

UNIVERZA V MARIBORU

UNIVERZA V LJUBLJANI

ENERGETSKA AGENCIJA ZA PODRAVJE



28. MEDNARODNO POSVETOVANJE

28TH INTERNATIONAL EXPERT MEETING

KOMUNALNA ENERGETIKA POWER ENGINEERING

14. do 16. maj 2019 Maribor, Slovenija

May 14TH to 16TH 2019 Maribor, Slovenia

ZBORNİK



Univerza v Ljubljani



Project co-financed by the European
Regional Development Fund



POMAGALI SO



ELEKTROINŠTITUT MILAN VIDMAR



Elektro Celje, d.d.



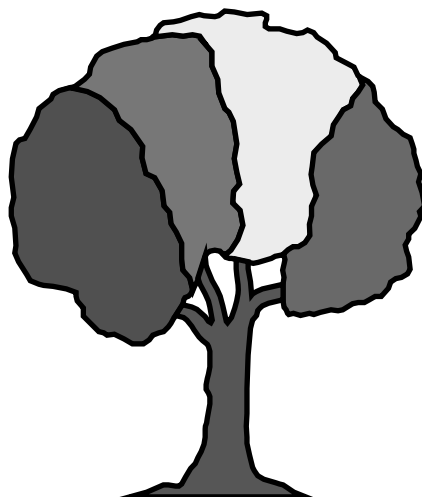
ELEKTRO MARIBOR



UNIVERZA V MARIBORU

UNIVERZA V LJUBLJANI

ENERGETSKA AGENCIJA ZA PODRAVJE



28. MEDNARODNO POSVETOVANJE

28TH INTERNATIONAL EXPERT MEETING

KOMUNALNA ENERGETIKA POWER ENGINEERING

14. do 16. maj 2019 Maribor, Slovenija
May 14TH to 16TH 2019 Maribor, Slovenia

ZBORNİK



Univerza v Mariboru



Univerza v Ljubljani



Project co-financed by the European
Regional Development Fund



Posvetovanje: "KOMUNALNA ENERGETIKA", Maribor, 14. do 16. maj 2019

Organizacija: Univerza v Mariboru,
Univerza v Ljubljani
Energetska agencija za Podravje

Odgovorni urednik: prof. dr. Jože PIHLER, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor

Članke posvetovanja so strokovno recenzirali:

Klemen DEŽELAK,	Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor
Rado FERLIČ,	ELES d.o.o.
Adnan GLOTIĆ,	Holding slovenske elektrarne
Aleš HRIBERNIK,	Fakulteta za strojništvo, Maribor
Vlasta KRMELJ,	Energetska agencija za Podravje
Filip KOKALJ,	Fakulteta za strojništvo Maribor
Tatjana KONJIĆ,	Fakultet elektrotehnike u Tuzli, Tuzla
Anita KOVAČ KRALJ,	Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, Maribor
Rafael MIHALIČ,	Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana
Tomaž MOHAR,	Elektroinštitut Milan Vidmar
Srete NIKOLOVSKI,	Elektrotehnički fakultet Osijek
Jožef RITONJA,	Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor
Urban RUDEŽ,	Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana
Nermin SARAJLIĆ,	Fakultet elektrotehnike u Tuzli, Tuzla
Mihael SEKAVČNIK,	Fakulteta za strojništvo, Ljubljana
Andrej SENEGAČNIK,	Fakulteta za strojništvo, Ljubljana
Kleme STOPAR,	Štore Steel
Gorazd ŠTUMBERGER,	Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor
Mladen TRLEP,	Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor
Stane VIŽINTIN,	Elektroinštitut Milan Vidmar
Rudi VONČINA,	Elektroinštitut Milan Vidmar
Jože VORŠIČ,	Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor

Prevajanje: Jurček VOH, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor

Tehnična ureditev: Jurček VOH, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor

Založnik: Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani
Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Univerza v Mariboru

ZBORNİK POSVETOVANJA KOMUNALNA ENERGETIKA 2019	POWER ENGINEERING 2019 CONFERENCE PROCEEDING
<u><i>Program</i></u> "UPRAVLJANJE Z ENERGIJO – ENERGETSKA UČINKOVITOST IN PROŽNOST" UPRAVLJANJE Z ENERGIJO OBNOVLJIVI VIRI ENERGIJE, UČINKOVITA RABA ENERGIJE VZPOSTAVLJANJE IN OBRATOVANJE MIKROOMREŽIJ ENERGETSKE NAPRAVE IN STROJI PAMETNE ZGRADBE, OMREŽJA IN MESTA IN ELEKTROMOBILNOST	<u><i>Programme</i></u> "ENERGY MANAGEMENT—ENERGY EFFICIENCY AND FLEXIBILITY" ENERGY MANAGEMENT RENEWABLE ENERGY SOURCES AND EFFICIENT USE OF ENERGY ESTABLISHMENT AND OPERATION OF MICROGRIDS ENERGY DEVICES AND MACHINES SMART BUILDINGS, GRIDS AND CITIES AND E-MOBILITY

Zbornik v elektronski obliki je na voljo na:

<http://ke.powerlab.um.si/arhiv/dokument.aspx?id=258>

Kataložni zapis o publikaciji (CIP) pripravili v Narodni in univerzitetni knjižnici v Ljubljani

[COBISS.SI](http://cobiss.si)-ID=[300786432](http://cobiss.si)

ISBN 978-961-6980-58-6 (pdf)

Organized by

- University of Maribor,
- University of Ljubljana,
- Energy agency of Podravje,

Scope

The focus of this year's conference will be on Energy Management—Energy Efficiency and Flexibility.

Five thematic complexes with different thematics are foreseen as a part of 28TH International Expert Meeting Komunalna energetika / Power Engineering 2019.

Organizacija

- Univerza v Mariboru,
- Univerza v Ljubljani,
- Energetska agencija za Podravje,

Namen

Poudarek letošnjega posvetovanja bo: Upravljanje z energijo – energetska učinkovitost in prožnost, na to temo bodo tudi uvodna predavanja in okrogla miza.

V sklopu 28. mednarodnega posvetovanja Komunalna energetika - oskrba z energijo / Power Engineering 2019 je predvidenih tudi pet tematskih sklopov z različnimi tematikami.

Topics of the conference:

ENERGY MANAGEMENT—ENERGY EFFICIENCY AND FLEXIBILITY

Discussion and Leading Lectures

ENERGY MANAGEMENT—ENERGY EFFICIENCY AND FLEXIBILITY

Thematic Complexes

ENERGY MANAGEMENT

ENERGY DEVICES AND MACHINES

**RENEWABLE ENERGY SOURCES
AND
EFFICIENT USE OF ENERGY**

**SMART BUILDINGS, GRIDS AND CITIES
AND E-MOBILITY**

***ESTABLISHMENT AND OPERATION OF
MICROGRIDS***

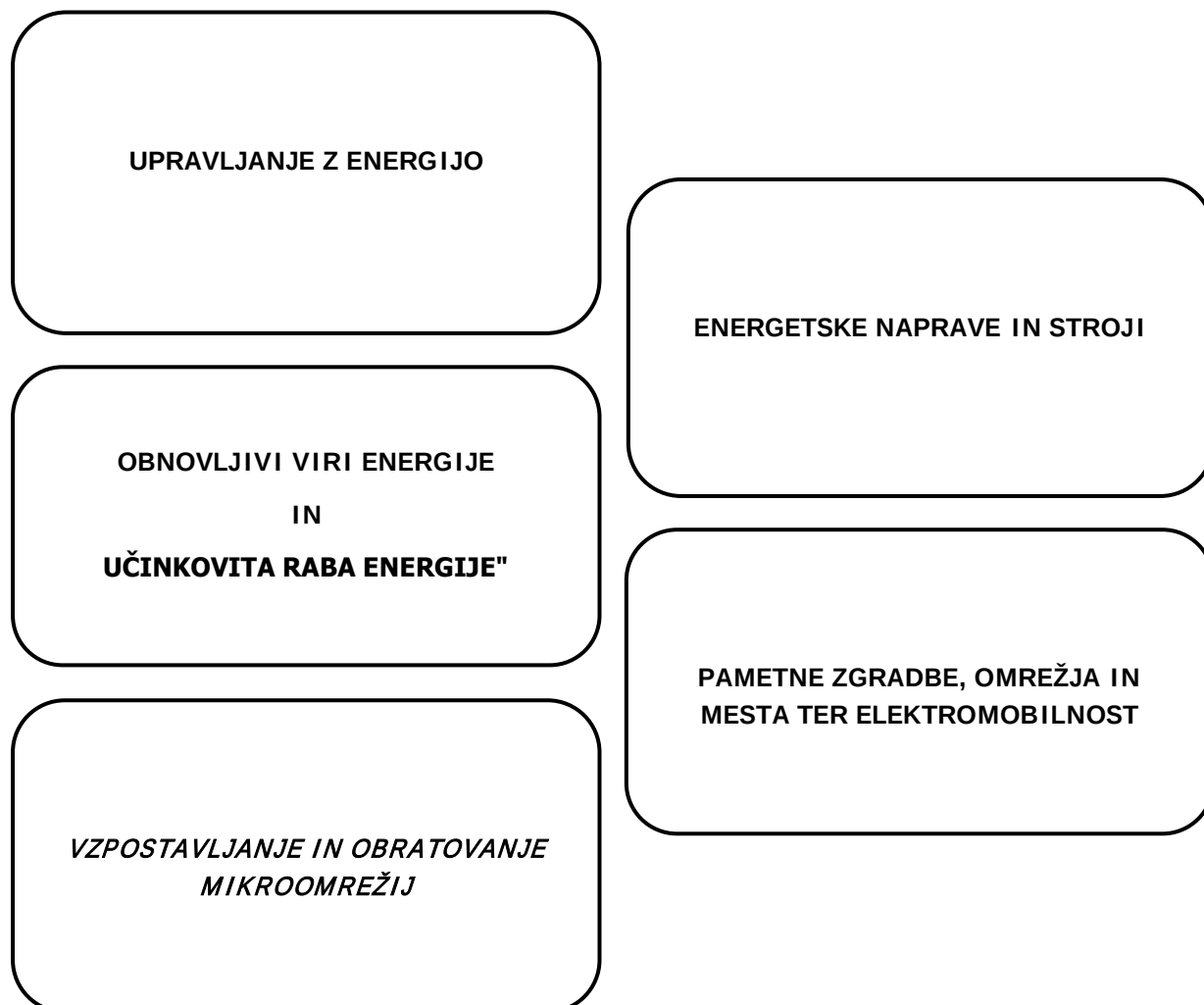
Tema posvetovanja:

UPRAVLJANJE Z ENERGIJO – ENERGETSKA UČINKOVITOST IN PROŽNOST

Okrogla miza in uvodna predavanja

UPRAVLJANJE Z ENERGIJO – ENERGETSKA UČINKOVITOST IN PROŽNOST

Tematski sklopi



ORGANISING COMMITTEE**Chairman:**

Jože PIHLER *Faculty of Electrical Eng. and
Computer Science, Maribor*

Secretary:

Jurček VOH *Faculty of Electrical Eng. and
Computer Science, Maribor*

Members:

Katarina DEŽAN *Faculty of Electrical Eng. and
Computer Science, Maribor*

Lidija K. KORITNIK *ICEM – TC, Maribor*

Vlasta KRMELJ *Energy Agency of Podravje, Maribor*

Jože VORŠIČ *Faculty of Electrical Eng. and
Computer Science, Maribor*

PROGRAM COMMITTEE**Chairman:**

Gorazd ŠTUMBERGER, *Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko,
Univerza v Mariboru*

Members:

Klemen DEŽELAK, *Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko,
Univerza v Mariboru*

Rado FERLIČ, *ELES d.o.o.*

Adnan GLOTIĆ, *Holding slovenske elektrarne*

Aleš HRIBERNIK, *Fakulteta za strojništvo, Maribor*

Filip KOKALJ, *Energetika Maribor, Maribor*

Tatjana KONJIĆ, *Fakultet elektrotehnike u Tuzli,
Tuzla*

Anita KOVAČ KRALJ, *Fakulteta za kemijo in kemijsko
tehnologijo, Maribor*

Rafael MIHALIČ, *Fakulteta za elektrotehniko,
Ljubljana*

Tomaž MOHAR, *Elektroinštitut Milan Vidmar*

Srete NIKOLOVSKI, *Elektrotehnički fakultet Osijek*

Jožef RITONJA, *Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko,
Maribor*

Urban RUDEŽ, *Fakulteta za elektrotehniko,
Ljubljana*

Nermin SARAJLIĆ, *Fakultet elektrotehnike u Tuzli,
Tuzla*

Mihael SEKAVČNIK, *Fakulteta za strojništvo, Ljubljana*

Andrej SENEGAČNIK, *Fakulteta za strojništvo, Ljubljana*

Kleme STOPAR, *Štore Steel*

Mladen TRLEP, *Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko,
Maribor*

Stane VIŽINTIN, *Elektroinštitut Milan Vidmar*

Rudi VONČINA, *Elektroinštitut Milan Vidmar*

Jože VORŠIČ, *Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko,
Maribor*

ORGANIZACIJSKI ODBOR***Predsednik:***

Jože PIHLER, *Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor*

Tajnik:

Jurček VOH, *Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor*

Člani:

Katarina DEŽAN, *Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko*

Lidija K. KORITNIK, *ICEM – TC, Maribor o,*

Vlasta KRMELJ *Energetska agencija za Podravje, Maribor*

Jože VORŠIČ, *Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko*

PROGRAMSKI ODBOR***Predsednik:***

Gorazd ŠTUMBERGER, *Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Univerza v Mariboru*

Člani:

Klemen DEŽELAK, *Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Univerza v Mariboru*

Rado FERLIČ, *ELES d.o.o.*

Adnan GLOTIČ, *Holding slovenske elektrarne*

Aleš HRIBERNIK, *Fakulteta za strojništvo, Maribor*

Filip KOKALJ, *Energetika Maribor, Maribor*

Tatjana KONJIČ, *Fakultet elektrotehnike u Tuzli, Tuzla*

Anita KOVAČ KRALJ, *Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, Maribor*

Rafael MIHALIČ, *Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana*

Tomaž MOHAR, *Elektroinštitut Milan Vidmar*

Srete NIKOLOVSKI, *Elektrotehnički fakultet Osijek*

Jožef RITONJA, *Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor*

Urban RUDEŽ, *Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana*

Nermin SARAJLIĆ, *Fakultet elektrotehnike u Tuzli, Tuzla*

Mihael SEKAVČNIK, *Fakulteta za strojništvo, Ljubljana*

Andrej SENEGAČNIK, *Fakulteta za strojništvo, Ljubljana*

Kleme STOPAR, *Štore Steel*

Mladen TRLEP, *Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor*

Stane VIŽINTIN, *Elektroinštitut Milan Vidmar*

Rudi VONČINA, *Elektroinštitut Milan Vidmar*

Jože VORŠIČ, *Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor*

Vsebina

Upravljanje z energijo

Peter KITAK, Lovro BELAK, Janez RIBIČ, Jože PIHLER DOKUMENTACIJA S PODROČJA ENERGETSKEGA UPRAVLJANJA OBJEKTOV	1
Aleš HRIBERNIK, Samo FEKONJA, Boštjan GREGORC SPLETNI KALKULATOR ZA ANALIZO SISTEMOV ZA IZRABO ODVEČNE TOPLOTE WEB CALCULATOR FOR WASTE HEAT RECOVERY SYSTEM ANALYSIS	2
Udo BACHHIESL, Dieter PREISS, Robert GAUGL (<i>ppt predstavitev</i>) REGIONAL ENERGY MANAGEMENT IN STYRIA - THE ROLE OF THE CLIMATE AND ENERGY STRATEGY STYRIA 2030 (REGIONALNO ENERGETSKO UPRAVLJANJE NA ŠTAJERSKEM - VLOGA PODNEBNE IN ENERGETSKE STRATEGIJE STYRIA 2030).....	3
Klemen SREDENŠEK, Maršenka MARKSEL, Miralem HADŽISELIMOVIĆ, Sebastijan SEME ŽIVI LABORATORIJI PROJEKTA GRASPINNO	4
Janez RIBIČ, Jože PIHLER, Lovro BELAK, Filip KOKALJ UPORABA IZRAČUNA POTREBNE TOPLOTNE MOČI STAVB ZA NJHOVO ENERGETSKO UPRAVLJANJE	5

Obnovljivi viri energije, učinkovita raba energije.....

Robert GAUGL, Udo BACHHIESL, Christopher PANSI TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS OF THE SUSTAINABLE TRANSITION SCENARIO, TYNDP 2018 (TEHNIČNO-EKONOMSKA ANALIZA SCENARIJEV ZA TRAJNOSTNO TRANZICIJO, TYNDP 2018)	6
Michael PUTTINGER, Udo BACHHIESL ANALYSIS OF DIFFERENT WIND ASSESSMENTS FOR RURAL AREAS IN EGYPT AS PART OF A RENEWED LOCAL ENERGY STRATEGY (ANALIZA RAZLIČNIH OCEN VETRA ZA PODEŽELSKA OBMOČJA V EGIPTU)	7
Klemen Deželak, Jože Pihler EKONOMSKO FINANČNA ANALIZA IZRABE TOPLOTE S TOPLOTNO ČRPALKO, GEOSONDO IN SPREJEMNIKI SONČNE TOPLOTE	8
Karthik Subramanya BHAT, Udo BACHHIESL, Heinz STIGLER STRATEGIC ANALYSIS FOR THE LONG-TERM RENEWABLE GOALS OF THE INDIAN ELECTRICITY SECTOR (STRATEŠKA ANALIZA DOLGOROČNIH CILJEV UPORABE OBNOVLJIVIH VIROV V INDIJSKEM ELEKTRIČNEGA SEKTORJU)	9
Dean ČERNEC POVRNITEV NUTRIENTOV IZ DIGESTATA PRI PROIZVODNJI BIOPLINA	10
Tina KEGL, Lidija ČUČEK, Anita KOVAČ KRALJ, Blaž LIKOZAR WASTE MATERIAL TREATMENT AND MANAGEMENT FOR PRODUCTION OF (BIO)METHANOL (OBDELAVA IN RAVNANJE Z ODPADKI ZA PROIZVODNJO (BIO)METANOLA).....	11

Vzpostavljanje in obratovanje mikroomrežij

Project co-financed by the European
Regional Development Fund



Vlasta KRME LJ, Marko ROJS, Tomaž ROBIČ

PRILAGAJANJE UPORABNIKOV MIKROOMREŽJEM (povzetek)12

Tomaž ROBIČ

PILOTNI PRIMER TEORETIČNEGA MIKROOMREŽJA V ŠPORTNEM PARKU RUŠE (povzetek)13

Diane CASSAR

MIKROOMREŽJA ZA MANJŠE OTOŠKE KRAJE – PRIMER MODELA ZA OTOK GOZO NA OBMOČJU MALTE (povzetek)14

Peter VRTIČ

MONITORING ENERGIJE KOT SESTAVNI DEL ZAGOTAVLJANJA ENERGETSKE UČINKOVITOSTI (povzetek)15

Aleš NASTRAN

PRIMERI DOBRIH PRAKS UVEDBE ENERGETSKEGA INFORMACIJSKEGA SISTEMA (povzetek)16

Žiga ZUPANČIČ, Peter SOMI

MOŽNOSTI UPORABE MIKROOMREŽIJ (povzetek)17

Energetske naprave in stroji.....

Marcel TOPLER, Robert BREZOVNIK, Jožef RITONJA, Boštjan POLAJŽER

DINAMIČNA SIMULACIJA PROCESA USKLAJENE IZRAVNAVE TRENUTNIH ODPSTOPANJ REGULACIJSKIH OBMOČIJ18

Mladen TRLEP, Marko JESENİK, Miloš BEKOVIĆ, Anton HAMLER

ANALIZA ELEKTROMAGNETNIH RAZMER V OKOLICI OZEMLJIL Z UPORABO METODE KONČNIH ELEMENTOV19

Gašper HABJAN, Martin PETRUN

IZVEDBA SKLOPLJENEGA TRANZIENTNEGA MODELA SISTEMA ZA UPOROVNO TOČKOVNO VARJENJE20

Marko JESENİK, Miloš BEKOVIĆ, Anton HAMLER, Mladen TRLEP

OCENA VELIKOSTI POŠKODBE V MATERIALU NA OSNOVI BREZ POŠKODBENEGA TESTIRANJA Z VRTINČNIMI TOKOVI21

Pametne zgradbe, omrežja in mesta in elektromobilnost

Nevena SREČKOVIĆ, Miran ROŠER, Gorazd ŠTUMBERGER

METODOLOGIJA ZA OVREDNOTENJE OBRATOVANJA SREDNJENAPETOSTNEGA OMREŽJA V ZAKLJUČENI ZANKI22

Ernad JABANDŽIĆ, Tatjana KONJIĆ, Mirza SARAJLIĆ

COMPARATIVE ANALYSIS OF DYNAMIC LOAD MODEL PARAMETERS OBTAINED BY MEASUREMENT, MODELING AND OPTIMIZATION TOOL

(KOMPARATIVNA ANALIZA PARAMETROV DINAMIČNEGA MODELA BREMENA DOBLJENIH Z MERITVIJO, MODELIRANJEM IN OPTIMIZACIJO).....	23
Tadej ŠKRJANC, Klemen JERIN, Rafael MIHALIČ DOLOČITEV TEHNIČNIH IZGUB PRENOSNEGA OMREŽJA	24
Jurij CURK, Uršula KRISPER DISTRIBUCIJSKO OMREŽJE IN ELEKTRIFIKACIJA PROMETA	25
Iztok BRINOVAR, Gregor SRPČIČ, Katja HANŽIČ, Miralem HADŽISELIMOVIĆ, Sebastijan SEME ANALIZA »PEDELEC-OV« IN ELEKTRIČNIH AVTOMOBILOV, KOT SESTAVNI DEL URBANIH TRANSPORTNIH SISTEMOV V IZBRANIH DRŽAVAH PODONAVSKE REGIJE	26

DOKUMENTACIJA S PODROČJA ENERGETSKEGA UPRAVLJANJA OBJEKTOV

Peter KITAK, Lovro BELAK, Janez RIBIČ, Jože PIHLER

POVZETEK

Področje energetskega upravljanja objektov je urejeno s standardom in ostalimi zakonodajnimi akti. Krovni dokument s področja energetskega upravljanja stavb je standard SIST EN ISO 50001 in se uporablja za vse vrste organizacij, ne glede na velikost in vrsto dejavnosti. Na področju zakonodajnih aktov je v veljavi direktiva 2012/27/EU Evropskega parlamenta in sveta, ki ponuja splošni okvir za spodbujanje energetske učinkovitosti v EU ter predvideva številne ukrepe, ki podpirajo in narekujejo upoštevanje meril energetske učinkovitosti. V javnem sektorju v Sloveniji pa obravnava področje upravljanja z energijo Uredba o upravljanju z energijo v javnem sektorju (Ur. l. RS, št. 52/16).

ABSTRACT

The field of energy management of buildings is regulated with standards and legislative acts. Crown document from a field of energy management of buildings is a standard SIST EN ISO 50001 and it is used for all kind of organizations, regardless of size and type of activity. In the field of legislative acts, there is a valid directive (2012/27/EU from European parliament and council), that offers a general framework for encouraging the energy efficiency in EU and also predicts numerous actions that support and provide the criteria of energy efficiency. In the public sector of Slovenia, the area is handled by "Regulation of energy management in the public sector (Ur. l. RS, št. 52/16)".

1. UVOD

Osnovni cilj upravljanja z energijo je povečanje energijske učinkovitosti in uporaba obnovljivih virov energije v stavbah, kar učinkovito prispeva k zmanjšanju emisij toplogrednih plinov in tako tudi k ublažitvi podnebnih sprememb. Cilj povečanja energetske učinkovitosti Evropske unije se ne uresničuje po načrtih. Potrebno bo torej odločno ukrepanje, da bi izkoristili znatne možnosti za večji prihranek energije pri stavbah, prometu, izdelkih in procesih.

Stavbe predstavljajo okoli 40 % končne porabe energije v Evropski uniji. Države članice bi morale za čas po letu 2020 opredeliti dolgoročno strategijo za spodbujanje naložb v prenovo stanovanjskih in poslovnih stavb, s čimer bi izboljšali energetske učinkovitost stavbnega fonda. Navedena strategija bi morala obravnavati stroškovno učinkovite temeljite prenove, ki zmanjšajo tako dobavljeno kot končno porabo energije stavbe, in to za bistven odstotek v primerjavi z ravni pred prenovo.

Tovrstno načrtovanje energetske učinkovitosti je tesno povezano z zakonodajo, drugimi pravnimi akti ter standardi. Pregled obstoječe dokumentacije s področja energetskega upravljanja je glavna tematika tega prispevka, ki je razdeljen v pet poglavij. Za uvodom, v drugem poglavju predstavljamo krovne dokumente s področja energetskega upravljanja objektov. Prvi takšen dokument je standard SIST EN ISO 50001 [1]. Vir zakonodajnih aktov članic Evropske unije predstavlja direktiva 2012/27/EU Evropskega parlamenta in sveta [2]. Javni sektor v Sloveniji pa ureja Uredba o upravljanju z energijo v javnem sektorju (Ur. l. RS, št. 52/16) [3]. V tretjem poglavju predstavljamo še dva dodatna dokumenta s področja energetskega upravljanja, in sicer energetski pregled in energetska izkaznica. Energetski pregled je določen s standardom SIST EN ISO 50001, energetske izkaznice pa so določene z energetskim zakonom. Četrto poglavje se nanaša na pripravo letnega poročila podjetja skladno s smernicami trajnostnega poročanja, kjer bomo izpostavili smernice GRI (Global Reporting Initiative). V tem poglavju bomo podali tudi primer poročanja na UM FERI. V petem poglavju bomo podali zaključke.

2. KROVNI DOKUMENTI S PODROČJA ENERGETSKEGA UPRAVLJANJA OBJEKTOV

Področje energetskega upravljanja stavb pokriva standard SIST EN ISO 50001 [1], s ciljem zagotoviti okvir za doseganje energetske učinkovitosti. Standard se uporablja za vse vrste organizacij, ne glede na velikost in vrsto dejavnosti.

Drugi vir zakonodajnih aktov predstavljajo direktive in uredbe. Na področju energetske učinkovitosti je krovni dokument o energetski učinkovitosti direktiva 2012/27/EU Evropskega parlamenta in sveta [2]. V javnem sektorju v Sloveniji obravnava področje upravljanja z energijo Uredba o upravljanju z energijo v javnem sektorju (Ur. l. RS, št. 52/16) [3]. Ta uredba določa obveznost vzpostavitve sistema upravljanja z energijo v stavbah oseb javnega sektorja. Določa tudi zavezanca in minimalne vsebine tega sistema, s ciljem povečanja energetske učinkovitosti in uporabe obnovljivih virov energije v stavbah, ki jih uporabljajo osebe javnega sektorja.

V naslednjih podpoglavjih bomo nekoliko podrobneje predstavili osnovne dokumente s tega področja.

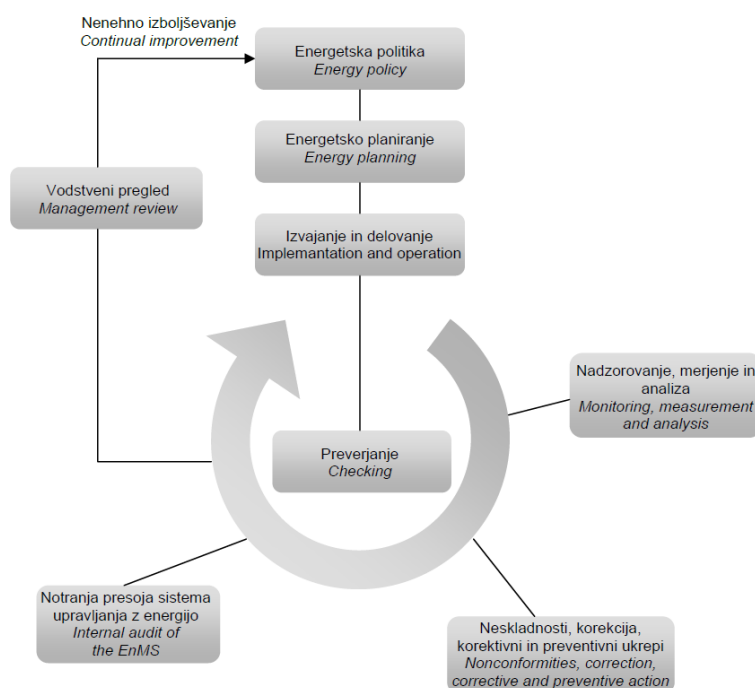
2.1 Standard SIST EN ISO 50001

Namen standarda SIST EN ISO 50001 je omogočiti organizacijam, da vzpostavijo sisteme in postopke, ki so potrebni za izboljšanje energetske učinkovitosti, vključno z energijsko učinkovitostjo, rabo in porabo. Izvajanje tega mednarodnega standarda naj bi s sistematičnim upravljanjem z energijo privedlo do zmanjšanja emisij toplogrednih plinov ter drugih, s tem povezanih okoljskih vplivov in stroškov energije. Ta mednarodni standard je mogoče uporabiti v organizacijah vseh vrst in velikosti ne glede na geografske, kulturne ali družbene razmere. Uspešno izvajanje standarda je odvisno od zavezanosti vseh ravni in struktur v organizaciji, še posebej najvišjega vodstva.

Standard SIST EN ISO 50001 temelji na metodologiji nenehnega izboljševanja, imenovani planiraj - izvajaj - preverjaj - ukrepaj (angl. Plan - Do - Check – Act, kratica: PDCA), ki upravljanje z energijo vključuje v vsakodnevno prakso organizacije (slika 1).

V okviru upravljanja z energijo je mogoče pristop PDCA na kratko opisati kot:

- **planiraj:** planiraj energetske pregled ter vzpostavi izhodišče, osnovne kazalnike energetske učinkovitosti, okvirne in izvedbene cilje ter akcijske plane, potrebne za doseganje rezultatov, ki bodo izboljšali energetske učinkovitost v skladu z energetsko politiko organizacije;
- **izvajaj:** izvajaj akcijske plane upravljanja z energijo;
- **preverjaj:** nadzoruj ter meri procese in ključne značilnosti delovanja, ki opredeljujejo energetske učinkovitost glede na energetsko politiko in okvirne cilje, ter poročaj o rezultatih;
- **ukrepaj:** ukrepaj tako, da se bosta energetska učinkovitost in sistem upravljanja z energijo nenehno izboljševala.



Slika 1: Shema modela sistema upravljanja z energijo po standardu SIST EN ISO 50001

Področje uporabe standarda SIST EN ISO 50001 se nanaša na zahteve za vzpostavljanje, izvajanje, vzdrževanje in izboljševanje sistema upravljanja z energijo, katerega namen je organizaciji omogočiti sistematičen pristop k nenehnemu izboljševanju njene energetske učinkovitosti, vključno z energijsko učinkovitostjo ter rabo in porabo energije, ki zajema tudi merjenje, dokumentiranje in poročanje.

V skladu z zahtevami standarda mora organizacija:

- vzpostaviti, dokumentirati, izvajati, vzdrževati in izboljševati sistem upravljanja z energijo;

- b) določiti in dokumentirati obseg in meje svojega sistema upravljanja z energijo;
- c) opredeliti, kako bo izpolnjevala zahteve tega mednarodnega standarda, da bo dosegla nenehno izboljševanje svoje energijske učinkovitosti in svojega sistema upravljanja z energijo.

Organizacija mora voditi in dokumentirati proces energetskega planiranja. Osnova energetskega planiranja je **energetski pregled**. Energetski pregled je treba obnavljati v določenih časovnih presledkih pa tudi ob večjih spremembah na objektih in opremi.

2.2 Direktiva 2012/27/EU evropskega parlamenta in sveta o energetske učinkovitosti

V sklepih Evropskega sveta z dne 8. in 9. marca 2007 je bila poudarjena potreba po povečanju energetske učinkovitosti v Uniji, da bi do leta 2020 dosegli cilj 20-odstotnega prihranka porabe primarne energije v Uniji v primerjavi s projekcijami. V sklepih Evropskega sveta z dne 4. februarja 2011 je bilo poudarjeno, da je treba doseči cilj povečanja energetske učinkovitosti za 20 % do leta 2020, ki se trenutno v EU ne uresničuje po načrtih.

Direktiva 2012/27 EU se v področju uporabe (člen 1) in opredelitve pojmov (člen 2) nanaša na:

- koristno toploto, ki pomeni toploto, proizvedeno v postopku sproizvodnje za zadovoljitev ekonomsko upravičenega povpraševanja po ogrevanju ali hlajenju;
- učinkovito individualno ogrevanje in hlajenje, ki pomeni sistem dobave za individualno ogrevanje in hlajenje, ki v primerjavi z učinkovitim daljinskim ogrevanjem in hlajenjem znatno zmanjša vnos primarne energije iz neobnovljivih virov.

Člen 3 direktive podaja cilje povečanja energetske učinkovitosti, kjer vsaka država članica določi okvirni nacionalni cilj povečanja energetske učinkovitosti, ki temelji na porabi primarne ali končne energije, na prihranku primarne ali končne energije ali na energetski intenzivnosti.

Pomemben je 8. člen Direktive, ki se nanaša na energetske preglede in sisteme upravljanja z energijo. Energetske preglede lahko izvajajo notranji strokovnjaki ali energetski pregledovalci. Energetski pregledi omogočajo podrobne in potrjene izračune za predlagane ukrepe, tako da se zagotovijo jasne informacije o možnih prihrankih. Omogočeno mora biti shranjevanje podatkov, uporabljenih v energetskih pregledih, zaradi opravljanja analiz za preteklo porabo in spremljanje učinkovitosti.

Člen 9 Direktive se nanaša na meritve. Države članice v mejah tehnične izvedljivosti, finančne sprejemljivosti in sorazmerno z morebitnimi prihranki energije zagotovijo, da imajo končni odjemalci električne energije, zemeljskega plina, daljinskega ogrevanja, daljinskega hlajenja in tople sanitarne vode na voljo individualne števce po konkurenčnih cenah, ki natančno prikazujejo dejansko količino porabljene energije končnega odjemalca in informacije o dejanskem času njene porabe.

Člen 10 podaja informacije o obračunu. Ta obveznost se lahko izpolni s sistemom rednega samoodčitavanja končnih odjemalcev, ki odčitane podatke s števca sporočajo dobavitelju

energije. Če končni odjemalec ne sporoči odčitanih podatkov s števca za zadevno obračunsko obdobje, se obračun pripravi na podlagi ocenjene porabe ali pavšalnega zneska.

Direktiva v poglavju o učinkovitosti oskrbe z energijo v 14. členu podaja informacije o spodbujanju učinkovitosti pri ogrevanju in hlajenju. V 19. členu podaja druge ukrepe za spodbujanje energetske učinkovitosti (npr. zagotavljanje spodbud, spremembo pravnih ali regulativnih določb, poenostavitev upravnih postopkov ...).

V 24. členu direktive so opredeljene naloge članic, ki se nanašajo na pregled in spremljanje izvajanja. Države članice od leta 2013 vsako leto do 30. aprila poročajo o napredku, doseženem v zvezi z nacionalnimi cilji povečanja energetske učinkovitosti. Države članice od 30. aprila 2014 vsaka tri leta predložijo nacionalne akcijske načrte za energetske učinkovitost.

2.3 Uredba o upravljanju z energijo v javnem sektorju

Uredba v 2. členu podaja vzpostavitev sistema upravljanja z energijo. Sistem upravljanja z energijo se vzpostavi v stavbah in posameznih delih stavb, ki so v lasti Republike Slovenije ali samoupravne lokalne skupnosti in v uporabi državnih organov, samoupravnih lokalnih skupnosti, javnih zavodov, javnih gospodarskih zavodov, javnih skladov, javnih agencij in ustanov, katerih ustanovitelj je Republika Slovenija ali samoupravna lokalna skupnost, in katerih uporabna površina obsega več kot 250 m².

V 3. členu so podane izjeme od uporabe uredbe, kot npr. stavbe za promet, stavbe za izvajanje komunikacij, industrijske stavbe, ki se ne ogrevajo ali klimatizirajo na temperaturo v prostorih, višjo od 12 °C, rezervoarji, silosi, skladišča, obrambni objekti in druge stavbe, ki niso uvrščene drugje.

5. člen uredbe podaja vsebino sistema upravljanja z energijo, ki vključuje:

- izvajanje energetskega knjigovodstva;
- določitev in izvajanje ukrepov za povečanje energetske učinkovitosti in rabe obnovljivih virov energije;
- poročanje odgovorni osebi zavezanca o rabi energije, s tem povezanih stroških in izvajanju ukrepov iz prejšnje alineje.

Energetsko knjigovodstvo je ločeno opisano v 6. členu. Energetsko knjigovodstvo je sistem zbiranja in spremljanja podatkov o rabi energije v stavbi ali posameznem delu stavbe in se vodi kot informatizirana zbirka podatkov, v katero morajo zavezanci najmanj enkrat letno, in sicer do 31. marca za predhodno leto, vnesti podatke o:

- letni rabi energije in energentov v stavbi ali posameznem delu stavbe;
- letnih stroških za porabljeno energijo in energente v stavbi ali posameznem delu stavbe;
- tehničnih lastnostih stavbe ali posameznega dela stavbe, in sicer o lastnostih ovoja in tehničnih sistemov stavbe ter o profilu rabe energije, vključno s podatki o zasedenosti stavbe in številu uporabnikov;
- načrtovanih in izvedenih ukrepih za povečanje energetske učinkovitosti in rabe obnovljivih virov energije.

8. člen se nanaša na meritve energije, in sicer, če se več stavb ali posameznih delov stavb oskrbuje z električno energijo, plinom oziroma toploto z enega prevzemno-predajnega mesta, zavezanec zagotovi merjenje porabe električne energije, zemeljskega plina in toplote za vsako stavbo oziroma posamezni del stavbe posebej.

9. člen podaja minimalne zahteve glede energetske učinkovitosti stavb. Stavbe, ki so opredeljene kot poslovne stavbe, izpolnjujejo minimalne zahteve glede energetske učinkovitosti, če je letna dovedena energija za stavbo ali posamezni del stavbe v primeru merjene energetske izkaznice največ 100 kWh/m²a oziroma je pri novogradnjah potrebna toplota za ogrevanje največ 25 kWh/m²a.

Do nedavnega je bil aktualen 12. člen uredbe, ki navaja, da je rok za vgradnjo števecov merjenja porabe električne energije, zemeljskega plina in toplote iz 8. člena te uredbe najpozneje do 31. decembra 2018.

3. DOKUMENTI, KI JIH NAVAJA STANDARD SIST EN ISO 50001 IN GRADBENI ZAKON

Standard SIST EN ISO 50001 v poglavju 4 (Zahteve sistema upravljanja z energijo) podaja, da mora organizacija razviti, zapisati in vzdrževati energetski pregled. Metodologija in merila za razvoj energetskega pregleda morajo biti dokumentirani. Glede na namen in obseg energetskih pregledov so energetski pregledi razvrščeni v tri skupine, in sicer preliminarni, poenostavljeni in razširjeni. V podpoglavju 3.1 podajamo osnovne izvlečke **razširjenega energetskega pregleda**.

Po določilih Energetskega zakona morajo vse novogradnje in obstoječe stavbe pridobiti energetsko izkaznico, kar pa bomo opisali v podpoglavju 3.2.

3.1 Razširjen energetski pregled (REP)

Razširjeni energetski pregled je pregled, ki zahteva natančno analizo podjetja ali stavbe. Vsebuje natančne izračune energetskih potreb in natančno analizo izbranih ukrepov za učinkovito rabo energije [4], [5].

Energetski pregled objekta je namenjen investitorju in upravitelju objektov oz. proizvodnje za sistematično načrtovanje kratkoročnih in dolgoročnih investicij s ciljem zmanjšanja obratovalnih stroškov objektov in povečanja toplotnega ugodja. Z energetskim pregledom se izvede pregled dejanskega stanja objektov, porabe energentov ter popis največjih porabnikov energije. Cilji energetskega pregleda so naslednji:

- vzpostaviti širši vpogled nad rabo energije objekta,
- ugotoviti možnosti za zmanjšanje porabe energije,
- oceniti možne letne prihranke (pri porabi energije in stroških), ocene stroškov izvedb ukrepov in njihovih vračilnih dob,
- ugotoviti način razvijanja metode energetskega managementa, da bi dosegli in ohranjali te prihranke, s tem pa bi iskali še nadaljnje možnosti prihrankov.

Oblika posameznega energetskega pregleda je odvisna od dejavnosti, ki se odvija v stavbi oz. podjetju. Vse oblike energetskih pregledov pa imajo skupne naslednje korake:

- izračun porabe in stroškov energije,
- izračun porabe energije po porabnikih,
- analiza porabe energije,
- ugotovitev možnih ukrepov,
- ovrednotenje ukrepov in zahteve glede poročanja in oblike poročila.

3.2 Energetske izkaznice

Energetska izkaznica stavbe je listina s podatki o energijski učinkovitosti stavbe in s priporočili za povečanje energijske učinkovitosti. Potrebna je za vse javne stavbe s površino večjo od 250 m² (pred 9. julijem 2015 je bila ta meja 500 m²). Pravilnik o metodologiji izdelave in izdaji energetskih izkaznic stavb (Ur. list RS, št. 92/2014) v 18. členu navaja vrste stavb, za katere velja obveznost namestitve energetske izkaznice. Najmanj prva stran energetske izkaznice mora biti nameščena na vidnem mestu v stavbi ali delu stavbe, za katero je bila energetska izkaznica izdana.

Veljavnost energetske izkaznice je 10 let, vendar se lahko izkaznico izdela tudi na novo, preden poteče 10 let. Prva stran energetske izkaznice vsebuje:

- podatke o stavbi,
- št. izkaznice in datum veljavnosti,
- vrsta izkaznice,
- podatek o potrebni toploti za ogrevanje (razvrščeni v razrede: A1, A2, B1, B2, C, D, E, F in G),
- podatek o dovedeni energiji za delovanje stavbe,
- podatek o primarni energiji in emisijah CO₂.

Bistveni del energetske izkaznice pa ni zgolj podatek o rabi energije, temveč priporočila za stroškovno učinkovite izboljšave energetske učinkovitosti. Ta predstavljajo spodbudo za izvedbo najpomembnejših ukrepov in niso splošna, ampak se nanašajo na stavbo, za katero je energetska izkaznica izdelana. Lastnik oziroma uporabnik stavbe lahko zmanjša porabo energije za ogrevanje z izvedbo teh priporočil.

4. DOKUMENTI ZA POROČANJE

Trajnostno poročilo podjetja oz. organizacije običajno obsega informacije o ekonomskih, okoljskih, družbenih in upravljaljskih učinkih in rezultatih delovanja organizacije. Poročilo je tudi osnova za izdelavo kazalnikov energetske učinkovitosti. Standard SIST EN ISO 50001 je v navajanju kazalnikov energetske učinkovitosti splošen in omogoča, da njihove definicije tvori organizacija, ki dejansko upravlja z energijo.

Na področju priprave letnega poročila skladno s smernicami trajnostnega poročanja so v zadnjem času vse bolj uveljavljeni standardi GRI (Global Reporting Initiative) [6]. Družina

standardov GRI, predvsem del GRI 302, ki podaja zahteve s področja poročanja o energiji, ima bolj natančno določen postopek obravnave kazalnikov energetske učinkovitosti od standarda SIST EN ISO 50001.

4.1 Smernice GRI (Global Reporting Initiative)

Smernice za pripravo trajnostnega poročila podaja podjetjem neprofitna organizacija GRI. Standardi GRI omogočajo podjetjem, da sistematično poročajo o svojem trajnostnem delovanju in omogočijo sodelujočim partnerjem, da dobijo zadostne informacije o družbeno odgovornem ravnanju podjetja, na podlagi katerih lažje oblikujejo svoje odločitve. Po drugi strani pa podjetja na podlagi merljivih učinkov spremljajo svoje delovanje ter z ustreznimi ukrepi prispevajo k trajnostnemu razvoju družbe [4].

Organizacija GRI nudi podjetjem za pomoč pri pisanju trajnostnega poročila 6 standardov:

- GRI 101: Temelji poročanja,
- GRI 102: Splošna standardna razkritja,
- GRI 103: Upravljavski pristop,
- GRI 200: Ekonomsko področje,
- GRI 300: Okolje,
- GRI 400: Družba.

Glavne značilnosti GRI standardov:

- primerni so za poročanje vseh vrst organizacij, ne glede na njihovo velikost, lokacijo ali lastniško strukturo,
- poročila, narejena po standardih GRI, so mednarodno priznana in primerljiva, saj na jasen, transparenten in merljiv način podajajo informacije deležnikom in širši javnosti,
- so pomembno orodje za vključevanje trajnostne komponente in družbene odgovornosti v strategijo poslovanja in vedenja organizacije.

Standardi GRI vključujejo:

- **Zahteve.** To so obvezna navodila. V besedilu so zahteve označene s krepko pisavo in označena z besedo "mora". Zahteve je treba upoštevati v okviru priporočil in smernic.
- **Priporočila.** To so primeri, ko se določeno opravilo spodbuja, vendar ni nujno. Beseda "bi moralo" označuje priporočilo.
- **Navodila.** Ti deli vključujejo ozadje informacij, pojasnila in primere za pomoč organizaciji, da bolje razumejo zahteve.

Pri pripravi poročila za področje upravljanja z energijo se upošteva standard GRI 302-4, ki se nanaša na zmanjšanje porabe električne energije. Standard GRI 302-4 določa, da mora poročilo družbe zajemati naslednje podatke:

- a) zmanjšanje porabe energije, dosežene kot neposredna posledica pobud za učinkovito rabo energije (v Joulih);
- b) vrsto energije, vključeno v zmanjšanje (gorivo, električna energija, ogrevanje, hlajenje, para);
- c) osnovo za izračun zmanjšanja porabe energije, kot npr. referenčno leto ali izbrano izhodišče, vključno z razlogom za njegovo izbiro;

d) standarde, metodologije, predpostavke in/ali orodja za izračun.

4.2 Primer poročanja UM FERI

Tako v podjetjih, kot tudi v družbah javnega sektorja morajo biti vzpostavljeni sistemi za učinkovito upravljanje z energijo, saj jih k temu silijo uredbe, direktive in zakoni. Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko (FERI) je del objektov Tehniških fakultet Univerze v Mariboru, kjer delujejo še naslednje fakultete: Fakulteta za strojništvo (FS), Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo (FKKT) in Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo (FGPA). Meritve porabe energentov (elektrika, toplotna energija in voda) so za vse fakultete skupne, in sicer za vsak energent eno merilno mesto. V preglednici 1 podajamo primer porabe teh energentov za leto 2017.

Preglednica 1: Poraba energentov na Tehniških fakultetah Univerze v Mariboru za leto 2017

Leto 2017	Električna energija (kWh)	Toplotna energija (MWh)	Voda (m ³)
januar	231.828	641,35	812,247
februar	193.068	437,21	717,459
marec	207.516	240,01	1.020,512
april	186.114	145,59	787
maj	201.640	37,97	787
junij	198.148	/	934,361
julij	189.728	/	823
avgust	186.564	/	744,51
september	177.317	25,14	623,353
oktober	193.237	160,37	991,669
november	204.899	390,99	866,459
december	200.280	488,21	914,827
Skupaj 2017	2.370.339	2.566,84	10.022,397

Strošek plačil porabe energentov se deli po fakultetah po posebnem ključu, ki vključuje površino prostorov, št. vpisanih študentov, št. zaposlenih in nekatere korekcijske faktorje.

Na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko je poročilo o porabi in prikaz porabe energentov vsakoleten in je del Samoevalvacijskega poročila (poglavje 1.6 tega poročila se nanaša na vrednotenje okoljskega vpliva). V preglednici 2 so prikazani podatki iz Samoevalvacijskega poročila za leto 2017 za področje energetske učinkovitosti in porabe vode. V preglednici so prikazani tudi normalizirani kazalniki na zaposlenega (vrednost C) in normalizirani kazalniki na študenta (vrednost C1).

Preglednica 2: Poraba energentov na FERi Univerze v Mariboru za leto 2017

Preglednica 1. Poraba energij in letna poraba vode v Mariboru za leto 2017								
Področje	Kazalnik	Vrednost	Št. zaposlenih	Vred./št. zaposlenih		Št. študentov	Vred./št. študentov	
		A	B	C=A/B		B1	C1=A/B1	
		leto 2017		leto 2016	leto 2017		leto 2016	
Energetska učinkovitost								
	Skupna poraba energije v kWh	2.387.896	288	8.291,31	8.639,08	1.903	1.254,81	1.272,49
	Skupna poraba energije iz obnovljivih virov (delež v %)	9,63 %						
	Skupna poraba energije iz obnovljivih virov v kWh	229.954	288	798,45	831,94	1.903	120,84	122,54
Voda								
	Skupna letna poraba vode v m ³	4.806	288	16,69	17,4	1.903	2,53	2,56

Smiselna je primerjava kazalnikov skupne porabe energije in porabe vode glede na prejšnja leta. V zadnjih letih ni bilo bistvenega odstopanja, minimalne spremembe se torej lahko pripišejo običajnim nihanjem.

5. ZAKLJUČEK

Dokumentacija s področja energetskega upravljanja objektov je osnova za načrtovanje in izvajanje energetske učinkovitosti. Dokumentov s tega področja je sicer več, vendar je krovni dokument standard SIST EN ISO 50001, ki podrobno določa zahteve za sistem upravljanja z energijo. Organizacijam omogoča razviti in izvajati energetske politike in zastavljati okvirne in izvedbene cilje ter akcijske piane, ki upoštevajo zakonske zahteve in informacije o pomembni rabi energije. Sistem upravljanja z energijo organizaciji omogoča izpolnjevati zaveze iz njene politike, po potrebi ukrepati za izboljšanje njene energetske učinkovitosti in izkazovati skladnost sistema z zahtevami tega mednarodnega standarda, ne glede na vrsto uporabljene energije.

Dokumentacija kljub svojemu pomenu predstavlja le izhodišče za energetske upravljanje objektov. Družba oz. organizacija mora za celovito upravljanje z energijo izdelati kazalnike energetske učinkovitosti in predlagati ukrepe. Vodstvo nadalje odloči o ukrepih, ki se bodo

izvedli. Postopek se ponavlja in pripomore k nenehnemu izboljševanju učinkovite rabe in zmanjšanja porabe energije.

6. VIRI, LITERATURA

- [1] Slovenski inštitut za standardizacijo, ISO 50001:2011 – Sistemi upravljanja z energijo – Zahteve z napotki za uporabo.
- [2] Direktiva 2012/27/EU Evropskega parlamenta in sveta z dne 25. oktobra 2012 o energetske učinkovitosti, spremembi direktiv 2009/125/ES in 2010/30/EU ter razveljavitvi direktiv 2004/8/ES in 2006/32/ES, Uradni list Evropske unije 315/1.
- [3] Uredba o upravljanju z energijo v javnem sektorju (Ur. l. RS, št. 52/16)
- [4] Energetski pregled stavbe, <http://www.energap.si>
- [5] Lovro Belak, Roman Plahutnik, Robert Maruša, Jože Pihler, Energetsko upravljanje stavb in pripadajočih objektov ELES, 13. Konferenca slovenskih elektroenergetikov - Maribor 2017.
- [6] Trajnostno poročanje po smernicah GRI (Global Reporting Initiative), <http://www.ekvilib.org/>

NASLOVI AVTORJEV

doc. dr. Peter Kitak

doc. dr. Janez Ribič

red. prof. dr. Jože Pihler

Univerza v Mariboru, Fakulteta, za elektrotehniko, računalništvo in informatiko
Koroška cesta 46, 2000 Maribor, Slovenija

Tel: + 386 2 220 70 80, fax: + 386 2 220 72 72

Elektronska pošta: peter.kitak@um.si

dr. Lovro Belak

ELES, d.o.o.

Hajdrihova 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenija

Elektronska pošta: lovro.belak@eles.si

SPLETNI KALKULATOR ZA ANALIZO SISTEMOV ZA IZRABO ODVEČNE TOPLOTE

Aleš HRIBERNIK, Samo FEKONJA, Boštjan GREGORC

POVZETEK

Odvečna toplota iz številnih industrijskih procesov pogosto vsebuje veliko eksergije, ki jo je mogoče koristno uporabiti z eno od mnogih tehnologij za izrabo le-te. Za zgodnjo pred investicijsko fazo smo za investitorje izdelali preprosto spletno orodje, ki omogoča na podlagi najosnovnejših podatkov oceniti ali je projekt tehnično izvedljiv in ekonomsko opravičen. Tako imenovani spletni kalkulator smo razvili v sklopu projekta CE-HEAT financiranem iz programa Interreg Centralna Evropa. Kalkulator omogoča enostaven pregled aktualnih tehnologij in na osnovi računalniško podprtega algoritma oceni osnovne tehnično-ekonomske kazalnike izbranega sistema za izrabo odvečne toplote.

ABSTRACT

Enormous amount of waste heat which is released from industry often contains large amount of exergy, and would be able to perform work through one of the many waste heat usage technologies. Thus it may be of interest for possible investors in energy sector which, however, need quick answer whether their investment is going to be economically efficient or not. A web calculator was, therefore, developed within a frame of CE-HEAT program financed by Interreg Central Europe which can be used to check technical feasibility and economic viability of a selected waste heat recovery technology, based only on basic information on waste heat source and waste heat recovery system.

1. UVOD

Številni industrijski procesi so vir velikih količin odvečne toplote, ki se odreja v okolico s sevanjem, hladilno vodo in zrakom ali z izpušnimi plini. Čeprav to toploto pogosto imenujemo odpadna toplota, pogosto vsebuje veliko eksergije, ki jo je mogoče koristno uporabiti z eno od mnogih tehnologij za izrabo odvečne toplote. Tehnologije za izrabo odvečne toplote lahko razvrstimo v pasivne ali aktivne [1], odvisno od tega ali toploto uporabljamo direktno pri enaki ali nižji temperaturi ali pa jo transformiramo v drugo obliko energije oz. na višji temperaturni nivo. Toplotni prenosniki in hranilniki toplote so preprosti primeri pasivnih naprav, medtem ko so absorpcijski sistemi, mehanske toplotne črpalke in Rankinov krožni proces z organsko delovno snovjo predstavniki aktivnih tehnologij.

Naš cilj je bil razviti kalkulator, ki bo omogočal analizo različnih tehnologij za izrabo odvečne toplote tako s stališča tehnične izvedljivosti kot ekonomske učinkovitosti. Pri tem smo

kot vir odvečne toplote obravnavali tako plinasto (izpušni plini) kot kapljevito (hladilna voda) snov in razvili modele delovanja sistemov z naslednjimi tehnologijami:

- Toplotni prenosnik (HE),
- Mehanska toplotna črpalka (MHP),
- Absorpcijski hladilni sistem (ACS),
- Rankinov cikel z organsko delovno snovjo (ORC).

Vsaka od naštetih tehnologij ima svoje prednosti in slabosti, zato naj da kalkulator hitre odgovore o tem, katera od tehnologij je v konkretnem primeru primerna in kakšni so njeni osnovni tehnično-ekonomski kazalniki.

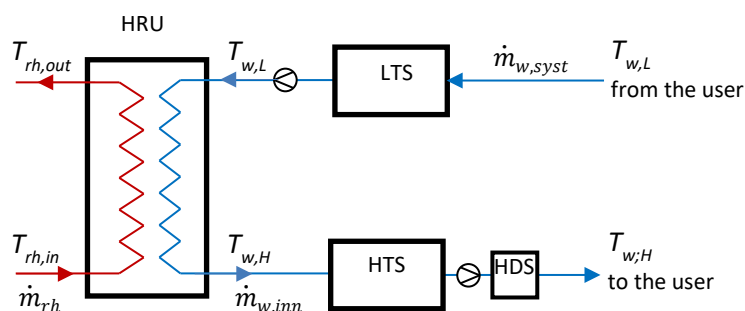
2. OBRAVNAVANI SISTEMI ZA IZRABO ODVEČNE TOPLOTE

Kako uporabiti odvečno toploto je v prvi vrsti odvisno od temperature odvečne toplote in uporabnikovih zahtev in potreb. Zato smo postavili tri sisteme za izrabo odvečne toplote in jih v nadaljevanju na kratko predstavljamo.

2.1 Sistem za oskrbo s toploto

Sistem za oskrbo s toploto prikazuje slika 1. Sestavlja ga centralna enota za izrabo odvečne toplote (HRU), ki lahko izrablja toploto dimnih plinov ali hladilne vode. V HRU se toplota prenese na vodo ogrevalnega sistema. Tako se proizvaja vroča voda, ki polni hranilnik vroče vode (HTS), napaja sistem za oskrbo s toploto, se ohladi pri porabnikih toplote in se vrača v hranilnik hladne vode (LTS). Oba hranilnika HTS in LTS smo uporabili zato, da lahko zagotovimo akumulacijo toplote in njeno porabo tudi v času, ko vir odvečne toplote ni na razpolago. To se lahko zgodi v primeru okvare ali zaradi neusklajenosti urnikov delovanja vira in porabnika toplote. Delovanje sistema za oskrbo s toploto je preprosto. Črpalka poganja vročo vodo temperature $T_{w,H}$ iz hranilnika HTS k porabnikom, kjer se le ta ohladi na $T_{w,L}$ in vrača ter zbira v hranilniku LTS. Po potrebi črpalka požene hladno vodo iz hranilnika LTS skozi centralno enoto (HRU), da se v njej proizvede ustrezna količina vroče vode in napolni hranilnik HTS. Tako sistem za oskrbo s toploto sestavljata dve zanki. V notranji so povezani LTS, HRU in HTS v zunanji pa HTS, uporabniki in LTS. Obe zanki obratujeta samostojno, zunanja glede na urnik dobave toplote, medtem ko se notranja vklaplja glede na potrebe po toploti, upošteva urnik obratovanja vira in velikost obeh hranilnikov HTS in LTS, ki mora biti zelo premišljeno izbrana.

Velikost hranilnikov toplote HTS in LTS je odvisna od delovnih parametrov vira odvečne toplote in sistema za oskrbo s toploto. Le-ti so definirani z značilnimi temperaturami $T_{rh,in}$, $T_{rh,out}$, $T_{w,H}$ in $T_{w,L}$, masnima pretokoma $\dot{m}_{rh}$ in $\dot{m}_{w,syst}$ ter urnikoma razpoložljivosti vira in oskrbe s toploto. Zgradbo urnika delovanja, ki smo ga uporabili v kalkulatorju, prikazuje preglednica I. Sestavlja ga tedenski in dnevni urnik. To pomeni, da lahko uporabnik izbere poljubne dneve v tednu in sestavi dnevni urnik obratovanja iz štirih 6 urnih intervalov. Številčni primer iz preglednice I prikazuje delovanje naprave, ki obratuje od ponedeljka do petka, med šesto uro zjutraj in šesto uro zvečer



Slika 1: Sistem za oskrbo s toploto

Kadar vir toplote in sistem za oskrbo s toploto ne delujeta sinhrono, je potrebno izbrati ustrezno toplotno moč centralne enote HPU in uporabiti hranilnik toplote HTS, ki akumulira toploto, ko le-ta ni potrebna in jo dobavlja, kadar odvečna toplota ni na voljo ali je potreba po toploti višja od trenutne razpoložljivosti toplotnega vira. Tako toplotno moč HPU kot ustrezno velikost HTS izbere ustrezen algoritem vgrajen v kalkulator.

Preglednica I: Urnik delovanja

Tedenski urnik	Ponedeljek	Torek	Sreda	Četrtek	Petek	Sobota	Nedelja
Izbira	1	1	1	1	1	0	0

Dnevni urnik	0 - 6	6 - 12	12 - 18	18 - 24
Izbira	0	1	1	0

Centralno enoto za izrabo odvečne toplote lahko predstavlja toplotni prenosnik ali mehanska toplotna črpalka. Katera od obeh naprav je primernejša, je odvisno od temperature in snovi, ki je vir toplote. Vselej kadar je temperatura vira dovolj visoka, je praviloma uporabljen prenosnik tople, medtem ko se toplotna črpalka uporabi le, kadar je temperatura vira nizka in jo je potrebno dvigniti na višji nivo. Tak je primer uporabe nizkotemperaturne hladilne vode iz hidroelektrarne.

Prenosnik toplote prenaša toploto od vroče tekočine na vročo vodo sistema za oskrbo s toploto (slika 1). Izdelali smo model protitočnega ploščnega prenosnika toplote, s katerim lahko oblikujemo ustrezen prenosnik toplote, ki zagotavlja delovanje s potrebno toplotno močjo pri pogojih definiranih z značilnimi temperaturami na vstopu in izstopu. Uporabili smo t.i. NTU (število prenosnih enot) pristop, s katerim je mogoče z iterativnim postopkom, v katerem opišemo razmere prestopa toplote na strani grelna in grete snovi, napovedati potrebno število plošč prenosnika. Pri tem smo Nu število izračunali s pomočjo korelacij podanih v [2], medtem ko smo toplotno upornost plošč zanemarili. Z modelom ocenimo potrebno število plošč prenosnika in izračunamo efektivno površino prestopa toplote, ki nato služi za oceno nabavne cene prenosnika toplote.

Uporaba prenosnika toplote je smiselna le, kadar je temperatura vira dovolj visoka, sicer je potrebno uporabiti toplotno črpalko. Mehansko gnane toplotne črpalke uporabljamo zelo pogosto, kadar želimo izkoriščati nizko temperaturne vire toplote, kot je na primer hladilna

voda. Za popis delovanja toplotne črpalke smo izdelali njen termodinamični model v programskem okolju Excel in pri tem kot makro uporabili program REFPROP [3] za izračun termodinamičnih stanj v obratovalnih točkah. Izmenjavo toplote na strani toplotnega vira in ponora smo popisali poenostavljeno s temperaturno razliko uščipa [4]. Predpostavili smo, da se pri tem delovna tekočina v kondenzatorju ustrezno temperaturni razliki podhladi. Delovne karakteristike toplotne črpalke smo napovedali upoštevaje konstanten izkoristek kompresorja in elektromotorja ter konstantne temperaturne razlike v prenosnikih toplote. Prestop toplote v kondenzatorju in uparjalniku smo obravnavali poenostavljeno in v obeh primerih uporabili kar konstantne koeficiente prestopa toplote. Uporabili smo protitočne ploščne prenosnike toplote tipa Chevron, ker so cenovno ugodni in se najpogosteje uporabljajo v podobnih aplikacijah. Kadar uporabimo tovrstne prenosnike toplote za kondenzator ali uparjalnik, je skupni koeficient prestopa toplote v mejah 1000 do 2500 W/m²/K [5], efektivno površino prestopa toplote pa določa enačba:

$$A_{HE} = \frac{\dot{Q}}{U\Delta T_{LM}} \quad (1)$$

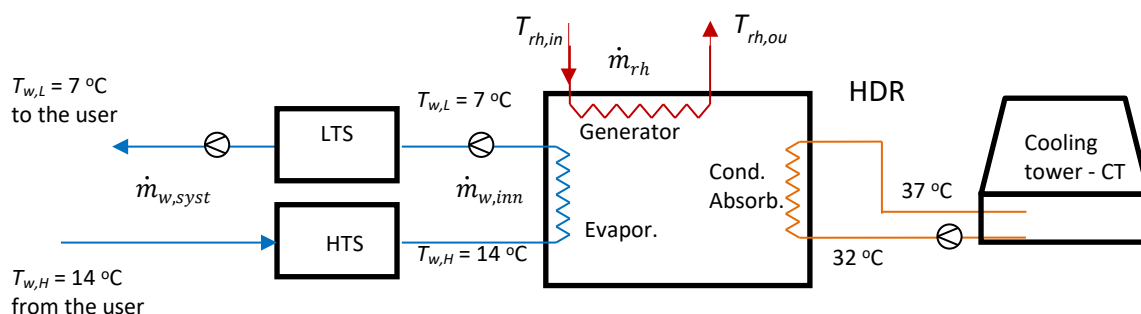
kjer je: A_{HE} - efektivna površina prestopa toplote,
 $\dot{Q}$ - toplotni tok,
 U - skupni koeficient prestopa toplote,
 ΔT_{LM} - srednja logaritemska temperaturna razlika.

Termodinamični model toplotne črpalke nam je omogočil, da smo ocenili delovanje toplotne črpalke pri izbranih obratovalnih pogojih, ki jih določata temperaturi toplotnega vira T_{source} in toplotnega ponora T_{sink} . Tako smo lahko z uporabo večjega niza rezultatov termodinamičnega modela zapisali preprost korelacijski model (interpolacijski polinom), ki nam je omogočil hitre napovedi, t.i. električnega grelnega števila toplotne črpalke (COP_{el}) v širokem območju obeh temperatur, ki ga določata temperaturna intervala $20^{\circ}\text{C} \leq T_{source} \leq 50^{\circ}\text{C}$ in $50^{\circ}\text{C} \leq T_{sink} \leq 90^{\circ}\text{C}$. Kot delovno tekočino smo uporabili R134a, rezultate pa popisali z interpolacijskim polinomom četrtega reda, ki napove rezultate termodinamičnega modela s točnostjo $\pm 0,1\%$. Na enak način smo, prav tako z uporabo korelacijskih funkcij, ocenjevali efektivni površini prestopa toplote kondenzatorja in uparjalnika ter masni pretok delovne tekočine. Ti podatki namreč odločilno vplivajo na nabavno ceno komponent toplotne črpalke. Ker interpolacijski polinomi napovejo specifične veličine, se dejanske veličine izračunajo kar z množenjem s toplotno močjo izbranega sistema za oskrbo s toploto.

2.2 Sistem za oskrbo s hladom

Sistem za oskrbo s hladom je prikazan na sliki 2. Za proizvodnjo hladu uporablja toplotno gnani absorpcijski hladilnik (HDR). Koncept delovanja se ne razlikuje od sistema za oskrbo s toploto, razlika je le nivo in razporeditev temperatur vode, ki kroži v sistemu. Uporaba absorpcijskega hladilnika je smiselna, le kadar je temperatura toplotnega vira dovolj visoka, zato je sistem zasnovan le za izrabo odvečne toplote izpušnih plinov, ki grejejo generator hladilnika. Le-ta proizvaja hladno vodo, ki se v uparjalniku ohladi od $T_{w,H}$ do $T_{w,L}$ in kroži v

sistemu za oskrbo s hladom. Potuje od nizkotemperaturnega hranilnika hladu (LTS) do porabnikov in se ogreta vrača in zbira v hranilniku (HTS). Oba hranilnika LTS in HTS smo uporabili zato, da lahko zagotovimo akumulacijo hladu in njegovo porabo tudi v času, ko izpušni plini za ogrevanje generatorja niso na razpolago. Sistem sestavljata dve zanki. V zunanji potuje hladna voda temperature $T_{w,L}$ iz hranilnika LTS k porabnikom, kjer odda del hladu in se vrača ogreta na $T_{w,H}$ ter zbira v hranilniku HTS. V notranji zanki se proizvaja hlad tako, da črpalka vodo iz hranilnika HTS požene skozi hladilnik (HDR), ohlajena voda pa polni hranilnik LTS. Obe zanki obratujeta samostojno, zunanja glede na urnik dobave hladu, medtem ko se notranja vklaplja glede na potrebe po hladu, upošteva urnik obratovanja vira in velikost obeh hranilnikov LTS in HTS. Toplota, ki jo hladilnik odvzame hladilni vodi in se v uparjalniku prenese na hladilno tekočino, da le-ta upari, se mora odvesti v okolico. Zato se pare hladilne tekočine s t.i. »absorpcijsko kompresijo« v absorberju stiskajo na višji tlak, da lahko teče odvod toplote v kondenzatorju pri temperaturi višji od okoliške. Hlajenje absorberja in kondenzatorja tako lahko poteka s hladilno vodo, ki jo pripravljamo v hladilnem stolpu.



Slika 2: Sistem za oskrbo s hladom

V sistem za oskrbo s hladom smo vgradili absorpcijski hladilnik voda-litijev bromid, ki je zelo pogosto uporabljen v večjih sistemih za klimatiziranje prostorov. Pri tem je hladilna tekočina voda, medtem ko je raztopina litijevega bromida v vodi uporabljena kot absorbent. Ker je hladilna tekočina voda in hladilni sistem ne more dosegati temperatur pod lediščem, sta obe temperaturi hladne vode v sistemu za oskrbo s hladom izbrani in konstantni $T_{w,L} = 7^{\circ}\text{C}$ in $T_{w,H} = 14^{\circ}\text{C}$.

Da bi dosegli ustrezen kompromis med kompleksnostjo absorpcijskega hladilnika in njegovo energetsko učinkovitostjo (EER), smo izbrali toplotno gnani absorpcijski hladilnik z dvojnimi učinkom. Njegov termodinamični model smo izdelali v programu Excel. Z modelom lahko določimo značilna termodinamična stanja hladilne tekočine, tj. vode in $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ raztopine, tj. absorpcijskega sredstva. Prav tako lahko izračunamo specifično toplotno moč vseh komponent: uparjalnika, kondenzatorjev 1 in 2, absorberja, generatorjev 1 in 2 in obeh regenerativnih prenosnikov toplote. Vhodne podatke modela, ki veljajo za običajne absorpcijske hladilne naprave v sistemih za klimatizacijo, smo izbrali iz [6], dobljene rezultate modela pa shranili za kasnejšo uporabo v spletnem kalkulatorju. Niz shranjenih podatkov so specifične veličine (specifične moči komponent, specifični pretoki,...), ki jih je potrebno le pomnožiti z izbrano hladilno močjo sistema za oskrbo s hladom, da izračunamo dejanske veličine in preko njih osnovne tehnično-ekonomske parametre absorpcijskega hladilnika.

2.3 Sistem za proizvodnjo električne energije

Za proizvodnjo električne energije smo izbrali Rankinov ciklus z organsko delovno snovjo (ORC), ki je v primerjavi z ostalimi tehnologijami najbolj robustna in preverjana tehnologija za izrabo odvečne toplote [7]. ORC sistem je prikazan na sliki 3. Izpušni plini tečejo skozi pregrevalec pare (SH), uparjalnik (EV) in predgrelnik (PH), predajajo toploto delovni tekočini in zapuščajo sistem ohlajeni na 120°C. Pare delovne tekočine visokega tlaka in temperature ekspandirajo v turbini in vstopajo v vodno hlajeni regenerator (VC), kjer se ohladijo in nato kondenzirajo v prigranjenem kondenzatorju. Črpalka stiska kondenzat na višji tlak in ga poganja skozi zgoraj omenjeni sistem prenosnikov toplote, kjer se proizvaja sveža para visokega tlaka in temperature.

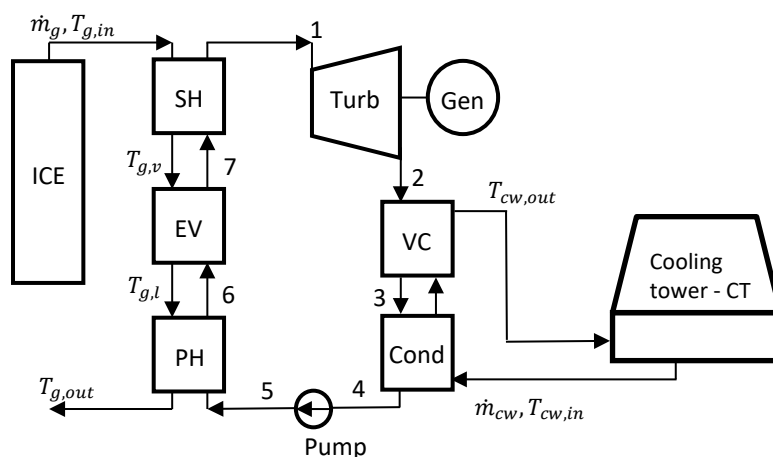


Fig. 3: ORC model

Termodinamični model preprostega ORC sistema smo izdelali v Excelu. Z njim lahko napovemo delovne parametre ORC. V prvem koraku določimo delovne točke 1 do 7, pri čemer stanje sveže pare (p_1 in T_1) in temperaturo kondenzacije predpišemo $T_3 = T_4 = T_c$. Ostale točke izračunamo z uporabo programa REFPROP [3], ki je v Excelu uporabljen kot makro.

Kot delovno snov smo uporabili tri organske tekočine: benzen, R11 in R134a, ki so v literaturi [8] pogosto navedene kot primerna delovna snov za ORC. Izbira najustreznejše med tremi je odvisna od temperature toplotnega vira in presejalnih kriterijev. V našem primeru smo kot presejalni kriterij uporabili specifično ceno ORC sistema (EUR/kW_{el}) in ne termičnega izkoristka. Slednji namreč pogosto zahteva visoka investicijska vlaganja, kar ob tehnični ne prinaša vedno tudi ekonomske učinkovitosti.

V Excelu smo preračunali parametre ORC za vse tri delovne tekočine. Pri tem smo najustreznejše vhodne podatke za vsako od njih (stanje sveže pare in temperatura v kondenzatorju) povzeli po [9]. Najvišji termični izkoristek dosežemo z benzenom, ki pa ima izredno visoko razmerje specifičnih volumnov v_2/v_1 , ki dirigira ceno turbine. Le-to je kar 20 krat večje, kot v primeru, ko je delovna snov R134a, s katero pa smo dosegli najnižji termični izkoristek. Spodnja mejna temperatura dimnih plinov, pri kateri odvečna toplota še lahko poganja ORC je 340°C za benzen in le 135°C, kadar uporabimo R134a.

Ker smo za vsako delovno snov predpisali konstantne vhodne podatke, je bilo potrebno delovne točke in specifične delovne parametre ORC sistema izračunati le enkrat in rezultate shraniti za kasnejšo uporabo v kalkulatorju. Masni pretok delovne snovi pa ni konstanten, ampak je odvisen od toplotne moči vira odvečne toplote in njegove temperature, zato ga je potrebno izračunati vselej, ko zaženemo kalkulator. Pri tem uporabimo naslednji izraz:

$$\dot{m}_{wf} = \frac{\dot{m}_g c_{p,g} (T_{g,in} - T_{g,out})}{h_1 - h_5} \quad (2)$$

kjer je: $T_{g,in}$ - temperatura izpušnih plinov,
 $T_{g,out}$ - končna temperatura ohlajenih izpušnih plinov (120°C),
 $\dot{m}_g$ - masni pretok izpušnih plinov,
 h_1, h_5 - entalpiji delovne snovi v točkah 1 in 5 (slika 3).

Ko je masni pretok delovne snovi znan, zadošča da z njim pomnožimo niz shranjenih specifičnih obratovalnih parametrov ORC in tako ocenimo dejansko moč električnega generatorja in ostale tehnično-ekonomske parametre ORC sistema.

3. ANALIZA EKONOMIČNOSTI

Analizo ekonomičnosti smo izdelali na podlagi primerjave predlaganega sistema za izrabo odvečne toplote z običajnim sistemom za proizvodnjo toplote ali hladu, kot sta na primer kotel na kurilno olje in zemeljski plin ali mehanski hladilni sistem. Pri tem smo med posameznimi tehničnimi rešitvami iskali najboljšo ekonomsko rešitev. Uporabili smo dva kriterija profitabilnosti: enostavno dobo vračanja in neto sedanjo vrednost. Prav tako smo izračunali proizvodno ceno končne energije, ki jo lahko primerjamo s cenami izbrane končne energije na trgu in na ta način ocenimo ekonomičnost sistema.

3.1 Višina investicije

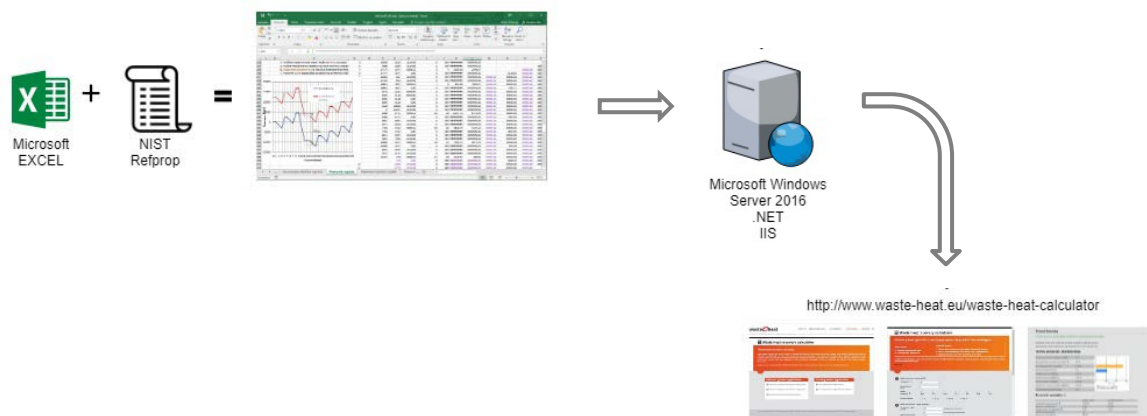
Nabavno ceno posameznih komponent izbranega sistema smo izračunali z uporabo cenovnih funkcij [10]. Pri tem izračunamo nabavno ceno komponente C_y velikosti ali moči X_y na podlagi poznane nabavne cene referenčne komponente C_{ref} velikosti ali moči X_{ref} in poznanega skalirnega eksponenta α . Referenčne vrednosti C_{ref} in X_{ref} ter pripadajoče skalirne eksponente α smo povzeli po [5, 11 in 12]. Ceno cevovodov smo izračunali na podlagi napotkov v [13] in je odvisna od zahtevnosti terena in nazivnega toplotnega toka. Ceno rekonstrukcije obstoječih sistemov za potrebe izkoriščanja odvečne toplote smo ocenili na 10 do 30 % investicije, stroške inženiringa pa na 6 % investicije. Ceno dodatnih prostorov za postavitve sistema smo ocenili z 1.500,00 EUR/m².

4. ZGRADBA KALKULATORJA

Opisani fizikalni modeli so osnova preprostega tehnično-ekonomskega kalkulatorja za analizo sistemov za izrabo odvečne toplote. Računski model narejen v Excelu izračuna osnovne tehnične in ekonomske parametre in predstavlja jedro spletnega kalkulatorja, ki je namenjen za javno uporabo. Spletni uporabnik lahko uporablja lastne podatke o viru odvečne toplote in sam izbere eno od tehnologij za njeno izrabo, preveri primernost izbrane tehnologije in oceni osnovne tehnično-ekonomske parametre izbranega sistema.

4.1 Spletna aplikacija kalkulatorja

Izdelava spletnega kalkulatorja sloni na Microsoftovi .NET tehnologiji in teče na Microsoftovi strežniški storitvi IIS ali Internet Information Server; vse na lokaciji Dravskih elektrarn Maribor (slika 4). Za komunikacijo med spletno storitvijo in Excel rešitvijo ter za izvoz v ustrezno pisno obliko, smo uporabili odprtokodno rešitev v obliki javnih knjižnic. Izdelana spletna storitev kalkulatorja nam služi le kot vmesnik za vnos podatkov (slika 5) in prikaz rezultatov (slika 6).

