno na površini čelika u realnim korozivnim uvjetima.

Ukupna vrijednost polarizacijske struje na katodnoj površini definirana je jednadžbom:

3 BOUNDARY CONDITIONS ON THE ANODE AND THE CATHODE SURFACE

Partial electrochemical reactions, which happen simultaneously on the cathode surface and are of interest in the corrosion of steel, are as follows:

- $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ partial anode reaction,
- $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$ oxygen reduction reaction,
- $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$ partial hydrogen evolution reaction.

These reactions occur simultaneously on the steel surface in real corrosion conditions.

Total polarization current density on the cathode surface is defined by:

$$j_{\text{totalC}} = j_{0\text{Fe}} \cdot 10^{\frac{\varphi - \varphi_{\text{el}} - \varphi_{\text{Fe}}}{\beta_{\text{Fe}}}} - j_{\text{lim},\text{O}_2} \cdot \left(1 + 10^{\frac{\varphi - \varphi_{\text{el}} - \varphi_{\text{O}_2}}{\beta_{\text{O}_2}}} \right)^{-1} - j_{0\text{H}_2} \cdot 10^{\frac{-(\varphi - \varphi_{\text{el}} - \varphi_{\text{H}_2})}{\beta_{\text{H}_2}}}, \quad (11)$$

gdje je:

- j_{0Fe} – gustoća struje koja odgovara reakciji otapanja metala $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$,
 j_{0H_2} – gustoća struje koja odgovara reakciji razvijanja vodika $2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$,
 j_{lim, O_2} – gustoća struje koja odgovara reakciji redukcije kisika $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$,
 φ – potencijal metala u odnosu na Cu/CuSO₄ referentnu elektrodu,
 φ_{el} – potencijal elektrolita u neposrednoj blizini čeličnog objekta,
 β_{Fe}, β_{O_2} i β_{H_2} – Tafelovi koeficijenti (nagibi) za odgovarajuće reakcije na katodi [7],
 $\varphi_{Fe}, \varphi_{O_2}$ i φ_{H_2} – korozivni potencijali za odgovarajuće reakcije, respektivno.

Elektrokemijska reakcija na anodnoj površini je:

whereat it is as follows:

- j_{0Fe} – current density due to reaction $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$,
 j_{0H_2} – current density due to reaction, $2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$,
 j_{lim, O_2} – current density due to reaction $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$,
 φ – metal potential regarding the CSE (Copper Sulphate Electrode) referent electrode,
 φ_{el} – potential of the soil close to the steel structure,
 β_{Fe}, β_{O_2} and β_H – Tafel's coefficients (slopes) of corresponding cathodic reactions [7],
 $\varphi_{Fe}, \varphi_{O_2}$ i φ_{H_2} – corrosion potentials of corresponding reactions, respectively.

Electrochemical reaction on the anode surface is:

whereat it is as follows:



gdje je:

- z – valentnost metala Me, odnosno broj izmijenjenih elektrona u reakciji.

Ovoj reakciji odgovara analitički izraz za polarizacijsku struju:

- z – valence of metal Me (number of exchanged electrons in reaction).

For this reaction corresponding analytical equation for polarization current is:

whereat it is as follows:

$$j_{totalA} = j_{0, O_2} \left(10^{\frac{\varphi - \varphi_{el} - \varphi_{corA}}{\beta_A}} - 1 \right) \quad (12)$$

gdje je:

- j_{0, O_2} – granična gustoća struje prijenosa mase za redukciju kisika,
 β_A – Tafelov koeficijent (nagib) za reakciju na anodi,
 φ_{corA} – korozivni potencijal za reakciju na anodi.

Na osnovi prethodnih jednadžbi može se konstatirati da se radi o izrazito nelinearnim polarizacijskim dijagramima, posebno na katodnoj površini.

- j_{0, O_2} – mass transfer limited current density for oxygen reduction,
 β_A – Tafel's coefficients (slopes) of anodic reactions
 φ_{corA} – corrosion potentials of reaction on the anode.

Based on the previous equation, it can be concluded that the polarization diagrams are nonlinear, especially on the cathode surface.

3.1 Granični uvjeti s nelinearnim polarizacijskim karakteristikama

Ako se analizira polarizacijska karakteristika katodne čelične površine u sustavu primijenjene katodne zaštite s galvaniskim anodama od cinka, vidi se da je dijagram za ukupnu struju nelinearan. Ova nelinearnost je utoliko veća što je manje odstupa-

3.1 Boundary Conditions with Nonlinear Polarization Characteristics

If we analyze the polarization characteristic of the steel cathode surface when the CP system with galvanic cast zinc anodes is applied, we notice that the total current diagram is non linear. This non linearity is greater if the deviation (over voltage or polarization) from corrosion potential

nje (prenapon ili polarizacija) od korozivnog potencijala. U realnim uvjetima radi se o korozivnom potencijalu od oko $-0,2$ V u odnosu na Cu/CuSO₄ referentnu elektrodu. Spajanjem cinkove anode s katodnom površinom katodna površina se polarizira za oko 200 mV do 300 mV, što znači da se uspostavlja novi potencijal na katodnoj površini od oko $-0,4$ V do $-0,5$ V u odnosu na Cu/CuSO₄ referentnu elektrodu. U intervalu od $-0,2$ V do $-0,5$ V polarizacijska karakteristika je potpuno nelinearna. Nelinearnost ima veću važnost za praktičan proračun kada se radi o većim Tafelovim nagibima, odnosno što je slabija izolacija čelika.

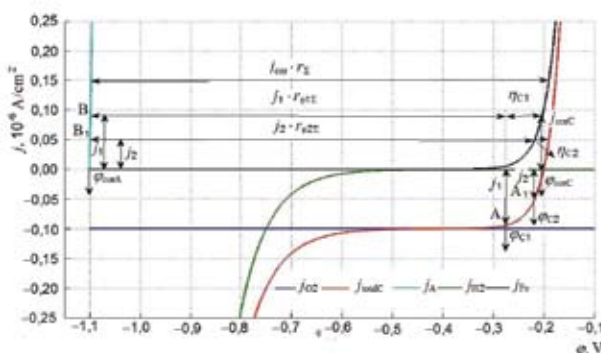
Kada se radi o velikim nelinearnostima, mora se voditi računa o donjoj i gornjoj granici potencijala u kojima se obavlja proračun potencijala i najčešće se to rješava uvođenjem logaritamske osi za struju.

Slika 2 dovoljno jasno objašnjava fizikalni model analize elektrokemijskih elektrodnih reakcija te njihov utjecaj na polarizacijske dijagrame anodne i katodne površine.

is smaller. In real conditions corrosion potential is approximately $-0,2$ V vs CSE. When we connect a cast zinc anode with a cathode surface that surface polarizes for approximately 200 mV to 300 mV which means that new potential of approximately $-0,4$ V to $-0,5$ V vs CSE is established at the cathode surface. In the interval from $-0,2$ V to $-0,5$ V the polarization characteristic is completely non linear. This non linearity has greater influence to the calculation if the Tafel slopes are greater, meaning that the steel isolation is weaker.

When this non linearity is greater, we must consider the upper and lower potential limits in which potential calculation takes place. This problem is usually solved by introducing a logarithmic axis for current.

The physical model used for analysis of electrochemical reactions on the anode and cathode surfaces, as well as their influence to anode and cathode polarization diagrams, is shown in Figure 2.



Slika 2 — Polarizacijski dijagram za galvanski element čelik – cink
Figure 2 — Diagram of polarization for galvanic element steel – zinc

Za crtanje navedenih polarizacijskih dijagrama na slici 2 korištene su vrijednosti dane u tablici 1.

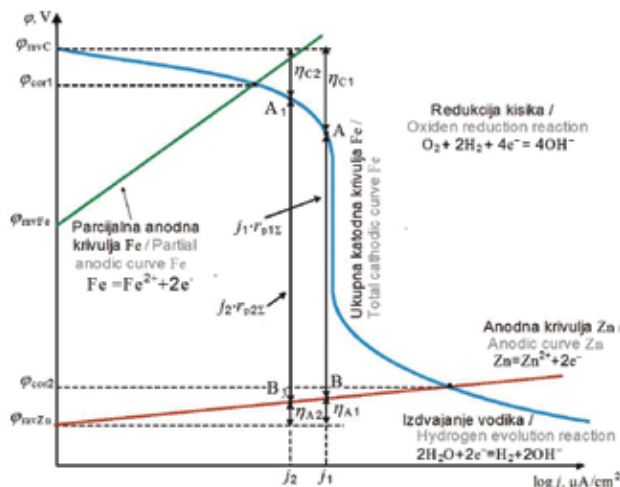
To plot the polarization diagram from Figure 2, the parameters listed in Table 1. were used.

Tablica 1 – Vrijednosti koeficijenata za crtanje polarizacijskog dijagrama
Table 1 – Values of polarization parameters

Parametar / Parameter	Vrijednost / Value	Parametar / Parameter	Vrijednost / Value
j_{lim, O_2}	0,1 $\mu A/cm^2$	ϕ_{Fe}	-200 mV
j_{0, O_2}	1,0 $\mu A/cm^2$	ϕ_{O_2}	$+100$ mV
$j_{0, Fe}$	0,1 $\mu A/cm^2$	ϕ_{H_2}	-750 mV
j_{0, H_2}	0,1 $\mu A/cm^2$	ϕ_{corA}	-1100 mV
β_{Fe}	0,06 V/dekadi / dec	β_{H_2}	0,1326 V/dekadi / dec
β_{O_2}	0,059 V/dekadi / dec	β_A	0,059 V/dekadi / dec

Na slici 3 prikazan je pojednostavljeni polarizacijski dijagram u polulogaritamskom razmjeru. Kada sustav katodne zaštite nije uključen, oba metala (čelik i cink) imaju svoje ravnotežne potencijale.

Figure 3 shows a simplified polarization diagram in a semi-logarithmic scale. When the CP system isn't applied, both metals (steel and zinc) have their own equilibrium potentials.



Slika 3 — Shematski radni uvjeti galvanskog elementa čelik – cink
Figure 3 — Scheme work conditions of galvanic element steel – zinc

U trenutku puštanja sustava katodne zaštite u pogon, radna točka na polarizacijskom dijagramu katodne površine je točka A s gustoćom zaštitne struje j_1 . Istodobno, pri istoj zaštitnoj struji, radna točka polarizacijskog dijagrama anodne površine je točka B. Pad napona u elektrolitu je $j_1 \cdot r_{\text{p1}\Sigma}$, Ωm^2 gdje je sa $r_{\text{p1}\Sigma}$, Ωm^2 označen ukupni specifični polarizacijski otpor u elektrolitu koji obuhvaća i prijelazne polarizacijske otpore anoda/elektrolit i katoda/elektrolit.

When the CP system is put into service, initial operating point on the polarization diagram is the point designated by A with the corresponding current density j_1 . Simultaneously, for the same protection current, the operating point of the anode is B. The voltage drop in electrolyte is equal to, $j_1 \cdot r_{\text{p1}\Sigma}$, Ωm^2 where $r_{\text{p1}\Sigma}$, Ωm^2 is the total specific polarization resistance in electrolyte including the polarization resistances at both the anode/electrolyte and the cathode/electrolyte boundary.

Ukoliko je specifični električni otpor elektrolita mali, onda je i pad napona u elektrolitu mali. Pri istim ostalim uvjetima, iz zbroja padova napona može se zaključiti da je veća i polarizacija katodne površine, odnosno veća gustoća zaštitne struje j .

If soil resistivity is small, then the voltage drop in the electrolyte is small as well. From the sum of voltage drops it can be concluded that the polarization of the cathode surface is greater as is the current density j , if the other conditions remain constant.

Poslije određenog vremena, to jest nakon polarizacije katodne površine i povećavanja prijelaznog otpora galvanske anode dolazi do smanjivanja zaštitne struje. To smanjivanje je rezultat povećanja ukupnog polarizacijskog otpora u električnom krugu katodne zaštite. U tom slučaju je radna točka A_1 (katodna površina), odnosno B_1 (anodna površina) sa zaštitnom strujom j_2 .

After the polarization of the cathode surface, the galvanic anode resistance increases which leads to the decrease of protection current. That decrease leads to the increase of total polarization resistance in the cathodic protection electric circuit. The new CP operating point is A_1 (cathode surface) and B_1 (anode surface) with protection current j_2 .

U ovom slučaju, pojavljuje se pad napona na ukupnom polarizacijskom otporu koji iznosi $j_2 \cdot r_{\text{p2}\Sigma}$. Ovaj pad napona je, bez obzira na smanjenje struje, veći od početnog pada napona na ukupnom pri-

In this case there is a voltage drop at the total polarization resistance. This voltage drop is, regardless of reduced current density, greater than the initial voltage drop at the total boundary re-

jelaznom otporu. Ovo pokazuje da je povećanje ukupnog polarizacijskog otpora dominantnije u odnosu na smanjenje gustoće zaštitne struje.

sistance. This shows that an increase of total polarization resistance is more dominant than a decrease of current density.

4 KRATAK OPIS SUSTAVA KATODNE ZAŠTITE NA KOJEM SU OBAVLJANI PRORAČUNI I MJERENJA

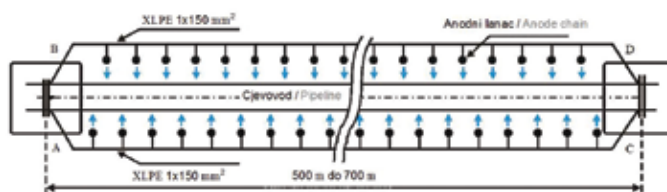
Katodna zaštita s galvanskim anodama primijenjena je na sustavu za vodoopskrbu koji je napravljen od armiranobetonskih cijevi bez izolacije promjera 4 000 mm. Na ovom objektu su obavljena i numerički proračuni i mjerenja potencijala. Cjevovod je položen u tlo (pustinjski pijesak) na odgovarajućoj dubini. Šahtovi, koji predstavljaju krajeve dionica, pristupačni su za spajanje kabela instalacija, kontrolno-mjernih mjesta i slično. Dužine pojedinih dionica između šahtova su 500 m do 600 m. Na potpunom sustavu osiguran je električni kontinuitet prenapregnute žice. S unutarnje strane cjevovoda postavljen je limeni plašt radi vodonepropusnosti. S vanjske strane limenog plašta, zbog mehaničkih razloga, postavljena je spiralno prenapregnuta čelična žica promjera 4 mm do 6 mm. Ova prenapregnuta žica je predmet katodne zaštite.

Projekt katodne zaštite odnosi se na postavljanje zaštitnog sustava s galvanskim anodama od legura cinka. Na slici 4 dana je principijelna shema sustava katodne zaštite jedne dionice cjevovoda.

4 A SHORT DESCRIPTION OF THE CP SYSTEM ON WHICH THE MEASUREMENTS HAVE BEEN MADE

Cathodic protection with galvanic anodes was applied on a watering system made of steel armored-concrete pipes 4 000 mm in diameter. Numerical calculations and potential measurements were performed at this object. The pipeline is situated in the ground (desert sand) on an adequate depth. Manholes, which represent the end of sections, are accessible for connections of cable installations, control-measurement points etc. Each section is of a 500 m to 600 m length on which electrical continuity is enabled. The inner layer of the pipeline is coated with steel for waterproofing reasons. Besides the steel cylinder, placed spirally for mechanical reasons, on the outer side of the tin pipe a pre-stressed steel wire (4 mm to 6 mm in diameter) is helically wrapped around the steel cylinder. This pre-stressed steel wire is the subject of cathodic protection.

This project refers to the installation of the protection system with galvanic cast zinc anodes. The CP system for one section applied to this object is presented in Figure 4.



Slika 4 — Sustav katodne zaštite jedne dionice cjevovoda
Figure 4 — CP system for one section of the pipeline

Katodna zaštita je realizirana, prema projektu, postavljanjem dubinskih cinkovih lanaca izmjenično, s obje strane cjevovoda na međusobnom razmaku od 6 m. Anodni lanci su postavljeni na dubini od 5 m do 15 m i udaljeni su od osi cjevovoda za 5,5 m.

Anodni materijal je cinkova legura s teoretskim elektrokemijskim kapacitetom 820 Ah/kg, ukupne mase 45,14 kg. Dimenzije anodnog lanca su 6 400 mm x 150 mm uključivo i punilo (engl. backfill). U jednom anodnom lancu ima 6 anoda. Principijel-

Cathodic protection is realised by means of cast zinc anodic strings, placed on both sides of the pipelines at a 6 m distance between each anode. Anodic strings are also placed vertically at a depth between 5 m and 15 m, and are 5,5 m away from the pipeline axis.

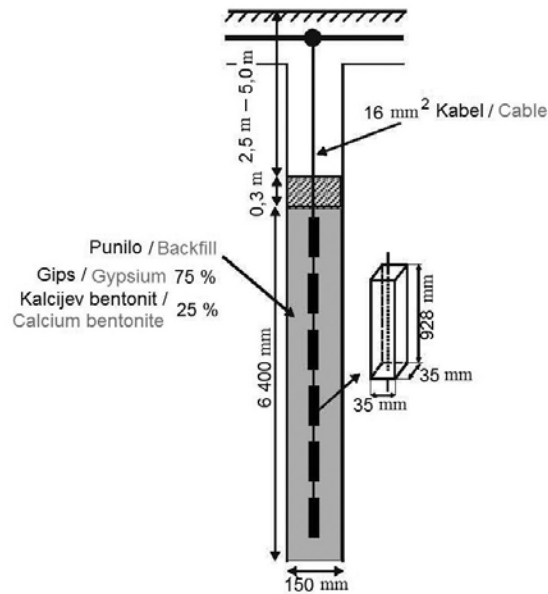
The anodic material used is a zinc alloy with a theoretical electrochemical capacity of 820 Ah/kg and a total mass of 45,14 kg. Anodic strings are constructed with 6 pcs of cast zinc anodes with an anodic groundbed measuring 6 400 mm x 150 mm

na shema anodnog lanca prikazana je na slici 5.

Anode od legure cinka (cink preko 99 %) liju se u kalupe dimenzija oko 930 mm x 33 mm x 33 mm poprečnog presjeka u obliku trapeza kroz čiju sredinu prolazi galvanizirana čelična žica promjera 4 mm. Po jednom lancu instaliraju se tri centralizera.

(including the backfill). Anodic strings are connected as shown in Figure 5.

Zinc alloy anodes (zinc over 99 %) are cast in models measuring approx. 930 mm x 33 mm x 33 mm and their cross-section is trapeze shaped. Galvanized steel wire, 4 mm in diameter, goes through the center.



Slika 5 — Anodni lanac
Figure 5 — Anode groundbed

Proračun otpora rasprostiranja za anodni lanac ukopan na dubini h izvršen je pomoću sljedeće formule koja se često koristi u anglosaksonskoj literaturi:

Calculation of resistance for anodic groundbed, buried at depth h is made using the following equation. This equation is often used in technical literature in English:

$$R_{AL} = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \left(\ln \frac{2 \cdot l}{r_B} + \frac{1}{2} \ln \frac{4h+l}{4h-l} + \frac{\rho_B}{\rho} \ln \frac{r_B}{r_A} \right), \quad (14)$$

gdje su:

whereat it is as follows:

R_{AL} – otpor rasprostiranja za anodni lanac,
 l – dužina anodnog lanca (u projektu: $l=6400$ mm),
 r_B – polumjer anodnog ležišta s punilom (u projektu: $2r_B = 150$ mm),
 r_A – polumjer anodnog ležišta bez punila (u projektu: $2r_A = 35$ mm),
 ρ_B – specifični električni otpor punila (u projektu: $\rho_B = 3,0 \Omega\text{m}$),
 ρ – specifični električni otpor elektrolita, Ωm ,
 h – prosječna dubina ukapanja anodnog lanca (u projektu: $h = 5\ 000$ mm).

R_{AL} – resistance for anodic groundbed,
 l – anodic chain length (in this project $l=6400$ mm),
 r_B – anodic groundbed (including backfill) diameter (in this project $2r_B = 150$ mm),
 r_A – anodic groundbed (without backfill) diameter (in this project $2r_A = 35$ mm),
 ρ_B – soil resistivity of backfill (in this project $\rho_B = 3,0 \Omega\text{m}$),
 ρ – soil resistivity of electrolyte, Ωm ,
 h – average depth at which anodic chains are buried (in this project $h = 5\ 000$ mm).

5 REZULTATI PRORAČUNA I MJERENJA

Za sustav katodne zaštite s galvanskim anodama od cinka koji je primijenjen na objektu opisanom u prethodnom poglavlju obavljani su numerički proračuni korištenjem softvera CP_Zildžovski_2009.F90. U radu su prezentirani proračuni napravljeni za jednu dionicu dužine oko 30 m. Pretpostavlja se da je elektrolit homogen s vrijednošću specifičnog električnog otpora od 500 Ωm . Grafički rezultati numeričkih proračuna su dani u nastavku. Na istom dijelu dionice su tijekom instaliranja sustava katodne zaštite i kasnije tijekom njegove eksploatacije obavljana periodična mjerenja potencijala i gustoće struje. Rezultati mjerenja potencijala dani su u nastavku.

5.1 Rezultati proračuna

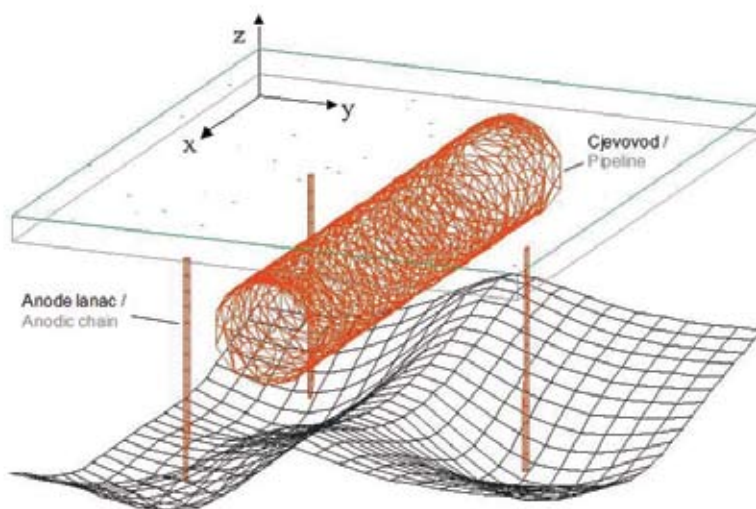
Slika 6 ilustrira raspodjelu zaštitnih potencijala u 3D prostoru na jednoj sekciji od 18 m. Razmak između dva anodna lanca s iste strane cjevovoda je 12 m. Najnegativnija vrijednost potencijala u elektrolitu je u neposrednoj okolini anodnog lanca.

5 RESULTS OF NUMERICAL CALCULATIONS AND MEASUREMENTS

For CP systems with galvanic zinc anodes, applied to the object described in previous chapter, numerical calculations using CP_Zildžovski 2009.F90 software have been made. These calculations refer to the 30 m long section. Soil resistivity in this section is 500 Ωm . The results of the numerical calculations are given in diagrams. The potential measurement data for this section are given as well. Periodic measurements of current density and potential have been made on the same section during and after the installment of the cathodic protection system.

5.1 Results of Numerical Calculations

Figure 6 shows the protection potential distribution in a 3D area on one 18 m long section. Distance between two anodic chains is 12 m. The most negative value of potential in the electrolyte is around the anodic chains.



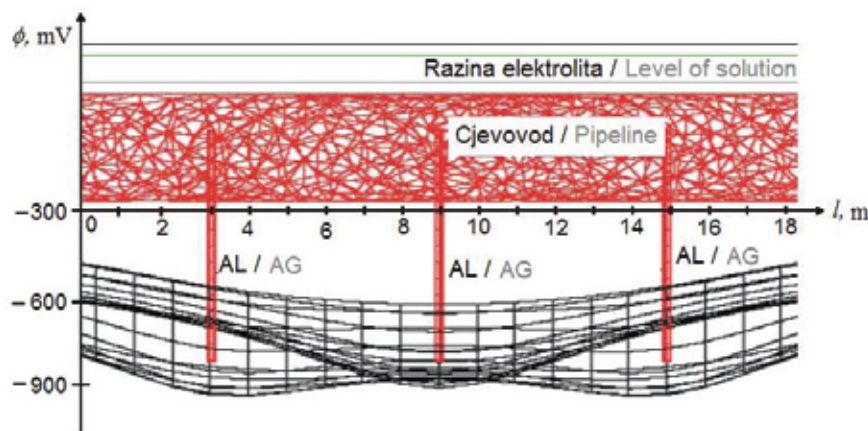
Slika 6 — Raspodjela zaštitnih potencijala
Figure 6 — Protection potential distribution (cross-section)

Uzdružni profil cjevovoda s odgovarajućom proračunatom raspodjelom potencijala dani su na slici 7. Ovakav način prikazivanja proračunatih vrijednosti raspodjele potencijala pogodan je za definiranje međusobnog razmaka anodnih lanaca (na slici označeno sa AL) odnosno primjene kriterija minimalnih zaštitnih potencijala duž objekta.

The longitudinal profile of the pipeline with adequate calculated potential distribution is shown in Figure 7. This way of showing calculated values of potential distribution is useful for defining the distance between anodic chains so we can apply minimal protection criteria on the object.

Ako se obavi kompariranje raspodjele potencijala sa slike 7 i izmjerenih vrijednosti zaštitnih potencijala sa slike 11, vidi se da postoji relativno dobro slaganje rezultata. Naravno, odstupanja su prisutna, što je rezultat oštećenja betonskog omotača u fazi instaliranja cjevovoda, promjene vrijednosti specifičnog otpora tla, itd.

If we compare potential distribution shown in Figure 7 with measured protection potential values, we can see that there is a relatively good matching. Of course, deviations occur as a result of damage to the concrete shell. The shell was damaged in the installation phase as a result of change in specific soil resistivity.



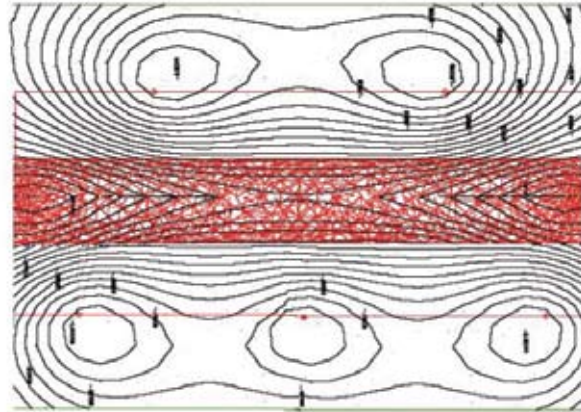
Slika 7 — Raspodjela potencijala (uzdužni presjek)
Figure 7 — Potential distribution (longitudinal profile)

Najnegativnija vrijednost potencijala je na mjestima gdje su locirana anodna ležišta, što je i logično. S dijagrama se može vidjeti da na tim dijelovima potencijal dostiže vrijednosti i do $-1\ 000\ \text{mV}$ na samom mjestu anodnog ležišta. Isto tako, vidi se da je potencijal iznad samog cjevovoda koji su najbliži anodnim lancima jednak oko $-600\ \text{mV}$. Vrijednosti potencijala iznad cjevovoda mijenjaju se unutar granica $-550\ \text{mV}$ do $-600\ \text{mV}$, što je dosta dobro slaganje s izmjerenim vrijednostima danim na slici 11.

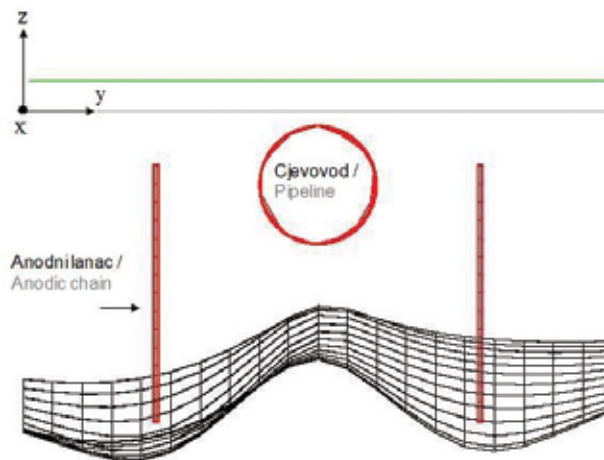
Poprečni presjek armirano betonskog cjevovoda s prenapregnutom armaturom i raspodjela potencijala u odnosu na anodne lance dani su na slici 9. Primjećuje se opadanje (smanjivanje negativnih vrijednosti) potencijala od anodnog lanca prema cjevovodu. Ova promjena potencijala je također, vidljiva i na slici 8.

Figure 7 shows potential distribution along the pipeline. The most negative value of potential is at the points where the anode groundbeds are positioned. We can see from the diagram that the potential is up to $-1\ 000\ \text{mV}$ at the exact place where the anode groundbed is positioned. Also, we can see that potential just above the pipeline, the closest to the anode chains, is $-600\ \text{mV}$. The values of potential above the pipeline are from $-550\ \text{mV}$ to $-600\ \text{mV}$ which is a very good matching with the measured values given in Figure 11.

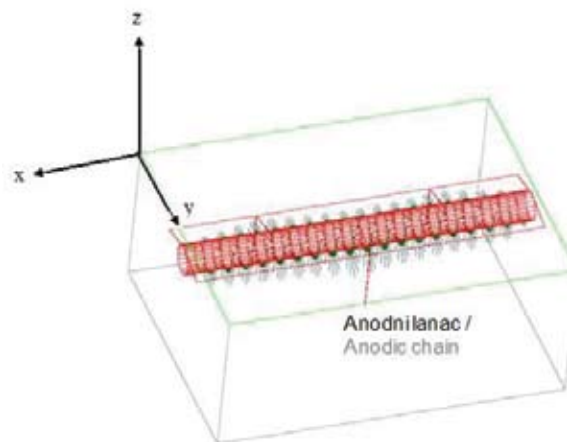
A cross section of pipeline with PCCP and potential distribution compared to the anode chains is given in Figure 9. We notice a potential attenuation (decrease of negative values) from the anode chains towards the pipeline. This potential shift is also shown in Figure 8.



Slika 8 — Raspodjela potencijala na površini zemlje
Figure 8 — Potential distribution on the earth surface



Slika 9 — Raspodjela potencijala (poprečni presjek)
Figure 9 — Potential distribution (cross-section)



Slika 10 — Raspodjela struje katodne zaštite ($\rho = 500 \Omega\text{m}$, rastojanje anodno ležište – cjevovod 5,5 m)
Figure 10 — CP current distribution ($\rho = 500 \Omega\text{m}$), anode groundbed-pipeline distance 5,5 m)

5.2 Rezultati mjerenja

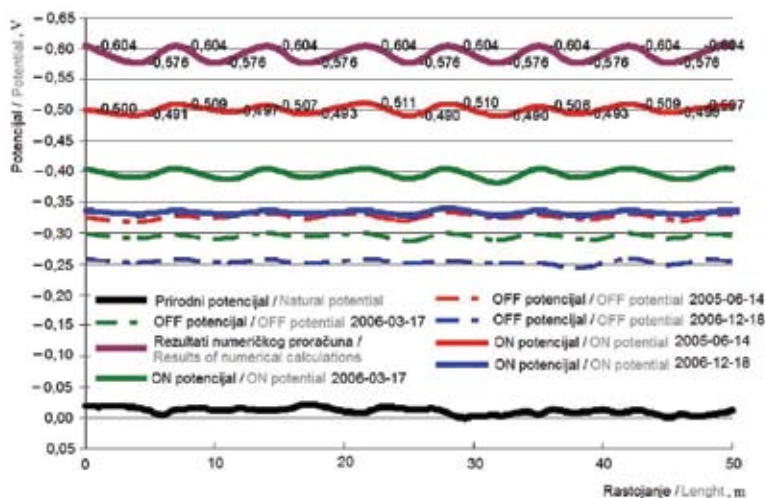
Na slici 11 OFF potencijal predstavlja izmjerenu vrijednost potencijala cjevovoda neposredno nakon isključenja sustava katodne zaštite, a ON potencijal predstavlja vrijednost potencijala cjevovoda izmjerenu kada je sustav katodne zaštite u radu.

Sa slike 11 se vidi da vrijednosti koje su proračunate pomoću numeričkog programa odstupaju od inicijalnog ON potencijala (2005-06-14) za manje od 20 %. Numerički proračun raspodjele potencijala rađen je za homogeni elektrolit uz zanemarivanje utjecaja otpora spojnih vodova, i drugo, tako da se odstupanja od izmjerenih vrijednosti mogu smatrati zadovoljavajućim.

5.2 Results of Measurements

On Figure 11 the OFF potential represents the potential value measured shortly after the CP system was shut down and the ON potential is the potential value of the pipeline measured while the CP system was operating.

On Figure 11 we can see that there is a 20 % deviation of values calculated using the numerical program from the initial ON potential (2005-06-14). The numerical calculation of potential distribution has been made for homogenous electrolyte. The influence of outside wire resistance is neglected so the deviations from measured values can be considered satisfying.



Slika 11 — Rezultati mjerenja potencijala
Figure 11 — Potential measurements results

Isto tako, može se zaključiti da tijekom eksploatacije sustava katodne zaštite dolazi do znatnog opadanja ON potencijala. ON potencijal nakon 18 mjeseci eksploatacije sustava opada za oko 35 % od svoje početne vrijednosti. U trenutku puštanja sustava u rad veća je gustoća zaštitne struje, jer je viši i pogonski napon. Tijekom vremena eksploatacije pogonski napon se snižava, odnosno potencijal štice objekta postaje manje negativan. Ovo se događa zbog povećanja polarizacijskog otpora armature, povećanja otpora rasprostiranja anodnih lanaca, odnosno zbog smanjivanja ukupne gustoće zaštitne struje. Gustoća zaštitne struje se smanjuje i zbog postojećeg pada napona na kabelima, anodnim lancima itd.

Moreover, we can conclude that, during the exploitation time of the cathodic protection system, there is a significant decrease of the ON potential. The ON potential, after 18 months of system exploitation, decreases for approximately 35 % from its initial value. In the moment when the CP system is put into work, current density is greater because the driving voltage is higher as well. During the exploitation time, the driving voltage decreases i.e. the potential of the protected object becomes less negative. This happens due to the increase of armature polarization resistance and anode chain resistance, which leads to decreased protection current density. Protection current density also decreases due to the voltage drops on wires, anodic chains, etc.

Može se primijetiti da se razlika između ON i OFF potencijala s vremenom smanjuje. Ova razlika predstavlja ustvari *IR* pad napona u elektrolitu. Ovo je posljedica uspostavljanja polarizacije, odnosno povećanja polarizacijskog otpora, s tim što se mora računati da su vremena polarizacija ovakvih objekata mnogo duža nego ako se radi o objektima s kvalitetnom izolacijom.

S dijagrama se vidi da je i nakon razdoblja eksploatacije od 18 mjeseci pomak potencijala u odnosu na prirodni veći od **200 mV** na negativnu stranu. Prema međunarodnim propisima (npr NACE standard za zaštitu cjevovoda dovoljno je da pomak potencijala, kada se eliminira *IR* komponenta, u odnosu na prirodni potencijal bude minimalno **100 mV** nakon depolarizacije od 4 sata. Na osnovi ovog kriterija vidi se da je predmetni cjevovod katodno zaštićen u skladu s propisima.

6 ZAKLJUČAK

Korištene numeričke metode za proračun raspodjele zaštitnih struja/potencijala u sustavima katodne zaštite s galvanskim anodama daje rezultate koji ne odstupaju puno od izmjerenih vrijednosti. Eventualna značajnija odstupanja proračunatih od izmjerenih vrijednosti zaštitnih potencijala mogu biti uzrokovana:

- promjenom električnih kvaliteta betonske obloge cjevovoda,
- promjenom vrijednosti specifičnog električnog otpora elektrolita,
- promjenom međusobnog razmaka anodnih lanaca nastalih u fazi instaliranja,
- prisutnost drugih podzemnih metalnih objekata, itd.

Naravno, kod pojave značajnijih odstupanja izmjerenih vrijednosti zaštitnih potencijala od proračunatih treba uraditi dodatnu analizu radi utvrđivanja uzroka.

Dane numeričke metode posebno su pogodne za proračune zaštitnih potencijala/struja podzemnih dugačkih metalnih objekata velikih dimenzija. Pogodno je prikazati proračunske vrijednosti kao što je dano na slici 7 radi jednostavnije usporedbe s mjerenim vrijednostima.

Rješavanje raspodjele zaštitnih potencijala/struja kod primjene sustava katodne zaštite s većim brojem galvanskih anoda jedino je moguće obaviti primjenom numeričkih metoda. U radu je primijenjena kombinirana BEM/FEM metoda. Primjena ove metode ima veliku praktičnu važnost za projektante sustava katodne zaštite

We can see that the difference between the ON and OFF potentials decreases over time. This difference in fact represents the *IR* voltage drop in electrolyte. This is caused by the establishment of polarization or the increase of polarization resistance. Objects with quality isolation need more time until polarization is reached and this should be taken into consideration.

We can see from the diagram that even after 18 months of system exploitation, the potential shift from the natural value is **200 mV** negatively. According to the international standards (NACE Standard) in order for a pipeline to be protected, the potential shift, without the *IR* component, must be minimally **100 mV** after a 4 hour depolarization. Based on this criterion we can see that the observed pipeline is properly protected.

6 CONCLUSION

The numerical methods used for the calculation of the protection current/potential in the cathodic protection system show small deviations from measured values. Possible significant deviations of calculated from measured values of protection potential can be caused by:

- changing the electrical quality of the concrete shell of the pipeline,
- changing the specific soil resistivity of the electrolyte,
- changing the distance between anode chains made in the installing phase,
- presence of other underground metal objects.

Of course, if any significant deviations occur, further analysis must be performed to determine the cause of that deviation.

The given numerical methods are suitable for the calculation of protection current/potential of large underground metal objects. It is useful to show the calculated values, like on Figure 7, for a simpler comparison to the measured values.

To solve the distribution of protective current/potential distribution when the CP system is applied with a larger number of galvanic anodes, in cases where the system is functioning, the numerical method is most likely to be used. In this paper the coupled BEM/FEM method was used. The use of this method has a practical importance for future designers of CP systems in all conditions, especially when bearing in mind different electrolyte characteristics. This way, we get technically correct data about protection current distribution, which in practice rep-

u svim uvjetima, posebno imajući u vidu različite karakteristike elektrolita. Tada se dobivaju tehnički korektni podaci o raspodjeli zaštitnih potencijala, što praktično predstavlja osnovu za optimalno projektiranje sustava katodne zaštite.

resents the basics for optimal projecting of the cathodic protection system.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] ADEY, R.A., BREBBIA, C.A., NIKU, S.M., Applications of Boundary Elements in Corrosion Engineering, Topics in Boundary Element Research, Computational Mechanics Publications, 1998
- [2] ORAZEM, M.E., ESTEBAN, J.M., KENNELLEY, K.J., DEGERSTEDT, R.M., Corrosion 53 (1997) 427
- [3] ORAZEM, M.E., ESTEBAN, J.M., KENNELLEY, K.J., DEGERSTEDT, R.M., Corrosion 53 (1997) 264
- [4] ADEY, R., Topics in Boundary Element Research, vol. 7, Electrical Engineering Applications, chapter 3, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 1990
- [5] AOKI, S., AMAYA, K., GOUKA, K., Optimal Cathodic Protection of Ship, Boundary Element Technology E XI, pp. 345-356, 1996
- [6] DEGIORGI, V.G., Boundary Elements XIX, pp.829-838, 1997
- [7] RIEMER, D.P., Modeling Cathodic Protection for Pipeline Networks, Ph.D.dissertation, University of Florida, Gainesville, FL, 2000
- [8] BREBBIA, C.A., DOMINGUEZ, J., Boundary Element Methods for Potential Problems, Applied Mathematical Modelling, 1(7), pp. 371-378, 1977
- [9] MUHAREMOVIĆ, A., ZILDŽO, H., LETIĆ, E., Modelling of Protective Potentials Distribution in Cathodic Protection System Using Coupled BEM/FEM Method, 30TH International Conference on Boundary Elements and other Mesh Reduction Methods BEM/MRM 30 2008. Maribor, Slovenia
- [10] MUHAREMOVIĆ, A., TURKOVIĆ, I., KAMENICA, A., Basic Specifics for the Assessment of Zinc Anode Strings for Cathodic Protection, 13TH International expert meeting Power Engineering, Maribor, 2004
- [11] MUHAREMOVIĆ, A., TURKOVIĆ, I., BISANOVIĆ, S., Functional Relationship Between Cathodic Protection Current/Potential and Duration of System Deployment in Desert Conditions, Electrocor 2009, Bolonja
- [12] MUHAREMOVIĆ, A., TURKOVIĆ, I., Distribution of the Protection Current and Potential in System of Cathodic Protection with Sacrificial Anodes, 5th Libyan Corrosion Conference, Benghazi 2005
- [13] MUHAREMOVIĆ, A., TURKOVIĆ, I., Analyses of the Voltage Component Influence on the System Measurement Error of the Stationary and Protection Potential, 5th Libyan Corrosion Conference, Benghazi 2005
- [14] LAZZARI, L., PEDEFERRI, P., Cathodic Protection, Polipress, Milano, 1st edition, 2006
- [15] RIEMER, D.P., ORAZEM, M.E., Modeling Coating Flaws with Non-linear Polarization Curves for Long Pipelines, WIT Press 2006, Southampton, UK
- [16] MORGAN, J., Cathodic Protection Design, NACE, International, Houston, TX, 1993
- [17] Energoinvest Sarajevo, External Cathodic Protection System – Scope of Work, 19051-S-395-10-MC-0028-00, Sarajevo, 2006
- [18] Energoinvest Sarajevo, Potential Survey Procedure, 19051-S-395-10-MC-0028-00, Sarajevo, 2006
- [19] Energoinvest Sarajevo, External Cathodic Protection Project for PCCP, Operation & Maintenance Period Final Report, 19051-S-395-10-MC-0028-00, 2006
- [20] Zildžo, H., Računarski program CP Zildžovski_2009.f90

Adrese autora:

Authors' Addresses:

Izv. prof. dr. sc. **Alija Muharemović**
alija.muharemovic@etf.unsa.ba

Izv. prof. dr. sc. **Hamid Zildžo**
hamid.zildzo@etf.unsa.ba

Viši asistent mr. sc. **Irfan Turković**
irfan.turkovic@etf.unsa.ba

Asistent mr. sc. **Halid Matoruga**
halid.matoruga@etf.unsa.ba

Sveučilište u Sarajevu
Elektrotehnički fakultet
Zmaja od Bosne bb
71000 Sarajevo
Bosna i Hercegovina

Prof **Alija Muharemović**, PhD
alija.muharemovic@etf.unsa.ba

Prof **Hamid Zildžo**, PhD
hamid.zildzo@etf.unsa.ba

Irfan Turković, MSc
irfan.turkovic@etf.unsa.ba

Halid Matoruga, MSc
halid.matoruga@etf.unsa.ba

University of Sarajevo
Department of Electrical Engineering
Zmaja od Bosne bb.
71000 Sarajevo
Bosnia and Herzegovina

Uredništvo primilo rukopis:
2009-07-14

Manuscript received on:
2009-07-14

Prihvaćeno:
2009-07-31

Accepted on:
2009-07-31

PROMJENA KONCEPCIJE UZEMLJENJA NEUTRALNE TOČKE SREDNJONAPONSKIH MREŽA

CHANGES OF THE CONCEPT OF NEUTRAL POINT EARTHING OF MID-VOLTAGE GRIDS

Milan Puharić, Zagreb, Hrvatska

Uzemljenje neutralne točke srednjonaponskih mreža provodi se na razne načine u svijetu, ovisno o praksi u pojedinim zemljama s naglaskom na tehničku regulativu koja je na snazi. U Hrvatskoj se odvija prijelaz s uzemljenja zvjezdišta preko otpornika na rezonantno uzemljenje. Pri tome se postavlja pitanje izbora tehnologije kompenzacijskih prigušnica kao i posljedice na rad relejne zaštite u transformatorskim stanicama. Potrebno je sagledati sve tehnoeekonomske aspekte kako bi se dobilo adekvatno rješenje, uvažavajući pouzdan rad uređaja za uzemljenje zvjezdišta kao i osiguranje zadovoljavajuće kvalitete opskrbe električnom energijom.

Neutral point earthing of mid-voltage grids is implemented variously around the world, depending on the practice of individual countries with the emphasis on the technical regulations in force. Croatia is in the process of transition from star-point earthing through resistors to resonant earthing. Questions on the choice of arc suppression coil technology and the consequences for the operation of relay protection in transformer stations arise in relation to that. It is necessary to view all technical-economic aspects in order to reach an appropriate solution, while at the same time acknowledging the reliable operations of star-point earthing devices, and ensuring a satisfactory quality of electric energy supply.

Ključne riječi: kompenzacijska prigušnica; srednjonaponska mreža; uzemljenje neutralne točke

Keywords: arc suppression coil; mid-voltage grid; neutral point earthing



1 UVOD

Uzemljenje neutralne točke srednjonaponskih mreža u svijetu se provodi na razne načine. Kao tipska rješenja prihvaćene su općenito tri izvedbe: pogon s izoliranom neutralnom točkom, direktno uzemljenje neutralne točke koje se provodi u jednoj ili više točaka mreže (Engleska i SAD) i uzemljenje preko impedancije. Svaki od spomenutih pristupa daje više- manje zadovoljavajuće rezultate, ovisno o parametrima mreže te uvjetima koji se žele postići u mreži, prije svega vezano na efikasnost zaštite te visinu struje jednopolnog kvara. Međutim, u nekim su se zemljama dogodile promjene u odabiru koncepcije uzemljenja. Naime, intenzivno kabliranje srednjonaponskih mreža, dovelo je u određenim zemljama do znatnog povećanja kapacitivnih struja. Jedna od tih zemalja je Francuska, koja je zbog toga početkom devedesetih godina prošlog stoljeća započela intenzivna istraživanja radi pronalaženja prihvatljivog tehnokonomskog rješenja tretmana zvjezdišta. U Francuskoj elektroprivredi EDF-u do tada su provodili uzemljenje zvjezdišta preko djelatnog otpora, koji je ograničavao struje jednopolnog kvara srednjonaponskih mreža 20 kV na vrijednosti od 300 A do 1 000 A, ovisno o udjelu zračnih i kablinskih mreža. Potrebno je naglasiti da je Hrvatska kao i sve zemlje bivše Jugoslavije imala isti razvojni put u pogledu odabira načina uzemljenja neutralne točke. Naime, u Hrvatskoj se primjenjivao takozvani francuski pristup uzemljenja [1], pa je Hrvatska nakon, u početku, izoliranog zvjezdišta započela s uzemljenjem neutralne točke preko niskoomskog otpornika. Primjena rezistentnog uzemljenja otpočela je krajem sedamdesetih godina prošlog stoljeća. Jednopolni se kratki spoj ograničavao na 150 A, odnosno 300 A.

U trenutku kada su kapacitivne struje narasle na iznose od 100 A i više ampera, u Elektroprimorju Rijeka su 2000. godine odlučili provesti istraživanje u pogledu daljnje strategije tretmana zvjezdišta, prije svega 20 kV mreža [2]. Razlozi za naglo povećanje kapacitivnih struja bili su dvojaki: prijelaz s napona 10 kV na napon 20 kV te zamjena zračnih vodova kablskim, kao i strateška odluka zasnovana na polaganju kabela u ruralnim područjima. Nakon višegodišnjih istraživanja u koja se ubrajaju studije vezane na navedenu tematiku, posjeta proizvođačima opreme, provedenih stručnih konzultacija i izvršenih audita TS 110/20 kV Crikvenica i Krk, Elektroprimorje Rijeka se odlučila odrediti kriterije vezane na odabir načina uzemljenja zvjezdišta [3]. Kriteriji su bili zasnovani na sljedećim parametrima:

- nazivni napon mreže,
- tip mreže,

1 INTRODUCTION

Neutral point earthing of mid-voltage grids is implemented in various ways around the world. Three variations have been accepted as typical solutions: isolated neutral point drive, direct neutral point earthing implemented in one or more points of the grid (England and the USA) and impedance earthing. Each of the aforementioned approaches gives more-or-less satisfactory results, depending on grid parameters and conditions which are meant to be achieved in the grid, primarily in relation to protection efficiency and the height of the single pole fault current. However, some countries have changed their choices of earthing concepts. The intense cabling of mid-voltage grids has significantly increased the capacitive currents in certain countries. One of those countries is France which, in the early nineteen-nineties, undertook intense research to find a viable technical-economic solution for treating star-points for that very reason. Until then, the French electric utility company EDF was implementing star-point earthing through active resistance, which limited the currents of single pole faults of 20 kV mid-voltage grids to values ranging from 300 A to 1 000 A, depending on the share of aerial and cable grids. It is necessary to point out that Croatia, like all countries of the former Yugoslavia, underwent the same development process regarding the choice of a neutral point earthing method. Croatia applied the so-called French approach to earthing [1], and so, after the initial isolated star-point, Croatia started grounding the neutral point through a Low Ohm resistor. The application of resistant earthing began in the late nineteen-seventies. The single pole short circuit was limited to 150 A or 300 A.

At a time when the capacitive currents rose to the figures of 100 A and beyond, in the year 2000, Elektroprimorje Rijeka decided to carry out a research of a further strategy for treating star-points, primarily of 20 kV grids [2]. The reasons for a sudden rise of capacitive currents were twofold: the transition from 10 kV voltage to 20 kV voltage and the replacement of aerial ducts with cable ducts, and the strategic decision based on the laying of cables in rural areas. After years of research, including studies of the aforementioned topic, visits to equipment manufacturers, consultations with experts and audits of TS 110/20 kV Crikvenica and Krk, Elektroprimorje Rijeka decided to set the criteria for choosing the star-point earthing method [3]. The criteria were founded on the following parameters:

- nominal grid voltage,
- grid type,

- nazivni napon trafostanice te
- veličina kapacitivne struje.

U ovome članku daje se poglavito osvrt na način uzemljenja neutralne točke mreža 20 kV uporabom automatske kompenzacijske prigušnice. S obzirom da se radi o novom uređaju za hrvatske prilike, potrebno je obuhvatiti sve aspekte njegova korištenja, prije svega odabira njegovih tehničkih parametara, a u sklopu toga i osvrt na djelovanje zaštite u novim okolnostima. Sagledat će se utjecaj postojećih tehničkih propisa na izbor tehničkog rješenja automatske kompenzacijske prigušnice, kao i uvažavanje europske norme HD 637 S1 (*Power installations exceeding 1 kV a.c.*) – Energetske instalacije izmjeničnog napona iznad 1 kV. Također, procesom liberalizacije tržišta električne energije postavlja se kao jedan od prioriteta bolja i kvalitetnija opskrba električnom energijom. Sve ovo je utjecalo na promjenu koncepcije uzemljenja neutralne točke te traženje optimalnih rješenja u njenoj implementaciji.

2 IZVEDBE UZEMLJENJA NEUTRALNE TOČKE

Kao što je spomenuto u uvodu, u svijetu se koristi nekoliko načina uzemljenja neutralne točke mreža srednjeg napona (SN mreža):

- direktno uzemljenje neutralne točke koje se provodi u jednoj ili više točaka mreže,
- uzemljenje preko impedancije,
- neutralna točka je izolirana.

Izbor jedne od varijanti je obično kompromis između:

- redukcije struje zemljospoja kako bi se ograničio visoki potencijal na uzemljenju,
- omogućavanje viših struja zemljospoja, ali uz uvjet sigurnijeg i bržeg otkrivanja kvara.

Odabir rješenja ima direktan utjecaj na sigurnost osoblja i potrošača kao i kvalitetu isporuke električne energije. U članku će se kasnije detaljno obrazložiti koji se problemi javljaju prilikom korištenja kompenzacijske prigušnice u vezi s otkrivanjem posebno visokookomskih kvarova, u odnosu na postojeće tehničke propise.

2.1 Izolirana neutralna točka

U izoliranom režimu rada ne postoji nikakva veza između neutralne točke i zemlje. U slučaju zemljospoja jedne faze javlja se struja koja je određena nultim kapacitetom galvanski spojene mreže, slika 1. U slučaju zemljospoja bez pri-

- nominal sub-station voltage and
- capacitive current volume.

This article will primarily give an overview of the neutral point earthing method for 20 kV grids using an automatic arc suppression coil. Since the device in question is new for Croatia, it is necessary to encompass all aspects of its usage, most importantly the selection of its technical parameters, and within that, an overview of how protection functions in new circumstances. The influence of existing technical regulations on the selection of a technical solution for the automatic arc suppression coil will be considered, as will the acceptance of the European standard HD 637 S1 – alternating current power installations exceeding 1 kV. Furthermore, an improved and top-quality electric energy supply is presented as one of the priorities of the liberalisation process of the electric energy market. All of the above has influenced the change of the concept of neutral point earthing, and a quest for optimal solutions for its implementation.

2 IMPLEMENTATIONS OF NEUTRAL POINT EARTHING

As mentioned in the introduction, several methods of neutral point earthing of mid-voltage grids (MV grids) are used around the world:

- direct neutral point earthing implemented in one or more points of the grid,
- impedance earthing,
- neutral point is isolated.

The choice of one of the varieties is usually a compromise between:

- the reduction of the earth-fault current to limit the high earthing potential,
- the enabling of higher earth-fault currents, with the condition of safer and quicker detection of faults.

The choice of the solution has a direct influence on staff and consumer safety and on the quality of electric energy delivery. The article will later elaborate in detail on the problems which arise with the usage of the arc suppression coil, especially concerning the discovery of high ohm faults in relation to the existing technical regulations.

2.1 The Isolated Neutral Point

There is no connection between the neutral point and the earth in the isolated regime of operations. In the case of a single phase earth-fault,

jelaznog otpora zdrave faze poprimaju linijski napon. Ovakav način rada mreže primjenjuje se obično u relativno malim mrežama s malim ili nikakvim udjelom kabela. Kvarovi se teško otkrivaju, iako pogon s izoliranim zvjezdištem ima i neke prednosti:

- kod prolaznih zemljospojeva dolazi do samogašenja struja (ukoliko struja zemljospoja nije previsoka),
- kod trajnih zemljospojeva moguć je nastavak pogona do lociranja mjesta zemljospoja,
- zaštita od opasnih napona dodira je jednostavna.