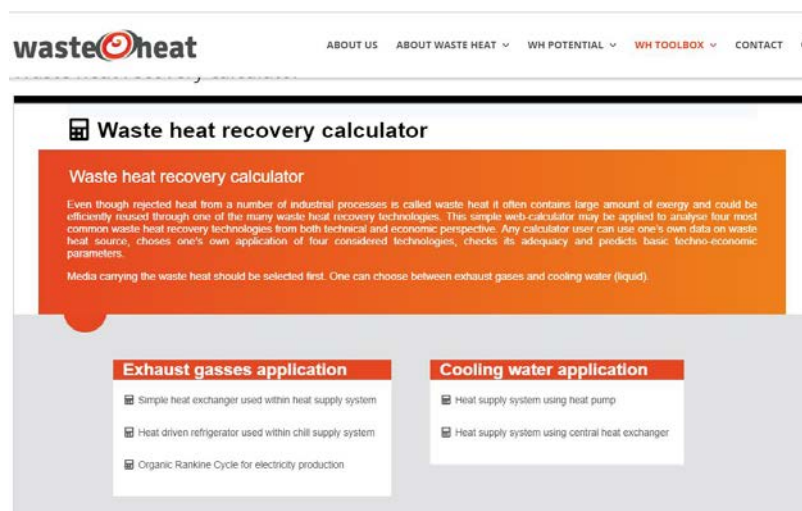


Slika 4: Prenos in obdelava podatkov

4.2 Vhodni podatki

Spletni uporabnik mora vnesti tri skupine podatkov. Podatki o viru odvečne toplote in izbira osnovnih parametrov sistema za njeno izrabo so obvezni, medtem ko so vhodni ekonomski parametri že nastavljeni, a dopuščajo vsakokratne spremembe.

Uporabnik lahko izbira med dvema viroma odvečne toplote; med izpušnimi plini in hladilno vodo (slika 5). Temperatura in masni pretok vira ter njegova razpoložljivost (glej Preglednico I) so potrebni vhodni podatki. Pri tem velja nekaj omejitev, saj je uporaba kalkulatorja omejena na toplotno moč vira med 50 in 5000 kW, in sta najvišji in najnižji pretok odvisna od temperature vira.



Slika 5: Izbira tehnologije [14]

Uporabnik lahko izbere eno od štirih predstavljenih tehnologij. Pri tem mora definirati osnovne tehnične karakteristike, kot je na primer toplotna moč sistema in željen urnik delovanja sistema.

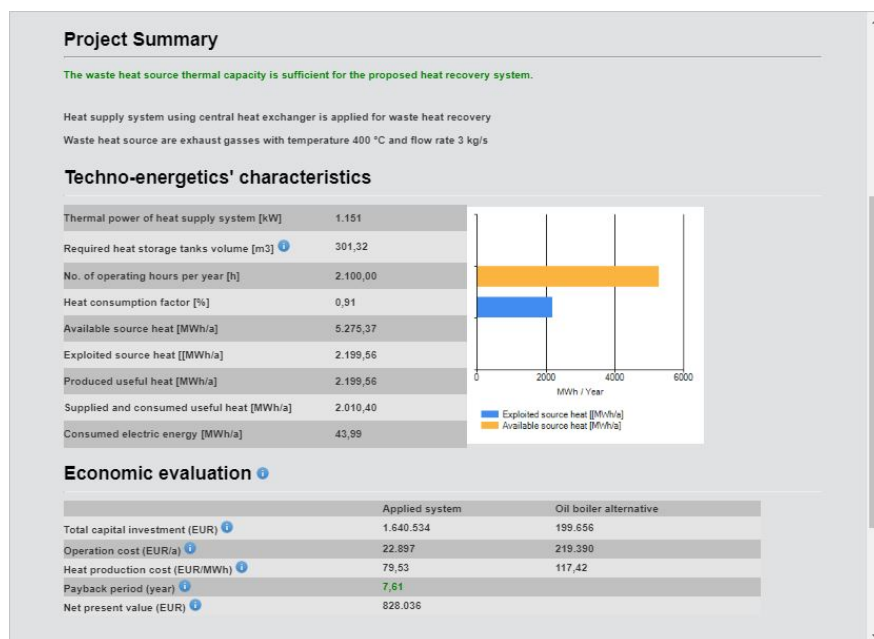
Ekonomski podatki, kot so obrestna mera, življenjska doba, tržna cena električne energije in podobno so že vneseni, a jih lahko uporabnik poljubno spreminja.

4.3 Potek izračuna in izpis rezultatov

Izračun se izvaja v več zaporednih korakih. V prvem se preveri primernost vira odvečne toplote in v primeru, da vir za izbrano aplikacijo ne zadošča, je uporabnik pozvan k spremembi izbranih tehničnih karakteristik, tj. toplotne moči ali urnika obratovanja.

V drugem koraku se preveri sočasnost razpoložljivosti vira in delovanja sistema. Kadar delovanje obeh ni sinhrono, je potrebno uporabiti hranilnike toplote/hladu, katerih velikost se oceni z ustreznim algoritmom. Pri visoki asinhronosti delovanja so za njeno premostitev potrebni veliki in dragi hranilniki. V tem primeru je uporabnik opozorjen in lahko poizkusi bolje sinhronizirati delovanje obeh sistemov.

V zadnjem koraku se izračunajo in izpišejo tehnično-ekonomski kazalniki (slika 6). Termotehnični rezultati med drugim obsegajo podatke o moči sistema (toplotni, hladilni ali električni), letno izkoriščeni količini odvečne toplote in letno proizvedeni končni energiji. Ekonomski rezultati obsegajo podatke o višini investicije, letnih stroških obratovanja, proizvodni ceni končne energije, neto sedanji vrednosti in dobi vračanja, tržni ceni končne energije in podobno.



Slika 6: Prikaz rezultatov [14]

5. SKLEP

Predstavili smo spletni kalkulator, ki ga lahko uporabimo za napoved tehnične izvedljivosti in ekonomske učinkovitosti izbranega sistema za izrabo odvečne toplote. Spletni uporabnik lahko izbira med štirimi tehnologijami: prenosnik toplote, mehanska toplotna črpalka, absorpcijski hladilnik in Rankinov cikel z organsko delovno snovjo, ki omogočajo izrabo odvečne toplote dimnih plinov ali hladilne vode. Na podlagi osnovnih podatkov o viru in uporabljeni tehnologiji spletni kalkulator napove osnovne tehnične parametre in ekonomske kazalnike izbranega sistema za izrabo odvečne toplote. Pri tem lahko spletni uporabnik uporablja lastne podatke o viru odvečne toplote, izbira med različnimi tehnologijami za njeno izrabo ter preveri tehnično primernost in ekonomsko učinkovitost izbrane tehnologije.

6. VIRI

- [1] Brueckner, S., Liu, S., Miro, L., Radspieler, M., Cabeza L.F., Laevemann, E. Industrial waste heat recovery technologies: An economic analysis of heat transformation technologies. *Applied Energy*, 151 (2015), 157-167.
- [2] Kakac, S., Hongtan, L., Pramuanjaroenkij, A. Heat exchangers design, selection, rating and thermal design, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012.
- [3] REFPROP software, developed by the National Institute of Standards and Technology.
- [4] Nellis, G., Klein, S. Heat Transfer. Cambridge University Press, 2009.

- [5] Henchoz, S., Weber, C., Mareshal, F., Favrat, D. Performance and profitability perspectives of a CO₂ based district energy network in Geneva's City Centre. *Energy*, 85 (2015), 221-235.
- [6] Liu, Y.L., Wang, R.Z., Performance prediction of a solar/gas driving double effect LiBr-H₂O absorption system; *Renewable Energy*, 29 (2004), 1677-1695.
- [7] DiPippo, R. Second Law assessment of binary plants generating power from low-temperature geothermal fluids. *Geothermics*, 33 (2004), 65–86.
- [8] Saleh, B., Koglbauer, G., Wendland, M., Fischer, J., Working fluids for low temperature organic Rankine cycles. *Energy*, 32 (2007), 1210–21.
- [9] Vaja, I., Gambarotta, A., Internal combustion engine (ICE) bottoming with organic rankine cycles (ORCs), *Energy*, 35 (2010), 1084-1093.
- [10] Bejan, A., Tsatsaronis, G., Moran, M. *Thermal Design & Optimization*. first ed. John Wiley & Sons, 1996, New York.
- [11] Ommen, T., Jensen, J.K., Markussen, W.B., Reinholdt, L., Elmegaard, B., Technical and economic working domains of industrial heat pumps Part 1: Single stage vapour compression heat pumps. *Int. J. Refrigeration*, 55 (2015), 168-182.
- [12] Quoilin, S., Declaye, S., Tchanche, B.F., Lemort, V., Thermo-economic optimisation of waste heat recovery Organic Rankine Cycle, *Applied Thermal Engineering*, 31 (2011), 2885-2893.
- [13] Leitfaden zur Abwaermenutzung in Kommunen. Bayerisches Landesamt fuer Ummwelt (LfU), Report, (2008).
- [14] <http://www.waste-heat.eu/waste-heat-toolbox/investment-decision-support/waste-heat-recovery-calculator>.

NASLOV AVTORJEV

Prof. dr. Aleš Hribernik

Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo
Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija

Tel: + 386 2 220 77 31

Elektronska pošta: ales.hribernik@um.si

dr. Boštjan Gregorc, univ. dipl. inž. str.

Samo Fekonja, mag. ekonomije

Dravske elektrarne Maribor,
Obrežna ulica 170, 2000 Maribor, Slovenija

WEB CALCULATOR FOR WASTE HEAT RECOVERY SYSTEM ANALYSIS

Aleš HRIBERNIK, Samo FEKONJA, Boštjan GREGORC

POVZETEK

Odvečna toplota iz številnih industrijskih procesov pogosto vsebuje veliko eksergije, ki jo je mogoče koristno uporabiti z eno od mnogih tehnologij za izrabo le-te. Za zgodnjo predinvesticijsko fazo smo za investitorje izdelali preprosto spletno orodje, ki omogoča na podlagi najosnovnejših podatkov oceniti ali je projekt tehnično izvedljiv in ekonomsko opravičen. Tako imenovani spletni kalkulator smo razvili v sklopu projekta CE-HEAT financiranem iz programa Interreg Centralna Evropa. Kalkulator omogoča enostaven pregled aktualnih tehnologij in na osnovi računalniško podprtega algoritma oceni osnovne tehnično-ekonomske kazalnike izbranega sistema za izrabo odvečne toplote.

ABSTRACT

The enormous amount of waste heat which is released from industry often contains a large amount of exergy, and would be able to perform work through one of the many waste heat usage technologies. Thus, it may be of interest for possible investors in the Energy sector which, however, would need a quick answer as to whether their investment is going to be economically efficient or not. A web calculator was, therefore, developed within the frame of the CE-HEAT Programme, financed by Interreg, Central Europe, which can be used to check the technical feasibility and economic viability of a selected waste heat recovery technology, based only on basic information on the waste heat source and waste heat recovery system.

1. INTRODUCTION

Industry produces an enormous amount of waste heat, which is released either via radiation, cooling fluid, exhaust gas or air. But, even though these heat streams are considered waste, they often contain large amounts of exergy, and would be able to perform work through one of the many waste heat usage technologies. Technologies to use waste heat from industry can be categorised as passive or active technologies [1]. This depends on whether the heat is being used directly at the same or at a lower temperature level, or whether it is transformed to another form of energy or to a higher temperature. Heat exchangers and thermal energy storages are the two dominant passive technologies. Sorption systems, mechanically driven heat pumps and Organic Rankine Cycles (ORC) are active technologies.

Our goal was to develop a calculator which can be applied to analyse different rejected heat recovery technologies from both technical and economic perspectives. Both hot liquid and hot gas were considered as a possible heat source and four technologies were applied:

- Heat exchanger (HE),
- Mechanically driven Heat Pump (MHP),
- Absorption (heat driven) Cooling System (ACS),
- Organic Rankine Cycle (ORC) for electricity production.

Each of the four mentioned technologies has its own advantages and limitations, and the idea of the developed calculator is to give quick answers on whether the chosen technology could be applied efficiently, and which are its basic techno-economic parameters.

2. PROPOSED WASTE HEAT RECOVERY SYSTEMS

How to apply waste heat depends first of all on the waste heat source temperature and user needs. Three different waste heat recovery systems were considered and are presented briefly.

2.1 Heat supply system

Fig. 1 shows a heat supply system using a central Heat Recovery Unit (HRU) schematically. It is assumed that the rejected heat, in the form of exhaust gasses or hot cooling water, enters the Heat Recovery Unit where hot water is produced. The produced hot water circulates within the heat supply system between the High temperature heat Storage tank (HTS), the heat user and the Low temperature heat Storage Tank (LTS). HTS and LTS are applied in order to make heat accumulation, which can be used when the rejected heat is not available, because of any possible difference in operational (schedules) timetables of the rejected heat supplying device and the heat supply system. Hot water from HTS at $T_{w,H}$ is pumped to the user, and is then returned to the LTS at $T_{w,L}$, where it is collected and pumped through the heat recovery unit when necessary. Thus, there are two hot water loops. The inner loop comprises LTS, HRU and HTS, and the outer loop consists of HTS, heat user and LTS. Each loop operates individually according to its operating schedule and the accumulation capacity of both heat storage tanks, which has to be predicted correctly.

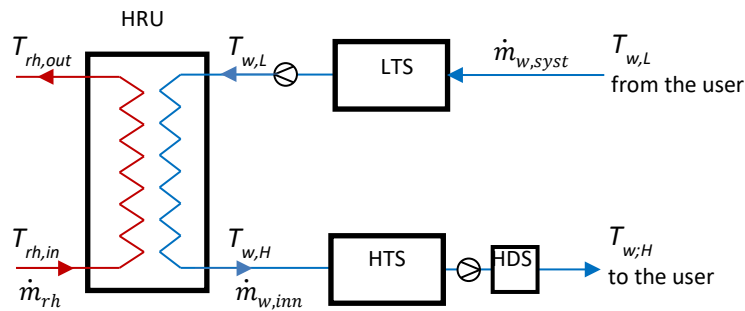


Fig. 1: Heat supply system

Heat storage capacity depends on the rejected heat source and heat supply system operating parameters. These are defined by the characteristic temperatures $T_{rh,in}$, $T_{rh,out}$, $T_{w,H}$ and $T_{w,L}$, mass flow rates $\dot{m}_{rh}$ and $\dot{m}_{w,syst}$ and operational time schedules. Table I shows an example of

a possible operational time schedule which is used in the calculator. It consists of a week and day schedules. It means that any day in the week could be selected as an operating day, with the selected day operating schedule having four possible time intervals. The example shown in Table I corresponds to the device which is operating from Monday till Friday from 6 a.m. till 6 p.m.

Table I: Operational time schedule

Week schedule	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday
Select	1	1	1	1	1	0	0

Day schedule	0 - 6	6 - 12	12 - 18	18 - 24
Select	0	1	1	0

No. of operating hours per week - $t_{i,week}$	60
--	----

Whenever the rejected heat supply source and heat supply system operate asynchronously, the thermal power of the Heat Recovery Unit has to be adjusted, and heat storage tanks have to be applied in order to accumulate the heat when it is not needed and use it when the rejected heat source is not available, or its heat flow rate is too low.

A heat exchanger or mechanically driven Heat Pump can be applied within the rejected Heat Recovery Unit. Which one suits better depends on the source temperature and media. Whenever the source temperature is high enough the heat exchanger is applied, while the Heat Pump is used only when the rejected heat temperature is low, like, for example, low temperature cooling water, and it has to be raised to the higher level.

The heat exchanger transfers the heat from hot liquid or gases to the hot water of the heat supply system (Fig. 1). A model of a plate heat exchanger was developed in order to design an appropriate heat exchanger which is capable of operating with the desired heat flow rate under selected conditions defined with rejected hot medium and water inflow and outflow temperatures, respectively. The Number of Transfer Units (NTU) approach was applied, which allows the number of plates to be computed iteratively, based on the heat transfer conditions at both sides of individual plates. Commonly used correlations for Nu number prediction [2] were applied in the model for heat transfer coefficients' calculation, while plates' thermal resistance was simply neglected. The model estimates the number of plates, and predicts the effective heat transfer area of the heat exchanger, which is then used to predict the cost of the heat exchanger.

Application of a simple heat exchanger is reasonable when the rejected heat temperature is moderate to high, otherwise the Heat Pumps should be used. Heat Pumps which can increase the heat temperature are commonly applied, to harvest low temperature rejected heat in the form of warm cooling water and similar. The Heat Pump model was built in two steps. In the first step, a zero dimensional thermodynamic model of a mechanical Heat Pump was developed in Excel using REFPROP software [3], as an Add-in to predict thermodynamic states of the refrigerant. Pinch point temperature difference was used to model heat exchange with both sink and source media [4]. In the condenser, the working fluid was assumed sub-cooled until it reached the pinch temperature difference at the sink entrance. The performance of the Heat

Pump was calculated using constant efficiencies for the compressor and electric motor, as well as fixed temperature differences in the heat exchangers. Heat exchange processes taking place in the condenser and evaporator were simplified, and constant overall heat exchange coefficients were applied for both components. Chevron type plate counter flow heat exchangers were considered, as they appear to be cost efficient and are, typically, used in such systems today. The overall heat transfer coefficient may be assumed at 1000 to 2500 W/m²/K for this type of heat exchanger for both evaporator and condenser [5], and their heat transfer area may be estimated using the following equation:

$$A_{HE} = \frac{\dot{Q}}{U\Delta T_{LM}} \quad (1)$$

where: A_{HE} - effective heat transfer area,
 $\dot{Q}$ - heat flow rate,
 U - overall heat transfer coefficient,
 ΔT_{LM} - logarithmic mean temperature difference.

By application of a thermodynamic model of a mechanically driven Heat Pump, it was possible to predict Heat Pump operation under any selected conditions which are defined by source and sink temperature, respectively. Thus, it was possible for the calculator purposes only, to build a simple correlation model fitted to the results obtained by the thermodynamic model. The idea was to use the thermodynamic model, and calculate the so- called Electrical Coefficient of Performance (COP_{el}) of the mechanical Heat Pump for any combination of T_{source} and T_{sink} within the intervals: $20^{\circ}\text{C} \leq T_{source} \leq 50^{\circ}\text{C}$ and $50^{\circ}\text{C} \leq T_{sink} \leq 90^{\circ}\text{C}$, and then fit the results using a polynomial. R134a was used as a working fluid, and the results were fitted by a fourth order polynomial, which reproduces the results of thermodynamic models by $\pm 0.1\%$ accuracy. Similarly, correlations were applied for estimation of the effective heat transfer area of the condenser and evaporator, and working fluid volume flow rate at the compressor entrance, which are necessary for purchase price estimation of individual Heat Pump parts. All three correlations predict specific quantities. Thus, any actual quantity is simply acquired by multiplying a specific one with the selected thermal power of the heat supply system.

2.2 Chill supply system

Figure 2 shows schematically a chill supply system using a heat driven refrigerator. Its operation is similar to the heat supply system, except for the circulating water temperature level and temperatures` distribution. Application of a heat driven refrigerator is reasonable when the rejected heat temperature is moderate to high, thus, the considered rejected heat sources are the high temperature exhaust gases which heat the generator of the refrigerator. The refrigerator produces cold water, which is cooled in the evaporator from $T_{w,H}$ to $T_{w,L}$, and circulates within the chill supply system between the low temperature chill storage tank (LTS), chill user, and the high temperature chill storage tank (HTS). LTS and HTS are applied in order to make chill accumulation which can be used when the rejected heat is not available, because of any possible

difference in operational (schedules) timetables of a rejected heat supplying device and chill supply system. Cold water from the LTS at $T_{w,L}$ is pumped to the user, and is then returned to the HTS at $T_{w,H}$, where it is collected and pumped through the refrigerator when necessary. Thus, there are two cold water loops. The inner loop comprises HTS, refrigerator and LTS, and the outer loop consists of LTS, chill user and HTS. Each loop operates individually according to its operating schedule and the accumulation capacity of both chill storage tanks, which has to be predicted correctly. Heat extracted from the cooling water of the chill supply system is transferred to the refrigerant within the evaporator, and needs to be rejected to the surroundings. Thus, the refrigerant vapour is compressed to the higher pressure level using the "absorption compression", in order for the condensation of refrigerant to take place at the elevated temperature, which allows the heat release to the surroundings. This process takes place within the condenser and absorber of the heat driven refrigerator, which are cooled by cooling air or cooling water. The latter is supplied by the cooling tower, where the final heat transfer to the surroundings takes place.

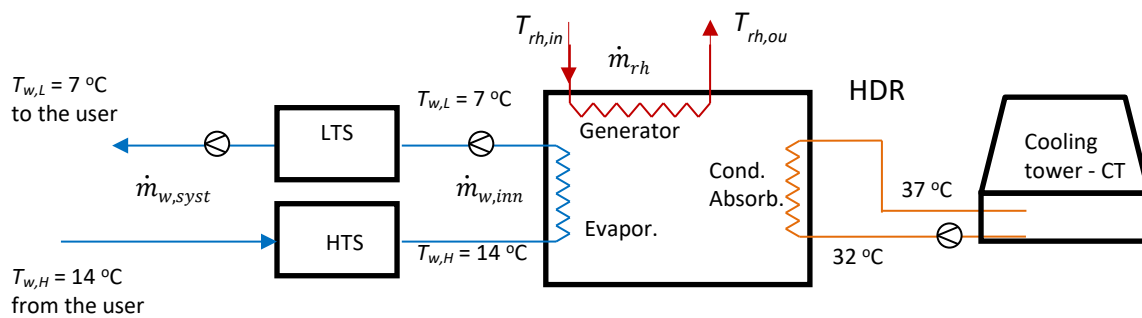


Fig. 2: Chill supply system

Vapour absorption refrigeration systems using a water-lithium bromide pair are used extensively in large capacity air-conditioning systems like the one presented in Fig. 2. In these systems, water is used as refrigerant, and a solution of lithium bromide in water is used as an absorbent. Since water is used as the refrigerant, using these systems, it is not possible to provide refrigeration at sub-zero temperatures. Thus, chilled water temperatures are set to $T_{w,L} = 7^\circ\text{C}$ and $T_{w,H} = 14^\circ\text{C}$.

A double-effect system, which is a good compromise between system complexity and increased Energy Efficiency Ratio (*EER*), was applied as the heat driven refrigerator in this study. A computational model of a double-effect absorption refrigeration system $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ was built in Excel. It was used to predict the thermodynamic states of the refrigerant (water) and the $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ solution and thermal power of all the components: Evaporator, condensers 1 and 2, absorber, generators 1 and 2, and two regeneration heat exchangers. The results obtained with the input data, characteristic for commonly used air-conditioning systems driven by an absorption refrigerator [6], were saved, and used within the rejected heat calculator. A set of saved data consists of specific values, which need to be multiplied by the selected chill power to estimate their actual values and to predict basic techno-economic parameters of the absorption refrigerator.

2.3 Electricity generation system

Organic Rankine Cycles (ORC), which is the most mature and tested technology when compared to other technologies [7], was considered for electricity generation. The system layout is presented in Fig. 3. Exhaust gases flow through the Super-Heater (SH), Evaporator (EV) and Preheater (PH), and reject their heat to the working fluid before being released to the atmosphere at approximately 120°C. High pressure working fluid vapour expands in the turbine, and then enters the regenerator, where the exhausted vapour rejects heat to the Vapour Cooler (VC) integrated within the water cooled condenser, where it finally condenses to the liquid phase. The condensate is then pumped super working pressure and fed to the system of heat exchangers to produce fresh high pressure superheated vapour.

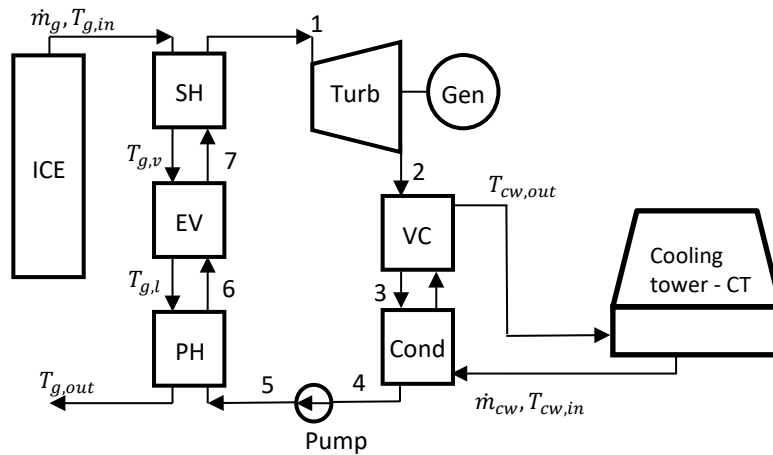


Fig. 3: ORC model

A simple ORC thermodynamic model written in Excel was developed to determine the main system operational parameters. ORC operational points 1 through 7 (Fig. 3) are first calculated, where the fresh vapour thermodynamic state (p_1 and T_1) and condensation temperature $T_3 = T_4 = T_c$ are set as input data. Using the REFPROP database [3] as an Excel Add-in, it was possible to find all other thermodynamic states of ORC.

The organic fluids considered were benzene, R11 and R134a. They are commonly quoted in literature as possible fluids for ORCs [8]. The choice of working fluid depends on the temperature range of the heat source and the screening criteria. The screening criterion used was the specific cost of the ORC system (EUR/kW_{el}) and not the system's efficiency, which may demand too high an investment cost and deteriorate its economic viability.

An ORC model written in Excel was solved for all three working fluids with the fresh vapour and condenser parameters adopted from [9]. The highest thermal efficiency was obtained when benzene was used as the working fluid. However, the specific volume ratio v_2/v_1 , which dictates turbine cost, was very high too. It was almost 20 times higher than that of R134a, which has, on the other hand, the lowest thermal efficiency. The lower source temperature limit ($T_{g,in,min}$) when using benzene is 340°C, and only 135°C when R134a is used.

Since the fresh vapour and condenser parameters for each working fluid were set constant, the resulted ORC working points and specific operational parameters were calculated only once, and saved to be applied later within the waste heat calculator. On the other hand, the working fluid mass flow rate depends on the rejected heat source flow rate and temperature, and needs to be calculated every time the calculator is run. The following equation was used:

$$\dot{m}_{wf} = \frac{\dot{m}_g c_{p,g} (T_{g,in} - T_{g,out})}{h_1 - h_5} \quad (2)$$

where: $T_{g,in}$ - the temperature of the exhaust gases,
 $T_{g,out}$ - the final temperature of the cooled exhaust gases (120 °C),
 $\dot{m}_g$ - mass flow rate of the exhaust gases,
 h_1, h_5 - enthalpies of the working fluid in states 1 and 5, respectively.

Once the working fluid flow rate is known, it is multiplied by a set of saved specific values in order to estimate the actual generator power and other techno-economic parameters of ORC.

3. ECONOMIC EVALUATION

The economic evaluation of any waste heat recovery system is based on the comparison of the system with standard heat or chill production facilities, such as natural gas or an oil boiler system for heat production, and a mechanically driven refrigeration system for chill production. When comparing technical solutions, the best available economic solution is preferred. Two different profitability criteria were used for the analysis, the (simple) payback period (*PBP*) and the Net Present Value (*NPV*), as well as, final energy (heat, chill or electricity) production cost was calculated and compared to its market price.

3.1 Investment required

Cost functions were used to estimate the purchasing cost of individual components of any system considered. The cost functions were applied as proposed by Bejan et al. [10], where the purchase cost of an equipment item C_y at a size or capacity X_y can be calculated based on knowledge of the reference cost C_{ref} at a different reference size, or capacity X_{ref} by use of a scaling exponent α . The reference values C_{ref} and X_{ref} and scaling exponent α used, where adopted from [5, 11 and 12]. The cost of the pipeline system was calculated by the model proposed by LfU [13], and depends on the transferred energy flow rate. Any original system adaptation costs necessary to recover rejected heat were estimated between 10 to 30% of the system costs. The cost of engineering accounted for 6% of the total installed cost. The additional space cost was assumed to be 1,500.00 EUR/m².

4. WASTE HEAT RECOVERY CALCULATOR LAYOUT

The presented physical models were used to build a simple techno-economic calculator for waste heat recovery system analyses. A computational model made in Excel predicts basic technical, as well as economic, parameters, and represents the core of a web calculator which is applicable for the broader public. Any calculator user can use one's own data on waste heat source, choose one's own application of four considered technologies, checks its adequacy and predicts the basic techno-economic parameters.

4.1 Calculator web application

Calculator web application was supported by Microsoft .NET technology and run on a server located at Dravske Elektrarne Maribor d.o.o., using a Microsoft Internet Information Server (IIS) service (Fig. 4). Open code public library solution was applied for communication between the web service and the Excel core solution. The developed web service solution was applied only as an interface for entering input data (Fig 5) and results` presentation (Fig 6).

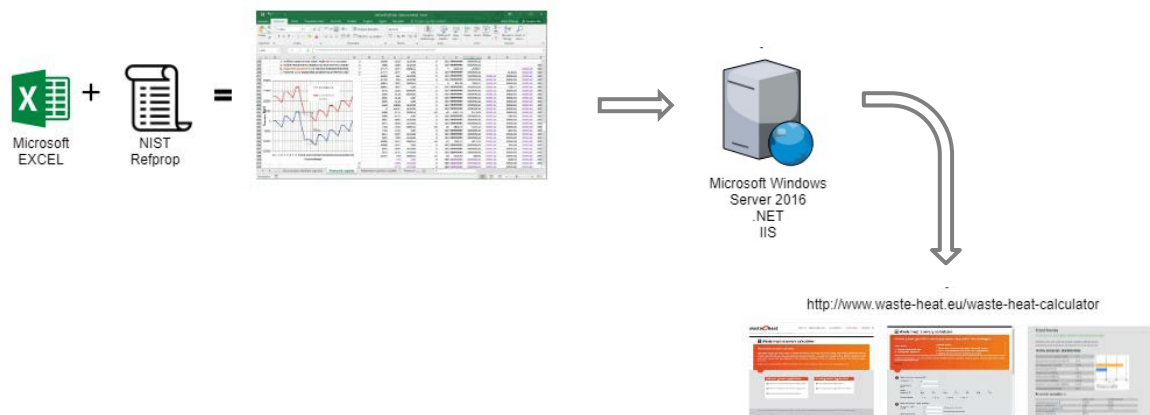


Fig. 4: Data transfer and processing

4.2 Input data

There are three sets of input data which have to be specified. Source (waste heat) data and recovery system input data are mandatory, while the economic input data are pre-set and may be changed when needed.

In general, two different waste heat sources are considered: Cooling water and exhaust gases (Fig. 5). Source temperature and mass flow rate, together with source availability (see Table I), are necessary input data. Some limitations apply. Correlations used in the calculator are, in general, valid within the source thermal power range between 50 and 5000 kW, thus min. and max. mass flow rate limits are source temperature dependent.

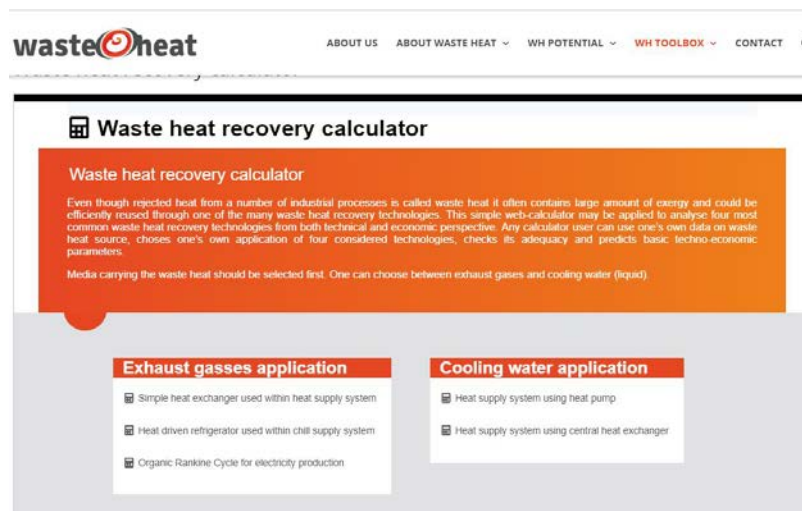


Fig. 5: Technology selection [14]

A calculator user has to select one of four considered technologies for waste heat recovery (Fig. 5) and define its basic parameters and operational time schedule. The basic parameters depend on the applied technology.

Economic input data, such as interest rate, system lifespan, electricity price, etc. are pre-set and can be changed easily.

4.3 Computation procedure and results

Several computational steps take place when the calculator is run. The adequacy of the source is checked in the first step. If the source heat is not sufficient, the calculator user is warned and asked to change the system settings. The selected system power or operational time schedule can be changed, and the programme is run again.

In the second step, the mode of operation is checked. If an asynchronous mode takes place, the required heat/chill storage capacity is determined, and the heat/chill storage tank's volume is calculated. If the operation of both systems (source and waste heat recovery) is highly asynchronous, the heat storage tanks have to be large (and expensive) to over-bridge it, which may increase heat/chill production cost significantly. In this case, the calculator user is encouraged to synchronise the operation of both systems better.

Techno/economic parameters are calculated and displayed in the final step (Fig. 6). Thermo-technical results include applied heat/chill/electricity plant power, annually used available rejected heat and annually produced useful energy. Economic results are represented by the estimated capital investment, annual expenses for the fuel/electricity and maintenance, useful energy production cost, net present value, and payback period of the system regarding its alternatives, like oil boiler and mechanical refrigerator, respectively, or market price.

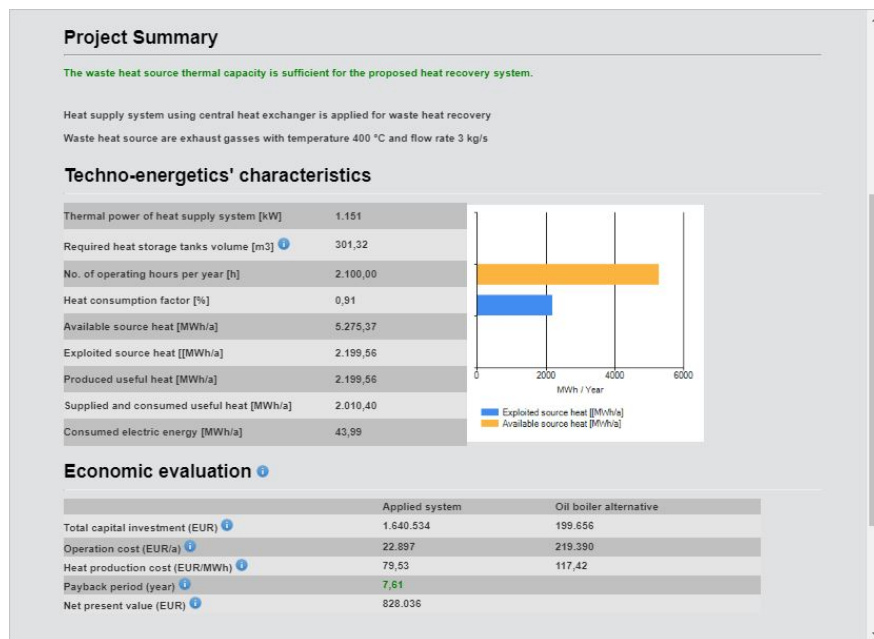


Fig. 6: Results presentation [14]

5. CONCLUSIONS

A web calculator was presented which can be used to check the technical feasibility and economic viability of a selected waste heat recovery technology. The user can select between four technologies: A heat exchanger, mechanical Heat Pump, absorption refrigerator and Organic Rankine Cycle, which can be applied to recover heat from cooling water or exhaust gasses. Based only on basic information on the waste heat source and waste heat recovery system, the calculator predicts basic technical, as well as economic, parameters of the proposed waste heat recovery system. Any web calculator user can use their own data on waste heat source, choose the waste heat recovery technology, and check its physical adequacy and economic viability.

6. LITERATURE

- [1] Brueckner, S., Liu, S., Miro, L., Radspieler, M., Cabeza L.F., Laevemann, E. Industrial waste heat recovery technologies: An economic analysis of heat transformation technologies. *Applied Energy*, 151 (2015), 157-167.
- [2] Kakac, S., Hongtan, L., Pramuanjaroenkij, A. Heat exchangers design, selection, rating and thermal design, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012.
- [3] REFPROP software, developed by the National Institute of Standards and Technology.
- [4] Nellis, G., Klein, S. Heat Transfer. Cambridge University Press, 2009.

- [5] Henchoz, S., Weber, C., Mareshal, F., Favrat, D. Performance and profitability perspectives of a CO₂ based district energy network in Geneva's City Centre. *Energy*, 85 (2015), 221-235.
- [6] Liu, Y.L., Wang, R.Z., Performance prediction of a solar/gas driving double effect LiBr-H₂O absorption system; *Renewable Energy*, 29 (2004), 1677-1695.
- [7] DiPippo, R. Second Law assessment of binary plants generating power from low-temperature geothermal fluids. *Geothermics*, 33 (2004), 65–86.
- [8] Saleh, B., Koglbauer, G., Wendland, M., Fischer, J., Working fluids for low temperature organic Rankine cycles. *Energy*, 32 (2007), 1210–21.
- [9] Vaja, I., Gambarotta, A., Internal combustion engine (ICE) bottoming with organic rankine cycles (ORCs), *Energy*, 35 (2010), 1084-1093.
- [10] Bejan, A., Tsatsaronis, G., Moran, M. *Thermal Design & Optimization*. first ed. John Wiley & Sons, 1996, New York.
- [11] Ommen, T., Jensen, J.K., Markussen, W.B., Reinholdt, L., Elmegaard, B., Technical and economic working domains of industrial heat pumps Part 1: Single stage vapour compression heat pumps. *Int. J. Refrigeration*, 55 (2015), 168-182.
- [12] Quoilin, S., Declaye, S., Tchanche, B.F., Lemort, V., Thermo-economic optimisation of waste heat recovery Organic Rankine Cycle, *Applied Thermal Engineering*, 31 (2011), 2885-2893.
- [13] Leitfaden zur Abwaermenutzung in Kommunen. Bayerisches Landesamt fuer Ummwelt (LfU), Report, (2008).
- [14] <http://www.waste-heat.eu/waste-heat-toolbox/investment-decision-support/waste-heat-recovery-calculator>.

AUTHORS ADDRESSES

Prof. dr. Aleš Hribernik

Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo
Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija

Tel: + 386 2 220 77 31

Elektronska pošta: ales.hribernik@um.si

dr. Boštjan Gregorc, univ. dipl. inž. str.

Samo Fekonja, mag. ekonomije

Dravske elektrarne Maribor,

Obrežna ulica 170, 2000 Maribor, Slovenija

ŽIVI LABORATORIJI PROJEKTA GRASPINNO

Klemen SREDENŠEK, Maršenka MARKSEL, Miralem HADŽISELIMOVIĆ,
Sebastijan SEME

POVZETEK

Prispevek predstavlja metodologijo živega laboratorija in analizo rezultatov živih laboratorijev ustanovljenih v okviru projekta GRASPINNO. Živi laboratoriji projekta GRASPINNO povezujejo raziskovalne in inovacijske procese, ter ustvarjajo uporabniško usmerjen inovativen ekosistem, ki krepi sodelovanje in povezovanje deležnikov ter spodbuja inovacije na trgu zelene energije. V okviru projekta je bilo ustanovljenih več živih laboratorijev, kateri pokrivajo različna področja, kot so mehanizmi financiranja za energetske prenove stavb, elektronsko orodje za zeleno javno naročanje, zelena politika in energetski management. V članku je predstavljena analiza vrednotenja živih laboratorijev, ki temelji na podlagi spletnega vprašalnika. Rezultati vprašalnika, v katerega je bilo vključenih skoraj 100 deležnikov so pokazali, da so deležniki v živih laboratorijih pridobili izkušnje in znanje z različnih področij, vključno z možnostjo ustvarjanja inovativnih rešitev.

LIVING LABORATORIES OF THE PROJECT GRASPINNO

ABSTRACT

This paper deals with the presentation of living lab methodology and analysis of living lab results from the GRASPINNO project. The GRASPINNO living labs integrate research and innovation processes and create a user-oriented open innovation ecosystem that strengthens cooperation and networking of stakeholders, while stimulating innovations on the green energy market. Within the framework of the project, several living lab were established covering various areas, such as funding mechanisms for energy refurbishment of buildings, an electronic tool for green public procurement, green policies and energy management. The paper presents the evaluation analysis of living labs, based on online survey. The results of the survey, which involved almost 100 participants, showed that stakeholders in the living labs gained benefits and knowledge from various fields, including the possibility of creating innovative solutions.

1. UVOD

Živi laboratoriji se uporabljajo že od zgodnjih let 20. stoletja in so dan danes zelo priljubljena strategija za reševanje kompleksnih izzivov. V živih laboratorijih z uporabo metodologije, ki temelji na izmenjavi znanj in soustvarjanju novih inovativnih rešitev sodelujejo deležniki iz različnih področij. Koncept živega laboratorija je uporaben na različnih področjih kot je na primer energetika, urbanizem, gradbeništvo in podobno [1, 2]. V okviru projekta GRASPINNO je bilo ustanovljenih več živih laboratorijev z namenom razvoja novih rešitev in koncepta na področju inovativne energetske prenove stavb in zelenih javnih naročil. Celotena ideja temelji na prenosu znanj pridobljenega v okviru pilotnih aktivnosti projekta (energetska obnova javnih stavb) in z izmenjavo izkušenj z vključevanjem končnih uporabnikov.

Z novo uredbo o zelenem javnem naročanju, ki je bila sprejeta 1.1.2018 je prišlo do sprememb zakonodaje pri prenovi javnih stavb. S tem namenom pa je bil ustanovljen tudi eden od živih laboratorijev, ki je pokrival področje mehanizma financiranja za energetske prenove javnih stavb. Metodologija živih laboratorijev GRASPINNO je sestavljena iz šestih faz: povezovanje, izobraževanje in usposabljanje, izvajanje, nadgradnja, ovrednotenje ter razširjanje. V živih laboratorijih so kot aktivni udeleženci vključeni predvsem javni organi ter mala in srednje velika podjetja. Eksperimentalno učenje je eno od najmočnejših orodij za poučevanje, ki premaga odpornost do klasičnega učenja in hkrati olajša spremembo vedenja. Eksperimentalno učenje vključuje: (1) »refleksivno učno fazo«; (2) fazo učenja pri eksperimentiranju; in (3) fazo učenja, ki izhaja iz povratnih informacij. Te faze so dobro usklajene v samem pristopu živih laboratorijev GRASPINNO. Zamisel je bila predstaviti novo uredbo o zelenih javnih naročilih, v kateri so opisane okoljske zahteve in različna merila. Glavni cilj prispevka je predstaviti rezultate pred in po ustanovitvi živih laboratorijev. Rezultati so bili ovrednoteni na podlagi spletnega vprašalnika, ki je predstavljen v naslednjih poglavjih. Prispevek vsebuje predstavljeno metodologijo, rezultate živih laboratorijev in zaključek.

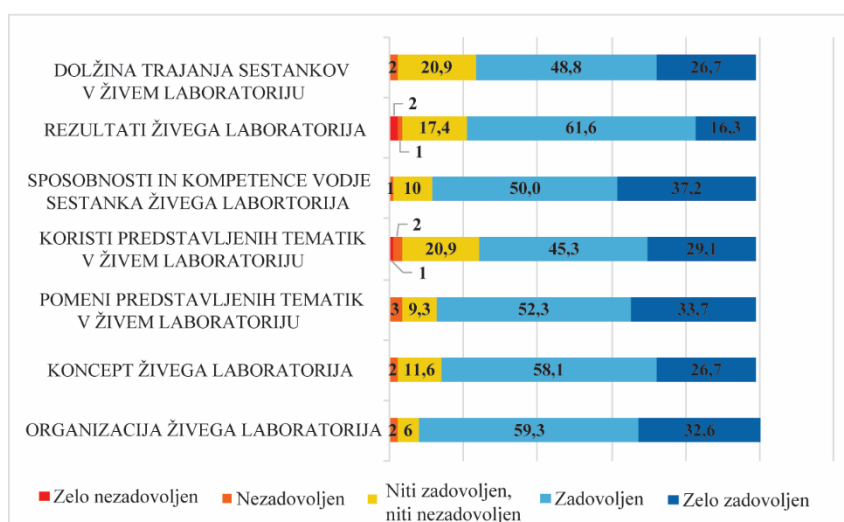
2. ŽIVI LABORATORIJI

Energetska učinkovitost je ena od stroškovno najučinkovitejših ukrepov za doseganje ciljev zmanjšanja emisij toplogrednih plinov in doseganja večjega deleža obnovljivih virov energije pri uporabi bruto končne energije. Zbrani podatki o porabi energije (razsvetljava, ogrevanje, hlajenje in prezračevanje) kažejo, da so javne stavbe ene izmed največjih porabnikov energije in imajo s tem zelo velik vpliv na okolje. Zaradi zmanjšanja emisij toplogrednih plinov in porabe električne energije pa je potrebno takšne stavbe tudi pravilno energetsko obnoviti, pri čemer moramo upoštevati tudi proizvodnjo drugih gradbenih materialov, ki so posledično odgovorini tudi za pomembne vplive na okolje. To se nanaša na surovine, ki za pridobivanje, predelavo in prevoz potrebujejo ogromno energije. V zvezi s tem lahko recikliranje in ponovna uporaba gradbenih materialov in izdelkov ter celotnih gradbenih elementov prispeva k zmanjšanju vplivov na okolje in razvoju krožnega gospodarstva. Vlada Republike Slovenije je na podlagi nacionalne zakonodaje različnih evropskih držav sprejela "dolgoročno strategijo za

spodbujanje energetske prenove stavb". V živih laboratorijih GRASPINNO se je zelo velik poudarek namenil tudi implementaciji in nadgradnji različnih orodij za elektronsko zeleno javno naročanje [3] in smernicam za energetski management, energetsko prenovo javnih stavb, mehanizmom financiranja in podobno. Ocenjevanje je potekalo v letu 2018 s pomočjo spletnih vprašalnikov, v katerih je sodelovalo skoraj 100 udeležencev iz različnih držav.

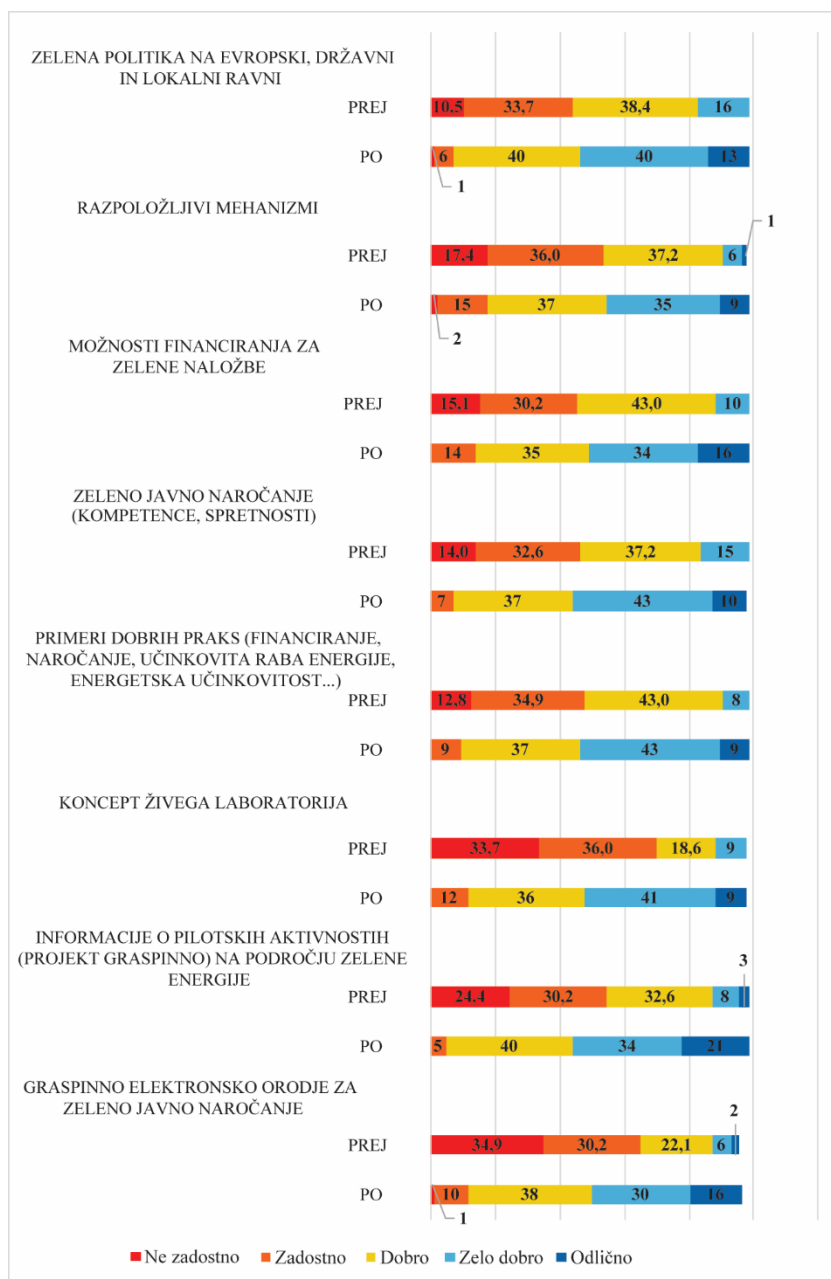
3. REZULTATI

Analiza vrednotenja živih laboratorijev je bila razdeljena na štiri različna področja: (1) stopnja zadovoljstva deležnikov, (2) koristi katere so deležniki pridobili v živih laboratorijih, (3) splošno znanje o zeleni politiki, mehanizmih financiranja, zelenem javnem naročanju in konceptu živega laboratorija, in (4) stopnja znanja o mehanizmih financiranja na področju prenove javnih stavb. Analiza poleg zgoraj naštetih področij, vsebuje tudi nekatera splošna vprašanja, katera bodo opisana na koncu tega poglavja.



Slika 1: Stopnja zadovoljstva deležnikov.

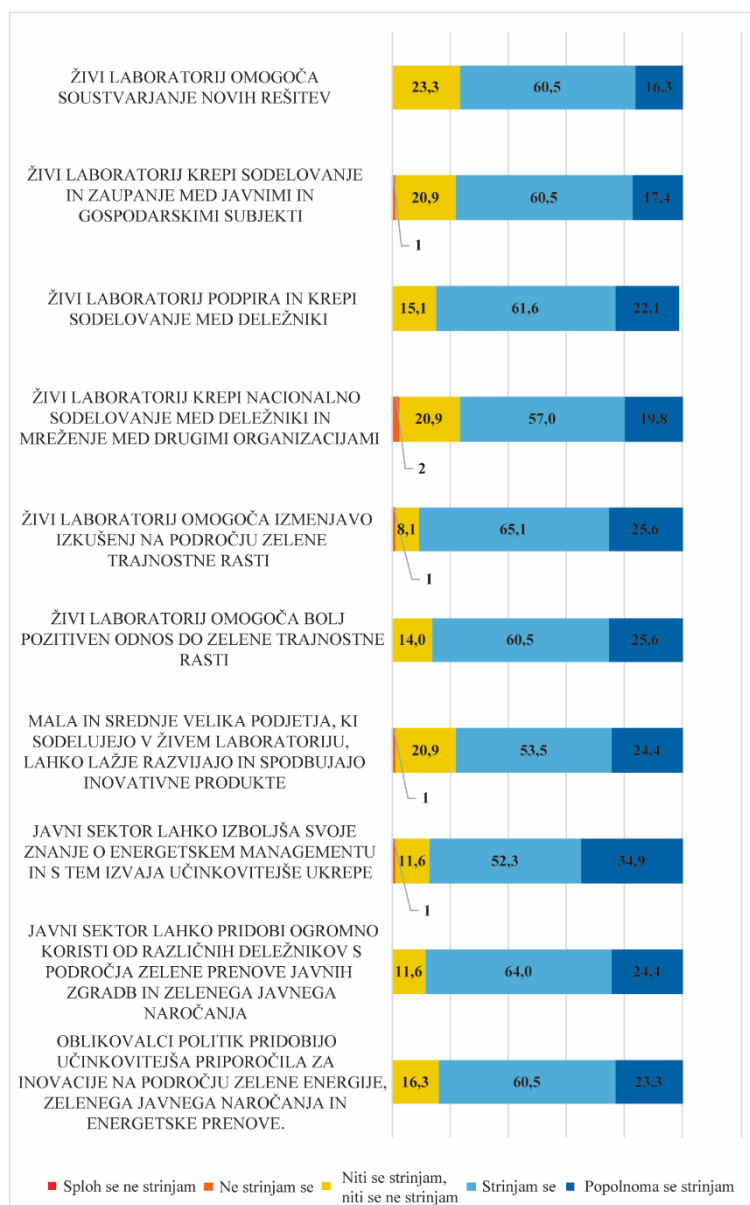
Iz rezultatov na sliki 1 je razvidno, da je bila večina udeležencev »zelo zadovoljna« in »zadovoljna« glede sestankov, sposobnosti in kompetenc vodje in tematike živega laboratorija. Rezultati prikazujejo tudi, da so bili »zelo zadovoljni« z vsebino in organizacijo dogodkov in delavnic, ki so se odvijale v okviru živega laboratorija. Le peščica deležnikov (1 do 2 %) se je negativno odzvala, kar posledično pomeni, da predstavljajo živi laboratorij zelo primerno in uspešno metodologijo pri zadovoljstvu deležnikov. Slika 2 predstavlja analizo splošnega znanja o zeleni politiki, mehanizmih financiranja, zelenem javnem naročanju in konceptu živega laboratorija.



Slika 2: Splošno znanje o zeleni politiki, mehanizmih financiranja, zelenem javnem naročanju in konceptu živega laboratorija.

Rezultati na sliki 2 prikazujejo, da je pred ustanovitvijo živih laboratorijev imela večina deležnikov »zadostno« in »dobro« znanje o zeleni politiki, mehanizmih financiranja, zelenem javnem naročanju, koncepta živega laboratorija in dobrih praks s področja učinkovite rabe energije in energetske učinkovitosti. Le peščica deležnikov (1 do 3 %) je ocenila, da ima »odlično« znanje glede na zgoraj opisana področja. Celotna analiza je pokazala, da se je znanje deležnikov pred in po sodelovanju v živih laboratorijih oziroma natančneje po zaključju vseh štirih faz živega laboratorija (povezovanje, izobraževanje in usposabljanje, izvajanje in nadgradnja) izjemno izboljšalo. Določen delež deležnikov, ki so imeli predznanje ocenjeno z

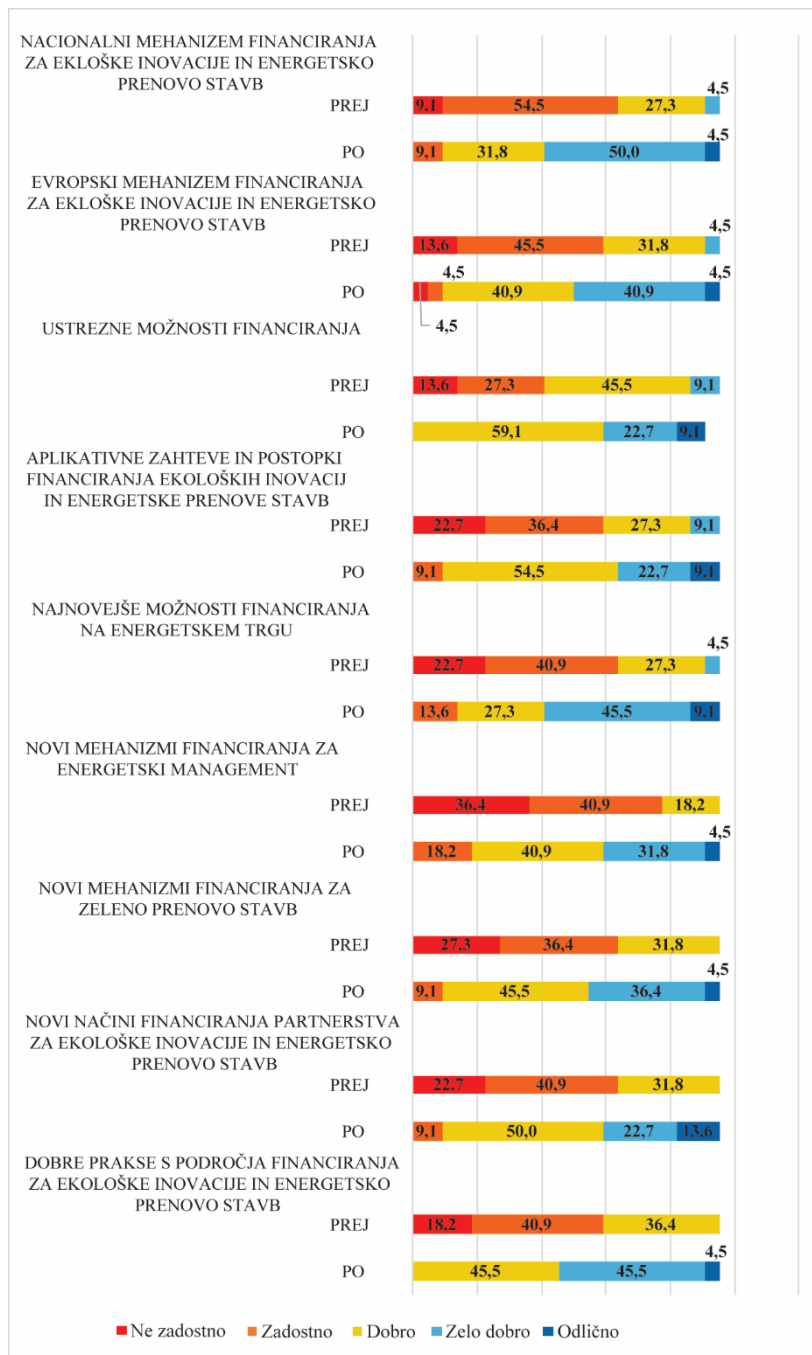
»zelo dobro« oceno se je po sodelovanju izboljšal za 43 %, medtem ko se je zelo zanemarljiv delež »odlično« ocenjenih deležnikov do konca živih laboratorijev dvignil tudi za 20 % v določenih tematikah. Na sliki 3 so prikazani rezultati analize »koristi katere so deležniki pridobili v živih laboratorijih«.



Sl.3 Koristi katere so deležniki pridobili v živih laboratorijih.

Kot je razvidno iz slike 3, se največji delež deležnikov (približno 35%) »popolnoma strinja«, da lahko živi laboratorij izboljša znanje javnega sektorja o energetskega managementu in s čimer bo lahko izvajal učinkovitejše ukrepe. Približno 26% deležnikov se »popolnoma strinja«, da živi laboratorij omogoča pozitiven odnos in izmenjavo izkušenj na področju zelene trajnostne rasti. Približno 90% deležnikov »se strinja« in »se popolnoma strinja«, da lahko javni organi pridobijo ogromno koristi od različnih deležnikov s področja energetske obnove javnih

stavb in zelenega javnega naročanja. Na sliki 4 so prikazani rezultati analize »stopnja znanja o mehanizmih financiranja na področju prenove javnih stavb«.



Sl.4 Stopnja znanja o mehanizmih financiranja na področju prenove javnih stavb.

Do sedaj so bili predstavljeni le rezultati splošnih vprašanj o zeleni politiki, zelenih javnih naročilih, mehanizmih financiranja in konceptu živih laboratorijev. V okviru projekta GRASPINNO so bili ustanovljeni trije živi laboratoriji s področja financiranja energetskih prenov javnih stavb. Na podlagi 22 izpolnjenih vprašalnikov je bilo ugotovljeno, da je večina deležnikov že imela pred sodelovanjem v živih laboratorijih »zadostno« ali »dobro« znanje o

temah, povezanih s financiranjem. Po končanem sodelovanju pa se je znanje drastično izboljšal, še posebej na področju nacionalnih in evropskih mehanizmov financiranja za ekološke inovacije in energetske prenove stavb (delež se je povečal iz 0 – 5 % na 40 – 50 %). Deležniki so poleg že zgoraj omenjenih tem, pridobili »odlično« znanje tudi na drugih področjih, vključno z zahtevami za prijavo in postopki financiranja, najnovejšimi možnostmi financiranja, novimi finančnimi mehanizmi za energetske prenove javnih stavb in energetskega managementu.

4. ZAKLJUČEK

Prenova stavb je bistvena za zmanjšanje energetske odvisnosti. Z drugimi besedami, poudarek je potrebno nameniti tudi ozaveščanju ljudi in povečanju njihovega znanja o energetske učinkovitosti ter obnovljivih in trajnostnih virih energije. Živi laboratoriji GRASPINNO omogočajo tesno sodelovanje javnega in zasebnega sektorja, zagotavljajo poglobljeno razumevanje potreb deležnikov in jih spodbujajo k soustvarjanju novih rešitev z izmenjavo izkušenj na področju zelenih javnih naročil, mehanizmih financiranja in energetskega managementu. Takšno soustvarjanje in prenos znanja ter izkušenj lahko pripelje do novih rešitev za bolj zelen trajnostni razvoj. Z ustanovitvijo živih laboratorijev GRASPINNO so javni organi, mala in srednje velika podjetja in oblikovalci politik pridobili ogromno koristi pri soustvarjanju in spodbujanju inovativnih rešitev, krepitvi sodelovanja, razumevanju o energetskega managementu, političnih priporočilih in razvoju pozitivnega odnosa do zelene (trajnostne) rasti. Opaziti je mogoče, da je večina deležnikov (iz različnih razlogov) izrazila pozitivno stališče do ponovne udeležbe na živih laboratorijev in priporočala udeležbo na živih laboratorijih predvsem javnim organom ter malim in srednje velikim podjetjem.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

The research was carried out within the GRASPINNO project co-financed by the European Regional Development Fund under Interreg MED programme 2014-2020.



Project co-financed by the European
Regional Development Fund

6. VIRI, LITERATURA

- [1] Voytenko, Y., McCormick, K., Evans, J., Schliwa, G., 2016. Urban living labs for sustainability and low carbon cities in Europe: towards a research agenda. *Journal of Cleaner Production*, 123, 45-54.

- [2] Cardullo, P., Kitchin, R., Felicianantonio, C. Di, 2018. Living labs and vacancy in the neoliberal city. *Cities*, 73, 44-50. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2017.10.00>
- [3] Sredenšek, K., Srpčič, G., Marksel, M., Hadžiselimović, M., Seme, S., 2019. The Implementation of Electronic Green Public Procurement Tool in Slovenia. *Conference proceedings, 7th Symposium on Applied Electromagnetics SAEM'2018*, 89-95.

UPORABA IZRAČUNA POTREBNE TOPLOTNE MOČI STAVB ZA NJIHOVO ENERGETSKO UPRAVLJANJE

Janez RIBIČ, Lovro BELAK, Filip KOKALJ, Jože PIHLER

POVZETEK

Energetsko upravljanje stavb, ki ga narekuje Uredba o upravljanju z energijo v javnem sektorju, je pomembna za stroškovno učinkovito upravljanje v javnem sektorju. Uredba je lahko tudi koristen pripomoček za vse ostale stavbe. Postopek za načrtovanje in izvedbo sistema ogrevanja pa je podan v standardu SIST EN 12831 – Ogrevalni sistemi v stavbah. Namen članka je predstavitev teh dokumentov in izvesti izračun potrebne toplotne moči stavbe. Izračun je lahko osnova za izdelavo energetske izkaznice in razširjenega energetskega pregleda (REP). Predstavljene so teoretične osnove za model izračuna potrebne toplotne moči za stavbe. Izdelana je implementacija modela v programskem orodju MS Excel na realnem primeru.

USING THE CALCULATION OF THE REQUIRED HEAT LOAD OF BUILDINGS FOR THEIR ENERGY MANAGEMENT

ABSTRACT

Energy management in buildings, which is dictated by the Regulation on energy management in the public sector have important role for cost-effective management in public sector. The regulation can also be a useful tool for all other buildings. The process for calculation of the design heat load is presented in the standard SIST EN 12831 - Heating systems in buildings. The purpose of the article is to present these documents and to perform the calculation of the required heat load for the building. The calculation can be the basis for the production of an energy performance certificate and an extended energy review (REP). Theoretical bases for the model for calculating the required heat load for buildings are presented. An implementation of the model in the MS Excel software tool is made in the real case.

1. UVOD

Trend sodobne gradnje stavb je izvesti čim bolj energetsko učinkovito gradnjo. Taka gradnja bo med obratovanjem omogočila učinkovitejšo rabo energije, predvsem toplotne. S tem so povezani tudi nižji obratovalni stroški stavbe. Podobno velja tudi za prenove stavb. Praktično vsaka prenova je hkrati tudi energetska prenova stavbe. Odločitev za prenovo je povezana tudi s subvencijami za prenovo, ki jih ponuja državni sklad. Vsakdo, ki hoče lotiti takšne prenove

ali gradnje novega objekta, mora pri tem upoštevati določena pravila, ki so podana v dokumentih s tega področja. Ti so: Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah [1], Gradbeni zakon [2] in Tehnična smernica o učinkoviti rabi energije TSG -1-004:2010 [3]. V rabi energije v stavbah ima največji delež poraba toplote za ogrevanje prostorov kot tudi za hlajenje prostorov. Če hočemo predvideti porabo toplotne energije v stavbi, potrebujemo ustrezno toplotno moč ogrevalnega sistema v njej. Smernica se sklicuje na standard SIST EN 12831, ki obravnava ogrevalne sisteme v stavbah in po metodo izračuna projektne toplotne obremenitve [4]. V tem članku bo osnovna tema predstavitev tega standarda in na njegovi osnovi prikaz primera izračuna projektne toplotne moči ogrevalnega sistema. Ti rezultati so lahko tudi osnova za vodenje učinkovite rabe toplotne energije v stavbi.

Učinkovita raba energije je temeljni del energetskega upravljanja stavb. Problematika upravljanja z energijo v stavbah je obravnavana v standardu SIST EN ISO 50001 iz leta 2011 [5]. Predstavlja osnovne smernice in podaja grobo metodologijo upravljanja z vsemi vrstami energije v stavbi. Ena od osnov za vodenje upravljanja z energijo po tem standardu so razširjeni pregledi (REP) za stavbo. Drugi pomembni dokument, ki je eden od temeljev upravljanja z energijo v stavbi, je energetska izkaznica, ki pa jo določa Uredba o upravljanju z energijo v javnem sektorju [7]. Ta dva dokumenta sta v uporabi v javnem sektorju, v družbah izven tega sektorja pa to ni praksa. Tudi ne pri lastnikih stavb. Ta dva dokumenta, ki določata lastnosti stavbe, se tvorita za obstoječe stavbe. Izmed vseh teh virov energije v stavbi se bomo v tem članku omejili le na rabo toplotne energije v stavbi. Eden izmed pokazateljev učinkovite rabe energije je kondicionirani kazalnik energetske učinkovitosti – t.i. energijsko število stavbe, ki nam pove, koliko toplote letno potrebujemo za ogrevanje enega m^2 površine stavbe. Ena od poti, kako dobiti to število je ta, da znamo določiti potrebno toplotno moč ogrevalnega sistema stavbe. Ko imamo ogrevalni sistem izbran, lahko iz obratovalnih ur določimo količino toplotne energije za ogrevanje.

V tem članku bomo podrobno predstavili standard SIST EN 12831 [4], ki obravnava metodologijo izračuna potrebne toplotne moči ogrevalnega sistema v stavbi. Ta postopek se uporablja tako za projektiranje potrebne toplotne moči za novogradnje kot tudi ocenitev toplotne moči za obstoječe stavbe. Za novogradnje je projektiranje toplotne moči odvisno od mnogih dejavnikov, kot so sodobni trendi načrtovanja stavb, raba različnih materialov, arhitektonska zasnova objekta, lega, gabariti objekta, razporeditve prostorov in odločitev investitorja. V tem primeru se v projektu lahko vnaprej predvidi čim bolj učinkovita raba energije, ki naj bo osnova za vodenje rabe energije. Pri obstoječih stavbah pa je potrebno za določitev predvidene toplotne moči poznati vse možne mere in razporeditve prostorov objekta, materiale v stavbi in lego objekta. Na tej osnovi se lahko določi energijsko število, ki naj bo osnova za odločitev o energetske obnove stavbe in možnih predvidenih ukrepih za zmanjšano rabo energije v stavbi (omejimo se na rabo toplotne energije).

V drugem poglavju bomo podrobno predstavili postopek izračuna potrebne toplotne moči za ogrevanje prostorov v stavbi po standardu SIST EN 12831. Prikazali bomo splošne enačbe, na podlagi katerih lahko za konkretni primer izračunamo vrednosti potrebne toplotne moči ogrevalnega sistema za stavbo. V tretjem poglavju bomo na kratko predstavili primer izračuna potrebne toplotne moči za upravno stavbo v RTP Laško. Podali bomo vhodne podatke, ki so

potrebni za izračun in rezultate izračunov v programskem orodju MS Excel. V četrtem poglavju bomo teoretično podali možno nadaljnjo uporabo teh rezultatov za razne namene za vodenje učinkovite rabe energije. Članek bomo zaključili s sklepnimi besedami.

2. POSTOPEK IZRAČUNA POTREBNE TOPLOTNE MOČI ZA OGREVANJE PROSTOROV STAVBE PO STANDARDU SIST EN 12831

Standard SIST EN 12831 podaja analitičen postopek izračuna potrebne toplotne moči za stavbo. Pristop standarda je splošen in izračun velja za stavbe s stropom do višine 5 m. Predpostavi se, da je temperatura zraka v prostorih stavbe enakomerno porazdeljena in je stacionarnem termodinamičnem stanju. Izračun potrebne toplotne moči za ogrevanje prostorov stavbe se vrši za celo stavbo. Preden začnemo izvajati izračune je potrebno pripraviti določene podatke.

2.1 Potrebni podatki za izračun toplotne moči za ogrevanje stavbe

Za izvajanje izračunov potrebujemo za celotno stavbo vse možne geometrijske podatke (površine, volumne, dolžine), prostore v notranjosti objekta moramo ustrezno razporediti, vedeti moramo, kakšna je sestava materialov sten, stropov, kakšna je lega objekta. Moramo določiti način prezračevanja in določiti ali se bo ogrevanje prostorov izvajalo neprekinjeno ali pa se bo izvajalo z vmesnimi prekinitevami. Določiti je potrebno tudi meteorološke podatke za lego stavbe. Potrebna toplotna moč ogrevalne naprave bo morala kriti izgube toplote, ki bo prehajala čez stene v okolico (izgube zaradi prehoda toplote), izgube zaradi prezračevanja (vdor hladnega zraka v prostore objekta) in morebitne izgube toplote zaradi ohlajanja prostorov objekta zaradi prekinitev ogrevanja (toplotna kapaciteta prostorov).

Ti koraki so navedeni v naslednjih točkah:

1. Tvorimo nabor vseh možnih materialov, ki so (ali bodo) zajeti v objektu. Za izračune je za te materiale najpomembnejši podatek toplotna prevodnost materiala (p) λ_p [W/m·K]. Podatek, ki ga podaja proizvajalec oken in vrat pa je njegova toplotna prehodnost U [W/m²·K]. Bazo podatkov za možne materiale tvorimo iz podatkov za materiale iz standarda [4], tehnične smernice [3] in katalogov za materiale in elemente stavbe na trgu. Tvorimo tudi bazo podatkov za vse možne linijske toplotne prevodnosti linijskih toplotnih mostov Ψ [W/m·K] (vodoravni in navpični toplotni mostovi). Ta baza podatkov je dostopna v standardu [4]. Tvorimo še bazo zidov. Za vsak zid strop, tla določimo strukturo (iz sheme ali ocene). Določimo debelino posameznih materialov strukture d_p . Tvorimo bazo toplotnih upornosti (s) med zrakom in konstrukcijo znotraj stavbe R_{si} in zunaj stavbe R_{se} [4]. Toplotna upornost je različna za prehod navpično ali vodoravno.
2. Vse možne prostore v stavbi moramo razdeliti, jih ustrezno indeksirati in poimenovati. Za vsak prostor (i) določimo ali naj bo ta ogrevan ali ne. Če bo, je potrebno določiti želeno temperaturo tega prostora $\Theta_{int,i}$. Najbolj učinkovit postopek je izdelava tlorisa teh prostorov po nadstropjih stavbe s klasifikacijo prostorov in zelenimi temperaturami.

S temi podatki lahko razberemo sosednje prostore (po in med nadstropji). Ponavadi razdelimo prostore po nadstropjih stavbe.

3. Za vsak prostor (i) moramo določiti elemente stavbe. Ti elementi so: stene, podi, stropovi, tla, okna in vrata. Tvorimo bazo elementov stavbe. Iz te baze moramo za vsak prostor stavbe določiti vse možne elemente. Element prostora (k) je lahko zunanji ali pa deli drugi prostor (j) stavbe. Za prostor (k) določimo vse možne vrste toplotnih mostov iz baze.
4. Za vsak prostor (i) stavbe določimo vse možne mere (izmerimo ali določimo iz risbe). Te mere morajo biti: površine zidov, stropov, tal, oken in vrat A_k , volumen posameznega prostora (i) V_i , dolžine vseh mogočih toplotnih mostov v prostoru (i) l_i in debeline materialov sten, stropov in tal d_p za vsak prostor (i). Dopolnimo bazo elementov stavbe s temi merami.
5. Iz baze zidov, stropov in tal določimo njihovo strukturo. Za element (zid) (k) prostora (i) izračunamo toplotno upornost R_p . Preko enačbe (1) izračunamo R_p .

$$R_p = \frac{d_p}{\lambda_p} \left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \right] \quad (1)$$

Skupno toplotno upornost elementa (k) prostora (i) stavbe določimo po enačbi (2):

$$R_k = R_{si} + R_{se} + \sum_p R_p \quad (2)$$

Končno lahko izračunamo toplotno prehodnost elementa (k) prostora (i) stavbe po enačbi (3).

$$U_k = \frac{1}{R_k} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right] \quad (3)$$

Dopolnimo bazo podatkov za elemente stavbe s temi podatki.

6. Določiti moramo t.i. projektno zunanjo temperaturo Θ_e in povprečno letno zunanjo temperaturo $\Theta_{m,e}$ za zunanjo okolico stavbe. Ti temperaturi sta v Sloveniji odvisni od področja, kjer se stavba nahaja. Pridobimo ju iz rezultatov statistične analize temperatur na danem območju. Te podatke nudi agencija ARSO na svoji spletni strani [5]. Podatki in metodologija so skladni s pravilnikom [1]. V ta namen moramo določiti GPS koordinati položaja stavbe (x, y). GPS koordinati (N, E) moramo pretvoriti potem v Gauss-Krügerjevi koordinati GKX in GKY in ju vstavimo kot položaj na spletni strani ARSO. Dobimo množico podatkov, ki so pomembni za izračun projektne toplote. Ti so: datuma začetka in konca kurilne sezone, energija sončnega obsevanja in omenjeni temperaturi Θ_e in $\Theta_{m,e}$.
7. V sodelovanju s investitorjem se moramo odločiti o načinu prezračevanja prostorov (i). Za novogradnje je pravilo, da se v določenih prostorih, kjer je lahko vlaga povišana (kopalnice, WC, kuhinje), potrebno odzračevanje. Če se uporabi centralna prezračevalna naprava, ki je lahko tudi centralna klimatska naprava, je potrebno določiti kateri prostori bodo vključeni in kakšna je količina zračnega toka vtočnega zraka in presežnega zraka. Pri obstoječih stavbah starejših letnic pa je prezračevanje večinoma čisto naravno, brez dodatnih ventilatorjev. Način prezračevanja vpliva na toplotne izgube zaradi prezračevanja, ki jih mora vir toplote pokrivati.

8. V sodelovanju s investitorjem se moramo odločiti o načinu ogrevanja prostorov stavbe. Večinoma se izvaja segrevanje s prekinitvami. V ta namen se je treba dogovoriti o količini dodatne toplotne moči toplotnega vira, ki bi pokrival toplotne izgube, ko se vmes prostori v stavbi ohlajajo. V ta namen se je potrebno dogovoriti o vrednosti faktorja ponovnega segrevanja $f_{RH,i}$ za posamezne prostore. Večinoma so za prostore stavbe enaki in znašajo med 10 in 50 W/m².

Vse te podatke, ki jih moramo imeti na voljo moramo vpisati v baze podatkov, ki jih s tem ustrezno posodobimo. Ti podatki so osnova za izračune projektne toplotne obremenitve, ki jo mora vir toplote zagotoviti v stavbi.

3. IZRAČUN PROJEKTNE TOPLOTNE OBREMENITVE STAVBE

Ko prostor (i) v stavbi segrevamo, segrevamo zrak v njem. Ta dodatna toplota prehaja preko vseh sten prostora v prostore z nižjo temperaturo. Nastajajo toplotne izgube zaradi prehoda toplote. Zaradi prezračevanja se ta ogret zrak odvaja iz prostora ali pa se vanj vteka svež hladen zrak od zunaj. Nastajajo toplotne izgube zaradi prezračevanja. V primeru ogrevanja prostorov s prekinitvami, se prostori v vmesnem času, ko se ne ogrevajo, zaradi omejene toplotne kapacitete prostorov ohlajajo. Nastajajo dodatne toplotne izgube zaradi vmesnega ohlajanja prostorov in potrebnega dodatnega ogrevanja. Projektno toplotno obremenitev stavbe Φ_{HL} tako lahko potem izračunamo po enačbi (4).

$$\Phi_{HL} = \sum_i \Phi_{T,i} + \sum_i \Phi_{V,i} + \sum_i \Phi_{RH,i}, \quad (4)$$

kjer je $\Phi_{T,i}$ transmisijaska toplotna izguba ogrevanega prostora (i) v [W], $\Phi_{V,i}$ so toplotne izgube zaradi prezračevanja ogrevanega prostora (i) v [W] in $\Phi_{RH,i}$ je zmogljivost segrevanja za izravnavo vplivov prekinitve ogrevanja ogrevanega prostora (i) v [W]. Sešteti moramo potrebne toplotne moči po vseh prostorih stavbe.

3.1 Izračun transmisijskih toplotnih izgub prostora (i) v stavbi

Toplota iz prostora (i) prehaja ven v vseh smereh: direktno ven iz objekta, v druge ogrevane prostore, v neogrevane prostore in v zemljo, če je temperatura prostora (i) višja od temperatur v drugih prostorih. Za prehod toplote čez stene velja Fourier-jev zakon prehoda toplote čez trdne snovi (5).

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{d\Theta}{dx} \quad (5)$$

Pri normalnem prehodu toplote obstaja linearna odvisnost med gradientom upada toplote in razliko temperatur (6).

$$\frac{d\Theta}{dx} = \frac{\Theta_2 - \Theta_1}{d} \quad (6)$$

Končno dobimo enačbo, ki jo iščemo (7).

$$\Phi = U \cdot A \cdot (\Theta_1 - \Theta_2) = H \cdot (\Theta_1 - \Theta_2) \quad (7)$$

Projektna transmisijška toplotna izguba ogrevanega i -tega prostora $\Phi_{T,i}$ se izračuna po enačbi (8).

$$\Phi_{T,i} = (H_{T,ie} + H_{T,iue} + H_{T,ig} + H_{T,ij}) \cdot (\Theta_{int,i} - \Theta_e) \quad [W] \quad (8)$$

$H_{T,ie}$ je koeficient transmisijške toplotne izgube med ogrevanim prostorom (i) in zunanjo okolico (e) skozi ovoj stavbe, $H_{T,iue}$ je koeficient transmisijške toplotne izgube med ogrevanim prostorom (i) in zunanjo okolico (e) skozi neogrevan prostor (u), $H_{T,ig}$ je koeficient transmisijške toplotne izgube med ogrevanim prostorom (i) in zemljo (g) in $H_{T,ij}$ je koeficient transmisijške toplotne izgube med ogrevanim prostorom (i) in sosednjim ogrevanim prostorom (j) pri signifikantni temperaturni razliki. V nadaljevanju bomo na kratko opisali posamezne vrste koeficiente prehodov toplote.