Mane ovakvih mreža su sljedeće:

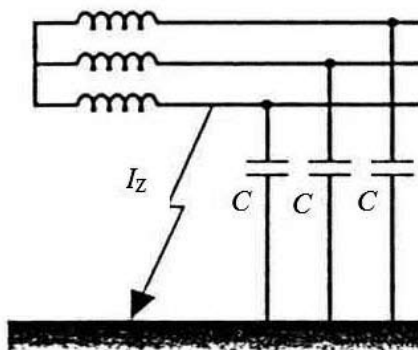
- visoke kapacitivne struje zemljospoja ne omogućavaju samogašenje kvara,
- ukoliko je mreža duže u zemljospoju prisutna je opasnost od nastanka dvostrukog zemljospoja s vrlo visokim strujama,
- kod malih struja zemljospoja može doći do intermitirajućih prenapona s veoma visokim vrijednostima,
- unutrašnji su prenaponi u izoliranim mrežama redovito viši od onih u rezistentno uzemljenim mrežama.

a current defined by the zero capacity of a galvanically connected grid occurs, Figure 1. In the case of an earth-fault without transient resistance, the healthy phases adopt the line voltage. This method of grid operation is usually applied on relatively small grids with small or no cable share. Faults are usually hard to detect, although a drive with an isolated star-point has some advantages:

- self-suppression of currents occurs with transient earth-faults (if the earth-fault current is not too high),
- with permanent earth-faults it is possible to continue operations until the earth-fault location is discovered,
- protection from dangerous contact voltage is simple.

The shortcomings of these grids are the following:

- high capacity currents of earth-faults do not permit the self-suppression of faults,
- if the grid is in earth-fault for a longer period of time, there is a danger of a double earth-fault with very high currents arising,
- with low earth-fault currents intermittent over-voltage with very high values can occur,
- internal over-voltages in isolated grids are regularly higher than those in grids with resistant earthing.



Slika 1 — Izolirana neutralna točka
Figure 1 — Isolated neutral point

Polaganje kabela u ovakvim mrežama dovodi do povećanja nultog kapaciteta, što rezultira opisanim ograničenjima.

2.2 Direktno uzemljena neutralna točka

Ovakav način uzemljenja, koji se u Hrvatskoj ne primjenjuje, dovodi do veoma visokih struja kratkog spoja koje su ograničene jedino impedanci-

The laying of cables in these grids leads to an increase of zero capacity, which in turn results with the limitations described.

2.2 Directly Earthed Neutral Point

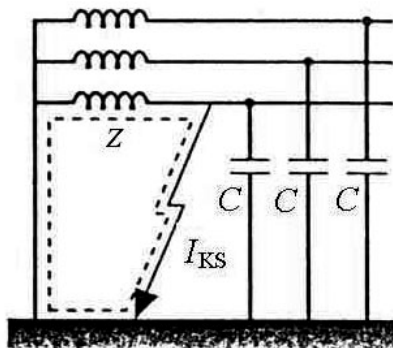
This earthing method, not implemented in Croatia, leads to very high short circuit currents which are limited only by transmission line impedance,

jom voda, povratnim putem kroz zemlju i prijelaznim otporom na mjestu kvara, slika 2.

Otkrivanje kvarova je olakšano, međutim zbog visokih struja kvar se mora odmah isključiti, što dovodi do loše kvalitete isporuke električne energije. Osim toga, pojavljuju se vrlo visoki potencijali na uzemljivačima čime je prisutna opasnost po osobe od nedopustivo visokih napona dodira.

the return route through the earth and the transient resistance on the fault point, Figure 2.

It is easier to detect faults, however, due to high currents, the fault must be switched off immediately, which leads to a low quality of electric energy delivery. Furthermore, very high potentials occur on earthing units, which creates danger from impermissibly high contact voltages for people.



Slika 2 — Direktno uzemljena neutralna točka
Figure 2 — Directly earthed neutral point

2.3 Uzemljenje neutralne točke preko impedancije

Ovakav način uzemljenja neutralne točke omogućava ograničenje struja kvara u mreži na način da se zvjezdište uzemlji preko otpornika ili prigušnice, slika 3. Na taj se način osiguravaju dovoljno visoke struje za potrebe prorade zaštite koja mora biti sigurna i pouzdana.

U Hrvatskoj se već dudi niz godina provodi uzemljenje zvjezdišta preko otpornika, dok se kompenzacijske prigušnice praktički ne koriste. Prednosti takvog uzemljenja su sljedeće:

- smanjenje razine unutrašnjih prenapona,
- izbjegnuta pojava intermitirajućih prenapona,
- brzo i selektivno djelovanje zaštite od jednopolnih kvarova uz mogućnost ugradnje sustava brzog APU u nadzemnu mrežu,
- eliminacija pojave dvostrukih zemljospojeva.

Postojeća tehnička regulativa u Hrvatskoj dopušta pogon distribucijskih mreža srednjeg napona s izoliranim zvjezdištem u pojnim transformatorskim stanicama uz uvjet da kapacitivne struje zemljospoja ne prijeđu granične iznose:

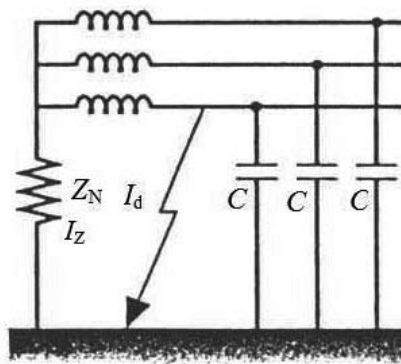
2.3 Neutral Point Impedance Earthing

This method of neutral point earthing enables limitations for fault currents in the grid in such a way that the star-point is earthed through a resistor or a coil, Figure 3. This method ensures sufficiently high currents for protection trips which must be safe and reliable.

In Croatia, star-point earthing through resistors has been implemented for many years, while arc suppression coils are virtually not used at all. The advantages of this earthing method are the following:

- reduction of internal over-voltage levels,
- avoiding the occurrence of intermittent over-voltages,
- fast and selective operation of single pole fault protection with the possibility of installing a fast APU system in the overhead grid,
- elimination of the occurrence of double earth-faults.

The existing technical regulations in Croatia allow the operation of mid-voltage distribution networks with an isolated star-point in supply transformer stations with the condition that the capacity currents of earth-faults do not exceed borderline values:



Slika 3 – Neutralna točka uzemljena preko impedancije
Figure 3 – Neutral point earthed through impedance

- mreže 10 kV: $I_C = 20$ A,
- mreže 20 kV: $I_C = 15$ A,
- mreže 30(35) kV: $I_C = 10$ A.

- 10 kV grids: $I_C = 20$ A,
- 20 kV grids: $I_C = 15$ A,
- 30(35) kV grids: $I_C = 10$ A

Ako kapacitivne struje prijeđu navedene veličine, potrebno je provesti uzemljenje zvjezdišta. Međutim, taj zahtjev nije svugdje ispunjen, prvenstveno zbog problema s naponima dodira.

If the capacity currents exceed the values given, it is necessary to implement star-point earthing. However, that demand is not met everywhere, primarily because of contact voltage problems.

3 DOSADAŠNJI PRISTUP PROVEDBI UZEMLJENJA ZVJEZDIŠTA U HRVATSKOJ

Odabir optimalnih karakteristika otpornika za uzemljenje zvjezdišta 10(20) kV mreža obrađen je i prezentiran u mnogim stručnim i znanstvenim radovima. Temeljni kriterij koji proizlazi iz dosadašnjih istraživanja je:

3 THE FORMER APPROACH TO THE IMPLEMENTATION OF STAR-POINT EARTHING IN CROATIA

The selection of optimal characteristics of resistors for star-point earthing of 10(20) kV grids has been analysed and presented in many expert and scientific theses. The basic criterion stemming from the research performed so far is:

$$I_R > 3 \cdot I_C \quad (1)$$

gdje su:

- I_R – nazivna struja otpornika,
- I_C – kapacitivna struja zemljospoja.

Navedeni kriterij osigurava pretežno radni karakter struje jednofaznog kvara. Njegovim ispunjavanjem ostvaruje se niskoomsko uzemljenje zvjezdišta.

Kada korištenje kriterija (1) dovodi do neprihvatljivih troškova rekonstrukcije uzemljivača, preporučuje se alternativni kriterij:

whereat it is as follows:

- I_R – nominal resistive current,
- I_C – capacitive earth-fault current.

The said criterion ensures the predominantly operational character of the single pole fault current. When it is met, the low ohm star-point earthing is realised.

When the usage of the criterion (1) leads to unacceptable expenses for the reconstruction of earthing units, an alternative criterion is recommended:

$$1,5 \cdot I_C < I_R < 3 \cdot I_C \quad (2)$$

Taj kriterij (2) definira tzv. visokoomsko uzemljenje zvjezdišta. Struja jednopolnog kvara u bilo kojoj točki 10(20) kV mreže računa se kao:

This criterion (2) defines the so-called high ohm star-point earthing. The single pole fault current in any point of the 10(20) kV grid is calculated as:

$$I_{1P} = \sqrt{I_{1R}^2 + I_C^2} \quad (3)$$

gdje su:

I_{1P} – struja jednopolnog kratkog spoja,
 I_C – kapacitivna struja zemljospoja,
 I_{1R} – radna komponenta struje jednopolnog kratkog spoja.

whereat it is as follows:

I_{1P} – single pole short-circuit current,
 I_C – capacitive earth-fault current,
 I_{1R} – active component of the single pole short-circuit current.

Kao što je već rečeno, u dosadašnjoj praksi za provedbu uzemljenja zvjezdišta mreža 10(20) kV koristili su se otpornici nazivne struje:

As stated previously, in the former implementation of star-point earthings of 10(20) kV grids nominal current resistors were used:

$$I_{1R} = 300 \text{ A} \text{ i } I_R = 150 \text{ A.}$$

$$I_{1R} = 300 \text{ A} \text{ and } I_R = 150 \text{ A.}$$

Odgovarajuće struje jednopolnog kvara u tako uzemljenim mrežama većinom su samo nešto niže od nazivnih struja otpornika (kod metalnih jednopolnih kvarova). Izuzetak su kvarovi na ekstremno dugačkim vodovima 10(20) kV, kada te struje mogu pasti i do 40 % u odnosu prema nazivnoj struji otpornika.

The corresponding single pole fault currents in grids earthed in this method are mostly only slightly lower than the nominal resistive currents (with metal single pole faults). The exception are faults on extremely long transmission lines 10(20) kV, when the currents can fall to 40 % in relation to the nominal resistive current.

Na temelju poznatih veličina struja jednopolnog kratkog spoja određuju se granični, tj. maksimalno dopušteni otpori uzemljivača TS 10(20) / 0,4 kV. Prema dosadašnjim (preuzetim) tehničkim propisima [4], ti otpori se određuju na način opisan u daljnjem tekstu.

On the basis of the known volumes of single pole short-circuit currents, the borderline, i.e. the maximal allowed resistances of earthing units TS 10(20) / 0,4 kV are determined. In accordance with the former (adopted) technical regulations [4], those resistances are determined in the manner described below.

Ako se u TS 10(20) / 0,4 kV izvodi združeno zaštitno i radno uzemljenje (što propisi preferiraju), tada ukupni otpor uzemljenja treba zadovoljiti uvjet:

If in TS 10(20) / 0,4 kV a common protective and working earthing is implemented (preferred by regulations), then the total earthing resistance must satisfy the condition:

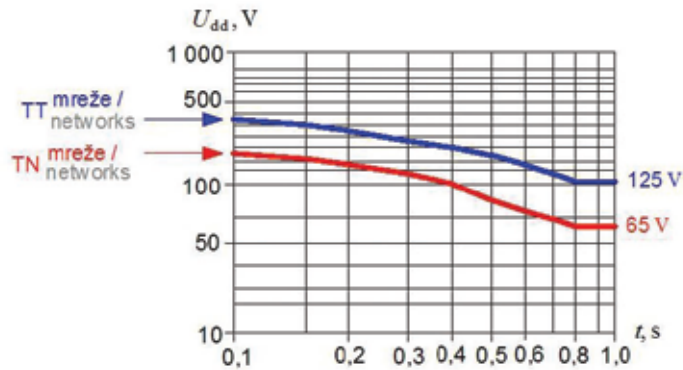
$$R_{zdr} \leq \frac{U_{dd}}{r \cdot I_{1P}} \quad (4)$$

gdje su:

R_{zdr} – združeno zaštitno i radno uzemljenje, Ω ,
 U_{dd} – dopušteni dodirni napon prema tehničkim propisima, slika 4, V,
 r – redukcijski faktor pojnog voda.

whereat it is as follows:

R_{zdr} – common protective and working earthing, Ω ,
 U_{dd} – permitted touch voltage in accordance with the technical regulations, Figure 4, V,
 r – supply line reduction factor.



Slika 4 – Dopušteni naponi dodira
Figure 4 – Permitted touch voltage

Ako se ne može ispuniti uvjet (4), potrebno je izvesti odvojeno zaštitno uzemljenje stanice od radnog uzemljenja mreže niskog napona. U tom slučaju radno uzemljenje treba zadovoljiti uvjete primijenjene zaštitne mjere na niskom naponu, a zaštitno uzemljenje treba ispuniti uvjet:

If the condition (4) cannot be fulfilled, it is necessary to implement a protective station earthing separate from the operative low voltage grid earthing. When that is the case, the operative earthing should fulfil the conditions of applied protective measures on low voltage, and protective earthing must satisfy the condition:

$$R_{zas} \leq \frac{1200}{r \cdot I_{1P}}, \quad (5)$$

gdje je:

R_{zas} – zaštitno uzemljenje, Ω .

Ako mreža 10(20) kV radi s izoliranim zvjezdishem te se zemljospoj isključuje u vremenu kraćem od 2 sata, također se primjenjuju kriteriji (4) ili (5), samo što se umjesto struje jednopolnog kvara (I_{1P}) uvrštava kapacitivna struja zemljospoja (I_C). Međutim, ako trajanje zemljospoja nije ograničeno na 2 sata, propisi dopuštaju isključivo izvedbu odvojenoga zaštitnog uzemljenja od radnog uzemljenja, uz poštivanje uvjeta (5). Osim toga, otpor radnog uzemljenja treba zadovoljiti dodatni kriterij:

where it is as follows:

R_{zas} – protective earthing, Ω .

If a 10(20) kV grid operates with an isolated star-point and the earth-fault is turned off for a period of less than 2 hours, the criteria (4) or (5) also apply, but with capacitive earth-fault current (I_C) inserted instead of the single pole fault current (I_{1P}). However, if the earth-fault duration is not limited to 2 hours, the regulations allow solely the implementation of protective earthing separate from operative earthing, in accordance with the condition (5). Furthermore, the operative earthing resistance must satisfy the additional criterion:

$$R_{rad} \leq \frac{65}{I_C}, \quad (6)$$

gdje je:

R_{rad} – otpor radnog uzemljenja, Ω .

where it is as follows:

R_{rad} – operative earthing resistance, Ω .

3.1 Komentar tehničkih propisa o opasnim dodirnim naponima

U tijeku je transpozicija odredbi hrvatske norme HRN HD 637 S (Električna postrojenja nazivnih izmjeničnih napona iznad 1 kV) u obvezujuće propise (Pravilnik o tehničkim zahtjevima za elektroenergetska postrojenja iznad 1 kV). Navedena hrvatska norma je u stvari preuzeta europska norma HD 637 S1:1999, pa se tim putem hrvatska tehnička regulativa usklađuje s europskom, a stavlja se izvan snage zastarjela preuzeta regulativa.

Novi propisi o opasnim naponima bit će bitno liberalniji od dosadašnjih, koji su bili izrazito strogi. Na slici 5 dana je usporedba dopuštenih vrijednosti dodirnih napona i to:

- prema normi HD 637 S1 koja će biti transponirana u nove tehničke propise,
- prema propisima koji vrijede u Hrvatskoj, i to za dimenzioniranje uzemljivača TS 10(20)/0,4 kV koje napajaju nulovane (TN) mreže, odnosno mreže s primijenjenim pojedinačnim zaštitnim uzemljenjem (TT mreže).

Kao što se vidi na slici 5, norma HD 637 S1 sadrži jedinstvenu krivulju ovisnosti dopuštenih dodirnih napona o trajanju kvara. U području podešenja relejne zaštite u mrežama srednjeg i visokog napona, tj. za $t < 1$ s, dopušteni dodirni naponi prema dokumentu HD 637 S1 bitno su viši u odnosu prema tehničkoj regulativi u Hrvatskoj. Na primjer, za tipično vremensko podešenje relejne zaštite u mrežama 10(20) kV od $t = 0,5$ s dopušteni dodirni naponi iznose:

- norma HD 637 S1: $U_{dd} = 210$ V,
- TT mreže (Hrvatska): $U_{dd} = 160$ V,
- TN mreže (Hrvatska): $U_{dd} = 80$ V.

Prema tome, dopušteni dodirni napon prema normi HD 637 S1 je oko 2,5 puta veći u odnosu na dopuštenu vrijednost koja je mjerodavna u slučaju primjene TN sustava u niskonaponskim mrežama priključenim na TS 10(20)/0,4 kV.

Očito je da je u tom smislu norma HD 637 S1 bitno liberalnija od hrvatskih propisa.

No, još važnija (u smislu liberalizacije propisa) je promjena u pristupu dimenzioniranju uzemljenja TS 10(20)/0,4 kV. Prema dosadašnjoj tehničkoj regulativi u Hrvatskoj, otpor združenog uzemljenja ograničen je u skladu s izrazom (4). Kroz taj uvjet implicitno je izjednačen maksimalni dopušteni dodirni napon s potencijalom združenog uzemljenja TS 10(20)/0,4 kV prema referentnoj zemlji. Dakako, u većini slučajeva opisani pristup

3.1 A Comment on Dangerous Touch Voltage Technical Regulations

A transposition of provisions of the Croatian standard HRN HD 637 S (Power plants with nominal alternating voltages exceeding 1 kV) into binding regulations (the Regulation on Technical Requirements for Electric Power Plants Exceeding 1 kV) is in progress. The above mentioned Croatian standard is actually the adopted European standard HD 637 S1:1999, therefore, in this manner the Croatian Technical Legislation will be harmonised with the European, and the outdated adopted regulation will no longer be in force.

The new dangerous voltage regulations will be much more liberal than the former which were extremely strict. Figure 5 compares the permitted values of touch voltages:

- in accordance with the standard HD 637 S1 which will be transposed in new technical regulations,
- In accordance with the regulations in force in Croatia, for the dimensioning of TS 10(20)/0,4 kV earthing units which supply the neutralised (TN) grids, or grids with applied individual protective earthing (TT grids).

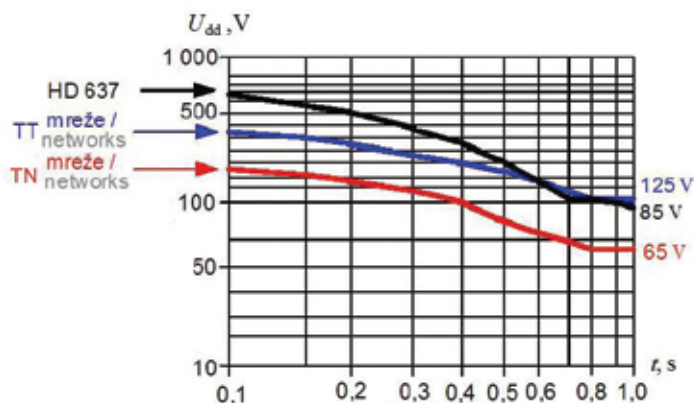
As it can be seen in Figure 5, the HD 637 S1 standard contains a unique dependency curve of permitted touch voltages and fault duration. In the domain of relay protection settings in mid and high voltage grids, i.e. for $t < 1$ s, the permitted touch voltages in accordance with the document HD 637 S1 are significantly higher in relation to the Croatian technical regulation. For example, for a typical time relay protection setting in 10(20) kV $t = 0,5$ s grids the permitted touch voltages are:

- HD 637 S1 standard: $U_{dd} = 210$ V,
- TT grids (Croatia): $U_{dd} = 160$ V,
- TN grids (Croatia): $U_{dd} = 80$ V.

Therefore, the permitted touch voltage in accordance with the HD 637 S1 standard is approximately 2,5 times higher in relation to the permitted value relevant when applying TN systems in low-voltage grids connected to TS 10(20)/0,4 kV.

It is therefore obvious that in that sense the HD 637 S1 standard is significantly more liberal than the Croatian regulations.

However, the change in the approach to the dimensioning of TS 10(20)/0,4 kV earthing is even more important (in the sense of regulation liberalisation). In accordance with the former technical regulations in Croatia, the joint earthing resistance is limited in accordance with the expression (4). With that condition the maximal



Slika 5 – Usporedba dopuštenih napona dodira
Figure 5 – Comparison of permitted touch voltages

je neopravdano strogo, jer je dodirni napon samo dio potencijala uzemljivača.

Nasuprot tome, norma HD 637 S1 definira sljedeće uvjete za izvedbu združenog uzemljenja TS 10(20)/0,4 kV:

- kod transformatorskih stanica čije je uzemljenje dio proširenog sustava uzemljenja dopušta se primjena združenog uzemljenja bez posebnih uvjeta. Prošireni (globalni) sustav uzemljenja je sastavljen od međusobno povezanih metalnih masa koje obuhvaćaju veću površinu. Tipični primjeri nalaze se u urbaniziranim sredinama s kabelskim elektroenergetskim mrežama, te na područjima velikih industrijskih cjelina,
- kod transformatorskih stanica kod kojih ne vrijedi prethodna postavka treba ispuniti uvjete iz tablice 1.

permitted touch voltage is implicitly equalled with the joint TS 10(20)/0,4 kV earthing potential per reference country. Of course, in the majority of cases the approach described is unjustifiably strict because the touch voltage is only a part of the earthing unit's potential.

In contrast to that, the HD 637 S1 standard defines the following conditions for the implementation of joint TS 10(20)/0,4 kV earthing:

- with transformer stations whose earthing is part of an expanded earthing system the application of joint earthing is permitted without special conditions. The expanded (global) earthing system is comprised of interconnected metal masses which encompass a larger area. Typical examples can be found in urban areas with cable electric power grids, and in areas with large industrial complexes,
- with the transformer stations for which the previous postulate does not apply, conditions from table 1 must be satisfied.

Tablica 1 – Uvjeti za izvedbu združenog uzemljenja (HD 637)
Table 1 – Conditions for the implementation of joint earthing (HD 637)

Zaštitna mjera u NN mreži / Protective measure in LV grid	Trajanje kvara / Fault duration	Uvjeti na potencijal uzemljivača / Conditions for earthing unit potential
TT	$t \leq 5 \text{ s}$	$U_u \leq 1200 \text{ V}$
	$t \leq 5 \text{ s}$	$U_u \leq 250 \text{ V}$
TN	–	$U_u \leq U_{dd} \text{ V} (*)$
	–	$U_u \leq X \cdot U_{dd} \text{ V} (**)$

* – PEN vodič NN mreže uzemljen samo u TS 10(20)/0,4 kV / PEN conductor for the LV grid earthed only in TS 10(20)/0,4 kV
 ** – PEN vodič NN mreže uzemljen na više mjesta; to je uobičajena praksa u našim TN mrežama / PEN conductor for the LV grid earthed in several points; it is common practice for our TN grids
 U_u – potencijal uzemljivača / earthing unit potential
 U_{dd} – dopušteni dodirni napon, slika 5 / permitted touch voltage, Figure 5

Faktor X prema normi HD 637 S1 iznosi barem 2. No, dopušta se mogućnost korištenja vrijednosti $X \leq 5$. To znači da HD 637 S1 priznaje činjenicu da je dodirni napon samo dio potencijala uzemljivača. Uz konzervativni pristup ($X = 2$) pretpostavlja se da maksimalni dodirni napon neće premašiti veličinu od 50 % potencijala uzemljivača; uz liberalniji pristup ($X = 5$) pretpostavlja se da maksimalni dodirni napon ne će premašiti veličinu od 20 % potencijala uzemljivača. Drugim riječima, formula (4) koja je mjerodavna za dimenzioniranje združenog uzemljenja TS 10(20)/0,4 kV, u slučaju primjene norme HD 637 S1 modificirala bi se na sljedeći način:

$$R_{zdr} \leq \frac{X \cdot U_{dd}}{r \cdot I_{1P}} \quad (7)$$

$$X = 2, \dots, 5.$$

The X factor in accordance with the HD 637 S1 standard is at least 2. However, the possibility to use values $X \leq 5$ is allowed. That means that HD 637 S1 acknowledges the fact that touch voltage is only part of the earthing unit's potential. The conservative approach ($X = 2$) assumes that the maximal touch voltage will not exceed the size of 50 % of the earthing unit's potential; the liberal approach ($X = 5$) assumes that the maximal touch voltage will not exceed the size of 20 % of the earthing unit's potential. In other words, the formula (4) relevant for the dimensioning of joint TS 10(20)/0,4 kV earthing, would be modified in the following manner when the HD 637 S1 standard would be applied:

Usporedba dopuštenih računskih otpora združenog uzemljenja TS 10(20)/0,4 kV s nadzemnim napajanjem ($r = 1$) dana je u tablici 2. Pretpostavljen je TN sustav zaštite u mreži niskog napona, uz uzemljeni PEN vodič na više mjesta. Trajanje jednopolnog kratkog spoja (I_{1P}) ograničeno je na 0,5 s.

The comparison of permitted calculated resistances of joint TS 10(20)/0,4 kV earthing with overhead supply ($r = 1$) is presented in Table 2. The TN system protection for low-voltage grids has been assumed, with a PEN conductor earthed in several points. The duration of the single pole short-circuit (I_{1P}) has been limited to 0,5 s.

Tablica 2 – Usporedba dopuštenih vrijednosti otpora R_{zdr}
Table 2 – Comparison of permitted resistance values R_{zdr}

Struja / Current I_{1P}	Maksimalne dopuštene vrijednosti za / Maximal permitted values for R_{zdr}		
	Dosadašnji propisi u Hrvatskoj / Former regulations in Croatia	HD 637 ($X = 2$)	HD 637 ($X = 5$)
150 A	0,53 Ω	2,73 Ω	6,83 Ω
300 A	0,27 Ω	1,37 Ω	3,42 Ω

4 IZBOR AUTOMATSKE KOMPENZACIJSKE PRIGUŠNICE

U Hrvatskoj elektroprivredi u tijeku je izrada studije kojoj je cilj pronalaženje adekvatnog rješenja uzemljenja neutralne točke mreža srednjeg napona. Ovaj članak se poglavito bavi određivanjem karakteristika automatske kompenzacijske prigušnice kao i reperkusija na rad sustava postojeće zaštite. U uvodu je spomenuto da je Elektroprimorje Rijeka započelo istraživanja vezana za promjenu koncepcije uzemljenja zvjezdista prije nekoliko godina, koja su rezultirala ugradnjom 2 sustava za uzemljenje u transformatorskim sta-

4 CHOOSING THE AUTOMATIC ARC SUPPRESSION COIL

Hrvatska elektroprivreda is in the process of compiling a study with the purpose of finding an adequate solution for neutral point earthing of mid-voltage grids. This article primarily focuses on determining arc suppression coil characteristics and the repercussions on the operation of the existing protection system. It was mentioned in the introduction that several years ago Elektroprimorje Rijeka started research relating to the change of the star-point earthing concept, which resulted in the installation of 2 earth-

nicama 110/20 kV Crikvenica i 110/20 kV Krk. Isto tako Elektra Zagreb je u pogonu Velika Gorica ugradila automatske kompenzacijske prigušnice, zasnovane na različitoj tehnologiji od one koju je ugradilo Elektroprimorje.

Postavlja se pitanje kriterija prilikom odabira karakteristika uređaja za uzemljenje u odnosu na tehničke propise koji se moraju zadovoljiti. Pri tome je nužno napomenuti da je kod pristupa ovoj problematici potrebno ukazati na različite koncepcije uzemljenja zvjezdišta prije svega u zemljama Europe. Prije svega treba razdvojiti dvije skupine zemalja: one koje odavno koriste rezonantno uzemljenje (Njemačka, Austrija, Češka) od onih koje su nedavno prešle na uzemljenje preko kompenzacijske prigušnice. U ovu drugu skupinu zemalja ubrajaju se Francuska i Italija. Razlog za odvojeno promatranje pristupa uzemljenju zvjezdišta je u različitim prije svega tehničkim propisima u tim zemljama kao i uvjetima sigurnosti u pogledu dopuštenog trajanja zemljospoja u tim mrežama.

Autor je aktivno sudjelovao u kreiranju koncepcije uzemljenja zvjezdišta u Elektroprimorju Rijeka te izradio više studija na tu temu [2], [3] i [5]. Rezultat istraživanja bio je izbor francuskog pristupa uzemljenju zvjezdišta temeljen na ograničenju trajanja zemljospoja u mreži. Odluka se bazirala na postojećim hrvatskim propisima koji ograničavaju trajanje zemljospoja u izvangradskim mrežama na maksimalno 2 sata. Iz tog razloga u članku će se podrobno opisati francuska praksa uzemljenja, koju je do sada Hrvatska slijedila, kako u pogledu izbora načina uzemljenja tako i vezano za izradu tehničkih propisa.

4.1 Princip rada kompenzacijske prigušnice

Princip rada kompenzacijske prigušnice sastoji se u tome da se pomoću promjenjivog induktiviteta kao aktivnog dijela mreže kompenziraju kapacitivne struje u mreži [6].

Osnovni princip kompenzacije struje dozernog kvara svodi se na poništavanje dozernih kapaciteta mreže uporabom po iznosu iste reaktancije koja se spaja između zvjezdišta i zemlje, a koja rezultira odgovarajućim smanjenjem struje jednopolnog kratkog spoja, odnosno dozernog spoja.

Strujni krug na slici 6 ustvari je strujni krug s paralelnom rezonancijom kod kojeg struja kvara ima samo određenu vrijednost radne komponente, ukoliko se induktivni otpor prigušnice namjesti točno na vrijednost nulte admitancije mreže. Ta mala vrijednost radne tzv. preostale struje nastaje zbog omskog otpora prigušnice i odvoda mreže. Često se ovakvom sustavu uze-

ing systems in transformer stations 110/20 kV Crikvenica and 110/20 kV Krk. Moreover, Elektra Zagreb installed automatic arc suppression coils in the Velika Gorica plant which are based on a different technology from the one installed by Elektroprimorje.

The question arises of criteria for choosing the characteristics of earthing devices in relation to the technical regulations which must be satisfied. It must be mentioned that, when approaching this problem, it is necessary to point to different concepts of star-point earthing, primarily in European countries. Firstly, countries must be separated in two groups: the ones which have been using resonant earthing for a long time (Germany, Austria, the Czech Republic) and those which have recently switched to arc suppression coil earthing. France and Italy belong to the latter group. The reason for separately observing the approaches to star-point earthing is primarily in different technical regulations of those countries and safety conditions in view of permitted earth-fault duration in those grids.

The author has actively participated in the creation of the star-point earthing concept in Elektroprimorje Rijeka and has compiled several studies on the topic [2], [3] and [5]. The result of the research was the choice of the French approach to star-point earthing based on the limitation of earth-fault duration in the grid. The decision was based on the existing Croatian regulations limiting the earth-fault duration in out-of-town grids to a maximum of 2 hours. For that reason, the article will in detail describe the French earthing practice, thus far followed by Croatia concerning the choice of the earthing method and the compilation of technical regulations.

4.1 Arc Suppression Coil Operating Principle

The operating principle of the arc suppression coil is that alterable induction, as an active part of the grid, compensates the capacity currents of the grid [6].

The basic principle for compensating earth-fault currents is reduced to the annullment of earth capacitance of the grid using the same amount of reactance connected between the star-point and the earth, and which results in the adequate reduction of single pole short-circuit current, or earth connection.

The electric circuit in Figure 6 is actually an electric circuit with parallel resonance where the fault current has only a certain value of the active component, if the inductive coil resistance is set precisely on the zero-admittance value of the grid. That small value of operative (so-called

mljenja dodaje paralelni otpor R_z , čiji je zadatak povećanje struje kvara s ciljem stvaranja uvjeta za selektivnost relejne zaštite.

Primjena kompenzacijske prigušnice različito se odvijala u europskim zemljama. Tako na primjer Njemačka i Austrija koriste Petersenku još početkom dvadesetih godina prošlog stoljeća. Stoga je i koncepcija vođenja pogona, primijenjene zaštite te tehnoloških rješenja drugačija u tim zemljama od zemalja poput Francuske i Italije. Naime, ove su zemlje primjenjivale drugačiju koncepciju uzemljenja neutralne točke. Dok je francuska elektroprivreda EDF još pedesetih godina 20. stoljeća počela s uzemljenjem preko otpornika [7], talijanski je ENEL ostavljao svoje mreže neuzemljene. Iz tih se razloga danas u svijetu primjenjuju dva tehnološki različita rješenja:

- prigušnica s kontinuiranom regulacijom – pomičnom jezgrom (engl. *plunger compensation*),
- prigušnica sa stupnjevitom kompenzacijom.

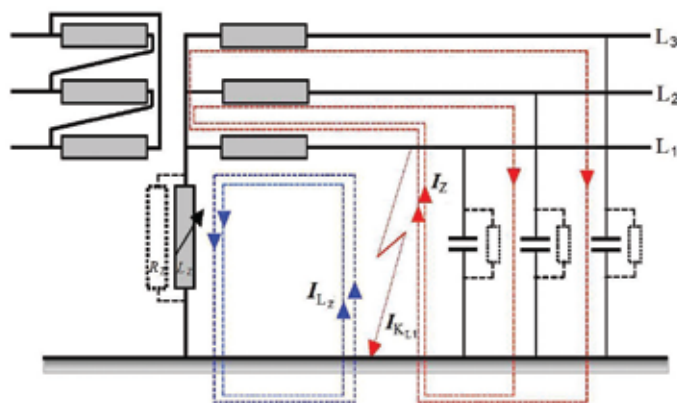
Obje prigušnice koriste sustave automatske regulacije, što znači da se proces poništavanja dozemnih kapaciteta odvija automatski. Naravno, postoje i tzv. fiksne prigušnice koje se instaliraju u relativno malim transformatorskim stanicama (npr. TS 35/10(20) kV), koje približno kompenziraju kapacitet galvanski vezane mreže. Njihova je uporaba ipak prilično limitirana s obzirom na zahtjeve relejne zaštite (selektivnost zaštite) o čemu će biti govora u daljnjem tekstu.

remaining) current occurs because of the ohm resistance of the coil and grid duct. Often, in this type of earthing systems, a parallel resistance R_z is added, the task of which is to increase the fault current with the purpose of creating conditions for relay protection selectivity.

The application of the arc suppression coil was carried out variously throughout European countries. For example, Germany and Austria use the Petersen coil since the early nineteen-twenties. Therefore, the concept of plant operation, the protection applied and the technological solutions have all differed in those countries when compared with countries like France and Italy. These countries applied a different concept of neutral point grounding. While the French electric utility company EDF started implementing earthing through resistors in the nineteen-fifties [7], the Italian ENEL left its grids without earthing. For those reasons, two technologically different solutions are applied in the world today:

- continuous regulation coil – plunger compensation,
- step coil.

Both coils use automatic regulation systems which means that the process of annulment of earth capacitance is automatic. Of course, there are also the so-called fixed coils, installed in relatively small transformer stations (for ex. TS 35/10(20) kV), and they approximately compensate the capacity of a galvanically connected grid. However, their usage is still quite limited considering the demands of relay protection (protection selectivity), to be discussed hereinafter.



Slika 6 — Jednopolni kratki spoj u mreži s kompenzacijskom prigušnicom
Figure 6 — Single pole short-circuit in a grid with an arc suppression coil

Impedancija za uzemljenje zvjezdišta imat će sljedeću vrijednost:

The star-point earthing impedance will have the following value:

$$Z_Z = \frac{1}{\frac{1}{R_Z} + \frac{1}{j\omega L_Z}}, \quad (8)$$

gdje je.

where it is as follows:

Z_Z - impedancija za uzemljenje zvjezdišta, Ω ,
 R_Z - dodatni paralelni omski otpor za povećanje struje kvara, Ω .

Z_Z - star-point earthing impedance, Ω ,
 R_Z - additional parallel ohm resistance for fault current increase, Ω .

Za slučaj jednopolnog kvara prema zemlji, dozemni kapaciteti mreže i induktivitet kompenzacijske prigušnice spojene između zemlje i neutralne točke mreže, čine kod nazivne frekvencije mreže paralelni rezonantni krug. U takvim uvjetima reaktivne struje na mjestu kvara se poništavaju bez obzira na vrijednost prijelaznog otpora kvara.

For a single pole fault towards earth, the earth capacitance of the grid and the arc suppression coil inductivity connected between the earth and the neutral point of the grid form a parallel resonant circuit at nominal grid frequency. In such conditions, the reactive currents at the fault point are annulled regardless of the value of the transient fault resistance.

U pogledu relejne zaštite (o čemu će biti govora u daljnjem tekstu) odnosno njezine funkcionalnosti i selektivnosti, korištenjem dodatnog paralelnog spojenog otpornika dobiva se određena vrijednost radne komponente struje kroz mjesto kvara. Vrijednosti navedene struje ovise dakako o vrijednosti korištenog otpornika. Ukoliko kompenzacija kapacitivne struje nije potpuna, pojednostavljeno se struja kvara I_K može odrediti na sljedeći način:

In view of relay protection (to be discussed hereinafter) or its functionality and selectivity, a certain value of the operating current component through the fault point is gained with the usage of an additional parallelly connected resistor. The values of the said current depend, of course, on the value of the resistor used. If the compensation of the capacitive current is not complete, in a simplified way the fault current I_K can be determined in the following manner:

$$I_K = \sqrt{I_{R_Z}^2 + (I_Z - I_{L_Z})^2}, \quad (9)$$

gdje su:

whereat it is as follows:

I_{R_Z} - radna komponenta struje kroz mjesto kvara,
 I_Z - kapacitivna komponenta struje dozemnog kapaciteta mreže,
 I_{L_Z} - induktivna komponenta struje kompenzacijske prigušnice spojene između zemlje i neutralne točke mreže.

I_{R_Z} - operating current component through the fault point,
 I_Z - capacitive current component of the earth capacitance of the grid,
 I_{L_Z} - inductive current component of the arc suppression coil connected between the earth and the neutral point of the grid.

Za razliku od varijante bez otpornika, kroz obuhvatni strujni transformator izvoda u kvaru protječe i radna komponenta struje kvara, dok kroz ostale izvode navedena struja ne prolazi, što je dovoljno za selektivnu proradu relejne zaštite.

Unlike the variety without a resistor, the active component of the fault current also flows through the current transformer of the faulted feeder, while the said current does not flow through other feeders, which is sufficient for a selective trip of relay protection.

Prigušnica s kontinuiranom regulacijom koristi se pretežno u zemljama koje imaju tradiciju korištenja Petersenke (Njemačka, Austrija). Ovakvo rješenje je skuplje od prigušnice s stupnjevitom

The continuous regulation coil is used primarily in countries with the tradition of using the Petersen coil (Germany, Austria). This solution

kompencijom, jer je tehnologija pomične plo-veće jezgre (engl. *plunger compensation*) slo-ženija. Nesumnjiva prednost ovakve izvedbe je mogućnost preciznog kompenziranja kapaciteta mreže (3 A do 4 A ampera), međutim pri tome je potrebno sagledati sljedeće elemente:

- koncepciju vođenja elektroenergetskog susta-va,
- parametre relejne zaštite mreža 10(20) kV.

Vođenje mreže bitan je element kod izbora pri-gušnice, jer se njena najvažnija tehnička ka-rakteristika određuje na temelju kriterija dopu-štenog trajanja zemljospoja. Naime, njemačka i austrijska praksa pokazuju da se u velikom broju distributivnih područja zemljospoj ne isključuje. Ovo ima direktnu implikaciju na dimenzioniranje automatskih prigušnica, jer su njeni gabariti u tom slučaju veći od prigušnica za kratkotrajan rad pri zemljospoju. Naravno da je cijena pri tome proporcionalno veća, jer se kretanje cijena odvija slično kao kod energetskih transformatora (po težini uređaja).

Potrebno je naglasiti da je u distribuciji HEP-a prisutna praksa isključivanja zemljospojeva u izoliranim mrežama, stoga je ovaj element izni-mno bitan kod odluke o odabiru automatske prigušnice. Eventualno dopuštenje trajanja zemljospoja na ograničeno vrijeme trebao bi biti predmet opsežne stručne diskusije, s obzirom da to ima direktan utjecaj na sigurnost potrošača.

4.1.1 Prigušnica s kontinuiranom regulacijom

Kompencijska prigušnica spaja se između ne-utralne točke mreže (zvjezdište napojnog tran-sformatora) i zemlje. Kako se oblik i veličina SN mreže mijenja u normalnom pogonu, prigušnica treba imati mogućnost podešenja u kratkom vre-menu, kako bi se neutralizirala kapacitivna struja dozemnog spoja za bilo koji oblik mreže. Za vri-jeme normalnog pogona (bez dozemnog spoja) na prigušnici se pojavljuje samo mali postotak faznog napona koji se koristi kod automatske re-gulacije prigušnice. Kod pojave dozemnog spoja, napon na prigušnici može doseći vrijednost faznog napona SN mreže [8].

Najnoviji tip prigušnica ima kontinuiranu regu-laciju koja se postiže jednostavnom promjenom širine zračnog raspora u magnetskom krugu pri-gušnice.

Prigušnica se obično izrađuje s dvije pomične jezgre kako bi se postigla simetrična razdioba magnetskog polja za bilo koju poziciju jezgri. Ovi-sno o položaju pomičnih cilindričnih jezgri dobiva se različita širina zračnog raspora.

is more expensive than a step coil because the plunger compensation technology is more com-plex. The indubitable advantage of this solution is the possibility of precise capacity compensation of the grid (3 A to 4 A), however the following ele-ments must be considered:

- the concept of electric power system opera-tion,
- the parameters of relay protection of 10(20) kV grids.

Grid operation is an important element when choosing the coil because its most important technical characteristic is defined on the basis of the permitted earth-fault duration criteria. German and Austrian practice demonstrates that in a large number of distribution areas the earth-fault is not turned off. This has a direct implication on the dimensioning of automatic coils, because their dimensions in that case are larger than those of coils for short-time opera-tion during earth-faults. Of course, the cost also proportionately increases because prices range in a similar way as with energy transformers (per device weight).

It is necessary to point out that the practice of turning off earth-faults in isolated grids is present in HEP's distribution, therefore this element is of extreme importance when choosing the au-tomatic coil. The possible permission of limited earth-fault duration should be the subject of an extensive expert discussion, since it has a direct impact on consumer safety.

4.1.1 A Continuous Regulation Coil

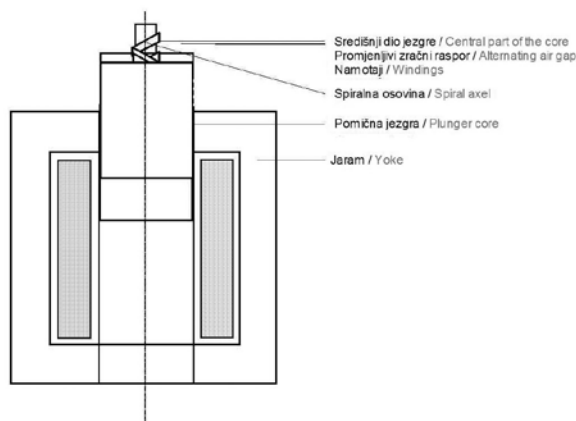
The arc suppression coil is connected between the neutral point of the grid (star-point of the sup-ply transformer) and the earth. Since the shape and size of the MV grid changes during regular operations, the coil must have the possibility of short-time adjustments in order to neutralise the earth connection capacitive current for any grid type. During normal operations (without earth connection) only a small percentage of the phase voltage used with automatic coil regula-tion appears on the coil. When earth connection occurs, the coil voltage can achieve the value of the MV grid phase voltage [8].

The latest type of coil has a continuous regula-tion, which is achieved by a simple change of air gap width in the magnetic circuit of the coil.

The coil is usually made with two plunger cores to achieve a symmetrical division of the magnetic field for any core position. Depending on the po-sition of the cylindrical plunger cores, a different air gap width is produced.

Okretanjem spiralne osovine, slika 7, pomične jezgre se približavaju ili razmiču tako da se zračni raspor može podešavati od približno nule do skoro cijele visine namota. To rezultira širokim područjem podešenja struje. Obično struja prigušnice s pomičnom jezgrom može varirati u odnosu od 1 do 10. Regulacija je moguća i kad je prigušnica isključena, ali i kad je ona u pogonu. Struja prigušnice regulira se preko upravljačkog el. motora koji se montira na kućište prigušnice, kojim se može upravljati ili ručno ili preko sustava automatske regulacije EFC.

When the spiral axel turns, Figure 7, the plunger cores move closer or further apart so that the air gap can be set from approximately zero to almost the entire height of the winding. That results in a wide area of current setting. Usually the plunger core coil current can vary from 1 to 10. Regulation is possible when the coil is turned off, but also when it is in operation. The coil current is regulated through a controlling electric motor mounted on the coil frame, which can be operated either manually or through an EFC automatic regulation system.



Slika 7 — Prigušnica s pomičnom jezgrom
Figure 7 — Plunger core coil

Prigušnice se najčešće dimenzioniraju na trajanje dozemnog spoja do 2 sata pri čemu se temperatura ulja i izolacijskog materijala održi u dozvoljenim granicama i bez ugradnje dodatnih rebrastih hladnjaka. Za razliku od navedenih prigušnica, prigušnice za kontinuirani pogon s dozemnim spojem u mreži dodatno su opremljene rebrastim hladnjacima. Glavne osobine opisane kompenzacijske prigušnice su sljedeće:

- mogućnost precizne regulacije prema trenutačnim uvjetima u SN mreži,
- prilikom regulacije nije potrebno isključiti prigušnicu, već se regulacija izvodi za vrijeme pogona, čime se postiže permanentno uzemljenje neutralne točke SN mreže,
- tijekom regulacije prigušnice ne dolazi ni do kakvih prekidanja,
- vrijednosti preostale struje kvara su minimalne,
- zbog velikog opsega regulacije 1:10(12,5), s istom prigušnicom omogućeno je proširenje i povećanje SN mreže (povećanje kapacitivne struje dozemnog spoja u mreži).

Coils are most frequently dimensioned for the earth connection duration of up to 2 hours, in the course of which the temperature of oil and insulation material is maintained within permitted limits without installing additional cooling fins. Unlike the aforementioned coils, the coils for continuous operation with an earth connection in the grid are additionally equipped with cooling fins. The main properties of the described arc suppression coil are the following:

- the possibility of precise regulation in accordance with the present conditions in the MV grid,
- it is not necessary to turn off the coil during regulation - regulation is performed during the operation, which achieves permanent earthing of the neutral point of the MV grid,
- there are no interruptions during the regulation of the coil,
- the values of the remaining fault current are minimal,
- because of the large regulation range 1:10(12,5), both widening and enlargement of the MV grid are enabled with the same coil (the increase of the capacitive current of the earth connection in the grid).

4.1.2 Prigušnica sa stupnjevitom kompenzacijom

Prigušnice sa stupnjevitom kompenzacijom su razvijene na zahtjev francuske elektroprivrede EDF-a s ciljem da se zamijeni do tada upotrebljavani sustav uzemljenja zvjezdista preko malo-omskog otpora [9]. Razlozi za takvu odluku su u činjenici da se početkom devedesetih godina prošlog stoljeća u EDF-u počelo tražiti drugo rješenje, budući da su se zbog intenzivne izgradnje mreže, odnosno polaganja novih kabelaških vodova 20 kV značajno povećale kapacitivne struje. Njihov porast u ruralnim područjima iznosio je nekoliko stotina ampera, tako da je ograničenje struje jednofaznog kvara na 300 A koje se primjenjivalo postalo problematično. Međutim, glavni razlog za promjenu koncepcije uzemljenja i prijelaz na uzemljenje preko prigušnice je primjena europske norme. Francuska norma NF C 15 100 koja predstavlja implementaciju CENELEC norme u Francuskoj nalaže da je maksimalni dozvoljeni potencijal na NN mreži 1 200 V. Ova norma postaje zakonska obveza pa je time prisilila EDF na traženje nove koncepcije uzemljenja. Prilikom odabira alternativnog rješenja za uzemljenje neutralne točke EDF je postavio određene preduvjete za realizaciju tog projekta:

- kompenzacijska prigušnica mora biti pouzdana i ekonomski isplativa,
- postojeću koncepciju relejne zaštite treba zadržati s time da ona mora biti pouzdana u kompenziranom režimu rada,
- razviti novu generaciju detektora kvara radi postizanja bolje kvalitete pogona.

Nova generacija prigušnica koja je razvijena tijekom opisanog projekta posjeduje sljedeće osnovne karakteristike:

- kada je kompenzacijska prigušnica u stanju potpune kompenzacije (poništanje kapacitivne struje induktivnom strujom) struja na mjestu kvara je ograničena na aktivnu komponentu struje, uvjetovanu otpornikom koji se nalaze u uređaju za kompenzaciju (što znači na oko 20 A). Kada je uređaj za kompenzaciju u stanju nekompenziranosti (preostala struja < 35 A), struja kvara je ograničena na 40 A uz puni nulti napon,
- ograničenje struje kvara na 40 A omogućava samogašenje kvarova čime se poboljšava kvaliteta pogona,
- zahvaljujući kompenzacijskoj prigušnici ograničava se uvjet na potencijal u NN mreži na $U + 1\ 200\ \text{V}$, odnosno na 1 430 V (sukladno europskoj normi).

Potrebno je naglasiti uvjet da kompenzacijska prigušnica bude u stanju potpune kompenziranosti, odnosno da preostala struja bude manja od 35 A.

4.1.2 Step Coil

Step coils were developed upon request of the French electric utility company EDF with the purpose to replace the star-point earthing through low ohm resistance system used until then [9]. The reasons for such a decision lie in the fact that in the early nineteen-nineties EDF started searching for a new solution, since capacitive currents had risen significantly because of intensive grid construction i.e. the laying of new 20 kV cable ducts. Their increase in rural areas amounted to several hundreds of amperes, so the limiting of single pole fault currents to 300 A, which used to be applied, had become problematic. However, the primary reason for the change of the earthing concept and the transition to coil earthing is the application of the European standard. The French NF C 15 100 standard, representing the implementation of the CENELEC standard in France, allows the maximal permitted potential on an LV grid to be 1 200 V. This standard is becoming legally binding so that has forced EDF to search for a new earthing concept. When choosing the alternative solution for neutral point earthing, EDF has set certain preconditions for the realisation of the project:

- the arc suppression coil must be reliable and economically cost-effective,
- the existing relay protection concept must be maintained, however it has to be reliable in a compensated operation regime,
- a new generation of fault detectors must be developed to achieve better drive quality.

The new generation of coils developed during the project described above possesses the following basic characteristics:

- When the arc suppression coil is in the full compensation state (annulling the capacitive current with the inductive current) the current at the fault point is limited to the active current component, conditioned by the resistors found in the compensating device (which means at approximately 20 A). When the compensating device is in the uncompensated state (remaining current < 35 A), the fault current is limited to 40 A with full zero voltage.
- Limiting the fault current to 40 A enables self-suppression of faults, which improves drive quality.
- Owing to the arc suppression coil, the condition for the LV grid potential is limited to $U + 1\ 200\ \text{V}$, or 1 430 V (in accordance with the European standard).

It is necessary to point out the condition that the arc suppression coil must be in a state of full compensation, or that the remaining current must be lower than 35 A.

Za potrebe EDF-a proizvedena su dva osnovna tipa kompenzacijskih prigušnica: za 600 A i 1 000 A, koje se ugrađuju ovisno o visini kapacitivne struje galvanski vezane mreže.

5 PRIJEDLOG KONCEPCIJE UZEMLJENJA MREŽE 10(20) kV HEP-a

Sagledavajući sve činjenice iznesene u prethodnom poglavlju, postavlja se nekoliko pitanja vezanih uz uzemljenje zvjezdišta mreža 20 kV, poglavito napajanih preko direktne transformacije 110/20 kV:

- kako odabrati tehničke karakteristike sustava automatske regulacije?
- kakve sheme spajanja automatskih kompenzacijskih prigušnica predložiti?
- treba li izvršiti određene promjene na postojećim zaštitama?
- kakvu kvalitetu opskrbe električnom energijom želimo postići?

Odgovor na postavljena pitanja bi trebao pomoći HEP-u u strateškoj odluci vezanoj na sustav uzemljenja zvjezdišta koji će dati tehnokonomski najpovoljnije rješenje.

5.1 Odabir tehničkih karakteristika sustava automatske regulacije

U poglavlju 4 ukratko su opisane dvije tehnologije izrade automatskih kompenzacijskih prigušnica. Prigušnica s kontinuiranom regulacijom koristi se u zemljama koje su otpočetak prihvatile rezonantno uzemljenje kao tehnički izbor te su shodno tome i prilagodili svoje tehničke propise ovakvom načinu uzemljenja. Njena prednost je nesumnjivo u mogućnosti kompenzacije kapacitivne struje na nekoliko ampera, međutim obično su to uređaji koji su konstruirani da mogu podnositi struje zemljospoja 2 sata, pa i više. Njihova je uloga da izdrže dugotrajne struje zemljospoja, te time omogućе traženje kvara, osiguravajući na taj način da se potrošači ne isklapaju. Međutim, zbog zahtjevanih uvjeta rada ovakve su prigušnice teže, odnosno njeni su gabariti znatno veći od prigušnica koje su konstruirane za rad tijekom zemljospoja koji ne traje više od maksimalno postavljenih vremena djelovanja relejne zaštite u transformatorskim stanicama.

Iz svega ovoga se može zaključiti da je izbor tehničkih karakteristika prigušnice usko vezan uz podešenje relejne zaštite, odnosno uz tehničke propise koji uvjetuju ili ne isključenje zemljospoja u mreži. Upravo iz tih je razloga EDF zahtijevao od proizvođača opreme da konstruiraju takvu auto-

Two basic types of arc suppression coils were produced for EDF's needs: for 600 A and 1 000 A, to be installed depending on the height of the capacitive current in a galvanically connected grid.