3.1.1 Koeficient neposredne toplotne izgube v zunanjo okolico

Koeficient projektne transmisijške toplotne izgube med ogrevanim prostorom (i) in zunanjo okolico (e), $H_{T,ie}$ je sestavljen iz vseh elementov stavbe in linijskih mostov, ki ločujejo ogrevani prostor od zunanje okolice (stene, okna, vrata, tla). Določi se po enačbi (9).

$$H_{T,ie} = \sum_k A_k \cdot U_k + \sum_l \Psi_l \cdot l_l \quad [W/K] \quad (9)$$

3.1.2 Koeficient toplotne izgube v neogrevan prostor

Če je med ogrevanim prostorom (i) in zunanjo okolico neogrevan prostor (u) – na primer podstrešje ali dvignjena tla, se koeficient projektne transmisijške toplotne izgube $H_{T,iue}$ iz ogrevane cone v zunanjo okolico izračuna po enačbi (10). Upoštevamo toplotne prehodnosti in vse možne toplotne mostove.

$$H_{T,iue} = \sum_k A_k \cdot U_k \cdot b_u + \sum_l \Psi_l \cdot l_l \cdot b_u \quad [W/K] \quad (10)$$

Kjer je b_u temperaturni redukcijski faktor, ki upošteva razliko med temperaturo neogrevanega prostora in projektno zunanjo temperaturo. Izračuna se kot normirana razlika temperatur $b_u = (\Theta_{int,i} - \Theta_u) / (\Theta_{int,i} - \Theta_e)$. Če vzamemo na primer podstrešje, se to lahko ohladi na zunanjo temperaturo; $\Theta_u = \Theta_e$, kar pomeni, da ta faktor znaša 1.

3.1.3 Koeficient neposredne toplotne izgube v zemljo

V kleti lahko čez tla in stene na nivoju zemlje toplota prehaja v zemljo. Koeficient projektne stacionarne transmisijške toplotne izgube v zemljo $H_{T,ig}$ med ogrevanim prostorom (i) in zemljo (g) se izračuna po enačbi (11).

$$H_{T,ig} = 1,45 \cdot f_{g2} \cdot \left(\sum_k A_k \cdot U_{equiv,k} \right) \cdot G_w \text{ [W/K]} \quad (11)$$

Kjer je f_{g2} korekcijski faktor, ki upošteva vpliv letnega nihanja temperature. Določi se kot normirana razlika temperatur $f_{g2} = (\Theta_{int,i} - \Theta_{m,e}) / (\Theta_{int,i} - \Theta_e)$. $U_{equiv,k}$ je ekvivalentna toplotna prehodnost elementa (k) stavbe (stena, tla) v stiku z zemljo. Določi se podobno kot ozemljitvena upornost ozemljitvenega sistema s horizontalno položenim tračnim ozemljilom, R_{oz} . G_w je korekcijski faktor, ki upošteva vpliv podtalnice (vrednost 1, če je podtalnica globlje od 1 m, če je manj kot 1 m pa ima ta faktor vrednost 1,15).

3.1.4 Koeficient toplotne izgube med prostori, ogrevanimi na različno temperaturo

$H_{T,ij}$ izraža transmisijski toplotni tok med ogrevanim prostorom (i) in sosednjim ogrevanim prostorom (j) pri izrazitejši temperaturni razliki. To je lahko sosednji prostor v enoti stavbe (skladišče ali kopalnica). Izračun ne upošteva vplivov toplotnih mostov. Izračuna se po enačbi (12).

$$H_{T,ij} = \sum_k f_{ij} \cdot A_k \cdot U_k \quad (12)$$

f_{ij} je temperaturni redukcijski faktor, ki upošteva razliko temperature med prostorom (i) in sosednjim ogrevanim prostorom. Določi se po enačbi $f_{ij} = (\Theta_{int,i} - \Theta_{neogrevan\ prostori}) / (\Theta_{int,i} - \Theta_e)$. Faktor je lahko tudi negativen, če je temperatura sosednjega prostora višja kot temperatura obravnavanega (kopalnica).

Toplotni vir stavbe mora poleg teh obravnavanih toplotnih izgub kriti še izgube, ki se pojavijo zaradi prezračevanja.

3.2 Izračun toplotnih izgub zaradi prezračevanja prostora (i) v stavbi

Projektna toplotna izguba zaradi prezračevanja, $\Phi_{v,i}$ se za ogrevani prostor (i) izračuna po enačbi (13).

$$\Phi_{v,i} = H_{v,i} \cdot (\Theta_{int,i} - \Theta_e) \quad (13)$$

$H_{v,i}$ je koeficient projektne toplotne izgube zaradi prezračevanja in se določi po enačbi (14).

$$H_{v,i} = \rho_z \cdot c_{p,z} \cdot \dot{V}_i = 0,34 \cdot \dot{V}_i \quad (14)$$

$\dot{V}_i$ je količina zračnega toka v ogrevani prostor (i) v $[m^3/s]$, ρ_z je gostota zraka pri projektni temperaturi $\Theta_{int,i}$ ($\rho_z = 1,2 \text{ kg/m}^3$ | $\Theta_{int,i} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$). $c_{p,z}$ je specifična toplota zraka pri konstantnem tlaku v $[J/kg \cdot K]$ ($c_{p,z} = 1013 \text{ J/kgK}$)

Faktor 0,34 dobimo, če pomnožimo spremenljivki in vzamemo količino zračnega pretoka v $[m^3/h]$. Pretok zraka v prostoru (i) lahko izračunamo po enačbi (15).

$$\dot{V}_i = \dot{V}_{\text{inf},i} + \dot{V}_{\text{su},i} \cdot f_{V,i} + \dot{V}_{\text{mech,inf},i} \quad (15)$$

$\dot{V}_{\text{inf},i}$ je količina zračnega toka naravne infiltracije v ogrevani prostor (i) v [m^3/h]. Količina naravnega zračnega toka infiltracije ogrevanega prostora (i), ki ga povzročita vzgon zraka in veter, se izračuna po enačbi (16).

$$\dot{V}_{\text{inf},i} = 2 \cdot V_i \cdot n_{50} \cdot e_i \cdot \varepsilon_i \quad (16)$$

V_i je volumen prostora (i). n_{50} je količina izmenjave zraka v [h^{-1}] pri tlačni razliki 50 Pa med notranjostjo prostora (i) in zunanostjo stavbe, vključno s vplivom zračnih odprtin (n_{50} je med 2 in 10). e_i je koeficient izpostavljenosti stavbe pred vetrom (med 0,01 in 0,05). ε_i je faktor korekcije zaradi višine (1 za višine prostora (i) v stavbi do 10 m in 1,2 za višino med 10 in 30 m). To je naravno prezračevanje. Če pa imamo prezračevalno napravo (ventilator po posameznih prostorih ali centralno prezračevalno napravo) pa moramo določiti še količino vtoka zraka iz prezračevalne naprave. Poda se na podlagi zmogljivosti prezračevalne naprave. Ta pretok se mora ustrezno porazdeliti po prostorih. Važen je še temperaturni redukcijski faktor, ki je odvisen od temperature vtočnega zraka $\Theta_{\text{su},i}$, $f_{V,i} = (\Theta_{\text{int},i} - \Theta_{\text{su},i}) / (\Theta_{\text{int},i} - \Theta_e)$. Preostali pretok zraka v enačbi (15) pa je $\dot{V}_{\text{mech,inf},i}$, ki je količina presežka toka odpadnega zraka iz ogrevanega prostora (i) v [m^3/h]. V splošnem se poda za celotno stavbo in se potem preračuna relativno glede na volumen zraka prostora (i). Skupni pretok zraka iz enačbe (15) mora biti večji od potrebne minimalne količine izmenjave zraka v prostoru $\dot{V}_{\text{min},i}$ v eni uri. Minimalna potrebna količina svežega zraka se izračuna po enačbi (17).

$$\dot{V}_{\text{min},i} = n_{\text{min}} \cdot V_i \quad (17)$$

n_{min} je minimalno število izmenjav zraka v eni uri (med 0,5 in dvema izmenjavama zraka v eni uri). Minimalno količino izmenjanega zraka določa tudi pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb [6]. Če imamo naravno prezračevanje, se upoštevata le minimalni pretok zraka in infiltracija zunanjega zraka v stavbo preko oken in vrat. Če imamo prezračevalno napravo, moramo vedeti kakšna količina zraka priteka v stavbo. V sodobnih stavbah so ventilatorji v kopalnicah in kuhinjah. Potrebno je analizirati količino odtočnega zraka in od kod priteka.

3.3 Ogrevanje prostora (i) v stavbi s prekinitvami

Prostori, ki se ogrevajo s prekinitvami, morajo imeti dodatno zmogljivost ogrevalnega sistema, ki je zmožen, po določenem času po prekinitvi segrevanja, prostor segreti nazaj na projektno notranjo temperaturo. Zmogljivost segrevanja je odvisna od toplotne zmogljivosti elementov stavbe, časa ponovnega ogrevanja, padca temperature in značilnosti regulacijskega sistema ogrevanja. V dogovoru z investitorjem je možno te dodatne zmogljivosti segrevanja izločiti, če je možno izgube zaradi prezračevanja zmanjšati. V standardu je opisana poenostavljena metoda določitve dodatne toplotne zmogljivosti segrevanja ogrevalnega

sistema. Zmogljivost segrevanja, ki je potrebna za izravnavo vplivov segrevanja s prekinitvami $\Phi_{RH,i}$ v ogrevanem prostoru (i) se določi po enačbi (18).

$$\Phi_{RH,i} = f_{RH,i} \cdot A_i \quad (18)$$

3.4 Zaključek poglavja

Predstavljeni postopek izračuna potrebne toplotne moči (izgub v stavbi) za vir toplote je obsežen saj pokriva veliko parametrov, ki jih je potrebno poznati. Če je le možno, se čim manj parametrov oceni, da dobimo končni rezultat dovolj realen. Določena stavba, ki ima po možnosti več nadstropij je obsežen projekt za analizo potrebne toplotne moči. Potrebno se ga je lotiti na celovit način. Določimo vse možne mere, raziščemo v celoti gradbene lastnosti stavbe, razdelimo prostore, poiščemo morebiti lastnosti novih materialov. Da vse to rešimo, si pomagamo s programskimi orodji.

4. PRIMER IZRAČUNA POTREBNE TOPLOTNE MOČI ZA UPRAVNO STAVBO V RTP LAŠKO

Postopek v standardu smo v celoti tvorili v MS Excel. Slog tabel, ki so v aplikaciji je podoben tistemu, ki je predstavljen v standardu. V tem članku bomo predstavili na kratko primer izračuna za upravno stavbo v RTP Laško. Zgrajena je bila leta 1924 za potrebe prenosa električne energije iz HE Fala proti Trbovljam. Zunanost stavbe je obnovljena s perlitno fasado. Na voljo smo dobili le tlorise dveh nadstropij stavbe. Originalne dokumentacije o zgradbi ni. Ti podatki seveda niso bili dovolj za pričetek analize. Potrebno je bilo izmeriti vse možne prostore v stavbi. Seznanili smo se tudi z materiali sten, stropov, tal, oken in vrat. Izvedli smo detajlno razporeditev prostorov, jih poimenovali in za vsakega od njih določili elemente prostora (stene, tla, stropi), njihove materiale in mere. Posodobili smo bazo podatkov za materiale stavbe. Vse pomembne podatke smo podali v tabelo vhodnih podatkov v aplikaciji v MS Excel, ki jih prikazuje slika 1. Kot vidimo iz slike 1, obravnavamo vsega skupaj 20 različnih prostorov, ki se jih ogreva in 8 prostorov, ki se jih ne ogreva v dveh nadstropjih.

Na podlagi vseh možnih podatkov, ki jih potrebujemo, smo za posamezne elemente upravne stavbe izračunali vrednosti toplotnih prevodnosti. Za to stavbo smo uporabili 19 različnih elementov stavbe. Slika 2 prikazuje izsek iz tabele elementov stavbe za le dva izračunana primera. To bazo podatkov iz izračunov smo uporabili za izračun transmisijских izgub toplote v prostor. Primer izračuna transmisijских toplotnih izgub iz enega prostora v upravni stavbi prikazujemo na posnetku aplikacije na sliki 3. To je primer izračuna za 1. obravnavani prostor v analizi. Poimenovali smo ga Dnevni prostor. Vrednost za rezultat izračuna se zabeleži v bazo rezultatov za ta del. Izvedeno je le naravno prezračevanje, brez ventilatorjev.

Meteorološki podatki						
Opis		Simbol	Enota	Vrednost		
Projektna zunanja temperatura		ϑ_e	[°C]	-13		
Povprečna letna zunanja temperatura		ϑ_{me}	[°C]	10,1		
Koefficienta zaščitenosti e_k in e_l						
Smer				Vrednost		
				na enoto		
Vse				1		
Podatki o ogrevanih prostorih						
Št. prostora	Naziv prostora	Projektna temperatura	Površina prostora	Višina prostora	Notranja prostornina	KODA prostora
		$\vartheta_{int,i}$	A_i	h_i	V_i	
		[°C]	[m ²]	[m]	[m ³]	
1	DNEVNI PROSTOR	21	45,82	2,85	130,59	P1
2	HODNIK PRITLIČJE 1	21	25,23	3,66	92,34	P2
3	UMIVALNICA + WC	21	26,55	3,9	103,55	P3
4	KOPALNICA	24	14,35	3,9	55,97	P4
5	PISARNA VS ZA DV	21	6,21	3,75	23,29	P5
6	POMOŽNI PROSTOR	21	14,82	2,3	34,09	P6
7	RELEJNI PROSTOR	21	27,30	2,3	62,79	P7
8	PISARNA	21	21,73	2,3	49,98	P8
9	HODNIK PRITLIČJE 2	21	45,25	med 2,4 in 3,9	97,51	P9
10	DELA VNICA	21	30,53	2,4	73,27	P10
11	PROSTOR ZA DEA	21	9,52	3,1	29,51	P11
Skupaj po nadstropjih			267,31		752,88	
12	MUZEJ 1	21	74,37	2,65	197,08	N1
13	HODNIK NADSTROPJE 1	21	25,53	2,65	67,65	N2
14	KUHINJA	21	5,72	3	17,16	N3
15	HODNIK NADSTROPJE 2 +WC	21	43,30	3	129,90	N4
16	DNEVNI PROSTOR	21	28,00	2,65	74,20	N5
17	PISARNA VODJE RTP	21	13,50	2,65	35,78	N6
18	PISARNA NADZORNIK RTP	21	22,95	2,65	60,82	N7
19	MUZEJ 2	21	42,57	2,65	112,81	N8
20	MUZEJ 3	21	33,66	2,65	89,20	N9
Skupaj po nadstropjih			289,60		784,60	
Skupaj vsi prostori			556,91		1537,48	
Podatki o neogrevanih prostorih			Vrednost b	Temperatura		
Naziv prostora			b_u	ϑ_u		
			na enoto	[°C]		
MUZEJ 4			0,8	8		
GARAŽA			0,8	8		
SKLADIŠČE			1	21		
USMERNIŠKI PROSTOR			1	21		
AKU PROSTOR			1	21		
TK PROSTOR			1	21		
NEOGREVA NO PODSTREŠJE			1	-10		
DVIGNJEN POD			0,8	8		

Slika 1: Posnetek tabele vhodnih podatkov za izračun toplotnih izgub upravne stavbe v RTP Laško

Element	Material	Opis	d [m]	λ [W/m · K]	R [m ² · K/W]	U_k [W/m ² · K]
52	Zunanja neizolirana stena (LAŠKO US)					
	61	Notranja površinska upomost (toplotni tok v vodoravni smeri)			0,130	
	78	Notranji stenski omet	0,015	0,500	0,030	
	1	Lahka opeka	0,500	0,800	0,625	
	88	Perlitna malta	0,050	0,130	0,385	
	62	Zunanja površinska upomost (toplotni tok v vodoravni smeri)			0,040	
	Celotna debelina in U_k		0,565		1,210	0,827
53	Zunanja izolirana stena (LAŠKO US)					
	61	Notranja površinska upomost (toplotni tok v vodoravni smeri)			0,130	
	78	Notranji stenski omet	0,015	0,500	0,030	
	1	Lahka opeka	0,500	0,800	0,625	
	88	Perlitna malta	0,050	0,130	0,385	
	21	Polistiren	0,150	0,043	3,488	
	77	Zunanji sloj fasade	0,005	0,700	0,007	
	62	Zunanja površinska upomost (toplotni tok v vodoravni smeri)			0,040	
	Celotna debelina in U_k		0,720		4,705	0,213

Slika 2: Posnetek tabele izračunanih vrednosti toplotnih prehodnosti dveh elementov upravne stavbe v RTP Laško (zunanja stena – pred in po morebitni obnovi)

Transmisijske izgube neposredno v zunanjo okolico				DNEVNI PROSTOR		
Šifra	Element stavbe	A_k [m ²]	U_k [W/m ² · K]	e_k na enoto	$A_k \cdot U_k \cdot e_k$ [W/K]	
53	Zunanja izolirana stena (LAŠKO US)	28,220	0,213	1	5,998	
46	Okna (PODLOG US)	6,000	1,100	1	6,600	
Elementi stavbe skupaj		$\sum_k (A_k \cdot U_k \cdot e_k)$			12,598 W/K	
Šifra	Toplotni most	ψ_k [W/m ² · K]	l_k [m]	e_k na enoto	$\psi_k \cdot l_k \cdot e_k$ [W/K]	
62A	Okenska polica	0,120	3,000	1	0,360	
62B	Prečni profil okna	0,120	0,000	1	0,000	
62C	Stranski profil okna	0,120	0,000	1	0,000	
Toplotni mostovi skupaj		$\sum_k (\psi_k \cdot l_k \cdot e_k)$			0,360 W/K	
Koeficient celotne toplotne izgube, neposredno v zunanjo okolico			$H_{T,ie} = \sum_k (A_k \cdot U_k \cdot e_k) + \sum_k (\psi_k \cdot l_k \cdot e_k)$		12,958 W/K	
Toplotne izgube vneogrevane prostore						
Šifra	Element stavbe	A_k [m ²]	U_k [W/m ² · K]	b_u na enoto	$A_k \cdot U_k \cdot b_u$ [W/K]	
56	Notranja predelna stena z lahko opeko (LAŠKO US)	22,515	1,656	0,80	29,834	
61	Dvignjena izolirana lesena tla (LAŠKO US)	45,820	0,546	0,38	9,568	
Elementi stavbe skupaj		$\sum_k (A_k \cdot U_k \cdot b_u)$			39,401 W/K	
Šifra	Toplotni most	ψ_k [W/m ² · K]	l_k [m]	b_u na enoto	$\psi_k \cdot l_k \cdot b_u$ [W/K]	
-	Brez	-	-	-	-	
Toplotni mostovi skupaj		$\sum_k (\psi_k \cdot l_k \cdot b_u)$			0,000 W/K	
Koeficient celotne toplotne izgube vneogrevane prostore			$H_{T,jue} = \sum_k (A_k \cdot U_k \cdot b_u) + \sum_k (\psi_k \cdot l_k \cdot b_u)$		39,401 W/K	
Toplotne izgube v zemljo						
Izračun B'		$A_{g,k}$	O_k	$B'_k = 2 \cdot A_{g,k} / O_k$		
		[m ²]	[m]	[m]		
		21,000	18,660	2,251		
Šifra	Element stavbe	U_k	$U_{equiv,k}$	A_k	$A_k \cdot U_{equiv,k}$	
-	Brez	-	-	-	-	
Enakovredni elementi stavbe skupaj		$\sum_k (A_k \cdot U_{equiv,k})$			0,000 W/K	
Korekcijski faktorji		f_{g1}	f_{g2}	G_w	$f_{g1} \cdot f_{g2} \cdot G_w$	
		na enoto	na enoto	na enoto	na enoto	
		1,450	0,267	1,000	0,387	
Koeficient celotne toplotne izgube v zemljo			$H_{T,jig} = f_{g1} \cdot f_{g2} \cdot G_w \cdot \sum_k (A_k \cdot U_{equiv,k})$		0,000 W/K	
Toplotne izgube v prostore, ogrevane na različne temperature						
Šifra	Element stavbe	f_{ij}	A_k	U_k	$f_{ij} \cdot A_k \cdot U_k$	
-	Brez	-	-	-	-	
Koeficient celotne toplotne izgube v prostore z različnimi temperaturami				$H_{T,ij} = \sum_k (f_{ij} \cdot A_k \cdot U_k)$		0,000 W/K
Koeficient celotne transmisijske toplotne izgube			$H_{T,i} = H_{T,ie} + H_{T,jue} + H_{T,jig} + H_{T,ij}$		52,359 W/K	
Temperaturni podatki						
Projektna zunanja temperatura		$\theta_e =$		-13	°C	
Projektna notranja temperatura		$\theta_{int,k} =$		21	°C	
Razlika projektnih temperatur		$\theta_e - \theta_{int,k} =$		34	°C	
Projektna transmisijska toplotna izguba				$\Phi_{T,i} = H_{T,i} \cdot (\theta_{int,i} - \theta_e)$		1780,209 W

Slika 3: Primer celotnega postopka izračuna transmisijskih toplotnih izgub za Dnevni prostor

Izjava se ogrevanje prostorov s prekinitvami. Za izračun rezerve moči za ogrevanje s prekinitvami smo predvideli faktor $f_{RH,i} = 35 \text{ W/m}^2$. To je kar velika rezerva. Vendar ta omogoča, da je po standardu mogoče v eni uri ogreti prostore na sobno temperaturo, če so se poprej prostori ohladili za 4 K.

Na sliki 4 so prikazani vsi rezultati izračunov toplotnih izgub upravne stavbe v RTP Laško. Iz slike je razvidno, da skupne izgube za upravno stavbo RTP Laško znašajo $\Phi_T = 57,908 \text{ kW}$.

Največji je prispevek transmisijских toplotnih izgub zaradi neizvedenega izolacijskega ovoja stavbe. Izgube prezračevanja so majhne, saj se izvaja le naravno prezračevanje brez ventilatorjev. Pogoji za rezervo moči za ogrevanje s prekinitvami so zahtevni, zato je izračunana toplotna rezerva približno 20 kW.

Izračun vseh IZGUB iz prostorov v RTP LAŠKO US sedanje stanje								
Št. prostora	Naziv prostora	KODA prostora	Projektna temperatura	Površina prostora	Notranja prostornina	Projektna transmisijske toplotne izgube po prostorih US LAŠKO	Projektna toplotne izgube zaradi prezračevanja v US LAŠKO	Zmogljivost segrevanja
			$\theta_{m,i}$	A_i	V_i	$\Phi_{T,i}$	$\Phi_{V,i}$	$\Phi_{RH,i}$
			[°C]	[m²]	[m³]	[W]	[W]	[W]
1	DNEVNI PROSTOR	P1	21	45,82	130,59	2.938,124	452,88	1.603,700
2	HODNIK PRITLIČJE 1	P2	21	25,23	92,34	732,175	320,24	883,050
3	UMIVALNICA + WC	P3	21	26,55	103,55	889,142	359,09	929,250
4	KOPALNICA	P4	24	14,35	55,97	522,557	140,83	502,320
5	PISARNA VS ZA DV	P5	21	6,21	23,29	438,382	53,84	217,350
6	POMOŽNI PROSTOR	P6	21	14,82	34,09	590,220	78,81	518,700
7	RELEJNI PROSTOR	P7	21	27,30	62,79	854,947	145,17	955,500
8	PISARNA	P8	21	21,73	49,98	1.041,834	173,33	760,550
9	HODNIK PRITLIČJE 2	P9	21	45,25	97,51	994,115	338,16	1.583,750
10	DELAVNICA	P10	21	30,53	73,27	1.092,746	169,40	1.068,550
11	PROSTOR ZA DEA	P11	21	9,52	29,51	1.419,419	68,23	333,200
Skupaj po nadstropjih				267,31	723,37	11.513,660	2.299,985	9.355,920
12	MUZEJ 1	N1	21	74,37	197,08	4.628,386	683,48	2.602,950
13	HODNIK NADSTROPJE 1	N2	21	25,53	67,65	1.396,633	156,42	893,550
14	KUHINJA	N3	21	5,72	17,16	499,322	39,67	200,200
15	HODNIK NADSTROPJE 2 +WC	N4	21	43,30	129,90	4.203,364	450,49	1.515,500
16	DNEVNI PROSTOR	N5	21	28,00	74,20	1.394,178	171,55	980,000
17	PISARNA VODJE RTP	N6	21	13,50	35,78	867,966	124,07	472,500
18	PISARNA NADZORNIK RTP	N7	21	22,95	60,82	1.801,690	210,92	803,250
19	MUZEJ 2	N8	21	42,57	112,81	3.943,121	391,23	1.489,950
20	MUZEJ 3	N9	21	33,66	89,20	3.330,670	309,34	1.178,100
Skupaj po nadstropjih				289,60	784,60	22.065,330	2.537,162	10.136,000
Skupaj vsi prostori				556,91	1.507,97	33.578,99	4.837,15	19.491,92
Vse skupaj za upravno stavbo v RTP Laško (pred prenovo)							57.908,06 W	

Slika 3: Izračun toplotnih izgub za trenutno stanje upravne stavbe v RTP Laško

5. UPORABA MODELA IZRAČUNA POTREBNE TOPLOTNE MOČI ZA STAVBO ZA VODENJE UČINKOVITE RABE ENERGIJE

Sedaj, ko imamo ta pomemben rezultat, se lahko lotimo detajlne analize rabe toplotne energije za ogrevanje prostorov.

Model ki smo ga predstavili, je v osnovi namenjen za projektiranje toplotne moči toplotnega vira, ki bo omogočal da tudi pri mejni projektni zunanji temperaturi lahko držimo zastavljeno temperaturo po vseh prostorih.

Model izračuna bi bilo mogoče posodobiti, če bi namesto projektne temperature v model vstavili urne podatke za temperature v ogrevalni sezoni. S tem bi izračunali potrebno količino toplotne energije v ogrevalni sezoni. Ob tem bi morali predvideti tudi ure prekinitve ogrevanja stavbe. Na podlagi te izračunane porabe toplote bi potem verodostojno izračunali energijsko število. To je edina metoda za novogradnje, da izračunamo energijsko število. Za obstoječe stavbe pa bi se lahko količina toplote v ogrevalni sezoni izmerila in bi se model s tem ustrezno umeril.

Druga možna uporaba modela izračuna toplotne moči bi bila pri odločitvi o energetski obnovi stavbe. Edina pot, kako izračunati izboljšane karakteristike predvidene prenove, je da se posodobi baza elementov stavbe in se izračuna toplotne izgube stavbe z novimi elementi (okna, vrata, izolirane zunanje stene), ki ustrezajo prenovi. V prvi vrsti bi to bil izračun mejne toplotne moči pod novimi pogoji in osnova za odločitev o prenovi ogrevalnega sistema.

Če bi te nove podatke iz baze elementov vstavili v posodobljen model bi lahko izračunali porabo toplotne energije za stavbo s stavbnim ovojem. Potem bi te rezultate primerjali z rezultati izračunov za obstoječe stanje. Nakar bi lahko izračunali prihranek toplote za ogrevanje stavbe in v končni fazi, prihranke stroškov ogrevanja. To bi bila tudi osnova za izračun povratne dobe investicije.

6. ZAKLJUČKI

Problemатiko upravljanja z energijo za stavbe podrobno obravnava standard SIST EN ISO 50001. Zakon o gradnji objektov, tehnična smernica za učinkovito rabo energije se ne sklicujeta na ta standard. Lahko zaključimo, da je standard za upravljanje z energijo nadgradnja tehnične smernice. Podrobno smo obravnavali postopek izračuna mejne toplotne moči za celotno stavbo. Ta postopek je dejansko le izračun potrebne toplotne moči, ki je osnova za izbiro toplotnega vira. Analiza problema je pokazala, da je ta moč linearno odvisna od razlike med notranjo temperaturo in zunanjo temperaturo. Če obravnavamo projektno temperaturo kot zunanjo temperaturo, izračunamo največjo možno toplotno moč, ki jo potrebujemo, da pri projektni zunanji temperaturi prostore v stavbi toliko ogrevamo, da držimo predvideno temperaturo v prostorih. V večini primerov je potrebna manjša toplotna moč.

Izdelali smo model izračuna mejne toplotne moči za splošno stavbo v MS Excel. Model zajema izračune transmisijskih izgub, izgub zaradi prezračevanja in določitev dodatne rezerve toplotne moči za ogrevanje prostorov stavbe s prekinitvami. Poljubno lahko širimo bazo vseh podatkov za vsako stavbo. Posodabljammo lahko poljubno lastnosti elementov stavbe (zidove, stropove, okna, vrata). Izkaže se, da za celovit izračun potrebujemo vse možne podatke o stavbi – mere, materiale elementov stavbe, razporeditev prostorov, način prezračevanja, predviden način ogrevanja.

Model izračuna toplotne moči za stavbe ima potencial za uporabo pri upravljanju z energijo za stavbe. Namesto projektne temperature bi morali v model vstaviti urne podatke o zunanji temperaturi v ogrevalni sezoni, ki jih je možno pridobiti. S tem bi z modelom izračunali potrebne moči za vsako uro. Iz teh podatkov bi potem izračunali potrebno toploto za ogrevanje v ogrevalni sezoni. Iz teh podatkov bi zlahka izračunali energijsko število, ki je eden od pomembnih podatkov stavbe. Ta postopek bi lahko ponovili za model s stavbnim ovojem. Nov izračun potrebne toplote bi pokazal prihranke. Takšen izračun bi lahko bil osnova za investicijo v energetsko obnovo stavbe

7. LITERATURA

- [1] Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah, 2010, LINK: <https://www.uradni-list.si/glasilo-uradni-list-rs/vsebina/98727>.
- [2] Gradbeni zakon, 2017, LINK: <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=ZAKO7108>.
- [3] Tehnična smernica, TSG- 1- 0 0 4: 2010, UČINKOVITA RABA ENERGIJE, 2010, LINK: http://www.mop.gov.si/fileadmin/mop.gov.si/pageuploads/zakonodaja/graditev_objekto v/TSG_01_004_2010_ure.pdf.
- [4] SIST EN 12831, Ogrevalni sistemi v stavbah – Metoda izračuna projektne toplotne obremenitve, februar 2004.
- [5] SIST EN ISO 50001:2011 – Sistemi upravljanja z energijo – Zahteve z napotki za uporabo.
- [6] Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb, 2013, LINK: <http://pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=PRAV4223>.
- [7] Uredba o upravljanju z energijo v javnem sektorju, 2016, LINK: <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=URED6635>.

NASLOV AVTORJEV

Janez RIBIČ

Jože PIHLER

UM, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Koroška cesta 46, 2000 Maribor

E-pošta: janez.ribic@um.si

Lovro BELAK

ELES, d. o. o., Hajdrihova 2, 1000 Ljubljana

Filip KOKALJ

UM, Fakulteta za strojništvo Maribor, Smetanova 17, 2000 Maribor

TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS OF THE SUSTAINABLE TRANSITION SCENARIO, TYNDP 2018

Robert GAUGL, Udo BACHHIESL, Christopher PANSI

ABSTRACT

Every two years, the European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E) publishes a Ten Year Network Development Plan (TYNDP), which provides an overview of the necessary expansion in the transmission network of the European Union (EU). The latest report (TYNDP 2018 [1]) includes three scenarios of possible future energy developments for Europe: Sustainable Transition, Distributed Generation and Global Climate Action. All three scenarios take the EU decarbonisation targets for 2030 into account. This report focuses on the analysis of the Sustainable Transition scenario. For this purpose, the development regarding to lines, power plant park, fuel and CO₂ prices and consumption is implemented in the simulation model ATLANTIS until the year 2030. Thereafter, a simulation is performed and the results regarding produced energy per power plant type, share of renewable energy and CO₂ emissions are discussed.

1. INTRODUCTION

The European electricity market is undergoing a transition from a system that relies on big parts on thermal and nuclear power plants to a new system that integrates more and more renewable energy. The reason for this are the energy strategies of the European Union (EU) for 2020 [2], 2030 [3] and 2050 [4], which are meant to reduce the impact of climate change and make the EU less dependent of imports. For 2030 the goals are to cut the greenhouse gas emissions by at least 40% (from the level of 1990), raise the share of renewable energy to a minimum of 32% and improve the energy efficiency by 32.5% (the last two targets were revised upwards from 27% in 2018) [5].

In order to achieve these targets, every sector including the electricity sector must play their parts. The *European Network of Transmission System Operators for Electricity* (ENTSO-E) lays out three different scenarios in their most recent *Ten Year Network Development Plan 2018* (TYNDP 2018), which they developed along with stakeholders from the industry, NGOs, EU Member states and Regulators. The three scenarios follow different storylines but have the achievement of the climate goals in common. The *Sustainable Transition* (ST) scenario focuses on achieving the targets through national regulation, emission trading schemes and subsidies. The use of existing infrastructure should be used maximised and lignite and bituminous coal fired power plants are increasingly replaced by gas-fired power plants. The *Distributed Generation* (DG) scenario puts small-scale generation with connected batteries (prosumer) at the center. Compared to the ST scenario the share of solar power plants is significantly higher

as can be seen in Table I. The *Global Climate Action* (GCA) scenario is identical with the ST scenario until 2030 and then focuses on large-scale renewables and nuclear power plants. [1]

Table I: Renewable Energy Systems share of demand for wind and solar power for the three scenarios in 2030 and 2040 according to [1].

Scenario	2030		2040	
	Wind	Solar Power	Wind	Solar Power
Sustainable Transition	20%	8%	29%	12%
Distributed Generation	19%	15%	27%	25%
Global Climate Action	20%	8%	36%	21%

2. METHODOLOGY

The ST scenario is implemented into the model of the European electricity economy called ATLANTIS. This model is developed at the Institute of Electricity Economy and Energy Innovation/Graz University of Technology (IEE). This chapter briefly describes the ATLANTIS model and the implementation of the ST scenario.

2.1 ATLANTIS

ATLANTIS is a techno-economical simulation model, that combines a physical and an economic model approach. The physical model approach is used for the calculation of the load flow using a direct current (DC) load flow method. It includes information about the power plants, lines, nodes with demand distribution and more. The economic model approach includes information about (electricity-) companies, fuel prices, inflation and more to calculate electricity trading between companies, market prices as well as balance sheets and profit and loss accounts for the included companies. ATLANTIS includes four types of market models:

1. *Cu-Plate Model*: No load flow (Copper plate over whole Europe); no Net Transfer Capacities (NTCs) between countries
2. *Zonal Pricing Model*: No load flow (Copper plate for each country) with NTCs between the countries
3. *Total Market Model*: With load flows but without NTCs
4. *Redispatch Zonal Pricing Model*: With load flows and NTCs

The Redispatch Zonal Pricing Model (RDZP-Model) is used for the simulation in this paper because it best reflects the reality. Further information about the ATLANTIS model can be found in [6].

2.2 Implementing the Sustainable Transition scenario

ATLANTIS has a comprehensive database of existing power plants and lines which has been compiled in extensive researches and is constantly updated. The following countries are included for this simulation (as can also be seen in Fig. 1): Albania, Austria, Belgium, Bosnia-Herzegovina, Bulgaria, Croatia, Czech Republic, Denmark, France, FYR of Macedonia, Germany, Greece, Hungary, Italy, Kosovo, Luxembourg, Montenegro, Netherland, Poland, Portugal, Romania, Serbia, Slovak Republic, Slovenia, Spain and Switzerland.

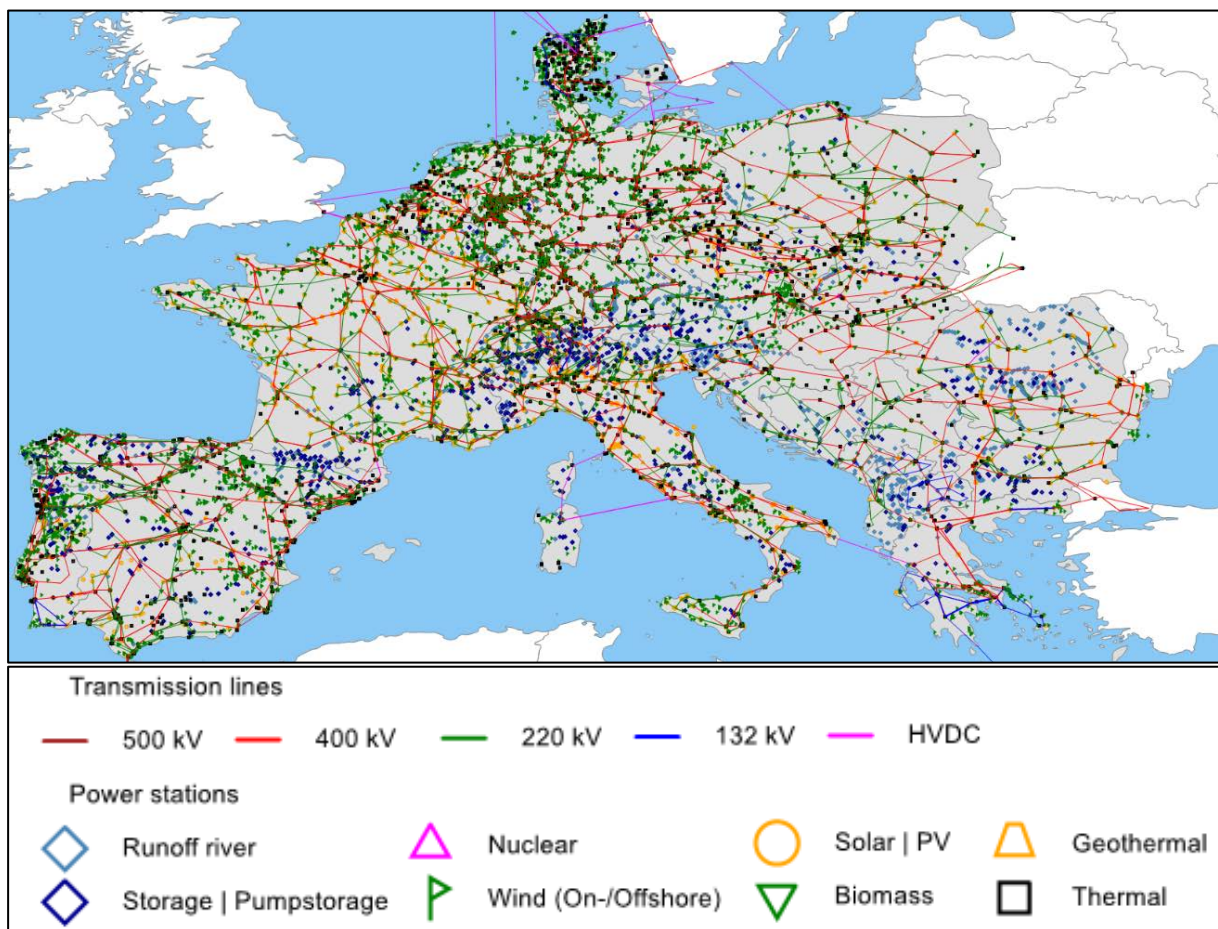


Fig. 1: Countries included in the simulation with the implemented power plants and nodes in the year 2018

Based on the hourly load profiles of the ENTSO-E for 2020, 2025 and 2030 [7], which contain all additional consumers such as e-mobility, heat pumps, etc., the annual demand is calculated and linear interpolated between those years. The annual consumption of all the countries included in the simulation can be seen in Fig. 2. The ST scenario envisages slightly higher consumption growth until 2020 and then slightly lower growth due to effective energy efficiency measures.

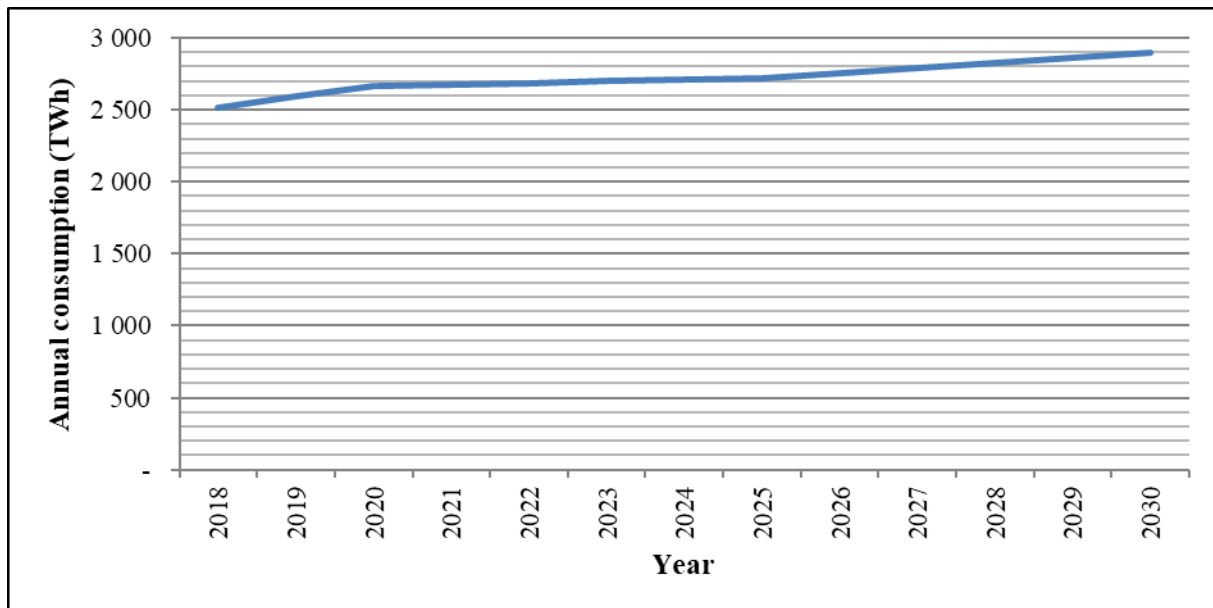


Fig. 2: Annual consumption per year for all the countries included in the simulation according to [7]

The installed capacities are modelled based on the generation capacities per country of the TYNDP 2018 [7] in ATLANTIS. The development of the installed capacity for the countries included in this simulation is shown in Fig. 3. It can be seen that the installed capacities of coal and gas-fired, as well as nuclear power plants decrease, whereas the capacities of renewable energies like solar and wind are increased.

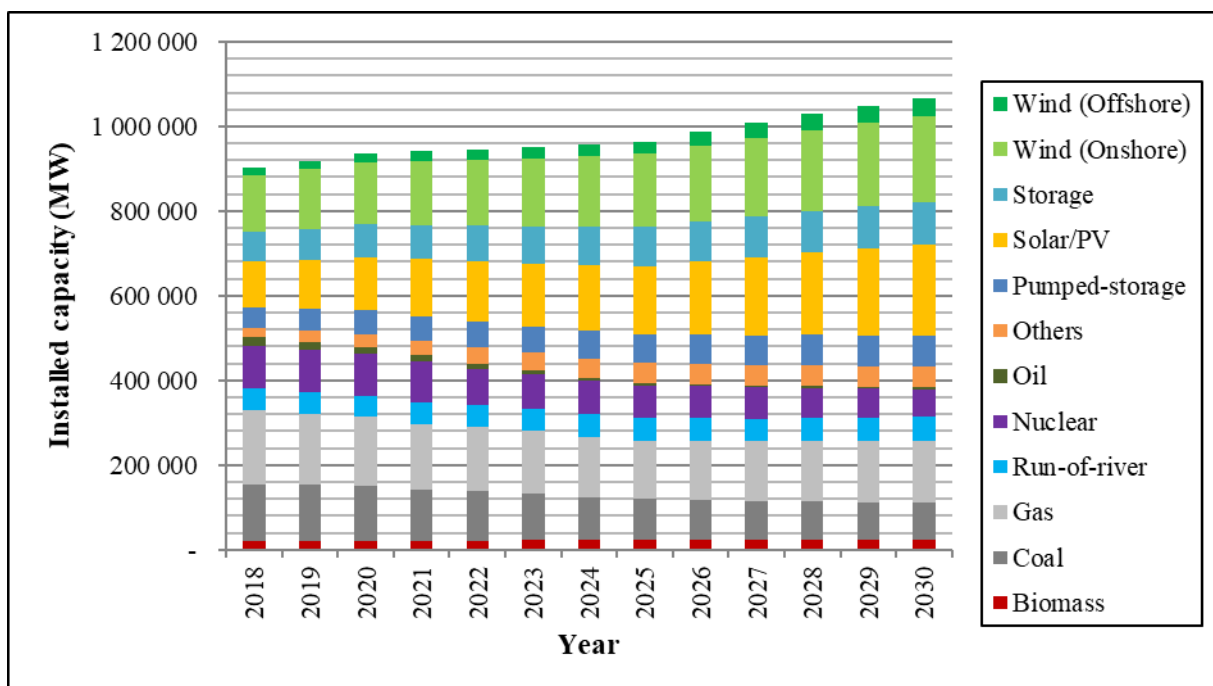


Fig. 3: Development of the installed capacity for the countries included in the simulation

As shown in Fig. 4 the share of coal-fired power plants splits nearly in half from about 15% in the year 2018 to about 8% in the year 2030. Also, the share of gas-fired power plants decreases from 19.5% to 13.7% and due to the shutdown of old nuclear power plants and the German nuclear phase-out until 2022, the share of nuclear power plants also decreases from 11% in 2018 to 6% in 2030. On the other side the share of renewable energies increases from 49.5% in the year 2018 to 67% in 2030. This is mainly due to the addition of wind and solar/PV power plants. The increase of new hydropower and biomass power plants is relatively low.

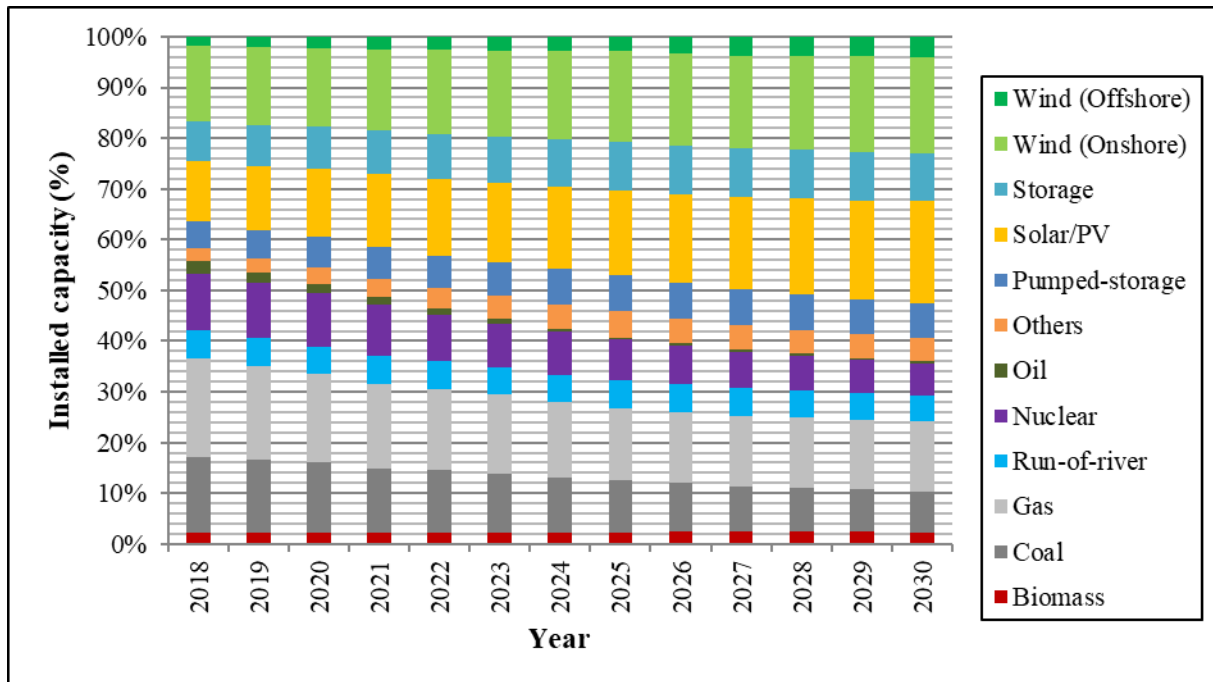


Fig. 4: Development of the share of the installed capacity by type

For every power plant type a fuel type with corresponding prices has to be included in ATLANTIS. The development of the fuel prices according to the ENTSO-E scenario [8] can be seen in Fig. 5. It shows a significant price increase for light and heavy oil after 2025 and a steady price increase for gas after 2020. The prices for lignite, hard coal and uranium remain nearly constant.

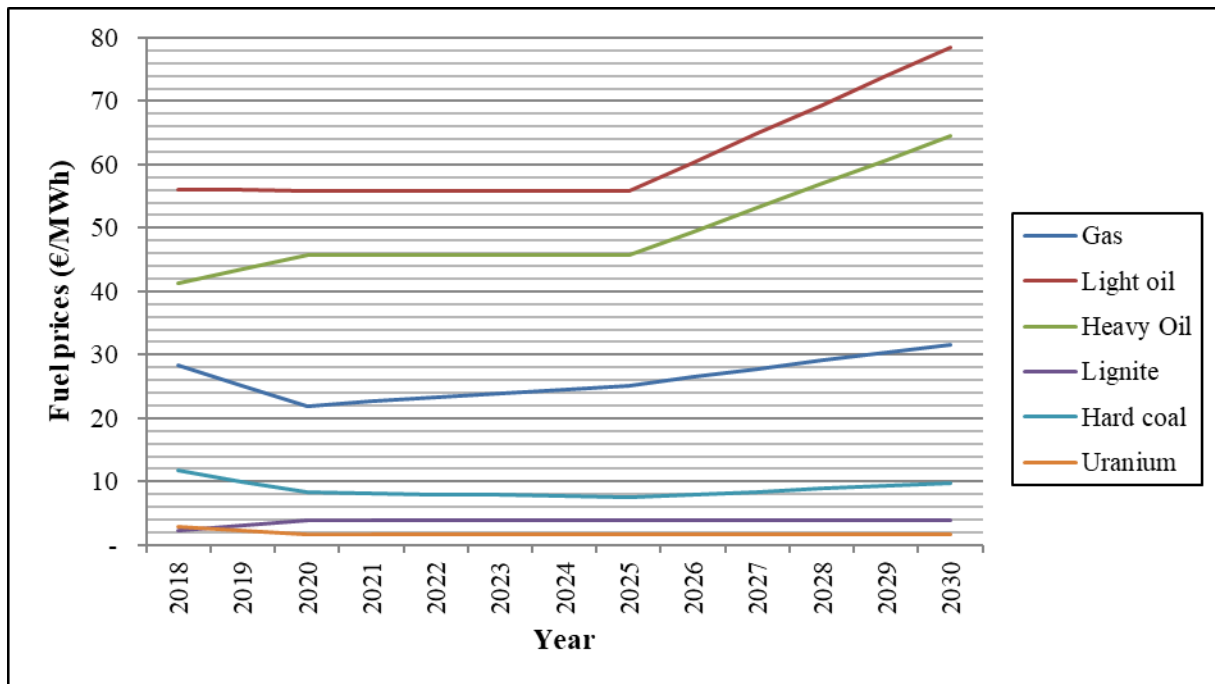


Fig. 5: Development of the fuel prices until 2030 according to [8]

In order to be able to calculate the production costs of thermal power plants correctly, beside the fuel prices the price of CO₂ is also important. As shown in Fig. 6, the price of CO₂ is currently relatively low, but the ENTSO-E expects rising CO₂ prices, especially from 2020 onwards [8].

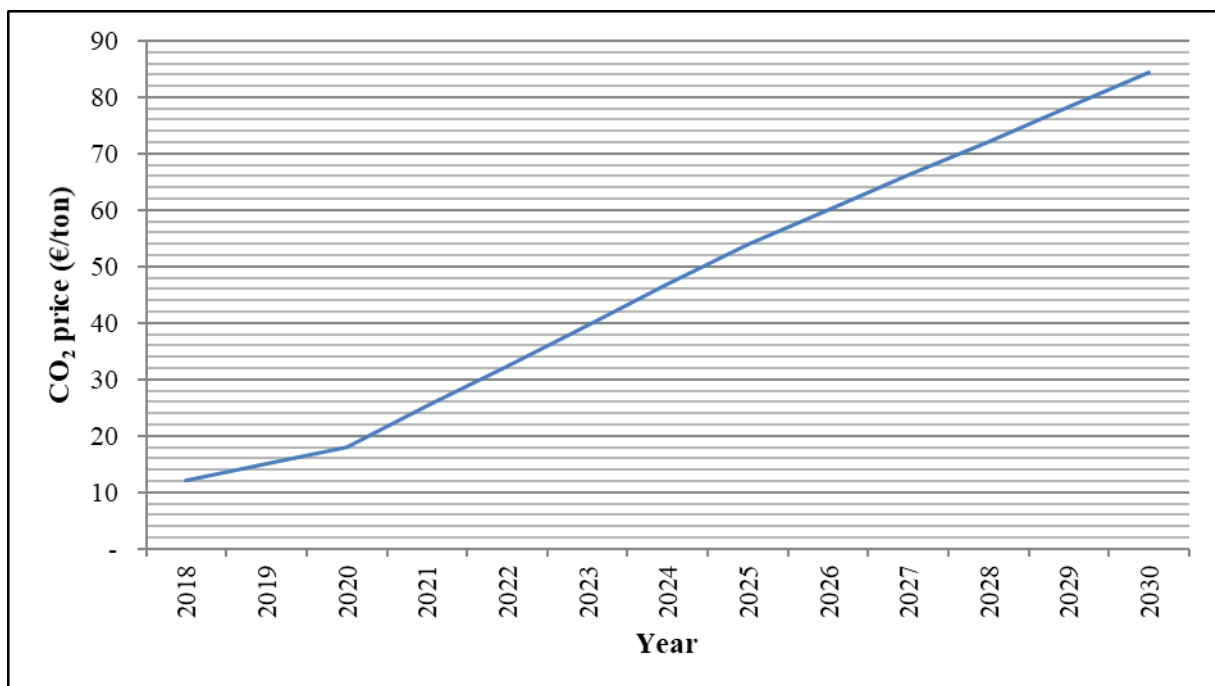


Fig. 6: Development of the CO₂ price until 2030 according to [8]

3. RESULTS

As can be seen in the breakdown of the total produced electricity per production technologies in Fig. 7, the total energy production from coal and gas-fired power plants stays nearly constant, but a shift from coal to gas power plants can be seen. This matches the goals of the scenario as described in chapter 1, that coal-fired power plants are increasingly replaced by gas-fired power plants. Besides solar/PV and wind especially waste-fired power plants, geothermal power plants, tidal power plants and other power plants that are not classified in the existing power plant categories (summarized in the category Others) see an increase in production until 2030

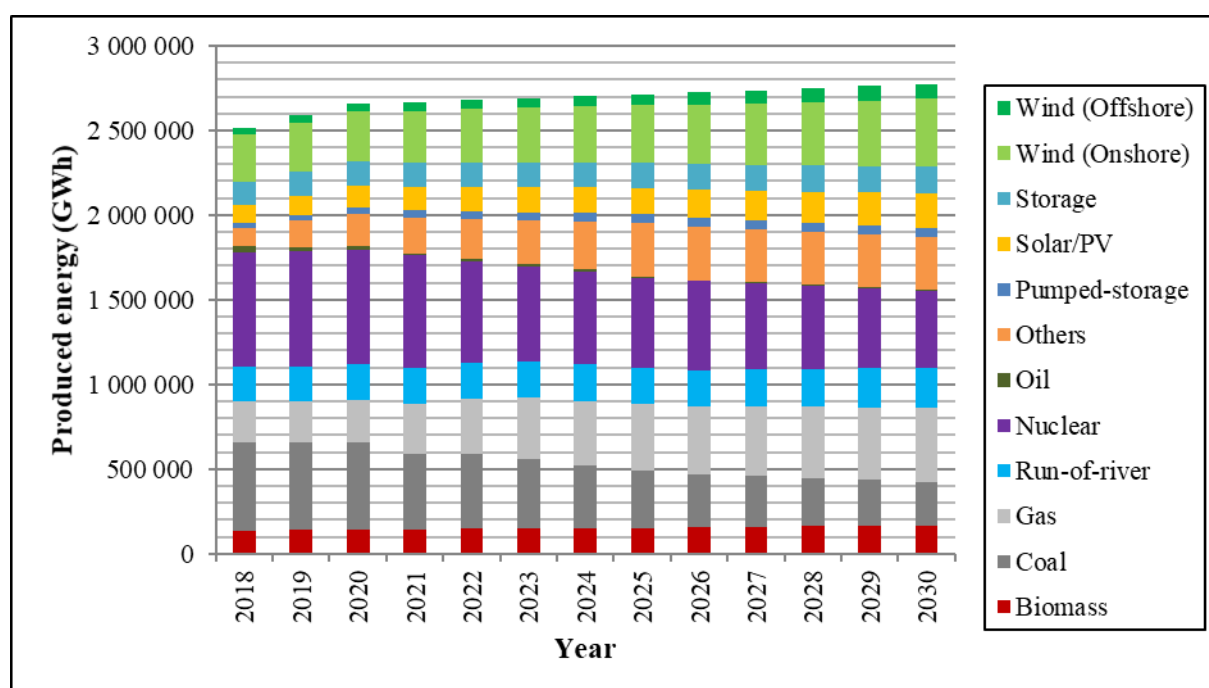


Fig. 7: Produced energy by type until 2030

Compared to the Table I, the goals of the share of renewable energies of 8% solar/PV and 20% wind cannot be reached in this simulation as is shown in Fig. 8. The share of wind reaches 17.5% and the share of solar/PV reaches 7.5% of the total produced electricity. Beside coal-fired power plants, which drop from 20.8% of share in 2018 to 9.1% in 2030 also the share of nuclear power plants decreases from 27.1% to 16.3% in the same timeframe. Gas-fired power plants take over a big share of the coal-fired power plants and see an increase from 9.7% in 2018 to 15.9% in 2030.

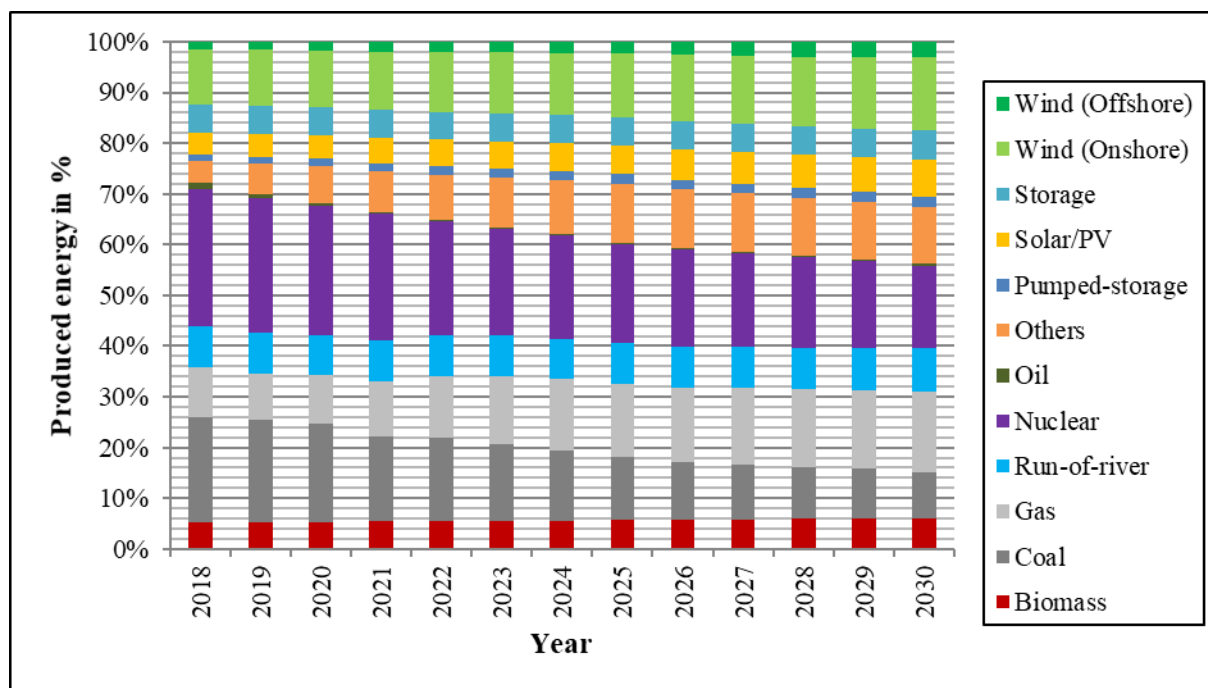


Fig. 8: Development of the share of produced energy by type

The shift away from coal-fired power plants to gas-fired power plants and renewable energies also has an impact on the CO₂ emissions. Fig. 9 shows a reduction of CO₂ emissions by 33.8%.

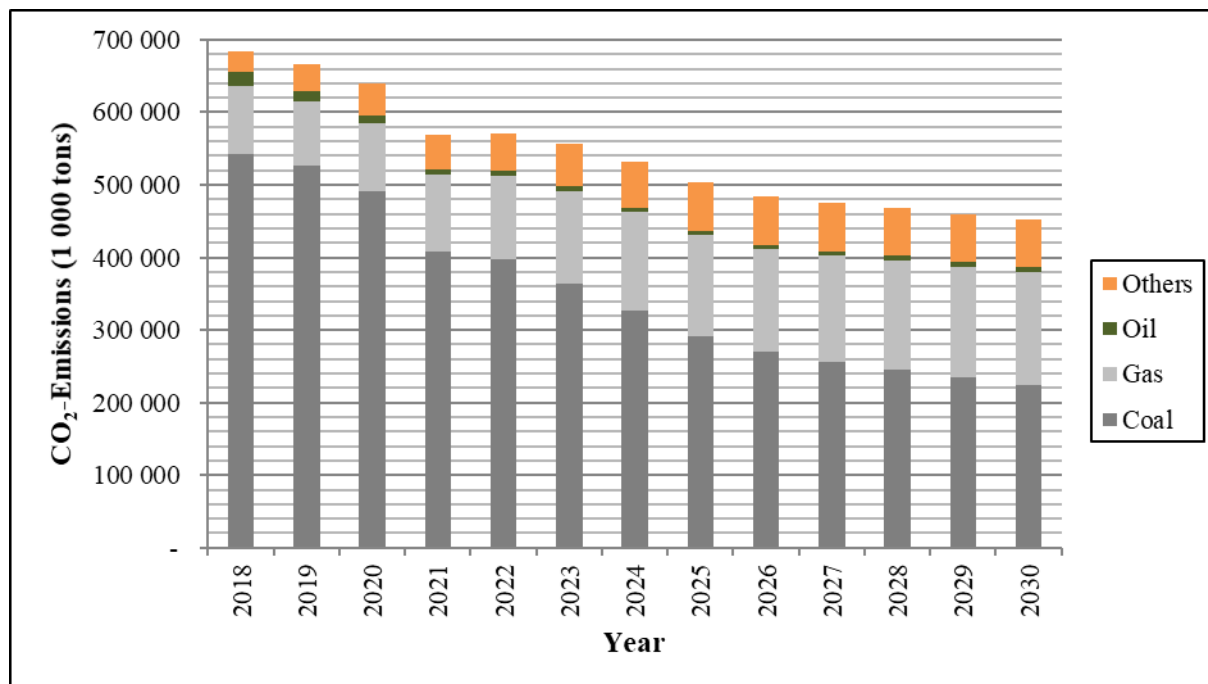


Fig. 9: CO₂ emissions per power plant type until 2030

4. SUMMARY

The scenario *Sustainable Transition* assumes that the share of coal-fired power plants will be reduced by 2030. This is due to the closure of old coal power plants as well as assumed higher CO₂ prices, which should make coal power plants increasingly unprofitable. As can be seen in this simulation, this is true with the assumptions made in this scenario as the share of coal-fired power plants is increasingly shifting towards gas-fired power plants and renewable energies. It should be mentioned that the assumptions of the ENTSO-E are plausible, as the example of the CO₂ price shows. The CO₂ price has already risen sharply in recent months (as of March 2019) and is currently even above the expectations of ENTSO-E for 2019.

Also, the share of renewable energies (Table I) could be realistic, although they couldn't be reached in this simulation. This is due to the fact, that not all the countries that the ENTSO-E includes in their scenarios are included in this simulation. Especially the northern countries like Norway, Finland and Sweden but also the United Kingdom and Ireland have big wind potentials and thus could be the tipping point for achieving the target for wind power.

The simulation also shows, that the impact of renewable energies and the shift from coal to gas power can be seen in terms of a remarkable reduction in CO₂ emissions which should help to mitigate the climate change.

5. REFERENCES

- [1] ENTSO-E, "TYNDP2018 - Scenario Report," 2018. [Online]. Available: https://docstore.entsoe.eu/Documents/TYNDP%20documents/TYNDP2018/Scenario_Report_2018_Final.pdf. [Accessed 20 01 2019].
- [2] Commission of the European Communities, "Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions - 20 20 by 2020, Europe's climate change opportunity," COM(2008) 30 final, Brussels, 2008.
- [3] Commission of the European Communities, "Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions - A policy framework for climate and energy in the period from 2020 to 2030," COM(2014) 15 final, Brussels, 2014.
- [4] Commission of the European Communities, "Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions - A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050," COM(2011) 112 final, Brussels, 2011.
- [5] European Commission, "2030 climate & energy framework," 2018. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en. [Accessed 07 03 2019].
- [6] H. Stigler, U. Bachhiesl, G. Nischler and G. Feichtinger, "ATLANTIS: techno-economic model of the European electricity sector," *Central European journal of operations research*, vol 24, no. 4, pp. 965–988. DOI: 10.1007/s10100-015-0413-8, 2016.
- [7] ENTSO-E, "Maps & Data," 2018. [Online]. Available: <https://tyndp.entsoe.eu/maps-data/>. [Accessed 08 03 2019].
- [8] ENTSO-E/ENTSO-G, "TYNDP 2018 Annex II Methodology," [Online]. Available: https://docstore.entsoe.eu/Documents/TYNDP%20documents/TYNDP2018/Scenario_Report_ANNEX_II_Methodology.pdf. [Accessed 19 11 2018].

AUTHORS' ADDRESS

Dipl.-Ing. Robert Gaugl

Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Udo Bachhiesl

Dipl.-Ing. Christopher Pansi

Graz University of Technology, Institute of Electricity Economics and Energy Innovation
Inffeldgasse 18, 8010 Graz, Austria

Tel: + 43 316 873 - 7904 Fax: + 43 316 873 - 107904

Email: robert.gaugl@tugraz.at

ANALYSIS OF DIFFERENT WIND ASSESSMENTS FOR RURAL AREAS IN EGYPT AS PART OF A RENEWED LOCAL ENERGY STRATEGY

Michael PUTTINGER, Udo BACHHIESL

ABSTRACT

The energy economy in Egypt is in transition. Especially consumers who are running their energy production based solely on fossil fuels are forced to start thinking about alternative possibilities. Egypt offers a big potential of sun and wind energy, while the top wind sites in Egypt are well documented and assessed in terms of wind energy, rural areas are still neglected in any climate assessment.

At the same time wind power in Europe develops very fast based on the European energy goals and the intensive subsidisation in many European countries. After the subsidisation period the used wind turbines are often replaced by bigger and more powerful ones, which offers the opportunity of a prolonged use of those used wind mills.

Following a 13 months measuring period a data analyses showed that the wind speed was not as expected. The theory that the available wind data is not accurate proved to be true for this site. A comprehensive site assessment showed negative economical feasibility, even with the approach of installing refurbished second hand turbines of central Europe. Nevertheless different scenarios with better wind sites, which are very likely to be present in other rural areas of Egypt, can display economic feasibility.

1. INTRODUCTION

This paper is about the feasibility of refurbished wind turbines in Egypt. This approach would result in a minimization of investment costs, while local human resources could be trained for doing necessary maintenance works, adding further value to respective communities. Especially the replacement of existing diesel generators should be targeted since the price for the operation has doubled in the last two years and further price increases are expected as a consequence of the reduction of the fossil fuel subsidisation in Egypt.

The existing wind atlas shows that Egypt offers a lot of potential sites with high wind speeds, but there are also many areas which should be investigated in depth. Local thermal wind systems which exist in the area of the Red Sea as well as near the Nile region are not well documented so far.

Within this project a wind measuring station is placed at a site with a potential local wind system, a certain electricity demand and the according technical infrastructure. The area Fayoum Oasis, which is located 100 km south of Cairo, also called "the garden of the capital"

is chosen therefor. Agriculture is the major economic sector and has a high energy demand for irrigation and food production processes.

For the wind measuring at the chosen site sensors, data logger and software were prepared following Austrian bestpractice and a 30 meters measuring mast was constructed with the help of local welding workshops. A special selfmade data logging system allows a standalone online data streaming and web based data analysis.

2. THE EGYPTIAN ENERGY ECONOMY

The Egyptian Energy economy is highly dependent on fossil fuels. More than half of its energy demand is covered by natural gas, nearly 45% is covered by primary and secondary oil. [1] As in many Arab countries, Egypt based its energy supply on fossil fuels, since it exported oil products in the past. The subsidization of fossil fuels was a very common principle of the Arab regimes and made any renewable energy developments less competitive. In the year 2010 Egypt switched from an oil exporting country to an oil importing country. This undertaking caused massive price increases on the governmental expenses. In the year 2014 the amount of governmental expenses on fuel subsidies was greater than the combined expenditures spent on health and education in the same time. [2]

Due to a renovation of the electric power supply following a massive supply problem several gas-fired power plants were newly installed and added urgently needed power to the grid, further decreasing the oil driven supply share.

Caused by the fast population growth and the induced increase of energy demand Egypt switches more and more to gas and renewable sources for electricity production as can be seen in Figure 1.

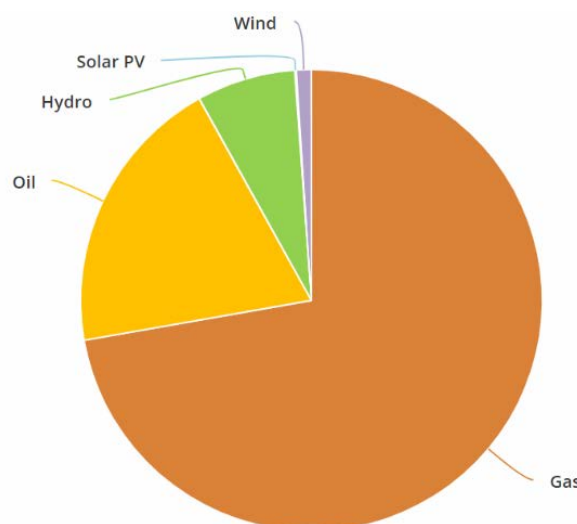


Figure 1: Share of electricity generation by fuel, Egypt 2016 [1]

The electricity market is mainly dominated by the Egyptian Electricity Holding Company (EEHC), which owns about 90% of all generation facilities and nearly 100% of transmission and distribution facilities. Nonetheless there are also private owned generation facilities which have contracts with the EEHC. The Egyptian Electric Utility and Consumer Protection Regulatory Agency (EgyptEra) takes the regulatory role between different parties from generation, transmission and distribution. They ensure availability of supply to consumers and set the price levels of different consumer sizes. Especially with the fast rise of renewable energy plants several proposals of an electricity market reform are in discussion with the aim of an unbundled structure. [3]

Caused by the fast increase in oil demand, Egypt switched from an oil exporter to an oil importer in 2011, as shown in Figure 2. As this expensive undertaking stressed the national bills, the subsidisation system of fossil fuels was revised, and the exit strategy of the subsidization was announced. The government has foreseen a total fossil fuel subsidization end until the end of 2021. So far, fuel prices doubled twice in the previous two years and are likely to rise again in July 2019. [4]

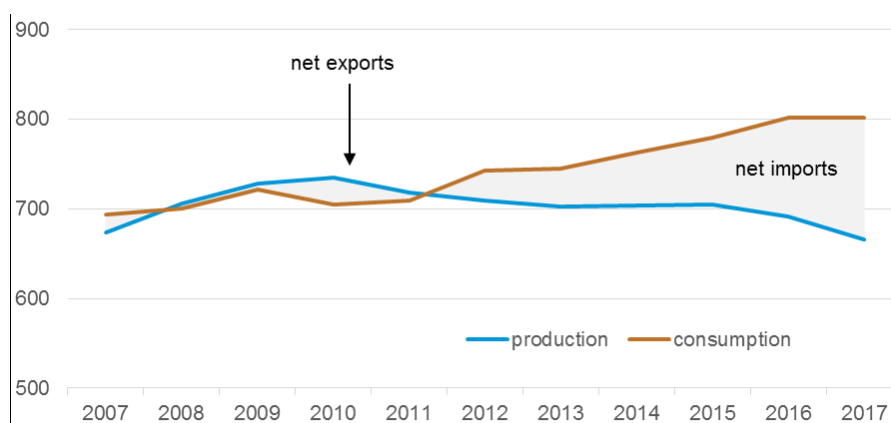


Figure 2: Annual oil production and consumption in Egypt, in thousand barrels per day [5]

Because of the cut of subsidies for fossil fuels, energy prices are rising fast, both direct fuel prices as well as dependent electricity rates. Especially large-scale users, e.g. larger SMEs (Small and Medium-sized Enterprises), are affected dramatically by the price increase while the electricity costs for small private households are rising slowly.

3. WIND RESOURCES

Wind is the movement of air, which is caused by pressure differences due to the sun irradiation and is influenced by a huge variety of earth surface and atmospheric parameters. Thus, wind at a certain site or area is always a product of more than one input effect, depending on the surrounding parameters. Especially Egypt is a region where the different wind systems have to be considered. Due to the position 30-degree north of the equator the atmospheric circulation called "Hadley cell" causes the north-east to north-west Passat trade winds. The north Passat is affecting Egypt's climatology throughout the year, from north to south it is turning from north-west to north-east winds. [6] The changing orography of the land between

The infinite values and input parameters therefore do not allow to predict or detect the current wind speed over an area, rather wind analyses are the product of grid-based models of certain observations, combined with meteorological satellite data.

To start a resource assesment at a certain site it is necessary to conduct a survey, analysing all available wind data.

The Egyptian wind atlas, shown in Figure 3, is based on two input parameters, an observation based model and numerical long-term reanalysis data. The stations for observations were mainly placed on the Mediterranean and red-sea coast and in populated areas. The black dots in Figure 3 show the positions of the meteorological stations used for the wind atlas of Egypt.



A second approach for the wind atlas modelling was a long-term reanalysis data model by NCEP/NCAR¹ which offered plenty of climate parameters through a numeric atmospheric model scheme. This 3D-grid of atmospheric states was based on radiosondes and weather satellites. The resolution of this data grid varies, depending on the location, between 5 and 7,5 km.

Information about the long-term, large-scale meteorological situation over Egypt was obtained from the NCEP/NCAR reanalysis data-set. Time-series data of wind and temperature profiles for the period 1965 to 1998 were used to create around 100 different large-scale wind situations or wind classes. These wind classes form a representative set of wind conditions for the region and represent different wind speeds, wind directions, atmospheric stability or shear. [8]

3.1.2 NASA'S MODERN-ERA RETROSPECTIVE ANALYSIS FOR RESEARCH AND APPLICATIONS (MERRA)

MERRA is a further development of the before used NCEP. The provided data is (like in earlier Versions) open to use and allow a wide scope of climate observations. [9] It shows some advantages compared to earlier versions. Beside the longer statistical series (1979-2010) with continuous improvement of measured parameters and output quality, a higher resolution (1 x 1 km) are additional benefits. The online tool called "Global wind atlas" allows an illustrative and numerical entering of this data. [10]

Figure 4 shows a graphical output of the available "Global Wind Atlas" for Egypt. The shown wind speeds, (vary in different colours) already reveal several differences compared to the existing wind atlas. Inspections in chosen sights are also available.

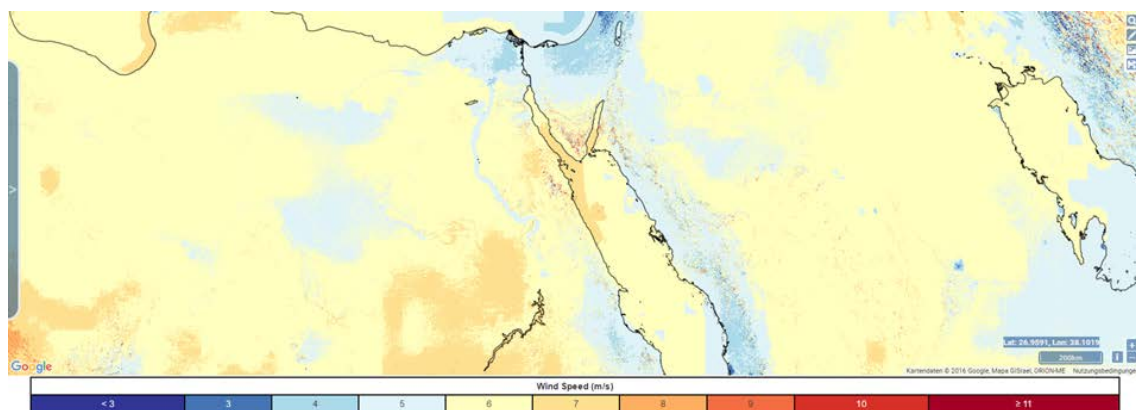


Figure 4: Egyptian mean wind speed MERRA, 50m o.g.l.

An example of data output for a feasibility analyses is made for the region Fayoum shown in Figure 5. MERRA allows sector wise analyses of wind direction and speed and already provides Weibull parameters for further calculations.

¹ Based on observations and numerical weather prediction, the NCEP, National Centers for Environmental Prediction, Reanalysis and the NCAR, National Center for Atmospheric Research, Reanalyses are continually updated data sets representing the atmospheric climatic state of the Earth.

It is divided in different surface roughness layers and available in three different heights (50m, 100m, 200m o.g.l). For the graphical wind atlas (see Figure 4) are different orographic models used to find the right surface roughness – regarding these models, the most suitable roughness for the area Fayoum would be 0,030m.

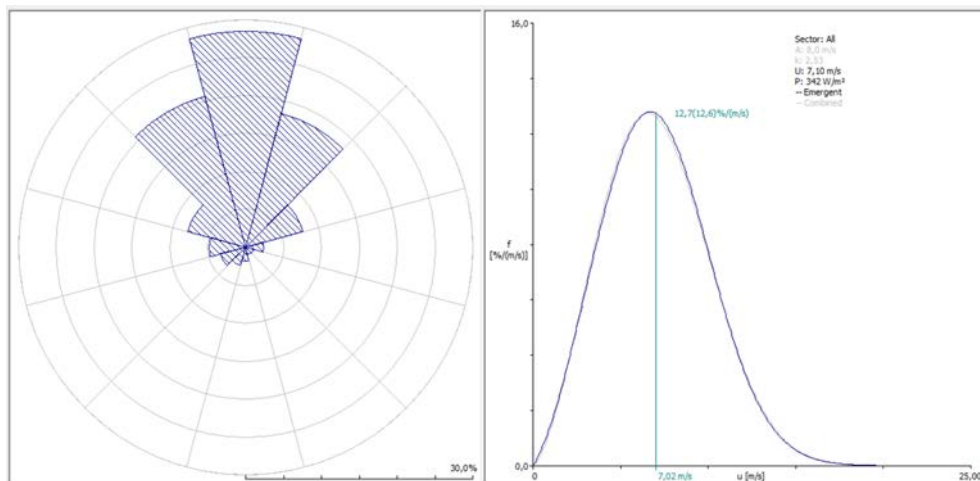


Figure 5: Mean wind speed and direction in the region Fayoum, MERRA data analyses with WASP²

3.2 Wind measuring

To get clarity, which wind conditions are present on a specific site, a wind measurement is essential and, as limited accuracies were pointed out, this can not be replaced by any climate observation model by now. The aim is to have a clear picture of what a potential wind turbine can generate out of this present flow of air. Most accurate systems are measuring wind conditions in several heights and are as tall as a future wind turbine (hub height) would be. The time series are analysed for several years to consider seasonal effects. Such systems are costly and come with the risk that something can fail or the site assessment can be negative. In many cases such a measurement of the wind is not possible because of very exposed sites or because of economic and financial reasons. Therefore adaptations in slimmed measuring set ups are possible with additional extrapolation of the data.