5 PROPOSAL FOR HEP's 10(20) kV GRID EARTHING CONCEPT

Considering all the facts presented in the previous chapter, several questions arise in connection to star-point earthing of 20 kV grids, primarily the ones supplied through direct 110/20 kV transformation:

- How to choose the technical characteristics of automatic regulation systems?
- What kind of diagrams for the connection of automatic arc suppression coils should be proposed?
- Should certain changes be made on existing protections?
- What kind of electric energy supply quality are we trying to achieve?

Answers to the questions posed above should help HEP make a strategic decision for a star-point earthing system which would present the most favourable technical-economic solution.

5.1 Choosing the Technical Characteristics of Automatic Regulation Systems

In Chapter 4 two technologies for the production of automatic arc suppression coils were briefly described. The continuous regulation coil is used in countries which have adopted resonant earthing as a technical choice since the beginning, and which have consequently also adjusted their technical regulations to this earthing method. Its advantage is undoubtedly the possibility to compensate capacitive current on several amperes, however, these are usually devices constructed to withstand earth-fault currents for 2 hours or longer. Their role is to withstand continuous duty earth-fault currents, and thus enable fault detection and ensure that consumers are not switched-off. However, due to the required operation conditions, this type of coil is heavier, its dimensions are significantly larger than those of coils constructed for operations during earth-faults whose duration does not exceed the maximal times set for relay protection operation in transformer stations.

From everything stated above it can be concluded that the choice of technical characteristics of a coil is closely associated with relay protection settings, or with technical regulations which do or do not condition the earth-fault switch-off in a

matsku prigušnicu koja će moći izdržati tijekom zemljospoja maksimalno 10 sekundi, jer njihovi tehnički propisi ne dozvoljavaju pogon mreže u zemljospoju. Naravno da je takva prigušnica jeftinija, ali je u tom slučaju potrebno osigurati pouzdan rad relejne zaštite kako bi se eliminirali svi prolazni zemljospojevi. Jasno da je izbor o vođenju mreže tijekom kvara veoma kompleksna odluka, jer između ostalog mora uzeti u obzir i opasnost za ljude.

5.2 Shema spajanja automatskih kompenzacijskih prigušnica

U slučaju primjene kompenzacijske prigušnice nije nužno sekcioniranje sabirnice 10(20) kV radi smanjivanja kapacitivne struje zemljospoja (po transformatoru 110/10(20) kV). Dakako, ako će se napajanje mreže 10(20) kV ostvariti preko dva transformatora 110/10(20) kV, tada sekcioniranje sabirnice postaje nužnost zbog zadržavanja struja trolejnog kratkog spoja u dopuštenim granicama (12,5 kA), a to je uobičajena situacija u hrvatskim mrežama.

Predloženo rješenje omogućava elastičnost pogona mreže 10(20) kV. Preporuča se odabir prigušnica s dovoljno visokom nazivnom strujom, tako da se u slučaju ispada jedne prigušnice druga može preuzeti i kompenzirati svu mrežu 10(20) kV. U tom smislu pogodan je izbor prigušnice nazivne struje 600 A.

Prijedlog priključka kompenzacijskih prigušnica na sabirnicu 10(20) kV prikazan je na jedнопolnoj shemi postrojenja 10(20) kV, slika 8.

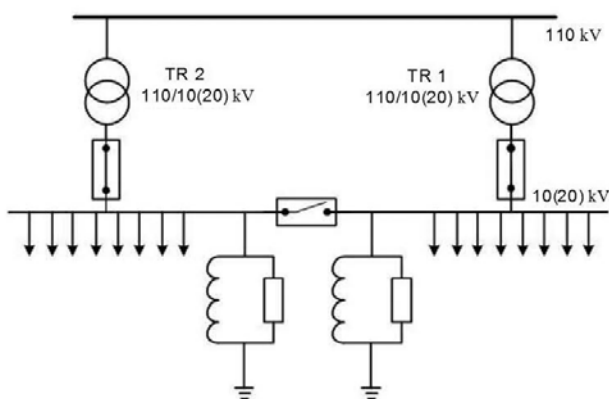
grid. For those very reasons EDF demanded that device manufacturers construct such an automatic coil which could endure an earth-fault of a maximum 10 seconds, because their technical regulations do not allow operations for an earth-faulted grid. Of course such a coil is cheaper, but in that case reliable relay protection operations must be ensured to eliminate all transient earth-faults. The choice of grid operation during a fault is clearly a very complex decision because, among other things, hazard for people must be taken into consideration.

5.2 Connection Diagram for Automatic Arc Suppression Coils

When applying the arc suppression coil, it is not obligatory to section 10(20) kV buses to reduce the capacitive earth-fault current (per 110/10(20) kV transformer). Of course, if the 10(20) kV grid supply is to be realised through two 110/10(20) kV transformers, bus sectioning will become a necessity because of the containment of three point short-circuit currents within permitted limits (12,5 kA), a common situation in Croatian grids.

The proposed solution enables the elasticity of the 10(20) kV grid operation. It is recommended to choose coils with a sufficiently high nominal current, so that, in case of the outage of one coil, the other one can take over and compensate the entire 10(20) kV grid. In that sense, it is suitable to choose a coil with 600 A nominal current.

A proposal for the connection of arc suppression coils on 10(20) kV buses is presented on a single pole 10(20) kV plant diagram, Figure 8.



Slika 8 — Pojednostavljena shema priključivanja kompenzacijskih prigušnica
Figure 8 — A simplified diagram of arc suppression coil connection

5.3 Relejna zaštita u kompenziranim mrežama

Prijelaz na uzemljenje zvjezdišta kompenzacijskom prigušnicom vodi kompenziranju nulte kapacitivne struje induktivnom strujom, koja za posljedicu ima ograničenje vrijednosti struje kvara na maksimalno 40 A za vrijeme zemljospoja (u francuskim mrežama srednjeg napona). Naravno da korištenjem drugih tehnologija kompenzacijske prigušnice (plivajuće jezgre) preostala struja može biti i znatno niža.

Nulta struja u pogođenom izvodu može biti dosta manja nego ona koja teče u izvodu bez kvara. Naime, nulta struja u izvodu bez kvara je proporcionalna kapacitetu tog izvoda. Može doseći više od 80 A (kod dugih kabelskih vodova, prema praksi u Francuskoj).

Zaštite na principu nulte granične struje, upotrijebljene kod uzemljenja preko otpornika više ne funkcioniraju, jer uvjet na osnovi kojeg su radile sada nije ispunjen, naime struja izvoda pod kvarom nije više nužno ona koja ima najvišu amplitudu.

Treba stoga postaviti novu koncepciju zaštite koja omogućava detektiranje jednofaznih kvarova. Ove zaštite moraju biti direktne i oslanjati se na sljedeći princip: izvod pod kvarom je jedini koji posjeduje značajnu radnu komponentu (koja odgovara struji kvara).

Navedene promjene zaštite zahtijevaju reviziju zaštite stanica. U sljedećem će se poglavlju opisati francuska koncepcija relejne zaštite, s obzirom na činjenicu da je u Hrvatskoj potrebno izvršiti identične zahvate, zbog sličnog prijelaza sa zaštite preko maloohmskog otpornika na rezonantno uzemljenje.

5.3.1 Jednofazni kvarovi

Pri uzemljenju preko otpora u Francuskoj, odnosno EDF-u, detekcija jednofaznih kvarova je realizirana na selektivni način uz pomoć ampermetričke nulte zaštite PAH-a (engl. *Protection Ampermetrique Homopolaire*), nulte vatmetričke zaštite PWR-a (engl. *Protection Wattmetrique Homopolaire*) i ampermetričke zaštite za visokoomske kvarove EPATR. U slučaju nefunkcioniranja ovih zaštita postoji i zaštita PDTR za visokoomske kvarove, koja će se kasnije opisati. (U članku su zadržani originalni nazivi zaštita, zbog mogućnosti korištenja opsežne literature o relejnoj zaštiti).

Zajedničko djelovanje ovih zaštita omogućava detektiranje kvarova s nultom strujom od 0,7 A do više od 600 A kako je prikazano na slici 9 (granične struje se odnose na napon 20 kV).

5.3 Relay Protection in Compensated Grids

The transition to arc suppression coil star-point earthing leads to the compensation of zero capacitive current with inductive current, which consequentially limits the fault current value to a maximum of 40 A during earth-fault (in French mid-voltage grids). Of course, with the usage of other arc suppression coil technologies (plunger cores), the remaining current can also be significantly lower.

The zero current in the affected feeder can be significantly smaller than the one flowing through the non-faulted feeder. Namely, the zero current in the non-faulted feeder is proportional to the capacity of that feeder. It can reach more than 80 A (with long cable ducts, according to the French practice).

Protections on the zero limiting current principle, used with earthing through resistors, no longer function because the condition on the basis of which they operated is no longer fulfilled, namely, the current of the faulted feeder is not necessarily the one with the highest amplitude.

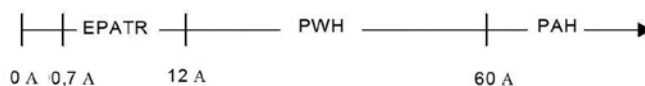
Therefore, a new concept of protection must be established, one which will enable the detection of single phase faults. These protections must be direct and rely on the following principle: the faulted feeder is the only one which possesses the significant active component (which corresponds to the fault current).

The said protection changes require a revision of station protection. The next chapter will elaborate on the French concept of relay protection, taking into consideration the fact that identical interventions must be undertaken in Croatia because of a similar transition from protection through low ohm resistors to resonant earthing.

5.3.1 Single Phase Faults

In earthing through resistance in France, i.e. EDF, the detection of single phase faults is realised in a selective manner with the aid of amperometric zero protection PAH (fr. *Protection Ampermetrique Homopolaire*), zero wattmetric protection PWR (fr. *Protection Wattmetrique Homopolaire*) and amperometric protection for high ohm faults EPATR. If the aforementioned protections fail to function, PDTR protection for high ohm faults also exists, and will be elaborated on later. (The original terms for the protections were retained in the article, to facilitate the usage of the extensive relay protection literature).

The joint operation of these protections enables fault detection for zero currents from 0,7 A to over 600 A as shown in Figure 9 (limiting currents relate to 20 kV voltage).



Slika 9 — Zajedničko djelovanje zaštita
Figure 9 — Joint protection operation

Međutim, kako smo vidjeli u uvodu, potrebno je revidirati uporabu ovih zaštita kod prijelaza na uzemljenje preko kompenzacijske prigušnice.

U nastavku će se ukratko opisati načini djelovanja spomenutih zaštita.

PAH

Ampermetrička nulta zaštita ne funkcioniše pri uzemljenju kompenzacijskom prigušnicom jer princip njezinog rada nije više osiguran. Ta vrsta zaštite zabranjena je kod kompenziranih mreža.

PWH

PWH je zaštita temeljena na mjerenju radne komponente nulte snage koja teče izvodima koje štiti. Ona omogućava izbjegavanje neispravnih prorada na izvodima s visokom kapacitivnom strujom, poboljšavajući znatno osjetljivost zaštite.

Princip rada se temelji na činjenici da zemljospoj predstavlja izvor takozvane preostale snage S_{pr} koji nadomješta mrežu prema izvoru. Nulta snaga se raspoređuje na nultu impedanciju izvora Z_i i kapacitivnu impedanciju izvoda zdravih faza. Izvod bez kvara vidi samo prolazak reaktivne (jalove) komponente snage. Dio mreže pod kvarom vidi samo prolazak radne komponente snage S_r .

PWH mjeri dakle snagu koja prolazi izvodom, i uspoređuje je s obzirom na postavljenu karakteristiku rada releja. Karakteristika je dana na slici 10.

However, as shown in the introduction, the usage of these protections must be revised when transitioning to arc suppression coil earthing.

In the remainder of the chapter I will briefly describe the operation modes of the aforementioned protections.

PAH

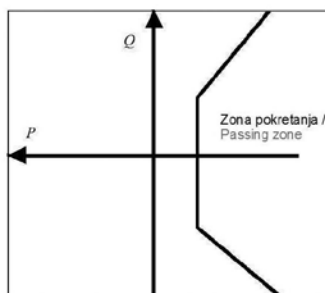
Ampermetric zero protection does not function with arc suppression coil earthing because its operation principle is no longer ensured. This type of protection is forbidden in compensated grids.

PWH

PWH is a protection based on the measuring of the zero power active component which flows through the feeders it protects. It enables avoiding faulty trips on high capacitive current feeders, significantly improving protection sensitivity.

The operating principle is based on the fact that the earth-fault presents a source of the so-called remaining power S_{pr} which substitutes the grid to the source. The zero power is arranged on the source zero impedance Z_i and the capacitive feeder impedance of the healthy phases. The non-faulted feeder sees only the passing of the reactive power component. The faulted part of the grid sees only the passing of the operative power component S_r .

PWH therefore measures the power passing through the feeder and compares it to the installed characteristic of relay operation. The characteristic is given in Figure 10.



Slika 10 — Proradna karakteristika zaštite
Figure 10 — The tripped characteristic of the protection

Kada se izmjerena snaga nalazi u zoni prorade, PWH šalje nalog za otvorenje prekidača u izvodu. Ovaj tip zaštite također radi dobro kod uzemljenja preko otpora kao i prilikom rezonantnog uzemljenja.

EPATR (fran. *Ensemble de Protections Ampèremétriques de Terre Résistante*)

Kao što se vidjelo u uvodu, zaštite upotrebljavane kod uzemljenja preko otpornika temelje se na principu prema kojem je izvod pod kvarom onaj koji posjeduje najveću nultu struju.

Kod uzemljenja preko otpornika, amperometrička nulta zaštita djeluje ispravno. Ipak, ova zaštita nema dovoljnu osjetljivost za detektiranje kvarova s velikim prijelaznim otporom. Smatra se da zemljospojevi preko visokih prijelaznih otpora ne mogu biti otkriveni navedenom zaštitom ($I < 12 \text{ A}$). Zato se za isključenje takvih kvarova upotrebljava zaštita s inverznom vremenskom karakteristikom ili EPATR.

Umjesto da uspoređuje vrijednosti nulte struje s obzirom na jednu podešenu vrijednost (kao PAH), EPATR uspoređuje ovu vrijednost s obzirom na vremenski ovisnu radnu karakteristiku: što je struja u izvodu veća, brže će se proraditi zaštita.

Granica detekcije EPATR-a je oko **0,7 A** na SN izvodu. To znači da će proraditi sve zaštite izvoda čija je nulta struja iznad ove granice. Ali vrijeme prorade svake zaštite će biti inverzno proporcionalno vrijednosti struje, tako da će izvod pod kvarom (koji ima najveću amplitudu struje) proraditi prvi. Kada kvar nestane, druge zaštite ne vide više nultu struju, dakle neće proraditi.

Ipak, ako EPATR izvoda pod kvarom ne radi, onda će sve zaštite izvoda bez kvara proraditi prije ili kasnije. Samo će izvod pod kvarom ostati napajan.

Da bi se zaštitili od ovog rizika, EPATR izvoda je povezana sa zaštitom od visokoomskih kvarova DTR-a koji daje nalog za otvaranje prekidača trafo polja u roku od **165 s**, od trenutka kada izmjerena struja u zvjezdistu prijeđe **0,5 A**. Zaštita DTR-om je nadstrujna zaštita, koja mjeri struju zvjezdista.

Zaštita EPATR je upotrebljena kod uzemljenja otpornikom za detekciju kvarova s prijelaznim otporom koje ne vidi PAH. Nasuprot tome, kod uzemljenja kompenzacijskom prigušnicom, ova se zaštita više ne koristi. Ona se mora zamijeniti novim tipom zaštite. Granična nulta struja PAH-a je podešena na oko **60 A**. Ispod te vrijednosti zaštita ne proraduje.

Može se primijetiti da će kvarovi, koje detektira PAH, isto tako biti detektirani od EPATR, ali vrije-

When the measured power is in the tripping zone, PWH sends an order to open the feeder switches. This type of protection also functions well during earthing through resistance and during resonant earthing.

EPATR (fr. *Ensemble de Protections Ampèremétriques de Terre Résistante*)

As shown in the introduction, the protections used with earthing through resistors are based on a principle by which the faulted feeder is the one possessing the highest zero current.

With earthing through resistors, the amperometric zero protection functions correctly. However, this protection is not sensitive enough to detect faults with large transient resistance. It is believed that earth-faults through high transient resistance cannot be detected with the said protection ($I < 12 \text{ A}$). Therefore, a protection with an inverse time characteristic (or EPATR) is used to switch off such faults.

Instead of comparing the zero current values in relation to one set value (as PAH), EPATR compares this value in relation to a time-dependent operating characteristic: the larger the feeder current, the faster the protection will trip.

The EPATR detection limit is approximately **0,7 A** on an MV feeder. That means that all feeder protections whose zero current is over this limit will trip. But the tripping time for each protection will be inversely proportional to the values of the current, so the faulted feeder (which has the highest current amplitude) will trip first. When the fault disappears, the other protections no longer see the zero current, therefore they will not trip.

Nevertheless, if the EPATR of the faulted feeder does not function, all the protections of non-faulted feeders will trip sooner or later. Only the faulted feeder will remain supplied.

To protect it from this risk, the EPATR of the feeder is connected to a high ohm fault DTR protection, which gives the order to open the transformer field switches within **165 s** from the moment the current measured in the star-point exceeds **0,5 A**. DTR protection is an overcurrent protection which measures the star-point current. EPATR protection is used with resistor earthing to detect transient resistance faults invisible to PAH. In contrast to that, this protection is no longer used with arc suppression coil earthing. It must be replaced with a new type of protection. The PAH zero limiting current is set at approximately **60 A**. Below that value, the protection will not trip.

It can be noted that the faults detected by PAH will also be detected by EPATR, but the tripping time of PAH is shorter than for EPATR (example:

me prorade PAH -a je manje od EPATR (primjer: pri kvaru od 60 A, PAH prorađuje za 0,5 s dok to vrijeme za EPATR iznosi 4 s). Te su dvije zaštite dakle komplementarne.

5.3.2 Zaštita od visokoomskih kvarova u kompenziranim mrežama (PDTR)

Kod novog način uzemljenja zvjezdišta u SN mrežama javlja se problem vezan za otkrivanje jednofaznih kvarova s prijelaznim otporom. Naime, za ovu vrstu mreže, izvod u kvaru nije više sistematski onaj kroz kojeg protječe nulta struja maksimalne amplitude (kao u rezistentno uzemljenoj mreži). Detekcija granične struje, čak i korištenjem releja s inverznom vremenskom karakteristikom nije prilagođena. S druge strane, vatmetrička nulta zaštita posjeduje ograničenu osjetljivost. Samo je moguća sigurna detekcija kvara u trafo polju pomoću voltmetričke zaštite na nulte komponente (PVH); međutim ne postiže se selektivnost, jer se u tom slučaju izbacuje cijela sekcija sabirnica.

Bez novih uređaja za detekciju jednofaznih kvarova s prijelaznim otporom, prijelaz na uzemljenje preko kompenzacijske prigušnice vodio bi lošijoj kvaliteti pogona, odnosno smanjenoj osjetljivosti zaštite i povećanom riziku, zbog neispravno detektiranih kvarova.

Zato je EDF definirao novi tip zaštite, sposoban da detektira kvarove s visokim prijelaznim otporom kod uzemljenja zvjezdišta kompenzacijskom prigušnicom, s osjetljivošću sličnoj onoj od EPATR-a.

Ova zaštita od visokoomskih kvarova (ili PDTR) radi prema sljedećem principu: ona uspoređuje promjene kapacitivne struje svakog izvoda s obzirom na radnu karakteristiku releja koja ovisi o veličini V_0 (nulti napon) i I_N (struja zvjezdišta). Ova zaštita može štititi do 8 izvoda (praktički jednu sekciju sabirnica). Princip zaštite se sastoji u davanju naloga za otvaranje prekidaču u vodnom polju kada se vektor nulte kapacitivne struje izvoda nađe u svojoj zoni, slika 11.

at a 60 A fault, PAH trips in 0,5 s, while the time for EPATR is 4 s). The two protections are therefore complementary.

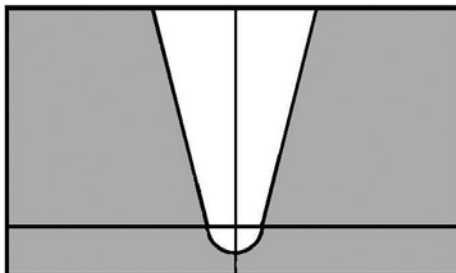
5.3.2 High Ohm Fault Protection in Compensated Grids (PDTR)

With the new method of star-point earthing in MV grids, a problem arises in connection with the detection of single phase faults with transient resistance. Namely, for this type of grid, the faulted feeder is no longer the systemic one through which the maximum amplitude zero current flows (as in a grid with resistant earthing). The detection of limiting current is not adjusted, even when using a relay with the inverse time characteristic. On the other hand, the wattmetric zero protection has limited sensitivity. Safe fault detection in the transformer field is possible only with voltmetric protection for zero components (PVH); however, selectivity is not achieved, because the entire bus section is faulted.

Without new devices for the detection of single phase faults with transient resistance, the transition to arc suppression coil earthing would lead to lower drive quality, to a reduced protection sensitivity and an increased risk for inaccurately detected faults.

That is why EDF has defined a new type of protection, capable of detecting faults with high transient resistance at star-point earthings with arc suppression coils, with the sensitivity resembling EPATR's.

This high ohm fault protection (or PDTR) operates according to the following principle: It compares the changes of the capacitive current of each feeder in relation to the operating characteristic of the relay which depends on the value of V_0 (zero voltage) and I_N (star-point current). This protection can protect up to 8 feeders (practically one bus section). The protection principle is to give orders to open switches in the transmission field when the feeder's zero capacitive current vector finds itself in the gray zone, Figure 11.



Slika 11 — Karakteristika djelovanja PDTR zaštite
Figure 11 — The characteristic of PDTR protection operation

Smatra se da jedino nulta struja u vodu u kvaru posjeduje radnu komponentu. Zdravi izvodi se na karakteristici nalaze u zoni oko imaginarne osi (bijeli dio). Karakteristika rada PDTR zaštite uzima u obzir moguće greške prilikom akvizicije parametara kao i asimetriju mreže koja bi mogla dovesti do neželjenih izbacivanje pojedinih izvoda.

Ova zaštita omogućava:

- postizanje osjetljivosti zagaranitirane od EPATR zaštite u 76 % slučajeva,
- otkrivanje kvarova koje EPATR ne može osjetiti ($R < 10 \text{ k}\Omega$).

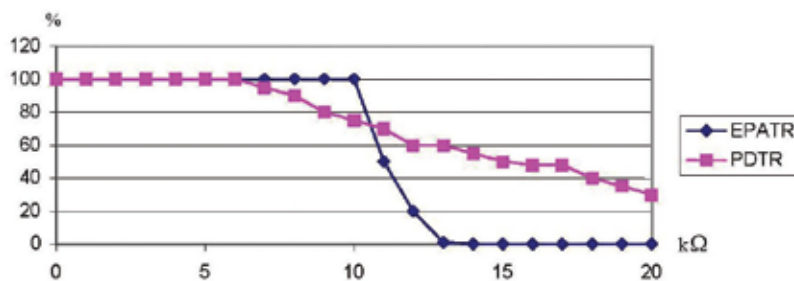
Na slici 12 prikazana je usporedba navedenih zaštita.

It is believed that only the zero current of the faulted line possesses the operative component. In the characteristic, the healthy feeders are located in the zone around the imaginary axis (white section). The characteristic of PDTR protection operation takes into consideration possible errors during parameter acquisition and the asymmetric nature of the grid, which could lead to unwanted faults of certain feeders.

This protection enables:

- reaching the sensitivity guaranteed by EPATR protection in 76 % of cases,
- detecting faults which cannot be felt by EPATR ($R < 10 \text{ k}\Omega$).

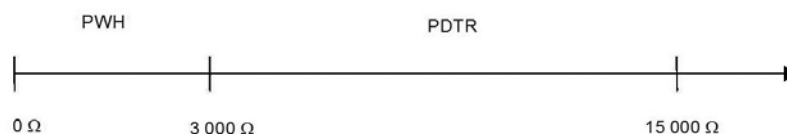
Figure 12 shows the comparison of the said protections.



Slika 12 — Usporedba karakteristika zaštita
Figure 12 — Comparison of protection characteristics

Kao što se vidi PWH i PDTR zaštite omogućavaju u kompenziranom režimu rada selektivnost zaštite izvoda prilikom jednopolnih kvarova. PDTR štiti jednu sekciju sabirnica (do 8 izvoda) dok PWH štiti samo jedan izvod. Te dvije zaštite su komplementarne, a njihovo se djelovanje može opisati slikom 13.

As we can see, PWH and PDTR protections enable the selectivity of feeder protection during single pole faults in a compensated operating regime. PDTR protect one bus section (up to 8 feeders) while PWH protects only one feeder. The two protections are complementary, and their operation can be described by Figure 13.



Slika 13 — Opis zaštite PWH i PDTR
Figure 13 — Description of PWH and PDTR protection

Ipak, u slučaju zatajivanja jedne od zaštita dotični izvod nije zaštićen. Stoga je potrebno imati u rezervi voltmetričku nultu zaštitu PVH, koja daje signal za otvaranje prekidača u transformatorskom polju u slučaju prekoračenja postavljenog nultog napona.

Nevertheless, if one of the protections fails, the feeder in question is not protected. Therefore it is necessary to have the voltmetric zero protection PVH in reserve, which gives the signal to open the transformer field switches in case the set zero voltage is exceeded.

5.4 Kvaliteta opskrbe električnom energijom

Primjena kompenzacijskih prigušnica za uzemljenje zvjezdišta ima veoma pozitivan utjecaj na kvalitetu opskrbe električne energije. Poznato je da se većina prolaznih zemljospojeva u takvim mrežama eliminira bez prorade relejne zaštite. To je bitno različita situacija u odnosu na mreže sa zvjezdištem uzemljenim preko otpornika, gdje se prolazni kvarovi uklanjaju proradom automatskog ponovnog uklopa (APU). U nadzemnim mrežama to je često veliki problem zbog velikog broja prolaznih kvarova.

S druge strane, prolazni kvarovi koji se uklanjaju djelovanjem APU-a postaju sve veći problem kupcima iz kategorije poduzetništvo. Razlog je sve šire korištenje elektroničke opreme koja je osjetljiva i na najmanje nestanke napona. Zbog toga se u mnogim državama Europske unije prolazni kvarovi (a ne samo trajni) tretiraju kao dio kvalitete isporuke električne energije, što je jedna od temeljnih zadaća operatora distribucijske mreže. Takav pristup se reflektira i u primjeni tzv. poticajne regulacije, gdje je broj prolaznih kvarova jedan od ulaznih parametara za penaliziranje/nagrađivanje operatora distribucijskog sustava. Kao primjer može se navesti Italija jer je otišla veoma daleko u poticajnoj regulaciji, koja je između ostaloga rezultirala masovnom primjenom kompenzacijskih prigušnica u mrežama srednjeg napona.