The strategy to generate input data for this study was to get an accurate enough result to decide if a wind turbine with hub height from 50 to 70m would be feasible. Any mast bigger than 30m was not feasible nor technically appropriate. To extrapolate the wind conditions in a later stage up to a hub height of 50 m, an anemometer was mounted also in 20m, additional to the one in the top at 30m. Wind assesment analyse methods enable to calculate wind speeds higher than the top anemometer in a following step.

² Wind resource assessment software suite by Technical University of Denmark Wind Energy Dptmt.

4. WIND SITE ASSESMENTS

Before installing a wind turbine in an area, a site assessment is necessary and usually done with a wind measurement in a certain height. Such a measurement logs wind speeds in one or several heights and logs other characteristic parameters like wind direction, temperature and solar irradiation.

Mean values of 10 minutes have shown a sufficient accuracy and are defined by the Measnet Standard. So far, data rows of 13 months were collected. Calculated monthly mean values are shown in Figure 6. Such monthly values are often available through retrospective analyses and weather data but can diverge from measured data. To compare the different input data it needs to be referred to one same height, which is in this case 50m over ground level, o.g.l.

The extrapolation from 30m to 50m height is calculated with the Hellmann exponent α [11]

$$\alpha = \frac{\ln \frac{v_{z1}}{v_{z2}}}{\ln \frac{z_1}{z_2}} \quad (1)$$

v_{z1} ...windspeed at height 1 (upper anemometer)

v_{z2} ...windspeed at height 2 (lower anemometer)

z_1 ...height 1

z_2 ...height 2

and the Hellmann equation [11]

$$v_H = v_{H_{ref}} \cdot \left(\frac{H}{H_{ref}} \right)^\alpha \quad (2)$$

v_H ...windspeed at height of turbine nacel

$v_{H_{ref}}$...windspeed at reference height

H ...height of turbine hub

H_{ref} ...reference height

The figure below shows how the measured wind diverges from the given dataset.

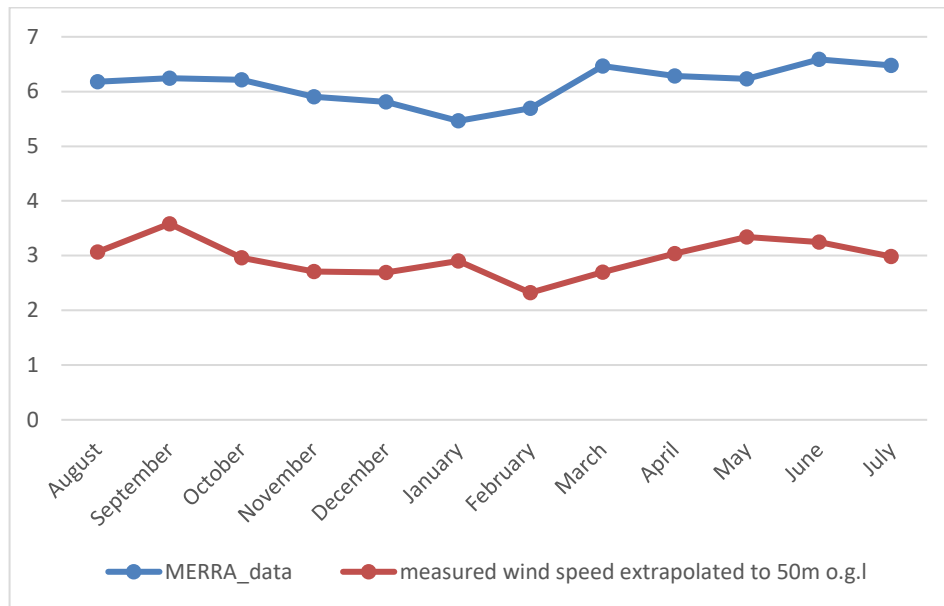


Figure 6: Monthly mean values at project site in m/s. Measured vs. retrospective data

To calculate the energy output of a turbine its necessary to sum up the hours with certain wind speeds and generate a histogram, where the wind speed is at the x axes and the number of hours in the y axes like shown in Figure 7. The data of the month September is chosen for demo purpose. It showed the most promising wind speed. A full year analyses has to be prepared before a valuable economic analysis can be done. The shape of the produced histogram can be analysed with the so-called Weibull distribution. This factor allows a comparison between several wind sites (monthly datasets, different sites) and typically comes with few shapes and scale factors, which enables a mathematical description of the measured curve and an easy handling for further calculations. [12]

The Weibull function is defined as following:

$$f(V) = \frac{k}{A} \cdot \left(\frac{V}{A}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{V}{A}\right)^k} \quad (3)$$

k ... Shape parameter of the Weibull function, which defines the curve most suitable to the measured wind distribution

A ... Scale parameter of the Weibull function

V ... Wind speed

The blue colour in Figure 7 shows the wind data histogram for one test month

To match a Weibull function to the given wind data histogram the scale parameter A has to be calculated out of following equation:

$$v_w = A \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (4)$$

v_w ... mean windspeed

Γ ... Gamma function

To get the Weibull distribution for a dataset it is the best principle to start with a fixed shape parameter of $k = 2$ and calculate the shape factor A with k fixed and the mean value from the raw data. This usually does not match very accurate to the original input function and needs further adjustments. One possibility to do so is to compare the calculated wind power density of the original data set with a calculated wind power density from a produced Weibull function.

The power density, in some sources called specific energy flux E_{spec} is defined by the following equation:

$$E_{spec} = \frac{1}{2} \rho \cdot v_w^3 \quad (5)$$

ρ ... air density

The variable, which needs to be adjusted until the given power density is reached, is the shape factor k . Using a solver e.g. in MS Excel saves time to find the most accurate curve. In this case the optimised k is at 3.01226 as shown in Figure 7 in red colour.

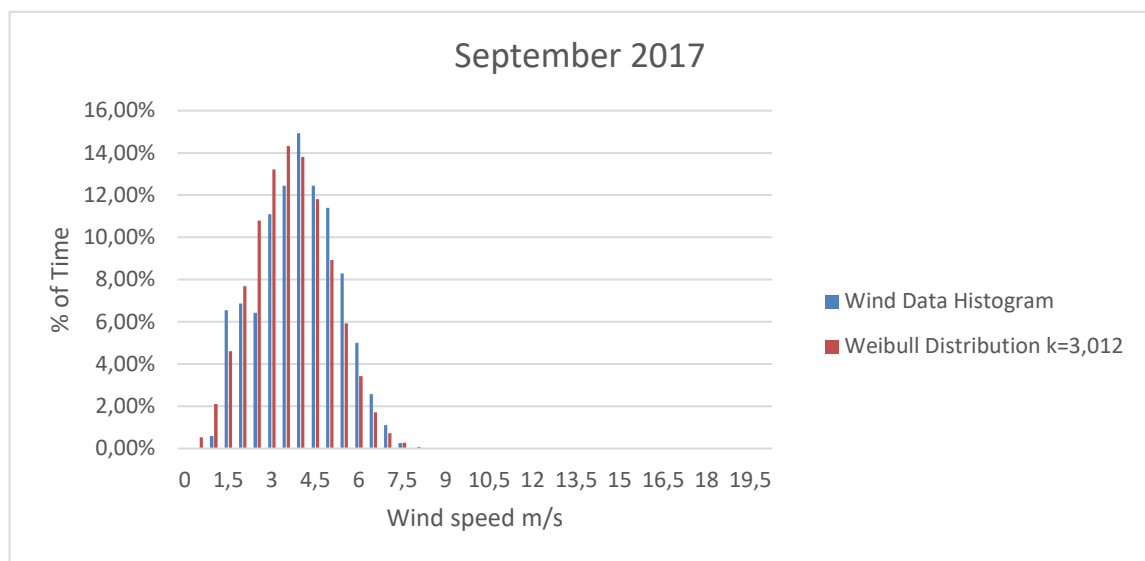


Figure 7: Wind histogram and matched Weibull distribution to wind data with $k=3,012$

The matched Weibull distribution allows to describe with a few numbers thousands datasets of the month September in a very accurate way, furthermore it makes it easy to calculate the electrical power output of a turbine with the following equation:

$$P_{el} = \int_{v_{min}}^{v_{max}} \frac{1}{2} \rho \cdot S_{rotor} \cdot c_p(V) \cdot V^3 \cdot f(V) dV \quad (6)$$

S_{rotor} ... circular area of the rotor

$c_p(V)$... power coefficient of a specific wind turbine

The mentioned c_p value is given by a turbine manufacturer. As an example for this calculation, the wind turbine Enercon E40/6.44 has been used. It's energy production characteristics can be seen in Figure 8.

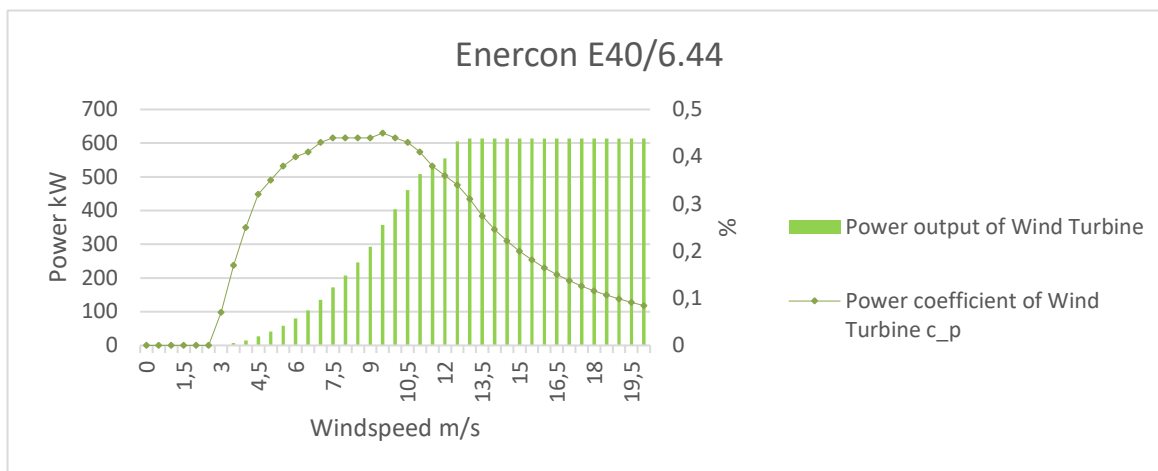


Figure 8: Wind turbine characteristics Enercon E40/6.44

Since we are in possession of the full wind resource datasets and the power output curve of the wind turbine, we are able to calculate the integral of the power output manually with the curve overlay. For the power output the measured share at each wind speed bin is multiplied with the related turbine output. Multiplied this number again with the hours of the month is equal to the produced energy of this month.

Figure 9 shows the energy output of the turbine. The monthly energy output needed for financial and economic analyses is the sum of the energy output at each wind speed bin.

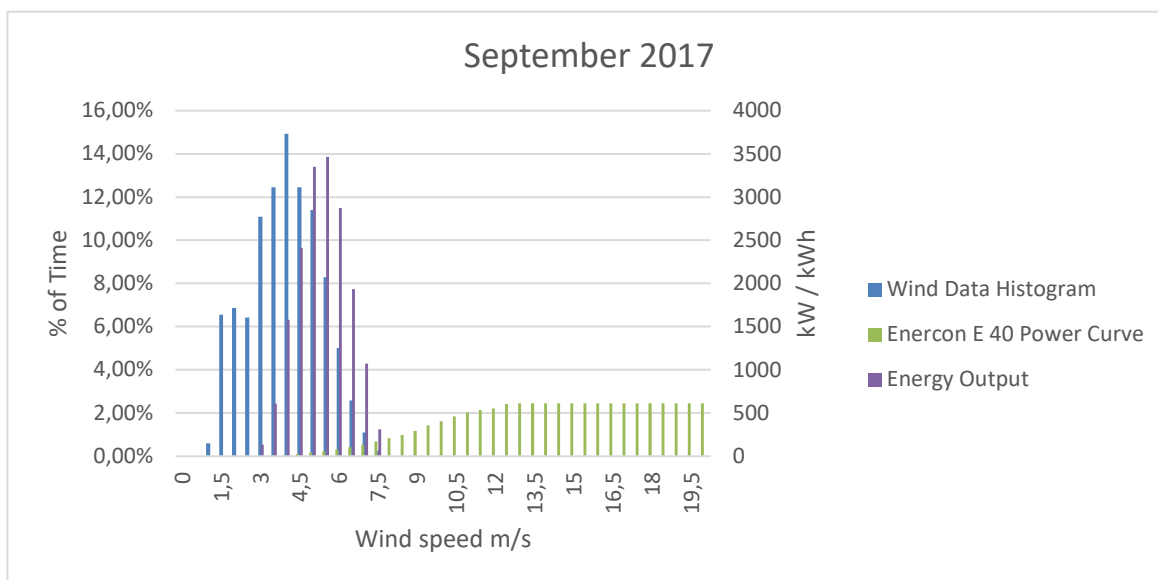


Figure 9: Energy output of the wind turbine

This method seems to be the most accurate possibility to calculate the power and energy output and is used in the most common software tools for wind assignments, namely Ret Screen, WindPro and Wasp as long that they have the resources like measured data.

5. CONCLUSION

The available wind data in Egypt comes with uncertainties, the Egyptian wind atlas shows low resolutions, especially in rural areas, and thus works with data rows which are at least 20 years old. Nevertheless, it provides an overview of potential good wind areas of Egypt. Modern available tools like the global wind atlas or the MERRA data discover in most cases the same areas as potential sites, but are more conservative in terms of absolute wind speeds. They seem to display higher accuracy due to longer data rows and better input data, but still are not as good as e.g. in Europe where the basic input data is much better.

Because of the identified uncertainties of available wind data, it seems obvious that a wind measurement is crucial for proper assessment analyses. This especially gains relevance for areas, away from the well-known coastal regions around Zafarana region.

Measuring wind in Fayoum is a groundbreaking endeavour, because it is an untouched region in terms of wind and weather assessment but has promising orographic specialities like the huge flat green cultivated land and the little desert coloured mountains and dunes what all meet at the shores of lake Qarun. The output of the measuring was unknown with chances to find out that the site is much better than it is mentioned in available wind data. The opposite happened. It turned out that the potential local wind system is less positive than the negative effect of the wind lee site depression region. On the contrary it seems likely that for this area the available wind data, both the wind atlas and MERRA data, is overestimating this site, while still being aware that this was a one year sounding measurement with possibilities to improve the accuracy and significance of its output.

For wind energy site assessment, a most accurate description of the measured data is essential. Every conversion and minimization of parameters would decrease the value of the output at the end. Calculating energy outputs with monthly mean values is nothing more than a rough estimation. The Weibull distribution offers a good possibility to compress the big data sets gained from the measurement (more than 4000 rows per month) to only one distribution function, which can be compared with different sites and time periods. If given, a sum of the real power outputs at each wind speed bin is accurate enough to have a good comparison between sites and turbine types. The resolution for the wind speed bins are mostly given by the turbine data, which was resolved in this example at 0,5m/s. If more accurate data is provided by a manufacturer, a higher resolution at the wind data histogram would mean a higher accuracy which could easily be generated, especially with measured data rows.

6. REFERENCES

- [1] International Energy Agency, „www.iea.org,“ 2016. [Online]. Available: <https://www.iea.org/sankey/#?c=Egypt&s=Balance>. [accessed at 15 11 2018]
- [2] A. A. Paolo Verme, The Quest for Subsidy Reforms in the Middle East and North Africa Region, Springer, 2017.
- [3] Egyptian Electric Utility for Consumer Protection and Regulatory Agency, „Renewable Energy, Feed-in Tariff Projects Regulations,“ Cairo, 2014.
- [4] T. E.-M. Minister of Petroleum, „Egypt's gas production to hit 6.5 billion cu ft/d by 2018-end,“ Egypttoday, 2018.
- [5] U. E. I. Administration, „Country Analysis Brief: Egypt,“ eia, 2018.
- [6] J. I. Craig, “Types of Weather in Egypt,,” Cientific Journal Cairo, Cairo, 1910.
- [7] M. Rizk, „WIND CHARACTERISTICS AND AVAILABLE WIND ENERGY IN EGYPT,“ Trieste, Italy, 1986.
- [8] N. G. Mortensen, “Wind Atlas for Egypt: Measurements, Micro- and Mesoscale-Modelling,,” Roskilde, 2006.
- [9] M. M. Rienecker, “MERRA - NASA’s Modern-Era Retrospective Analysis for Research,,” Journal of Climate (MERRA Special Collection), 2011.
- [10] T. U. o. Denmark, „Globalwindatlas,“ 2010. [Online]. Available: www.globalwindatlas.com.
- [11] E. Hau, Windkraftanlagen, 4. Auflage, Kraling: Springer, 2008.
- [12] S. Stewart, „Wind systems analyses, tutorials and online teaching material,“ Penn State University Wind Energy Institute, 2016.

AUTHORS' ADDRESS

Dipl.-Ing. Michael Puttinger, michael.puttinger@wind-driven.com
Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Udo Bachhiesl, bachhiesl@tugraz.at

Graz University of Technology
Institute of Electricity Economics and Energy Innovation
Inffeldgasse 18, 8010 Graz/AUSTRIA

Phone: +43 (0) 316 873 - 7901
Fax.: +43 (0) 316 873 - 7910

Email: iee@tugraz.at
Web: www.iee.tugraz.at

EKONOMSKO FINANČNA ANALIZA IZRABE TOPLOTE S TOPLOTNO ČRPALKO, GEOSONDO IN SPREJEMNIKI SONČNE TOPLOTE

Klemen DEŽELAK, Jože PIHLER

POVZETEK

V prispevku predstavljamo nekatere vire toplote, ki so lahko potencialno uporabljeni kot dodatni viri za ogrevanje in hlajenje prostorov v energetske-stavbnem kompleksu z obstoječo rešitvijo. Podana je ekonomska utemeljitev smiselnosti investicij za predlagane scenarije energetske oskrbe s toplotno črpalko, geosondo in tudi s sprejemniki sončne toplote. Ekonomsko finančno ovrednotenje je izvedeno s finančno analizo upoštevanja stroškov in prihrankov, ki smo jo izvedli na podlagi pripadajočega denarnega toka investicije.

ECONOMIC FINANCIAL ANALYSIS OF HEAT USAGE WITH HEAT PUMP, BOREHOLE HEAT EXCHANGER AND SOLAR THERMAL COLLECTORS

ABSTRACT

This article deals with some sources of heat, which can be potentially used as additional sources for heating and cooling of the locations in the energy-building complex with an already existing solution. An economic justification is given for the sensitivity of investments inside the proposed scenarios of energy supply with a heat pump, borehole heat exchanger and solar thermal collectors, as well. The economic and financial evaluation was carried out through a financial analysis of costs and savings consideration, which was made on the basis of the respective investment cash flow curve.

1. UVOD

Najnovejši trendi po racionalni rabi energije narekujejo sanacijo raznovrstnih objektov in tudi rabo različnih energijskih virov, ki so na voljo na kraju samem. Poleg ustreznega vzdrževanja objektov je nujna tudi obnova le-teh, kar pa hkrati zajema njihovo energijsko sanacijo. V sklopu tovrstnih prizadevanj je tudi ugotavljanje možnosti izrabe nekaterih drugih razpoložljivih virov energije kot je na primer sončna energija. Obstaja pa tudi možnost uporabe toplotnih črpalk. S tem je namreč mogoče racionalizirati rabo energije bodisi za ogrevanje ali hlajenje tako tehnoloških kot tudi drugih prostorov. Tovrstno investicijo je seveda mogoče vključiti v sistem upravljanja z energijo in bi hkrati predstavljala prispevek k učinkoviti rabi energije.

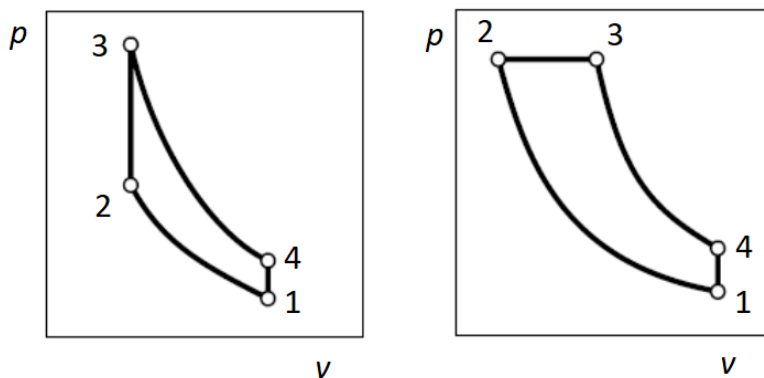
V kolikor se večina objektov nekega kompleksa ogreva na električno energijo predstavlja prvo možnost izboljšanja zamenjava vira in prehod na ogrevanje s pomočjo toplotne črpalke z dodatnim električnim ogrevanjem. Druga možnost je energetska sanacija, kar zajema zamenjavo oken in izdelavo dodatnega zunanjega toplotnega ščita objekta. Tretja možnost je ureditev primerne ogrevanja in hlajenja preko prezračevalnega sistema, medtem ko toplotne črpalke v kombinaciji z geosondami in sončno energijo kot virom toplotne oskrbe objektov predstavljajo četrto možnost. Vsi ti ukrepi so namenjeni zmanjšanju stroškov oziroma upravljanju z energijo stavb in pripadajočih objektov.

V tem delu tako podajamo ekonomsko finančno analizo novih rešitev energetskega upravljanja konkretnega energetskega-stavbnega kompleksa z obstoječo rešitvijo. Podana je ekonomska utemeljitev smiselnosti investicij za predlagane scenarije energetske oskrbe s toplotno črpalko, geosondo in sprejemniki sončne toplote. Ekonomsko finančno ovrednotenje je opravljeno s finančno analizo upoštevanja stroškov in prihrankov, ki smo ga izvedli na podlagi denarnega toka investicije. Grafično so prikazane neto sedanje vrednosti pri spreminjanju prihrankov v obdobju do 30 let.

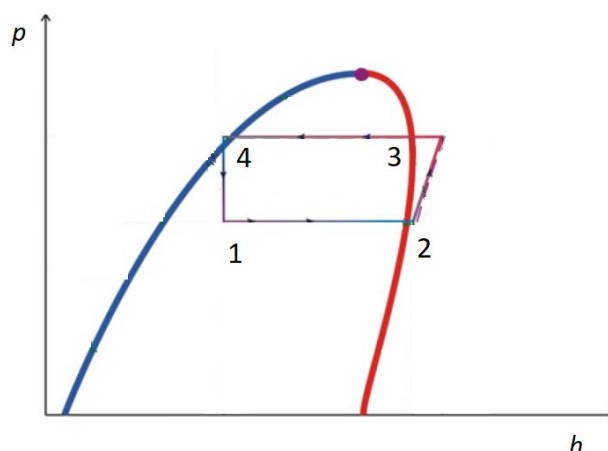
2. TOPLOTNA ČRPALKA

Iz določenega sistema, v katerega dovajamo toploto, je mogoče pridobivati drugačne vrste energije in tudi mehansko delo. Seveda je potrebno vedenje o tem, kako takšen sistem, iz katerega pridobivamo mehansko delo, deluje. Tak proces imenujemo termodinamični krožni proces. Krožni zato, ker lahko delo iz procesa pridobivamo kontinuirano, torej v procesu kroži delovna snov, ki na eni strani sprejema toploto, na drugi strani pa oddaja delo [1].

Krožni procesi so lahko desnosmerni (slika 1), med katere spadajo zgoraj navedeni, s ciljem pridobivanja dela ali levosmerni (slika 2), s ciljem prenosa toplote med dvema hranilnikoma toplote. Seveda je treba takšnemu levosmernemu krožnemu procesu dovesti tako imenovano kompenzacijsko energijo, na primer mehansko delo kompresorja. Treba je poudariti, da se levi krožni proces lahko vodi tako s ciljem ogrevanja kakor tudi hlajenja [1].



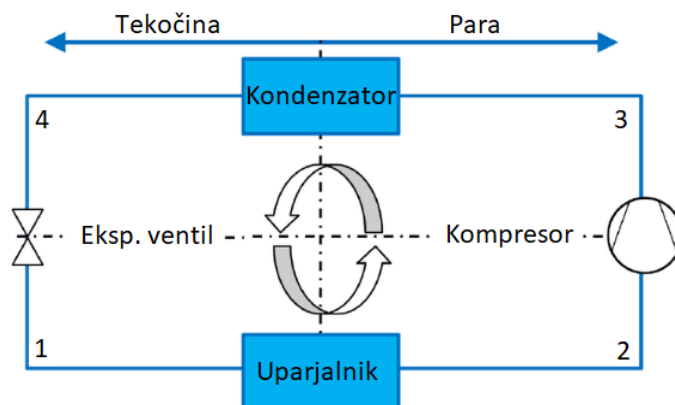
Slika 1: Desnosmerni krožni procesi.



Slika 2: Levosmerni krožni proces.

Krožni proces je torej vrstni red sprememb v nekem sistemu, ki se zaključi v stanju, ki je v termodinamičnem smislu enako začetnemu stanju. Proces se lahko večkrat ponovi. Posledice takšnega procesa so spremembe v okolici opazovanega sistema, kot je na primer prenos toplote ali opravljeno delo. Ker je idealen krožni proces sestavljen iz povračljivih podprocesov, v realnosti ne obstaja. Razlog je seveda v nepovračljivosti podprocesov.

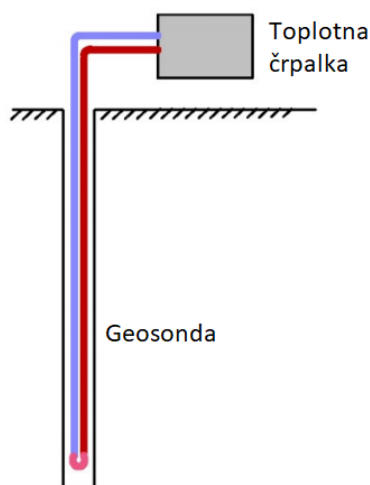
Termodinamični krožni proces, ki ga uporabljamo za ogrevanje s toplotnimi črpalkami (slika 3), je poznan in precej izpopolnjen že od zgodnjih let prejšnjega stoletja. V vsakdanjem življenju ga srečujemo predvsem pri hladilnikih, kasneje so se pojavile klimatske naprave ter nekako istočasno tudi toplotne črpalke za ogrevanje sanitarne vode. Pri teh procesih se uporablja predvsem toplota, ki jo površina zemlje absorbira s sevanjem sonca. Toplotne vire delimo na naravne, z razmeroma konstantnimi temperaturami (površinske in podzemne vode, sončna energija ter slojevita tla) ter z razmeroma spremenljivimi temperaturami (zrak), in umetne (odpadna voda in izrabljeni zrak). Toploto lahko črpamo na več načinov, in sicer iz podzemnih, površinskih in odpadnih voda, kjer uporabljamo toplotno črpalko voda/voda (odprt sistem), iz zemlje na določeni globini, kjer uporabljamo toplotno črpalko zemlja/voda, iz kamenin z vrtnami do večjih globin, kjer uporabljamo toplotno črpalko voda/voda (zaprt sistem) ter iz okoliškega in odpadnega zraka, kjer uporabljamo toplotno črpalko zrak/voda. Lahko rečemo, da je toplotna črpalka naprava za prenos energije iz sistema nižjega temperaturnega nivoja na sistem višjega temperaturnega nivoja, seveda z uporabo dodatnega dela ter ustreznega hladila. Zaradi navedenega so toplotne črpalke primerne kot vir grelne in hladilne moči v sistemih ogrevanja, prezračevanja, klimatizacije in ustrezne priprave sanitarne vode.



Slika 3: Termodinamični krožni proces v toplotni črpalki.

3. GEOSONDA

Pri toplotni črpalki zemlja/voda se kot vir toplote lahko izkorišča toplota zemlje s pomočjo zemeljskega kolektorja ali v vrtino vstavljene zemeljske sonde, oziroma krajše geosonde (slika 4). Pridobivanje geotermalne energije s pomočjo geosond v kombinaciji s toplotno črpalko je vedno bolj zanimivo in tudi finančno sprejemljivo. Geotermalno energijo prištevamo poleg energije sonca, vetra in vode k obnovljivim virom energije. Takšen sistem torej tvorita vrtina s pripadajočimi sondami in toplotna črpalka zemlja/voda. Geosonda je v bistvu toplotni prenosnik, sestavljen iz cevi in vstavljen vertikalno v vrtino. V kolektorju kroži medij (mešanica vode in glikola), ki odvzame toploto okoliški kamenini. V notranjosti kamenin se medij segreje ter se po vzporedni cevi segret vrača na površje [2]. Sistem z geosondo je namenjen široki izrabi geotermalne energije za ogrevanje stanovanjskih in poslovnih prostorov ter za ogrevanje sanitarne vode s pomočjo toplotne črpalke. Uporaben je kot dodatni ali samostojni vir energije v obstoječih sistemih individualnega centralnega ogrevanja in pri novogradnjah [3].



Slika 4: Primer geosonde.

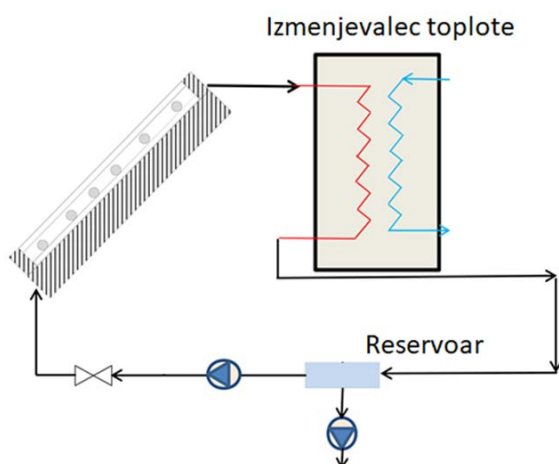
4. SPREJEMNIKI SONČNE TOPLOTE

Sprejemniki sončne toplote (slika 5) zbirajo sončno energijo in z njo grejejo prenosni medij, in sicer na ekonomičen in okolju prijazen način. Najprej so jih uporabljali na vesoljskih postajah, sedaj pa jih zaradi številnih pozitivnih lastnosti uporablja vedno širši krog uporabnikov za ogrevanje sanitarne vode in segrevanje prostorov. Zaradi visokih cen fosilnih goriv, ki jih pogosto uporabljamo za ogrevanje stavb in pripravo tople vode, je vgradnja sončnih kolektorjev precej ekonomična. Glede na predvidene še višje cene energentov bo tudi uporaba sončnih kolektorjev postala vse pogostejša. Lahko torej rečemo, da sprejemniki sončne toplote pretvarjajo sončno energijo v toploto in jo zatem predajo nosilcu toplote, pri čemer je to najpogostejše voda mešana z glikolom. Učinkovitost sprejemnika sončne toplote pove, kolikšen delež vpadle sončne energije lahko prenese na nosilec toplote. Glede na tip sončnega kolektorja se lahko do približno 75 % sončnega obsevanja pretvori v koristno toploto [4], [5].

Poznamo več vrst sprejemnikov, in sicer ploščate, vakuumske cevne, vakuumske cevne z direktnim prenosom in tako imenovane vakuumske Heat Pipe (tehnologija vročih steklenih cevi). Ugodno razmerje med ceno in učinkovitostjo velja za ravne sprejemnike, čeprav so Heat Pipe sprejemniki tudi do 50 % bolj učinkoviti.

Ploščati sprejemnik je navadno sestavljen iz bakrenih ali aluminijastih cevi, prekritih z absorpcijsko ploščo. Cevi so nameščene vzporedno po višini ali širini sprejemnika in priključene na obeh koncih. Grelna tekočina v ceveh sprejema toploto preko absorpcijske plošče, ki je običajno prekrita s steklom z nizko vsebnostjo železa, kar zagotavlja višjo prosojnost. Ploščati sprejemnik sončne toplote pridobljeno toploto slabo izkorišča. Velik del namreč preide nazaj v okolico skozi stekleno ploščo in tudi izolacijo na zadnji strani ohišja.

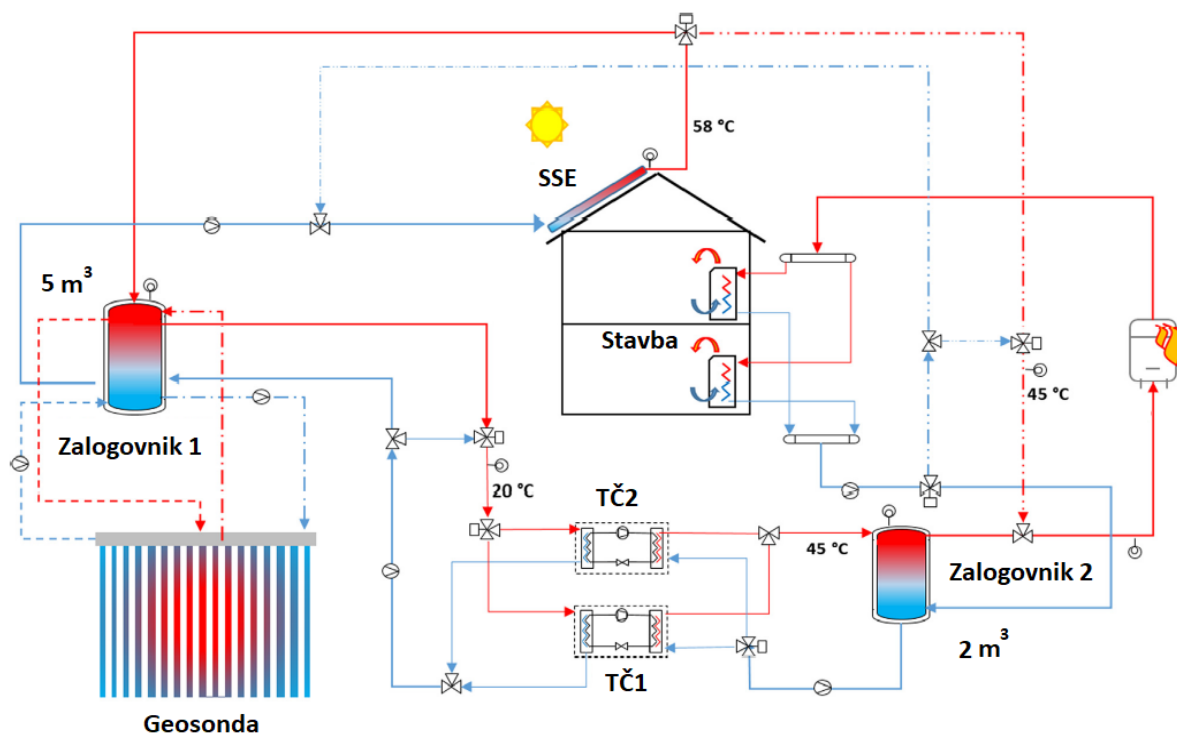
Vakuumski cevni sprejemnik sestavljata dve koncentrično nameščeni stekleni cevi, ki sta ena v drugi. V prostoru med njima je vakuum. Zunanja površina notranje cevi je prekrita s toplotno absorpcijsko snovjo in vsebuje grelno tekočino. Tekočina za prenos toplote se segreva boljše v ekonomičnem smislu, vakuumska izolacija cevi pa zagotavlja majhne toplotne izgube [6], ki stečejo po cevki navzdol in se srečujejo s paro, ki potuje navzgor proti kondenzatorju.



Slika 5: Sprejemnik sončne toplote.

5. EKONOMSKO FINANČNA ANALIZA

Shematski prikaz uporabe sprejemnikov sončne toplote oziroma uporabljen koncept je prikazan na sliki 6, iz katere je razvidna tudi predlagana uporaba dveh zalogovnikov toplotne energije [7]. Dodatno se poleg sprejemnikov sončne toplote pogosto predlaga več vrtin s pripadajočimi geosondami in toplotnimi črpalkami, pri čemer se pridobljena energija lahko akumulira v omenjenem zalogovniku (slika 6).



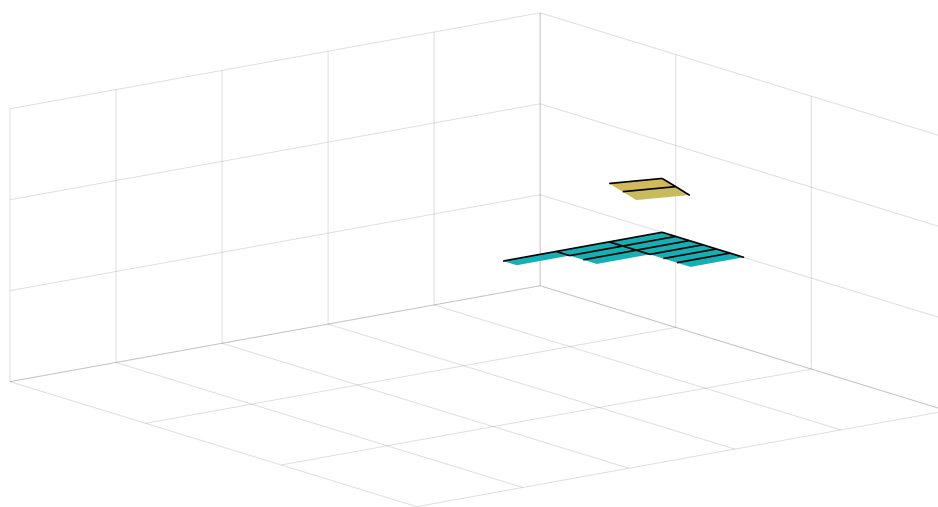
Slika 6: Koncept uporabe virov energije iz sprejemnikov sončne toplote in geosond.

Ekonomsko ovrednotenje izvedb ogrevanja in hlajenja objekta smo opravili s finančno analizo upoštevanja stroškov in tudi koristi [8], [9]. Gre za metodo, s katero v osnovi identificiramo, merimo in nenazadnje ovrednotimo neto koristi v navezavi na pripadajoče stroške investicij ter le-te primerjamo z neto koristmi in stroški stanja brez nje. Vrednotenje neto koristi in stroškov investicije se izvede na podlagi denarnega toka investicije, v katerega so vključeni različni denarni pritoki in denarni odtoki. Pomembno je poudariti, da so pri tem pritoki lahko prikazani tudi kot prihranki.

S tako imenovanim diskontiranjem denarnih tokov izrazimo vse prihodnje stroške in koristi v sedanjih vrednostih in to na podlagi trenutnih možnosti, ki obstajajo na trgu. Razliko med vsemi diskontiranimi stroški in diskontiranimi koristmi v celotni življenjski dobi prikazuje kazalnik Neto sedanje vrednosti (ang. Net Present Value - NPV) [10].

V primeru predstavljene ekonomsko finančne analize se začetni stroški spreminjajo glede na rešitve, ki smo jih razdelili na več sklopov, in sicer na tako imenovano osnovno rešitev, katera je zatem nadgrajena še s koriščenjem dodatnih virov energije iz sončnih sprejemnikov toplote in geosond.

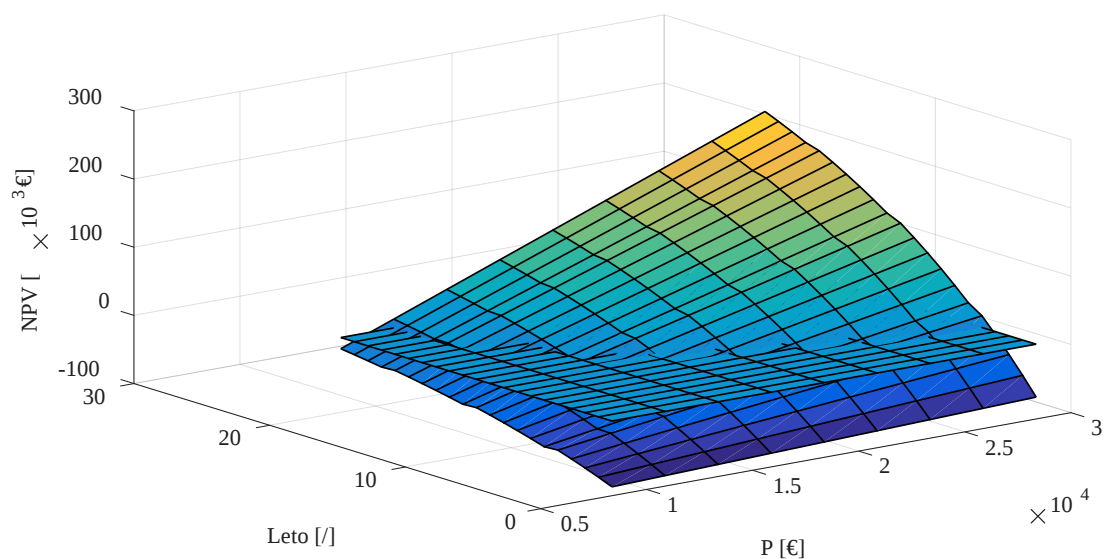
Pri osnovni rešitvi smo pri specifikaciji začetnih stroškov, poleg toplotne črpalke, bakrenih cevi, elektro in signalnih kablov ter razdelilnih enot upoštevali še vodni prenosnik toplote, zalogovnik vode, črpalke, cevi in vso potrebno pripadajočo opremo, in sicer uporovni termometer, komandno omarico in ventile. Ocenjeni stroški, brez upoštevanja dela, se tako gibljejo med 70.000 in 75.000 €. Poleg začetnih stroškov je potrebno upoštevati še prihranek energije oziroma njene cene, glede na obstoječe rešitve. V kolikor, glede na primerjavo trenutne in ocenjene porabe energije pri izkoriščanju toplotne energije transformatorjev oziroma njihove proizvodnje odvečne toplote, govorimo o prihrankih reda do 20.000 €, je za osnovno rešitev mogoče izračunati neto sedanjo vrednost, predstavljeno na sliki 7.



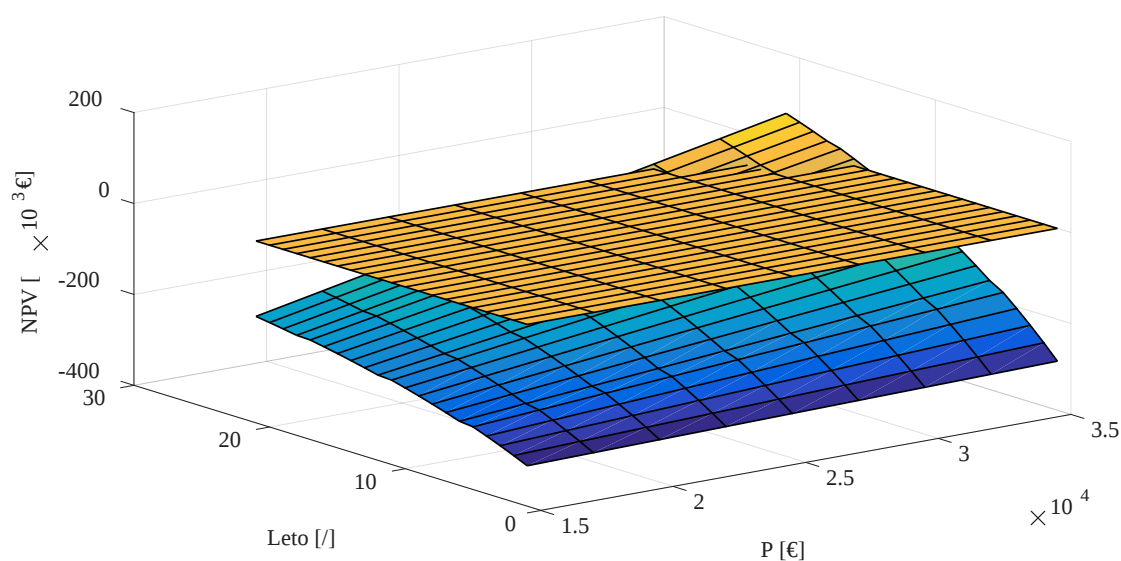
Slika 7: Neto sedanja vrednost – osnovna rešitev.

Na predstavljenem izračunu je razvidno gibanje neto sedanje vrednosti pri upoštevanju variaciji začetnih stroškov med 50.000 in 100.000 €, in sicer glede na čas. Pri izračunih je upoštevana konservativna letna vrednost prihranka 15.000 €, inflacija, izbrana diskontna stopnja ter vrednosti določenih vzdrževalnih del ob večjih remontih. Pri tem je potrebno poudariti, da govorimo o času vračanja vloženih sredstev med 4 in 7 let, odvisno seveda od vrednosti začetnih stroškov. Iz slike 7 je tako razvidna pozitivna vrednost *NPV*, tudi ob primerih največjih začetnih stroškov, kar kaže na pozitivno odločitev sprejema investicije v takšen projekt.

Vrednosti prihrankov je mogoče z uporabo dodatnih virov toplotne energije, na primer geosonde še nekoliko povečati, pri čemer se seveda poveča tudi vrednost začetnih stroškov. Rezultati *NPV* (slika 8) so v teh primerih podobni predhodnim, medtem ko se izračunane neto sedanje vrednosti precej poslabšajo, če sistemu dodamo še sprejemnike sončne toplote (slika 9). Zaradi zelo visokih začetni stroškov postane vrednost *NPV* negativna na praktično celotnem področju. Lahko rečemo, da je v takšnih primerih instalacija sprejemnikov sončne toplote precej nesmotna.



Slika 8: Neto sedanja vrednost pri variaciji prihrankov – rešitev z dodano geosondo.



Slika 9: Neto sedanja vrednost pri variaciji prihrankov – rešitev z dodanimi sprejemniki sončne toplote.

6. SKLEP

V kolikor želimo izdelati predlog energetskega upravljanja kot dela sistema upravljanja s sredstvi v konkretnem energetsko-stavbnem kompleksu z obstoječo rešitvijo, je hkrati potrebno določiti metodologijo za vrednotenje prispevkov posameznih virov energije in kazalnike energetske učinkovitosti. Z uvajanjem navedenih ciljev je zagotovljena učinkovita raba

energije, vključevanje odvečne energije in novih alternativnih virov energije v energetske oskrbo stavb in objektov ter z analiziranjem, poročanjem in izvajanjem ukrepov nenehnega izboljševanja, kar predstavlja osnovne cilje sodobno orientiranih družb in tudi novo sprejete zakonodaje. Nekateri viri energije so namreč na voljo praktično ves čas ali del dneva. To so na primer vsebnost toplote v zraku, toplota, vsebovana v površinski in talni vodi, geotermalni energijski potencial zemlje ter seveda direktni, razpršeni in odbiti sončni žarki. V zemlji, podtalni vodi in v ozračju so namreč shranjene ogromne količine toplotne energije, ki jo lahko s pomočjo toplotnih črpalk pretvorimo v energijo, primerno za ogrevanje. Zaradi tega je v učinku toplotnih črpalk velik delež obnovljivih virov, posledično so okoljsko sprejemljiv in ekonomsko učinkovit način ogrevanja. Z uporabo dodatnih virov toplotne energije, geosond in sprejemnikov sončne toplote je namreč mogoče vrednosti prihrankov še nekoliko povečati. Izvedba geosond se, v konkretnem primeru, z ekonomskega vidika izkaže za sprejemljivo rešitev, medtem ko je zaradi zelo visokih začetnih stroškov sprejemnikov sončne toplote, vrednost *NPV* negativna na praktično celotnem upoštevanem področju, zaradi česar se instalacija sprejemnikov sončne toplote (v tem/takšnih primerih) ne priporoča.

7. LITERATURA

- [1] Bojan Grobovšek, Praktična uporaba toplotnih črpalk, Energetika marketing, 2009.
- [2] Péter SZŐKE, Izkoriščanje geotermalne energije s pomočjo geosond vgrajenih v nosilno podkonstrukcijo objekta, Diplomsko delo, Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, 2016.
- [3] Jože Turinek, Toplotna črpalka z geosondo za ogrevanje enostanovanjske hiše, Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, 2009.
- [4] Matej Kušer, Energetska analiza delovanja med toplotno črpalko, ploščatim in vakuumskim solarnim sprejemnikom, Diplomsko delo, Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, 2011.
- [5] Biotherm (spletni vir), dostopen na: <http://www.biotherm.si>.
- [6] Klemen Kopač, Primerjava toplotnih lastnosti ploščatih sončnih kolektorjev s sončnimi kolektorji s toplotno cevjo, Diplomsko delo, Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, 2013.
- [7] Panno, D., A. Buscemi, M. Beccali, C. Chiaruzzi, G. Cipriani, G. Ciulla, V. Di Dio, V. Lo Brano, and M. Bonomolo, A solar assisted seasonal borehole thermal energy system for a non-residential building in the Mediterranean area, Solar Energy, 2018.
- [8] W. Samuelson, S. G. Marks, Managerial economics, John Wiley & Sons, Inc, 2012.
- [9] U. A. Sarwar, G. Keinosuke, Cost-Benefit Analysis of Environmental Goods by Applying the Contingent Valuation Method, Tokyo, Springer, 2006.
- [10] K. Dežan, Povračilo marketinških naložb, Magistrsko delo, Univerza v Mariboru, Ekonomsko poslovna fakulteta, 2011.

NASLOV AVTORJEV

doc. dr. Klemen Deželak, univ. dipl. inž. el.
red. prof. dr. Jože Pihler, univ. dipl. inž. el.

Univerza v Mariboru, Fakulteta, za elektrotehniko, računalništvo in informatiko
Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija

Tel: + 386 2 220 71 80

Fax: + 386 2 252 54 81 ali + 386 2 220 72 72

Elektronska pošta: klemen.dezelak@um.si

STRATEGIC ANALYSIS FOR THE LONG-TERM RENEWABLE GOALS OF THE INDIAN ELECTRICITY SECTOR

Karthik Subramanya BHAT, Udo BACHHIESL, Heinz STIGLER

ABSTRACT

The energy sectors of a majority of countries globally are undergoing a transition from conventional thermal energy to clean renewable energy, with regards to a higher awareness on climate change. The electricity sector forms a major part of any energy sector. The transition of the electricity sector from conventional electricity generation to renewable energy is a tedious and long-term process. Furthermore, the transition process brings about a large number of complications on the electricity system. This has already been observed in the European Union (EU).

India is a country in the middle of such a transition process. Also, the Government of India (GoI) is committed to its stance on battling climate change, with the improvement of its electricity generation shares from renewable energy sources by the year 2030. In order to attain such an objective, the GoI has come up with ambitious objectives for capacity expansions of solar Photo-Voltaic (PV) and Wind power by the year 2025.

This study focuses on the analysis of a scenario with large scale electricity generation from Solar PV and onshore wind power capacities, distributed over the five different power regions in India. For the simulation of this scenario, the techno-economic model ATLANTIS_India, developed at the Institute of Electricity Economics and Energy Innovation, Graz University of Technology, has been used. The simulation results of such a scenario are analyzed and further discussed as conclusions for the study.

1. INTRODUCTION

India can be called as a land of diversity, be it in cultures, languages, cuisines or many more things. Unfortunately, the same cannot be said for the electricity sector, where the electricity generation in the country has been dominated by conventional coal power technology for over more than a few decades. Overall, by the end of the year 2018, the electricity generation from coal-based power plants in India was around 60 percent of the total electricity generation. The share of the Indian coal power plant fleet was about 57 percent of the total installed capacity [1]. The dependency on coal power began with the industrialization reforms introduced in the country, in the early 1990s. Since then, the focus of the GoI to improve the country's standing in the global economy pushed the energy sector for a continuous installation of coal power plant capacities every consecutive year. However, with the recent changes in the energy politics of

the country, much focus is on the improvement of renewable energy capacity in regards to India's international commitment to battle climate change [2].

The geographical positioning of the country, places it in a very favorable situation for renewable energy generation. With a staggering amount of over 2300 -3000 sunlight hours, and several identified wind rich areas, the identified technical potential for solar Photo Voltaic (PV) power generation alone amounts up to a staggering 750 GW [3]. This by quantity is enough to replace all the coal generation facilities in the country. However, the intermittent nature of the electricity generation from these renewable energy sources create several complications in the working of the electricity system of the country. This study analyses the long-term plans of the GoI by building a specific scenario, taking an overall stance on the current situation of the energy sector in the country, and the implementation of a strategy for electricity generation from renewables across each power region in the system up to the target year 2040. The simulation of the scenario has been done using the techno economic simulation model *ATLANTIS_India* [4]. The results of the simulation have been discussed, and inferences are proposed as conclusions.

2. THE UNIQUENESS OF THE INDIAN ELECTRICITY SECTOR

With the overall generation capacity of 350 GW and an electrical energy consumption of 900 TWh at the end of the year 2018 [1], the Indian electricity sector is one of the largest electricity systems in the world today. As already discussed, most of the power generation in India comes from its valued coal power plant fleet, which mostly satisfies the industrial load of the country. Traditionally, before the industrial reforms of 1990s, the major source of electric power in India was Hydroelectric power. Hydroelectric power has an installed capacity share of over 18 percent in the Indian power plant fleet today. Small Hydro Power plants are classified separately, along with the other renewable energies' share. After the initial liberalization stages of the Indian electricity market, SHP is one of the fastest emerging technologies in the country considering the improved benefits for private investments in the electricity sector.

Renewable Energy Technologies (RETs) like Solar PV and Wind power have also been gaining a lot of focus in the recent years, with India's stand on RETs improving a lot in the last decade. The installed capacity of solar PV has increased up to four times of its share than in the year 2010, while wind power capacity in the country has almost doubled. The RET share in the power plant capacity mix has already reached 33 percent in the year 2018 [1] and is expected to develop further in the coming decade. Nuclear power plant capacity in India has reached a standstill, due to trading restrictions imposed for not being a part of the non-proliferation treaty. However, with the improvement of research within the country and cooperation with other countries like Russia and Canada, the share of Nuclear energy is also slowly improving. India's long-term stance on Nuclear power is to double its capacity from 6 GW in 2018 to around 10 GW by 2030. Recent advancement of India in the field of Thorium-based nuclear fuel further brings the country closer to its 'Three stage nuclear programme', envisioned to secure the country's long-term energy independence [5]. The overall illustration of the Indian power plant fleet classified by generation technology type is shown in the accompanying figure (1)

The Indian power plant fleet (GW), 2018

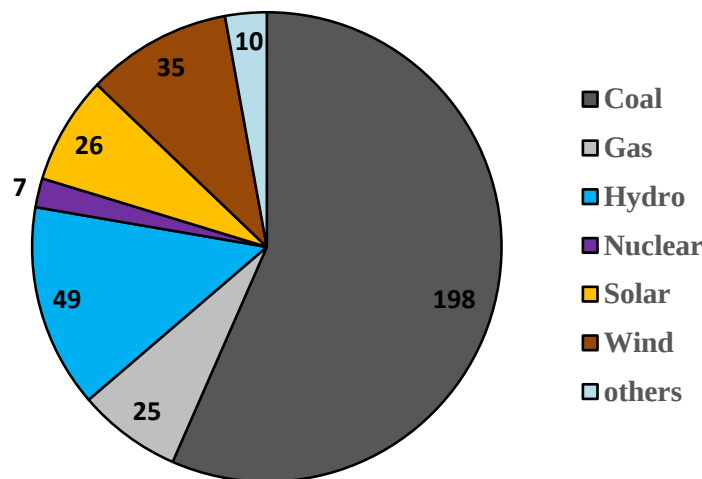


Figure (1) The Indian power plant fleet, capacities by generation type, end of the year 2018

After the agreement to curtail around thirty percent of energy related emissions from their 1990 levels by the year 2030, India has been rigorously investing its efforts into the improvement of their renewable energy power plant fleet. Several energy policies were introduced with strict focus on Solar PV and Wind energies, which had severe impacts on the new investments in coal power. With the rise of awareness of climate change in the country, the GoI was forced in to a situation to manage the economic development, while decreasing its overall energy related emissions. With other challenges of inefficient distribution networks and increasing electricity demands, a severe financial crisis in the energy sector arose with the creation of debts and stranded assets. Thus, a new approach to improve the financial situation of the Indian electricity sector was needed. With the introduction of subsidies for renewable energy generation and Renewable Energy Certificates, the interest of several private energy companies arose and the situation was somehow contained. However, the overall variation in seasonal availability of the renewable sources in India now creates another specific challenge for the electricity sector.

With the vast area of the country, the seasonal variations within each different power region is significantly large. For example, the annual rainfall season (Monsoon) in the South Region (SR) is during the months of June, July and August, whereas the monsoon season in the Eastern Region (ER) is mainly during the months of October and November. Since almost 80 percent of the annual flow of Indian rivers happen during the monsoon months [6], the generation from hydro power in each of the region also varies significantly over the months. With the availability of Solar irradiation, there is also a seasonal variation. Solar irradiation can be considered least during rainfall season in the SR and ER regions. The winter months of November, December and January in the North Region (NR) and North East Region (NE) have the least amount of irradiation. As a result, the availability of electricity generation from PV capacities also varies significantly. Thus, a very innovative distributed renewable energy

generation strategy has to be designed for India, to make up for the seasonal variations, as well as for the sustainable and efficient operation of the Indian power grid.

3. THE TECHNO-ECONOMIC SIMULATION MODEL '*ATLANTIS_India*'

The Techno-economic simulation model *ATLANTIS_India* [4] was developed at the Institute of Electricity Economics and Energy Innovation, Graz University of Technology. The model *ATLANTIS_India* is based on the simulation model *ATLANTIS* [7], which was developed to simulate the European electricity economics, at the same institute.

The unique feature of this model is that it combines the physical structure of the Indian energy system, along with the economical part of the sector. This makes the model *ATLANTIS_India* a one-of-its-kind model in the global energy field. The physical model covers the transmission network, transformers, power plants and demand center nodes over the five different power regions in India, along with Bangladesh, Bhutan, Nepal and Sri Lanka. The five power regions are as defined by the Transmission System Operator in the country: East Region (ER), North East Region (NE), North Region (NR), South Region (SR) and West Region (WR)

The transmission network, nodes and the power plant data are geographically accurate, to simulate an as-close-to-reality scenario. Transmission lines of voltage levels 132 kV, 220 kV, 400 kV, 500 kV, 765 kV and High Voltage DC (HVDC) are considered in the model. The economic part contains four different market models and a business model for companies (smaller companies are segregated together for simplicity) involved in the energy sector. The possibility to simulate the energy economy of the fastest growing region in the world is a very interesting one, and through *ATLANTIS_India*, it can be realized.

The node-specific demand distribution in the model has been done through the assigning of weightages with respect to the total regional electricity demand, based on population, agricultural activity and industrial activity around the region of the specific node. The identification of the agricultural activities and industrial activities was done by superimposing the model node GIS data with the opensource GIS maps of agricultural lands and Special Economic Zones in the countries involved.

The model *ATLANTIS_India* can simulate up to four different market models, out of which specific market model types are selected for analysis of each study, based on the requirement. The market models are defined based on load flows and transmission constraints. The four different market models can be explained using simple terms:

1. **Copper Plate model:** Without load flow calculations, and Net Transfer Capacity restrictions, where the cheapest operational power plant in each region is taken into consideration as the best power plant.
2. **Total (Overall) Market model:** With load flow calculations, and no Net Transfer Capacity restrictions. This market model type considers the transmission lines within each model.

3. **Zonal Pricing model:** The Copper Plate model, along with Net Transfer Capacity restrictions, limiting the power exchange between each region.
4. **Re-Dispatch model:** Considers both load flow calculations, and Net Transfer Capacity restrictions, giving an as-close-to-reality-as-possible approach

For the scope of this study, a large focus is on the Re-Dispatch model, as we would like to simulate the reality as close as possible. Both the load flow distribution and the transmission constraints, along with the Net Transfer Capacity restrictions are being simulated for the realistic case study. The physical structure and the market model of *ATLANTIS_India* is visually represented with the *ATLANTIS VISU* visualization tool [5], and is as shown in the accompanying figure (2)

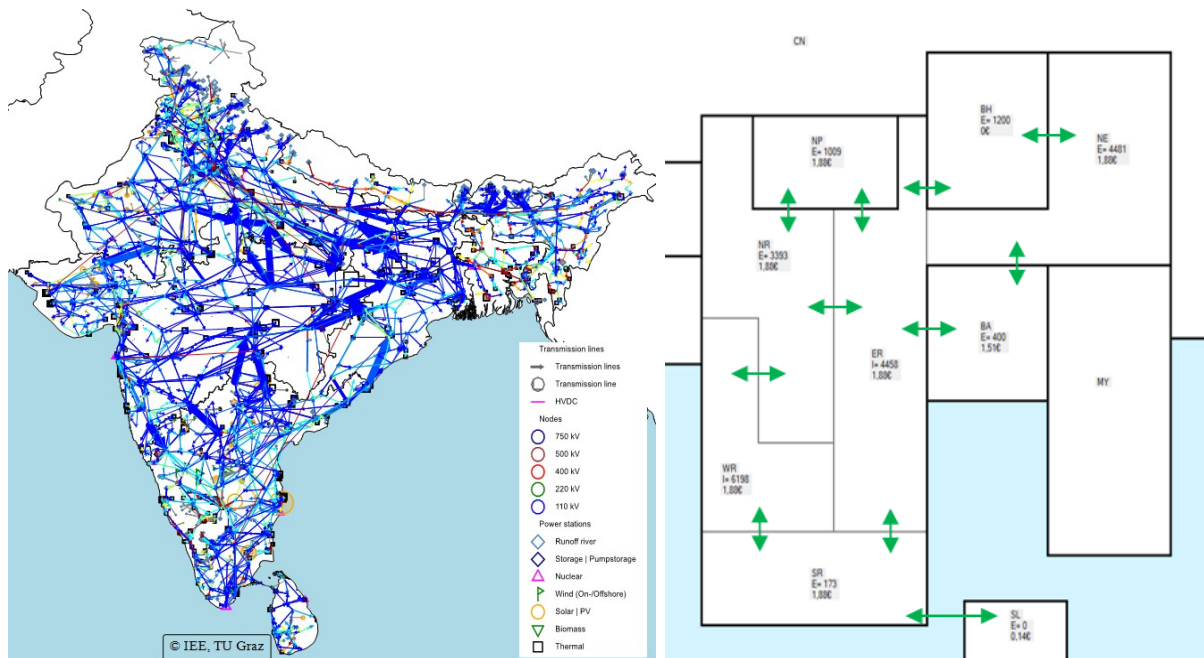


Figure (2) Visualization of the physical structure and load flows in *ATLANTIS_India* (left) and Zonal Pricing market model example (right)

4. DEVELOPMENT OF A SCENARIO

Using the model *ATLANTIS_India*, and the long-term plans listed by the Ministry of Power (MoP) in India, a scenario was developed in the scope of this study. The scenario is named as the 'Current Strategy scenario', where the long-term plans of the MoP are included as they are listed in the annual reports of the MoP India [1]. The overall development of the scenario is usually done by altering the input data to *ATLANTIS_India*, be it altering power plant data, transmission line data, and/or changing the overall demand projections. The detailed buildup of the scenario used in this study is as discussed.

4.1 CURRENT STRATEGY SCENARIO (CSS)

The CSS is just a representation of the Business as usual scenario, taking the current proposed policies of the MoP including both the present short term and the long-term goals of the Indian energy politics. The plans to reach 100 GW of PV and wind capacity by 2030 has been taken in to account in this scenario, and most of the planned power plants are considered to be operational in their planned year of commission, by 2025. A Figure (3) represents the increase in the overall power plant capacity by generation type, describing the scenario CSS. The average monthly availability of RET sources is also implemented by the use of 'Erzeugungsfaktoren' or simply termed as Generation Factors, along with the power plant input data. The seasonal variability in the availability of solar irradiance, wind and rainfall are represented by the generation of power plants in each region by defining different generation factors in different periods of the year. The gap between supply and demand, which is an ever-present situation in the Indian electricity sector, is mostly covered up by additional increase in gas power plant capacity. The scenario is simulated till the target year 2040, with consideration of peak load duration from 08:00 to 21:00 and off peak from 21:01 – 07:59.

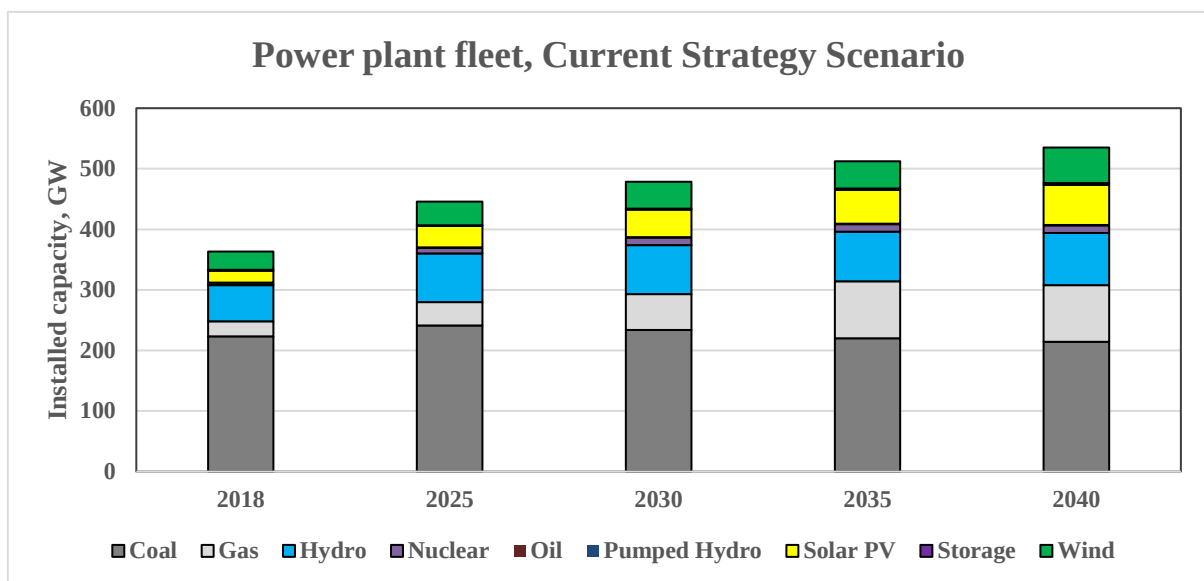


Figure (3) Current Strategy Scenario: Installed power plant capacities in the five power regions

A large increase of PV and Wind capacities can be seen, from the years 2018-2025. The overall installed PV and wind capacities together has an increase with a factor of five until the target year 2040. The dominance of coal and gas (thermal energies) in the power plant fleet still remains, a decrease in the coal power plant capacity is covered up by the increase in gas capacity. However, in the overall share, an increase in the share of Hydro power and Nuclear capacities can also be seen. The newly built Thorium fast breeder power plants [5] in India are also defined in the scope of this scenario, and are represented as EPRs.

It is also important to observe that this scenario focuses almost all of the large wind and solar PV capacities installations only in the NR, SR and the WR power regions. The identified solar potential in these regions is dramatically larger than in the ER and the NE power regions. Most of the areas in the SR and WR have annual solar irradiation averaging up to more than around 2700 hours. Availability of strong winds is also high in the southern peninsula, i.e. majority of the SR region, and the eastern part of WR region. The NR region has desert wastelands in the North west area, where there is a rich usable potential of solar irradiance and wind.

The available potentials in the two regions ER and NE, falter in comparison to the NR, SR and WR regions. Several of the planned expansion of capacities in the ER and the NE regions are not large enough to be taken into consideration, in comparison to the other three regions. Also, the regions NR, SR and WR are home to the most prominent demand centers in the country, most of which are high priority industrial regions. The figure (4) shows the classification of Solar and Wind installed capacities by region, from 2018 - 2040. The region SR remains in both cases, the largest region with installed PV and wind capacities.

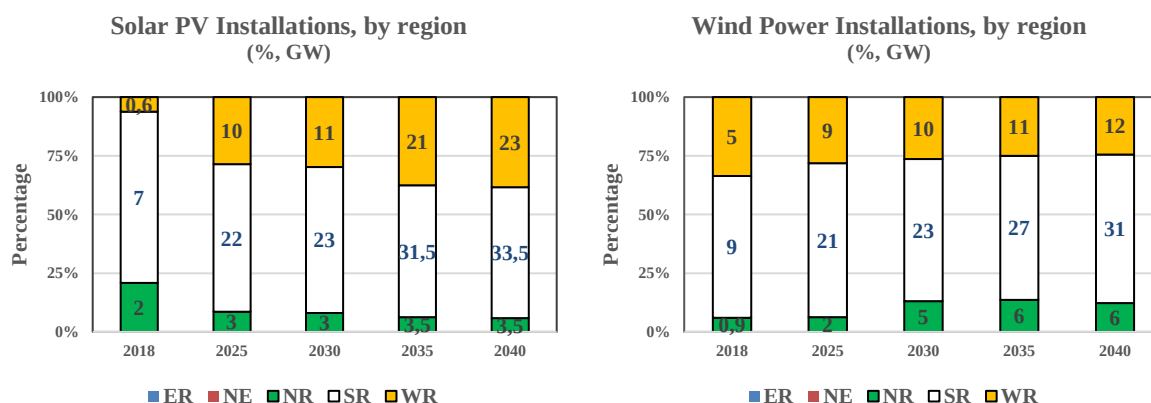


Figure (4) Solar PV installations (left), and wind power installations (right), classified by the various power regions defined in the scenario CSS

It was mentioned before that the SHP capacities in India are usually categorized under ‘other renewables’ share. However, in the scope of this study, and in the model ATLANTIS_India, SHP capacities are segregated into the ‘Hydro power’ category, and are defined as run-of-river capacities for simplicity.

5. SIMULATION RESULTS

The results of the scenario simulations are analyzed in two different ways, in the scope of this study. The first way being the evaluation of the load flows in the transmission network. The second way is to compare the installed capacities of renewable power plants and their respective energy generation shares. Analysis of the load flows gives us an overall view in to

the bottlenecks of the transmission system in the model. A comparison of the transmission load flows is as shown in the figures (5) and (6) below.

Since the addition of renewable capacity is majorly done in the SR and WR regions in the CSS, the transmission networks of the two regions are used to represent the results. The load flows in the 220 kV network is shown, for simplicity and easier identification of bottlenecks. The load flows in the 400 kV and 765 kV network were also considered, but the changes in load flow were more prominent in just the 220 kV networks in the two regions.

For the WR region, in the simulation year 2018, several transmission bottlenecks are identified, around the feed in points of the renewable energy plants show the highly loaded transmission lines. With the additional increase in PV and wind capacities, and a subsequent increase in transmission capacities, the WR region still shows a large number of bottle necks in the target year 2040. This is due to the highly centralized increase in the PV capacities in the WR region. However, the subsequent addition of HVDC lines connecting WR to the other regions alleviate the constraints as shown by the green marking in the figure (5).

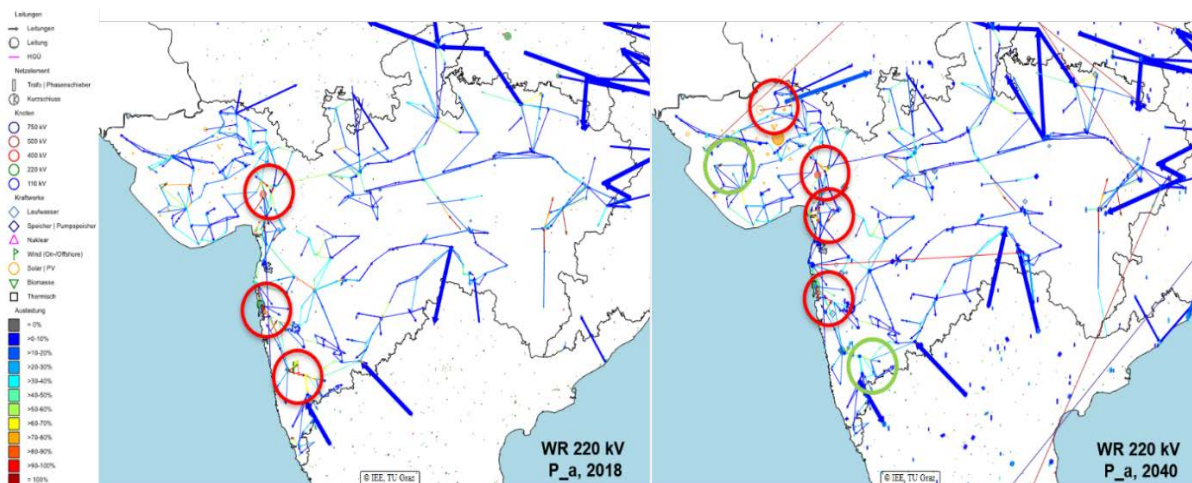


Figure (5) Load flow comparisons in the WR region, in 2018 (left) and in 2040 (right)

The effect of the improvement of cross-border transmission capacity and the increase of the NTC between SR and WR becomes really prominent, especially with WR importing a large share of electricity from the SR region. The initial transmission constraint between the two regions (south-west) is seen to be relieved considerably, with the increase in the NTC values between the WR and SR regions.

Similarly, the simulation results for the SR region also highlights the already existing bottlenecks in the simulation year 2018, which would justify the improvement of the transmission network in the region, along with the addition of renewable capacity. The load flows are in the North-South direction, indicating the electricity flow from the other regions in to the SR region. However, in the target year 2040, it is seen that majority of the load flows are in the opposite direction. The addition of renewable capacities, as seen are usually around the region of the demand centers, and it can be seen to improve the transmission conditions around

the load centers. The comparison of the load flows in the year 2018 and the target year 2040 is as illustrated in the figure (6).

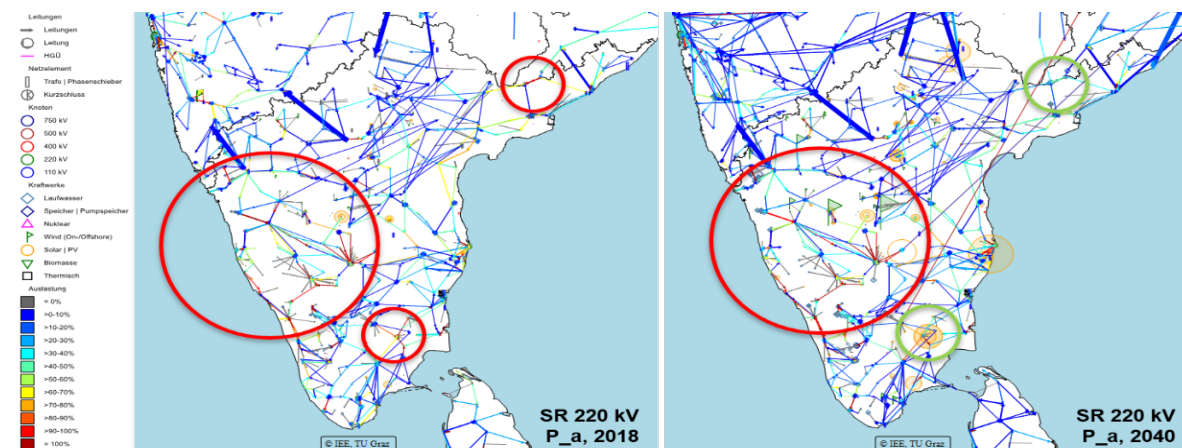


Figure (6) Load flow comparisons in the SR region, in 2018 (left) and in 2040 (right)

The comparison of the shares of installed capacity and the electrical energy generated over the year represents the usage of the planned RET power plant capacity. From this comparison, several inferences can be made about the sustainability of the overall power plant fleet and the effectiveness of the RET expansion strategy. The comparison is made as shown in the figure (7).

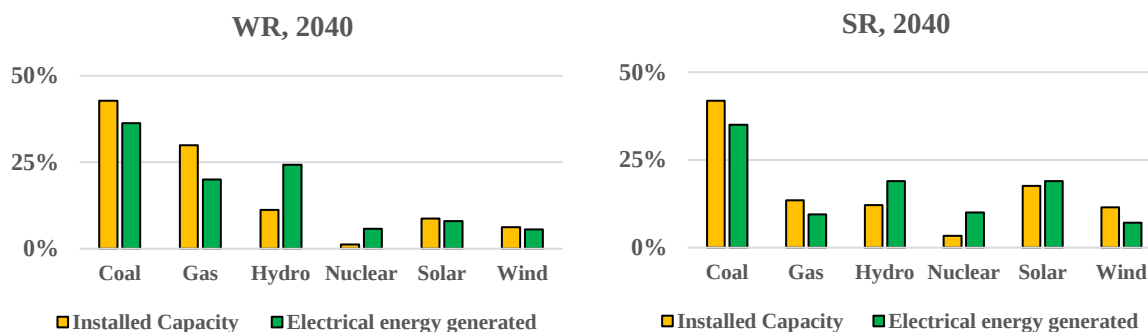


Figure (7) Comparison of installed capacity and the energy generated shares by technology types in WR (left) and in SR (right)

The comparison of installed capacity share and the calculated electrical energy generation share for SR and WR in 2040 indicates the effectiveness of the PV and Wind installations. It is to be noted that the installed capacities and the electrical energy generated from the automatically added gas power plants are not considered in this comparison. In WR, the solar PV share of 9 percent of the total installed capacity produces around 8 percent of the total generated electrical energy, whereas a 6 percent share of wind in the total capacity mix produces around 6 percent of the total electrical energy generated. In SR, a higher effectiveness of the PV installations can be seen, where a 17 percent share of total installed capacity produces 19 percent of the total electrical energy generated, whereas a 11 percent share of wind in the total installed capacity produces only 7 percent of the total electrical energy. The improvement of

hydro power capacities in both the regions prove to be highly effective, as the decrease in share of electrical energy generated from coal and gas seem to be compensated/ mostly replaced by the additional hydro power capacities.

6. DISCUSSIONS

Several inferences can be made from analyzing the load flows in the transmission network in the target year and comparing it with the load flows in the simulation year 2018. The change in the overall direction of the load flow in the SR indicate that the region becomes a net exporter from a net importer of electricity. The further increase in the cross-border capacity and the addition of new HVDC lines make this a real possibility. The large PV and wind capacities in the SR region actually help satisfy the majority of the demand at the nearest demand center, thus decreasing the bottlenecks in the rest of the SR transmission network.

However, in the case of WR, there is an increase in the number of transmission constraints after the addition of the PV and wind capacity. Furthermore, an increase in the severity of the transmission bottlenecks around the largest demand centers in the region is clearly observed from the load flows. The addition of several HVDC lines improve the cross-border constraint situation, and relieves several cross-border bottlenecks in the vicinity of the new HVDC lines. The increase in the bottlenecks in the transmission network of the WR region can be partially explained because of a rapid increase of electrical demand in the region, which leads to a situation where the region imports much more electricity from the ER and SR regions. The ER region has a very meager share of RET capacities, and a majority of the power generated in this region comes from coal and gas. This means that even with a large increase in PV and wind capacity, the WR region would be still dependent on the coal and gas power.