Također treba ukazati na obveze koje proizlaze iz važećih Općih uvjeta za opskrbu električnom energijom. Operatori prijenosne i distribucijske mreže dužni su predložiti standardne razine kvalitete opskrbe električnom energijom po područjima potrošnje, koje će u konačnici usvojiti Vlada Republike Hrvatske. Bez obzira na konkretne numeričke parametre, sigurno je da će usvajanje navedenih standarda djelovati poticajno na uvođenje prigušnica za uzemljenje zvjezdišta.

6 PROVEDBA UZEMLJENJA ZVJEZDIŠTA U ELEKTROPRI-MORJU RIJEKA

Nakon intenzivnih priprema koje uključuju studijski rad kao i konzultacije s proizvođačima opreme, Elektroprimorje Rijeka se odlučila provesti uzemljenje zvjezdišta u dvije transformatorske stanice: TS 110/20 kV kV Crikvenica i TS 110/20 kV Krk. Izbor ovih dviju transformatorskih stanica je proizišao iz činjenice što su kapacitivne struje dotičnih mreža prešle vrijednosti 250 A odnosno 350 A. Odabrana je takozvana francuska koncepcija uzemljenja zasnovana na automatskoj kompenzacijskoj prigušnici sa stupnjevitom kompenza-

5.4 The Quality of Electric Energy Supply

The application of arc suppression coils in star-point earthing has a very positive effect on the quality of electric energy supply. It is known that most transient earth-faults in such grids are eliminated without tripping the relay protection. It is a significantly different situation in relation to grids with the star-point earthed through resistors, where transient faults are removed by tripping the automatic re-switch-on (ARSO). In overhead grids this is often a serious problem because of the large number of transient faults.

On the other hand, transient faults removed by ARSO are becoming a growing problem for buyers from the entrepreneurial category. The reason for that is the ever increasing usage of electronic equipment sensitive to even the slightest voltage faults. That is why in many European Union states transient faults (not only permanent ones) are treated as part of quality electric energy delivery, which is one of the basic tasks of the distribution grid operator. Such an approach is also reflected in the usage of the so-called incentive regulation, where the number of transient faults is one of the entry parameters for penalising/rewarding the distribution system operators. As an example we can cite Italy, because it has gone very far with incentive regulation, and that has, among other things, resulted in the mass application of arc suppression coils in mid-voltage grids.

The obligations stemming from the valid General Conditions for the Supply of Electric Energy should also be pointed out. The transmission and distribution grid operators are required to suggest standard quality levels for electric energy supply by consumption areas, which will finally be adopted by the Government of the Republic of Croatia. Regardless of specific numeric parameters, the adoption of the aforementioned standards will certainly have an incentive effect on the introduction of coils for star-point earthing.

6 THE IMPLEMENTATION OF STAR-POINT EARTHING IN ELEKTROPRI-MORJE RIJEKA

After intense preparations which include studies and consultations with equipment manufacturers, Elektroprimorje Rijeka decided to implement star-point earthing in two transformer stations: TS 110/20 kV Crikvenica and TS 110/20 kV Krk. The choice of these two transformer stations stems from the fact that the capacitive currents of the grids in question have respectively exceeded the 250 A and 350 A values. The so-called French

cijom povezanoj sa selektivnim djelovanjem re-
lejne zaštite. Dakle, primijenjeno je rješenje koje
uvažava hrvatske propise kojima se ograničava
pogon mreže tijekom zemljospoja. U sljedećem
će se poglavlju opisati primijenjeno rješenje.

6.1 Uzemljenje zvjezdišta u TS 110/20 kV Crikvenica i TS 110/20 kV Krk

Automatske kompenzacijske prigušnice (AKP) su
ugrađene u transformatorske stanice Crikvenica
i Krk. Sastoje se od cik-cak transformatora koji
služi za stvaranje umjetne neutralne točke i di-
jela gdje su smještene induktivne zavojnice s pa-
ralelnim otpornicima, slika 14. Postoje četiri in-
duktivne zavojnice za limitiranje struje (X40, X80,
X160, X320, X400) za AKP nazivne struje 600 A.
Uređaj sadrži i dva otpornika R_1 i R_2 koji u raznim
kombinacijama s induktivnim zavojnicama osi-
guravaju skalu zahtijevane kompenzacije. Upravl-
janje ovim sklopom elemenata osigurava da
niti u jednom trenutku neutralna točka ne bude
izolirana. Osim toga postoji i transformator za
utiskivanje struje koji dobiva signal od sustava za
automatsku regulaciju SAR. SAR vrši proračun
nulte impedancije mreže kako bi se KP postavila
u položaj koji osigurava odgovarajuće podešenje.
Točna procedura proračuna će biti pojašnjenja u
daljnjem tekstu.

Kompenzacijska prigušnica je povezana s uprav-
ljačkim sklopom koji se obično nalazi u glavnoj
zgradi transformatorske stanice, a ima sljedeće
osnovne funkcije:

- upravljanje elementima za komutaciju (in-
duktivne zavojnice i otpornici) prema nalogu
SAA-a,
- omogućavanje ručnog podešenja kompen-
zacije,
- registriranje događaja vezanih za rad uređaja
KP.

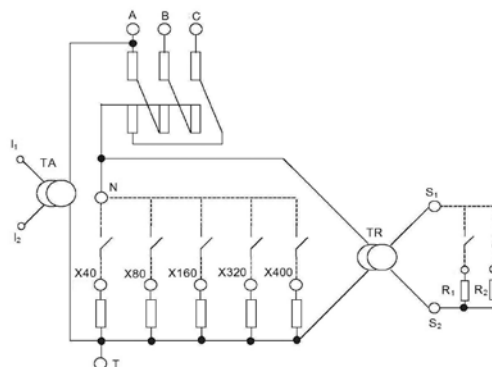
earthing concept was chosen, based on an auto-
matic arc suppression coil with stepped compen-
sation connected with selective relay protection
operation. Therefore, the solution which takes into
consideration Croatian regulations limiting grid
operation during earth-faults was applied. The next
chapter will elaborate on the solution applied.

6.1 Star-point Earthing in TS 110/20 kV Crikvenica and TS 110/20 kV Krk

Automatic arc suppression coils (AASC) were
installed in transformer stations Crikvenica and
Krk. They are comprised of a zigzag transformer
which serves to create an artificial neutral point,
and a section which houses inductive coils with
parallel resistors, Figure 14. There are four in-
ductive coils for limiting currents (X40, X80, X160,
X320, X400) for 600 A nominal current AASC.
The device also contains two resistors, R_1 and
 R_2 , which ensure the scale of the required com-
pensation in various combinations with induc-
tive coils. The operation of this element circuit
ensures that the neutral point is not isolated in
any moment. Furthermore, there is also a trans-
former for current injection which receives a sig-
nal from the ARS automatic regulation system.
The ARS calculates the zero impedance of the
grid to position the ASC in such a manner to en-
sure adequate settings. The specific calculation
procedure will be elaborated on subsequently.

The arc suppression coil is connected to the op-
erative circuit which is usually in the main trans-
former station building, and it has the following
basic functions:

- controlling commutation elements (inductive
coils and resistors) in accordance with SAA
orders,
- enabling manual compensation settings,
- registering events connected with ASC device
operation.



Slika 14 — Shema automatske kompenzacijske prigušnice
Figure 14 — Automatic arc suppression coil diagram

Kompensacijska prigušnica posjeduje sljedeće karakteristike (na slici 15 prikazana je jedna AKP instalirana u TS Crikvenica:

- nazivni napon: 21 400 V, 50 Hz,
- područje reguliranja induktivne struje: od 40 A do 600 A, korakom od 40 A,
- radna komponenta struje: veća od 20 A,
- trajna struja: 60 A,
- kratkotrajna struja: 10 s, 600 A,
- razina buke: od 68 dB do 90 dB,
- nivo izolacije faza A B C : 24 kV (50/125 kV na udarni atmosferski napon),
- nivo izolacije stezaljki prema zemlji: 24 kV (50/95 kV na udarni atmosferski napon),
- gubitci praznog hoda: 1 750 W (KP 600 A) ili 2 500 W (KP 1 000 A).

The arc suppression coil has the following characteristics (Figure 15 shows one AASC installed in TS Crikvenica):

- nominal voltage: 21 400 V, 50 Hz,
- inductive current regulation area: from 40 A to 600 A, with a 40 A step,
- operative component of the current: higher than 20 A,
- continuous current: 60 A,
- short-time current: 10 s, 600 A,
- noise level: from 68 dB to 90 dB,
- A B C phase isolation level: 24 kV (50/125 kV on the atmospheric voltage impulse),
- clamp isolation level towards earth: 24 kV (50/95 kV on the atmospheric voltage impulse),
- idle running losses: 1 750 W (KP 600 A) or 2 500 W (KP 1 000 A).



Slika 15 — KP u TS Crikvenica
Figure 15 — ASC in TS Crikvenica

6.2 Sustav automatske regulacije (SAR)

Cilj sustava automatske regulacije je održavanje SN mreže kompenziranom u rasponu

6.2 Automatic Regulation System (ARS)

The purpose of the automatic regulation system is to maintain the MV grid compensated in the range

$$-35 \text{ A} < I_{\text{raz}} < +35 \text{ A} \quad , \quad (10)$$

gdje je struja razlike:

where the difference of current is:

$$I_{\text{raz}} = I_{\Delta} = I_L - I_C \quad , \quad (11)$$

a predstavlja vektorsku razliku induktivne struje prigušnice i kapacitivne struje mreže.

And it presents the vector difference of the coil's inductive current and the capacitive current of the grid.

SAR je uređaj koji koristi patent zaštićen od EDF-a pod imenom: Metoda i uređaj za mjerenje kompenzacije distributivne mreže.

ARS is a device using an EDF protected patent entitled: The Method and Device for Measuring Distribution Grid Compensation.

v automatske regulacije se stavlja na montažnu šinu 19" 3U, a povezan je s drugim uređajem, nazvanim DIC (*Dispositif d'Injection de Courant*) koji ima funkciju uređaja za injekciju (utiskivanje) signala, odnosno struje. Postoji i uređaj za upravljanje i nadzor automatske kompenzacijske prigušnice (CCIC) kako bi upravljao pozicijom (položajem) kompenzacijske prigušnice.

Uloga SAR-a je održavanje SN mreže kompenziranom, bez obzira na izvođenje manevara u mreži, odnosno mijenjanja uklopnog stanja.

Prebacivanje s jednog izvoda na drugi, preuzimanje jednog transformatora drugim ili svi ostali događaji tog tipa u mreži se manifestiraju promjenom preostalog napona V_r (vektorski zbroj triju faznih napona). Stoga, SAA periodički mjeri veličinu tog preostalog napona. (Period akvizicije i obrade je približno 2 sekunde).

Kada SAA detektira promjene preostalog napona (V_r) zadovoljavajući pritom određene uvjete, započinje proces proračuna koji se sastoji od mjerenja stupnja nekompenziranosti mreže. Ako je mreža nekompenzirana, SAR započinje proces usklađivanja radi ponovne kompenzacije mreže, zatim ponovo pokreće proces proračuna kako bi provjerio je li kompenzacija uspjela. Ovaj način rada detaljno je opisan u nastavku.

6.2.1 Odvijanje procedure proračuna

SAR prati promjene preostalog napona (V_r) te u trenutku kad on prijeđe prag vrijednosti koja se u 20 kV mreži obično postavlja na 30 V, SAA pokreće vremensko zatezanje T . Vrijednost ovog zatezanja se također može parametrirati, a regulirana je obično na 30 s.

Ako je za vrijeme ovog zatezanja promjena preostalog napona V_r uvijek iznad postavljene vrijednosti (npr. 30 V), SAA pokreće proces proračuna.

SAA pokreće također periodičke procese proračuna (svaka 24 sata) kako bi provjerio da je mreža uvijek kompenzirana.

Odvijanje procesa proračuna ima za cilj utvrđivanje vrijednosti struje razlike I_{Δ} , kao i vrijednosti radne komponente struje I_R mreže.

Postupak započinje injekcijom struje između faze i zemlje – koja odgovara kontroliranom kvaru – i mjerenju nultog napona prije i za vrijeme injekcije, kao i vrijednosti injektirane struje.

Cilj procedure je izmjeriti vrijednost preostalog napona i injektirane struje. Time se znatno olakšava izračun kapacitivne struje jer se ranije vršilo mjerenje struje direktno u mreži (prije pojave EDF-ovog patenta).

The automatic regulation system is placed on a mounting 19" 3U rail, and is connected with another device called DIC (*Dispositif d'Injection de Courant*) which has a signal, i.e. current, injection function. There is also a device for automatic arc suppression coil control and surveillance (CCIC) to manage the position of the arc suppression coil.

The role of ARS is to maintain the MV grid compensated, regardless of manoeuvres performed in the grid, or the changes to the switch-on condition.

Switching from one feeder to the other, taking over one transformer with another or any other events of this kind are manifested in the grid with the change of the remaining voltage V_r (vector addition of the three phase voltages). Therefore, SAA periodically measures the size of the remaining voltage. (The acquisition and processing period is approximately 2 seconds).

When SAA detects changes in the remaining voltage (V_r) while satisfying certain conditions, the calculation process begins, comprised of measuring the degree of uncompensation of the grid. If the grid is uncompensated, ARS begins the harmonisation process to re-compensate the grid, and then restarts the calculation process to verify whether the compensation was successful. This mode of operations is described in detail below.

6.2.1 The Calculation Procedure

ARS tracks the changes in the remaining voltage (V_r), and in the moment it crosses the value threshold usually set to 30 V in a 20 kV grid, SAA initiates the time delay T . The value of this delay can also be parametered, and it is usually regulated to 30 s.

If, during this delay, the change in the remaining voltage V_r is always over the set value (for ex. 30 V), SAA initiates the calculation procedure.

SAA also initiates periodic calculation processes (every 24 hours) to verify whether the grid is always compensated.

The goal of the calculation process is to determine the value of the difference of current I_{Δ} , and the values of the operative component of the current I_R of the grid.

The procedure starts with a current injection between the phase and the earth – which corresponds to a controlled fault – measures zero voltage before and during the injection and measures the values of the injected current.

The purpose of the procedure is to measure the value of the remaining voltage and the injected current. That significantly eases the calculation of capacitive current, because earlier (prior to the

Proračun se odvija na način da se izmjere veličine V_{r0} i V_{r1} koje nazivamo preostalim naponom prije, odnosno za vrijeme injektiranja struje I_{inj} , pa se može postaviti relacija:

$$V_{r1} - V_{r0} = Z_{ekv} \cdot I_{inj} \quad , \quad (12)$$

$$Y_{ekv} = \frac{I_{inj}}{\Delta V_r} \quad , \quad (13)$$

gdje je:

ΔV_r – preostali napon, V,
 V_{r0} – preostali napon prije injektiranja struje, V,
 V_{r1} – preostali napon za vrijeme injektiranja struje, V,
 I_{inj} – struja u vrijeme injektiranja, A,
 Z_{ekv} – ekvivalentna impedancija mreže, Ω ,
 Y_{ekv} – ekvivalentna admitancija mreže, Ω .

Dakle, vrijednost ekvivalentne admitancije mreže ovisi o veličinama I_R i I_Δ prema sljedećoj jednadžbi:

$$Y_{ekv} = \frac{I_R - jI_\Delta}{\Delta V_r} \quad , \quad (14)$$

gdje je:

I_Δ – struja razlike, A,
 I_R – struja mreže, A

Iz (13) i (14) se dobiju vrijednosti realnog dijela (I_R) i imaginarnog dijela (I_Δ), čime se omogućuje proračun struje razlike I_Δ .

Nulta shema mreže za vrijeme injektiranja struje prikazana je na slici 16.

introduction of the EDF patent) currents were measured directly in the grid.

The calculation is made in the following manner - the values V_{r0} and V_{r1} , the remaining voltage prior to or during current injection I_{inj} , are measured, and we can establish the relation:

where it is as follows:

ΔV_r – remaining voltage, V,
 V_{r0} – remaining voltage prior to current injection, V,
 V_{r1} – remaining voltage during current injection, V,
 I_{inj} – current during injection, A,
 Z_{ekv} – equivalent grid impedance, Ω ,
 Y_{ekv} – equivalent grid admittance, Ω .

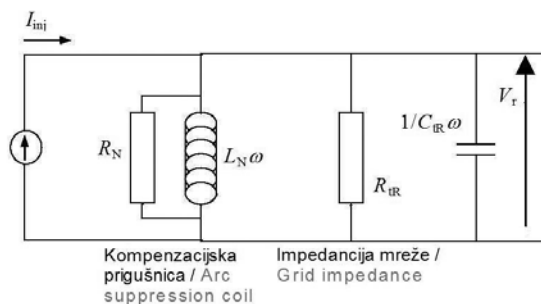
Therefore, equivalent grid admittance depends on the values of I_R and I_Δ in accordance with the following equation:

where is:

I_Δ – difference of current, A,
 I_R – grid current, A,

(13) and (14) give us the values of the real share (I_R) and the imaginary share (I_Δ), which enables the calculation of the difference of current I_Δ .

The zero grid diagram during current injection is shown in Figure 16.



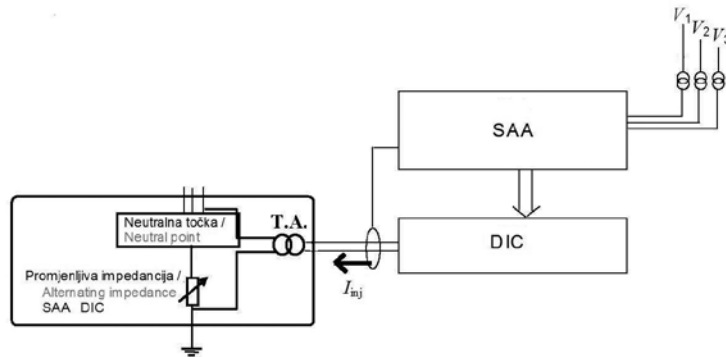
Slika 16 – Nulta shema mreže za vrijeme injektiranja struje
 Figure 16 – Zero grid diagram during current injection

Princip injektiranja je, kao što je ranije napomenuto patentiran u EDF-u, a temeljen je na uporabi uređaja za utiskivanje signala integriranog u kompenzacijsku prigušnicu. Ovaj uređaj je povezan na primarni namot između faze i zemlje, i na sekundarne stezaljke uređaja za injektiranje struje (DIC), slika 17.

DIC dozvoljava spajanje otpora na sekundar uređaja za utiskivanje signala, što se manifestira kao ponašanje mreže pri jednofaznom kratkom spoju (djelatni otpor kvara $R_{kv} = 33,8 \text{ k}\Omega$).

The injection principle was patented by EDF, as mentioned above, and it is based on the usage of a signal injecting device integrated in the arc suppression coil. This device is connected to the primary winding between the phase and the earth, and to the secondary clamps of the current injecting device (DIC), Figure 17.

DIC permits the connection of the resistance to the secondary winding of the signal injecting device, which is manifested as grid behaviour during a single phase short-circuit (operative fault resistance $R_{kv} = 33,8 \text{ k}\Omega$).



Slika 17 — Princip injektiranja
Figure 17 — Injection principle

Princip rada

Kada je proces proračuna završen, SAA uspoređuje trenutačnu vrijednost I_L s teoretskom vrijednošću koja odgovara kompenzaciji. Moguća su tri slučaja:

- teoretska pozicija je udaljena više od jednog otcjepa od aktualne pozicije. SAA šalje naloge za regulaciju kompenzacijske prigušnice, da bi postavila KP na najbliži mogući položaj koji odgovara teoretskoj vrijednosti,
- teoretska pozicija je postavljena na više od 2/3 razmaka između aktualnog otcjepa i susjednog otcjepa. SAA dakle šalje nalog za regulaciju kompenzacijske prigušnice, da bi je pozicionirala na susjednu poziciju (otcjep),
- teoretska pozicija je postavljena na manje od 2/3 razmaka između otcjepa. SAA je u stanju mirovanja. Smatra se da je mreža kompenzirana.

Operating Principle

When the calculation process is completed, SAA compares the present I_L value with the theoretical value corresponding to the compensation. Three cases are possible:

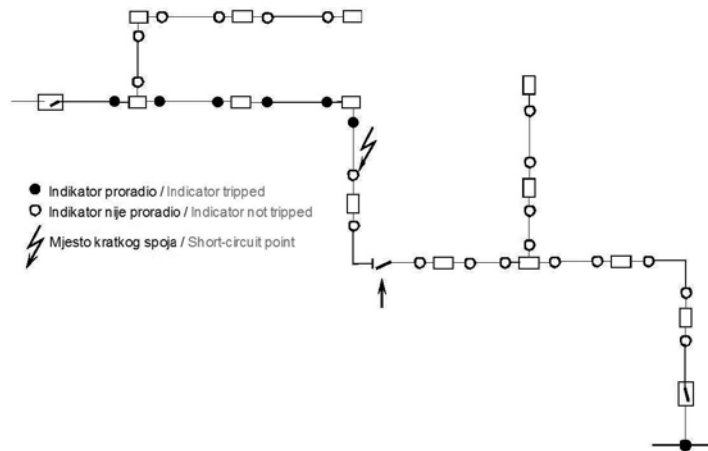
- The theoretic position is more than one splice away from the actual position. SAA sends orders for the regulation of the arc suppression coil, to position the ASC to the closest possible position corresponding to the theoretic value.
- The theoretic position is positioned more than 2/3 away between the actual splice and the adjacent splice. SAA therefore sends orders for the regulation of the arc suppression coil, to position it to the following position (splice).
- The theoretic position is positioned at less than 2/3 distance between the splices. SAA is in a suspended state. The grid is considered compensated.

7 INDIKATORI KVAROVA

Radi smanjenja trajanja otkrivanja mjesta kvara koriste se indikatori kvarova koji služe za pronalaženje mjesta kvara u mrežama s radijalnim pogonom. Mogu se ugraditi na kabelske ili nadzemne vodove. Princip djelovanja prikazan je na sljedećoj slici 18.

7 FAULT INDICATORS

Fault indicators which serve for detecting fault points in radial powered grids are used to reduce fault point detection times. They can be installed on cable or overhead transmission lines. The operating principle is shown in Figure 18.



Slika 18 — Mreža s indikatorom kratkog spoja
Figure 18 — Grid with a short-circuit indicator

Indikator kvara mjeri magnetsko polje koje je uzrokovano strujom koja teče kroz vod. Ukoliko struja prijeđe neku podešenu vrijednost, indikator proradi. Prorada indikatora rezultira nekim svjetlosnim i/ili elektroničkim signalom.

The fault indicator measures the magnetic field caused by the current flowing through the transmission line. If the current exceeds a set value, the indicator trips. Indicator tripping results in a light and/or electronic signal.

Zbog težnje za masovnim korištenjem indikatora kvarova trebaju biti:

Due to the tendency towards mass usage, fault indicators must be:

- pristupačni po cijeni,
- pouzdani u radu.

- affordably priced,
- operationally reliable.

Indikatori kvarova prvenstveno se koriste za brzo lociranje mjesta kvara, te rekonfiguraciju mreže nakon otkrivanja mjesta kvara. Osim toga, suvremeni indikatori mogu se koristiti za dobivanje prethodnih informacija koje će poslužiti za planiranje preventivnog održavanja (uglavnom u nadzemnim mrežama).

Fault indicators are primarily used to speedily detect fault points, and reconfigure the grid after the discovery of the fault point. In addition, modern indicators can be used to obtain previous information to be used for the planning of preventive maintenance (mostly in overhead grids).

Indikatore kvarova treba ugraditi posebno na sljedeća mjesta u mreži:

Fault indicators must be installed especially in the following points of a grid:

- važna čvorišta, odnosno daljinski upravljane sklopke,
- čvorišta u koja ulazi tri ili više vodova,
- lako dostupne objekte, u slučaju da se ne koriste daljinski upravljane linijske sklopke.

- important hubs, or remotely controlled switches,
- hubs entered by three or more transmission lines,
- easily accessible facilities, if remotely controlled line switches are not used.

Iako neki proizvođači nude opciju registriranja prolaznih kvarova poželjno je da indikatori kvarova prepoznaju samo trajne kvarove, a ne registriraju prolazne kvarove. Indikacija prolaznih kvarova potrebna je eventualno u svrhu statistike.

Although some manufacturers offer the option of registering transient faults, it is desirable for the fault indicators to recognise only permanent faults, and not register transient faults. Transient fault indication might be necessary only for statistic purposes.

S obzirom na način ugradnje, indikatori kvarova mogu se koristiti na dva načina:

Considering the method of installation, fault indicators can be used in two ways:

- bez uključivanja u sustav daljinskog upravljanja i nadzora nad 10(20) kV mrežom,
- ugradnjom uz daljinski upravljane linijske sklopke uz povezivanje pomoću komunikacijskog sustava DCC.

Može se govoriti o dvije temeljne vrste indikatora kvarova:

- univerzalni indikatori kvarova, koji se priključuju na vod preko strujnih senzora. Kod daljinski upravljanih linijskih sklopki ovakvi indikatori ugrađuju se uz upravljačku jedinicu, kao dodatna opcija. Navedeni indikatori mogu registrirati kako prolaz struja višepolnih kvarova koje poprimaju iznose veće od nekoliko stotina A, tako i nulte struje koje mogu poprimiti veoma niske iznose, od nekoliko desetaka ampera,
- indikatori koji prepoznaju kvarove kod kojih je ostvaren spoj sa zemljom. Njihov princip rada zasnovan je na mjerenju magnetskog polja pomoću magnetskog jezgra.

Potrebno je napomenuti da se za mreže srednjeg napona uzemljene preko kompenzacijske prigušnice upotrebljavaju posebno razvijeni indikatori kvarova, s obzirom na činjenicu da su kapacitivne struje kompenzirane, a time je i zahtijevana osjetljivost indikatora veća od izoliranih ili uzemljenih mreža.

8 ZAKLJUČAK

U članku je dan osvrt na provedbu uzemljenja neutralne točke mreža srednjeg napona u HEP-u. Prezentirani su dosadašnji pristupi uzemljenju zvjezdišta kao i promjena koncepcije uzemljenja uvjetovana povećanjem kapacitivnih struja prije svega u ruralnim mrežama. Predočena je praksa u nekim europskim zemljama s naglaskom na francusko rješenje, s obzirom na činjenicu da je Hrvatska na neki način slijedila njihovu praksu u pogledu tretmana zvjezdišta. Obradena su dva rješenja automatske kompenzacijske prigušnice: tehnologije plivajuće jezgre i tehnologija stupnjevane regulacije.

Podrobno je opisan projekt u Elektroprimorju Rijeka gdje su ugrađene četiri automatske kompenzacijske prigušnice sa stupnjevanom regulacijom. Posebno se obradio problem vezan na promjenu koncepcije relejne zaštite, uvažavajući nove okolnosti u svezi s prelaskom uzemljenja zvjezdišta s niskoomskog načina na kompenzacijski režim.

Uvažavanjem tehničkih propisa u Hrvatskoj, dolazi se do zaključka da je osnovni kriterij pri odabiru koncepcije uzemljenja vezan na ograničenje

- without inclusion into the remote control and oversight system for a 10(20) kV grid,
- installed with remotely controlled line switches connected by the DCC communication system.

Two basic types of fault indicators can be discussed:

- universal fault indicators, connected to a transmission line through current sensors. With remotely controlled line switches these indicators are installed together with a control unit, as an additional option. The said indicators can register both the flow of multi pole fault currents amounting to over several hundred A, and zero currents amounting to only several dozen amperes,
- indicators which recognise faults in which earth contact has occurred. Their operating principle is founded on measuring the magnetic field with a magnetic core.