To ensure the successful transition of the country's electricity sector to renewable energy, a further push is necessary in the expansion of renewable capacity. The improvement of PV capacity could also be implemented in the ER region, which could deliver more renewable power to the WR region. Similarly, in the NR and NE regions, the expansion of PV and wind capacity has to be seriously implemented. The region NR could then use a large share of renewable power imported from the NE and ER regions. In a nut shell, an expansion of PV and wind capacities would have to be distributed over all the five regions. This could be more effective than the centralized addition of large capacities in certain regions.

From the comparison of the installed capacities and electrical energy generation shares by technology, it is evident that the solar PV installations in the SR seem to be more effective than the PV capacity expansion in the WR. Whereas, the wind capacity expansions in the WR are more effective than the installations in the SR. Eventually, all further investments in solar PV and wind capacity expansions must be carefully planned by taking these inferences into account. In the CCS, as mentioned before, capacities of SHPs are segregated in to the 'Hydro power' category in general, for the sake of simplicity. The add up of SHP capacities make up for the increase in the share of the Hydro power capacities in the region. The subsequent

addition of hydro capacities in the regions of SR and WR prove to be highly effective along with the improvement of PV and wind capacities.

7. CONCLUSIONS

The long-term plans for renewable energies in India were carefully analyzed with the use of the techno economic model ATLANTIS_India, and the following several conclusions were drawn from the analysis.

The current long-term plans of the Indian electricity economy would effectively increase the share of the electrical energy generated from renewable energy. However, the allocation of the large portion of the capacity has to be intelligently implemented. The bottlenecks in the transmission system increase due the addition of PV and Wind capacities even with the improvement of infrastructure, especially at the 220 kV level. The HVDC lines (planned by the year 2025) would definitely play a major role in relieving the cross-border constraints between the power regions, all the way up to the target year 2040.

Due to the addition of large PV and wind capacities, the overall load flow in the SR regions has major changes. A large portion of the demand coverage by the RET power plant expansions, around their feed in points relieves the constraints in the other parts of the SR transmission network. The WR region on the other hand has more bottlenecks in its transmission system due to an increased load flow coming in from the SR and ER regions. Thus, a distributed approach on the allocation of RET capacities in all the five regions could prove to be much more effective, as WR and NR show a large import tendency.

The Current Strategy Scenario (CSS) definitely has a large impact on the overall situation of the electricity sector in India. For sustainability of the long-term RET capacity expansion plans included in the strategy, it would prove beneficial to reinforce the 220 kV grid, especially in the regions of NR, SR and WR where most of the capacities are planned. As mentioned before, a distributed approach could be more effective than a centralized expansion of RET capacities in the large demand regions of NR, SR and WR. By keeping the expected electrical energy generated by each technology in each region in mind, further investments and expansions in RET capacities must be carefully planned at each specific power region.

8. REFERENCES

- [1] Central Electricity Authority, Ministry of Power, Government of India, Executive summary on Power sector, September 2018, http://www.cea.nic.in/reports/monthly/executivesummary/2018/exe_summary-09.pdf
- [2] Mitra, A., P. Chitkara, K. Ross, M. Singh, S. Sawhney, S. Keswani, J. Altamirano, T. Fransen, S. Majumdar, and P. Batra. 2017. "Pathways for Meeting India's Climate Goals." Working Paper. Washington, DC: World Resources Institute <http://www.wri.org/publication/meeting-indias-climate-goals>

- [3] National Institute for Solar Energy (NISE), Ministry of New and Renewable Energy, Government of India, 'State wise Estimated Solar Power Potential in the Country', No. 22/02/2014-15/Solar-R&D (Misc.)
<https://mnre.gov.in/file-manager/UserFiles/Statewise-Solar-Potential-NISE.pdf>
- [4] Bhat, K., Feichtinger, G., Bachhiesl, U., Stigler, H., 'Model based analysis of the Indian Electricity Economics', 15. Symposium Energieinnovation, 14-15.02.2018, Graz.
- [5] Bhabha Atomic Research Center (BARC), Department of Atomic Energy, Government of India, 'ANU SHAKTI: Atomic Energy in India, strategy for nuclear power'
http://www.barc.gov.in/about/anushakti_sne.html
- [6] Soni, V., Shekhar, S., and Singh, D., 'Environmental flow for Monsoon Rivers in India: The Yamuna River as a case study'
https://www.researchgate.net/publication/237145634_Environmental_flow_for_Monsoon_Rivers_in_India_The_Yamuna_River_as_a_case_study
- [7] Stigler, H., Bachhiesl, U., Nischler, G., Feichtinger, G., 'ATLANTIS: techno-economic modelling of the European Electricity Sector', CEJOR, DOI 10.1007/s10100-015-0413-8,
https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Institute/IEE/files/Pub_IEE_ATLANTIS_150908.pdf

AUTHORS' ADDRESS

Karthik Subramanya Bhat, M.Sc.,

Udo Bacchiesl, Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.

Heinz Stigler, Univ.-Prof. Mag.rer.soc.oec. Dipl.-Ing. Dr.techn.

Institute of Electricity Economics and Energy Innovation
Graz University of Technology
Inffeldgasse 18, 8020 Graz, Austria

Tel: + 43- (0) 316/ 873-7908

Fax: + 43- (0) 316/ 873-107908

Email: karthik.bhat@tugraz.at

POVRNITEV NUTRIENTOV IZ DIGESTATA PRI PROIZVODNJI BIOPLINA

Dean ČERNEC

POVZETEK

Digestat kot stranski produkt anaerobne razgradnje pri proizvodnji bioplina ima lastnosti zelo kvalitetnega gnojila, saj je bogat tako z organskimi snovmi kot makro- in mikrohranili. Digestat se ponavadi brez nadaljnje obdelave uporablja kot gnojilo na obdelovalnih površinah, kar pripomore k zmanjšanju uporabe umetnih (mineralnih) gnojil. A naraščanje potreb po učinkovitejšem upravljanju z nutrijenti na lokalni in globalni ravni, pogojeno z usihanjem naravnih virov ter zakonskimi omejitvami uporabe gnojil, botruje razvoju novih tehnologij in pristopov, ki v končnih produktih omogočajo višje koncentracije nutrientov v primerjavi z neobdelanim digestatom. Končni produkti po obdelavi so lahko tudi gnojila v mineralni obliki.

ABSTRACT

Digestate as a by-product of anaerobic digestion in the biogas production has the properties similar to high-quality fertilizer, since it is rich in both organic matter and in macro- and micronutrients. In general, digestate is applied to the land without further treatment, thus reducing the usage of industrially produced mineral fertilizers. However, a growing need for a more efficient nutrient management at the local and global level, conditioned on the depletion of natural resources and the legal restrictions on the use of fertilizers, is fueling the development of new technologies and approaches that allow higher concentrations of nutrients in the end-products compared to these of untreated digestate, whereby the final products can also be in the form of mineral fertilizers.

1. UVOD

Naraščanje zavedanja o negativnih okoljskih vplivih, ki jih povzročajo organski odpadki v povezavi z uporabo gnojil širom sveta, je v zadnjih desetletjih na območjih intenzivne živinoreje privedlo do postopnega zakonskega omejevanja vnosa hranil v tla obdelovalnih površin. Zaradi teh omejitev je postala anaerobna razgradnja živalskih fekalij in gnojevke marsikje sestavni del procesa izboljševanja veterinarske varnosti, nadzora kakovosti zraka ter zaključevanja cikla hranilnih snovi oz. nutrientov. Če pogledamo iz druge perspektive, se svet sooča tudi z usihanjem dostopnih naravnih virov nekaterih bistvenih nutrientov kot sta fosfor in kalij (rezerve kalija sicer niso tako problematične, a to ne opravičuje nesmotrne rabe le-tega) in s tem z naraščujočo potrebo, da se zagotovijo zaloge in alternativni viri za prihodnje generacije. V razvitem svetu se zato, v nasprotju z dosedanja prakso odstranjevanja iz odpadnih tokov ter deponiranja, težišče problematike nutrientov pomika k postopkom povrnitve in

ponovne uporabe. Tehnologije, ki to omogočajo, se s ciljem izboljševanja upravljanja z nutrienti v kmetijstvu in v sistemih za obdelavo odpadnih tokov hitro razvijajo in nadgrajujejo.

2. DIGESTAT KOT STRANSKI PRODUKT PROIZVODNJE BIOPLINA

Bioplin vsebuje $50 \div 70$ % metana in $30 \div 50$ % ogljikovega dioksida z manjšimi deleži drugih plinov (npr. vodik in vodikov sulfid), dejanska sestava pa je močno odvisna od vhodne surovine oziroma substrata. Podobno so od vrste substrata odvisne tudi lastnosti digestata (pregnito blato oziroma ostanek substrata), kot imenujemo ostanek anaerobnega vrenja pri proizvodnji bioplina. Digestat je navadno v tekočem, pastoznem stanju, kadar gre za proces suhe anaerobne razgradnje, pa je lahko tudi v trdni obliki. Zadrževalni čas substrata (le-ta je lahko mešanica različnih substratov, lahko pa je čisti »monosubstrat«) v digestorju ali fermentacijski posodi je nekaj tednov, odvisen pa je od več faktorjev, kot so koncentracija organskih snovi v substratu, temperatura, stopnja mešanja,... V tem času mikroorganizmi v anaerobnem okolju (brez prisotnosti kisika) v sosledju kompleksnih biokemičnih procesov substrat razgradijo, pri čemer dobimo končna produkta: bioplin in digestat. Digestat nato odstranimo iz digestorja in ga skladiščimo v posebnih posodah, ponavadi pa ga uporabljamo namesto mineralnih gnojil na obdelovalnih površinah, saj vsebuje veliko makronutrientov kot so dušik, fosfor, kalij in žveplo, različne mikronutriente ter organske snovi in je kot gnojilo visoko kompatibilen z rastlinami.

Kot že omenjeno pa fizikalno-kemične lastnosti digestata variirajo in so močno odvisne od izvora in sestave substrata ter od parametrov anaerobnega procesa razgradnje. Na splošno je v primerjavi s surovimi živalskimi fekalijami ali gnojnico v digestatu skupno manj trdnih snovi in skupne vsebnosti ogljika, nižje je razmerje med ogljikom in dušikom, digestat pa je tudi manj viskozen. Nasprotno pa sta pH vrednost in delež amonija v digestatu višja. Kot substrati se v Evropi tradicionalno uporabljajo odpadni produkti iz poljedelstva in živinoreje, komunalni organski odpadki (ostanki hrane), energetske rastline (npr. koruzna in travna silaža) ter odpadki iz živilsko predelovalne panoge. V zadnjem času se kot substrat uporabljajo tudi ostanki, ki nastanejo pri proizvodnji bioetanola in biodizelskega goriva.

Vsebnost suhe snovi oziroma skupna vsebnost trdnih snovi se po anaerobni razgradnji lahko zmanjša za 50% do 80%, odvisna pa je tako od vsebnosti suhe snovi v vstopnem substratu kot od deleža lahko razgradljivih organskih snovi. Tako imajo recimo leseni ostanki, ki vsebujejo veliko lignina nizko stopnjo razgradljivosti, medtem ko so substrati, ki vsebujejo maščobe, sladkor in alkohol zelo dobro razgradljivi. 70 % suhe snovi v digestatu je organskega izvora, kar na dolgi rok predstavlja velik potencial pri uporabi na poljedelskih površinah, saj gre večinoma za inertne organske snovi in vlakna (lignin-celuloza), ki so neobhodne pri procesu tvorbe humusa.

V procesu anaerobne razgradnje organskih dušikovih spojin se sprošča amonij, ki ga lahko rastline takoj absorbirajo za svojo rast, njegova vsebnost v digestatu pa je neposredno povezana s skupno vsebnostjo dušika v substratu, ki pa je lahko tudi mešanica različnih vrst substrata. V

takšnih primerih, ko gre dejansko za ko-razgradnjo različnih substratov, lahko koncentracije dušika v digestatu zelo nihajo, saj je vsebnost dušika v različnih substratih lahko zelo različna.

Vsebnost fosforja v digestatu se navaja kot skupna vsebnost fosforja ali kot ekvivalent fosfata, vendar pa pri fosforju anaerobna razgradnja ne vpliva na vsebnost v digestatu, saj je le-ta odvisna zgolj od vsebnosti fosfatov v substratu. Seveda pa bo pri ko-razgradnji substrata z visoko vrednostjo fosfatov (npr. prašičja gnojevka) ter substrata z nižjo vsebnostjo fosfatov imel digestat zaradi razredčenja posledično manjšo vsebnost fosfatov.

Prisotnost nečistoč in kontaminantov v digestatu, je v veliki meri odvisna od količine teh snovi v substratu. Biološke onesnaževalce (patogeni, seme plevela,...) lahko v procesu anaerobne razgradnje učinkovito odstranimo z ustrezno procesno temperaturo in zadrževalnim časom v digestorju. Večje težave lahko nastanejo pri trdnih nerazgradljivih nečistočah ali celo večjih delcih (npr. plastični in kovinski kosi) ter pri kemičnih onesnaževalcih kot so težke kovine in trdovratni organski polutanti, na katere anaerobna razgradnja večinoma nima nobenega vpliva. Prisotnost takšnih snovi v digestatu predstavlja okoljsko tveganje, s čimer je lahko njegova uporaba kot gnojila zelo vprašljiva. V takšnih primerih je potrebno upoštevati zakonsko dovoljene mejne vrednosti oziroma slediti navodilom nacionalnih priglasiženih organov, ki se vključujejo v postopke ocenjevanja in preverjanja končnih produktov.

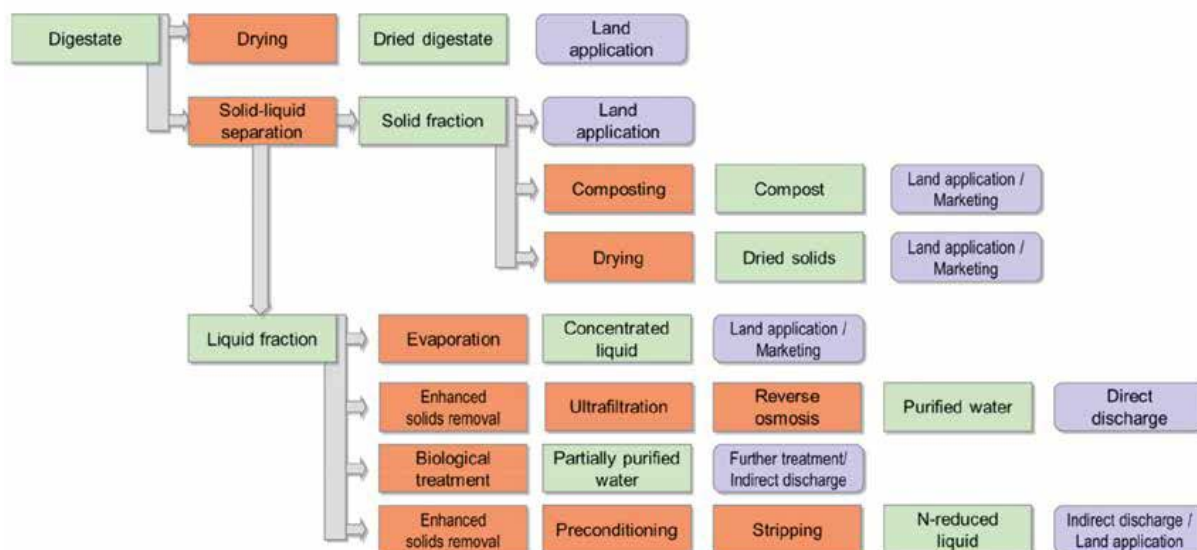
3. POSTOPKI OBDELAVE DIGESTATA ZA POVRNITEV NUTRIENTOV

Postopki nadaljnje obdelave digestata vključujejo različne tehnologije, ki so povečini primerljive s tehnologijami za obdelavo odpadnih vod, kanalizacijskih odplak in gnojnic. Obdelava digestata je lahko samo delna z namenom zmanjšanja volumna, lahko pa je dokončna, pri čemer dobimo naslednje končne produkte: očiščeno vodo, frakcijo biognojila v trdni obliki in koncentrate različnih vrst gnojil.

Prva stopnja obdelave je ločevanje trdne frakcije digestata od tekoče frakcije. Trdna frakcija se lahko kot biognojilo takoj uporabi v poljedelskih dejavnostih, lahko pa se tudi kompostira ali suši za kasnejšo uporabo.

Delna obdelava digestata je sorazmerno enostavna in ne vključuje dragih tehnologij, za kompletno obdelavo pa je na voljo več različnih tehnologij, med katerimi so tudi takšne, ki tehnično gledano še niso čisto dovršene, vsem pa so skupni višji stroški investicije, večja poraba energije in višji obratovalni stroški. Za povrnitev nutrientov se lahko uporabljajo membranske tehnologije, recimo nano in ultrafiltracija, včasih pa tudi reverzna osmoza. Pri membranskih filtracijah dobimo na vstopni strani koncentrirane nutriende, na iztoku pa očiščeno vodo. Tekoči digestat lahko obdelamo tudi s postopkom aerobne biološke obdelave odpadnih vod, čeprav je v tem primeru zaradi visokih vsebnosti dušika in nizke biološke potrebe po kisiku pogosto potrebno dodajanje ogljika zunanjega izvora, da dosežemo dovolj visoko stopnjo denitrifikacije. Koncentracijo digestata lahko povečamo tudi z uparjanjem, pri čemer lahko uporabimo presežno toploto iz kogeneratorske enote bioplinske naprave, za zmanjševanje vsebnosti dušika v digestatu pa se lahko uporablja desorpcija amoniaka (ang. ammonia stripping), ionska izmenjava ter obarjanje (precipitacija) struvita. Kot že omenjeno pa napredna

obdelava digestata, neglede na uporabljeno tehnologijo, v večini primerov terja veliko porabo energije in kemičnih reagentov. Na sliki 1 je pregled trenutno razpoložljivih tehnologij za obdelavo digestata.

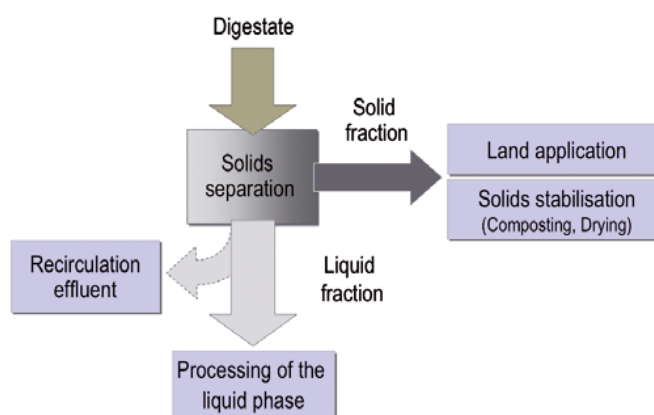


Sl.1: Pregled trenutno razpoložljivih tehnologij za obdelavo digestata
(vir: Fuchs and Drosig, 2013)

Očitno je, da imamo na voljo velik nabor razpoložljivih tehnologij za obdelavo digestata, od katerih pa na trgu še nobena ni prevzela vodilne vloge, a dejstvo je, da se najpogosteje začne obdelava digestata z ločevanjem trdne frakcije od tekoče.

3.1 Ločevanje trdne in tekoče frakcije digestata

Ločevanje trdne frakcije od tekoče je največkrat uporabljen postopek začetka procesa obdelave digestata, saj poteka obdelava brez ločevanja frakcij le v primerih sušenja celotne količine digestata. Na sliki 2 je shematično prikazan način ločevanja trdne od tekoče frakcije.



Slika 2: Ločevanje trdno-tekoče (vir: Fuchs and Drosig, 2010)

Pri izbiri separacijske metode za ločevanje trdne frakcije od tekoče je bistvenega pomena, da se problematike lotimo celostno z upoštevanjem faz obdelave, ki še sledijo, saj le z optimalno kombinacijo uporabljenih tehnologij dobimo dobre in ekonomsko upravičene rezultate (npr. kadar ločevanju frakcij sledi proces membranske filtracije ali uparjanja, je potrebno separacijo izvesti temu primerno - t.j. trdna frakcija ne sme imeti niti premalo niti preveč vsebnosti vode).

Ločevanje trdno-tekoče frakcije lahko izvajamo z vijačnimi stiskalnicami (za digestate z visoko vsebnostjo vlaken), »karafno« centrifugo (ang. decanter centrifuge; za ločevanje manjših trdnih delcev in koloidov), tračnimi stiskalnicami in vakuumskimi tračnimi filtri (večja učinkovitost separacije v primerjavi s postopkom z vijačno stiskalnico in manjša poraba energije v primerjavi s postopkom s karafno centrifugo, slabost pa je, da je pri tem postopku uporaba kemičnih reagentov za obarjanje in flokulacijo neobhodna), centrifugiranjem v šaržah (gre za nekontinuirano centrifugiranje - v primerjavi s postopkom s karafno centrifugo lahko dosežemo malenkost večji delež skupnih trdnih snovi v trdni frakciji) ter z izboljšanimi postopki odstranjevanja trdnih snovi (tu gre za dodatne metode prečiščenja tekoče frakcije digestata kot so obarjanje, flokulacija, flotacija,...).

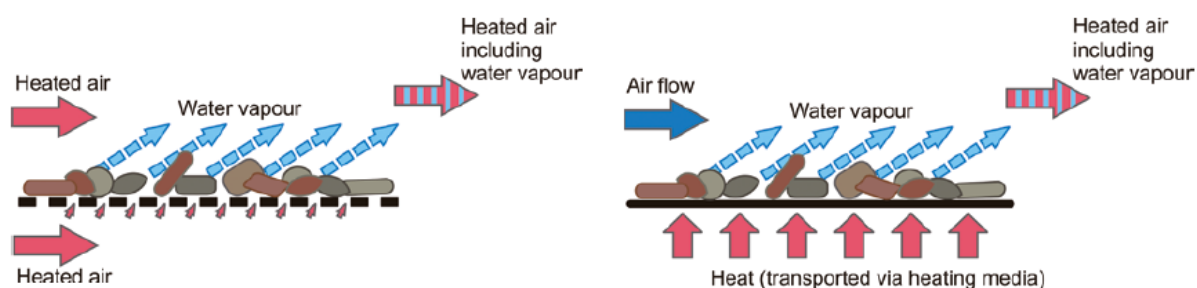
3.2 Obdelava trdne frakcije digestata

Koncentracija skupnih trdnih snovi, ki jo ima trdna frakcija digestata po končanem procesu ločevanja od tekoče frakcije je v območju $20 \div 30\%$. Ta frakcija je delno stabilizirana in jo lahko takoj uporabimo kot biognojilo ali za obogatitev zemljišča v poljedelstvu. Ker pa je mikrobiološka aktivnost v takšni frakciji še vedno prisotna, proces gnitja pa še ni povsem končan (lahko se pojavijo neprijetne vonjave), so potrebni za dosego stabilnega produkta (biognojila), ki bi ga radi lansirali na trg, še dodatni ukrepi - na primer kompostiranje ali sušenje.

Pri kompostiranju gre za proces mikrobne razgradnje, kjer se v aerobnih pogojih organske snovi v trdni frakciji digestata pretvorijo v kompost oziroma stabilizirano organsko snov z huminskimi substancami. Ker je trdna frakcija digestata mokra oziroma vsebuje dosti vlage, je za zagotovitev dobrih aerobnih pogojev potrebno trdni frakciji dodati sredstvo za povečanje volumna, da se gomila razrahlja, kar dosežemo na primer z dodajanjem lesnih sekancev.

Posebna vrsta kompostiranja je pridobivanje vermikomposta, kjer kompost »pridelujejo« deževniki. Kompostiranje na splošno pripomore k povečanju koncentracije nutrientov v trdni frakciji digestata, lahko pa se pri tem postopku pojavijo izgube dušika.

Namen postopka sušenja trdne frakcije digestata je stabilizacija, zmanjšanje prostornine in povečanje koncentracije nutrientov. Če bioplin uporabljamo za proizvodnjo električne energije v kogeneracijski enoti, lahko presežno toploto uporabimo za sušenje trdne faze digestata. Presežno odpadno toploto pa lahko uporabimo tudi za sušenje celotnega digestata še pred ločevanjem v trdno-tekoče, čeprav se to v praksi ne izvaja pogosto, saj presežne toplote ponavadi ni dovolj za celotno količino neobdelanega digestata. Na sliki 3 je prikazan osnovni princip sušenja digestata.



Slika 3: Princip procesa sušenja; levo s konvekcijskim načinom, desno s kondukcijskim načinom (vir: Fuchs and Drogg, 2010)

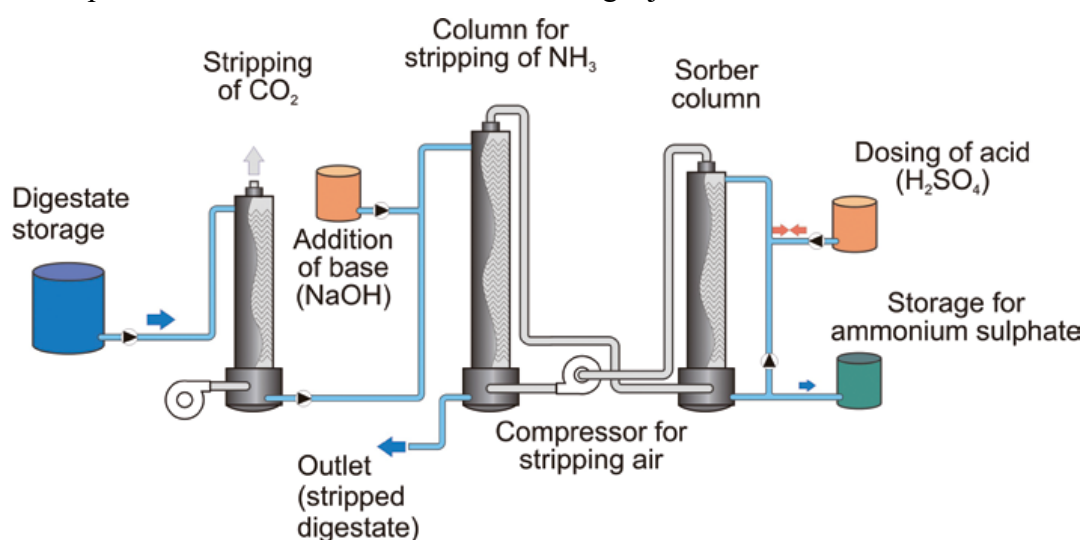
Posušen digestat se lahko dobavlja v obliki peletov. Takšni produkti so na trgu že dosegljivi in se uporabljajo v vrtnarstvu, hortikulturi ali pa za posebne namene, kot je na primer gojenje gob.

3.3 Obdelava tekoče frakcije digestata

Po ločitvi trdne frakcije je v tekoči frakciji digestata še vedno prisotna precejšnja količina nutrientov in suspendiranih trdnih delcev, ki je odvisna od vrste substrata in separacijske metode trdno-tekoče, zato tekoča frakcija po ločitvi od trdne frakcije ni primerna za izpust v okolje. Del tekoče faze se, odvisno od vsebnosti vode in amoniaka v substratu, lahko vrača v digestor, kjer poteka anaerobna razgradnja. S tem vsaj delno zmanjšamo količino tekoče frakcije, ki jo moramo še dodatno obdelati. V državah, kjer v bližini bioplinske naprave proizvajajo tudi kompost se lahko tekoča frakcija uporabi za močenje gomil nastajajočega komposta, pri čemer se priporoča predhodna redukcija amoniaka, da se preprečijo prekomerne emisije le-tega. Za ta namen se uporabljajo desorpcijski postopki, kjer v koloni za desorpcijo hlapljive komponente v tekočini (tekoča frakcija) z dovajanjem plina (zrak ali para) odstranimo iz tekoče frakcije. Hlapljivost amoniaka v procesu lahko povečamo s povišanjem temperature in zniževanjem pH vrednosti. Za povišanje temperature lahko uporabimo presežno toploto iz kogeneracijske enote bioplinske naprave, pH pa zmanjšamo s predhodnim odstranjevanjem ogljikovega dioksida, ki v digestatu deluje kot pufer in se kot tak upira spremembi pH vrednosti. Amoniak, ki v desorpcijski koloni (slika 4) preide na tok plina, nato pri izpiranju plina z žvepleno kislino

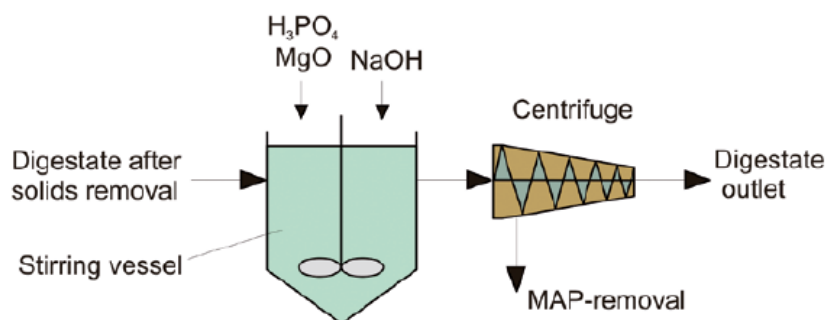
pridobimo nazaj v obliki amonijevega sulfata, t.j. umetnega gnojila z veliko vsebnostjo dušika in žvepla. Če uporabljamo kot plinski medij vodno paro, je zaradi uparjanja potrebna veliko večja temperatura kot pri zraku, prednost pa je ta, da zadnja stopnja čiščenja oz. izpiranja v tem primeru odpade, saj v procesu kondenzacije amoniak kondenzira skupaj z vodno paro, pri čemer dobimo amoniakovo vodo s $25 \div 35$ % vsebnosti amoniaka. Glavni težavi pri desorpcijskem postopku obdelave digestata sta mašenje napeljav v koloni (zaradi preostalih trdnih delcev v tekoči fazi digestata – zato je učinkovita predhodna separacija trdno-tekoče bistvenega pomena) ter zahtevnost čiščenja in vzdrževanja. Obetavni so rezultati alternativnih pristopov, kjer se namesto kolon uporabljajo enostavni mešalni kotli.

Največja prednost postopkov desorpcije amoniaka je ta, da z ustreznimi parametri dobimo kot končni produkt čisto, standardizirano dušikovo gnojilo.



Slika 4: Desorpcija amoniaka z zrakom z odstranjevanjem CO₂ in povrnitvijo amoniaka v obliki amonijevega sulfata (vir: Fuchs and Drosig, 2010)

Naslednja možnost obdelave tekoče frakcije digestata je obarjanje struvita ali magnezijevega amonijevega sulfata. Da je povrnitve nutrientov čim učinkovitejša, je potrebno med postopkom obdelave dodajati presežno količino magnezija, da je približno razmerje nutrientov 1,3 : 1 : 0,9 za Mg : N : P. Ker je amoniaka v digestatu največ, je poleg magnezijevega oksida potrebno dodajati še fosforno kislino, pH pa je potrebno zvišati na 8,5 – 9,0. Produkt, ki ga dobimo je zgoraj omenjen struvit, gnojilo z daljšim sproščanjem, ki vsebuje N, P in Mg. Pomanjkljivost postopka z obarjanjem struvita je predvsem velika poraba kemikalij, s čimer naraščajo operativni stroški. Slika 5 prikazuje postopek pridobivanja struvita iz tekoče faze digestata.

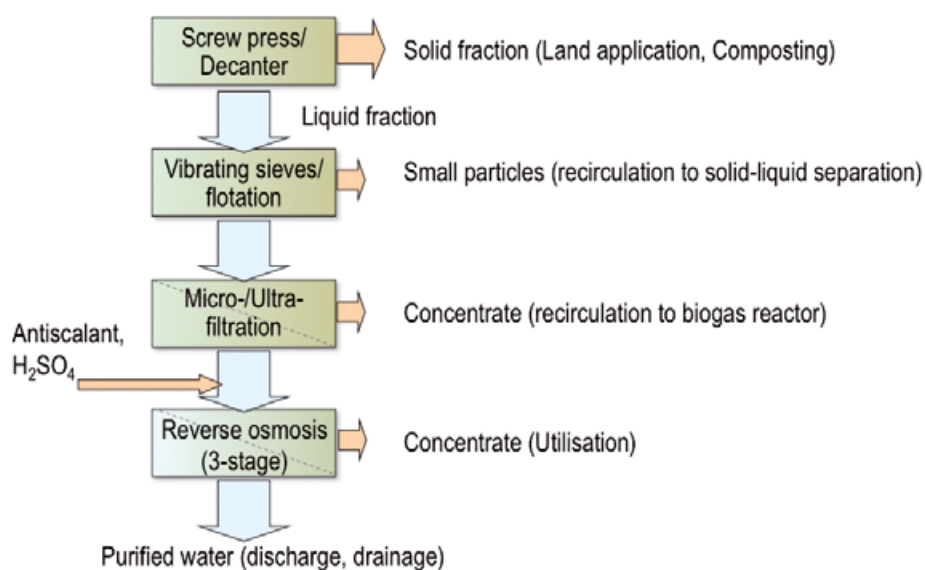


Slika 5: Proces obarjanja struvita iz tekoče faze digestata (vir: Lehmkuhl, 1990)

Postopki, ki omogočajo koncentriranje nutrientov, ki so prisotni v tekoči frakciji digestata, so pravzaprav postopki čiščenja vode. K tem postopkom uvrščamo membranske in uparjalne tehnologije.

Pri membranskih tehnologijah gre za proces fizičnega ločevanje, kjer tekočina, ki bi jo radi prečistili, prehaja skozi membrano. Velikost delcev, ki lahko prehajajo skozi membrano, je odvisna od poroznosti membrane oziroma od velikosti por. Delce, ki so večji od velikosti por, membrana zadrži in ostanejo v koncentratu, vsi manjši delci in tekočina, ki tvorijo precedek pa prehajajo skozi membrano. Membranske postopke lahko na splošno razvrstimo glede na velikost por membrane: mikrofiltracija (izločanje delcev do $0,1\ \mu\text{m}$), ultrafiltracija (do $0,01\ \mu\text{m}$) ter nanofiltracija in reverzna osmoza, pri katerih lahko izločamo iz vode tudi raztopljene soli (do $0,001\ \mu\text{m}$, pri reverzni osmozi so velikosti por še manjše). Obstajata dva tipa membranskih tehnologij – prve so že omenjene porozne membrane, druge pa so tako imenovane raztopinsko-difuzijske membrane (ang. solution-diffusion membrane), kjer temelji ločevanje različnih substanc na manjši ali večji zmožnosti raztapljanja v materialu membrane ter posledično na različnih difuzijskih hitrostih. Takšne membrane so lahko keramične ali pa iz polimerov.

Membransko čiščenje tekoče frakcije digestata je kompleksen proces (slika 6), saj poleg separacije trdno-tekoče vključuje še dodatno procesiranje tekoče frakcije z izboljšanimi postopki izločevanja trdnih delcev. Dodatni koraki so ključnega pomena, saj s tem bistveno zmanjšamo možnosti, da se v naslednji fazi procesa, t.j. ultrafiltraciji, membrana zamaši. Kot zadnja faza membranskega čiščenja se uporablja reverzna osmoza v treh stopnjah, kjer lahko zadnjo stopnjo nadomestimo tudi z ionsko izmenjavo. V procesu čiščenja z reverzno osmozo odstranimo amoniak in preostale organske snovi. Slabost takšnih membranskih procesov je, da prečiščena voda predstavlja samo polovico vode, ki jo vsebuje neobdelan digestat. Okoli 50 % digestata se namreč akumulira v stranskih produktih, t.j. trdni frakciji, v ostanku po ultrafiltraciji in nazadnje še v koncentratu, ki ostane po reverzni osmozi. Da zmanjšamo količine teh stranskih produktov, se na primer ostanek po ultrafiltraciji ponavadi vrača v bioplinško napravo ali v fazo separacije trdno-tekoče. Membransko čiščenje digestata je drag postopek, kjer se porabi precejšnja količina energije.



Slika 6: Tipične stopnje v procesu membranskega čiščenja digestata
(vir: Fuchs and Drosig, 2010)

Uparjalne tehnologije oziroma uparjanje digestata je smiselno le v primeru, ko imamo na razpolago dovolj presežne toplote iz kogeneracijske enote bioplinske naprave ali iz kateregakoli drugega vira, ki je v bližini bioplinskega postrojenja. Ker se bioplinarne nahajajo večinoma na ruralnih območjih brez prisotnosti druge industrije, lahko to predstavlja težavo (v Nemčiji to rešujejo s finančnimi spodbudami za uporabo odpadne toplote, tako da je tam kar nekaj bioplinarn opremljenih tudi z uparjalniki).

Pri uparjanju prevladuje tehnologija z uparjalniki s prisilnim kroženjem (z obtočno črpalko) tekoče frakcije digestata, uporabljajo pa se tudi uparjalniki z naravno cirkulacijo. Po ločevanju trdno-tekoče z vijačno stiskalnico in vibracijskim platnom (da izločimo čim več vlaknastega in nitastega materiala, s čimer zmanjšamo možnost mašenja napeljav in uparjalnikov), dodajamo tekoči frakciji digestata žveplovo kislino. S postopkom desorpcije nato odstranimo ogljikov dioksid. Z dodajanjem kisline se zniža tudi pH (na 4,5), s čimer dosežemo, da je celoten dušik vezan v obliki amonija. Na ta način zagotovimo, da v procesu 3-stopenjskega nizko tlačnega uparjanja pri nizki temperaturi (90°C) ohranimo skoraj ves dušik v koncentratu oziroma v koncentratu gnojila.

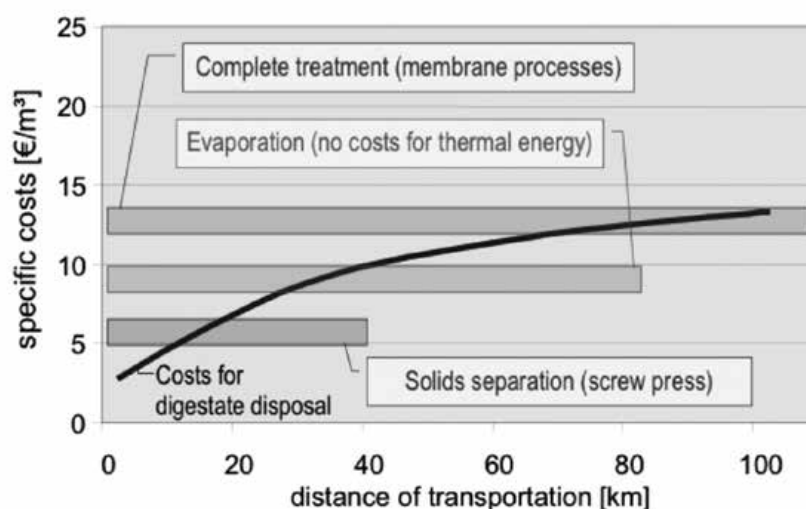
Kondenzat uparjenega dela tekoče frakcije vsebuje manjše količine amoniaka ter hlapljive kisline, zato ga ne moremo izpustiti direktno v okolje. Ponavadi ga uporabimo kot procesno vodo v bioplinski napravi, lahko pa ga izpustimo v čistilno napravo za odpadne vode. Če je v dani situaciji najbolj smiselno, da kondenzat izpustimo v okolje, ga je potrebno še naknadno prečistiti z uporabo reverzne osmoze ali ionske izmenjave, da zadostimo zakonsko določenim mejnim vrednostim za izpust. Kadar v procesu uparjanja uporabljamo presežno toploto iz kogeneracijske enote, je tipično zmanjšanje volumna digestata petdeset odstotno, poraba toplotne energije na tono uparjene vode iz digestata pa se giblje med 300 in 350 kWh.

4. EKONOMSKA UPRAVIČENOST IN ZAKLJUČNE BESEDE

Utemeljevanje ekonomske upravičenosti obdelave digestata je zahtevno že iz tega razloga, ker pri obdelavi dobimo različne končne in stranske produkte. Po drugi strani imajo tudi lokalni dejavniki močan vpliv na ekonomsko uspešnost. Analizo ekonomske upravičenosti je zato smiselno osnovati na podlagi referenčnih stroškov. V primeru obdelave digestata lahko za referenco vzamemo stroške prevoza neobdelanega digestata na kraj končne uporabe in raztrosa po zemljišču, saj stroški transporta naraščajo z večanjem oddaljenosti od bioplinarne naprave. Očitno je, da v primeru, ko neobdelan digestat raztrosimo po obdelovalnih površinah v neposredni bližini bioplinarne (t.j. ob zanemarljivih stroških prevoza), ne moremo upravičiti dodatnih stroškov, ki bi jih povzročili s postopki nadaljnje obdelave digestata. Tu je sicer potrebno še poudariti, da obdelovalne zemlje v neposredni bližini bioplinarne ne smemo preobremeniti z vnosom digestata. Ko je ustrezna količina vnosa dosežena, je v vsakem primeru potrebno ostali digestat raztrositi po bolj oddaljenih, s hranili siromašnejših površinah.

Za posamezne tipične obdelave digestata lahko stroške ocenimo in jih nato primerjamo z referenčnimi vrednostmi. Slika 7 prikazuje splošno primerjavo specifičnih stroškov nekaterih načinov obdelave digestata v odvisnosti od oddaljenosti od bioplinarne. Kot vidimo, postanejo najdražje tehnologije (npr. celovita membranska separacija z vsemi predhodnimi postopki) ekonomsko upravičene šele v primerih, ko bi morali neobdelan digestat trositi po zemljiščih, ki so od bioplinarne oddaljena več kot 80 kilometrov.

Glede samega procesiranja digestate velja omeniti še stranske produkte, ki predstavljajo slabo polovico količine digestata (ostalo je prečiščena voda). Sploh pri večjih sistemih gre za velike količine stranskih produktov, ki jih lahko zaenkrat samo delno izkoristimo (npr. vračanje ostanka ultrafiltracije v bioplinarno napravo). V teh stranskih produktih je še veliko potenciala za razvoj novih, namenskih tehnologij procesiranja, sploh ker gre za produkte z visoko vsebnostjo nutrientov.



Slika 7: Primerjava specifičnih stroškov nekaterih načinov obdelave digestata v odvisnosti od oddaljenosti od bioplinarne (vir: Fuchs and Drosch, 2013)

Zaključimo lahko, da se tehnologije za povrnitev nutrientov, katerih razvoj narekuje potreba po boljšem gospodarjenju z nutrienti tako v kmetijstvu kot v sistemih za obdelavo odpadnih tokov, hitro razvijajo, obenem pa se večajo tudi potrebe po komercializaciji in standardizaciji organskih gnojil. S pomočjo smelih ter strokovno in trajnostno naravnanih odločitev, ki morajo biti v sodelovanju s predstavniki gospodarskih dejavnosti sprejete na državnem in lokalnem nivoju, lahko z uvajanjem teh tehnologij najdemo precej odgovorov na sodobne okoljske in ekonomske izzive.

5. VIRI, LITERATURA

- [1] Nutrient Recovery by Biogas Digestate Processing; Technical Brochure prepared by: Bernhard DROSG, Werner FUCHS, Tedorita AL SEADI, Michael MADSEN, Bernd LINKE; ISBN 978-1-910154-16-8 (eBook electronic edition), 2015
- [2] N. Samec, "Inženirstvo okolja (Študijsko gradivo za univerzitetni študijski program strojništva – smer okoljevarstveno inženirstvo)," Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2005.
- [3] D. Černec, "Fosfor v odpadnih tokovih in ponovna uporaba"; Maribor, 27. Mednarodno posvetovanje "Komunalna energetika 2018"
- [4] Biogas For Road Vehicles; Technology brief; IRENA 2017
- [5] www.watrec.com; " <http://www.watrec.com/solutions/waste-energy/biogas-plants/>"

NASLOV AVTORJEV

Dean Černec

Trg Dušana Kvedra 3

2000 Maribor

Tel: + 386 41 840 156

Elektronska pošta: cerdej@yahoo.com

WASTE MATERIAL TREATMENT AND MANAGEMENT FOR PRODUCTION OF (BIO)METHANOL

Tina KEGL, Lidija ČUČEK, Anita KOVAČ KRALJ, Blaž LIKOZAR

POVZETEK

V zadnjem času potekajo številne raziskave kako predelati in ponovno uporabiti odpadne materiale s ciljem ohraniti naravne vire in reševati problem ravnanja z odpadki.. V ta namen so v raziskavi kot odpadni materiali za proizvodnjo metanola uporabljeni bioplin iz odpadnih surovin, odpadni les, trdni komunalni odpadki – plastične vrečke in odpadni CO₂. Za vsako vstopno surovino je izdelan model proizvodnje metanola z računalniškim procesnim simulatorjem Aspen Plus. Poleg tega je opravljena poenostavljena ekonomska analiza, kjer so upoštevane cena metanola in stroški odpadnih materialov. Dobljeni rezultati so primerjani z rezultati proizvodnje metanola iz zemeljskega plina. Rezultati kažejo, da sta bioplin iz odpadnih surovin in odpadni les ekonomsko najugodnejši vhodni surovini za proizvodnjo metanola. Največje količine metanola so proizvedene iz trdnih komunalnih odpadkov – plastičnih vrečk.

ABSTRACT

Opportunities for recovery and reuse of waste are being sought in order to conserve natural resources and solve growing waste management problems. For this purpose, the production of methanol from waste materials such as biogas from waste, waste wood, municipal solid waste - plastic bags and waste CO₂ was investigated. For each waste material, process model of methanol production is developed using Aspen Plus simulator. Furthermore, simplified economic analysis in terms of methanol prices and cost of waste materials is performed. The solutions obtained are compared with the solution using natural gas as a raw material for methanol production. Results show that biogas and waste wood are the most economically viable waste materials for methanol production. The highest amounts of methanol are produced by conversion from municipal solid waste – plastic bags.

1. INTRODUCTION

In recent decades constantly growing amounts of waste and the burdens associated with waste materials have become a widespread problem [1]. Most of waste materials are disposed of in landfills or dumped in the open space and will remain in the environment for hundreds or thousands of years. Therefore, waste treatment and management present a significant challenge in most of the countries worldwide [2] and will need to be changed from a linear system to more circular system to achieve the progress in sustainable development and more circular systems [3].

One example of non-linear system is the usage of waste materials as a raw material for production of synthesis gas (syngas). Waste materials can efficiently replace the natural gas (NG), which is traditionally used for production of syngas. By using NG, various techniques can be used. For example, the conversion of NG into syngas can be performed via catalytic processes based on partial oxidation of CH₄, described by direct mechanism: $\text{CH}_4 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + 2 \text{H}_2$. The indirect mechanisms of catalytic partial oxidation of methane, consisting of methane combustion, steam reforming and dry reforming, are given by following chemical reactions [4]:

- methane combustion, exothermic reaction: $\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$
- steam reforming, endothermic reaction: $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$
- dry reforming, endothermic reaction: $\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \rightarrow 2 \text{CO} + 2\text{H}_2$

The maximal syngas production from NG depends on various influencing parameters, like the used catalyst, ratios H₂/CO, CO₂/O₂ and O₂/CH₄, and other process conditions [4]. These influencing parameters and process conditions play an important role when using various types of waste materials for syngas and methanol production as alternative to NG. Promising alternatives to NG seem to be biogas from waste (BG), waste wood (WW) [5], municipal solid waste – plastic bags (MSW) [6] and waste CO₂ (WCO₂) [7]. The composition of biogas is mainly CH₄, with a certain amounts of CO₂ and other species in smaller quantities like H₂S, H₂, N₂ and CO. Due to similar composition of biogas (cleaned) and NG, all chemical reactions for syngas production are similar [8]. Furthermore, the method of two-stage pyrolytic biomass processing, combining the WW pyrolysis, and subsequent heterogeneous cracking of volatile pyrolysis products in charcoal bed, provides a high degree of energy conversion of raw material into syngas [9]. By using MSW as alternative to NG, the clean syngas can be produced via catalytic gasification and reforming technology [10] [11] [12]. CO and H₂ are the main products of the CO₂ water electrochemical reduction, where high selectivity, current density and good stability are the main challenges to find a suitable CO₂ reduction catalyst [13]. Syngas could further be used for many useful products, such as biopolymers [14], methyl acetate and ethylene [15] or methanol [16]. Methanol is a large volume product (100 Mt in 2020), which could be used as both chemical and fuel in several applications [17]. Methanol is produced from syngas via the following chemical reactions [18] [19]:

- CO hydrogenation: $\text{CO} + 2\text{H}_2 \leftrightarrow \text{CH}_3\text{OH}$
- CO₂ hydrogenation: $\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \leftrightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$.

It was stated [17] that waste-to-methanol process allows to produce methanol with about 40% and 30–35% reduction in greenhouse gas (GHG) emissions with respect to methanol production from fossil fuels and bio-resources.

In this work the possibility of using waste materials for production of methanol via syngas is considered. Various waste materials are considered, such as BG, WW, MSW and WCO₂. For each waste material, process model of methanol production is developed using Aspen Plus simulator. Furthermore, simplified economic analysis in terms of raw material costs and product prices is performed to obtain simple economic bound of maximum potential profit [20].

The obtained solutions are compared with the solution using natural gas (NG) as a raw material for methanol production.

2. METHANOL PRODUCTION

Waste materials such as BG, WW, MSW and WCO₂ are investigated as potential candidates to produce methanol via syngas. For each selected waste material, process model of methanol production is developed using Aspen Plus simulator. The simulated models for the methanol production consist of 4 steps; (i) syngas synthesis (ii) syngas purification, (iii) methanol synthesis, and (iv) methanol purification, Fig 1. For simplification, only the main components as obtained from pre-treatment of each waste materials, were used in the study. Used waste materials and their components with assumed composition are presented in Table 1.

Table 1: Used raw materials and their compositions.

Raw material	Component	Fraction
BG	CH ₄	60%
	CO ₂	40%
WW	CO	50%
	H ₂	50%
MSW	C ₂ H ₄ ,	100%
WCO ₂	CO ₂	100%
NG	CH ₄	100%

Assumed pre-treatment technologies are desulfurization for NG and BG, gasification for WW and for MSW, while the source of WCO₂ is considered to be captured CO₂ from power plant. The methanol synthesis model consists of two reactors, two separators, three heat exchangers and two compressors, Table 2.

Table 2: List of equipment.

Equipment name	Block type	Description
R1	RGibbs	Gas equilibrium composition calculation
E1	Cooler	Cooling the stream
S1	Flash	Separation of condensate from gas
PC1	Compressor	Increase of pressure
E2	Heater	Heating the stream
R2	REquil	Simultaneous phase and chemical equilibrium calculation
PC2	Valve	Decrease of pressure
E3	Cooler	Cooling the stream
S2	Flash	Separation of gasses and methanol

The Aspen Plus flowsheet process for methanol production from various raw materials is shown in Fig. 1.

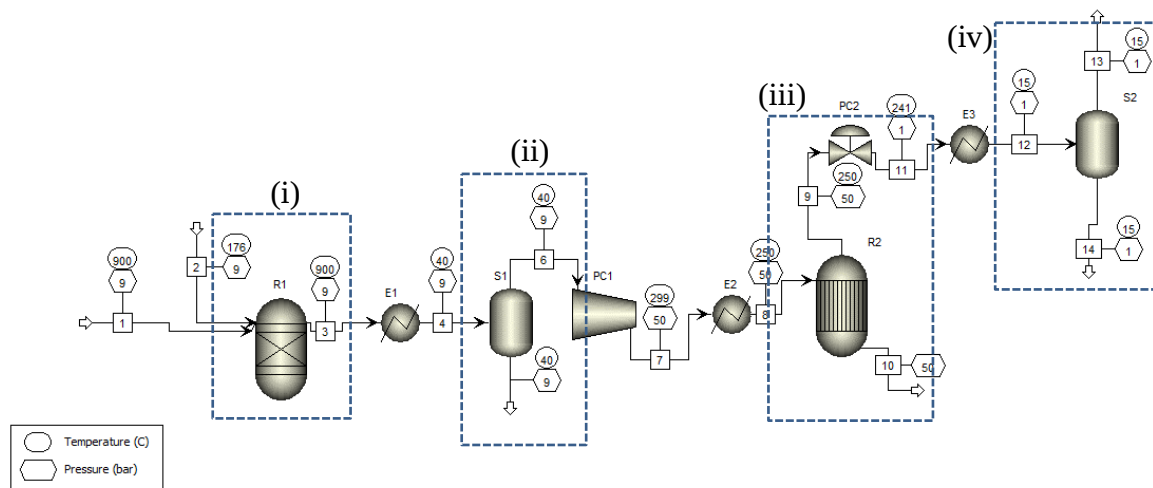


Fig.1: Aspen Plus flowsheet process.

In order to compare results, obtained by various raw materials, the feed rate of each raw material was fixed at 1000 kmol/h. Material enters into R1 at temperature of 900 °C and pressure of 9 bar (stream 1), while steam enters into block R1 at temperature of 176 °C and 9 bar in cases of NG, BG, WW and MSW (stream 2), but in the case of WCO₂, H₂ is used instead of steam with temperature of 176 °C and pressure of 9 bar (stream 2), Fig. 1.

Chemical reactions in reactor R1 are considered to occur at temperature of 900 °C and at pressure of 9 bar by minimizing Gibbs free energy. Used catalyst in R1 is NiO in order to speed up reactions. Raw syngas was further cooled at 9 bar in E1 to 40 °C in order to separate H₂O from syngas in S1. Since the methanol production takes place at temperature of around 250 °C and at pressure of around 50 bar in the R2 with Cu catalyst, it is necessary to increase the pressure from 9 bar to 50 bar with PC1 and then with E2 to raise the temperature from 40 °C to 250 °C. As it is of interest to obtain the methanol of the highest possible purity, the separation process in S2 was considered to occur at 15 °C and 1 bar, after the pressure and temperature decreases in PC2 and E3.

Base thermodynamic model for the entire process and for the reactions in R1 is Grayson, for R2 is Peng Robinson and for S2 is RK Aspen. Chemical reactions in R1 (syngas production) and R2 (methanol synthesis) for each waste material are presented in Table 3 [4] [8] [21] [22].

Table 3: Chemical reactions for syngas and methanol production.

Raw material	Component	Reaction in block R1	Reaction in block R2
BG	CH ₄ , CO ₂	$\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \rightarrow 2 \text{CO} + 2 \text{H}_2$ $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3 \text{H}_2$ $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 3 \text{H}_2$	
WW	CO, H ₂	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$	$\text{CO} + 2 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$
MSW	C ₂ H ₄	$\text{C}_2\text{H}_4 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{CO} + 4 \text{H}_2$	$\text{CO}_2 + 3 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$
WCO ₂	CO ₂	$\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$	
NG	CH ₄	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3 \text{H}_2$ $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 3 \text{H}_2$	

The methanol production was firstly simulated using the data as presented above, and in the second step it was optimized to obtain simple economic bound of the process [20] and maximal methanol production. With simplified economic optimization of the process by optimizing different parameters such as temperatures and pressures in R2 and S2, maximum potential profit of the process has thus been estimated which considers costs of waste materials and methanol price. Temperature in R2 could be between 200 and 300 °C and pressure between 30 and 70 bar. In S2, temperature could be in the range 10 and 40 °C and pressure between 0.5 and 70 bar. The assumed price of methanol and assumed costs of all raw materials in the study are presented in Table 4.

Table 4: Assumed price of methanol and cost of raw materials.

Product/Raw material	Price/Cost (EUR/kg)
Methanol	0.4
BG	0.235
WW	0.075
MSW	0.5
WCO ₂	0.13
NG	0.45

Objective was to maximize the amount of produced methanol by considering price of methanol and cost of raw material:

$$\max Z = C_{MET} \cdot P_{MET} \cdot t - C_{RM} \cdot P_{RM} \cdot t \quad (1)$$

where:

- C_{MET} - cost of methanol $\left(\frac{\text{EUR}}{\text{kg}}\right)$
- P_{MET} - amount of produced methanol $\left(\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right)$
- C_{RM} - cost of raw material $\left(\frac{\text{EUR}}{\text{kg}}\right)$
- P_{RM} - feed rate of raw material $\left(\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right)$
- t - operating time $\left(8000 \frac{\text{h}}{\text{year}}\right)$

3. RESULTS AND DISCUSSION

As it was stated previously, the methanol production was firstly simulated, and later it was optimized on obtain simple economic bound for production processes. Both, simulations and optimizations were performed using Aspen Plus. For each raw material, the obtained simulated capacities of produced methanol are graphically presented in Fig. 2.

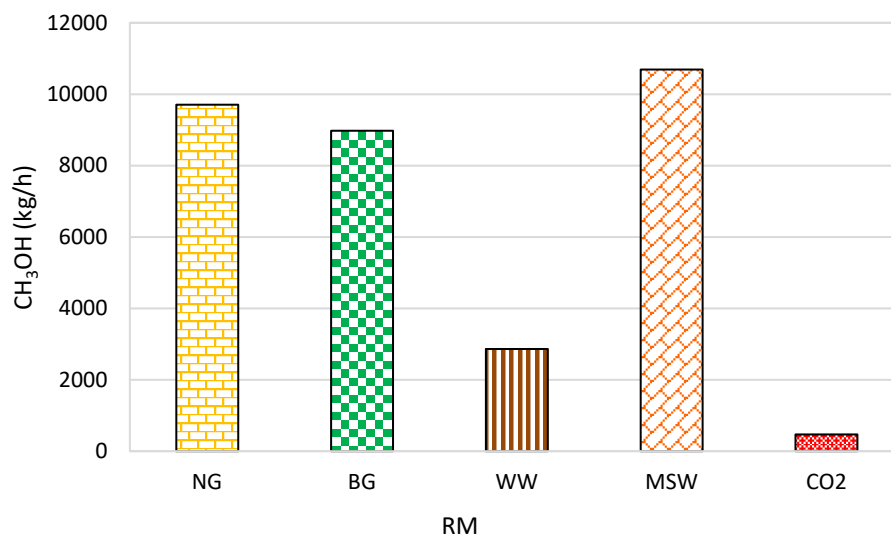


Fig.2: Simulated capacities of produced methanol.

Fig. 2 show that maximal production of methanol is obtained from MSW, while WCO₂ offered the lowest amount of produced methanol, because the amount of generated CO during syngas production in R1 is small. The amount of methanol produced before (obtained by simulation) and after optimization depending on different waste materials and NG is shown in Fig. 3.

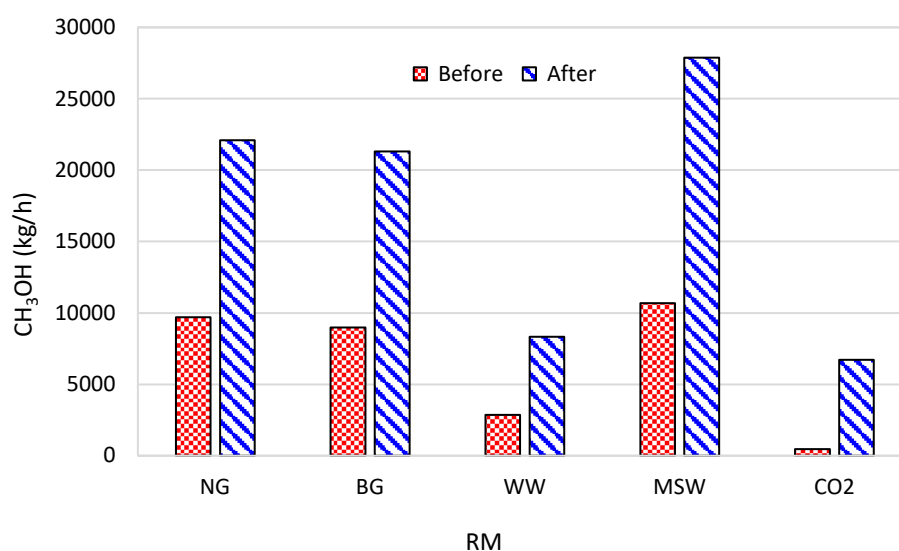


Fig.3: Amount of methanol produced before and after optimization.

The objective function as simple indicator of economic viability shows that the most profitable waste sources for methanol production are BG and WW, Fig. 4.

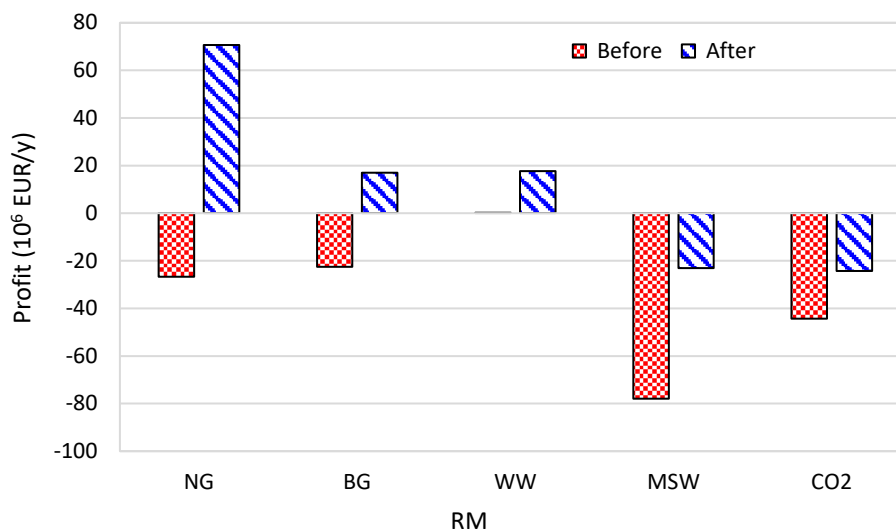


Fig.4: Profit before and after optimization.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful for the financial support from the Slovenia Research Agency (PhD research fellowship contract No. 1000-18-0552 and core research funding No. P2-0412 and P2-0032).

4. REFERENCES

- [1] Abdel-Shafy HI, Mansour MSM. Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization. *Egyptian Journal of Petroleum*. 2018;27(4):1275-90.
- [2] Guerrero LA, Maas G, Hogland W. Solid waste management challenges for cities in developing countries. *Waste Management*. 2013;33(1):220-32.
- [3] Singh J, Ordoñez I. Resource recovery from post-consumer waste: important lessons for the upcoming circular economy. *Journal of Cleaner Production*. 2016;134:342-53.
- [4] Chen W. H. CO₂ conversion for syngas production in methane catalytic partial oxidation. *Journal of CO₂ Utilization*. 2014;5:1–9.
- [5] Aydin E. S., Yucel O., Sadikoglu H. Experimental study on hydrogen-rich syngas production via gasification of pine cone particles and wood pellets in a fixed bed downdraft gasifier. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.02.175
- [6] Šuhaj P., Husar J., Haydarry J. Modelling of syngas production from municipal solid waste (MSW) for methanol synthesis. *Acta. Chimica. Slovaca*. 2017;10:107-114.
- [7] Manneti G., Molinari L., Manenti F. Syngas from H₂S and CO₂: An alternative, pioneering synthesis route? *Hydrocarbon Processing* 2016;6:1-4.

- [8] Chein R. Y., Hsu W. H. Analysis of syngas production from biogas via the tri-reforming process. *Energies*. 2018;11:1–18.
- [9] Larina O. M., Lavrenov V. A., Zauitchenko V. M. The partial replacement of diesel fuel in hot boiler with syngas obtained by thermal conversion of wood waste. In K.V. Anisimov, A.V. Dub, S.K. Kolpakov, A.V. Lisitsa, A.N. Petrov, V.P. Polukarov, O.S. Popel, V.A. Vinokurov (Eds.), *Proceedings of the Scientific-Practical Conference "Research and Development - 2016"*, Moscow, Russia, 165-171.
- [10] Zhang L., Wu W., Zhang Y., Zhou X. Clean synthesis gas production from municipal solid waste via catalytic gasification and reforming technology. *Catalyst Today* 2018;318:39–45.
- [11] He M., Xiao B., Liu S., Hu Z., Guo X., Luo S., Yang F. Syngas production from pyrolysis of municipal solid waste (MSW) with dolomite as downstream catalyst. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2010;87:181–187.
- [12] Pandey B. K., Vyas S., Pandey M., Gaur A. Municipal solid waste to energy conversion methodology as physical, thermal, and biological methods. *Current Science Perspectives* 2016;2(2):39–44.
- [13] Hernández S., Farkhondeh M. A., Sastre F., Makkee M., Saracco G., Russo N. Syngas Production from Electrochemical Reduction of CO₂: Current Status and Prospective Implementation. *Green Chemistry* 2017;19:2326–2346.
- [14] Drzyzga O., Revelles O., Durante-Rodríguez G., Díaz E., García JL, Prieto A. New challenges for syngas fermentation: towards production of biopolymers. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*. 2015;90(10):1735-51.
- [15] Zhou W, Kang J, Cheng K, He S, Shi J, Zhou C, Zhang Q, Chen J, Peng L, Chen M, Wang Y. Direct Conversion of Syngas into Methyl Acetate, Ethanol, and Ethylene by Relay Catalysis via the Intermediate Dimethyl Ether. *Angewandte Chemie*. 2018;130(37):12188-92.
- [16] Hernández B, Martín M. Optimal Process Operation for Biogas Reforming to Methanol: Effects of Dry Reforming and Biogas Composition. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2016;55(23):6677-85.
- [17] Iaquaniello G., Centi G., Salladini A., Palo E. Perathoner S., Spadaccini L. Waste-to-methanol: Process and economics assessment. *Bioresource Technology*. 2017;243:611–619.
- [18] Pérez-Fortes M., Schöneberger J. C., Boulamanti A., Tzimas E. Methanol synthesis using captured CO₂ as raw material: Techno-economic and environmental assessment. *Applied Energy* 2016;161:718–732.
- [19] Vita A., Italiano C., Previtali D., Fabiano C., Palella A., Freni F., Bozzano G., Pino L., Manenti F. Methanol synthesis from biogas: A thermodynamic analysis. *Renewable Energy* 2018;118:673–684.
- [20] Biegler L. T., Grossmann I. E., Westerberg A. W. *Systematic Methods of Chemical Process Design*, Prentice Hall, PTR, New Jersey, USA, 1997.

- [21] Nikitin A., Ozersky A., Savchenko V., Sedov I., Shmelev V., Aruthymunov V. Matrix conversion of natural gas to syngas: The main parameters of the process and possible applications. Chemical Engineering Journal 2019, doi: 10.1016/j.cej.2019.01.162.
- [22] Redissi Y., Bouallou C. Valorization of carbon dioxide by co electrolysis of CO₂/H₂O at high temperature for syngas production. Energy Procedia 2013;37:6667–6678.

ABOUT AUTHORS

Tina Kegl, mag. inž. kem. teh.

doc. dr. Lidija Čuček

doc. dr. Anita Kovač Kralj

Univerza v Mariboru, Fakulteta, za kemijo in kemijsko tehnologijo

Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija

Phone: +386 2 2294 400

Fax: +386 2 2527 774

Elektronska pošta: fkkt@um.si

doc. dr. Blaž Likozar

Kemijski inštitut

Hajdrihova 19, 1001 Ljubljana, Slovenija

Phone: 01/476 02 00

Fax: 01/476 03 00

E-mail: glavna.pisarna@ki.si

PRILAGAJANJE UPORABNIKOV MIKROOMREŽJEM

Vlasta KRMELJ, Marko ROJS, Tomaž ROBIČ

POVZETEK

Preobrazba elektro energetskega sistema za omogočanje večje izkoriščenosti OVE, energetske samozadostnosti in stabilizacije oskrbe močno obremenjenih omrežij bo morala vsebovati tudi mikroomrežja. Za dejansko izvedbo mikroomrežij se bodo morali uporabniki, upravljalci in investitorji nekoliko prilagoditi. Potrebne bodo nekatere zakonodajne, vedenjske in postopkovne spremembe, ki otežujejo razvoj decentraliziranih mikrosistemov. Potrebna bodo tudi izobraževanja potencialnih uporabnikov ter informiranja o novih tehnologijah za vse deležnike.

USERS ADAPTATION TO MICROGRIDS

ABSTRACT

The transformation of the electrical energy system to allow greater use of RES, energy self-sufficiency and stabilization of the supply of heavily loaded networks will have to include micro networks. Users will have to adjust slightly for the actual implementation of micro networks. There will be some legislative, behavioural and procedural changes that make the development of decentralized microsystems more difficult. It will also require training of potential users and information on new technologies for all stakeholders.



Project co-financed by the European
Regional Development Fund



PILOTNI PRIMER TEORETIČNEGA MIKROOMREŽJA V ŠPORTNEM PARKU RUŠE

Tomaž ROBIČ

POVZETEK

Na pilotnem primeru teoretičnega mikroomrežja so se simulirale različne variante delovanja takšnega omrežja povezanosti več zgradb, na katerih je bil vzpostavljen sistem natančnega merjenja porabljene in proizvedene električne energije. Na podlagi teh simulacij so se ugotavljale lastnosti delovanja pod trenutnimi profili rabe in proizvodnje energije. Prav tako se je simulirala oskrba z OVE in samooskrba z kogeneracijo. Cilj simulacije je bil ugotavljanje neodvisnosti od centralnega omrežja z zmanjšanjem stroškov rabe energije in povečanjem deleža OVE.

SIMULATED MICROGRID PILOT EXAMPLE IN THE SPORTS PARK OF RUŠE

ABSTRACT

In the simulated microgrid pilot example, various variants of the operation of such a network of interconnections of several buildings were simulated, on which a system of accurate measurement of consumed and produced electricity was established. On the basis of these simulations we determined the performance characteristics under the current profiles of energy consumption and production at the site. Also, the supply of RES and self-supply with cogeneration was simulated. The aim of the simulation was to determine independence from the central network by reducing the cost of energy use and increasing the share of RES.

MIKROOMREŽJA ZA MANJŠE OTOŠKE KRAJE – PRIMER MODELA ZA OTOK GOZO NA OBMOČJU MALTE

Diane CASSAR

POVZETEK

Mikro omrežja predstavljajo številne prednosti, predvsem v manjših lokalnih skupnostih in na otokih. Pred implementacijo mikroomrežij je potrebno analizirati prednosti in slabosti z vidika tehničnih zahtev in ekonomske učinkovitosti. Realni podatki pilotnega primera, izvedenega na otoku Gozo, na Malti, služijo kot pilotni projekt in osnova za izračune in analize. Pilot zajema 15 javnih in zasebnih stavb. Rezultati projekta kažejo, da obstajajo prednosti mikroomrežij, tako za uporabnike kot operaterje omrežja.

MICRO-GRIDS FOR SMALL ISLAND COMMUNITIES –THE GOZO CASE-STUDY

ABSTRACT

The presentation shall focus on the advantages of implementing community-based micro-grids in small island localities. A number of value drivers for the implementation micro-grids shall be presented, both from a technical and a financial point of view. A specific case-study based on a pilot project implemented in the island of Gozo through the PEGASUS project shall be presented, highlighting economic advantages for different types of users within a community as well as potential advantages for grid operators.



Project co-financed by the European Regional Development Fund



MONITORING ENERGIJE KOT SESTAVNI DEL ZAGOTAVLJANJA ENERGETSKE UČINKOVITOSTI

Peter VRTIČ

POVZETEK

V tej raziskavi so bili v okviru EU projekta Together razviti monitoring sistemi, pri čemer so bili obstoječi energetski sistemi v štirih javnih objektih nadgrajeni s senzorji, informacijskim sistemom in vizualizacijo podatkov. Vizualizacija podatkov je bila izvedena z namestitvijo monitorja na izpostavljen del hodnika objekta, kjer so predstavljeni energetski indikatorji v 15 minutnem intervalu, kar spodbuja uporabnike objekta, energetske upravljavce in lastnike k dvigu zavesti in spremembi obnašanja z namenom povečanja energetske učinkovitosti. Raziskava je razširjena z rezultati EU projekta StoRES, kjer je bil v stanovanjski objekt nameščen baterijski hranilnik energije in monitoring sistem z obstoječim fotonapetostnim sistemom, s čimer se je vzpostavilo mikroomrežje v režimu obratovanja z elektroenergetskim omrežjem in sicer z namenom dvigniti stopnjo energetske samooskrbe.

ENERGY MONITORING AS AN INTEGRAL PART OF ENERGY EFFICIENCY ASSURANCE

ABSTRACT

In this research energy monitoring systems were developed within the EU project Together, where existing energy systems of four public buildings were upgraded with sensors, information system and data visualisation. Data visualisation was carried out by installing the monitor on the exposed part of building corridor, where energy indicators in 15 min intervals are presented, which encourage the buildings users, energy managers and owners to rise the awareness and change the behaviour in order to increase energy efficiency. The research is extended with the results of StoRES EU project, where battery storage system and monitoring system with existing photovoltaic system in residential building were installed forming the microgrid in grid-connected mode of operation in order to increase the level of energy self-sufficiency.



Project co-financed by the European
Regional Development Fund



PRIMERI DOBRIH PRAKS UVEDBE ENERGETSKEGA INFORMACIJSKEGA SISTEMA

Aleš NASTRAN

POVZETEK

AMIBIT naslavlja naraščajoči trend digitalne transformacije v energetskega sektorju z inovativnimi rešitvami, ki temeljijo na lastno razviti strojni (krmilniki) in programski opremi ter omogočajo spremljanje in upravljanje priključenih naprav v realnem času, s čimer različnim profilom uporabnikom (vodjem, vzdrževalcem, administraciji in uporabnikom) omogočajo doseganje nove vrednosti. Slednje obsegajo učinkovito rabo energije; znižanje stroškov energije in emisij CO₂; šifriranje prenosov podatkov, usklajenimi z GDPR ter visoki varnostni standardi; optimizacija energetskega sistema; avtomatizacija procesov, povezanih z energijo, poročanjem in vnosom podatkov; opozarjanje ob mejnih vrednostih in anomalijah; boljše načrtovanje virov; boljša uporabniška izkušnja; avtomatizirano energetsko knjigovodstvo in drugo.

BEST PRACTICES OF ENERGY MANAGEMENT SYSTEM IMPLEMENTATION

ABSTRACT

AMIBIT addresses the increasing trend of digital transformation in the energy sector with own developed innovative hardware (controllers) and software solutions, which enable the monitoring and management of connected devices in real time, bringing users value on different levels (management, maintenance staff, administration, users), including: efficient energy use; lowering energy costs, CO₂ emissions and energy consumption; encryption of data transfers aligned with GDPR and high security standards, energy system optimization, automation of energy-related processes, reporting and data inputs; alerting; better planning of resources; better user experience; automated energy bookkeeping and others.



Project co-financed by the European
Regional Development Fund



MOŽNOSTI UPORABE MIKROOMREŽIJ

Žiga ZUPANČIČ, Peter SOMI

POVZETEK

Strategije na področju sigurne oskrbe z energijo vzpodbujajo uporabo lokalnih virov in manjših omrežij, katerih cilj je optimizacija proizvodnje in porabe energije. Samooskrba in lokalna omrežja postajajo vedno pomembnejši dejavnik pri načrtovanju proizvodnje in rabe energije. Pri načrtovanju in vzpostavitvi lokalnih oziroma tako imenovanih mikroomrežij je potrebno upoštevati številne dejavnike: administrativne, tehnične in finančne, tako na strani proizvodnje kot pri uporabnikih. Preizkušeni poslovni modeli kažejo, da je optimalne pogoje delovanja možno doseči predvsem tam, kjer mikroomrežja delujejo ob podpori distribucijskega omrežja.

Cilj mikroomrežnega modela je tako zmanjšati stroške energije za člane mikroomrežne skupnosti, zagotoviti zanesljivejšo oskrbo z energijo z uporabo obnovljivih virov energije (morda v povezavi s shranjevanjem energije) in zmanjšati izgube v distribucijskem omrežju v zgornjem delu oskrbne verige.

POSSIBILITIES OF USING MICROGRIDS

ABSTRACT

Strategies in the field of secure energy supply encourage the use of local resources and smaller microgrids to optimize the production and consumption of energy. Self-sufficiency and local grids are becoming an increasingly important factor in planning of production and energy use. When designing and establishing local or so-called microgrids a lot of indicators must be considered: administrative, technical and financial, both on the production and users side. A proven business models show that optimal operating conditions can be achieved when microgrids operate with the support of the distribution network.

The goal of the microgrid model is to reduce energy costs for members of the microgrid community, to provide more reliable energy supply through the use of renewable energy sources (possibly in connection with energy storage) and to reduce losses in the distribution network in the upper part of the supply chain.



Project co-financed by the European
Regional Development Fund



DINAMIČNA SIMULACIJA PROCESA USKLAJENE IZRAVNAVE TRENUTNIH ODSTOPANJ REGULACIJSKIH OBMOČIJ

Marcel TOPLER, Robert BREZOVNIK, Jožef RITONJA, Boštjan POLAJŽER

POVZETEK

Članek obravnava proces usklajene izravnave trenutnih odstopanj (ang. Imbalance Netting Proces – INP) regulacijskih območij (RO), ki je bil implementiran v Kontinentalni Evropi zaradi visokih stroškov izravnalne energije. Namen INP je kompenziranje zahtev izravnalne energije med povezanimi RO, ki imajo različne predznake trenutnih izmenjav moči. Dobljeni rezultati dinamičnih simulacij potrjujejo, da INP zmanjša izravnalno energijo in s tem sprosti regulacijsko rezervo, zmanjša pa se tudi nenamerna izmenjava energije. Poleg tega dobljeni rezultati nakazujejo vpliv INP na izvajanje regulacije frekvence.

ABSTRACT

This paper discusses Imbalance Netting Process (INP) between multiple control areas (CAs) that was integrated in Continental Europe due to high costs of balancing energy. The purpose of INP is to net the demand for balancing energy between interconnected CAs with different signs of instantaneous interchange power variation. Results obtained with dynamic simulations confirm that INP reduces balancing energy and thus releases regulating reserve. Furthermore, the unintended exchange of energy is also reduced. Moreover, the obtained results also indicate the impact of INP on performance of the frequency control.

1. UVOD

Ena izmed glavnih nalog systemskega operaterja prenosnega omrežja (SOP) je vzdrževanje in zagotavljanje ravnotežja med proizvodnjo in porabo električne energije v regulacijskem območju (RO) [1]. Neravnotežja se odražajo v odstopanju frekvence, ki mora biti omejeno z različnimi ciljnim vrednostmi, frekvenca pa je regulirana na različnih nivojih [2] - [4].

Z uskladitvijo aktivacije izravnalne energije povezanih RO se lahko izkoristi morebiten denarni prihranek zaradi zmanjšanja aktivacije sekundarne regulacijske rezerve. Ena izmed možnosti optimizacije aktivacij je usklajena izravnava trenutnih odstopanj RO (ang. Imbalance Netting Process – INP). INP je uporabljen za optimizacijo kompenzacij neravnotežij med RO, s čimer je odpravljena aktivacija regulacijske rezerve z nasprotnim predznakom. INP doda korekcijsko vrednost v izračun napake RO (ang. Area Control Error – ACE) preko virtualnega povezovalnega voda, vključno z dejanskimi odzivi reguliranih proizvodnih enot.

Kakovost frekvence v zadnjih letih pada [5] in INP bi naj pozitivno vplival na njeno kakovost in na izvajanje regulacije delovne moči in frekvence (ang. Load-Frequency Control – LFC). V [6] je pokazano, da INP sprosti regulacijsko rezervo, medtem pa ne vpliva na izvajanje LFC. V tem članku želimo s simulacijo testnega sistema treh povezanih RO pokazati vpliv INP na dinamiko regulacijskih enot in posameznih RO, kakor tudi na izvajanje regulacije frekvence.