It should be noted that specially developed fault indicators are used for mid-voltage grids earthed through an arc suppression coil, in view of the fact that the capacitive currents are compensated, which increases the required indicator sensitivity in comparison to isolated or earthed grids.

8 CONCLUSION

This article gave an overview of the implementation of neutral point earthing of mid-voltage grids in HEP. Former approaches to star-point earthing were described, as was the change of the earthing concept conditioned by the increase of capacitive currents, primarily in rural grids. The practice of some European countries was presented, with an emphasis on the French solution, considering the fact that Croatia had in some way followed their practice of treating star-points. Two solutions for the arc suppression coil were analysed: plunger core technology and stepped regulation technology.

The Elektroprimorje Rijeka project, where four automatic arc suppression coils with stepped regulation were installed, was described in detail. Special consideration was given to the problem connected to the change of the relay protection concept, acknowledging the new circumstances related to the transition from low ohm star-point earthing to the compensation regime.

When we acknowledge the technical regulations in Croatia, we can conclude that the basic criterion for the choice of an earthing concept is connected to the limitation of earth-fault duration in

trajanja zemljospoja u mrežama srednjeg napona. Proizlazi da je trajanje zemljospoja potrebno svesti na minimum. U slučaju nepoštivanja ovog kriterija dovodi se u životnu opasnost ljude, pa je i odluka vezana na navedeni izbor u nadležnosti menadžmenta firme koji mora preuzeti odgovornost za eventualne posljedice.

mid-voltage grids. It follows that earth-fault duration must be reduced to the minimum. If this criterion is not respected, people are exposed to hazard and therefore the decision concerning the abovementioned choice is under the authority of company management which must assume responsibility for possible consequences.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] KOMENJ, V., SIROTNJAK, V., ČUČIĆ, R., Pristup uzemljenju zvjezdišta sredjonaponskih mreža, HO CIRED, Šibenik, 2008.
- [2] PUHARIĆ, M., ŽUTOBRADIĆ, S., Provedba uzemljenja zvjezdišta 10(20) kV mreža pomoću kompenzacijske prigušnice, Energetski institut Hrvoje Požar - EIHP, Zagreb, 2001.
- [3] PUHARIĆ, M., ŽUTOBRADIĆ, S., Uzemljenje neutralne točke u TS 110/20 kV Lovran i Matulji, Energetski institut Hrvoje Požar - EIHP, Zagreb, 2004.
- [4] Pravilnik o tehničkim normativima za zaštitu niskonaponskih mreža i pripadnih transformatorskih stanica, preuzeto Službeni list, 1978.
- [5] PUHARIĆ, M., Uzemljenja zvjezdišta mreže 10 kV i 20 kV napajane iz TS 110/10(20) kV Nin, Enedis d.o.o., Zagreb, 2003.
- [6] Damianić, M., Analiza parametara uzemljanja zvjezdišta 10(20) kV mreže, Magistarska radnja, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2000.
- [7] IMPEDANCE DE COMPENSATION POUR LA MISE A LA TERRE DU NEUTRE DES RESEAUX HTA AERIENS ET MIXTES, EDF, normes HN 52-S-25, 1997
- [8] PAPP KLAUS, aRC Supression Coils for Neutral Grounding of Distribution Systems, Power technology international, Simpozij, 1992
- [9] SPECIFICATION TECHNIQUE EDF: Régime de neutre compensé - Spécification de la protection wattmétrique homopolaire, EDF norma HN- 45-S-54, 2001

Adrese autora:

Dr. sc. **Milan Puharić**
milan.puharic@zg.t-com.hr
Voćarska cesta 50
10000 Zagreb
Hrvatska

Authors' Addresses:

Milan Puharić, PhD
milan.puharic@zg.t-com.hr
Voćarska cesta 50
10000 Zagreb
Croatia

Uredništvo primilo rukopis:
2009-06-04

Manuscript received on:
2009-06-04

Prihvaćeno:
2009-11-04

Accepted on:
2009-11-04

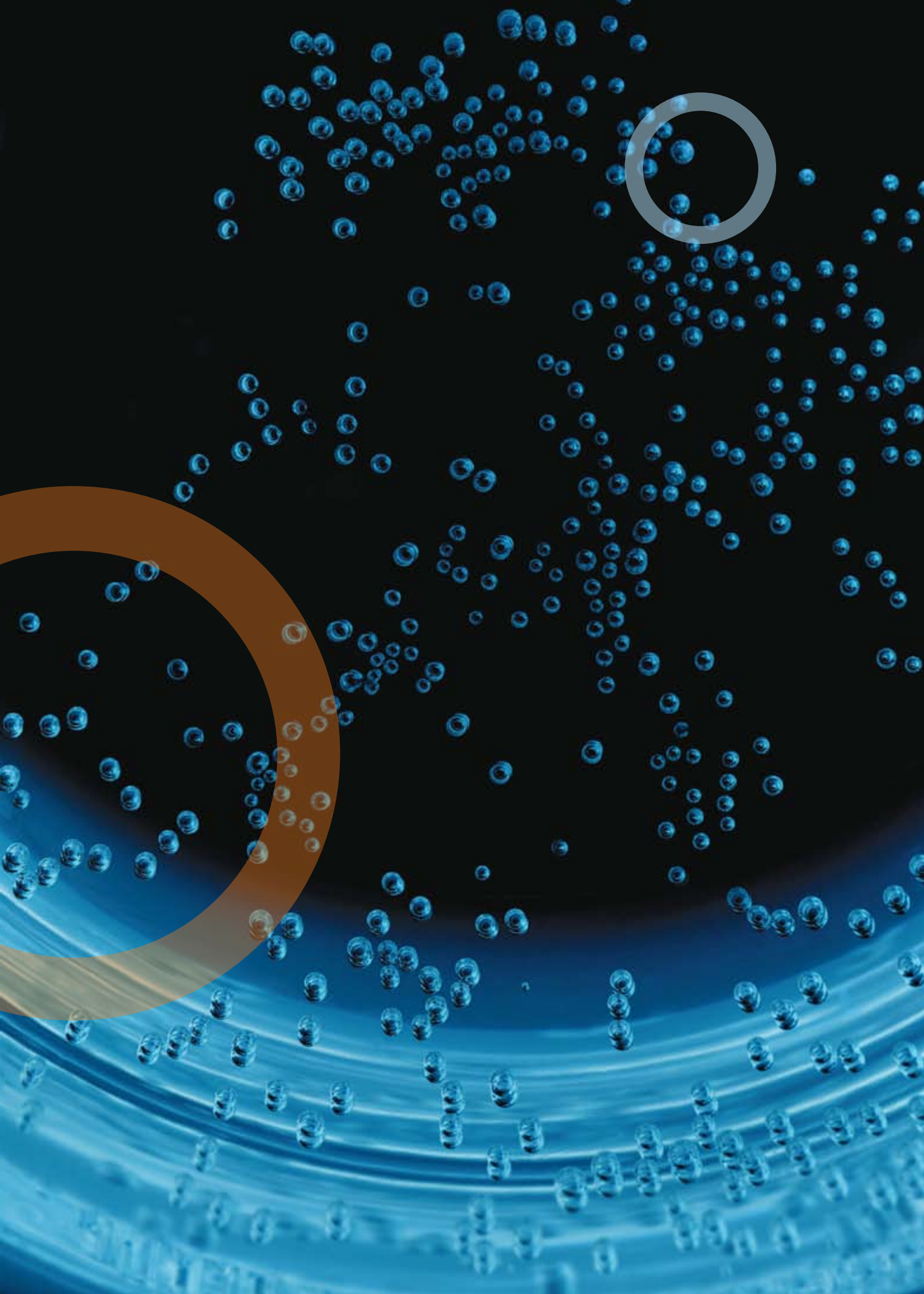
ELEKTROMAGNETSKI PRORAČUN I KONSTRUKCIJSKA IZVEDBA BESKONTAKTNOG UZBUDNOG SUSTAVA BRUSHLESS EXCITATION SYSTEM ELECTROMAGNETIC DESIGN AND ANALYSES

Livio Šušnjić, Rijeka, Hrvatska

Sustav uzbuđe beskontaktnog sinkronog generatora (SG) sadrži glavni uzбудnik, generator s permanentnim magnetima (PMG) sa polovima na rotoru (konzekventni polovi) kao posljedica razdiobe permanentnih magneta, i automatski regulator napona (AVR). Za oba stroja dana je konstrukcijska izvedba i proračun. Karakteristike razmatranih strojeva dobivene su metodom konačnih elemenata (MKE) u vremenskoj domeni s pridijeljenim vanjskim električnim krugom. Izrađen je eksperimentalni stroj i prikazani su rezultati ispitivanja.

The brushless synchronous generator (SG) excitation system consists of a main exciter, a permanent magnet generator (PMG) of consequent rotor poles type, and an automatic voltage regulator (AVR). Both exciter machines have been properly designed and analysed. The machines performances are obtained by time stepping finite-element method (FEM) coupled with the external electrical circuit. An experimental machine is built and the measured results are given.

Ključne riječi: beskontaktni sinkroni generator; elektromagnetski proračun; metoda konačnih elemenata; uzbudni sustav
Keywords: brushless synchronous generator; electromagnetic design; excitation system; finite element method



1 UVOD

Beskontaktni sinkroni generatori (SGs) snage općenito do 5 MVA su primjenjivi kao glavni izvori u brodskom električnom sustavu. Pored zadovoljavanja IEC standarda brodski generatori moraju zadovoljavati zahtjeve klasifikacijskog društva. Uzbudni sustav napaja SG uzbudnom strujom radi regulacije napona ili reaktivne snage za zadani operativni režim rada. Tipični AC beskontaktni sustav uzbude SG sadrži PMG s izlaznim veličinama koje su elektronički upravljive nakon ispravljanja, a napajaju glavni uzbudnik na statoru, a namotom armature na rotoru [1]. Pri razmatranju uzbudnog sustava nužno je uzeti u obzir različite zahtjeve. Upravljački krug AVR je izoliran od utjecaja nelinearnog opterećenja što je značajna osobina ovog uzbudnog sustava. Odgovarajuća konstrukcijska izvedba i elektromagnetski proračun glavnog i tzv. pilot uzbudnika (PMG) rezultiraju zadovoljavajućim upravljanjem naponom u statičkom i dinamičkom načinu rada [2]. Od strane klasifikacijskih društava npr. [3], postavljaju se sljedeći zahtjevi za uzbudni sustav:

- osigurano napajanje strujom uzbude za nazivno opterećenje generatora,
- osigurano napajanje strujom uzbude za preopterećenje u vrijednosti 1,5 puta nazivne struje generatora pri nazivnom naponu i faktoru snage 0,6 ind,
- odgovarajuće napajanje uzbudnom strujom za stacionarnu struju kratkog spoja generatora u vrijednosti od približno 3 do 5 puta nazivne vrijednosti struje,
- dinamički propad napona i stabilizacija napona trebaju biti unutar propisanih vrijednosti.

Za slučaj kvara, kao što je kratki spoj, uzbudni sustav mora omogućiti odgovarajuće napajanje uzbudnom strujom što rezultira strujom generatora od tri do pet puta većom od nazivne vrijednosti, a to omogućuje selektivnu zaštitu. U ovom radu prikazana je konstrukcijska izvedba glavnog uzbudnika i pilot uzbudnika (PMG) i njihov elektromagnetski proračun za primjenu u uzbudnom sustavu 6-polnog sinkronog generatora snage 1 070 kVA i frekvencije 60 Hz. Zahtjev za uzbudom za slučaj preopterećenja generatora od 1,5 puta nazivne vrijednosti struje je automatski zadovoljen ispunjenjem zahtjeva po uzbudi za slučaj kratkog spoja. Prikazan je tijek proračuna za zadanu geometriju uzbudnika uz zadana konstrukcijska ograničenja. Uzbudnici su analizirani MKE u vremenskoj domeni primjenom software Flux2D [4], radi dobivanja uzbudnih karakteristika i potvrde da li te karakteristike zadovoljavaju. PMG je proračunat MKE u sprezi sa Matlab-Simulink programom [5]. AVR kao dio uzbudnog sustava je uključen u proračunsku domenu sa svojim

1 INTRODUCTION

Brushless synchronous generators (SGs) generally sizing up to 5 MVA are used as the main units for the ship's electrical systems. In addition to the satisfying IEC standard, marine alternators also conform to the requirements of classification societies. The excitation system supplies the SG field current to control either terminal voltage or the reactive power to set point. The typical AC brushless excitation system of the SG contains PMG with output that is electronically controlled after rectification to supply the DC excitation of the inside-out synchronous exciter as is shown in [1]. In the design process of the excitation system it is necessary to take into account various design aspects. The important feature of this excitation system is that the AVR control circuit is isolated from the effects of non-linear load. The carefully matched electromagnetic design of the main exciter and pilot exciter machine (PMG) result in a highly satisfactory static and dynamic voltage control behavior [2]. From classification society rules e.g. [3], the following requirements of the excitation system are:

- adequate supply of field current for nominal load,
- adequate provision of field current for an overload of 1,5 times the rated currents at a rated voltage at **p.f. = 0,6 lagg**,
- adequate provision of field current for the generator sustained short-circuit current of approximately 3 to 5 times the rated current,
- dynamic voltage dip and voltage recovery time have to be acc. specified values.

During a fault operation such as the short circuit, the excitation system has to be capable of supplying enough field current resulting in three to five times the rated current at generator output. This enables the use of graded protective relaying. In this paper, the main exciter and pilot exciter (PMG) electromagnetic design is given for a 6 poles synchronous generator rated 1 070 kVA with a frequency of 60 Hz. The excitation requirement for overloading this generator with 1,5 times the rated current is automatically satisfied by fulfilling excitation requirements for the short circuit. Design principles associated with the exciters are given along with critical design constraints. Both exciter machines are analyzed by a time stepping FEM using software Flux2D [4], in order to check if their performance is satisfactory. PMG is analyzed by FEM coupling to a Matlab-Simulink program [5]. AVR as a part of the excitation system is introduced by its power circuit. Requirements for dynamic voltage

energetskim krugom. Zbog opsega, zahtjevi za dinamičkim promjenama napona nisu obrađeni u ovolikom radu. U zadnjem poglavlju prikazani su eksperimentalni rezultati koji pokazuju dobro slaganje s rezultatima proračuna.

changes aren't treated in this paper. The last section presents the test results which show good agreement with the computed results.

2 PRORAČUN I KONSTRUKCIJSKE IZVEDBE UZBUDNIKA

2 EXCITERS DESIGN

Proces konstrukcije i elektromagnetskog proračuna uključuje sljedeće:

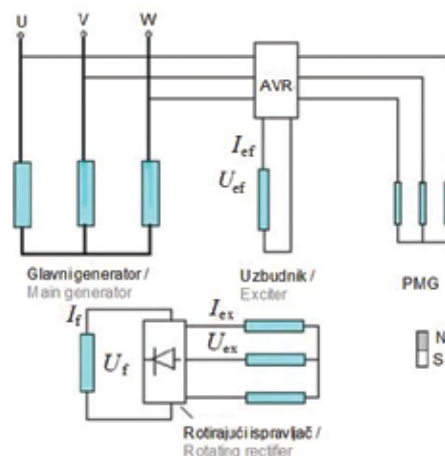
The electromagnetic design process includes the following:

- topologiju od interesa,
- početne konstrukcijske i proračunske podatke,
- elektromagnetski proračun,
- izlazne rezultate proračuna.

- topologies of interest,
- initial design data,
- electromagnetic design,
- design output data.

Topology of the considered synchronous generator excitation system is shown in Figure 1.

Topologija razmatranog uzbuđenog sustava sinkronog generatora prikazana je na slici 1.



Slika 1 — Topologija uzbuđenog sustava sinkronog generatora
Figure 1 — Topology of the synchronous generator excitation system

2.1 Podaci uzbudnika

2.1 Exciter rating

Dimenzioniranje uzbudnika ovisno je o nazivnim vrijednostima za napon i struju uzbuđenog generatora (V_m, I_m). Maksimalni napon i struja uzbudnika određeni su naponom i strujom uzbuđenog generatora (V_r, I_r) za slučaj kratkog spoja generatora, osiguravajući pri tome 3-struku vrijednost nazivne struje generatora. Zahtijevane vrijednosti struja i napona uzbuđenog generatora prikazani su u tablici 1. Ove vrijednosti dobivene su mjerenjima na eksperimentalnom stroju. Alternativna mogućnost dobivanja ovih podataka, za slučaj da eksperimentalni stroj nije na raspolaganju, je numeričkim proračunom metodom konačnih elemenata [6].

The exciter rating depends on the generator rated field voltage and current (V_m, I_m). Maximum exciter rating is determined with field voltage and current (V_r, I_r) for generator short circuit, providing 3 times the rated current. The required field currents and voltages in order to start the exciter design are given in the Table 1. These data are obtained by measurement on an experimental machine. An alternative possibility to obtain these data in the case experimental machine is not available is calculation by finite element analysis as is shown in [6].

Tablica 1 – Struja i napon uzbuđe generatora
Table 1 – Field currents and voltages

Nazivno opterećenje / Rated load		Kratki spoj / Short circuit	
I_m, A	V_m, V	I_f, A	V_f, V
97	155	221	354

2.2 Početno dimenzioniranje uzbuđnika

Pomoću podataka u tablici 1 određuju se struja i napon namota armature uzbuđnika. Proračun se nastavlja radi određivanja protjecanja za namot statora uzbuđnika uz pomoć fazorskog dijagrama za sinkroni stroj. Faktor snage uzima se 0,95 a indukcija u zračnom rasporu jednakom 0,33 T za nazivno opterećenje. Podaci dobiveni proračunom i izborom geometrije prikazani su u tablici 2 a temelje na analitičkom proračunu i iskustvu projektanta. Uzimajući u obzir smanjenje vremena u kojem se generira napon dovodi do ograničenja za vrijednost tranzijentne reaktancije ispod 0,3. Glavni udio za tu reaktanciju predstavlja rasipna reaktancija armature. Njeno smanjenje je moguće izborom širokih a ne dubokih utora armature i kraćih glava namota armature. Zahtijeva se i manji broj utora za isti izlazni DC napon V_m .

2.2 Initial exciter sizing

The data in Table 1 is used to derive the exciter's armature current and voltage. Calculation proceeds in order to determine the exciter's field ampere-turns with the help of the synchronous machine phasor diagram. The power factor is chosen as 0,95 and the air-gap flux density is equal to 0,33 T for the rated load condition. Prediction and selection of the geometrical data given in the Table 2 is based on analytical calculation and designer experience. Taking into account the reduction in voltage response time leads to severe limitation of the AC exciter transient reactance value, below 0,3. The main part of its value is the armature leakage inductance. Reducing it is possible by choosing wide and not so deep armature slots and short end connections. It also requires a smaller number of slots for the same output DC voltage V_m .

Tablica 2 – Geometrijski parametri uzbuđnika
Table 2 – Exciter geometric parameters

Veličina / Quantity	Vrijednost / Value
Aksijalna dužina / Axial length	130 mm
Vanjski promjer statora / Stator outer diameter	511 mm
Unutarnji promjer statora / Stator inner diameter	330 mm
Dužina zračnog raspora / Air-gap length	1,1 mm
Broj polova / Number of poles	8
Broj rotorskih faza / Number of rotor phases	3
Spoj / Connection	Y
Broj utora na rotoru / Number of rotor slots	24

2.3 Početne dimenzije pilot uzbuđnika (PMG)

Rotor pilot uzbuđnika je cilindričan i sadrži 8 obodno porazdijeljenih otvorenih utora i 8 rotorskih zubi. Dva NdFeB magneti u obliku kvadra postavljeni su u svaki od utora. Permanentni magneti su magnetizirani svi u istom smjeru formirajući N-polove, na taj način magnetski tijekom prolazi i feromagnetskom stazom između permanentnih magneti formirajući S polove. Kaže se da su feromagnetski polovi posljedično

2.3 Initial sizing pilot exciter (PMG)

The rotor of the consequent-poles PMG is cylindrical and consists of 8 circumferentially distributed open slots and 8 rotor teeth. Two block shaped NdFeB magnets are placed within each of the slots. The permanent magnets are magnetized in the same direction forming N-poles, so that magnet flux has to circulate round through the iron poles between the permanent magnets. Thus the iron poles are consequently

ili konzekventno magnetizirani. Otuda se ovaj stroj naziva i stroj s konzekventnim polovima [7] i [8]. Frekvencija struja i napona za pilot uzбудnik jednaka je 160 Hz.

Odabir geometrijskih podataka prikazan u tablici 3 temeljen je na analitičkom proračunu magnet-skog kruga. Postoji zahtjev za veličinu promjera statora i provrta rotora radi mehaničke integracije pilot uzbudnika na generatorsku ne-pogonsku stranu. Također je važno procijeniti najteži slučaj demagnetizacije magneta. Razmatrana je jakost magnetskog polja proizvedena armaturnom strujom u namotu statora.

magnetized as S-poles. Therefore, this machine is known as a consequent-pole machine, [7] to [8]. The PMG is designed for a frequency equal to 160 Hz.

Prediction of the geometrical data in the Table 3 is based on the analytical calculation of the magnetic circuit. Construction requirements such as stator core diameter and rotor bore diameter are prescribed in order to mechanically integrate the pilot exciter at the generators non driving end side. It is important to estimate the worst-case demagnetizing condition in the magnet. The magnetic field intensity produced by the armature current in the stator winding is considered.

Tablica – 3 PMG podaci
Table 3 – PMG data

Veličina / Quantity	Vrijednost / Value
Aksijalna dužina / Axial length	42 mm
Vanjski promjer stat ora / Outer stator diameter	305 mm
Unutarnji promjer statora / Inner stator diameter	195 mm
Dužina zračnog raspora / Air-gap length	1 mm
Broj polova / Number of poles	16
Broj rotorskih faza / Number of phases	3
Spoj / Connection	Y
Broj utora na rotoru / Number of stator slots	48
Debljina PM / PM thickness	8,5 mm
Parametri PM pri / PM parameter at 20 °C	$B_r = 1,16 \text{ T}$
	$H_c = 860 \text{ kA/m}$
	$\rho = 0,15 \text{ E-5 } \Omega\text{m}$

3 2D ANALIZA MKE

Nakon analitičkih proračuna, izbora početnih dimenzija i konstrukcijske izvedbe, proces proračuna se nastavlja primjenom analize MKE i, ako se pokaže nužnim, početna se geometrija mijenja sve dok se cilj ne postigne. 2D magnetsko polje je opisano sljedećom jednačzbom, [9]:

3 2D FEM ANALYSES

After prediction of the initial exciters design, the design process continue by using FEM analyses and if necessary the initial design could be modified until the objectives are met. The 2D magnetic field is described by the following equation, [9]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial \vec{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial \vec{A}}{\partial y} \right) = -\vec{J}_0 - \vec{J}_M - \vec{J}_e, \quad (1)$$

gdje je:

- \vec{A} – magnetski vektorski potencijal,
- \vec{J}_0 – gustoća struje namota statora,
- \vec{J}_M – gustoća ekvivalentne struje magnetiziranja, a
- \vec{J}_e – gustoća vrtložnih struja.

Simulacija opterećenja za konstantnu brzinu vrtnje je temeljena na tranzijentnoj 2D analizi magnetskog polja primjenom MKE u sprezi s vanjskim električnim krugom. Jednadžbe magnetskog polja i jednadžbe električnog kruga rješavaju se simultano. Analiza je provedena vremenskom koračnom metodom.

3.1 Simulacija uzбудnika

Energetski krug je prikazan na slici 2 i opisan je sa 2D elementima domene MKE i vanjskog električnog kruga. Domena MKE je predstavljena uzbudnim namotom uzbudnika i trofaznim namotom armature. U seriji s armaturnim svicima, rasipni induktivitet glava namota određen je analitički i pridodan električnom krugu. Vanjski električni krug sadrži trofazni rotirajući ispravljač čije su izlazne stezaljke spojene na uzbudni namot generatora. Uzbudni namot predstavljen je koncentriranim parametrima, induktivitetom i ohmskim otporom.

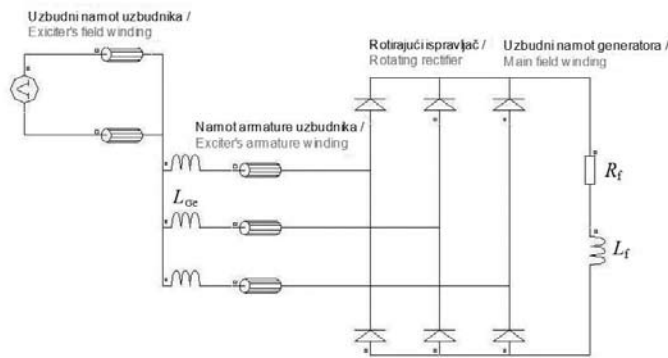
where is:

- \vec{A} – the magnetic vector potential,
- \vec{J}_0 – the stator winding current density,
- \vec{J}_M – the equivalent magnetizing current density, and
- \vec{J}_e – the eddy current density.

Simulation of the load condition at constant speed is based on the transient 2D FEM analysis of the magnetic field coupled with the external electrical circuit. The magnetic field equations and the circuit equations are solved simultaneously. The analysis has been done by time-stepping method.

3.1 Exciter simulation

The electrical power circuit is shown in Figure 2. and is described with, 2D FEM domain circuit elements and external circuit. The FEM domain is represented by the exciter's field winding and three-phase armature winding. In series with armature coils, end winding inductance predicted analytically is added. The external circuit consists of a three-phase rotating rectifier connected to a generator field winding. The field winding is represented by lumped parameters, inductance and resistance.



Slika 2 – Električni krug uzbudnika
Figure 2 – Exciter electrical circuit

Induktivitet namota uzbuđe L_f za cilindričnu izvedbu rotora je [1]:

The field inductance L_f for cylindrical rotor design is predicted as follows acc. [1]:

$$L_f = L_{fm} + L_{fl} \quad (2)$$

gdje je:

where is:

- L_{fm} – glavni induktivitet, a
- L_{fl} – rasipni induktivitet.

- L_{fm} – the main field inductance, and
- L_{fl} – the leakage field inductance.