2. LFC IN INP

2.1 Osnovni princip delovanja LFC

Vsak posamezni SOPO zagotavlja LFC v svojem RO in tako odpravlja odstopanje frekvence in odstopanje moči izmenjav na čezmejnih povezovalnih vodih. Odstopanje moči izmenjav in odstopanje frekvence i -tega RO sta definirani kot

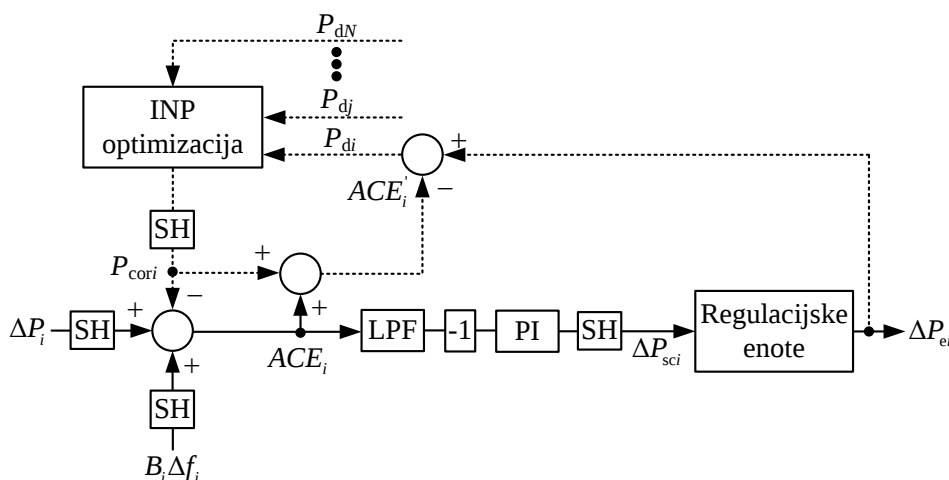
$$\Delta P_i = P_{ai} - P_{si}, \quad (1)$$

$$\Delta f_i = f_{ai} - f_{si}, \quad (2)$$

kjer P_{ai} in f_{ai} označujeta dejanske, torej merjene vrednosti, medtem ko P_{si} in f_{si} označujeta načrtovane vrednosti. Neravnotežje med proizvodnjo in porabo i -tega RO, ki vključuje tudi odstopanje frekvence, je merjeno kot

$$ACE_i' = \Delta P_i + B_i \Delta f_i, \quad (3)$$

kjer je B_i faktor frekvenčnega prispevka, ki odraža velikost RO. Vsi SOPO določijo, na letni ravni, velikost B_i , ob upoštevanju vsote primarne regulacijske rezerve glede na maksimalno stacionarno odstopanje frekvence, samoregulacijo bremen in avtomatsko regulacijo [2]. Upoštevati je potrebno, da ACE_i' ne zajema korekcijskega člena INP.



Slika 1: Blokovna shema LFC (polna črta) z INP optimizacijo (črtkana črta) za i -to RO.

Slika 1 prikazuje osnovno strukturo LFC i -tega RO s polno črto, kjer LPF označuje nizkopasovni filter (ang. Low-Pass Filter), PI je proporcionalno-integralni regulator (ang. Proportional-Integral Controller), SH pa označuje vzorčenje in zadrževanje (ang. Sample and Hold) s časom vzorčenja T_s . Negativna povratna regulacijska zanka je upoštevana z ojačenjem -1 . Izhod LFC je načrtovana regulacijska moč ΔP_{sci} , ki je porazdeljena med različne regulacijske enote, ki sodelujejo pri LFC. Posamezna regulacijska enota ustrezno spremeni delovno moč, katerih vsota je označena z ΔP_{ei} . Zagotavljanje LFC je strošek za RO, ki je odvisen od velikosti regulacijske rezerve, kot tudi od dejansko aktivirane regulacijske moči. Pri tem je potrebna velikost regulacijske rezerve odvisna od ΔP_{sci} , medtem ko dejansko aktivirana regulacijska moč ΔP_{ei} v enoti časa označuje izravnalno energijo.

2.2 Osnovni princip delovanja INP

INP je bil razvit zaradi visokih stroškov izravnalne energije, kjer lahko RO z različnimi predznaki odstopanj moči ta odstopanja med seboj kompenzirajo. Na ta način se zmanjša izravnalna energija, sprosti pa se tudi regulacijska rezerva. Vhodna spremenljivka INP je zahtevana moč P_{di} , ki določa skupno moč, in jo je treba kompenzirati z ostalimi RO, ki imajo nasproten predznak ACE_i' . V primerih, ko je ACE_i' pozitiven, je proizvodnja večja od porabe, posledično je RO "dolgo". Zato je potrebna negativna vrednost P_{di} za zmanjšanje ACE_i' . Negativen ACE_i' pomeni, da je RO "kratko", zato mora biti P_{di} pozitiven. Zahtevana moč je tako podana kot

$$P_{di} = \Delta P_{ei} - ACE_i' \quad (4)$$

Izhodna spremenljivka INP je korekcija P_{cori} in je dodana v (3) na način

$$ACE_i = (\Delta P_i + B_i \Delta f_i) - P_{cori} \quad (5)$$

kjer izraz v oklepaju označuje ACE_i' . Jasno je, da morata imeti P_{di} in P_{cori} različen predznak. Struktura LFC z dodanim INP je prikazana na sliki 1 s črtkano črto, kjer INP optimizacija izračuna P_{cori} s časovno zakasnitvijo $T_s = 2$ s, ki je posledica vzorčenja in zadrževanja.

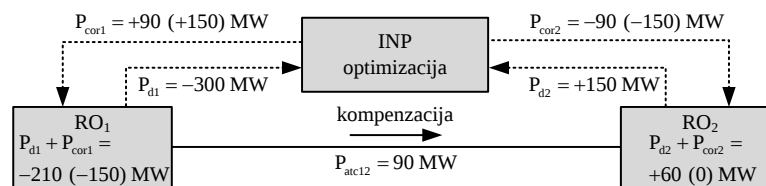
2.2.1 INP optimizacija

Glavni cilj INP optimizacije je največja možna kompenzacija s splošno omejitvijo P_{di} . Pri tem pa je potrebno upoštevati tudi omejitve prenosnih zmogljivosti daljnovodov (ang. Available Transmission Capacity – ATC), ki je lahko različna za obe smeri kompenzacije. Povezovanje več RO skozi eno skupno točko doda ciljno funkcijo porazdelitve korekcije med sodelujoča RO. Uporabljena porazdelitvena funkcija je največkrat sorazmerno z neravnotežjem, uporabijo pa se lahko tudi druge vrste porazdelitve [7]. V primeru vzporednih prenosnih poti je potrebna dodatna ciljna funkcija prednostne uporabe tistih prenosnih poti, ki imajo največjo vrednost omejitve ATC. Poleg tega INP omogoča tudi ekonomsko optimizacijo sodelujočih RO.

2.2.2 Primera stacionarnega izračuna korekcije

a.) Primer za dve RO

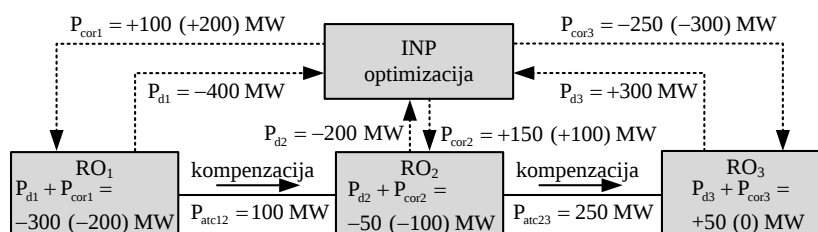
Vrednosti izračuna korekcije z INP optimizacijo za dve RO so prikazane na sliki 2. V omenjenem primeru je RO₁ dolgo ($P_{d1} = -300$ MW), medtem ko je RO₂ kratko ($P_{d2} = +150$ MW). Omejitev ATC znaša $P_{atc12} = 90$ MW. Brez omejitve ATC lahko RO₂ uvozi 150 MW iz RO₁, tako da ostane RO₁ dolgo ($P_{d1} + P_{cor1} = -150$ MW), RO₂ pa je izravnano ($P_{d2} + P_{cor2} = 0$ MW). V primeru omejitve ATC pa lahko RO₂ uvozi le 90 MW iz RO₁, ki ostane dolgo ($P_{d1} + P_{cor1} = -210$ MW), medtem ko ostane RO₂ kratko ($P_{d2} + P_{cor2} = +60$ MW).



Slika 2: Izračun korekcije z INP optimizacijo za dve RO, kjer so vrednosti brez omejitve ATC podane v oklepajih.

b.) Primer za tri RO

Vrednosti izračuna korekcije z INP optimizacijo za tri RO so prikazane na sliki 3, kjer sta RO₁ in RO₃ povezani samo preko virtualnega voda z INP optimizacijo, nista pa fizično povezani preko povezovalnega voda. V omenjenem primeru sta RO₁ in RO₂ dolgi ($P_{d1} = -400$ MW, $P_{d2} = -200$ MW), medtem ko je RO₃ kratko ($P_{d3} = +300$ MW). Brez omejitve ATC lahko RO₃ uvozi 300 MW, kar je proporcionalno porazdeljeno med RO₁ in RO₂ glede na neravnotežje. Tako lahko RO₁ izvozi 200 MW, medtem ko RO₂ izvozi 100 MW. Posledično ostaneta RO₁ in RO₂ dolgi ($P_{d1} + P_{cor1} = -200$ MW, $P_{d2} + P_{cor2} = -100$ MW), medtem ko je RO₃ izravnano ($P_{d3} + P_{cor3} = 0$ MW). V primeru omejitve ATC z $P_{atc12} = 100$ MW in $P_{atc23} = 250$ MW, lahko RO₃ uvozi le 250 MW. Zato ostane RO₃ kratko ($P_{d3} + P_{cor3} = +50$ MW), medtem ko ostaneta RO₁ in RO₂ dolgi ($P_{d1} + P_{cor1} = -300$ MW, $P_{d2} + P_{cor2} = -50$ MW).



Slika 3: Izračun korekcije z INP optimizacijo za tri RO, kjer so vrednosti brez omejitve ATC podane v oklepajih.

3. DINAMIČNI IZRAČUNI

Za testni model so bila uporabljena tri enaka RO, ki so bila povezana s povezovalnimi vodi na enak način kot prikazuje slika 3, torej povezava $RO_1 - RO_2$ in $RO_2 - RO_3$. Poleg tega so bila vsa RO povezana preko virtualnih vodov s skupnim INP optimizacijskim modulom. Sestavljen je bil Matlab/SIMULINK model in izvedeni so bili dinamični izračuni s korakom 50 ms.

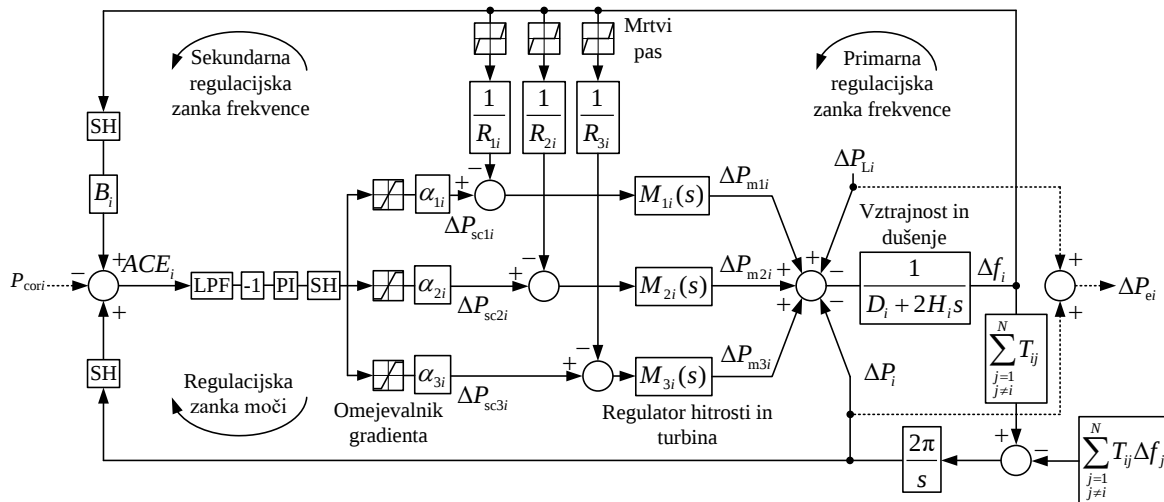
3.1 Dinamični model

3.1.1 Struktura

Posamezno RO je predstavljeno z lineariziranim modelom nižjega reda [8], kot prikazuje slika 4. Predpostavljeno je, da regulacija napetosti (jalova moč) ne vpliva na regulacijo frekvence (delovna moč). Poleg tega je skupina več generatorjev nadomeščena z enim ekvivalentnim, kjer je električni del zanemarljiv. Dinamika generatorja je predstavljena z vztrajnostjo rotorja H_i , frekvenčna odvisnost bremen pa z dušenjem D_i . Uporabljeni so bili trije različni tipi turbin z regulatorji hitrosti, to so vodna turbina, parna turbina s pregrevalnikom in parna turbina brez pregrevalnika. Mrtvi pasi regulatorjev hitrosti niso bili upoštevani zaradi negativnega vpliva na stabilnost sistema pri majhnih motnjah, zato je bila predpostavljena konstantna karakteristika padca hitrosti R_i . Povezava s sosednjimi RO je predstavljena s sinhronizacijskim koeficientom T_{ij} , ki je definiran s parametri ekvivalentnega povezovalnega daljnovoda brez izgub. Poleg tega sta upoštevana še LPF in PI regulator, ter omejitvev gradienta proizvodnje in faktor sodelovanja α_i regulacijskih enot. En cikel LFC in INP sta predstavljena z SH elementom s časom $T_s = 2$ s.

3.1.2 Parametri

Parametri turbin so bili izbrani v skladu z [1], [9]. Vrednost omejevalnika gradienta za vodno turbino je znašala ± 100 puMW/min, za parno turbino s pregrevalnikom ± 10 puMW/min in za parno turbino brez pregrevalnika ± 20 puMW/min. Upoštevani so bili enaki faktorji sodelovanja regulacijskih enot, ki so znašali $\alpha_{1i} = \alpha_{2i} = \alpha_{3i} = 1/3$. Faktor frekvenčnega prispevka je bil določen na način $B_i = (1/R_i + D_i)$, kjer je $D_i = 0,01$ pu/Hz, $1/R_i = (1/R_{1i} + 1/R_{2i} + 1/R_{3i})$ in $R_{1i} = R_{2i} = R_{3i} = 3$ Hz/pu.

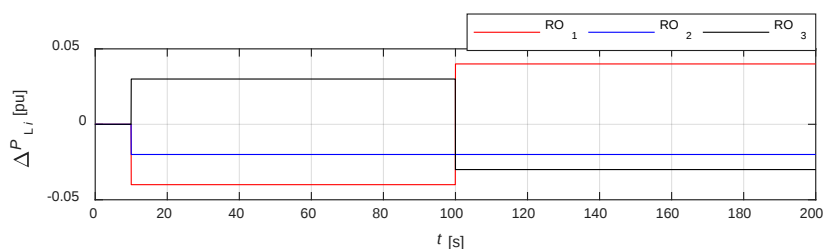


Slika 4: Blokovna shema i -tega RO v Laplaceovem prostoru, kjer črtkane črte označujejo vhodne in izhodne spremenljivke INP.

Vrednost vztrajnosti in sinhronizacijskega koeficienta smo ocenili na $H_i = 0,1$ pu s in $T_{ij} = 0,0667$ pu/Hz. Ojačenje in časovna konstanta LPF sta znašali $K_{LPFi} = 1$ in $T_{LPFi} = 15$ s, medtem ko je bilo ojačenje PI regulatorja $K_{PIi} = 0,3$, kar so tipične vrednosti. Parametri so bili enaki za vsa tri RO. Edina razlika so bile vrednosti časovnih konstant PI regulatorja, ki so znašale $T_{PI1} = 60$ s in $T_{PI2} = T_{PI3} = 30$ s. Izkazalo se je namreč, da ima ta parameter, v kombinaciji z INP, največji vpliv na dinamiko časovnih odzivov frekvence obravnavanih RO.

3.2 Testni primer

Za oceno vpliva INP na izvajanje LFC, omejitev ATC ni bila upoštevana, kar pomeni, da ima INP največji možni vpliv. Poleg tega so bila bremena vseh treh RO spremenjena istočasno. Izvedena sta bila dva simulacijska primera. V prvem primeru so bile nastavljene amplitude bremen takšne, da sta bili RO₁ in RO₂ dolgi, RO₃ pa kratko. V drugem primeru je bilo RO₁ kratko, medtem ko sta bili RO₂ in RO₃ dolgi. Absolutna vrednost vsote bremen v dolgih RO je bila večja kot absolutna vrednost v kratkih, kar je omogočalo maksimalno kompenzacijo med RO. Začetne vrednosti bremen so za vsa RO znašale nič. V prvem primeru je bila izvedena stopnična sprememba vseh bremen pri času $t = 10$ s, kjer so bile nastavljene amplitude bremen $\Delta P_{L1} = -0,04$ pu, $\Delta P_{L2} = -0,02$ pu in $\Delta P_{L3} = 0,03$ pu. V drugem primeru so bile izvedene stopnične spremembe pri $t = 100$ s, in sicer na vrednosti $\Delta P_{L1} = 0,04$ pu, $\Delta P_{L2} = -0,02$ pu in $\Delta P_{L3} = -0,03$ pu. Stopnične spremembe bremen so prikazane na sliki 5.



Slika 5: Stopnične spremembe bremen uporabljenih v simulacijskih izračunih za tri RO.

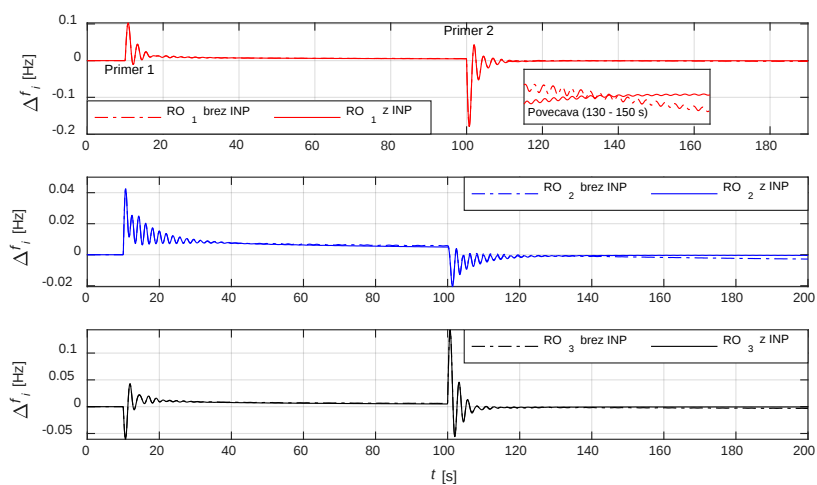
4. REZULTATI

Simulacijski izračuni so bili izvedeni za testni sistem treh povezanih RO, in sicer najprej z, nato pa še brez INP. Vpliv INP na izvajanje LFC je ovrednoten glede na dobljene dinamične odzive, ki so prikazani na slikah 6 – 9.

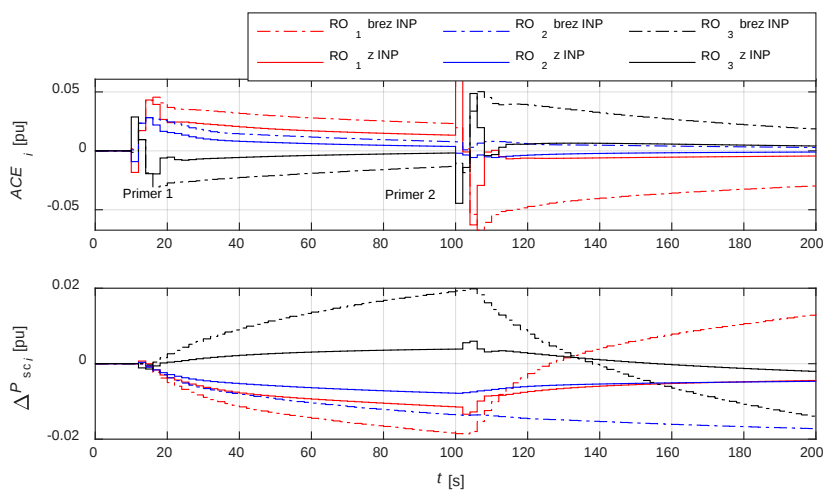
Ob stopnični spremembi bremen se pojavi odstopanje frekvence v vseh treh RO, kar prikazuje slika 6. Za primer 1 je odstopanje frekvence pozitivno zaradi negativne vrednosti vsote bremen, ki je $\Delta P_{L1} + \Delta P_{L2} + \Delta P_{L3} = -0,3$ pu. V prvem trenutku je odziv Δf_3 negativen zaradi pozitivne vrednosti ΔP_{L3} . Primarna regulacija zmanjša prehodni pojav frekvence v približno 30 s po stopnični spremembi nakar sekundarna regulacija počasi zmanjšuje odstopanje frekvence. Odzivi za primer 2 so podobni le predznaki so nasprotni. Dobljeni rezultati kažejo, da INP vpliva na časovne odzive frekvence, vendar šele po zaključku odziva primarne regulacije. Jasno je vidno, da INP zmanjša odstopanje frekvence v vseh treh RO za oba obravnavana primera. Vendar se v primeru 2 absolutna vrednost Δf_1 poveča v časovnem intervalu od 100 do 130 s. V primeru, ko je bila vrednost T_{PLi} enaka v vseh treh RO, ni bilo vpliva INP na odzive frekvence.

Vpliv INP je podrobneje viden na slikah 7 in 8. V vseh treh RO so vrednosti ACE_i , ΔP_{sci} in ΔP_{ei} manjše v primeru uporabe INP. Poleg tega INP poveča ΔP_i zaradi povečane moči po povezovalnem daljnovodu, ki je potrebna za kompenzacijo med RO. Iz ΔP_{ei} je jasno vidno, da INP nima znatnega vpliva na dinamiko primarne regulacije frekvence.

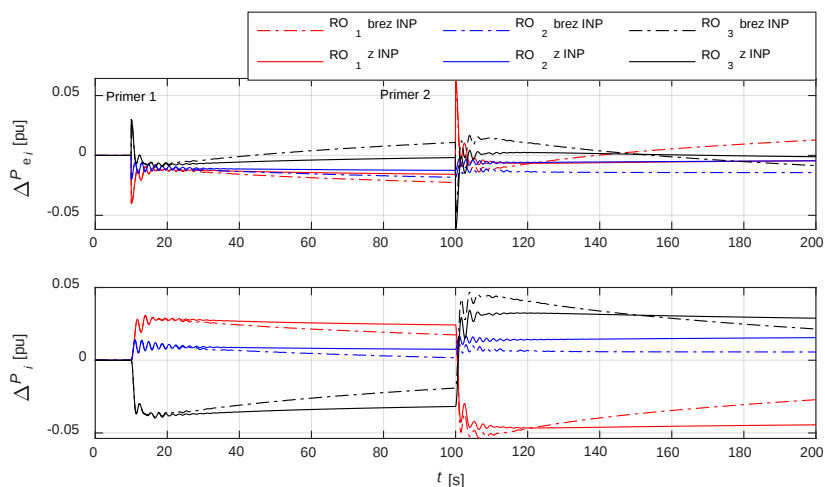
Slika 9 prikazuje vhodno ΔP_{di} in izhodno ΔP_{cori} spremenljivko INP, ki imata nasproten predznak. V odzivu ΔP_{cori} je vidna časovna zakasnitev 2 s, še posebej na začetku obeh prehodnih pojavov. Poleg tega je zaradi vpliva oscilacij v Δf_i vidna sprememba predznaka v ΔP_{di} . Posledično tudi ΔP_{cori} spremeni predznak, vrednost pa je lahko tudi nič. Potrebno je poudariti, da hitre spremembe kompenzacij niso zaželeno, ker povečajo varianco ACE_i , kot kaže slika 7.



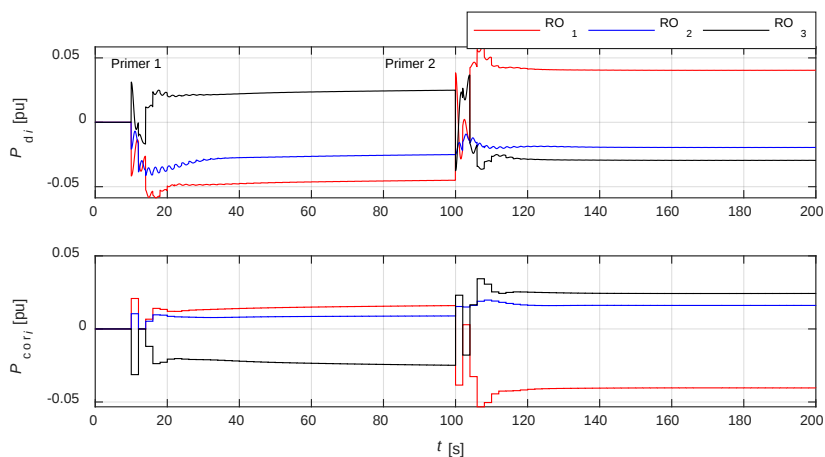
Slika 6: Časovni odzivi Δf_i za tri RO, brez INP in z INP.



Slika 7: Časovni odzivi ACE_i in ΔP_{sci} za tri RO, brez INP in z INP.



Slika 8: Časovni odzivi ΔP_{ei} in ΔP_i za tri RO, brez INP in z INP.



Slika 9: Časovni odzivi P_{di} in P_{cori} za tri RO z INP.

5. SKLEP

Članek obravnava proces usklajene izravnave trenutnih odstopanj (INP) regulacijskih območij (RO). Za testni sistem, sestavljen iz treh RO, so bili izvedeni dinamični izračuni s stopničnimi spremembami bremen. Dobljeni rezultati kažejo, da INP zmanjša odstopanje frekvence, vendar se lahko pojavijo tudi primeri, ko INP odstopanje frekvence poveča. Poudarimo, da INP vpliva na izvajanje sekundarne regulacije frekvence, vpliv na primarno regulacijo frekvence iz rezultatov ni razviden. Nadalje je pokazano, da INP zmanjša napako RO ACE_i , načrtovano regulacijsko moč ΔP_{sci} in električno regulacijsko moč ΔP_{ei} . INP tako zmanjšuje izravnalno energijo in sprošča regulacijsko rezervo, zmanjša pa se tudi nenamerna izmenjava energije. Vendar lahko INP med prehodnimi pojavi poveča varianco napake RO ACE_i , kar pa ima negativen vpliv na izvajanje regulacije moči in frekvence.

6. VIRI

- [1] P. Kundur, "Power system stability and control," New York: McGraw-Hill, 1994.
- [2] Establishing a guideline on electricity transmission system operation, Commission Regulation (EU) 2017/1485, Avg. 2017.
- [3] Frequency response standard, background document, NERC, Nov. 2012.
- [4] N. Jaleeli and L. S. VanSlyck, "NERC's new control performance standards," IEEE Trans. Power Syst., vol. 14, no. 3, pp. 1092—1099, Avg. 1999.
- [5] Operational Reserve Ad Hoc Team Report, ENTSO-E, Brussels, Belgium, Maj 2012.
- [6] P. Zolotarev et. al., "Grid control cooperation – a framework for technical and economical cross-border optimization for load frequency control," Cigre 2012, vol. C2-107, 2012.
- [7] M. Scherer and G. Andersson, "A blueprint for the imbalance netting process using multi-objective optimization," IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), Belgium, Apr. 2016.
- [8] P. M. Anderson and M. Mirheydar, "A low-order system frequency response model," IEEE Trans. Power Syst., vol. 5, no. 3, pp. 720-729, Avg. 1990.
- [9] H. Bevrani, "Robust power system frequency control," New York: Springer, 2009.

NASLOV AVTORJEV

asist. Marcel Topler, mag. inž. el.

asist. dr. Robert Brezovnik

izr. prof. dr. Jožef Ritonja

izr. prof. dr. Boštjan Polajžer

Univerza v Mariboru, Fakulteta, za elektrotehniko, računalništvo in informatiko
Koroška cesta 46, 2000 Maribor, Slovenija

e-pošta: marcel.topler@um.si

ANALIZA ELEKTROMAGNETNIH RAZMER V OKOLICI OZEMLJIL Z UPORABO METODE KONČNIH ELEMENTOV

Mladen Trlep, Marko Jesenik, Miloš Beković, Anton Hamler

POVZETEK

Glavna funkcija ozemljevanja je odvod toka okvare skozi ozemljitev v okoliško zemljo. Za analizo in dimenzioniranje ozemljitvenih sistemov je najbolj primerna metoda končnih elementov (MKE). Članek prikazuje uporabo MKE tako za problem statičnega oz. stacionarnega tokovnega polja kot tudi za problem časovno odvisnega elektromagnetnega polja v okolici ozemljitvenega sistema. V numeričnem modelu je upoštevana tudi ionizacija zemlje. Uporabljena programska rešitev omogoča analizo poljubnega ozemljitvenega sistema in lastnosti zemlje za različne časovne poteke toka okvare.

ABSTRACT

The main function of grounding is to enable discharging of fault currents into the soil around the grounding system. The most common approach for dimensioning of the grounding systems is the use of the finite element method FEM. This paper shows the use of (FEM) for a static/stationary, first and second order time dependent electromagnetic field problem, around grounding systems. In the numerical model also ionization in the soil should be considered. The applied program solution is suitable for any grounding system and soil properties as well as time-varying fault current.

1. UVOD

Namen ozemljitvenega sistema (OS) je omogočiti odvajanje toka okvare skozi ozemljilo v okoliško zemljo in ustrezno oblikovanje porazdelitve električnega potenciala na površini zemlje, ki zagotavlja dovolj majhne napetosti koraka in dotika. Analiza teh razmer zahteva izračun elektromagnetnega polja. Sam problem izgleda na prvi pogled enostaven. Prostor izračuna predstavlja slabo prevodni del (zemlja), v katerega je vkopano ozemljilo iz visoko prevodnega materiala in zrak nad površino zemlje. Geometrije posameznih področij so praviloma enostavne, električne in magnetne lastnosti področij, razen v primeru ionizacije zemlje, pa linearne.

Tako je električna prevodnost OS konstantna, reda 10^6 S/m do 10^7 S/m, prevodnosti zemlje pa v območju 0.1 S/m do 0.0005 S/m, Struktura zemlje je lahko zelo različna, tako naletimo pri izračunu na primere, ko je zemlja:

- homogena

- slojevita in homogena po slojih
- deloma lokalno nehomogena:
 - zaradi ščiteneh objektov ali objektov v okolici OS, katerih del (armirani beton) se nahaja v zemlji,
 - zaradi potrebe po izboljšanju prevodnosti zelje v neposredni okolici OS (geli, nanosi dobro prevodne zemlje,...)
 - zaradi konfiguracije terena (kamniti predeli v okolici, vodni viri,...)
 - zaradi ionizacije zemlje pri večjih tokovnih gostotah J , ko specifična prevodnost (σ) oz. upornost (ρ) postane nelinearna funkcija E oz. J . Bolj natančen model (t.i. dinamični model ionizacije) pa vsebuje histerezno odvisnost $\rho(J)$

Predstavljen splošni problem OS je opisan s sistemom Maxwellovih enačb (1).

$$\begin{aligned}
 \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\
 \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\
 \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0 \\
 \operatorname{div} \mathbf{D} &= \rho
 \end{aligned} \tag{1}$$

Kjer je $\mathbf{H}$ - magnetna poljska jakost (A/m), $\mathbf{B}$ - gostota magnetnega pretoka (T), $\mathbf{E}$ - električna poljska jakost (V/m), $\mathbf{D}$ - gostota električnega pretoka (As/m²), $\mathbf{J}$ - tokovna gostota (A/m²), ρ - prostorska gostota naboja (As/m³).

V praksi pri analizi OS naletimo na dva ločena primera:

- I. obravnava razmer v okolici OS, ko pride do okvare med obratovanjem elektroenergetskega sistema frekvenca 50Hz oz. 60Hz oz. do okvare v enosmernem tokokrogu. Tokovno polje v zemlji, ki je posledica toka okvare, popolnoma zapišemo s pomočjo enačb (2) in ga lahko obravnavamo kot stacionarno (oz. statično) tokovno polje. Glavni parametri izračuna so krajevna porazdelitev električnega potenciala, napetosti koraka (U_k) in napetosti dotika (U_d) na površini zemlje ter ozemljitvena upornost (R).

$$\begin{aligned}
 \operatorname{rot} \mathbf{E} &= 0 \\
 \operatorname{div} \mathbf{J} &= 0 \\
 \mathbf{J} &= [\sigma] \mathbf{E}
 \end{aligned} \tag{2}$$

- II. obravnava razmer v okolici OS, ko steče v zemljo tok pulzne oblike (npr. pri udaru strele v nadzemni del OS). Elektromagnetno polja v zemlji in v zraku nad zemljo zapišemo s kompletnim sistemom Maxwellovih enačb (1). Glavni parametri izračuna so ozemljitvena (pulzna) impedanca (Z), porazdelitev električnega potenciala, U_k in U_d na površini zemlje, vse v odvisnosti od časa, pa tudi samo elektromagnetno polje (EMP) v zraku in v okolici OS.

Preglednica I: Vhodni podatki za izračun OS z MKE

IZRAČUN	Zemlja			Ionizacija zemlje		
	σ	μ	ε	σ	T_i	T_d
statični	(0.1 - 0.0005) S/m			$\sigma_{\text{ion}}=\text{konst.}$		
tranzientni	(0.1 - 0.0005) S/m	$\mu=\mu_0$	$\varepsilon=(1-80) \varepsilon_0$	$\sigma=\sigma(J)$	nekaj μs	nekaj μs

Čeprav so se skozi razvoj reševanja problemov OS razvili različni pristopi, iz opisa in zahtev problema izhaja, da je univerzalna metoda za izračun EMP v okolici OS le MKE. Natančen izračun je pogojen tudi z dobrim poznavanjem vhodnih podatkov. Geometrija in električne lastnosti ozemljila so dovolj dobro poznane, večji problem je poznavanje fizikalnih lastnosti zemlje (predvsem prevodnosti in dielektričnosti, v primeru upoštevanja ionizacije pa tudi parametrov ionizacijskega modela). Osnovni korak pri določevanju lastnosti zemlje v okolici konkretnega OS, pa je vsekakor določitev njene prevodnosti, kar se zreducira na določitev ekvivalentnega več slojnega modela zemlje s pomočjo ustrezne meritve (običajno Wenerjeve metode) v kombinaciji z numeričnim oz. grafičnim postopkom. Dejansko gre za inverzni pristop pri določevanju prevodnosti in debeline posameznih plasti zemlje, v ekvivalentnem modelu zemlje, ki ga uporabimo pri izračunu. Zaradi omenjenega pristopa pridobivanja vhodnih podatkov za izračun, se je potrebno seveda zavedati vpliva ekvivalentnega modela zemlje na končno natančnost izračuna v konkretnem primeru. Dodatno na natančnost izračuna vplivajo še nehomogenosti v strukturi zemlje, če te niso upoštevane.

2. NUMERIČNI MODEL OZEMLJILA

2.1 MKE model za industrijske frekvence

Za analizo OS pri industrijskih frekvencah ali pri enosmernih razmerah uporabimo sistem (2), ki ga lahko, ko vpeljemo električni skalarni potencial (3), prevedemo v parcialno diferencialno enačbo 2. reda (4).

$$E = -\text{grad } \varphi \quad (3)$$

$$\nabla([\sigma] \nabla \varphi) = 0 \quad (4)$$

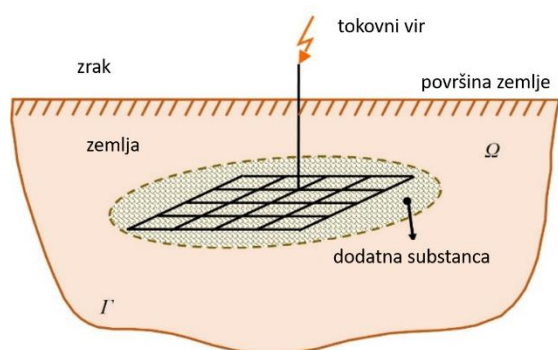
Kjer je $[\sigma]$ tenzor električne prevodnosti zemlje.

Za večino primerov, ki vključujejo poljubno geometrijo OS in večplastni model zemlje z dodatnimi lokalnimi nehomogenostmi v zemlji je zgornji pristop [1-5] dovolj natančen. Analizo vpliva različnih plasti zemlje (debelina plasti, specifična upornost) in debeline (d) lokalne nehomogenosti prikazuje naslednji primer. Na sl. 1 je prikazana ozemljitvena mreža, ki je zakopana v enoplastni/dvoplastni zemlji, v globini 0.8 m. Zaradi potrebe po znižanju obratovalne ozemljitvene upornosti prevelika, je zemlja v neposredni okolici OS

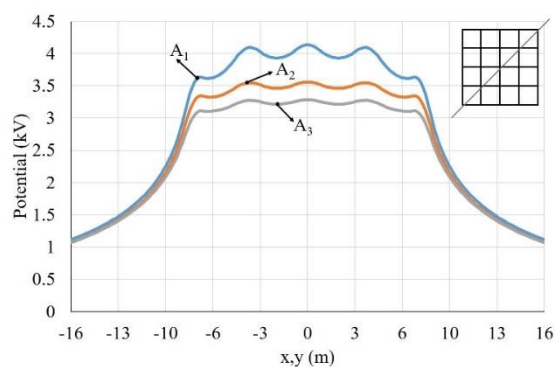
nadomeščena z dodatno substance z manjšo specifično upornostjo ($50 \Omega\text{m}$) kot jo ima zemlja ($200/1000/800 \Omega\text{m}$)

Preglednica II: Podatki zemlje za tri obravnavane primere

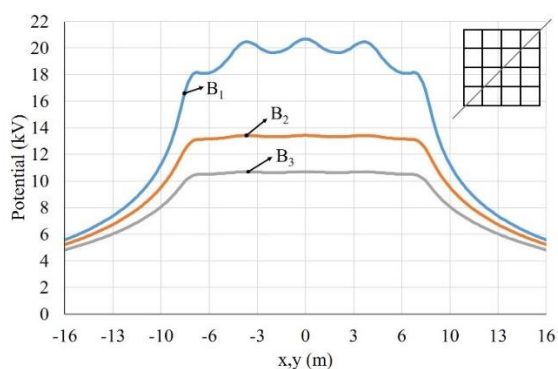
Primer	1. sloj		2. sloj	Dodatna substanca		
	$\rho(\Omega\text{m})$	Debelina (m)	$\rho(\Omega\text{m})$	d_1 (m)	d_2 (m)	d_3 (m)
A	200	/	/	0	(zgoraj) 0.2	(zgoraj) 0.4
B	1000	/	/		-----	-----
C	200	4	800		(spodaj) 0.05	(spodaj) 0.15



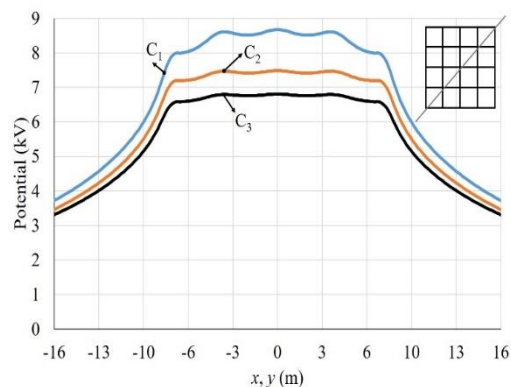
Sl.1: Primer ozemljitvene mreže



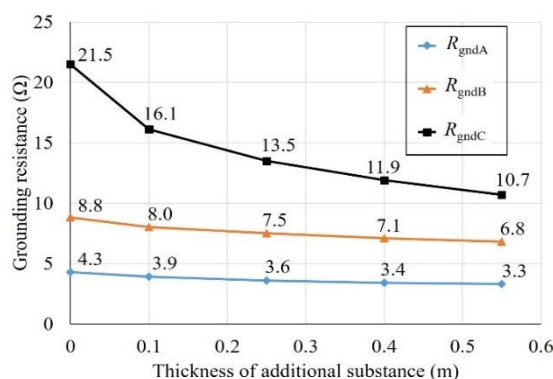
Sl.2: Porazdelite električnega potenciala na površini zemlje, za različne debeline (d_1 , d_2 in d_3) dodatne substance v enoplastni zemlji A.



Sl.3: Porazdelite električnega potenciala na površini zemlje, za različne debeline (d_1 , d_2 in d_3) dodatne substance v enoplastni zemlji B



Sl.4: Porazdelite električnega potenciala na površini zemlje, za različne debeline (d_1 , d_2 in d_3) dodatne substance v dvoplastni zemlji C



Sl.5: Odvisnost ozemljitvene upornosti za različne debeline dodatne substance za primere A, B in C

2.2 MKE model za tranzientne razmere

Za analizo OS pri tranzientnih razmerah uporabimo sistem (1), ki ga lahko, ko vpeljemo električni skalarni potencial φ in magnetni vektorski potencial $\mathbf{A}$, prevedemo v sistem dveh parcialnih diferencialnih enačb 2. reda [7].

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} - \nabla \frac{1}{\mu} \nabla \mathbf{A} + \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \varphi \right) + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} + \nabla \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) = 0 \quad (5)$$

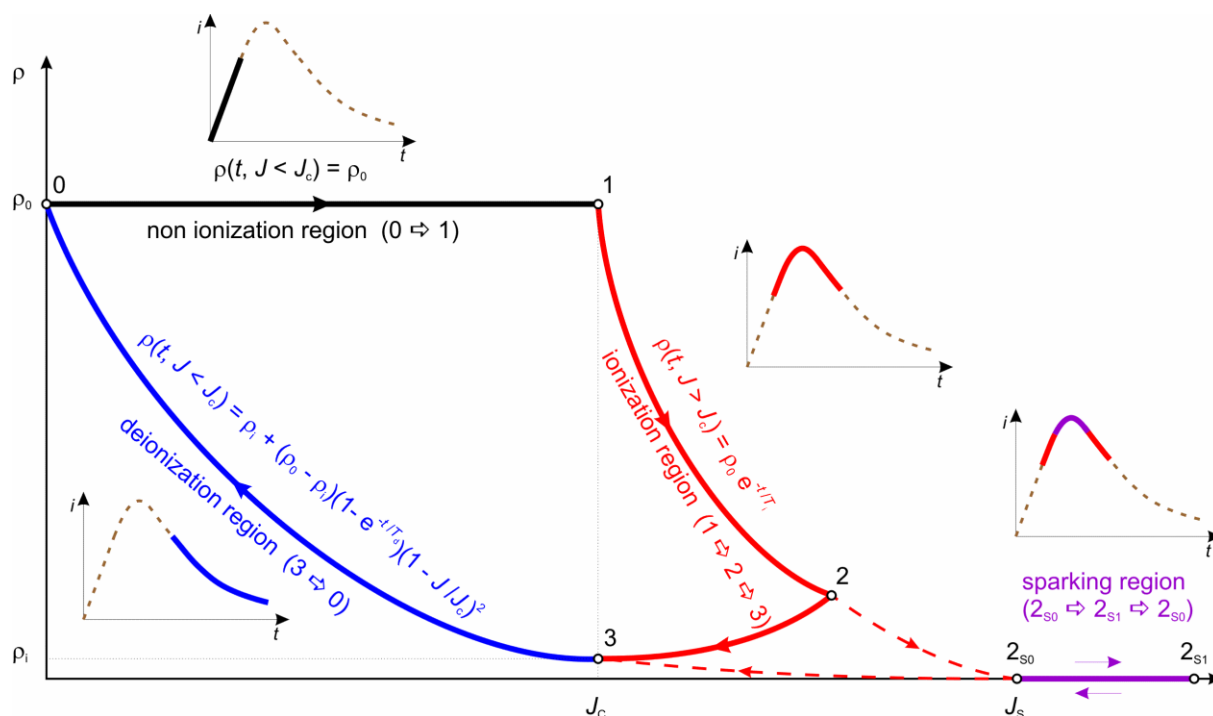
$$\nabla \cdot \left[\sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \varphi \right) + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} + \nabla \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) \right] = 0 \quad (6)$$

Ti vključujeta tokovno gostoto konduktivnega (7) in poljskega (8) toka.

$$\mathbf{J}_{\text{cond}} = \sigma \left(-\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \varphi \right) \quad (7)$$

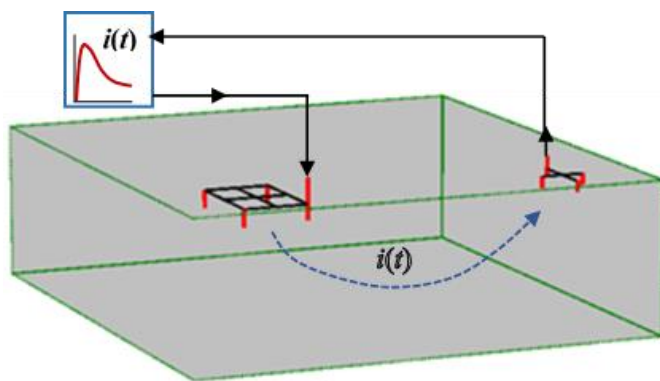
$$\mathbf{J}_{\text{disp}} = \varepsilon \left(-\frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} - \nabla \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) \quad (8)$$

V primeru upoštevanja ionizacijskih in deionacijskih procesov v zemlji, ki se sprožijo pri večjih tokovih ($\mathbf{J} > \mathbf{J}_c$ oz. $\mathbf{E} > \mathbf{E}_c$), je potrebno v numerični model vključiti tudi nelinearno odvisnost specifične upornosti oz. prevodnosti zemlje [8-10], v obliki histereze, ki je prikazana na sl. 6.



Sl.6: Potek specifične upornosti zemlje v odvisnosti od tokovne gostote, za izboljšán model ionizacije/deionizacije zemlje

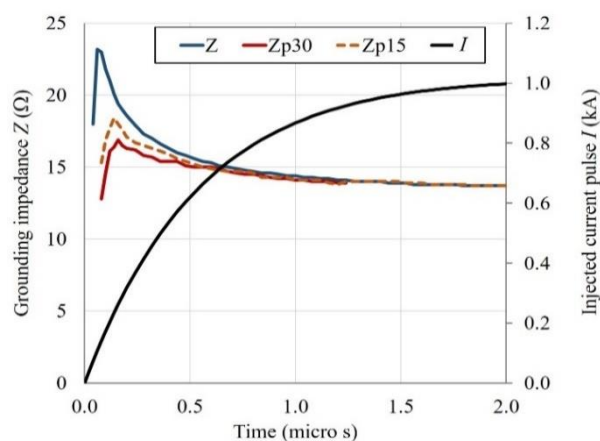
Opisani numerični model je bil uporabljen za analizo elektromagnetnih razmer na eksperimentalnem modelu sl. 7. Ta je sestavljen je iz glavne ozemljitvene mreže povezane s štirimi vertikalnimi prevodnimi palicami in povratne elektrode, sestavljene iz dveh prevodnih horizontalnih in štirih vertikalnih palic. V eno od palic ozemljitvene mreže se injicira električni tok pulzne oblike ($I(t) = 1000 (e^{-0.015t} - e^{-1.8t})$), ki se zaključi preko povratne elektrode. Zemlja v danem primeru je dvoplastna, prva plast ima debelino 1.9 m in specifično upornost 140 Ωm , druga plast pa ima specifično upornost 90 Ωm .



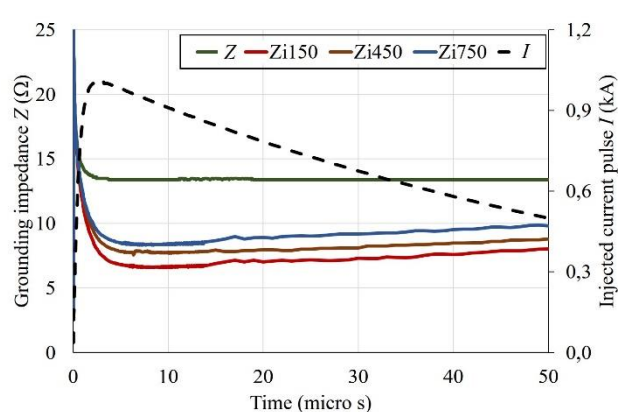
Sl.7: Eksperimentalni model za analizo časovnih karakteristik mrežastega ozemljila za pulzno obliko injiciranega toka

Na sl. 8 je prikazan potek ozemljitvene impedance v začetnem delu naraščanja razelektritvenega toka, kjer prihaja do največjih sprememb v vrednosti impedance. Časovni potek impedance, ko ne upoštevamo dielektričnosti zemlje je prikazan z grafom Z . V primeru, ko je relativna dielektričnost zemlje (ϵ_r) enaka 15, je ustrezeni potek označen z Z_{p15} , v primeru $\epsilon_r=30$ pa z Z_{p30} . Primerjava posameznih grafov kaže na vpliv dielektričnosti na potek impedance, ki je najbolj izrazit na začetku pulza in zmanjšuje vrednost impedance z večanjem dielektričnosti zemlje. Sl. 9 prikazuje vpliv upoštevanja ionizacije in deionizacije zemlje na potek ozemljitvene impedance. Analizirani so štiri primeri, ki so podani z naslednjimi grafi:

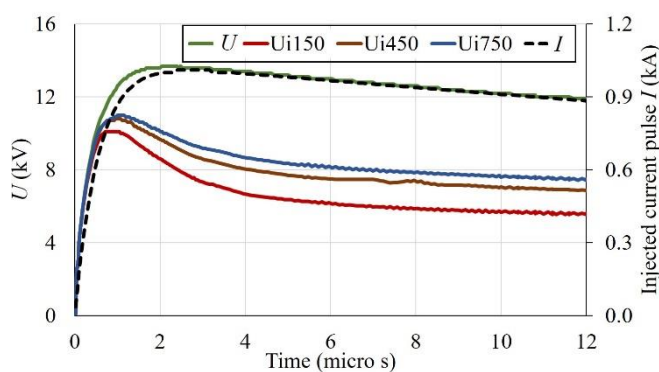
- Z ... potek impedance brez upoštevanja ionizacije zemlje,
- Z_{i150} ... potek impedance z upoštevanja ionizacije zemlje, ki se pojavi, ko naraste vrednost električne poljske jakosti E nad $E_c=150$ kV/m,
- Z_{i450} ... potek impedance z upoštevanja ionizacije zemlje, ki se pojavi pri $E > 450$ kV/m,
- Z_{i750} ... potek impedance z upoštevanja ionizacije zemlje, ki se pojavi pri $E > 750$ kV/m.



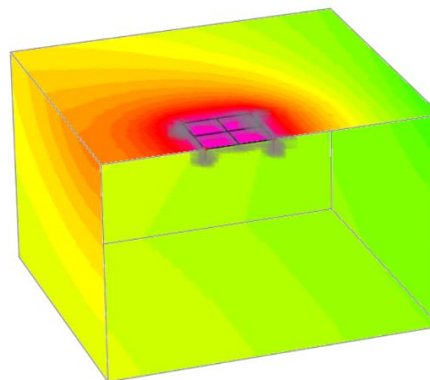
Sl. 8: Časovni potek injiciranega toka (I) in ozemljitvene impedance, brez upoštevanja dielektričnosti (Z) in z upoštevanjem (Z_{p15} , Z_{p30})



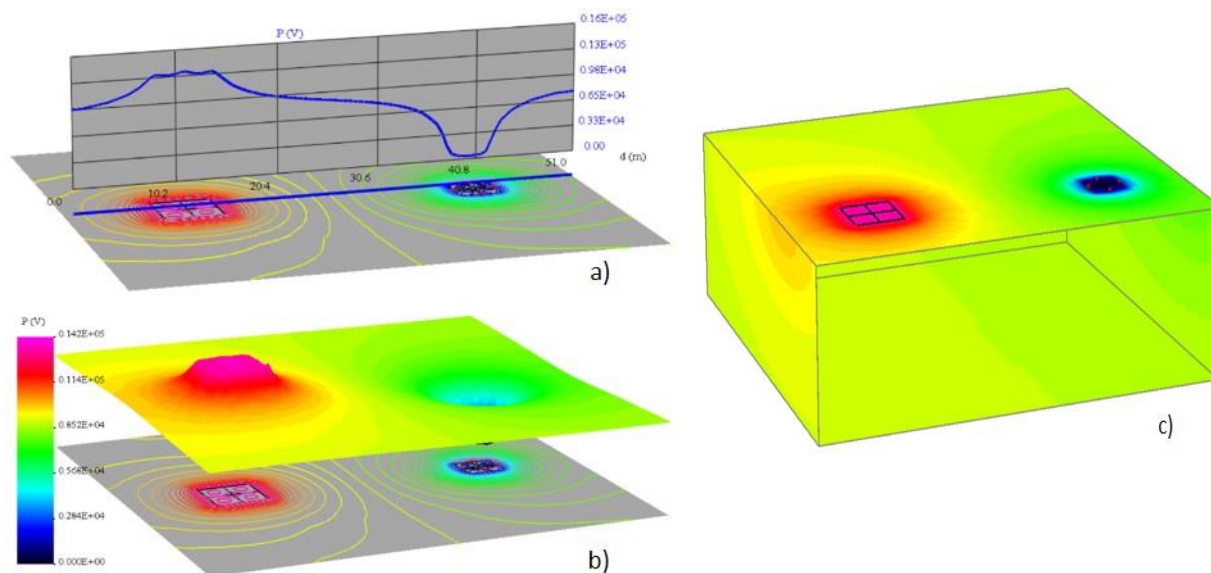
Sl. 9: Časovni potek injiciranega toka (I) in ozemljitvene impedance, brez upoštevanja ionizacije (Z) in z upoštevanjem ionizacij (Z_{i150} , Z_{i450} , Z_{i750})



Sl.10: Časovni potek injiciranega toka (I) in napetosti, brez upoštevanja ionizacije U in z upoštevanjem ionizacije (U_{i150} , U_{i450} , U_{i750})



Sl.11: Področje ionizirane zemlje v bližini ozemljitvene mreže pri $E_c=150$ kV/m.



Sl.12: Vizualizacija električnega potenciala; (a) 2D graf na liniji in porazdelitev na površini zemlje, (b) 3D graf in ekvipotencialne linije površini zemlje, (c) barvna slika porazdelitve v zemlji

3. ZAKLJUČEK

Članek predstavlja uporabo metode končnih elementov za izračun elektromagnetnega polja v okolici ozemljitvenega sistema v primeru toka okvare s frekvenco 50 Hz in v primeru atmosferske razelektritve s tokom pulzne oblike. Prikazana je ustrezna analiza tokovnega oz. elektromagnetnega polja za oba primera in poudarjena odvisnost karakteristik OS od specifične prevodnosti in dielektričnosti zemlje ter pojava ionizacije zemlje. Iz rezultatov analize izhaja, da so vse odvisnosti pomembne, čeprav ne vplivajo enako oz. niso nujno vse prisotne. Zato je globlje poznavanje te problematike nujno za kvalitetno analizo konkretnega OS, saj nas lahko čisti "ad hoc" pristop pri uporabi komercialnega programskega orodja za analizo ozemljil tudi zavede in ne pripelje do optimalne rešitve.

4. LITERATURA

- [1] O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor and J.Z. Zhu, "The Finite Element Method: its Basis and Fundamentals", Butterworth-Heinemann, 2013.
- [2] J. R. Cardoso, "FEM modeling of grounded system with unbounded approach", IEEE Transactions on Magnetics, 30, 1994, pp 2893–2896.
- [3] M. Trlep, M. Hamler and B. Hribernik, "The analysis of complex grounding systems by FEM", IEEE Transactions on Magnetics, 34, 1998, pp 2521–2524.

- [4] A. Habjanič, M. Trlep, J. Pihler, "The Influence of an Additional Substance in the Trenches Surrounding the Grounding Grid's Conductors on the Grounding Grid's Performance", IEEE Transactions on Magnetics, 43, 2007, pp 1257-1260.
- [5] M. Trlep, "FIELD_GS_low frequency", V1.0", Internal Documentation, Applied Electromagnetics Laboratory, 2012.
- [6] A. Habjanič and M. Trlep, "The simulation of the soil ionization phenomenon around the grounding system by the finite element method", IEEE Transactions on Magnetics, 42(4), 2006, pp 867-870.
- [7] O. Biro and K. Preis, "On the use of the magnetic vector potential in the finite element analysis of the three dimensional eddy current", IEEE Transactions on Magnetics, 25(4), 1989, pp 3145-3159.
- [8] A.C. Liew and M. Darveniza, "Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths", Proc. IEE, 121(2), 1974, pp 123-135.
- [9] Y. Liu, N. Theethayi, R. Thottappillil, R.M. Gonzales and M. Zitnik, "An improved model for soil ionization around grounding system and its application to stratified soil", Journal of Electrostatics, 60(2-4), 2004, pp 203-209.
- [10] A.C. Liew, J. Wang and M. Darveniza, "Extension of dynamic model of impulse behaviour of concentrated earths at high currents", IEEE Transactions on Power Delivery, 20(3), 2005, pp 2160-2165.
- [11] M. Trlep, M. Jeseni and A. Hamler, "Transient calculation of electromagnetic field for grounding system based on consideration of displacement current", IEEE Transactions on Magnetics, 48(2), 2012, pp 207-210.
- [12] M. Trlep, "FIELD_GS_transient V1.0", Internal Documentation, Applied Electromagnetics Laboratory, 2013.
- [13] N.M. Nor, M. Trlep, S. Abdullah, R. Rajab and K. Ramar, "Determination of threshold electric field of practical earthing systems by FEM and experimental work", IEEE Transactions on Power Delivery, 28(4), 2013, pp 2180-2184.

NASLOV AVTORJEV

Mladen Trlep, Marko Jesenik, Miloš Beković, Anton Hamler

Univerza v Mariboru, Fakulteta, za elektrotehniko, računalništvo in informatiko

Koroška cesta 46, 2000 Maribor, Slovenija

Tel: + 386 2 220 70 41

Fax: + 386 2 252 54 81 ali + 386 2 251 11 78

Elektronska pošta: mladen.trlep@um.si

IZVEDBA SKLOPLJENEGA TRANZIENTNEGA MODELA SISTEMA ZA UPOROVNO TOČKOVNO VARJENJE

Gašper HABJAN, Martin PETRUN

POVZETEK

V članku je predstavljena izvedba sklopljenega modela sistema za uporovno točkovno varjenje. Zaradi natančnejše analize gostote magnetnega polja B v jedru transformatorja za uporovno točkovno varjenje, je potrebno za ta del sistema uporabiti bolj podroben matematični model s pomočjo metode končnih elementov. Preostali del sistema pa je predstavljen z enostavnim veznim modelom. Oba modela skupaj predstavljata skupen model sistema za uporovno točkovno varjenje. Model končnih elementov je združen z veznim modelom s pomočjo funkcij masivnega in vrvnega navitja. Predstavljena teoretična analiza je potrjena z numeričnimi izračuni s pomočjo programske opreme Octave Circuit Simulator in Matlab.

REALIZATION OF A COUPLED TRANZIENT MODEL OF THE RESISTANCE SPOT WELDING SYSTEM

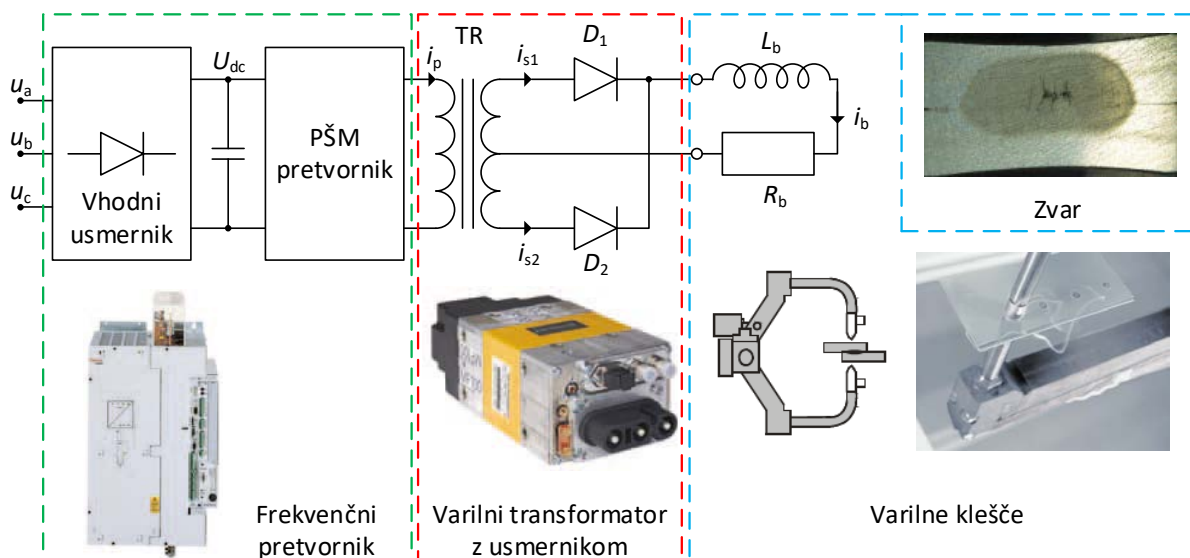
ABSTRACT

In this paper, the process of establishing a coupled finite element model and a lumped model of the resistance spot welding system is presented. A more accurate analysis of the magnetic field density B in the core of the resistance spot welding transformer is required. This demands the use of a more detailed mathematical model using the finite element method to model the transformer inside the resistance spot welding system. The rest of the system is presented with a simple lumped model. Both models together represent a coupled model of the resistance spot welding system. The finite element model is coupled with a lumped model using special functions of solid and stranded conductors. The presented theoretical analysis is confirmed by numerical calculations using the Octave Circuit Simulator and Matlab software.

1. UVOD

Za potrebe hitrega in učinkovitega spajanja karoserij je v avtomobilski industriji v današnjem času najpogosteje uporabljen postopek uporovnega točkovnega varjenja (UTV) z enosmernim tokom. V članku je predstavljen postopek modeliranja srednje-frekvenčnega sistema za UTV na enosmerni varilni tok, katerega prednost je manjša teža, boljši izkoristek kvalitetnejši zvari, večja produktivnost v primerjavi s sistemom za UTV na izmenični varilni

tok. UTV sistem je sestavljen iz: usmernika na vhodu, tranzistorskega razsmernika, transformatorja, izhodnega diodnega polnovalnega usmernika in varilnih klešč kot je prikazano na sliki 1. Sistem za UTV je priključen na omrežno trifazno napetost, ki jo z usmernikom usmerimo in tako napetost enosmernega vodila U_{dc} znaša približno 565 V. To napetost nato H-mostič, ki deluje na principu pulzno širinske modulacije (PŠM), z ustreznimi stikalnimi operacijami pretvori v napetost frekvence od 500 Hz do 5000 Hz. Modulirana napetost napaja varilni transformator s prestavnim razmerjem 55:1 in integriranim polnovalnim usmernikom s čimer zagotovimo ustrezno velik enosmerni varilni tok. Masa transformatorja za UTV in usmernika je zelo pomembna, saj sta vgrajena na robotsko roko. Za transformator z integriranim izhodnim usmernikom, ki deluje na frekvenci 1 kHz, znaša masa približno 20 kg, pri čemer znašata izhodna moč do 160 kW in varilni tok do 25 kA. V članku smo predstavili metodo, s katero lahko posamezne dele sistema za UTV opišemo z različno podrobnimi matematičnimi modeli. Predstavljeni so tudi ustrezni modeli vodnikov s katerimi povežemo podrobnejši model KE transformatorja z modeli preostalega dela sistema za UTV.



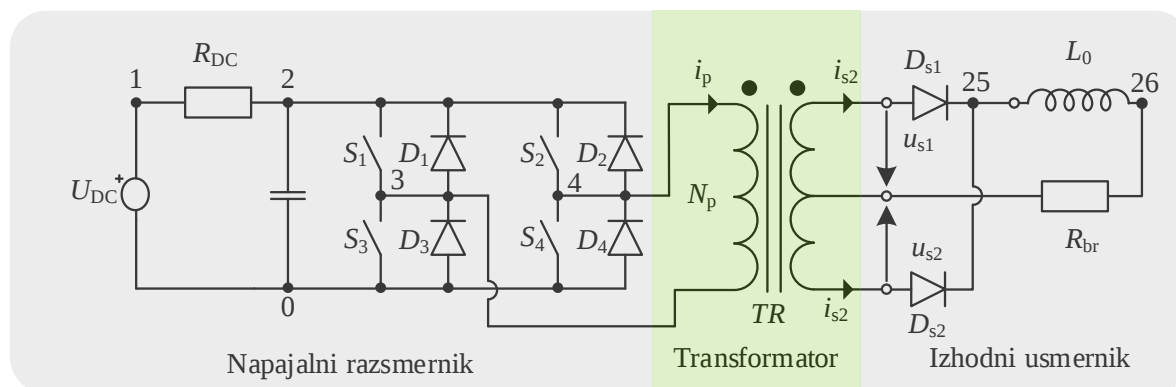
Sl. 1: Sistem za UTV [2]

2. MODEL SISTEMA ZA UTV

Modeliranje celotnega sistema za UTV z metodo končnih elementov (KE) ni smiselna, saj bi dobili prezahteven matematični model. Zato je pomembno, da se sistem za UTV obravnava s sklopljenimi modeli, ki ustrezno opisujejo posamezne naprave v sistemu. Tako sistem za UTV razdelimo na več delnih modelov, ki pa morajo biti med sabo ustrezno povezani. Zanima nas predvsem elektromagnetno polje znotraj transformatorja za UTV, zato le-tega predstavimo s podrobnim matematičnim modelom (modelom KE). Preostale naprave v sistemu za UTV pa predstavimo z bolj enostavnimi matematičnimi modeli (na primer veznimi modeli s koncentriranimi parametri).

2.1 Vezni model

Celoten sistem za UTV bi lahko poenostavljeno opisali z veznim modelom, ki je prikazan na sliki 2. V veznem modelu uporabimo princip koncentriranih parametrov, ki jih opišemo z osnovnimi veznimi elementi, na primer idealnimi upori, induktivnostmi, kapacitivnostmi in napetostnimi oz. tokovnimi izvori. V veznem modelu transformatorja za UTV moramo uporabiti tudi sklopljene magnetne komponente s katerimi opišemo transformator (TR) in elemente, ki ustrezno opišejo polprevodniške komponente (diode D in tranzistorje S). Za vsak takšen element veznega modela so značilne notranje relacije med spremenljivkami elementa (na primer med tokom in napetostjo v elementu upornosti, induktivnosti ali kapacitivnosti), posamezne elemente v veznem modelu pa povezujejo Kirchhoffova zakona zank in vozlišč [4]. Sklopljene induktivne elemente predstavimo z lastnimi in medsebojnimi induktivnostmi med navitji, med tem ko lahko polprevodniška stikala (tranzistorje) poenostavljeno predstavimo z idealnim uporom s spremenljivo upornostjo: ko je stikalo S sklenjeno, predstavlja element kratek stik med vozliščema in ko je razklenjeno, predstavlja odprte sponke. Tudi diodo lahko predstavimo na podoben način kot tranzistor, vendar pa je razlika v tem, da je stikalno stanje diode odvisno od toka in napetosti znotraj diode. Diodo predstavimo z idealno diodo D , ki prevaja električni tok, ko je ta pozitiven in padec napetosti na diodi znaša 0 V (stikalo je sklenjeno). V nasprotnem primeru, ko je na idealni diodi negativna napetost, tok skozi njo ne teče (stikalo razklenjeno). Idealna dioda ima med prevodnim in neprevodnim stanjem mejno stanje imenovano prelomna točka [3].

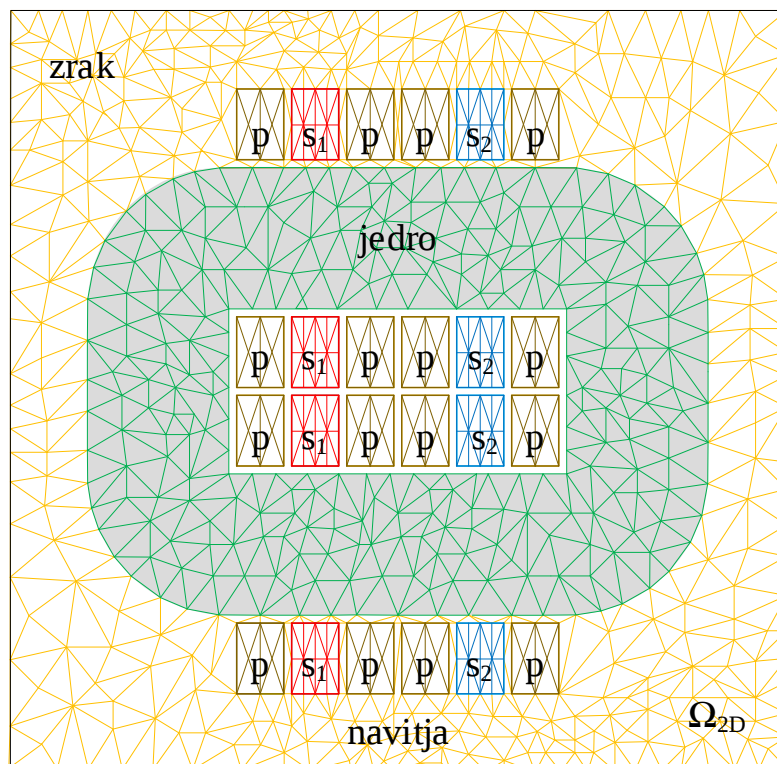


Sl. 2: Vezni model transformatorja za UTV [1]

2.2 Model končnih elementov transformatorja

Za podrobnejšo analizo obravnave transformatorja z enostavnimi elementi sklopljenih induktivnosti predvsem zaradi grobih poenostavitev, ne zadošča. Če želimo na primer podrobneje obravnavati elektromagnetno (EM) polje v transformatorju opisanega sistema, je potrebno ta del sistema opisati z bolj podrobnim modelom. Za analize EM polj v EM napravah so najprimernejši modeli s KE. V obravnavanem primeru geometrija transformatorja omogoča uporabo 2D modela KE, ki je shematsko prikazan na sliki 3.

Pri metodi KE je najprej potrebno omejiti računsko območje na končno veliko območje Ω , ki v tem primeru obsega dve prostorski razsežnosti ($\Omega \in \mathbb{R}^2$). To področje se nato razdeli na manjše ploskve končnih velikosti, ki predstavljajo končne elemente. Vsakemu KE se nato dodelijo osnovne lastnosti, ki so odvisne od vrste materiala (baker, magnetno jedro, zrak) na opazovanem območju kjer leži posamezen KE. Vse KE med sabo povezujejo oglišča, ki predstavljajo vozlišča in tako skupaj tvorijo mrežo. Na osnovi dobljene mreže lahko zapišemo sistem diferencialno-algebrskih enačb (DAE), ki temeljijo na magneto-kvazistatičnem (MKS) približku Maxwellovih enačb. Tako pridobljen sistem enačb (model) omogoča numerično rešitev EM problema za določene začetne in robne pogoje na mejah področja Ω [1].



Sl. 3: Model KE transformatorja za UTV [1]

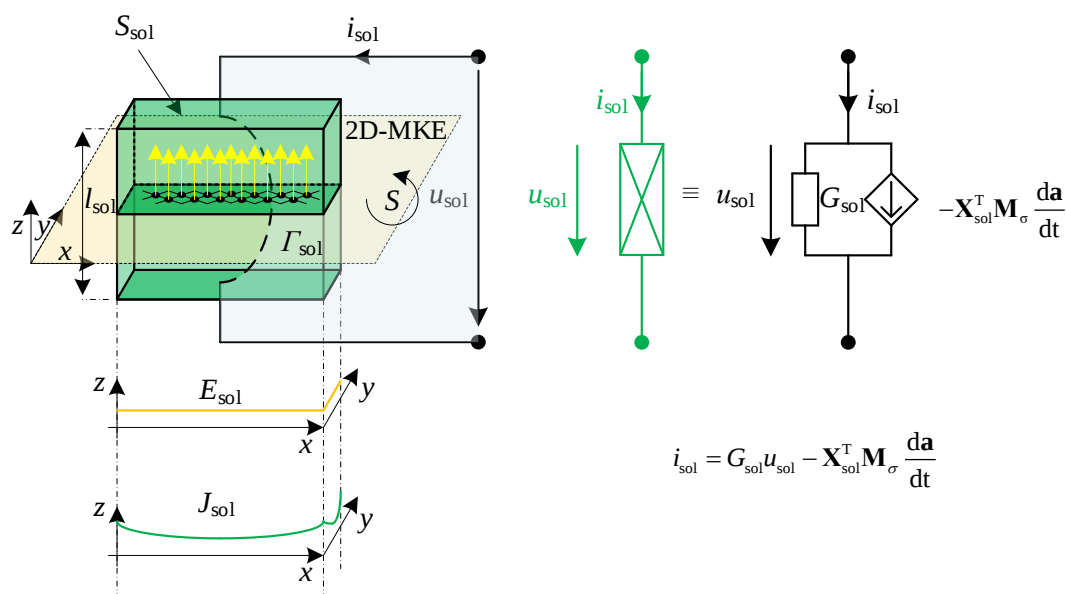
2.3 Vključitev MKE v vezni model

Dobljen model KE lahko v splošnem rešimo z uporabo harmoničnega ali tranzientnega izračuna. V primeru sistema za UTV je transformator napajan pulzno s pretvornikom močnostne elektronike, zato je potrebno uporabiti tranzientni izračun, kjer rešitev modela poiščemo zaporedno za ustrezne diskretne časovne trenutke v času delovanja naprave. Prav tako je transformator del povezane celote; posamezne naprave znotraj sistema za UTV neločljivo vplivajo druga na drugo. Modela KE transformatorja zato ne moremo obravnavati posebej, temveč ga moramo vključiti v model veznega modela celotnega sistema. Zato element sklopljenih induktivnosti v veznem modelu na sliki 2 zamenjamo z modelom KE

transformatorja, ki ga z vozlišči veznega modela povežemo s tako imenovanimi funkcijami navitij.

Funkcija navitja je v splošnem vektorska funkcija χ , ki predstavlja povezavo med veznim modelom in modelom KE, kjer povežemo napetosti u in toke i veznega modela z mrežnimi napetostmi e in toki j diskretnega modela KE (t.j. z vozlišči KE, ki ležijo v območju vodnikov 2D modela). V splošnem lahko vodnike v magnetnih komponentah razdelimo v dve skupini: vodnike večjega preseka v katerih pride do pojava izriva toka in vodnike, ki so ustrezno majhnih dimenzij, da lahko ta pojav zanemarimo. Posledično je funkcijo navitja smiselno zapisati za dva modela navitja in sicer funkcijo masivnega vodnika χ_{sol} in funkcijo vrvnega vodnika χ_{str} .

O masivnem vodniku (slika 4) govorimo takrat, ko je presek vodnika večji od vdorne globine magnetnega polja. V tem primeru spreminjajoče se magnetno polje v vodniku inducira vrtnične tokove. Zaradi teh tokov pride do izrazitega pojava izriva toka, ki teče po vodniku, torej gostota električnega toka v preseku vodnika ni homogena. Vsak vodnik v modelu predstavlja vozlišče na začetku in na koncu vodnika. Začetek in konec vodnika pa je povezan bodisi na vozlišče drugega vodnika v modelu KE ali pa na vezni model pretvornika (slika 6) [1].



Sl. 4: Prikaz masivnega vodnika v 2D-MKE: a) masivni vodnik dolžine l_{sol} s prikazom porazdelitve električne poljske jakosti in gostote električnega toka po preseku vodnika S_{sol} ter b) vezni simbol masivnega vodnika in nadomestno vezje [1]

Za poljuben masivni vodnik lahko funkcijo $\chi_{sol}(\mathbf{r})$ zapišemo z (2.1), kjer l_z predstavlja dolžino vodnika (oziroma globino 2D-modela), $\mathbf{e}_z$ predstavlja bazni vektor, ki je usmerjen v smeri koordinate z in $\mathbf{r}$ je krajevni vektor, ki predstavlja lokacijo posameznega elementa v območju Ω [1].

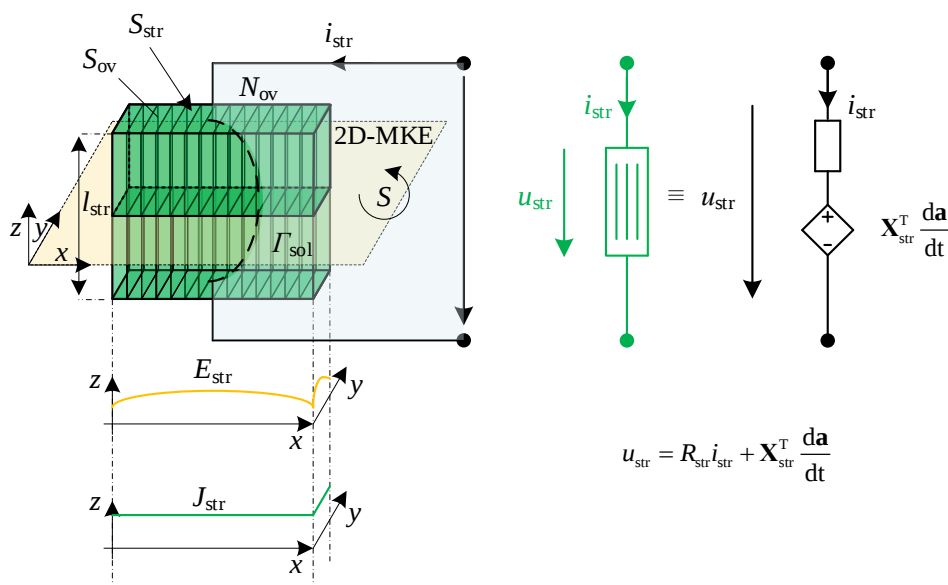
$$\chi_{\text{sol}}(\mathbf{r}) = \frac{\mathbf{e}_z}{|l_z|} \mathbf{11}_{\text{sol}}(\mathbf{r}), \quad \mathbf{11}_{\text{sol}}(\mathbf{r}) := \begin{cases} 1, & \mathbf{r} \in \Omega_{\text{sol}} \\ 0, & \mathbf{r} \notin \Omega_{\text{sol}} \end{cases} \quad (2.1)$$

Na sliki 4 je prikazan masivni vodnik na katerem je padec napetosti označen z u_{sol} (2.2) in tok, ki teče skozi vodnik i_{sol} . Vodnik je konstantnega preseka S_{sol} . Pot Γ_{sol} , ki povezuje obe vozlišči skozi vodnik je lahko poljubno izbrana. Ključnega pomena je razporeditev potenciala φ po vodniku saj je le tako mogoče določiti povezavo med masivnim vodnikom in veznim modelom oziroma povezavo modela KE z veznim modelom. Funkcija navitja χ_{sol} razporedi potencial po vodniku kot je prikazano na sliki 4, pri čemer zagotovi, da je električna poljska jakost E_{sol} homogeno razporejena skozi presek vodnika S_{sol} (2.3). Opisan pogoj povzroči, da sprememba potenciala $\mathbf{a}$ povzroči nehomogeno razporeditev gostote električnega toka J_{sol} skozi presek masivnega vodnika (slika 4). Podrobnejšo predstavitev funkcije najdemo v [1].

$$u_{\text{sol}} = - \int_{\Gamma_{\text{sol}}} \nabla \varphi \cdot d\mathbf{l} \quad (2.2)$$

$$\mathbf{E}_s = \chi_{\text{sol}} u_{\text{sol}} \quad (2.3)$$

Model vrvnega vodnika (slika 5) lahko uporabimo takrat, kadar imamo opravka z navitji katerih prerez žice je precej manjši od vdorne globine polja. V takih primerih lahko posledice izriva toka zanemarimo. Navitja pri katerih so prerezi posameznih vodnikov navitja zelo majhni ni smiselno predstaviti z modelom masivnega vodnika, saj bi morali diskretizirati veliko vzporednih vodnikov v navitju, kar bi privedlo do velikega števila KE in zahtevnega matematičnega modela. Z uporabo modela vrvnega vodnika je mogoče matematični model zelo poenostaviti. V tem primeru lahko predpostavimo, da je gostota električnega toka $\mathbf{J}_{\text{str}}$ (2.4) konstantna po celotni površini vrvnega vodnika S_{str} in je odvisna od povezovalnega vektorja $\mathbf{X}_{\text{str}}$ ter celotnega toka i_{str} skozi vrvni vodnik. Nehomogena razporeditev električne poljske jakosti E_{str} je odvisna od padcev napetosti u_{str} na vrnem vodniku, ki je posledica ohmskih upornosti vodnikov R_{str} in spremembe potenciala $\mathbf{a}$. Dobra lastnost modeliranja vrvnega vodnika na takšen način je, da so diskretizirani elementi dovolj veliki, obravnava se celoten presek navitja (več zaporednih vodnikov) na enkrat, pri čemer se lahko upošteva število ovojev tuljave N_{ov} in polnilni faktor k_{str} . Ker ni potrebe po pretirani diskretizaciji in reševanju posameznih vodnikov navitja se matematični model problema bistveno poenostavi [1].



Sl. 5: Prikaz vrhnega vodnika v 2D-MKE: a) vrhni vodnik dolžine l_{str} s prikazom porazdelitve električne poljske jakosti in gostote električnega toka po preseku vodnika S_{str} ter b) vezni simbol vrhnega vodnika in nadomestno vezje [1]

$$\mathbf{J}_{str} = \mathbf{X}_{str} i_{str} \quad (2.4)$$

Razlika med funkcijo masivnega in vrhnega vodnika je v tem, da funkcijo masivnega vodnika integriramo vzdolž linije Γ_{sol} med elektrodama masivnega vodnika in kot rezultat vedno dobimo vrednost 1 (2.5), medtem ko funkcijo vrhnega vodnika integriramo po preseku vrhnega vodnika S_{str} in kot rezultat dobimo število ovojev N_{ov} navitja (2.6). Zagotoviti je potrebno tudi medsebojno ortogonalnost funkcij navitij, saj s tem dosežemo, da se posamezni modeli navitij med seboj ne prekrivajo (2.7) [1].

$$\int_{\Gamma_{sol}} \chi_{sol} dl = 1 \quad (2.5)$$

$$\int_{\Gamma_{str}} \chi_{str} dS = N_{ov} \quad (2.6)$$

$$\chi_i(\mathbf{r}) \cdot \chi_j(\mathbf{r}) = 0, \quad i \neq j, \quad \mathbf{r} = \Omega \quad (2.7)$$

2.4 Numerično reševanje sklopljenega modela

Modele vodnikov v vezni model vključimo z uporabo modificirane metode vozliščnih potencialov (MMVP) s katero združimo sistem enačb transformatorja za UTV in sistem enačb veznega modela (frekvenčni pretvornik, usmernik in varilne klešče) v skupni sistem enačb. Tako je skupni sistem enačb sklopljen s MKS sistemom DAE (2.8).

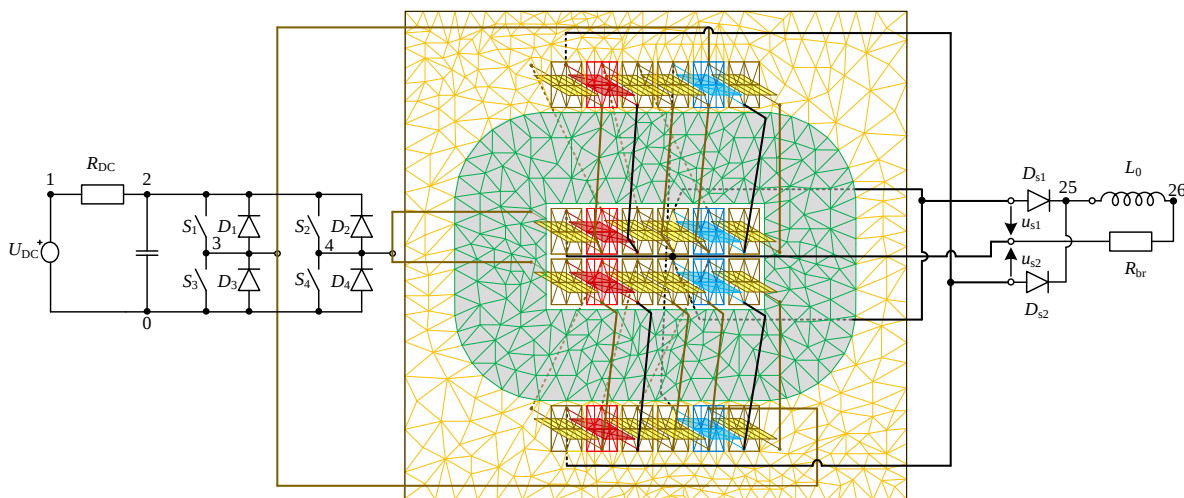
$$\mathbf{M}_\sigma \frac{d}{dt} \mathbf{a} + \mathbf{K}_v(\mathbf{a}) \mathbf{a} - \mathbf{M}_\sigma \mathbf{X} \mathbf{Q}_M^T \mathbf{v} = 0 \quad (2.8)$$

Kjer je $\mathbf{M}_\sigma$ masna matrika v kateri so zajete električne lastnosti (prevodnosti) elementov. Ta je pomembna za nastanek vrtničnih tokov v električno prevodnih področjih modela, ki so odvisni od časovnega spreminjanja magnetnega vektorskega potenciala $\mathbf{a}$. Velikost matrik $\mathbf{M}_\sigma$ in $\mathbf{K}_v$ je odvisna od števila vozlišč mreže KE in je $m \times m$, če področje vsebuje m vozlišč. Togostno matriko $\mathbf{K}_v$ dobimo z uporabo diskretnega operatorja rotor $\mathbf{C}$, reluktančne matrike $\mathbf{M}_v$ in magnetnega vektorskega potenciala $\mathbf{a}$. Tako diskretiziran model transformatorja za UTV vsebuje mrežo z N_v vozlišči, ki je sestavljena iz N_{sol} modelov masivnega vodnika in N_{str} modelov vrvnega vodnika. Povezovalne vektorje za posamezni tip vodnika ($\mathbf{X}_{sol}$, $\mathbf{X}_{str}$) je potrebno združiti v matrike $\mathbf{X}_{solm}$ in $\mathbf{X}_{str}$, ki sta velikosti $N_v \times N_{sol}$ in $N_v \times N_{str}$. Tako dobimo povezovalno matriko $\mathbf{X}$, ki je sestavljena iz povezovalnih vektorjev posameznega vodnika v diskretnem modelu. Za celotno predstavitev (2.8) še potrebujemo incidenčno podmatriko $\mathbf{Q}_M$, katere naloga je vključitev modelov vodnikov v vezni model. [1]

3. REZULTATI

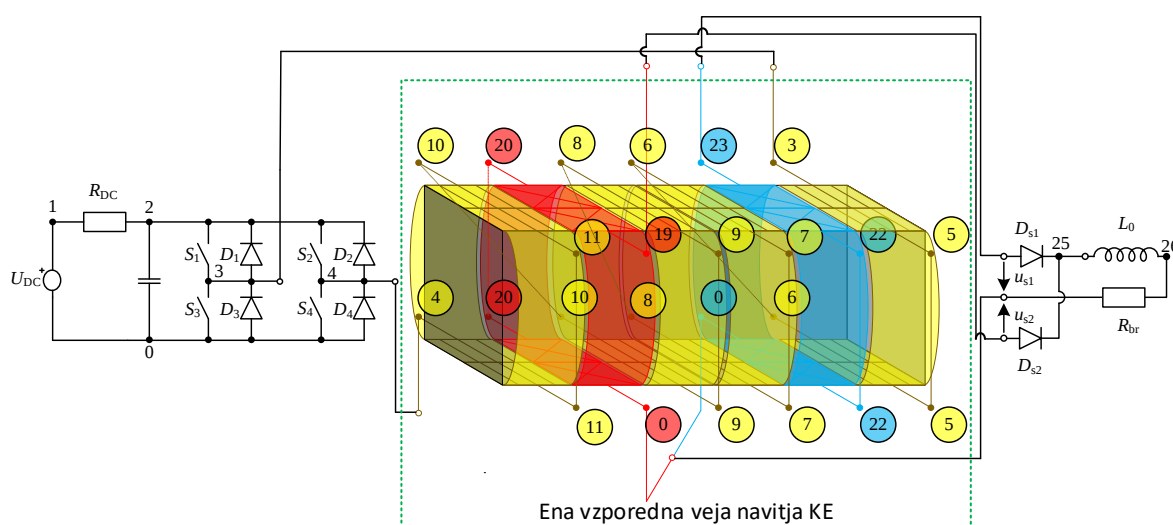
3.1 Uporabljena programska oprema

Diskretizacija 2D-modela KE transformatorja za UTV je izvedena s pomočjo odprtokodnega programskega paketa FEMM 4.2 [5]. Slika 6 shematsko prikazuje vključitev dobljenega modela KE v vezni model sistema za UTV. Vezni model vseh ostalih komponent pretvornika je izveden z odprtokodno programsko knjižnico Octave Circuit Simulator (OCS) [6], ki je prilagojena za delo v programskem okolju Matlab. V knjižnici OCS so definirani že vsi osnovni elementi za sestavo veznega modela, pri čemer lahko posamezne elemente enostavno modificiramo ali pa definiramo nove elemente.



Sl. 6: Povezava modela KE z veznim modelom pretvornika [1]

V okviru knjižnice OCS se sistem DAE, ki predstavlja vezni model, generira na podlagi vhodne datoteke *.cir. V tej datoteki definiramo zgradbo veznega modela z ustreznim oštevilčenjem vozlišč uporabljenih elementov. Za vključitev modela KE v vezni model smo uporabili na novo definiran element, v katerem posameznim funkcijam navitij dodelimo številke vozlišč in ga s tem umestimo v vezni model, kot je shematsko prikazano na sliki 7. Na sliki 7 je prikazana ena vzporedna veja navitja modela KE, ki je povezana na vezni model pretvornika [1].



Sl. 7: Povezava veznega modela pretvornika z modelom ene veje navitja KE transformatorja [1]

Za primer na sliki 7 (ena veja navitja KE transformatorja) v vhodno datoteko *.cir zapišemo naslednje zaporedje vozlišč:

3	5	6	5	6	7	8	7	8	9	10	9	10	11	4	11	19	20	0	20	0	22	23	22
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	---	----	----	---	----	----	----	---	----	---	----	----	----

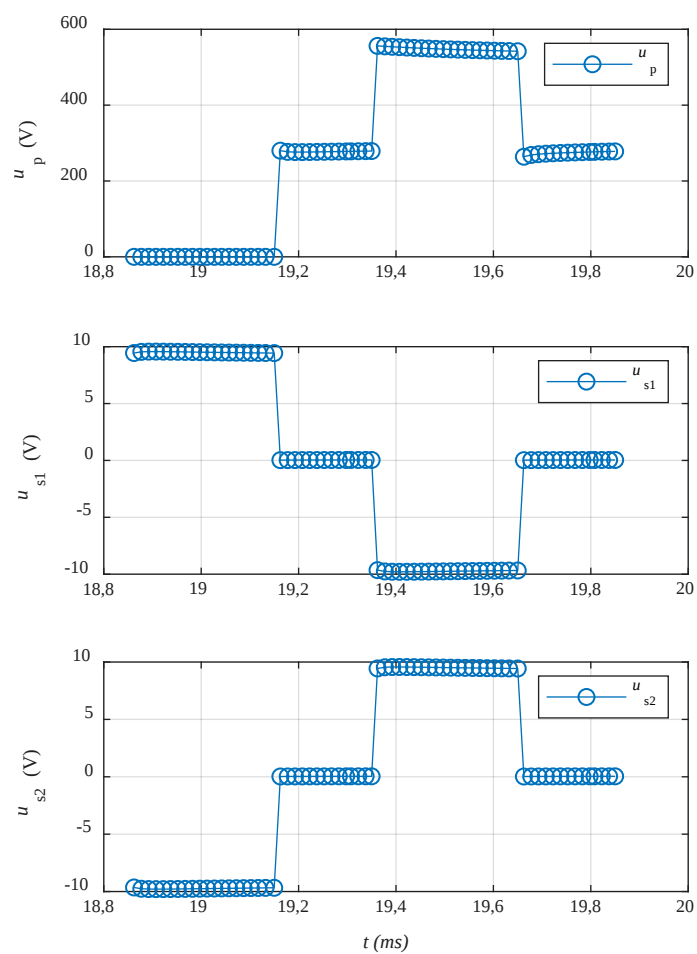
Zaporedje števil, ki je obarvano rumene barve prikazuje povezavo štirih zaporedno vezanih tuljav primarnega navitja, katerih sta začetek in konec (vozlišča 3 in 4) povezana z frekvenčnim pretvornikom. Ostale številke pa predstavljajo začetke in konce posamezne tuljave primarnega navitja, ki skupaj tvorijo zaporedno vezavo tuljav. Zaporedje števil, obarvano rdeče in modre barve pa predstavlja tuljavo sekundarnega navitja 1 in sekundarnega navitja 2. Konec tuljave sekundarnega navitja 1 in začetek tuljave sekundarnega navitja 2 predstavlja srednji odcep transformatorja, ki je označen z vozliščem 0. Začetek sekundarnega navitja 1 je povezan na diodo D_2 (vozlišče 19) in konec sekundarnega navitja 2 je povezan na diodo D_1 (vozlišče 23).

Skupen sistem DAE dobimo na osnovi MMVP in je generiran s pomočjo programske knjižnice OCS. Dobljen sistem DAE lahko rešimo z različnimi numeričnimi metodami, ki so ponujene v okviru knjižnice OCS. V obravnavanem primeru smo uporabili implicitno Eulerjevo metodo, pri čemer smo v vsakem koraku izračuna uporabili Newton-Raphsonovo metodo zaradi prisotnosti nelinearne karakteristike magnetnega jedra [3].

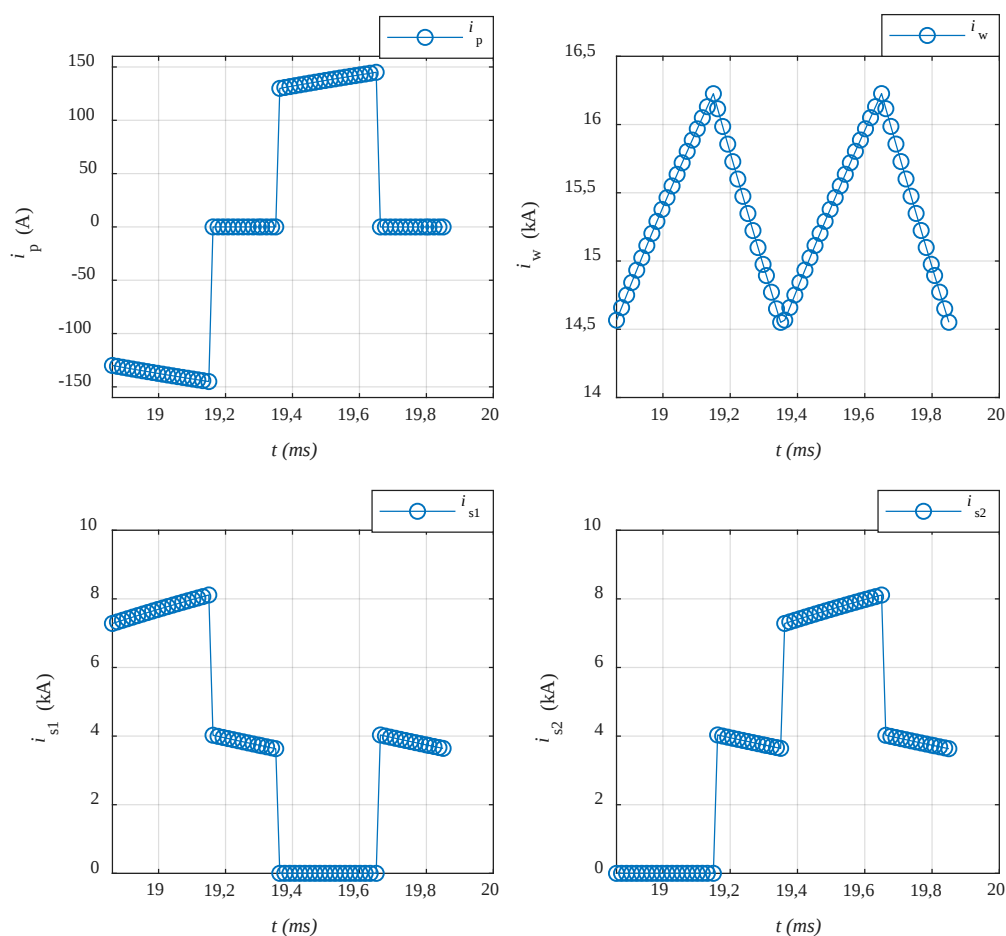
3.2 Numerični izračuni

Rezultati računske analize so predstavljeni s pomočjo programskega paketa Matlab in odprtokodnega programskega paketa ParaView 5.5.0-RC4 [8]. Slika 8 prikazuje rezultate numeričnega izračuna ene periode primarne napetosti u_p ter sekundarnih napetosti u_{s1} in u_{s2} transformatorja za UTV. Slika 9 prikazuje eno periodo primarnega toka i_p , ki teče po primarnem navitju, ter varilnega toka i_w , ki je vsota sekundarnih tokov i_{s1} in i_{s2} . Ena perioda posamezne spremenljivke, je prikazana v 68 časovnih korakih, pri čemer znaša časovni interval med posameznimi koraki 1 ms. Kljub temu, da je za izris prikazan konstanten časovni korak, pa smo pri izračunu uporabili različne korake izračuna. V časovnih oknih, kjer pride do hitrih sprememb vrednosti posameznih spremenljivk smo uporabili krajši korak izračuna kot v časovnih oknih, kjer so spremembe spremenljivk manjše. S pomočjo programa ParaView 5.5.0-RC4 je prikazana razporeditev gostote magnetnega polja B v jedru transformatorja za UTV (slika 10), ki je odvisna od aktivnosti posameznega navitja. Tako imamo štiri časovna stanja:

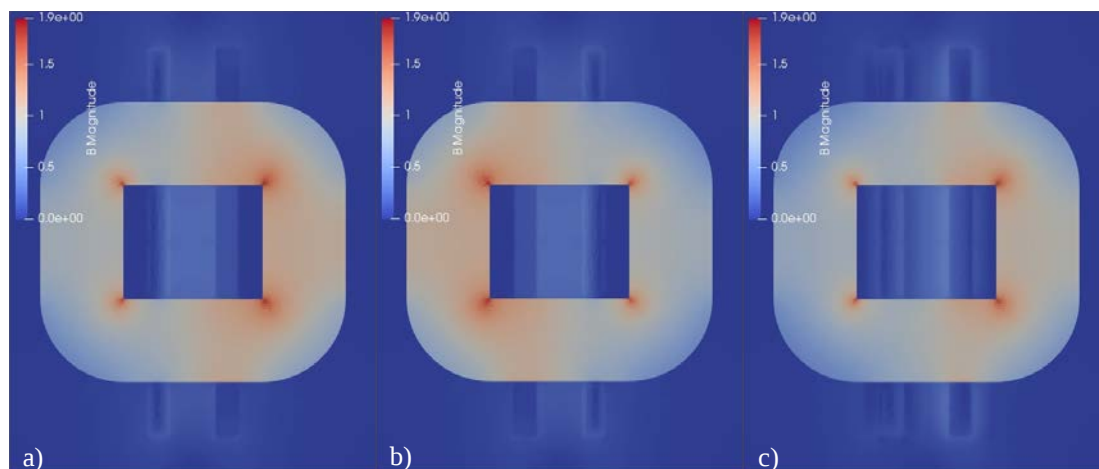
- stanje 1: aktivno sekundarno navitje 1 in primarno navitje,
- stanje 3: aktivno sekundarno navitje 2 in primarno navitje,
- stanje 2 in 4: aktivni samo sekundarni navitji 1 in 2.



Sl. 6. Potek izračunane primarne napetosti u_p in sekundarnih napetosti u_{s1} in u_{s2} prikazano s pomočjo programskega paketa Matlab



Sl. 7: Potek izračunanega primarnega toka i_p , varilnega toka i_w , ki ga dobimo z vsoto primarnih tokov i_{s1} in i_{s2} , prikazano s pomočjo programskega paketa Matlab



Sl. 8: Prikaz gostote magnetnega polja B v jedru transformatorja za UTV, kjer so aktivna naslednja navitja: a) primarno navitje in sekundarno navitje 1, b) primarno navitje in sekundarno navitje 2 ter sekundarni navitji

4. SKLEP

V članku je prikazano, da je model kompleksnega sistema za UTV mogoče izvesti na način, da lahko določen del kompleksnega sistema opišemo podrobneje od drugih, pri čemer smo uporabili metodo KE in metodo modeliranja s koncentriranimi parametri. Predstavljena je neposredna povezava veznega modela z modelom KE, ki temelji na uporabi ustreznih modelov vodnikov. Podrobno sta opisana modela vrvnega in masivnega vodnika. Opisan je postopek združevanja obeh modelov s pomočjo programskega orodja OCS, v katerem je potrebno pravilno zapisati zaporedje številke začetkov in koncev vodnikov modela KE in elementov veznega modela. Predstavljen način modeliranja omogoča relativno enostavno modeliranje različnih EM problemov in ga bomo v prihodnosti uporabili za analizo dinamičnih vrtničnih izgub navitij in razporeditve gostote magnetnega polja B v oknu transformatorja in za UTV.

5. VIRI, LITERATURA

- [1] Petrun, M. *Modeliranje in analiza magnetnih komponent v močnostnih DC – DC – pretvornikih: doktorska dizertacija*. Maribor: Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Univerze v Mariboru, 2014.
- [2] Habjan, G. *Nehomogeno porazdeljen magnetni pretok v jedru transformatorja za uporovno točkovno varjenje: magistrsko delo*. Maribor: Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Univerze v Mariboru, 2018.
- [3] Benderskaya, G. *Numerical Methods for Transient Field-Circuit Coupled Simulations Based on the Finite Integration Technique and a Mixed Circuit Formulation*, PhD Thesis, TU Darmstadt, Darmstadt, 2007.
- [4] Günther, M. Feldmann, U. and Maten, J. *Modelling and discretization of circuit problems, in Numerical Methods in Electromagnetics*. Vol, 13, W. Schilders, P. Ciarlet, and J. Maten, Eds., ed: North-Holland, 2005, pp. 523-659.
- [5] Meeker, D. *Finite Element Method Magnetics Version 4.2 User's Manual* [pdf]. Dostopno na: <http://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf> [20.2.2019]
- [6] Falco, C. Culpo, M. in Merlin, M. Dostopno na: <https://octave.sourceforge.io/ocs/> [20.2.2019]
- [7] Schöps in De Gersem, H. "Niobe – a Octave/Matlab Based Environment for Coupled Low-Frequency Electromagnetic Field Simulations in Teaching and Research," in *OctConf 2013*, Milan, Italy, 2013.
- [8] Moreland, K. *The Para View Tutorial Version 4.1* [pdf]. Dostopno na: <https://www.paraview.org/Wiki/images/5/5d/ParaViewTutorial41.pdf> [20.2.2019]

NASLOV AVTORJEV

Gašper Habjan, mag.inž.el.

doc.dr. Martin Petrun, univ.dipl.inž.el

Univerza v Mariboru, Fakulteta, za elektrotehniko, računalništvo in informatiko

Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija

Tel: + 386 2 220 73 45

Elektronska pošta: gasper.habjan@um.si

Fax: /

OCENA VELIKOSTI POŠKODBE V MATERIALU NA OSNOVI BREZ POŠKODBENEGA TESTIRANJA Z VRTINČNIMI TOKOVI

Marko JESENİK, Miloš BEKOVIĆ, Anton HAMLER, Mladen TRLEP

POVZETEK

Brez poškodbno testiranje se vse pogostejše uporablja za testiranje materiala. Uporabljajo se različne metode in ena od teh je testiranje z vrtinčnimi tokovi. V našem primeru smo premikali vzbujalno tuljav s Hallovim senzorjem na zgornji strani aluminijaste plošče, poškodba pa se je nahajala na spodnji, skriti strani plošče. Debelina plošče je 5 mm z različnimi poškodbami. S postopkom so lahko zaradi precejšnje debeline plošče odkrite le globlje poškodbe. Predstavljen problem je inverzni problem, ki ga lahko rešujemo na različne načine. Najbolj natančen je direktni pristop z uporabo modela z metodo končnih elementov (MKE). Za hitro oceno dimenzij poškodbe z uporabe MKE modela smo izračunali gostote magnetnega pretoka za različno dolge in različno globoke poškodbe in podatke vpisali v bazo podatkov. Rezultate meritev smo primerjali z izračunanimi vrednostmi gostot magnetnega pretoka iz baze podatkov in na osnovi primerjave ocenili dimenzije poškodbe. Ocenjene dimenzije poškodbe so kljub malemu številu potekov gostot magnetnega pretoka v bazi podatkov dobro primerljive z dejanskimi dimenzijami poškodb. Čas za izvedbo postopeka ocene na osnovi primerjave merjenih vrednosti s podatki iz baze je zelo kratek.

ABSTRACT

Non-destructive testing is now used increasingly often for the testing of materials. Different methods are used, and testing with eddy currents is one of them. In our studied example, an excitation coil with a Hall sensor was moving on the upper side, and the crack was hidden on the lower side of the aluminium plate. As test plates we used 5 mm-thick damaged aluminium plates. Only deeper and longer cracks can be detected due to the substantial thickness of the plates. The presented problem is an inverse problem. The most accurate is the direct solving approach, using a model made by the Finite Element Method (FEM). For fast estimation of the crack we used the FEM model in order to make a database. The results of the measurements were compared with the calculated values from the database, and the dimensions of the damage were estimated on the basis of the comparison. The estimated crack's dimensions, despite the small number of magnetic flux density sequences in the database, compare well to the actual damage's dimensions. The time needed to make the evaluation procedure based on the comparison of the measured values with the data from the database is very short.

1. UVOD

Brez poškodbeno testiranje se vse pogosteje uporablja za testiranje materialov [1, 2]. Razvite so različne brez poškodbene metode za iskanje in identifikacijo poškodb [3, 4]. Ena od teh je tudi testiranje z vrtničnimi tokovi, pri kateri merimo gostoto magnetnega pretoka $\mathbf{B}$ v bližini testnega materiala, ki se spremeni zaradi poškodbe v materialu [5-7].

V testnem primeru premikamo vzbujačo tuljavo skupaj s Hallovim senzorjem na zgornji strani plošče, med tem ko je poškodba skrita na spodnji strani plošče. Kot testne plošče smo uporabili aluminijaste plošče z različnimi poškodbami. Glede na precejšnjo debelino plošč, lahko zaznamo samo globlje in daljše poškodbe. Ni pomembno samo, da poškodbo najdemo, pomembna je tudi ocena velikosti poškodbe [8].

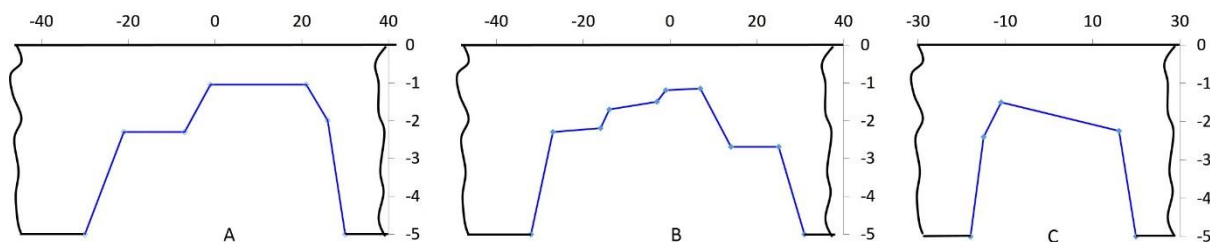
Glede na dimenzije poškodbe, se lahko odločimo, če je potrebno poškodovani material zamenjati. Hitra ocena dimenzij poškodbe je narejena na osnovi merjene $\mathbf{B}$. Obravnavamo inverzni problem, kjer je $\mathbf{B}$ nad ploščo merjen, dimenzije poškodbe pa niso znane. Za reševanje inverznih problemov se uporabljajo različni pristopi [9, 10], vključno z direktnimi modeli, ki temeljijo na analitičnem modelu, pristopi z modeli, ki temeljijo na nevronske mrežah, in pristopi, ki temeljijo na modelih s končnimi elementi.

V testnem primeru so znani vzbujače, lastnosti materialov in $\mathbf{B}$, toda dimenzije poškodbe niso znane. Za rešitev inverznega problema z uporabo direktnega pristopa z modelom iz končnih elementov, so uporabljane različne metode, kot je genetski algoritem ali druge optimizacijske metode [11]. Slabosti dolgotrajnih izračunov se lahko izognemo z uporabo predhodno izračunanih vrednosti $\mathbf{B}$ z metodo končnih elementov (MKE). Po meritvi, lahko ocenimo dimenzije razpoke s primerjavo merjenih rezultatov z izračunanimi vrednostmi iz baze podatkov.

2. MERITVE

2.1 Testne plošče in poškodbe

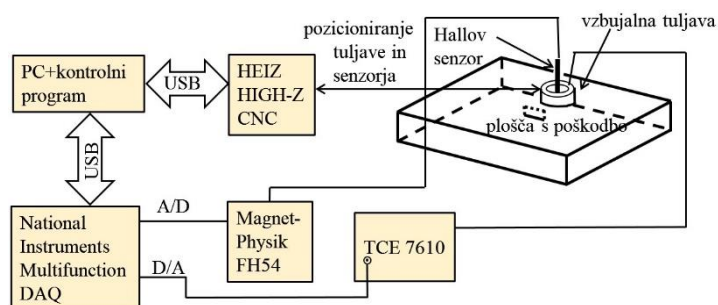
Testi so narejeni na aluminijastih ploščah dimenzij 200 x 200 mm in debeline 5 mm. Meritve so izvedene za tri različne testne primere, označene kot A, B in C in predstavljene na sl. 1. Širina vseh testnih poškodb je približno 1 mm in poškodbe so postavljene v center testne plošče, kjer ne prihaja do robnega učinka.



Sl.1: Uporabljene testne poškodbe, označene kot A, B in C

2.2 Merilna oprema

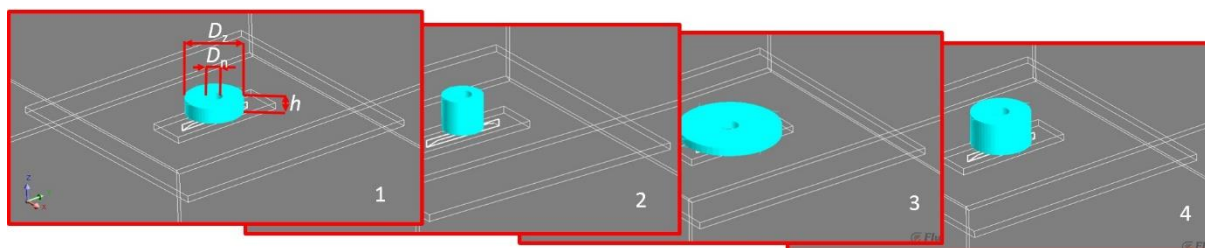
Meritve so narejena s komercialno CNC TECHNIK HEIZ HIGH-Z S-1000 pozicionirno napravo. Vzbujačna tuljava je napajana s TCE 7610 napajalnikom. Hallov senzor HS-AGB5-4805 je nameščen v center vzbujačne tuljave in meri komponento pravokotno na ravnino plošče (z komponento). V nadaljevanju je oznaka B uporabljana za z komponento B_z . Hallov senzor je povezan z Magnet-Physik FH 54 merilnim instrumentom. Občutljivost Hallovega senzorja skupaj z Magnet-Physik FH 54 je 0.01 mT. S sistemom lahko zaznamo poškodbo, za katero je razlika med merjenim B v področju brez poškodbe in merjenim B v področju poškodbe večja od občutljivosti sistema. Magnet-Physik FH 54 je povezan z National Instruments multifunkcijsko DAQ karto. Meritve so kontrolirane z LabVIEW programom. Naprave, ki so uporabljene za meritve, so shematsko prikazane na sl. 2.



Sl.2: Merilni sistem

2.3 Vzbujačna tuljava

Pomembno je uporabiti ustrezno vzbujačno tuljavo. Z MKE modelom so testirane različne vzbujačne tuljave. Na sl. 3 so predstavljene štiri od testiranih.



Sl.3: Štiri od testiranih vzbujačnih tuljav

Naš cilj je bil narediti tuljavo, ki ni prevelika. Enostavneje je primikati majhno tuljavo in nismo želeli preveliko napajalno napravo. Prav tako je področje robnega efekta manjše za tuljave z manjšim premerom [12]. Vse štiri predstavljene tuljave so napajane s sinusnim tokom 0.6 A, frekvence 400 Hz. Število ovojev je 500 za tuljave 1, 2 in 3 in 1000 za tuljavo 4. ΔB je razlika med B nad ploščo v centru tuljave v področju z poškodbo in B nad ploščo v centru tuljave v področju brez poškodbe (za teste je uporabljena oblika poškodbe A s sl. 1). Dimenzije tuljav prikazanih na sl. 3 in izračunane ΔB so predstavljene v preglednici I.

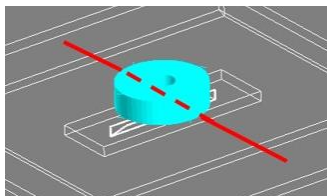
Preglednica I: Dimenzije tuljav, prikazane na sl. 3, in izračunane ΔB

Tuljava	D_n (mm)	D_z (mm)	h (mm)	N (ovoji)	ΔB (mT)
1	13	44	12	500	0.39
2	13	28.5	24	500	0.23
3	13	75	6	500	0.34
4	13	44	24	1000	0.48

Notranji premer D_n vseh tuljav je enak, ker moramo v prostor znotraj tuljave vstaviti Hallov senzor. Če primerjamo ΔB iz preglednice I za tuljave 1, 2 in 3, vidimo, da je tuljava 1 najboljša. Če tuljavi 1 dodamo 500 ovojev dobimo tuljavo 4 s čimer se ΔB poveča le za 23%, čeprav je število ovojev dvakrat večje. Glede na rezultate, smo za meritve uporabili tuljavo 1.

2.4 Uporabljena frekvenca

Različne frekvence so primerne za različne probleme. Da najdemo najprimernejšo frekvenco smo izvedli meritve B s premikanjem tuljave skupaj s Hallovim senzorjem na liniji pravokotno glede na poškodbo, kot je prikazano na sl. 4.



Sl.4: Pomik po liniji pravokotno glede na poškodbo

Korak pomika je bil 0.2 mm. Preglednica II prikazuje ΔB dobljen pri različnih frekvencah in vzbujačnem toku 0.6 A.

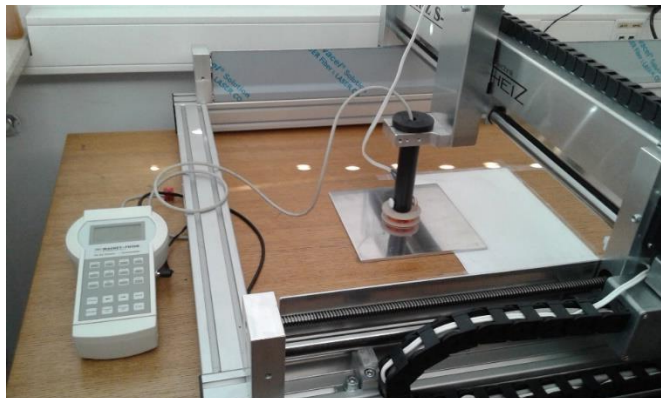
Preglednica II: ΔB za različne frekvence vzbujačnega toka (poškodba A)

f (Hz)	300	350	400	500	600	1000
ΔB (mT)	0.281	0.289	0.294	0.253	0.238	0.131

Najvišji ΔB dobimo pri frekvenci 400 Hz. V primeru, če bi za test uporabili poškodbo B ali C, bi lahko bila izbrana frekvenca nekoliko drugačna.

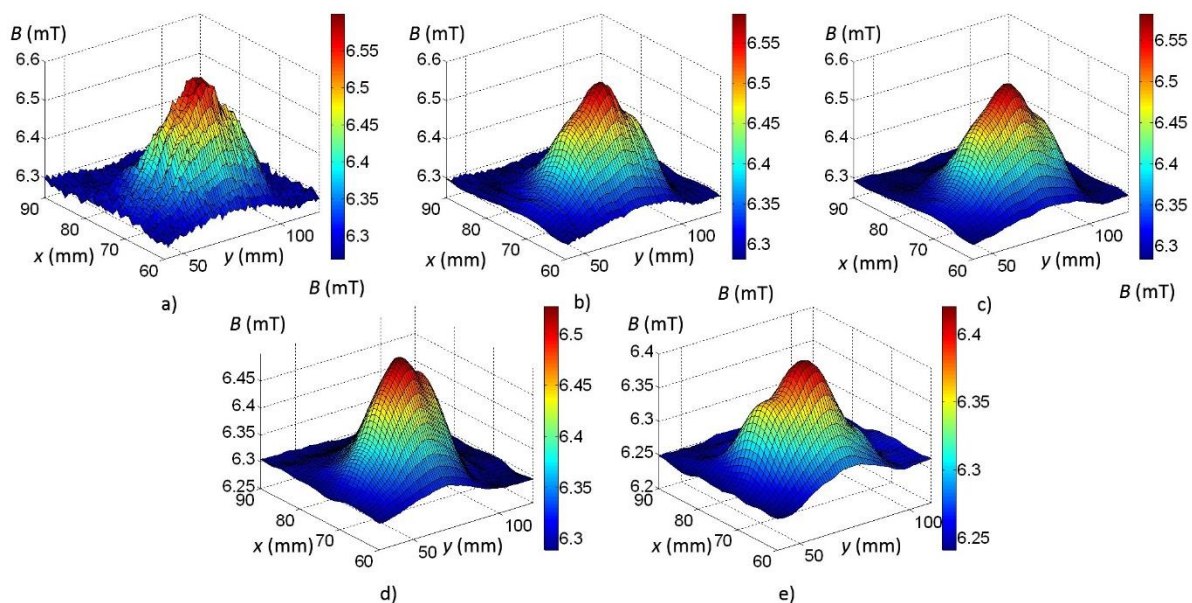
2.5 Meritev v ravnini nad testno ploščo

Meritve so narejene s premikanjem vzbujalne tuljave skupaj s Hallovim senzorjem v ravnini nad testno ploščo. Na sl. 5 je prikazana fotografija vzbujalne tuljave, nameščene v pozicionirno napravo, skupaj s Hallovim senzorjem povezanim z Magnet-Physic FH54.



Sl.5: Fotografija laboratorijskega merilnega sistema

Vzbujalna tuljava se premika približno 0.5 mm nad ploščo. Na robovih plošče se pojavi robni efekt, ker vrtnični tokovi ne morejo teči v neprevodno področje čez robove plošče [12]. Da obidemo robni efekt, so meritve narejene le v območju do 3 cm od robov plošče. Sprememba razdalje med ploščo in tuljavo s senzorjem prav tako vpliva na točnost meritve [12]. Pred začetkom meritve smo izmerili B v vseh štirih ogliščih plošče (3 cm od roba) in ko so bile vse izmerjene vrednosti enake, smo lahko začeli z meritvijo. Za meritev je uporabljen korak 1 mm v x smeri in 1 mm v y smeri. Rezultati pred in po glajenju za poškodbo A ter rezultati po glajenju za poškodbi B in C so predstavljeni na sl. 6.

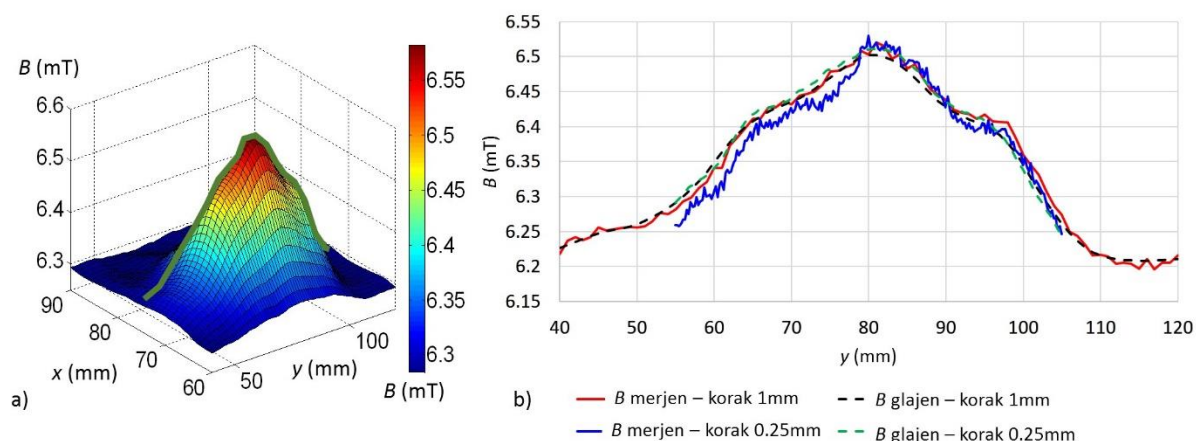


Sl.6: merjen B a) za poškodbo A, b) za poškodbo A po glajenju v y smeri, c) za poškodbo A po glajenju v y in x smeri, d) za poškodbo B po glajenju, e) za poškodbo C po glajenju

Iz sl. 6 a) lahko vidimo, da merjene vrednosti niso gladke in niso primerne za nadaljnje izračune. Glajenje je narejeno z uporabo srednje vrednosti med tremi sosednjimi točkami. Najprej je glajenje izvedeno v y smeri in rezultat je predstavljen na sl. 6 b). Za vsako merjeno točko je izračunana srednja vrednost med tremi sosednjimi točkami v y smeri in postopek je trikrat ponovljen. Po tem je na enak način izvedeno glajenje v x smeri.

3. POSTOPEK OCENE DIMENZIJ POŠKODBE

MKE model omogoča primerjavo med merjenimi in izračunanimi vrednostmi B z namenom, da določimo obliko poškodbe [3, 4]. Ker je MKE časovno zahtevna, uporabimo za primerjavo samo vrednosti B na liniji nad poškodbo, prikazane s črtkano črto na sl. 7 a). Te vrednosti dobimo z iskanjem maksimalnih vrednosti v x in y smeri za vsako linijo premikanja tuljave s senzorjem. Testirali smo, če manjši korak vodi do boljših rezultatov. Meritve so narejene za področje celotne plošče, vendar so na sliki 7 b) predstavljeni rezultati za korak 1 mm in 0.25 mm le na liniji nad poškodbo.



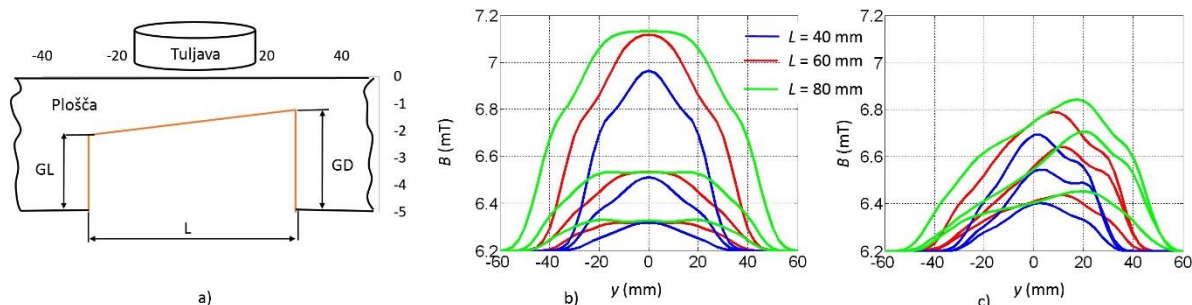
Sl.7: a) B na liniji nad poškodbo prikazan s črtkano linijo, b) merjene in glajene vrednosti B na liniji nad poškodbo A dobljene s korakom 1 mm in 0.25 mm

Če primerjamo glajeni liniji s sl. 7 b) za korak 1 mm (črna črtkana) in 0.25 mm (zeleno črtkana), vidimo da z manjšim korakom ne dobimo bistveno več informacij.

3.1 Izračunan B za različne poškodbe

Po zaključeni meritvi sledi hitra ocene dimenzij poškodbe. Uporabili smo bazo podatkov, ki vsebuje poteke B za različne poškodbe. Poškodbe smo definirali s tremi parametri, ki so dolžina poškodbe L , globina poškodbe na levi strani GL in globina poškodbe na desni strani GD , ki so prikazani na sl. 8 a). Z MKE modelom smo izračunali bazo podatkov za različne poškodbe. Ker nas zanima le B na liniji nad poškodbo, je število izračunov bistveno manjše, kot če bi računali nad površino celotne plošče. Ker je poškodba na nasprotni strani, lahko identificiramo le globlje in daljše poškodbe. Baza podatkov je narejena za vse kombinacije parametrov $L = 40, 60, 80$ mm, $GL = 2.5, 3.5$ in 4.5 mm in $GD = 2.5, 3.5$ in 4.5 mm. Če je

$GL=GD$ je krivulja simetrična. Prav tako so simetrične krivulje enakih dolžin $L_1 = L_2$ ter nasprotnih vrednost globin $GL_1=GD_2$ in $GD_1=GL_2$.



Sl.8: a) Parametri poškodbe uporabljeni za generiranje baze podatkov, b) krivulje B -jev na liniji za $GL=GD$, c) krivulje B -jev na liniji za $GD<GL$

Na osnovi predstavljenih parametrov smo izračunali 27 krivulj in jih shranili v bazo podatkov. Uporaba baze podatkov z večjim številom krivulj bi dala boljše rezultate.

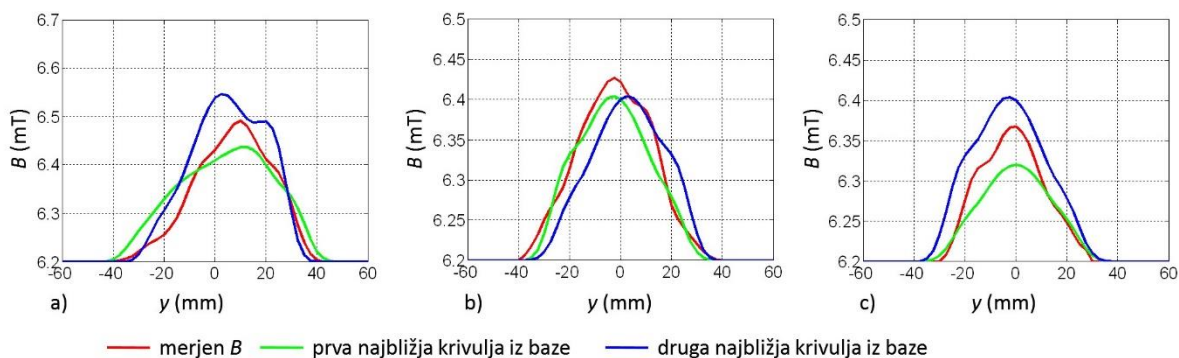
3.2 Ocena dimenzij poškodbe

Iz rezultatov meritve izločimo B na liniji nad poškodbo. Primerjana je s krivuljami iz baze podatkov. Ocena dimenzij poškodbe je narejena v petih korakih.

Korak 1: Izračunana je vsota kvadratov razlik med merjenimi B -ji in B -ji iz baze podatkov za vse krivulje iz baze z (1).

$$\text{vsota_kvadratov} = \sum_{i=1}^{\dot{S}T} (B_{i_merjen} - B_{i_baza_podatkov})^2 \quad (1)$$

$\dot{S}T$ je število točk posamezne krivulje. Dve najbližji krivulji iz baze glede na (1) sta uporabljeni za nadaljnji postopek. Na sl. 9 sta prikazani po dve najbližji krivulji iz baze za poškodbo A, B in C.



Sl.9: Dve najbližji krivulji za a) poškodbo A, b) poškodbo B in c) poškodbo C

Korak 2: Dolžina poškodbe L se določi na osnovi razlik med merjenimi B -ji in B -ji dveh najbližjih krivulj z (2) in (3).

$$vsota_L1 = \sum_{i=1}^{\check{S}T} (B_{i_merjen} - B_{i_prva_najbližja}) \quad (2)$$

$$vsota_L2 = \sum_{i=1}^{\check{S}T} (B_{i_merjen} - B_{i_druga_najbližja}) \quad (3)$$

Če je dolžina dveh najbližjih krivulj različna, določimo dolžino merjene z linearno kombinacijo dolžin bližnjih krivulj z uporabo (4)

$$L = \frac{L_2 - L_1}{vsota_L2 - vsota_L1} (0 - vsota_L1) + L_1 \quad (4)$$

Kjer je L_1 dolžina prve najbližje krivulje in L_2 dolžina druge najbližje krivulje. Če je dolžina prve in druge najbližje krivulje enaka, uporabimo kot drugo krivuljo, krivuljo z enakima globinama GL in GD in prvo večjo ali manjšo dolžino L glede na prvo krivuljo.

Korak 3: Za določitev globine, celotno dolžino krivulj nad poškodbo (y os na sl. 7 a)) razdelimo na krajše dele, odvisno od števila merjenih točk. V našem primeru so ti deli približno 10 mm.

Korak 4: Izračunamo globino G za levi del poškodbe. Za levi del poškodbe upoštevamo GL -e najbližjih dveh krivulj iz baze. G izračunamo za vsak del krivulje, dobljen v koraku 3. G dobimo s pomočjo izračuna vsote razlik med merjenimi in izračunanimi B -ji za opazovan del krivulje nad poškodbo z uporabo (5) in (6).

$$vsota_G1 = \sum_{i=NZ}^{NK} (B_{i_merjen} - B_{i_prva_najbližja}) \quad (5)$$

$$vsota_G2 = \sum_{i=NZ}^{NK} (B_{i_merjen} - B_{i_druga_najbližja}) \quad (6)$$

Kjer NZ definira začetek opazovanega dela in NK definira konec opazovanega dela. G posameznega opazovanega dela je definiran z linearno kombinacijo zapisano v (7), z upoštevanjem le podatkov znotraj opazovanega dela.

$$G = \frac{GL_2 - GL_1}{vsota_G2 - vsota_G1} (0 - vsota_G1) + GL_1 \quad (7)$$

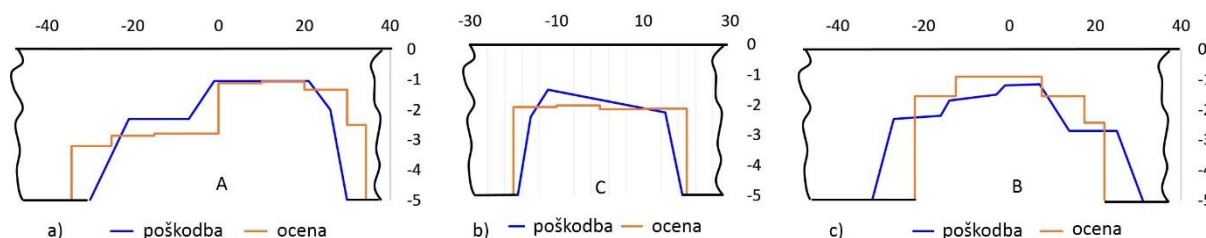
Če sta GL prve in druge najbližje krivulje enaka, kod drugo krivuljo uporabimo krivuljo z enako L in GD in višjo ali nižjo GL glede na prvo krivuljo.

Korak 5: Izračunamo G za poškodbo na desni. Pri tem upoštevamo GD -je dveh najbližjih krivulj. G izračunamo za posamezne dele desne strani poškodbe na enak način, kot je prikazano v koraku 4 za levi del poškodbe.

Preglednica III: Parametri prve in druge najbližje krivulje iz baze podatkov in ocena dolžine

Poškodba	Prva najbližja krivulja iz baze L, GL, GD (mm)	Druga najbližja krivulja iz baze L, GL, GD (mm)	Ocenjena dolžina L (mm)
A	60, 2.5, 2.5	40, 2.5, 4.5	68.6
B	40, 3.5, 2.5	40, 2.5, 3.5	44.23
C	40, 2.5, 2.5	40, 3.5, 2.5	40

Ocenjene oblike poškodb skupaj z dejanskimi poškodbami so prikazane na sl. 10.



Sl.10: a) dejanska in ocenjena poškodba A, b) poškodba B, c) poškodba C

V koraku 1 smo uporabili razliko kvadratov med merjenimi in računanimi B -ji, da je vpliv večjih vrednosti nad poškodbo večji. V korakih 2, 3, 4 in 5 je pomembno vedeti, če je računani B večji ali manjši od merjenega, zato so tam uporabljene le razlike B -jev brez kvadratov.

4. ZAKLJUČEK

Cilj predstavljenega postopka je hitra ocena parametrov poškodbe. Postopek ocene je lahko izveden nemudoma po zaključeni meritvi. Postopke je hiter tudi v primeru obsežnih baz podatkov narejenih na osnovi veliko različnih izračunanih krivulj. Naši testi so narejeni z le 27-timi krivuljami iz baze, kar kaže, da je možno postopek uporabiti tudi na osnovi male baze podatkov. Slabost postopka je, da je generacija baze podatkov časovno zahteven postopek. Prikazana primerjava med realnimi poškodbami in ocenami poškodb, prikazana na sl. 11, kaže podobnost med realnimi in ocenjenimi poškodbami.

5. VIRI, LITERATURA

- [1] Ward D. Rummel, "Nondestructive inspection reliability – history, status and future path," CD-ROM Proceedings, Internet Version, 18th World Conference on NDT (Durban, South Africa, 16 – 20 April), 2012.

- [2] H. Wiggensauser, A. taffe, "NDE in Civil Engineering: Research, Application, Validation and Training." CD-ROM Proceedings, Internet Version, 18th World Conference on NDT (Durban, South Africa, 16 – 20 April), 2012.
- [3] Z. Zeng, L. Udpa, S.S. Udpa, "Finite-element model for simulation of ferrite-core eddy-current probe," IEEE Trans. Magn., 46, 2010, pp 905-909.
- [4] Z. Zeng, L. Udpa, S.S. Udpa, M.S.C. Chan, "Reduced magnetic vector potential formulation in the finite element analysis of eddy current non-destructive testing," IEEE Trans. Magn. 45, 2009, pp 964-967.
- [5] T. Theodoulidis, N. Poulakis, A. Dragogias, Rapid computation of eddy current signals from narrow cracks, NDT&E Int. 43, 2010, pp 13-19.
- [6] G. Rubinacci, A. Tamburrino, S. Ventre, "An efficient numerical model for a magnetic core eddy current probe," IEEE Trans. Magn. 44, 2008, pp 1306-1309.
- [7] M. Fan, P. Huang, B. Ye, D. Hou, G. Zhang, Z. Zhou, "Analytical modelling for transient probe response in pulse eddy current testing," NDT&E Int. 41, 2009, pp 376-383.
- [8] Y. Zhang, Z. Ye, Chong Wang, "A fast method for rectangular crack size reconstruction in magnetic flux leakage testing," NDT&E Int. 42, 2009, pp 369-375.
- [9] P. Kuchment, L. Kunyansky, "2D and 3D reconstructions in acousto-electric tomography," Inverse Problems 27, 2011, 055013.
- [10] H. Huang, T. Takagi, T. Uchimoto, "Crack Shape reconstruction in ferromagnetic materials using a novel fast numerical simulation method," IEEE Trans. Magn. 40, 2004, pp 1374-1377.
- [11] R.L. Haupt, S.E. Haupt, "Practical Genetic Algorithms," Second Edition, Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2004.
- [12] J. Garcia-Martin, J. Gomez-Gil, E. Vazquez-Sanchez, "Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing," OPEN ACCESS sensors 11, 2011, pp 2525-2565.

NASLOV AVTORJEV

Doc. dr. Marko Jesenik

Doc. dr. Miloš Beković

Prof. dr. Anton Hamler

Prof. dr. Mladen Trlep

Univerza v Mariboru, Fakulteta, za elektrotehniko, računalništvo in informatiko

Koroška cesta 46, 2000 Maribor, Slovenija

Tel: + 386 2 220 70 45

Elektronska pošta: marko.jesenik@um.si

METODOLOGIJA ZA OVREDNOTENJE OBRATOVANJA SREDNJENAPETOSTNEGA OMREŽJA V ZAKLJUČENI ZANKI

Nevena SREČKOVIĆ, Miran ROŠER, Gorazd ŠTUMBERGER

POVZETEK

Pospešeno preoblikovanje distribucijskega omrežja, ki ga pogojujejo razvoj tehnologije, vpeljava aktivnih elementov v nekoč pretežno pasivni del elektroenergetskega sistema, ter politične in okoljske uredbe, zahteva nove algoritme načrtovanja, vodenja in optimizacije delovanja distribucijskih omrežij. Ta prispevek obravnava možnost obratovanja srednjenapetostnega omrežja v zaključeni zanki in vplive, ki jih takšno obratovanje ima na izgube električne energije v omrežju. V prispevku bo predstavljena metodologija za primerjavo obratovanja realnega srednjenapetostnega distribucijskega omrežja v radialni in zazankani konfiguraciji, ki bo temeljila na izračunu pretokov energije v omrežju, ob upoštevanju različnih modelov bremen in izmerjenih vrednosti proizvodnje in porabe električne energije. Predstavljeni bodo tudi različni načini določanja izbire optimalne zaključene zanke in optimalnih točk za razklopitev teh, s ciljem zmanjšanja izgub v omrežju ob zagotavljanju ustreznih napetosti in tokov.

ABSTRACT

Evolution of distribution networks, driven by the development of technology and integration of active elements in what was once considered to be a passive part of an electric power system, as well as political and environmental regulations, results in the necessity for novel algorithms for design, control and optimization of operation of distribution networks. This paper discusses the possibility of closed loop operation of a medium voltage distribution networks and its impact on losses of electrical energy. Methodology for evaluation and comparison of a closed loop and radial operation, based on a load flow calculation with consideration of different loading models and measured loading and generation profiles, will be presented. The paper will also present different algorithms for optimal loop coupling and decoupling, yielding minimum power losses, while satisfying voltage and current constraints.

1. UVOD

Razvoj tehnologije na področju distribucije električne energije omogoča nove poglede na obratovanje distribucijskih omrežij. Čeprav načrtovana in izvedena zazankano, nizkonapetostna (NN) in srednjenapetostna (SN) distribucijska omrežja so nekoč obratovala izključno radialno. Zazankana izvedba omogoča preoblikovanje radialne konfiguracije omrežja za zagotavljanje napajanja odjemalcev v primeru okvar [1], vendar trajno obratovanje v zanki

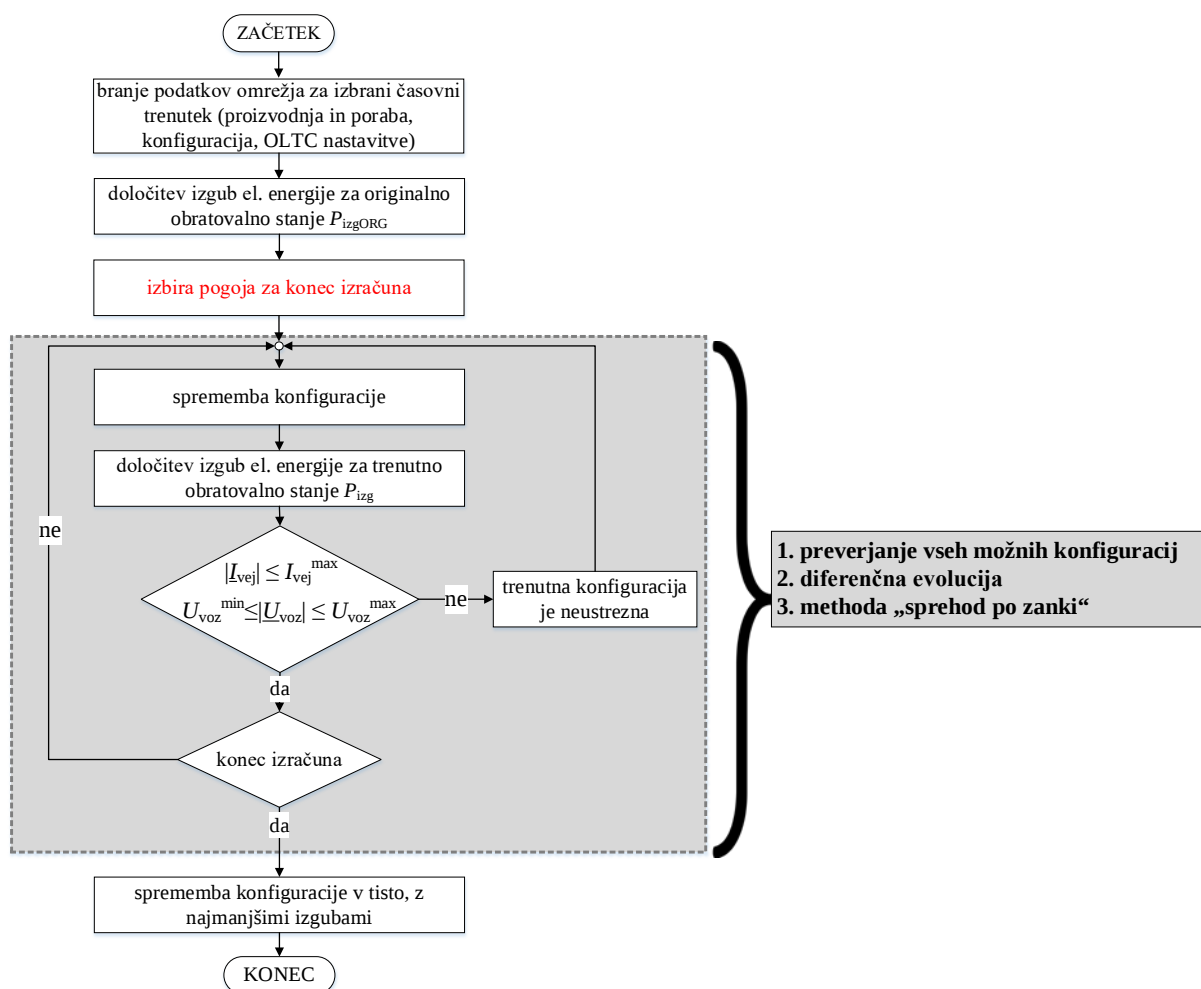
lahko prinaša številne izzive, predvsem s stališča usklajevanja delovanja zaščite. Ob pravilni obravnavi delovanja zaščite [2], trajno obratovanje v zanki, poleg večje zanesljivosti oskrbe odjemalcev, lahko prinaša tudi druge ugodnosti, kot so izboljšanje napetostnih profilov, zmanjšanje izgub, zmanjšanje harmonskega popačenja, povečanje kapacitete omrežja za umestitev razpršenih virov itn. [2], [3], [4]. Na področju Slovenije je trenutno v teku aplikativni slovensko – japonski projekt NEDO, ki se med drugim ukvarja tudi z možnostjo obratovanja SN omrežja v zaključeni zanki in reševanjem problemov, ki jih takšno obratovanje lahko prinese (optimalno odpiranje in zapiranje zank, zagotavljanje ustreznih napetostnih profilov, usklajevanje zaščite itn.).

Osnovni namen tega prispevka je predstavitev razvoja metodologije za ovrednotenje obratovanja SN DO v zaključeni zanki. Kriterij za določitev optimalnega odpiranja ali zapiranja zank je minimizacija izgub električne energije, ob zagotavljanju ustreznih napetostnih profilov in preprečevanju termičnih preobremenitev povezav. Predstavljeni bodo trije možni načini za določitev optimalnih konfiguracij, in sicer preverjanje vseh možnih rešitev, uporaba optimizacijske metode – diferenčne evolucije ter metode, razvite za izkoriščanje topoloških lastnosti v prispevku obravnavanega omrežja, imenovane »sprehod po zanki«. Metode bodo medsebojno primerjane glede na ustreznost za implementacijo pri doseganju zastavljenega cilja. Analiziran bo tudi vpliv upoštevanja različnih modelov bremena na obratovanje v zanki.

Prispevek je sestavljen iz pet poglavij. V drugem poglavju so prikazani metodologija in predlagani algoritmi za določanje optimalnega odpiranja in zapiranja zank. V tretjem poglavju je prikazan realni model SN distribucijskega omrežja. Rezultati simulacijskih izračunov na izbranem modelu so prikazani v četrtem poglavju. Peto poglavje poda sklepe ugotovitve.

2. ANALIZA OBRATOVANJA SN OMREŽJA V ZAKLJUČENI ZANKI

V tem poglavju so prikazani možni načini za izbiro optimalne konfiguracije omrežja, s ciljem zmanjšanja izgub v DO, ob zagotavljanju ustreznih napetostnih profilov in tokov vej po standardu SIST EN 50160 [5]. Primeri zaključenih zank, ki bodo obravnavani v tej študiji, predstavljajo najmanj problematičen primer iz obratovalnega stališča, in sicer zanko, pridobljeno, kadar dva izvoda, ki obratujeta na istem sistemu napetosti, medsebojno sklopimo [4]. Za izbrano obratovalno stanje je možno določiti optimalno konfiguracijo omrežja s pomočjo diagrama poteka, predstavljenega na Sl. 1. Diagram prikazuje metodologijo, ki je ustrezna za določitev izbire optimalne zaključene zanke in optimalnih točk za razklopitev zank, s ciljem zmanjšanja izgub v omrežju ob zagotavljanju ustreznih napetostnih profilov.



Sl. 1: Diagram poteka za izbiro optimalne konfiguracije

Ob predpostavki, da za obravnavano omrežje poznamo vhodne podatke, kot so trenutna konfiguracija omrežja, trenutna poraba in proizvodnja električne energije, nastavitve regulacijskih transformatorjev itn., lahko določimo izgube električne energije za trenutno stanje P_{izgORG} . Izgube električne energije v distribucijskem omrežju ovrednotimo na osnovi izračuna pretokov energije. V tem prispevku je za ta namen izbrana metoda »backward – forward sweep« [6] in njena različica, primerna za analizo zazankanih omrežij [7]. Glede na želeno konfiguracijo omrežja, radialno ali zazankano, in glede na izbrano metodo za določitev le te, prilagodimo pogoj za konec izračuna. Del algoritma, ki predstavlja ovrednotenje potencialnih rešitev rekonfiguracije omrežja, označen s sivo barvo na Sl. 1, je bil implementiran na tri načine.

2.1 Določitev optimalne zaključene zanke

Pri določitvi optimalne zaključene zanke, razvita metodologija mora podati odgovor naslednji vprašanji, in sicer: »katera dva izvoda moramo povezati, da dobimo najmanjše izgube v omrežju?«, ter: »kakšna je optimalna radialna konfiguracija preostalega dela omrežja?«.

2.1.1 Preverjanje vseh možnih rešitev

Za izbrano obratovalno stanje določimo vse možne konfiguracije, ki vsebujejo eno zaključeno zanko. Za vsako izmed njih določimo izgube ter preverimo, ali so v katerem primeru presežene napetostne (1.1) ali tokovne omejitve (1.2). Konfiguracije, ki presegajo zastavljene omejitve, zavržemo kot neustrezne. Kriterij za konec izračuna je da so preverjene vse možne konfiguracije. Optimalna rešitev je tista, ki poda najmanjše izgube.

$$\underline{U}_{\text{voz},i}^{\min} \leq |\underline{U}_{\text{voz},i}| \leq \underline{U}_{\text{voz},i}^{\max} \quad (1.1)$$

$$|\underline{I}_{\text{vej}}| \leq I_{\text{vej}}^{\max} \quad (1.2)$$

2.1.2 Diferenčna evolucija

Diferenčna evolucija (DE) [8] predstavlja meta-hevristični algoritem, ki s posnemanjem naravnih procesov mutacije, križanja in selekcije išče optimalno rešitev zastavljene kriterijske funkcije q_{fun} . V literaturi lahko zasledimo prispevke, ki uporabljajo modificirane oblike DE; za optimalno rekonfiguracijo distribucijskih omrežij [9],[10]. Kriterijsko funkcijo za reševanje zastavljenega problema, iskanja optimalne zanke, prikazuje (1.3). Penali p poskrbijo za zagotavljanje ustreznih napetostnih profilov (1.1) ter tokov (1.2). S pomočjo (1.3) iščemo najmanjši količnik med izgubami potencialne rešitve P_{izg} ter izgubami začetne konfiguracije, ki jo želimo optimizirati P_{izgORG} .

$$\min q_{\text{fun}} = \frac{P_{\text{izg}}}{P_{\text{izgORG}}} + p \quad (1.3)$$

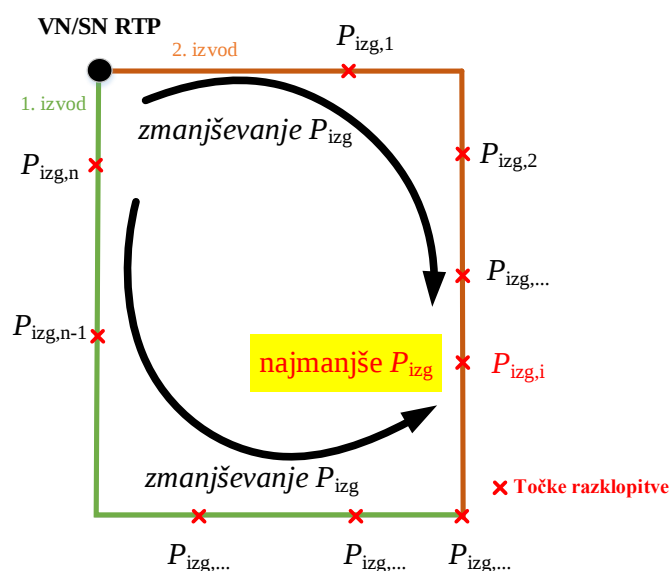
Število možnih konfiguracij, ki zagotavljajo obratovanje v eni zaključeni zanki, je za obravnavno omrežje podano s spremenljivko N_{DO} . Vektor $N_{\text{DO}} = \{1, 2, \dots, i, \dots, N_{\text{DO}}\}$ pri tem predstavlja indekse možnih konfiguracij. S pomočjo DE iščemo spremenljivko x_p , ki nam poda indeks konfiguracije omrežja z najmanjšimi izgubami. DE išče v področju realnih števil in je dobljeno rešitev x_p potrebno pretvoriti v celo število XP , kar naredimo s pomočjo (1.4). Kriterij za konec izračuna določimo z izbiro števila iteracij izračuna.

$$x_p \in [0,1] \rightarrow XP = N_{\text{DO}} \{ \lfloor x_p \cdot N_{\text{DO}} \rfloor + 1 \} \quad (1.4)$$

2.1.3 »Sprehod po zanki«

Metodo za iskanje optimalnih točk razklopitve omrežja, razvito za izkoriščanje topoloških lastnosti obravnavanega modela SN omrežja, imenujemo »sprehod po zanki«. Ime izhaja iz samega postopka iskanja optimalne konfiguracije, ki temelji na ovrednotenju izgub posameznih konfiguracij, v izbrani smeri obhoda po zanki. Osnovna predpostavka metode je ta, da v zaključeni zanki obstaja točka razklopitve, ki bo povzročila radialno konfiguracijo z najmanjšimi izgubami, v primeru razklopitve zanke v točno tej točki. Razklopitev zanke v

sosednjih točkah razklopitve, lahko povzroči radialno konfiguracijo le z večjimi izgubami. Bolj kot smo oddaljeni od optimalne točke, večje so izgube, saj se obremenitev na izvodu vedno bolj neustrezno razpodeli med izvodoma, ki sodelujeta v oblikovanju zanke, in je $P_{izg,1} \geq P_{izg,2} \geq \dots \geq \boxed{P_{izg,i}} \leq \dots \leq P_{izg,n-1} \leq P_{izg,n}$. Shematski prikaz »sprehoda po zanki« je predstavljen na Sl. 2.



Sl. 2: Shematski prikaz iskanja optimalne točke razklopitve z metodo »sprehod po zanki«.

V smeri urinega ali proti urinega kazalca, z izhodiščem pri VN/SN RTP (v točki 1 ali v točki n na Sl. 2), odpiramo zanko in določamo izgube v dobljenih radialnih omrežjih. Izgube bodo zaradi razdelitve bremena med izvodi vedno manjše, do doseganja optimalne točke razklopitve i (Sl. 2). Odpiranje zanke v točki, ki je sosednja točki i , bo povzročilo povečanje izgub. Pogoji za konec izračuna je pojav povečanja izgub, ki nakazuje, da je optimalna točka razklopitve bila določena v prejšnjem koraku. Izhajajoč iz popolnoma zazankanega omrežja se predlagana metoda lahko uporabi za iskanje ene optimalne zaključene zanke na naslednji način:

- prvo zanko sklenemo in naredimo »sprehod po zanki« na preostalem delu omrežja, vse dokler se izgube zmanjšujejo. Na ta način določimo zaključeno zanko I, ki obratuje z najmanjšimi možnimi izgubami;
- postopek ponovimo toliko krat, koliko je možnih zaključenih zank v omrežju;
- primerjamo izgube optimalnih zank in izberemo tisto z najmanjšimi izgubami.

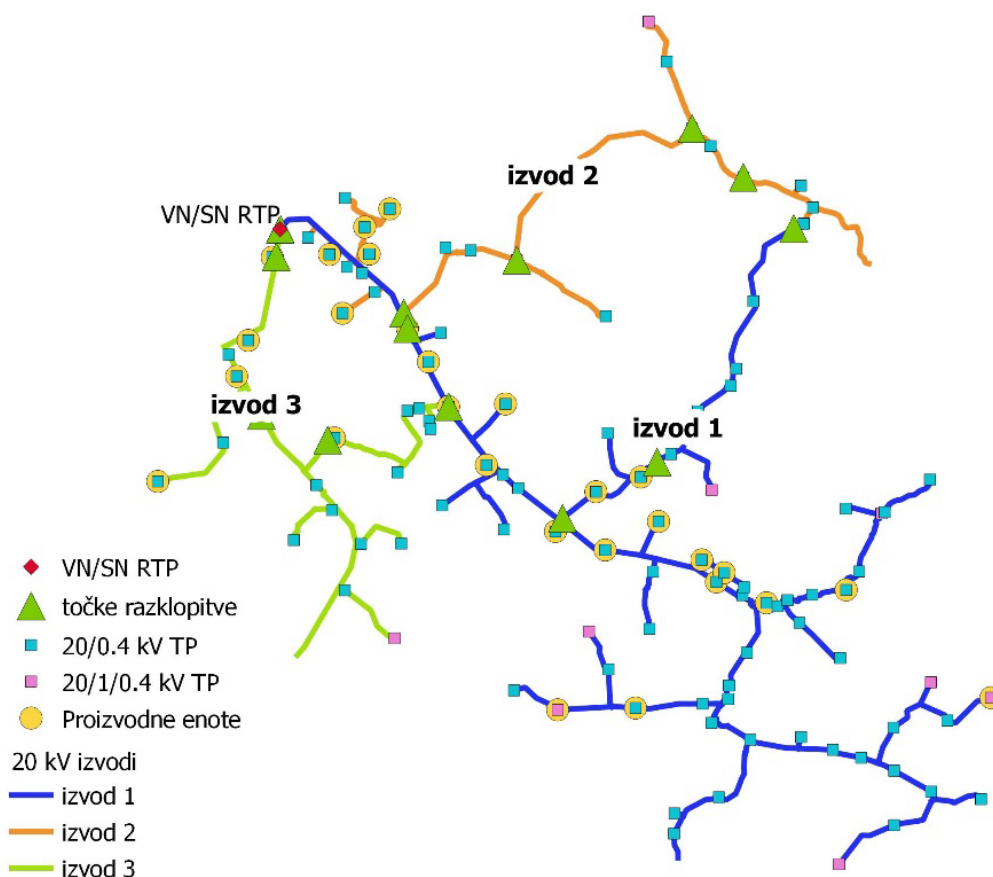
2.2 Optimalna razklopitev zanke

Pri določitvi optimalne razklopitve zanke upoštevamo, da je omrežje v začetnem trenutku obratovalo v optimalni zaključeni zanki, ki jo sedaj želimo razkleniti. To lahko naredimo na tri, že predstavljene načine. Za razliko od iskanja optimalne zaključene zanke, sedaj bo število možnih rešitev nekoliko manjše, saj je treba ovrednotiti manjši nabor konfiguracij, ker je že znano, katero zanko želimo razkleniti. Algoritem DE je enak, le da preoblikujemo vektor

možnih konfiguracij tako, da ustreza radialnim konfiguracijam prvotno zaključene zanke. Metodo »sprehod po zanki« je pri optimalni razklopitvi zanke potrebno narediti le za zanko, ki jo želimo razkleniti.

3. REALNI MODEL SN OMREŽJA

V prispevku je obravnavan del 20 kV SN omrežja, ki ga napaja 110/20 kV RTP. Kvazi-statični, enofazni model obravnavanega dela omrežja je sestavljen iz 296 vozlišč in 297 vej in je prikazan na Sl. 3. Trije izvodi oskrbujejo 110 SN/NN transformatorskih postaj. V obravnavam delu omrežja je 30 priključenih proizvodnih enot.