Glavni induktivitet je:

The main field inductance is:

$$L_{fm} = \frac{2p\mu_0 N_f^2 \tau l \frac{\tau_p}{\tau}}{g \cdot K_c (1 + K_{sd})} \quad (3)$$

gdje je:

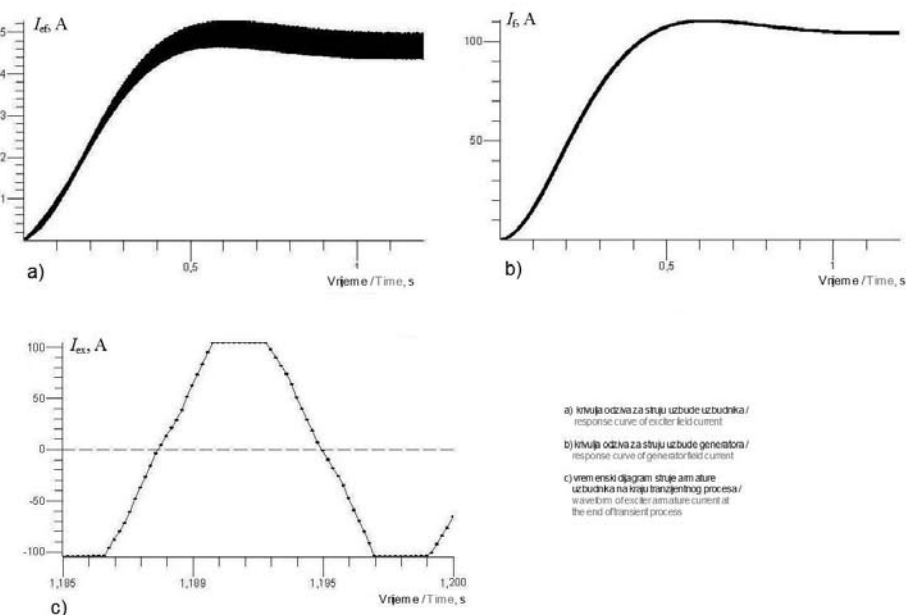
N_f – broj zavoja namota uzbude,
 p – broj pari polova,
 l – aksijalna dužina paketa,
 τ – polni razmak,
 τ_p – dužina pola,
 g – zračni raspor,
 K_c – Carterov koeficijent i
 K_{sd} – koeficijent redukcije magnetizirajuće reaktancije u d osi.

where is:

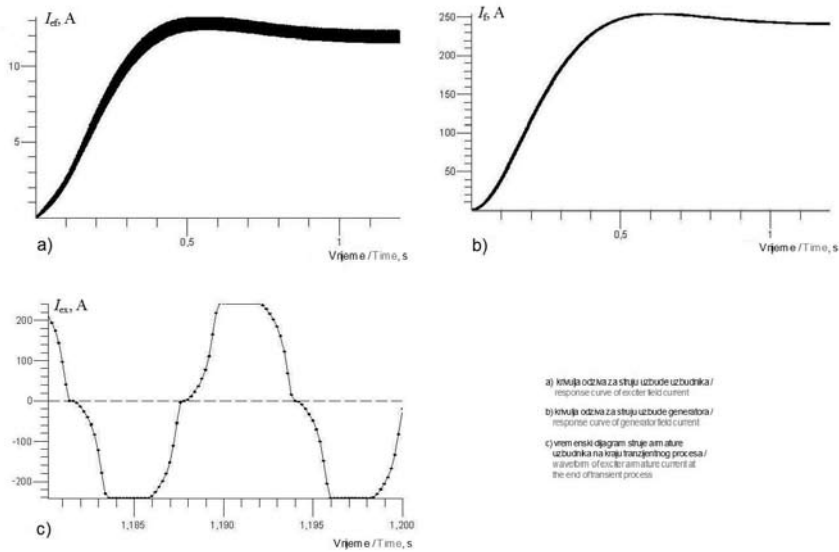
N_f – the number of field winding turns,
 p – number of poles pairs,
 l – the stack length,
 τ – the pole pitch,
 τ_p – the pole span,
 g – the airgap,
 K_c – the Carter coefficient and
 K_{sd} – a reduction coefficient of the d axis magnetizing reactance.

Ciljevi ovog proračuna jesu dobivanje vrijednosti struje uzbude zadane u tablici 1. Početne dimenzije i podaci za uzбудnik mogu se u manjoj mjeri promijeniti ako je to nužno, kao i ulazna vrijednost za uzbudni napon uzbudnika dok se iterativnim proračunom ne postignu ciljevi. Za nazivno opterećenje i kratki spoj generatora, krivulje struje uzbude uzbudnika, struje uzbude generatora i vremenski dijagram struje armaturnog namota uzbudnika prikazani su na slikama 3 i 4.

The objectives of this calculation are to obtain the value of field currents given in Table 1. The exciter's initial design could be slightly modified if necessary, as with the input value of the exciter's field voltage too, and reiterated until calculation objectives are met. Corresponding to generator rated load and short circuit, response curves of exciter field current and main field current and waveform of the exciter armature current are shown in Figure 3. and Figure 4 respectively.



Slika 3 – Nazivno opterećenje generatora
Figure 3 – Generator rated load



Slika 4 – Kratki spoj generatora
 Figure 4 – Generator short circuit

Stacionarne vrijednosti za struju uzbuđe uzbudnika i uzbudnu struju generatora su izračunate na kraju tranzijentnog procesa (slike 3 i 4) i dane u tablici 4. Vrijednosti uzbuđne struje generatora su nešto veće od onih prikazanih u tablici 1.

The steady state values of the exciter field current and main field current are predicted at the end of transient process (Figures 4 to 5) and are given in Table 4. The values of the field currents are slightly higher than that given in Table 1.

Tablica 4 – Struja uzbuđe uzbudnika i uzbudna struja generatora
 Table 4 – Exciter field current and main field current

Nazivno opterećenje / Rated load		Kratki spoj / Short circuit	
I_{ef} , A	I_f , A	I_{ef} , A	I_f , A
4,7	103	12,4	240

3.2 Simulacija pilot uzbudnika

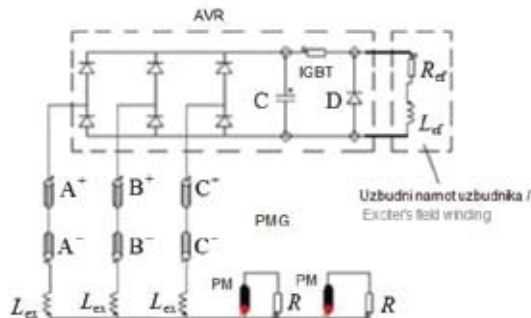
Cilj simulacije pilot uzbudnika je postići zadane vrijednosti u tablici 4. Električni energetski krug sadrži elemente iz 2D MKE domene i vanjski električni krug, a prikazan je na slici 5.

Domena MKE je predstavljena s tri statorske faze i permanentnim magnetima. Vanjski električni krug je predstavljen s trofaznim ispravljačem, kondenzatorom, IGBT tranzistorom, otporom i induktivitetom uzbuđnog namota uzbudnika. Svaki fazni namot je modeliran s finožičnim svicima i induktivitetom glava namota. Namot statora pilot uzbudnika je spojen na 6-pulsni ispravljački most na kojeg je priključen IGBT tranzistor i koncentrirani parametri uzbuđnog namota uzbudnika. U isto-

3.2 Pilot exciter simulation

The goal of pilot exciter simulation is to fulfill the given data from Table 4. The electrical power circuit which consists of 2D FEM domain circuit elements and external circuit is shown in Figure 5.

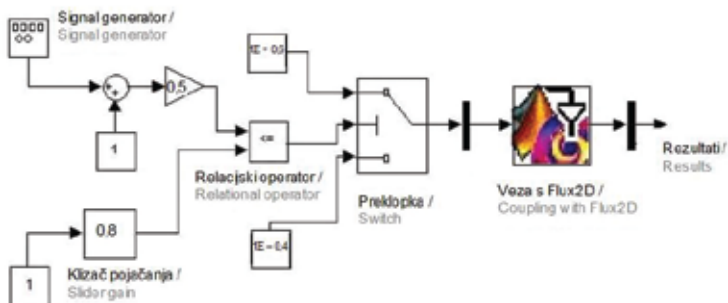
The FEM domain is represented by three stator phases and permanent magnets. The external circuit is represented by three phase rectifier, capacitor, IGBT transistor, exciter's field winding resistance and inductance. Each phase winding is modelled with stranded coils and end winding inductance. PMG stator winding is connected through a six-pulse diode rectifier followed by IGBT transistor and field winding lumped param-



Slika 5 — Električni krug za pilot uzbudnik
Figure 5 — Pilot exciter electrical circuit

smjernom međukrugu spojen je kondenzator na izlazne stezaljke ispravljača. IGBT tranzistor (engl. *chopper*) djeluje periodično s periodom T , ostaje u stanju vođenja za vrijeme $t_{on} = \delta T$, uz $0 < \delta < 1$. Varijabla δ predstavlja omjer između vremena vođenja i periode djelovanja IGBT tranzistora. Frekvencija djelovanja IGBT tranzistora je konstantna i fiksirana na 660 Hz. Na uzbudni namot uzbudnika je spojena poredna dioda. Za modeliranje električnog kruga permanentnog magneta potrebno je osigurati da struja ne teče izvan magneta. Iz ovog razloga na krajeve permanentnog magneta spojen je otpor visoke vrijednosti ($1E + 0,6 \Omega$). Za simulaciju upravljanja IGBT, MKE je u sprezi s Matlab-Simulink programom. Prekidanje IGBT ovisi o opterećenju glavnog generatora. IGBT je modeliran otporom čija je vrijednost mala u tijeku vođenja i vrlo velika u zapornom stanju. U stanju vođenja vrijednost otpora iznosi $1E - 0,4 \Omega$, dočim u zapornom stanju otpor je $1E + 0,6 \Omega$. Za generator s konstantnom brzinom vrtnje u stacionarnom operativnom radu, δ je konstanta. Simulink upravlja vrijednošću otpora. U Matlab-Simulink modelu prikazanom na slici 6, δ se može kontinuirano mijenjati promjenom položaja klizača pojačanja.

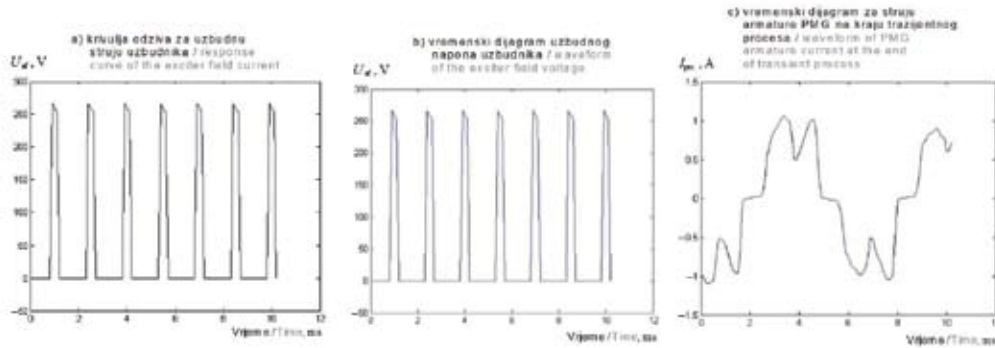
eters. The DC link capacitor is connected across rectifier terminals. The IGBT transistor (chopper) is operated periodically with a period T and remains closed for the time $t_{on} = \delta T$, with $0 < \delta < 1$. The variable δ is the duty ratio or duty cycle of a chopper. Switching frequency of the IGBT transistor is constant and fixed at 660 Hz. The exciter's field winding is shunted by a freewheeling diode. To model the permanent magnets electrical circuit, no current flow outside the permanent magnet should be provided. For this reason at the ends of permanent magnets the high value resistances ($1E + 0,6 \Omega$) are connected. To simulate the control of IGBT, the FEM is coupled to the Matlab-Simulink program. The switch states of IGBT depend on the main generator load condition. The IGBT is modelled by resistances with a very low value to model on-state and very large value to model off-state. In the following, the on state is represented by a resistance of $1E - 0,4 \Omega$, and the off state by a resistance of $1E + 0,6 \Omega$. For a generator operating at constant speed and steady load, the duty ratio is constant. Simulink controls the value of the resistance. In the Matlab-Simulink model shown in Figure 6., the duty ratio can be changed continuously by changing the slider gain value.



Slika 6 — Matlab-Simulink model za proračun PMG
Figure 6 — Matlab-Simulink model for the PMG calculation

Za vrijednost $\delta = 0,2$, odziv uzbuđne struje uzbuđnika, vremenski dijagram uzbuđnog napona uzbuđnika i vremenski dijagram struje armature za PMG su prikazani na slikama 7a, 7b i 7c.

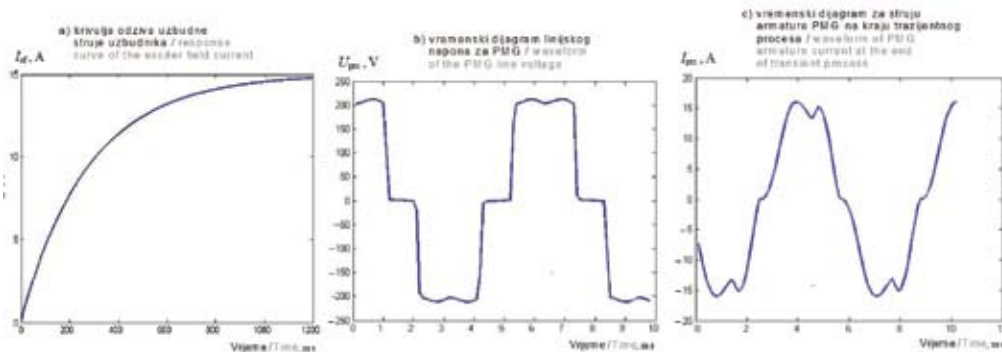
Corresponding to $\delta = 0,2$, the exciter field current response, exciter field voltage waveform and PMG armature current waveform are shown in Figure 7a, Figure 7b and Figure 7c, respectively.



Slika 7 — Opterećenje generatora, $\delta = 0,2$
Figure 7 — Generator loading, $\delta = 0,2$

Za $\delta = 1$, odziv uzbuđne struje uzbuđnika, vremenski dijagram linijskog napona i struje armature za PMG su prikazani na slikama 8a, 8b i 8c.

Corresponding to $\delta = 1$, the exciter field current response, PMG line voltage and armature current waveform are shown in Figure 8a, Figure 8b and Figure 8c respectively.



Slika 8 — Kratki spoj generatora, $\delta = 1$
Figure 8 — Generator short circuit, $\delta = 1$

Vrijednost uzbuđne struje i napona uzbuđnika su prikazani u tablici 5.

The value of exciter's field current and voltage are given in Table 5.

Tablica 5 – Proračunate vrijednosti za uzbuđnu struju i napon uzbuđnika
Table 5 – Calculated exciter field current and voltage

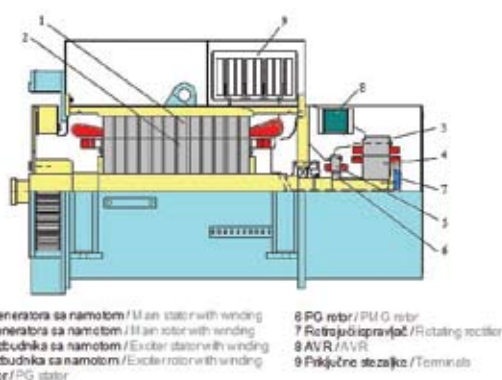
Opterećenje / Load, $\delta = 0,2$		Kratki spoj / Short circuit, $\delta = 1$	
I_{ef} , A	V_{ef} , V	I_{ef} , A	V_{ef} , V
3,7	50,3	14,8	203

4 EXPERIMENTALNA VERIFIKACIJA

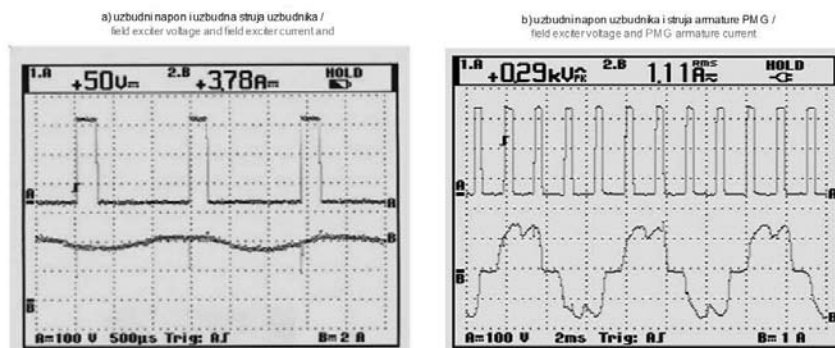
Za verifikaciju rezultata numeričke analize, izrađen je eksperimentalni stroj (slika 9) na kojemu su izvedena ispitivanja. Vremenski dijagrami za uzbudnu struju i napon uzбудnika za stacionarno opterećenje generatora prikazani su na slici 10a, vremenski dijagrami za uzbudni napon uzbudnika i struju armature za PMG su prikazani na slici 10b. Vremenski dijagrami uzbudnog napona uzbudnika i struju armature za PMG za slučaj kratkog spoja generatora prikazani su na slici 11.

4 EXPERIMENTAL VERIFICATION

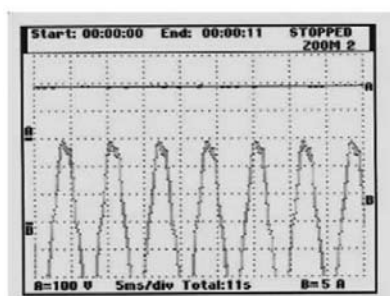
To further verify results of the numerical analyses, measurement have been made on the manufactured experimental machine in Figure 9. Waveforms of the field exciter's voltage and current are shown in Figure 10a, waveforms of the field exciter voltage and PMG armature current are shown in Figure 10b. The waveforms of the field exciter voltage and PMG armature current for the case of the main generator short circuit are shown in Figure 11.



Slika 9 — Aksijalni presjek sinkronog stroja
 Figure 9 — Axial cross section of the synchronous machine



Slika 10 — Stacionarno opterećenje generatora, mjereni oblici
 Figure 10 — Generator steady loading, measured waveforms



Slika 11 — Kratki spoj generatora: uzbudni napon uzbudnika i struja armature PMG-a
 Figure 11 — Generator short circuit: field exciter voltage and PMG armature current

U tablici 6 prikazana je usporedba rezultata proračuna i mjerenja za struju i napon uzbude uzbuđnika.

The values of exciter field current and voltage obtained by calculation are compared with measurements and given in Table 6.

Tablica 6 – Struja i napon uzbude uzbuđnika, usporedba rezultata proračuna i mjerenja
Table 6 – Exciter field current and voltage, calculation versus test

	Opterećenje / Load, $\delta = 0,2$		Kratki spoj / Short circuit, $\delta = 0,2$	
	I_{ef} , A	V_{ef} , V	I_{ef} , A	V_{ef} , V
Izračun / Calculation	3,7	50,3	14,8	203
Test / Test	3,78	51,4	14,2	193

Potrebno je naglasiti da za slučaj kratkog spoja generatora struja uzbude uzbuđnika ne smije biti manja od 12 A (prema tablici 1). Za uzbuđnu struju uzbuđnika od 14,2 A, izmjerena je struja kratkog spoja 3,7 puta veća od nazivne.

It should be noted that for the case of the generator short circuit exciter field current shouldn't be less than 12 A (acc. Table 1). With an exciter field current of 14,2 A, the corresponding generator short circuit current obtained with measurement is 3,7 times the rated one.

5 ZAKLJUČAK

Ovaj rad predstavlja elektromagnetski proračun i konstrukcijsku izvedbu uzbuđnog sustava beskontaktnog sinkronog generatora za primjenu na brodu. Prikazana procedura proračuna i izbora konstrukcijske izvedbe uzimaju u obzir zahtjeve i ograničenja primjene. Svrha ovog elektromagnetskog proračuna uzbuđnog sustava ima tri glavna cilja.

Prvi cilj je osiguranje dovoljne vrijednosti uzbuđne struje za stacionarno opterećenje i kratki spoj generatora.

Drugi cilj je vezan na dinamičke promjene napona generatora, odnosno stabilizaciju napona u vremenu prema zahtjevima klasifikacijskog društva. Ovaj cilj jest ispunjen zajednički, odgovarajućim parametrima generatora, AVR karakteristikama, i odzivom uzbuđnog sustava.

Treće, realizacijom zasebnog izvora napajanja, kao što je stroj s konzekventnim polovima na rotoru, ostvaruje se pouzdano, robusno i transparentno rješenje za uzbuđni sustav sinkronog generatora. Eksperimentalna ispitivanja su izvedena s ciljem potvrđivanja rezultata numeričkih proračuna. Rezultati i vremenski dijagrami uzbuđnih struja i napona dobiveni proračunom pokazuju manje odstupanje u usporedbi s rezultatima eksperimentalnih ispitivanja.

5 CONCLUSION

This paper presents the electromagnetic design of an excitation system of a brushless synchronous generator for marine application. The given design procedure has treated application requirements and constraints. Thus, in this paper the purpose of electromagnetic design of the excitation system has three main objectives.

The first of these is to provide enough excitation current for steady state loading and for short circuit of the main generator.

The second one is connected to generator dynamic voltage changes, to preserve voltage recovery time acc. classification society rules. That objective is the task of generator parameters, AVR characteristics, but the role of excitation system response is important as well.

Thirdly, designing a separate power source such as consequent rotor poles machine offers a reliable, robust and transparent solution for the excitation system of the synchronous generator. Experimental tests have been performed to validate the results obtained by numerical calculations. The computed values and waveforms of the exciter's current and voltage closely match the test values.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] BOLDEA, I., Synchronous Generators, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2006
- [2] DEPSEER, H., SPERLING, P.G., New Range of Brushless Synchronous Generators, Siemens Power Engineering, 5,1984
- [3] DNV, Rules for Classification of Ships, Part 4, Chapter 8, Electrical Installations, 2007
- [4] FLUX 2D V.10.1, CAD package for electromagnetic and thermal analysis using finite elements, CEDRAT, 2007
- [5] Matlab 7.1 – Simulink, Model Based and System based design, The Math Works, 2007
- [6] SUSNJIĆ, L., HAZNADAR, Z., Combined genetic algorithm – 2D finite element analysis applied to synchronous machines, Electromotion, 4, 2001, Mediamira Science Publisher
- [7] SUSNJIĆ, L. et al, Consequent Poles Electrical Machine–Design and Analysis, EDPE 2005, Dubrovnik, 2005
- [8] HENDERSHOT, J.R., MILLER, T.J.E., Design of brushless permanent magnet motors, Magna Physics Publishing and Clarendon press, Oxford, 1994
- [9] YOSHIDA, K. et al, Eddy-Current Loss Analysis in PM of Surface-Mounted-PM SM For Electric Vehicles, Compumag, Sapporo, 1999
- [10] ADKINS, B., HARLEY, R.G., The General Theory of Alternating Current Machines, Chapman and Hall, London, 1975

Adrese autora: Authors' Addresses:

Izv. prof. dr. sc. Livio Šušnjić livio.susnjic@riteh.hr Sveučilište u Rijeci Tehnički fakultet Vukovarska 58 51000 Rijeka Hrvatska	Prof Livio Susnjic PhD livio.susnjic@riteh.hr University in Rijeka Faculty of Engineering Vukovarska 58 51000 Rijeka Croatia
---	---

Uredništvo primilo rukopis:
2009-06-20

Manuscript received on:
2009-06-20

Prihvaćeno:
2009-08-01

Accepted on:
2009-08-01

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

Priopćenje za javnost

broj: 7/2009

datum: 2009-11-27

Hrvatski zavod za norme u punopravnom članstvu CEN-a i CENELEC-a

Na izvanrednoj Općoj skupštini održanoj 16. studenog 2009. godine u Bruxellesu, članovi **Europskog odbora za elektrotehničku normizaciju (CENELEC)** donijeli su odluku o primanju **Hrvatskog zavoda za norme (HZN)** u tu organizaciju od 1. siječnja 2010. godine, a na izvanrednoj Općoj skupštini održanoj 25. studenog 2009. godine u Bruxellesu, članovi **Europskog odbora za normizaciju (CEN)** donijeli su odluku o primanju **HZN-a** u tu organizaciju od 1. siječnja 2010. godine.

Prijave HZN-a za članstvo u europskim organizacijama za normizaciju CEN (European Committee for standardization) i CENELEC (European Committee for electrotechnical standardization) podnesene su u lipnju ove godine. Rezultati nezavisnog ocjenjivanja pokazali su da je HZN ispunio uvjete, koji su u njegovom djelokrugu odgovornosti, za punopravno članstvo u navedenim europskim organizacijama.

Uključivanjem HZN-a u europsku normizaciju ispunjena je obveza iz Nacionalnog programa Republike Hrvatske za pristupanje Europskoj uniji za 2009. godinu i osigurano ispunjavanje jednog od uvjeta za zatvaranje pregovora u 1. poglavlju – Sloboda kretanja roba. HZN je postigao jedan od svojih strateških ciljeva postavši ravnopravni sudionik europske normizacije. Na taj način HZN daje svoj doprinos ne samo zaključivanju pregovora u području slobode kretanja roba već i ispunjava jedan od preduvjeta za članstvo Republike Hrvatske u Europskoj uniji.

Primanje Hrvatskog zavoda za norme u CEN i CENELEC rezultat je višegodišnjega sustavnog razvoja hrvatske normizacije i njezina usklađivanja s načelima, procesima i postupcima europske normizacije.

Ovime se hrvatskome gospodarstvu otvaraju nove mogućnosti kao što su aktivno sudjelovanje u izradi europskih norma i odlučivanje o njihovu prihvaćanju u skladu s interesima hrvatskog gospodarstva.

Kontakti za dodatne obavijesti:

Stanka Miljković, voditeljica Odsjeka za međunarodnu suradnju i odnose s javnošću

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.

Press Release

No: 6/2009

Date: 25 November 2009

The Croatian Standards Institute becomes full member of the European Committee for Standardization (CEN)

At its extraordinary General Assembly held in Brussels on 25 November 2009, the members of **the European Committee for Standardization (CEN)** decided to grant the Croatian Standards Institute (HZN) to the organisation's full membership as of 1 January 2010.

Upon becoming full member of the European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC), and now thanks to CEN membership, HZN has reached one of its strategic goals and become full participant in the European standardization.

HZN applied for **CEN** and **CENELEC** membership in June this year. The results of an independent assessment have proved that HZN fulfilled all the conditions, falling under its area of responsibility, required for full membership in these European organisations.

By getting fully involved in the European standardization HZN has met one of its obligations from the National Programme for the Accession of the Republic of Croatia into the European Union 2009 and ensured the fulfilment of one of the conditions required for closing the EU accession negotiations on Chapter 1 – Free Movement of Goods. This is how HZN not only contributes to the conclusion of negotiations with the EU concerning the Free Movement of Goods, but also meets one of the prerequisites for the membership of the Republic of Croatia in the EU.

HZN's full membership in CEN and CENELEC comes as a result of multiannual systematic development of Croatian standardization and its harmonization with the European standardization principles, processes and procedures.

This event shall provide new opportunities to Croatian economy, such as active participation in drafting European standards and in decision-making concerning their adoption in line with the interests of the Croatian economy.

For further information:

Stanka Miljković, Head of International Cooperation and Public Relations Department

Tel: +385 1 610 60 65

Fax: +385 1 610 93 21

E-mail: pr@hzn.hr

Web: www.hzn.hr

The Croatian Standards Institute is an autonomous non-profit public institution established as the national standards body of the Republic of Croatia with a view to accomplishing the following goals of standardization: increasing the safety level of products and processes, protecting human health and lives and environmental protection, promoting the quality of products, processes and services, ensuring the appropriate use of work, materials and energy, improving production efficiency, controlling variety, ensuring compatibility and interchangeability, and removing technical barriers to international trade.

HZN's core activities are preparation, adoption and publication of Croatian standards and other documents in the field of standardization. HZN provides all information on national, European and international standards to the public in general, and especially to the Croatian economy.