Sl. 3: Enopolna shema, obravnavanega SN omrežja

Matematični model omrežja predstavlja graf, ki je sestavljen iz vozlišč, medsebojno povezanih z vejami. Veje, zaznamovane z dolžino, upornostjo in reaktanco, se uporabijo za predstavitev nadzemnih in podzemnih vodnikov in kablov ter transformatorskih postaj. Detajlen opis načina modeliranja posameznih elementov omrežja najdemo v [11]. Vozlišča predstavljajo začetke in konce povezav, proizvodne enote in točke razklopitve. Breme, priključeno v vozlišče i , je opisano s kompleksno navidezno močjo $\underline{S}_{brm,i} = P_{brm,i} + jQ_{brm,i}$, ki je

lahko odvisna od napetosti vozlišča, v katero je breme priključeno. Za opis odvisnosti delovne (1.5) in jalove komponente moči (1.6), uporabimo polinomski model bremena [12]

$$P_{\text{brm},i} = P_{\text{brm},i} (a_0 + a_1 U_{\text{voz},i} + a_2 U_{\text{voz},i}^2) \quad (1.5)$$

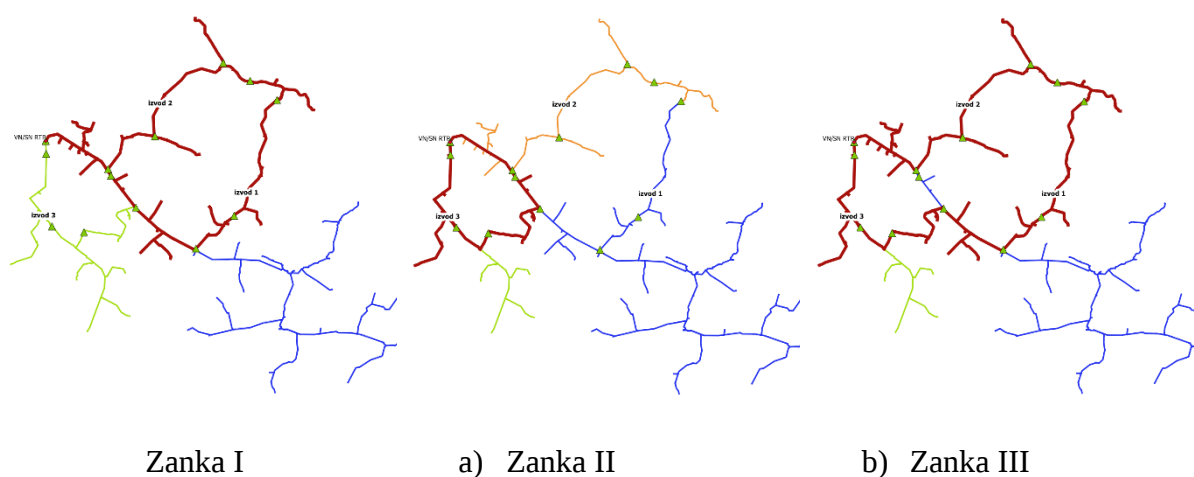
$$Q_{\text{brm},i} = Q_{\text{brm},i} (b_0 + b_1 U_{\text{voz},i} + b_2 U_{\text{voz},i}^2) \quad (1.6)$$

Model uporablja koeficiente, ki opisujejo moč, ki je neodvisna (a_0, b_0), linearno odvisna (a_1, b_1) ali kvadratno odvisna (a_2, b_2) od napetosti. Vsota koeficientov za delovno oz. jalovo moč mora biti enaka ena (1.7).

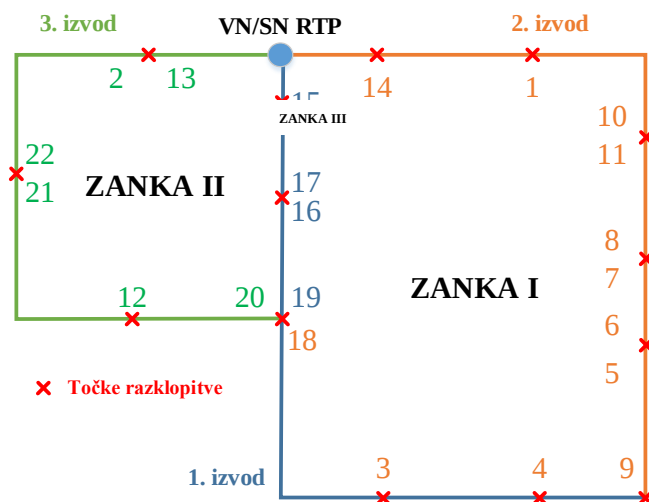
$$a_0 + a_1 + a_2 = b_0 + b_1 + b_2 = 1 \quad (1.7)$$

S pomočjo koeficientov a in b lahko definiramo model bremena konstantne moči ($a_1 = a_2 = b_1 = b_2 = 0$), model bremena konstantnega toka ($a_0 = a_2 = b_0 = b_2 = 0$), ter model bremena konstantne impedance ($a_0 = a_1 = b_0 = b_1 = 0$). V nadaljevanju bo analiziran vpliv različnih modelov bremena, na optimalno odpiranje in zapiranje zank. Upoštevana bosta dva skrajnja primera – vsa bremena so modelirana kot bremena konstantne moči oz. vsa bremena so modelirana kot bremena konstantne impedance.

Trije izvodi v obravnavanem modelu omrežja se lahko preoblikujejo v tri zaključene zanke, ki so potencialno ustrezne za obratovanje (Sl. 4 a-c). Indeksi posameznih konfiguracij, dobljenih z odpiranjem točk razklopitev, prikazuje shema na Sl. 5. Pri določenih razklopitvenih točkah na Sl. 5 sta zapisana dva indeksa, ker je v tistih točkah zanko možno odpreti z dveh straneh. Za doseganje obratovanja v zaključeni zanki je predstavljen model treba razkleniti v eni, oz. za doseganje radialnega obratovanja pa v dveh točkah.



Sl. 4: Tri možne zaključene zanke v obravnavanem SN omrežju



Sl. 5: Shematski prikaz omrežja z indeksi konfiguracij, dobljenih z odpiranjem pripadajoče točke razklopitve

4. REZULTATI

S pomočjo simulacij, izvedenih v programskem okolju Matlab je prvo preverjeno, ali različno modeliranje bremen lahko vpliva na rezultate optimalnega odpiranja in zapiranja zank. Na osnovi urnih meritev proizvodnje in porabe električne energije tekom 15 mesecev, v nekaj več kot 60 točk omrežja, so bili določeni povprečni profili proizvodnje in porabe. Za vsako uro povprečnega dne v mesecu smo tako preverili, katera konfiguracija bi bila najbolj ustrezna, v smislu minimizacije izgub električne energije. Algoritem, izbran za ta izračun, je preverjanje vseh možnih rešitev, s čim je zagotovljeno, da so globalni optimumi dejansko bili doseženi.

Pri določanju optimalne zaklenjene zanke se izkaže, da je ne glede na časovni trenutek in model bremen, najbolj ugodno obratovati v konfiguraciji 20 – zaprta zanka I (vidi Sl. 5), ob razklenjenih izvodih 2 in 3, tako kot so načrtovani. V primeru, da zanko želimo optimalno razkleniti, se rezultati ob uporabi različnih modelov bremen razlikujejo v le 5 od 288 časovnih trenutkov, kot prikazuje Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Optimalna razklopitev zanke I

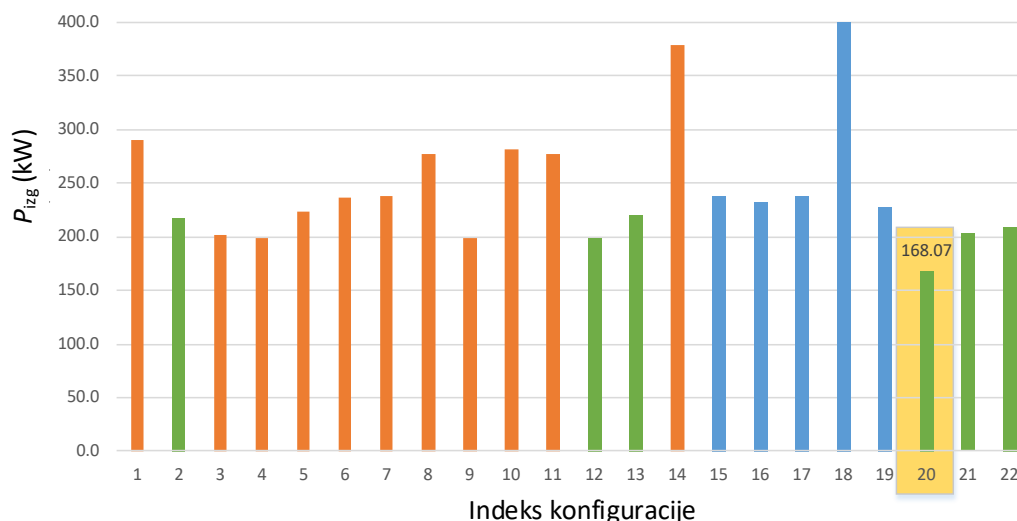
MODEL BREMENA KONSTANTNE MOČI												
	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	avg	sep	okt	nov	dec
00:00	9	9	5	9	5	5	9	9	9	9	9	9
01:00	9	9	5	5	5	5	9	9	9	9	9	9
02:00	9	9	5	5	5	5	9	9	9	9	9	9
03:00	9	5	5	9	5	5	9	9	9	9	9	9
04:00	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
05:00	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
06:00	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
07:00	9	9	9	9	9	9	9	4	9	9	9	9
08:00	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
09:00	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
10:00	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
11:00	9	9	9	9	9	9	9	4	9	4	9	9
12:00	9	9	9	9	9	9	9	4	9	9	9	9
13:00	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
14:00	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
15:00	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
16:00	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
17:00	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
18:00	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
19:00	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
20:00	9	9	9	9	9	9	4	9	9	9	9	9
21:00	9	9	9	9	9	9	4	9	9	9	9	9
22:00	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
23:00	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9

MODEL BREMENA KONSTANTNE IMPEDANCE												
	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	avg	sep	okt	nov	dec
00:00	9	9	9	9	5	5	9	9	9	9	9	9
01:00	9	9	9	9	5	5	9	9	9	9	9	9
02:00	9	9	5	5	5	5	9	9	9	9	9	9
03:00	9	5	5	9	5	5	9	9	9	9	9	9
04:00	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
05:00	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
06:00	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
07:00	9	9	9	9	9	9	9	9	4	9	9	9
08:00	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
09:00	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
10:00	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
11:00	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
12:00	9	9	9	9	9	9	9	9	4	9	9	9
13:00	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
14:00	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
15:00	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
16:00	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
17:00	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
18:00	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
19:00	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
20:00	9	9	9	9	9	9	9	4	9	9	9	9
21:00	9	9	9	9	9	9	9	4	9	9	9	9
22:00	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
23:00	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9

Na osnovi dobljenih rezultatov lahko sklepamo, da izračune lahko nadaljujemo z upoštevanjem modela bremena konstantne moči, saj modeli bremen za upoštevane profile proizvodnje in porabe niso imeli bistvenega vpliva.

V nadaljevanju je predstavljena hitrost izračuna posameznih optimalnih konfiguracij s tremi različnimi algoritmi. V nadaljevanju smo za poljubno izbrani časovni trenutek (januar ob 11h) poiskali optimalno zaključeno zanko.

Preverjanje vseh možnih rešitev poda vrednosti izgub, predstavljene na Sl. 6, kjer barva označuje lokacijo razklopitvene točke, odprte za doseganje obratovanja v zaklenjeni zanki, in sicer zelena (zaklenjena zanka I), oranžna (zaklenjena zanka II) in modra (zaklenjena zanka III)

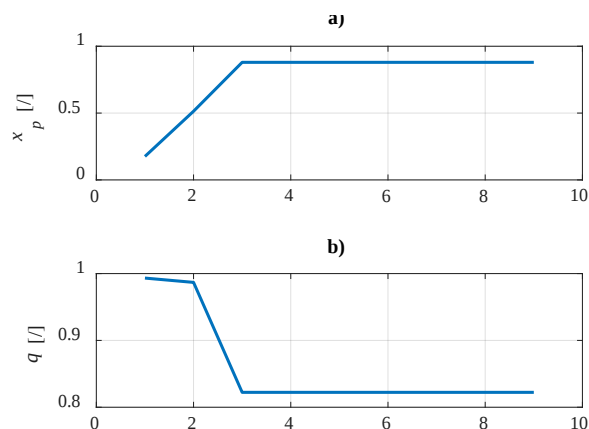


Sl. 6: Iskanje optimalne zaključene zanke, preverjanje vseh možnih rešitev

Z diferenčno evolucijo dobimo vrednost iskalnega parametra $x_p = 0,8796$, in na osnovi (1.4) dobimo konfiguracijo z indeksom 20.

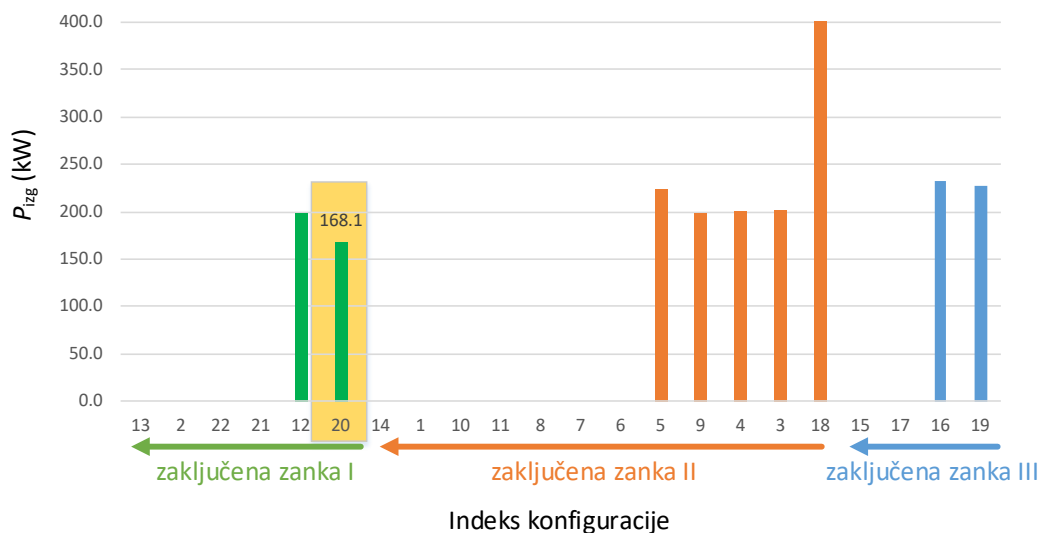
$$XP = N_{DO} \{ \lfloor x_p \cdot N_{DO} \rfloor + 1 \} = N_{DO} \{ \lfloor 0,8796 \cdot 22 \rfloor + 1 \} = 20$$

Potek iskanja parametra x_p in pripadajočo vrednost kriterijske funkcije po posameznih iteracij izračuna poda Sl. 7.



Sl. 7: Iskanje optimalne zaključene zanke, *diferenčna evolucija*

Pri metodi »sprehod po zanki« je za izbran časovni trenutek potrebno ovrednotenje le 9, namesto 22 možnih rešitev, kar bistveno pospeši izračun. Iz Sl. 8 je razvidno, da je treba narediti tri »sprehode po zanki«, pri čem je za določitev optimalne zaključene zanke I treba narediti dva izračuna, optimalne zaključene zanke II pet izračunov, ter za določitev optimalne zaključene zanke III dva izračuna. Puščice na sliki kažejo smeri opravljenih sprehodov.



Sl. 8: Iskanje optimalne zaključene zanke, »sprehod po zanki«

Tabela 4.2 primerja časovne zahtevnosti posameznih algoritmov. Iz nje je razvidno, da je najhitrejša predlagana metoda »sprehod po zanki«, ki je v povprečju potrebovala 1,5 sekunde v primerjavi s 2,3 sekunde, koliko je potrebno za izračun vseh možnih kombinacij. Razlog za zmanjšanje časa je ta, da je namesto 22 ovrednotenij izgub, v primeru metode »sprehod po zanki« v povprečju potrebno le 9 oz. 10 (odvisno od časovnega trenutka). Časovna zahtevnost izračuna s pomočjo DE je predvsem odvisna od izbranega števila iteracij (it) in števila ovrednotenih populacij v posamezni iteraciji (NP). V večini primerov je 120 ovrednotenij

kriterijske funkcije ($it = 10$, $NP = 12$) bilo zadosti, da dosežemo globalni optimum, ob času, ki je primerljiv s časom izračuna drugih dveh metod. Povečanje števila ovrednotenj kriterijske funkcije na 300 ($it = 25$; $NP = 15$) je zagotovilo doseganje globalnega optimuma v vseh 288 primerih, vendar ob skoraj štirikratnem povečanju časa izračuna.

Tabela 4.2: Čas potreben za določitev optimalne zaključene zanke

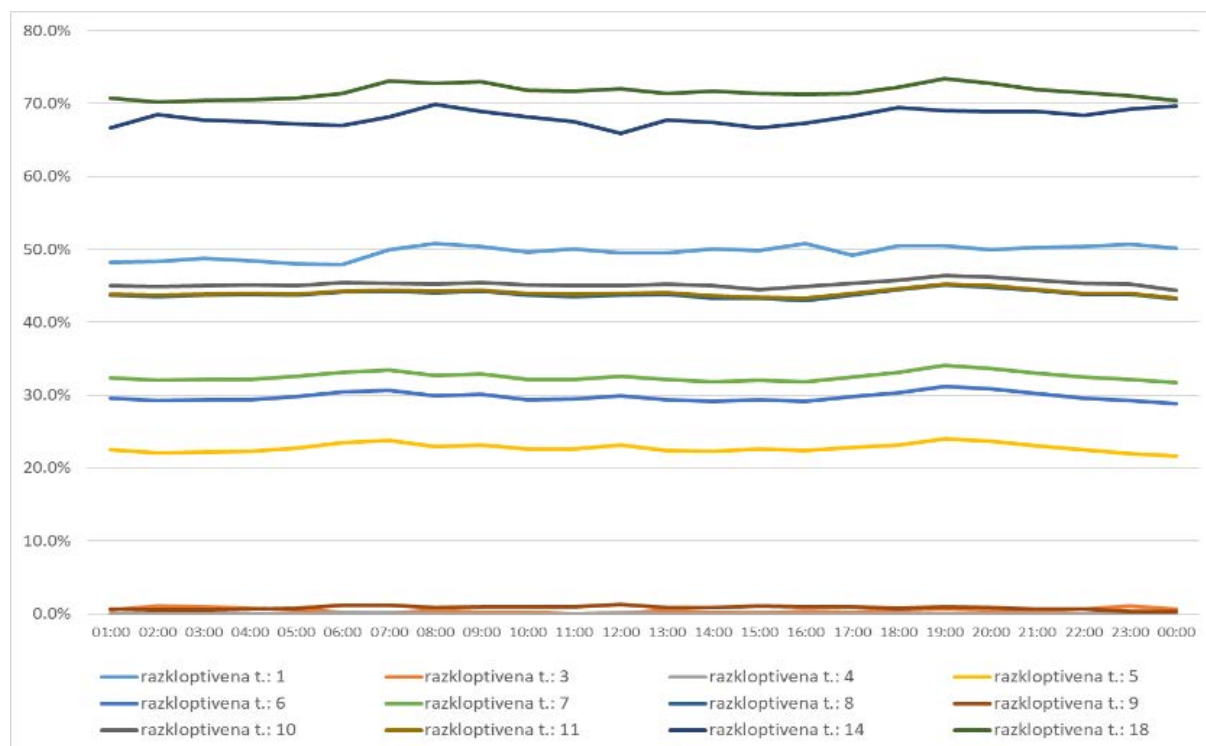
		Čas izračuna (s)
ovrednotenje vseh možnih rešitev		2,3
diferenčna evolucija	$it = 10$; $NP = 12$	3,4
	$it = 25$; $NP = 15$	12,6
metoda "sprehod po zanki"		1,5

Postopek iskanja optimalne razklopitve zanke je podoben že predstavljenim rezultatom, s tem, da je potrebno ovrednotiti manjše število konfiguracij, ker je že znano, katero zanko je treba razkleniti. Poteki posameznih izračunov zaradi tega ne bodo prikazani, prikazani pa bodo povprečni časi določitve optimalne razklopitve zanke s tremi predstavljenimi algoritmi. Vidimo, da sta se časa, potrebna za ovrednotenje vseh možnih rešitev in metodo »sprehod po zanki« zmanjšala, saj je bilo treba narediti manj posameznih ovrednotenj izgub. Izračuni za DE evolucijo se ne spremenijo, ker je število ponovitev izračuna definirano s številom iteracij (it), in ne s številom možnih konfiguracij.

Tabela 4.3: Čas potreben za določitev optimalne razklopitve zanke I

		Čas izračuna (s)
ovrednotenje vseh možnih rešitev		1,9
diferenčna evolucija	$it = 10$; $NP = 12$	3,4
	$it = 25$; $NP = 15$	12,6
metoda "sprehod po zanki"		1,3

V nadaljevanju so prikazani vplivi obratovanja v zaključeni zanki I na izgube. Ti so bili narejeni na osnovi 15 minutnih meritev porabe električne energije v marcu 2019, na osnovi katerih so bili narejeni povprečni urni profili porabe. Odstotek zmanjšanja izgub, ki ga dobimo prehodom iz odprte zanke (dobljene z odprtjem različnih razklopitvenih točk) v zaklenjeno zanko I prikazuje Sl. 9. Primerjava vseh konfiguracij kaže, da je s stališča izgub najbolj ugodno obratovanje v zaključeni zanki, odstotki zmanjšanja izgub se razlikujejo glede na izhodiščno radialno konfiguracijo. Radialni konfiguraciji, dobljeni odprtjem zanke na začetkih izvoda pri VN/SN RTP, sta najbolj neugodna primera in je posledično zmanjšanje izgub prehodom na obratovanje v zaključeni zanki prineslo največje zmanjšanje izgub. Zmanjšanje izgub je najmanjše, če smo izhajali iz radialnih konfiguracij, dobljenih z razklopitvijo zanke pri dejanski povezavi 1. in 2. izvoda.



Sl. 9: Odstotki zmanjšanja izgub dobljeni preходом v zaklenjeno zanko I

5. SKLEP

V prispevku je predstavljena metodologija za ovrednotenje obratovanja srednjenapetostnega distribucijskega omrežja v zaključeni zanki. Na osnovi primerjave izgub električne energije lahko sklepamo, da je prehod na trajno obratovanje v zaključeni zanki smiselni tudi s stališča izgub. Pri tem pa seveda mora biti poskrbljeno za ustrezno vodenje omrežja in uskladitev delovanja zaščite.

V prispevku so predstavljeni trije možni algoritmi za odpiranje in zapiranje zank v omrežju, s ciljem zmanjšanja izgub električne energije, ob upoštevanju ustreznih napetostnih in tokovnih omejitev. Vse tri metode so bile uspešne pri izbiri optimalne konfiguracije, ampak so se razlikovale v hitrosti izračuna. Metoda preverjanja vseh možnih rešitev zagotovo najde globalni optimum, vendar pri njej čas izračuna narašča s številom možnih konfiguracij. Pri diferenčni evoluciji, tako kot pri drugih optimizacijskih metodah, ne moremo zagotovo trditi, da smo našli globalni optimum, in je zaradi tega treba zagotoviti večje število ponovitev izračuna (s povečanjem števila iteracij ali števila populacije), ob čem se čas izračuna poveča nekaj krat. DE pa bi po drugi strani bila zelo primerna za probleme, ki vključujejo hkratno iskanje več parametrov. Najbolj ustrezna za obravnavno omrežje se je izkazala metoda »sprehod po zanki«, ki je zaradi topoloških lastnosti omrežja potrebovala najmanj ovrednotenih izgub posameznih konfiguracij in posledično je najmanj časovno zahtevna. V prispevku smo preverili tudi vpliv izbire modela bremena. Izkaže se, da se pri iskanju optimalne razklopitve zanke rezultat razlikoval le v 5 od 288 obravnavanih primerov, kar nakazuje, da izbira modela bremena ni

igrala bistvene vloge pri opravljenih izračunih. Vsekakor pa je ob poznavanju lastnosti bremen smiselno prilagoditi koeficiente a in b tako, da ustrezajo dejanskih razmeram.

6. LITERATURA

- [1] F. A. Viawan and D. Karlsson, "Voltage and Reactive Power Control in Closed Loop Feeders with Distributed Generation," in *2007 IEEE Lausanne Power Tech*, 2007, pp. 549–554.
- [2] Bin Li, Xuan Yu, and Zhiqian Bo, "Protection schemes for closed loop distribution network with distributed generator," in *2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*, 2009, pp. 1–6.
- [3] K. Deželak, M. Rošer, R. Škof, T. Kastelič, and G. Štumberger, "Vpliv obratovanja v zanki na izgube," in *11. konferenca CIGRE-CIRED*, 2013.
- [4] D. Hrastnik, M. Rošer, and R. Škof, "Sklepanje zank v SN omrežju Elektro Celje, D.D.," in *12. Konferenca Slovenskih Elektroenergetikov*, 2015.
- [5] SIST EN 50160:2011., *Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks*. 2011.
- [6] D. Thukaram, H. M. Wijekoon Banda, and J. Jerome, "A robust three phase power flow algorithm for radial distribution systems," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 50, no. 3, pp. 227–236, 1999.
- [7] W. C. Wu and B. M. Zhang, "A three-phase power flow algorithm for distribution system power flow based on loop-analysis method," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 30, no. 1, pp. 8–15, Jan. 2008.
- [8] R. Storn and K. Price, "Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces," *J. Glob. Optim.*, vol. 11, no. 4, pp. 341–359, 1997.
- [9] Ching-Tzong Su and Chu-Sheng Lee, "Network reconfiguration of distribution systems using improved mixed-integer hybrid differential evolution," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 18, no. 3, pp. 1022–1027, Jul. 2003.
- [10] J.-P. Chiou, C.-F. Chang, and C.-T. Su, "Variable Scaling Hybrid Differential Evolution for Solving Network Reconfiguration of Distribution Systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 2, pp. 668–674, May 2005.
- [11] J. Voršič, T. Zorič, and M. Horvat, *Izračun obratovalnih stanj v elektroenergetskih omrežjih*, 1st ed. Maribor: Založniška dejavnost FERI, 2009.
- [12] W. H. Kersting, *Distribution system modeling and analysis*. CRC Press, 2002.

NASLOV AVTORJEV

Nevena Srečković, mag. inž. el,
dr. Miran Rošer , univ. dipl. inž. el.
red. prof. dr. Štumberger Gorazd, univ.dipl.inž. el.

Univerza v Mariboru, Fakulteta, za elektrotehniko, računalništvo in informatiko
Koroška cesta 46, 2000 Maribor, Slovenija

Tel: + 386 2 220 70 56

Fax: + 386 2 252 54 81

Elektronska pošta: nevena.sreckovic@um.si

COMPARATIVE ANALYSIS OF DYNAMIC LOAD MODEL PARAMETERS OBTAINED BY MEASUREMENT, MODELING AND OPTIMIZATION TOOL

Ernad JABANDŽIĆ, Tatjana KONJIĆ, Mirza SARAJLIĆ

ABSTRACT

Modelling and optimization of voltage dependent load is always a current topic due to existence of an adequate load model, which is a prerequisite for calculation of steady states and the analysis of transient regimes of power systems. Given that it is important to know the load model parameters, we have performed the measurements in electric power system of Bosnia and Herzegovina (EPS BIH). The paper describes dynamic load models for real and reactive power and gives load model parameters obtained by dynamic load modelling and by Nelder-Mead optimization technique. The input data used in both approaches were obtained by measuring in the real system on the 35 kV side of the transformer.

According to presented results, it is visible that Nelder-Mead optimization technique can estimate parameters for real and reactive dynamic load models better than by modelling.

KOMPARATIVNA ANALIZA PARAMETROV DINAMIČNEGA MODELA BREMENA DOBLJENIH Z MERITVIJO, MODELIRANJEM IN OPTIMIZACIJO

ABSTRACT

Modeliranje in optimizacija napetostno odvisnega bremena je vedno aktualna tema zaradi obstoja adekvatnega modela bremena, ki je predpogoj za izračun stacionarnega stanja in analizo prehodnih pojavov elektroenergetskega sistema. Glede na to, da je pomembno poznati parametre modela, opravljene so meritve v elektroenergetskem sistemu Bosne in Hercegovine (EPS BIH). Članek opisuje dinamični model bremena za realne in reaktivne moči ter poda parametre modela, ki so dobljeni z dinamičnim modeliranjem bremena in z Nelder-Mead optimizacijsko metodo. Vhodni podatki uporabljeni v obeh pristopih so dobljeni z meritvijo v realnem sistemu na 35 kV strani transformatorja.

Glede na predstavljene rezultate je razvidno, da Nelder-Mead optimizacijska metoda določi parametre za realne in reaktivne dinamične modele bremena boljše kot z modeliranjem.

1. INTRODUCTION

Load modelling has the attention of world's scientific public for a long time. Modelling of the voltage dependent load is a starting point for the calculation of steady state and the analysis

of transient regimes in electric power system (EPS). Load models are necessary for studying power system [1]. The authors in [2] and [3] demonstrated the effect of the load models on voltage stability, while authors in [4] describe different load model types and international industry practice on load modelling. In general, all existing load models can be classified in two groups: static load models [2] – [5] and dynamic load models [6], [7]. The complexity of load models depends on the load constituency, types of phenomenon that are being analysed, and required accuracy for output.

Static load modelling is done by static characteristics of real and reactive power in dependence of voltage and frequency in a given time. However, there are many cases when it is necessary to take into account the dynamics of load components, e.g., when load change in comparison to voltage change is relatively slow. In those situations, one uses dynamic load models. There are several dynamic load models: exponential load models, induction motor model, and complex load models.

In order to properly model load it is necessary to select an appropriate approach and identify the model parameters. The selection of load model and the mode of load modelling depends on the purpose of its use and load components. Selection of the appropriate load model for the measurement in EPS used in this work is represented in [8], [9].

Many research articles and studies that deal with load modelling based on the measurement have been published so far (e.g., [10]-[19]). Authors such as Navarro [13] and Karlsson [14] identify in their research the load parameters. Those identified load parameters are represented by individual values that in some cases vary greatly in two serial experiments due to interference effects [15]. Korunović in [16] gives the comprehensive statistical analysis of identified dynamic load model and on that basis obtains representative load characteristics.

In order to identify the load model parameters of dynamic load model based on the node measurement in EPS in Bosnia and Herzegovina, we have conducted experiments in the power plant TE Tuzla on TM1 transformer 110/35/10 kV with variable transient ratio which can be altered automatically and manually. The voltage has been varied between 0.96 to 1.07 p.u. and characteristic of dependency between power and voltage have been recorded. Based on the obtained ratios between power and voltage, we have determined the load model parameters of dynamic load model which are presented in the paper.

The scope of this paper is to compare the parameters obtained by measurement, modelling and optimization. The adopted load model structure is the well-known exponential recovery load model that describes the load real and reactive power with a set of nonlinear functions of voltage [14]. This model is selected, since it is among the most popular dynamic load models used for power systems analysis [4].

The paper is organized as follows: Section 2 describes the field measurements; Section 3 and 4 describe dynamic load models and optimization technique used to get the real and reactive model parameters, respectively; Comparison of load model parameters for the real and reactive power is given in Section 5 and Section 6 concludes the paper.

2. DESCRIPTION OF THE EXPERIMENTS

Measured based methodology can be used to determine the parameters of the load model. Data can be collected by continuous measurements during the normal operation and periodical measurements during experiment conduction in the EPS. In the last period, one can notice an increase in load modelling research based on data collected during the normal operation. This trend is supported by specialization of the measurement equipment which can collect and/or process larger amount of data. However, introduction of the standards related to quality of electrical energy and deregulation of electrical energy market, decreases the possibilities for conducting the experiments in the EPS.

Most of the experiments which have been conducted for load modelling were based on changing the transient ration of the regulation transformer [18]. Abrupt voltage change obtained in this way is the approximation that consists of several step voltage changes that correspond to each of serial positions of voltage regulator.

Step changes can be caused by excluding, i.e., including one of the transformers which work in parallel if one of the transformers can take over the whole load. In addition, step voltage changes can be caused by excluding/including capacitor batteries.

The experiments were conducted on the power plant TE Tuzla on TM1 transformer 110/35/10 kV with variable transient ratio that can be changed automatically and manually and which has installed power of 40 MVA. With aim of determining concrete parameters of the most frequently used static and dynamic load models, we have conducted several types of measurement. The measurement included recording of the voltage and power (real and reactive) during the voltage change on the transformer. The voltage change on the transformer secondary during the experiment was achieved by varying the transient ratio in range from 0.96 to 1.07 p.u. The change of voltage in given range was done in order to prevent the decrease in voltage quality for the most distant load in considered network.

Fig. 1 illustrates the schema of the measurement on 35 kV side of the TM1 110/35/10 kV transformer whose transient ratio is $115 \pm 10 \times 1.5 \% / 36.75 / 6.3$ kV.

In order to conduct the research, we used Fluke 434 [20] which was connected by voltage measurement transformer 35/0.1 kV and Current Measurement Transformer (CMT) 500/5 A. The device has the sampling rate of 500 ms, records average voltage values and calculated average real and reactive power values, and prints them in the form of trend characteristic.

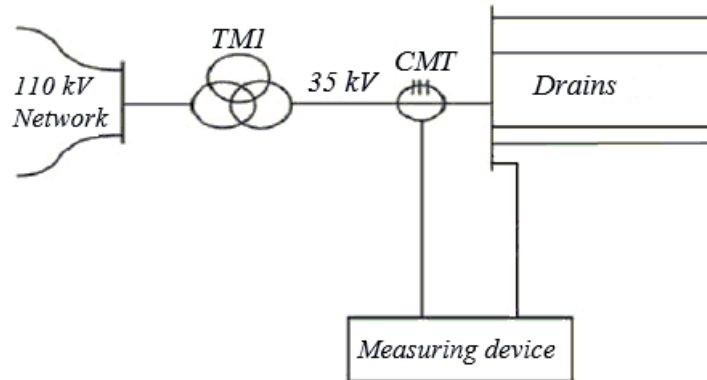


Fig. 1. Schema of measurement on 35 kV side of transformer TM1 in TE Tuzla.

The TM1 transformer of the power plant TE Tuzla supplies industrial, residential, and commercial consumers. On the day of the measurement, transformer supplied the following industrial consumers: Salt mine Tušanj, Salt factory Tuzla, Dita Tuzla, and Cement factory Lukavac. Besides the industrial load, this transformer supplies residential consumers in suburban area that do not have distance heating system. Additional consumers that may fall into category of commercial ones are University of Tuzla, University Clinical Centre Tuzla, the building of Tuzla Municipality, hotels, malls, and other similar consumers.

Average annual electricity consumption of consumers supplied by TM1 is 188966.371 MWh. The share of the customers' categories in total annual electricity consumption is residential with 74682.758 MWh or 39.52 %, industrial with 85193.784 MWh or 45.08 % and other consumers with 29089.829 MWh or 15.40 %.

3. DYNAMIC LOAD MODELS

Only in cases where the load response to voltage change is fast and when the steady state is achieved after short time interval, static load modelling is justified. When the response of real and reactive power on voltage change is slow, it is necessary to include the dynamics of load parameters. Then, one uses the dynamic load models which in general can be described with the following equations:

$$P = f'_P(U, t), \quad (1)$$

$$Q = f'_Q(U, t) \quad (2)$$

where P and Q are real and reactive power under voltage U in time interval t , respectively.

Taking into account the load components in the considered network node, the exponential dynamic load model approach has been selected to conduct the modelling. The adequacy of this model has been confirmed by many researches and studies [9], [13], [14], [16], [17].

Real power time response on step voltage change is given by the following equation

$$P_l(t) = \left[P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{\alpha_s} - P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{\alpha_t} \right] \cdot \left(1 - e^{-t/T_p} \right) + P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{\alpha_t} \quad (3)$$

where:

$P_l(t)$ – response of real power on voltage change,

P_0 – initial value of real power before voltage change,

U_0 – initial voltage value,

T_p – real power recovery time constant,

α_s – steady state real power load model exponent,

α_t – transient real power load model exponent.

Graphical representation of the equation (3) is given in Fig. 2 [14].

Due to voltage decrease, real power instantly falls for ΔP_t on the value $P_t(U)$ and recovers up to $(P_0 - \Delta P_s)$ in new steady state determined by load parameters. It is considered that the new steady state is achieved after three time constants T_p .

Using exponential dynamic load model it is also possible to describe the time response of reactive power on step voltage change in the similar way like it is presented by equation (3). Load model parameters α_s , α_t , β_s and β_t were obtained using a simplified analytical method like in [14].

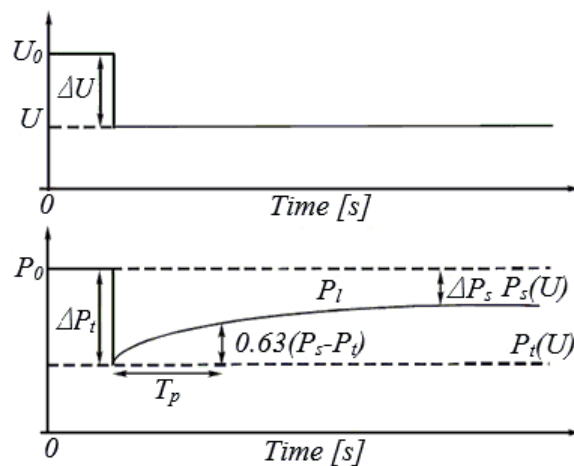


Fig. 2. Power response on step voltage change in exponential dynamic load model.

4. OPTIMIZATION

This chapter describes used optimization technique, i.e., Nelder-Mead method. The scientists John Nelder and Roger Mead presented their method in [21] by adding two transformations (expansion and contraction) and thereby improved and extended other optimization methods. This description is referred to as simplex which adjusts to local space, i.e., environment, and narrows to the minimum.

4.1 Nelder-Mead method

The Nelder-Mead method is based on iterative transformations. Each transformation starts from simplex. The authors suppose that one deals with n -dimensional space and consider the simplex defined with $(n+1)$ points $x_1, \dots, x_{n+1}$ from R^n . Having no doubts in generality, the points are marked in a way that the following array of inequalities is in place:

$$f_1 \leq f_2 \leq \dots \leq f_{n+1}, \quad (4)$$

where $f_i = f(x_i)$ for $i = 1, \dots, n+1$.

Given that the goal is to find the minimum of the function f , the point x_1 whose function value is the lowest is considered to be the best point, while the point x_{n+1} , i.e., the point in which the function value is the worst will be called the worst one. After that, the centre of all points is calculated excluding the worst one.

$$\tilde{x} := \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5)$$

Then follow the transformations in order to replace the worst point with the better one. There are four options for the transformations: reflexion, expansion, contraction, and shortening. Each of them is described by the corresponding parameter: α for reflexion, β for contraction, γ for expansion and δ for shortening. According to [21] these parameters need to satisfy the following conditions:

$$\alpha > 0, \beta > 1, 0 < \gamma < 1, 0 < \delta < 1 \quad (6)$$

while their real values are

$$\alpha = 1, \beta = 2, \gamma = \frac{1}{2}, \delta = \frac{1}{2} \quad (7)$$

Each iteration has two possible outcomes:

- a new point obtained by using reflection, contraction, and expansion which replaces the worst point in next iteration, and

- n new points obtained by shortening which create the simplex with x_1 , i.e., the best point.

5. RESULTS

The graphs of the functions presented in Fig. 3 and Fig. 4 were obtained on the basis of three types of data. The graph of the function shown by blue curve is obtained based on the measured data. The load model parameters obtained by optimizing the data are presented below. A graphic of the function obtained on the basis of optimized data is presented by red curve. The graph of the function represented by the green curve was obtained on the basis of the modelled data from our work shown in [22]. The parameters of the dynamic real power model are $\alpha_s = 1.011$ and $\alpha_t = 1.162$. The parameters of the dynamic reactive power model are $\beta_s = 6.6627$ and $\beta_t = 6.7966$.

To perform the optimization of the real and reactive power function, the *fminsearch* command in the Matlab software package has been used.

5.1 Optimization of real power function

The optimization of real power function has been successful given that the current x_1 and x_2 satisfy the ending criteria, while optimized function $f(x)$ satisfies the convergence criteria. The optimized function $f(x)$ has converged to x_1 and x_2 in 92 iterations. The values obtained by optimization are $x_1 = -2.9226$ and $x_2 = 0.1004$, that corresponds to real power dynamic load parameters of α_s and α_t , respectively.

Fig. 3. gives the graphical representation of measured data, function obtained by modelling, and the one which is based on optimization. It is easy to notice that real power curve based on optimization better fits to curve based on measured data than the curve obtained by modelling.

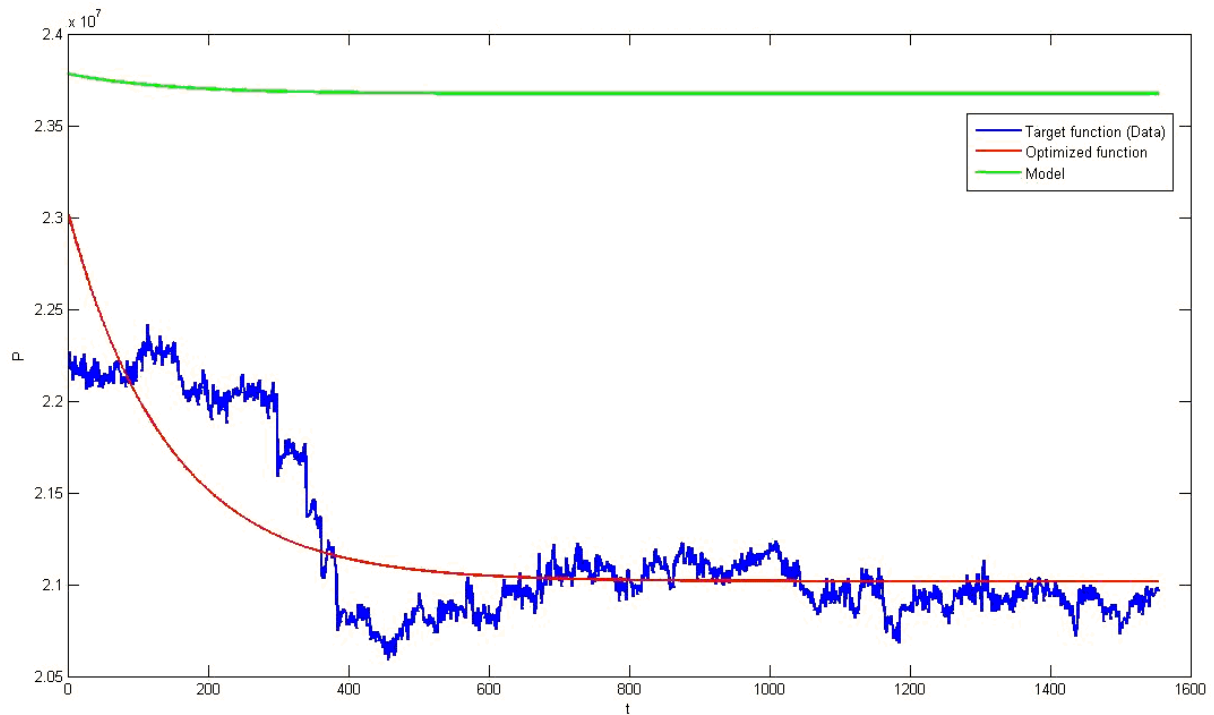


Fig. 3. Comparison of real power curves based on measurement, modelling and optimization.

5.2 Optimization of reactive power function

The optimization of reactive power function has been successful given that the current x_1 and x_2 satisfy the ending criteria, while optimized function $f(x)$ satisfies the convergence criteria. The optimized function $f(x)$ has converged to x_1 and x_2 in 93 iterations. The values obtained by optimization are $x_1 = 2.2043$ and $x_2 = 17.4780$, that correspond to reactive power dynamic load parameters of β_s and β_t , respectively. Fig. 4. represents the function based on measured data, function obtained by modelling, and the one which is based on optimization in case of reactive power.

This figure shows that the graphs of optimized function and the one based on measured data coincide in the most part. The graph which shows the modelling results partially vary from other two. The reason for this is possibly the insufficient accuracy and adequacy of the model. Namely, we expected these results, i.e., for optimized function to be closer to the function which is based on the measured data than the modelled one.

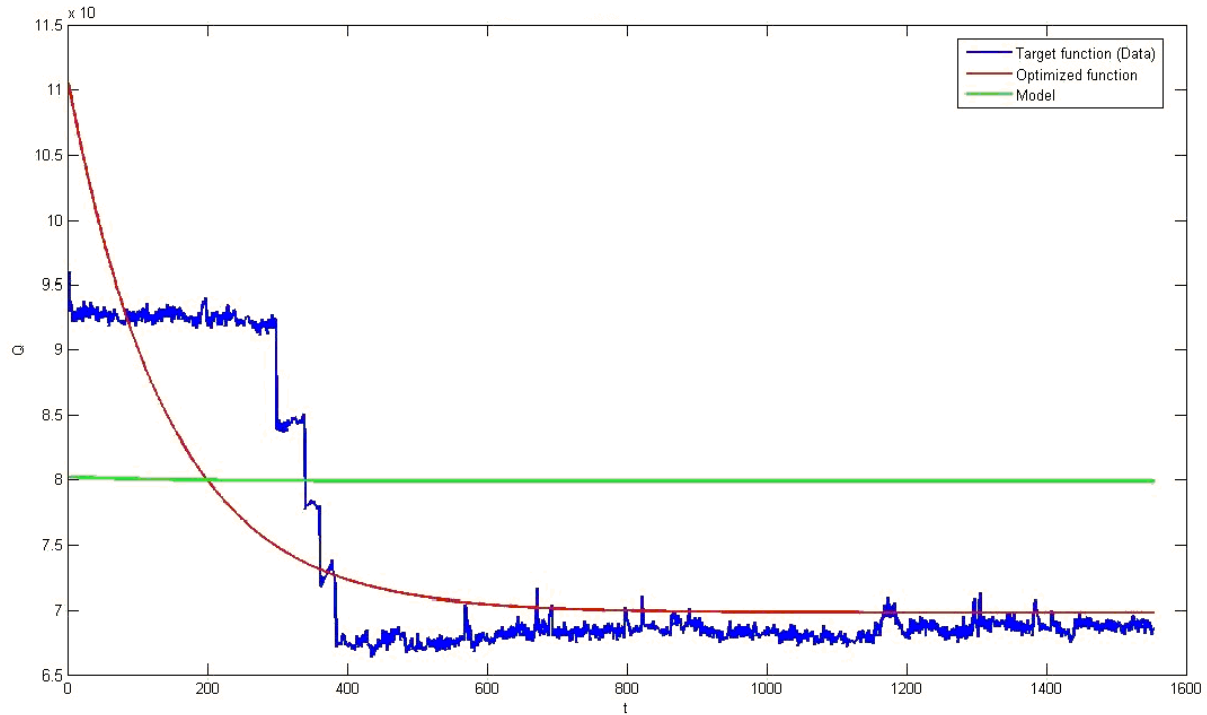


Fig. 4. Comparison of reactive power curves based on measurement, modelling and optimization.

6. CONCLUSION

This paper gives the comparative analysis of parameters gained by modelling and optimization for real and reactive power based on the measurement on 35 kV side of the transformer. Based on previously identified load model parameters we have obtained models which show the change of real and reactive power in time, while we have used the Nelder-Mead method for the optimization purpose.

By using the described methodology, we have gained the values for x_1 and x_2 which represent the parameters α_s and α_t , i.e., β_s and β_t . The optimized function for the values of these parameters has the curve which is the closest to the one obtained based on the measured values for real and reactive power. The ratios between the optimized parameters α_s and α_t , i.e., β_s and β_t can be described by $\alpha_s < \alpha_t$, i.e., $\beta_s < \beta_t$. The same ratio stands for the parameters stemming from modelling, while the difference in mutual values is smaller in modelled parameters.

Besides, we have presented the function curves, i.e., the graphs of the functions which are obtained based on optimization and modelling for real and reactive power. The obtained results show that the optimized function and the function which is based on measured data are in line in the most part, while the graph of the model function partially deviates from the previous two.

As already stated, this deviation in both cases, the real and reactive power, can be attributed to the insufficient accuracy and adequacy of the model. Also, we have expected these results, i.e., for the optimization function to be closer to measured data function than to model function. The reason for this is possibly the insufficient accuracy and adequacy of the model. In addition to better accuracy of the optimization approach, it allows faster and simpler determination of load model parameters using the proposed tool.

This work is the basis for future research that can go in several directions, such as the validation of the optimization method and the comparison of load model parameters obtained with other research. A very interesting field is the research of load model parameters in the nodes of the network with distributed energy sources.

7. REFERENCES

- [1] A.V. Pankratov, et. al., "Estimating Accuracy of Experimentally Obtained Power System ZIP Load Models," MATEC Web of Conferences, vol. 91, pp. 1047-1050, 2017.
- [2] C.A. Baone, et. al., "Measurement based static load model identification," IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2015.
- [3] J.N.S. Mrudveeka, S.V.N.L. Lalitha and M. Ramamoorthy, "Analysis of Maximum Loadability of a Bus for Different Load Models using New Algorithms," Indian Journal of Science & Technology, vol. 9, no. 23, 2016.
- [4] J. Milanović, et. al., "Modelling and Aggregation of Loads in Flexible Power Networks," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, 2013.
- [5] A. Bokhari, et. al., "Experimental Determination of the ZIP Coefficients for Modern Residential, Commercial, and Industrial Loads," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 29, no. 3, pp. 1372-1391, 2014.
- [6] E. Polykarpou and E. Kyriakides, "Parameter estimation for measurement-based load modeling using the Levenberg-Marquardt algorithm," 18th Mediterranean Electrotechnical Conference, 2016.
- [7] E.O. Kontis, et. al., "Development of measurement-based generic load models for dynamic simulations," IEEE Eindhoven PowerTech, 2015.
- [8] F.A.C. Viana, Y. Pan, and S. Bose, "Bayesian model selection and calibration applied to composite load identification," 2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition, pp. 1-6, 2014.
- [9] Y. Li, et. al., "Representative static load models for transient stability analysis: Development and examination," IET Transactions on Generation, Transmission & Distribution, vol. 1, no. 3, pp. 422-431, 2007.
- [10] J. Ribeiro and F. Lange, "A new aggregation method for determining composite load characteristics," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-101(8), pp. 2869-2875, 1982.
- [11] L. Korunović, "Analiza uticaja parametara modela potrošnje na rezultate proračuna srednjenaponskih distributivnih mreža," Master thesis, Electronic Faculty Niš, University of Niš, 2001.

- [12] C.L. Chang and P.H. Huang, "Load modeling study using measurement data for Taiwan power system," *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 22, no. 5, pp. 643-649, 2014.
- [13] I.R. Navarro, O. Samuelsson, and S. Lindahl, "Automatic determination of parameters in dynamic load models from normal operation data," *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, vol. 3, pp. 1375-1378, 2003.
- [14] D. Karlsson and D.J. Hill, "Modelling and identification of nonlinear dynamic loads in power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, no. 1, pp. 157-166, 1994.
- [15] D. Stojanović, L. Korunović, and J.V. Milanović, "Dynamic load modelling based on measurements in medium voltage distribution network," *Electric Power Systems Research*, vol. 78, no. 2, pp. 228-238, 2008.
- [16] L. Korunović, "Modelovanje potrošnje srednjenaponske distributivne mreže na osnovu eksperimenata," PhD thesis, Electronic Faculty Niš, University of Niš, 2008.
- [17] J. Radović, "Statičke naponske karakteristike potrošnje," *Electrodistribution systems*, Lecture II, Electrical Engineering Faculty, University of Podgorica, 2013.
- [18] Y. Baghzouz, and C. Quist, "Determination of static load models from LTC and capacitor switching tests," *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 1, pp. 389-394, 2000.
- [19] E. Jabandžić, T. Konjić, L. Korunović, "Modelovanje naponski ovisne potrošnje na osnovu eksperimenata u EES-u BiH," *Bosanskohercegovačka elektrotehnika*, vol. 9, pp. 59-67, 2015.
- [20] Fluke 434, [online] <https://www.fluke.com/en-us/product/electrical-testing/power-quality-analyzers/three-phase-power-quality-meters/fluke-434-series-ii>, 2018.
- [21] J. A. Nelder, R. Mead, "A simplex method for function minimization," *The Computer Journal*, vol. 7, pp. 308-313, 1965.
- [22] E. Jabandžić, et. al., "Identification of Voltage Parameters of Dynamic Load Model on 35 kV Side of the Transformer," Submitted for publication on 18th International Symposium INFOTEH-JAHORINA, 2019.

AUTHORS' ADDRESS

Ernad Jabandžić, M.Sc.

Electrical Engineering School
Zmaja od Bosne 37, 71000 Sarajevo, Bosnia and Herzegovina

Email: ernad.jabandzic@gmail.com

Prof. Ph.D. Tatjana Konjić,

University of Tuzla, Faculty of Electrical Engineering
Franjevačka 2, 75000 Tuzla, Bosnia and Herzegovina

Email: tatjana.konjic@untz.ba

Mirza Sarajlić, M.Sc.

University of Maribor, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science
Koroška cesta 46, 2000 Maribor, Slovenia

Email: mirza.sarajlic@um.si

DOLOČITEV TEHNIČNIH IZGUB PRENOSNEGA OMREŽJA

Tadej ŠKRJANC, Klemen JERIN, Rafael MIHALIČ

POVZETEK

Pri prenosu električne energije od elektrarne do končnega porabnika, se del energije izgubi. Nedobavljena energija za operaterja elektroenergetskega omrežja predstavlja strošek, zato le ta teži k zmanjšanju tovrstne energije. V splošnem ločimo izgube, ki so v omrežju prisotne ves čas in izgube, ki so močno odvisne od obremenitve. Ker mongolskega operaterja prenosnega omrežja zanima, kako učinkovito obstoječe omrežje prenaša električno energijo, smo iz obremenitvenih diagramov in izmerjene maksimalne obremenitve, določili tehnične izgube omrežja. Obravnavano visokonapetostno omrežje zajema pet razdelilnih transformatorskih postaj in štiri daljnovode, ki so s stališča prenosa električne energije v Mongoliji izjemno pomembni. Z določitvijo konstantnih izgub nismo imeli težav, za izračun variabilnih izgub pa smo uporabili tako imenovano standardno metodo.

DETERMINATION OF THE TECHNICAL LOSSES IN THE TRANSMISSION NETWORK

ABSTRACT

When electricity is transferred from the power plant to the final consumer, part of it is lost. Energy not being supplied represents cost for the transmission system operator therefore it is in its interest to reduce such energy. In general, the losses are divided on losses that are constantly present in the network and losses that are heavily dependent on the load. Because the Mongolian transmission system operator wants to know how efficiently the existing system transfer the electrical energy, the technical losses of the network from the load diagrams and the measured peak load was determined. The high voltage network under consideration covers five substations and four transmission lines that are very important, from the point of view of the electric energy transmission in Mongolia. Determination of the constant losses was not problematic, but for the variable losses calculation the so-called standard method was used.

1. UVOD

Ker se proizvedena električna energija do končnega porabnika prenaša po neidealnih elementih elektroenergetskega sistema, prihaja do izgube energije. Strošek energije, ki na koncu ne prispe do porabnika, se prevali na operaterja prenosnega in distribucijskega omrežja, zato le ta želi čim manj tovrstne energije. Da bi izgubo energije spravili na minimum, moramo oceniti izgube v obstoječem omrežju. Ker so izgube močno odvisne od obremenitve sistema,

moramo na podlagi pretekle in predvidene prihodnje obremenitve, le tega prilagoditi v smislu re-konfiguracije omrežja in s tem prerezporeditve obremenitve z bolj na manj obremenjene elemente ter zamenjave obstoječih elementov z novejšimi, ki imajo zaradi napredka v tehnologiji, manjše izgube. Pri tem je potrebno najti kompromis med tehničnimi in ekonomskimi možnostmi.

Izgube v omrežju delimo na [1-4]:

- tehnične
 - o neodvisne od obremenitve (konstantne, prisotne 8760 h/leto)
 - izgube v nadzemnih vodih: koronske izgube, izgube na izolatorjih
 - izgube v kablovodih: dielektrične izgube
 - izgube praznega teka transformatorjev: histerezne in vrtnične izgube
 - izgube v kondenzatorjih
 - izgube v napetostnih in tokovnih transformatorjih
 - izgube v električnih števcih
 - izgube v ostalih merilnih elementih
 - o odvisne od obremenitve (variabilne)
 - izgube v vodih in kablovodih
 - izgube v navitjih transformatorjev
 - izgube v tokovnih navitjih merilnih instrumentov
- ne-tehnične (komercialne)
 - o netočnost meritev
 - o napačno odčitavanje instrumentov
 - o napake števcev energije
 - o nelegalna poraba energije (kraja, neplačevanje)

Največji delež tehničnih izgub v prenosnem omrežju predstavljajo izgube daljnovodov in kablov ter izgube v železnem jedru in navitjih transformatorjev. Za določitev spremenljivih izgub obstaja več metod, ki v glavnem temeljijo na [3-4]:

- maksimalnih obremenitvah in empiričnega ugotavljanja polnih ur letnih energijskih izgub,
- srednjih kvadratnih obremenitvah,
- srednjih tokovnih obremenitvah ter
- verjetnostni teoriji in statističnih metodah.

Pri analizi smo variabilne izgube v prenosnem omrežju ocenili s pomočjo standardne metode oziroma metode koničnih obremenitev. Ideja slednje je, da na podlagi porabljene letne energije, koničnih obremenitev in povprečnega faktorja moči obremenitve, izračunamo fiktiven nadomestni čas, ki nam ob konstantni maksimalni obremenitvi dá enake energijske izgube, kakor normalen potek obremenitve.

2. IZRAČUN IZGUB

Za izračun izgub uporabimo standardno metodo, kjer izgubno energijo izračunamo kot:

$$\Delta W = \Delta P \cdot T \Delta \quad (1)$$

kjer je:

ΔW – letne izgube,

ΔP – izgubna moč ob maksimalni obremenitvi,

$T \Delta$ – polne ure letnih energijskih izgub.

Polne ure letnih energijskih izgub predstavljajo fiktiven čas pri katerem bi dobili enake izgube pri konstantni maksimalni obremenitvi kakor pri normalnem poteku obremenitve in jih po definiciji izračunamo kot:

$$T \Delta = \frac{\int_0^{8760} S^2(t) \cdot dt}{S_{\max}^2} \quad (2)$$

kjer je:

S – trenutna moč,

$S_{\max}$ – letna konična moč,

t – čas.

Iz zgornje enačbe lahko vidimo, da gre za neke vrste obratovalne ure, vendar ne za krivuljo obremenitve, temveč za kvadrat krivulje obremenitve. Ker v večini primerov ne poznamo letnega diagrama obremenitve, se poslužujemo empiričnih enačb, ki temeljijo na neki tipični obliki diagrama. Najbolj pogosto se uporablja obrazec:

$$T \Delta = (0,17 + 0,83 \frac{T}{8760}) \cdot T \quad (3)$$

pojavi pa se tudi:

$$T \Delta = 8760 \cdot \sqrt{\left(\frac{T}{8760}\right)^3} \quad (4)$$

$$T \Delta = \frac{T}{6} \cdot \left(\frac{5 \cdot T}{8760} + 1\right) \quad (5)$$

$$T \Delta = 8760 \cdot (0,124 + 10^{-4} \cdot T)^2 \quad (6)$$

kjer T predstavlja letne obratovalne ure, ki jih izračunamo kot:

$$T = \frac{W}{S_{\max} \cdot \cos \varphi} \quad (7)$$

kjer je:

W – oddana letna energija,

$S_{\max}$ – letna konična moč,

φ – kot med navidezno in delovno močjo.

2.1 Konstantne izgube

Konstantne izgube so neodvisne od obremenitve in so posledica stalne pripravljenosti sistema, tj. prisotnosti električne napetosti na elementih. Njihov izračun je preprost, saj so zaradi stalne prisotnosti, obratovalne in izgubne ure enake 8760 h. Konstantne izgube v omrežju nastanejo kot posledica izgub v železnem jedru transformatorja, torej jih izračunamo kot:

$$\Delta W_{\text{konst}} = \Delta P_{\text{fe}} \cdot T \Delta = \Delta P_{\text{fe}} \cdot 8760 \quad (8)$$

kjer je:

ΔP_{fe} – izgubna moč v železu oziroma moč transformatorja v prostem teku.

2.2 Variabilne izgube

Spremenljive izgube so odvisne od obremenitve in so posledica električnega toka, ki teče skozi ohmsko upornost elementa. So kvadratno odvisne od toka in se izkazujejo kot gretje elementov. Zaradi nelinearne odvisnosti in posredne povezanosti z letnim diagramom obremenitve, njihova določitev ni enostavna, saj ne moremo uporabiti metode superpozicije. Tako moramo najprej določiti letne obratovalne ure T po (7) in nato polne ure letnih energijskih izgub $T\Delta$, v splošnem po (2). Variabilne izgube so posledica izgub v navitjih transformatorjev ter upornosti daljnovodov, torej jih izračunamo kot:

$$\Delta W_{\text{var}} = \Delta P_{\text{var}} \cdot T \Delta \quad (9)$$

kjer je:

ΔP_{var} – izgubna moč v navitjih transformatorja $\Delta P_{\text{izg,tr}}$ oziroma izgubna moč daljnovoda $\Delta P_{\text{izg,dv}}$.

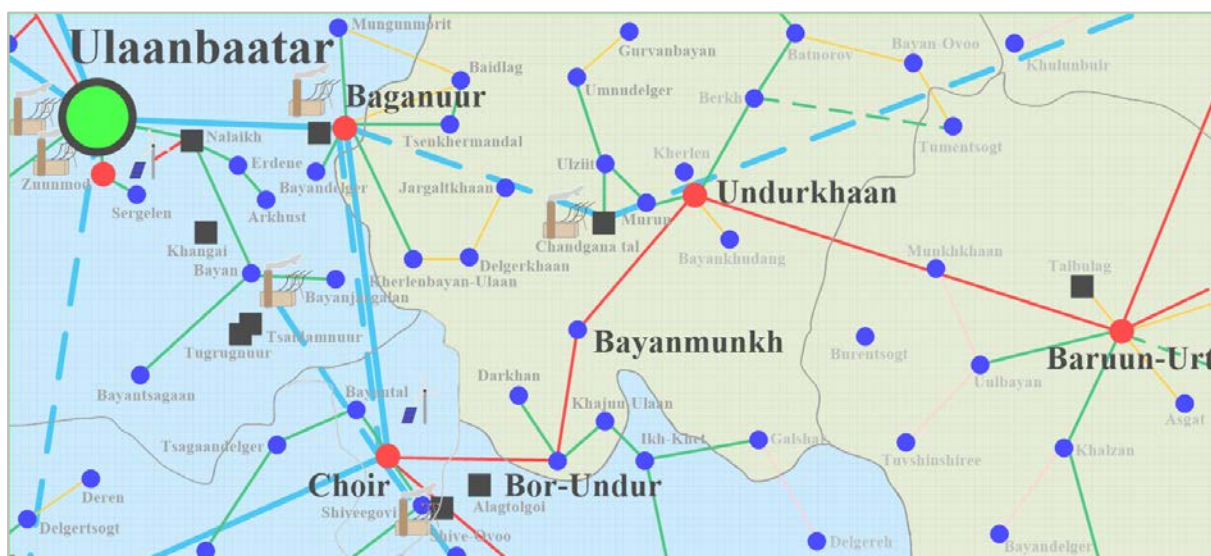
3. IZGUBE MONGOLSKEGA VN SISTEMA

Ker je mongolsko omrežje staro in tako v procesu intenzivnega posodabljanja, mongolskega operaterja prenosnega omrežja zanima, kako učinkovito obstoječe visokonapetostno (VN) omrežje prenaša električno energijo, saj želi vedeti kje ter kakšna posodobitev je potrebna, da bo delovanje omrežja bolj učinkovito.

Obravnavano omrežje v tem članku prikazuje Sl. 1 in sicer izgube smo izračunali za:

- avtotransformator Baganuur moči 63 MVA (220/110/35 kV),
- 220 kV daljnovod Baganuur-Choir,
- avtotransformator Choir moči 200 MVA (220/110/35 kV),

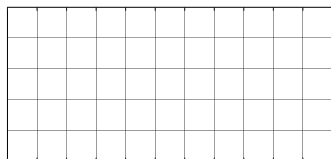
- 110 kV daljnovod Choir-Borundur,
- trinavtiti transformator Borundur moči 16 MVA (110/35/6 kV),
- 110 kV daljnovod Borundur-Bayanmunkh,
- transformator Bayanmunkh moči 10 MVA (110/10 kV),
- 110 kV daljnovod Bayanmunkh-Undurkhaan in
- trinavtiti transformator Undurkhaan moči 10 MVA (110/35/6 kV).



Sl. 1: Obravnavano VN prenosno omrežje

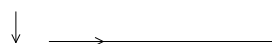
Vsi zajeti elementi so stari približno 35 let. Izjema je le avtotransformator v Choiru, kjer so pred dvema letoma starega, z močjo 63 MVA, nadomestili z novim, z močjo 200 MVA. Zaradi majhne vlažnosti (ni korozije), rednega vzdrževanja in majhne obremenitve so elementi glede na starost še vedno v dobrem stanju, vendar pozimi ekstremen mraz zahteva dodatno gretje elementov, kar prinese nezanemarljiv delež lastne rabe.

Sl. 2 prikazuje obremenitve transformatorjev in daljnovodov v letu 2017, kjer razberemo, da sta najbolj obremenjena elementa daljnovod Baganuur-Choir in transformator Choir, najmanj pa transformator Bayanmunkh.



Sl. 2: Letni obremenitveni diagrami

Za izračun letnih izgub potrebujemo izgube, ki jih posamezen element povzroča pri maksimalni (vršni) letni obremenitvi, zato smo za pridobitev teh podatkov uporabili simulacijski program, kjer smo na podlagi izmerjene maksimalne letne obremenitve nastavili pretoke moči, kot prikazuje Sl. 3.



Sl. 3: Simulacijski model in pretoki ob maksimalni letni obremenitvi

Podatke ter odčitane izgube transformatorjev in daljnovodov pri maksimalni letni obremenitvi podaja Tabela I.

Tabela I: Podatki ter maksimalne izgube transformatorjev in daljnovodov

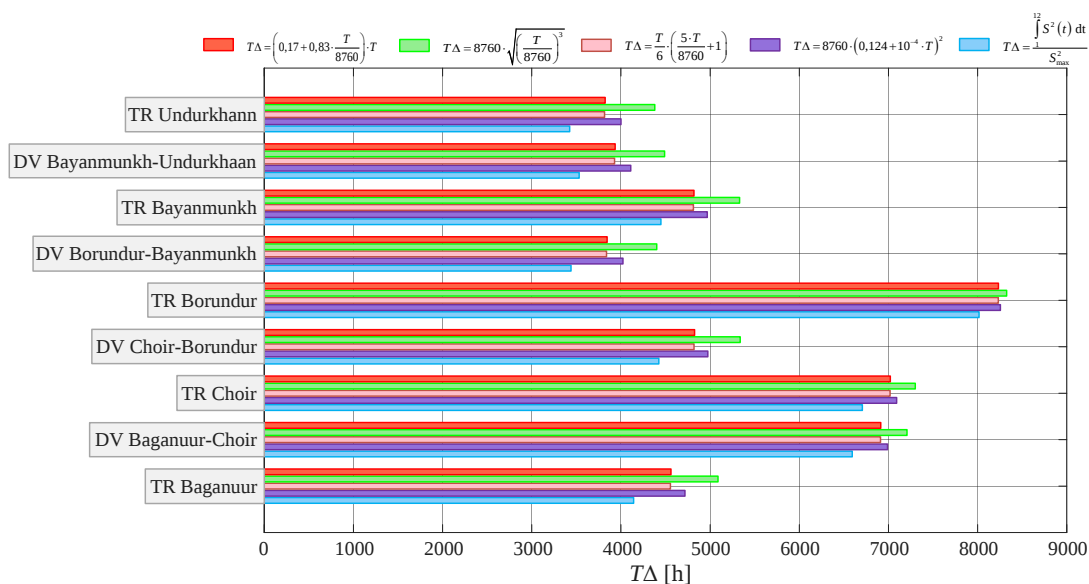
transformator	S_n [MVA]	$P_{cu,n}$ [kW]	P_{fe} [kW]	W^* [GWh]	P_{max}^{**} [MW]	$\Delta P_{izg,tr}^{***}$ [kW]
Baganuur	63	215	45	86,936	14,255	77,332
Choir	200	591	113	362,788	46,766	147,919
Borundur	16	96	26	68,256	8,061	51,212
Bayanmunkh	10	60	14	0,692	0,110	10,418
Undurkhaan	10	76	19	39,928	7,236	117,287
daljnovod	l [km]	r [Ω/km]	R [Ω]	W^* [GWh]	P_{max}^{**} [MW]	$\Delta P_{izg,dv}^{***}$ [kW]
Baganuur-Choir	171,7	0,121	20,776	370,225	48,131	1365,696
Choir-Borundur	90,5	0,249	22,535	171,270	27,205	1429,597
Borundur-Bayanmunkh	81,0	0,249	20,169	98,066	17,714	601,963
Bayanmunkh-Undurkhaan	100,8	0,249	25,099	95,376	17,002	741,920

* izmerjen letni pretok energije 2017, glej Sl. 2

** izmerjena maksimalna obremenitev 2017, glej Sl. 3

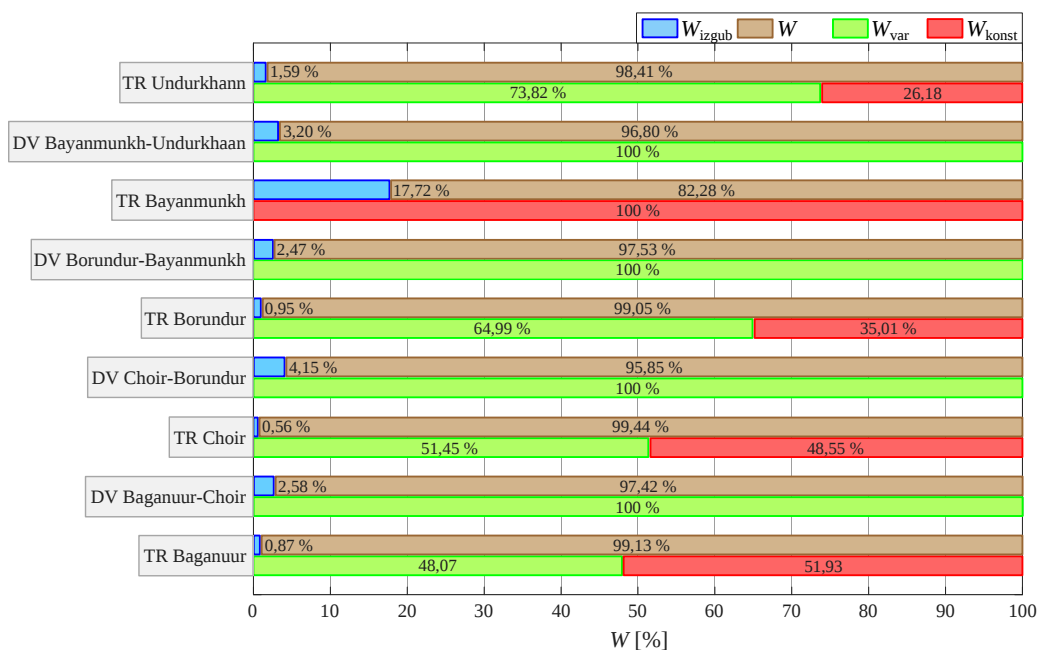
*** izgube izračunane s simulacijskim programom

Kot smo že omenili, lahko za izračun variabilnih izgub uporabimo empirične obrazce, ki so prilagojeni za določen tip obremenitvenega diagrama. Tako v nekaterih primerih dobimo bolj točne rezultate z uporabo enega, v drugih primerih pa drugega obrazca. Da bi preverili katera enačba najbolje opisuje obremenitev v opazovanem omrežju, smo v nadaljevanju za izračun polnih letnih energijskih izgub uporabili (3)-(6), dobljene vrednosti pa primerjali z vrednostjo izračunano po (2), saj imamo na voljo podatke o mesečnih vrednostih obremenitev. Rezultate prikazuje Sl. 4, kjer razberemo, da dajejo obrazci (3)-(6) v primerjavi z (2) večje vrednosti $T\Delta$. Opazimo lahko, da z uporabo (3) in (5) dobimo zelo podobne rezultate, največje vrednosti oziroma odstopanje od točne vrednosti pa dobimo z uporabo (4). Ker predpostavljamo, da letna obremenitev skozi leta sledi nekemu trendu, v primeru da za obravnavano omrežje nimamo na voljo podatkov o dnevni, mesečni obremenitvi, lahko za oceno izgub uporabimo (3) in (5), saj najmanj odstopata od točne vrednosti, kar pomeni, da najbolje opisujeta trend obremenitve.



Sl. 4: Primerjava empiričnih enačb za izračun polnih ur letnih energijskih izgub

Za izračun in primerjavo posameznih izgub smo uporabili čase $T\Delta$ dobljene z (2). Rezultate prikazuje Sl. 5, kjer najprej opazimo, da največ izgub povzroča transformator Bayanmunkh, kar pa je razumljivo, saj je ves čas praktično neobremenjen (približno 1 % nazivne moči) in zato prevladujejo konstantne izgube. Pri transformatorju Choir in Baganuur variabilne izgube predstavljajo približno polovico, pri transformatorju Undurkhaan in Borundur pa 2/3 vseh izgub. Če primerjamo izgube daljnovodov in transformatorjev vidimo, da daljnovodi povzročijo več izgub, kakor transformatorji. Razen pri transformatorju Bayanmunkh, izgube predstavljajo do slabih 5 % prenesene energije.



Sl. 5: Izgube posameznega elementa

4. ZAKLJUČEK

Zaradi starosti je mongolsko prenosno omrežje v procesu posodabljanja, zato operaterja zanima, kako učinkovito obstoječe omrežje prenaša električno energijo in kje ter kakšna posodobitev bi bila smiselna, da bi izboljšali njegovo delovanje. Tako smo na podlagi letnih diagramov obremenitve in izmerjene maksimalne obremenitve, s pomočjo simulacijskega programa in različnih empiričnih enačb, določili prenosne izgube dela obstoječega visokonapetostnega omrežja. Izkaže se, da največ izgub povzroča transformator Bayanmunkh, kar pa je posledica zelo majhne obremenjenosti in tako prevlade izgub neodvisnih od obremenitve. Smiselna bi bila torej zamenjava tega transformatorja s transformatorjem manjše moči oziroma večja obremenitev le tega z dodatnimi porabniki.

5. VIRI, LITERATURA

- [1] Brane Hlebčar, Jože Perme, "Izračuni izgub v distribucijskem omrežju," 6, konferenca slovenskih elektroenergetikov, CIRED ŠK 5-2, Portorož 2003.
- [2] Rafael Mihalič, "Primerjava metod za analizo izgub v distribucijskih omrežjih," 6, konferenca slovenskih elektroenergetikov, CIRED ŠK 5-3, Portorož 2003.
- [3] Simon Velišček: "Analiza direktnih metod za izračun energijskih izgub v razdelilnih omrežjih," diplomsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana 2003.
- [4] Matjaž Kačičnik: "Možnosti izboljšanja direktnih metod za izračun energijskih izgub v razdelilnih omrežjih," diplomsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana 2003.
- [5] David Gerbec, Ferdinand Gubina, "Nadomestni obremenitveni diagram," magistrsko delo, Fakulteta za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, Ljubljana 2003.

NASLOV AVTORJEV

Tadej Škrjanc, mag. inž. el.

Klemen Jerin, mag. inž. el.

Prof. dr. Rafael Mihalič, univ. dipl. inž. el.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko

Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

Tel: + 386 1 476 89 56

Elektronska pošta: tadej.skrjanc@fe.uni-lj.si

DISTRIBUCIJSKO OMREŽJE IN ELEKTRIFIKACIJA PROMETA

Jurij CURK, Uršula KRISPER

POVZETEK

Slovenija se je v okviru EU prizadevanj za znižanje vplivov na okolje odločila za obsežno prestrukturiranje energetike z velikim poudarkom na električni energiji in obnovljivih virih energije. V ta prizadevanja spada tudi želja po elektrifikaciji prometa, ki je pogoj za t.i. dekarbonizacijo naše družbe. Zato bo potrebno ojačati distribucijska omrežja in zgraditi obsežno javno polnilno infrastrukturo za električna vozila. Glede na razvoj tehnike pa bo nujno izvajati tudi ukrepe za vzpodbudo elektrifikacije prometa. V referatu so podani argumenti za predlog, da se te vzpodbude izvajajo skozi izgradnjo OVE in distribucijskih omrežij ter informacijske podpore polnilni infrastrukturi. Mnogo teh ukrepov je smiselno izvesti prek elektro distribucijskih podjetij, ki so regulirana s strani države. Na ta način bi država tudi ohranila kontrolo nad razvojem področja, kar je glede na pomembnost za nacionalno ekonomijo nujno doseči.

ELECTRIFICATION OF THE TRANSPORT FROM DISTRIBUTION SYSTEM OPERATOR'S PERSPECTIVE

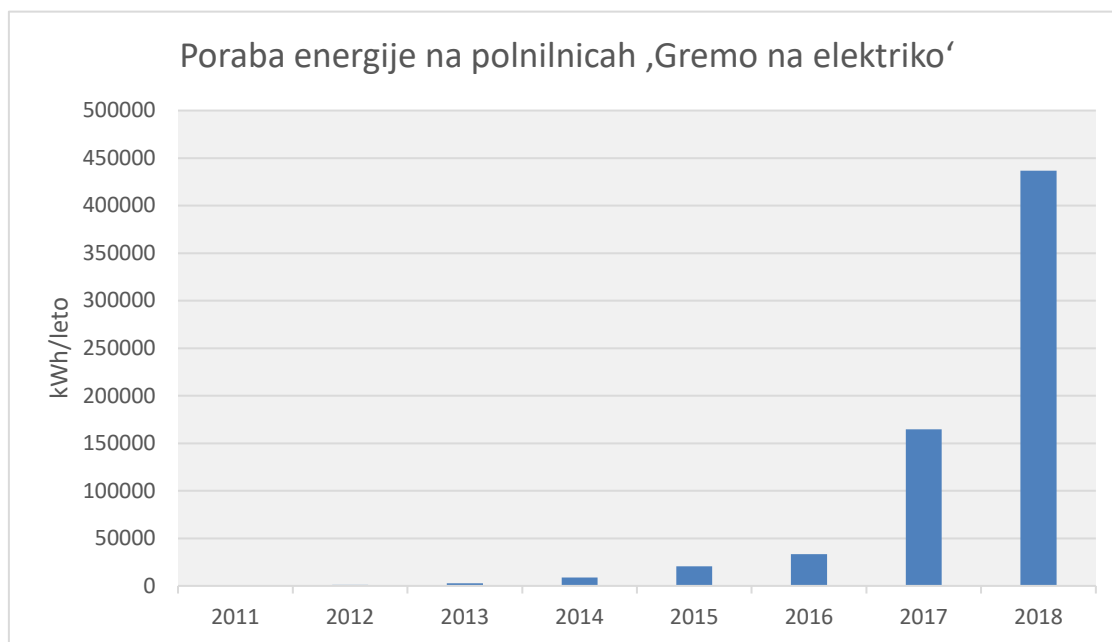
ABSTRACT

Within the framework of the EU, efforts to reduce environmental impacts have been taken by Slovenia for a large-scale restructuring of the energy sector with a strong emphasis on electricity and renewable energy. This effort also includes the desire to electrify traffic, which is a prerequisite for the so-called decarbonisation of our society. Therefore, it will be necessary to strengthen distribution networks and build a large public charging infrastructure for electric vehicles. In view of the evolution of the technique, it will also be necessary to implement measures to encourage the electrification of transport. The paper provides arguments for the proposal that these incentives should be implemented through the construction of RES and distribution networks and information support for charging infrastructure. Many of these measures are reasonable to be carried out by state-regulated electricity distribution companies. In this way, the state would also maintain control over the development of the area, which in view of the importance for the national economy is necessary.

1. UVOD

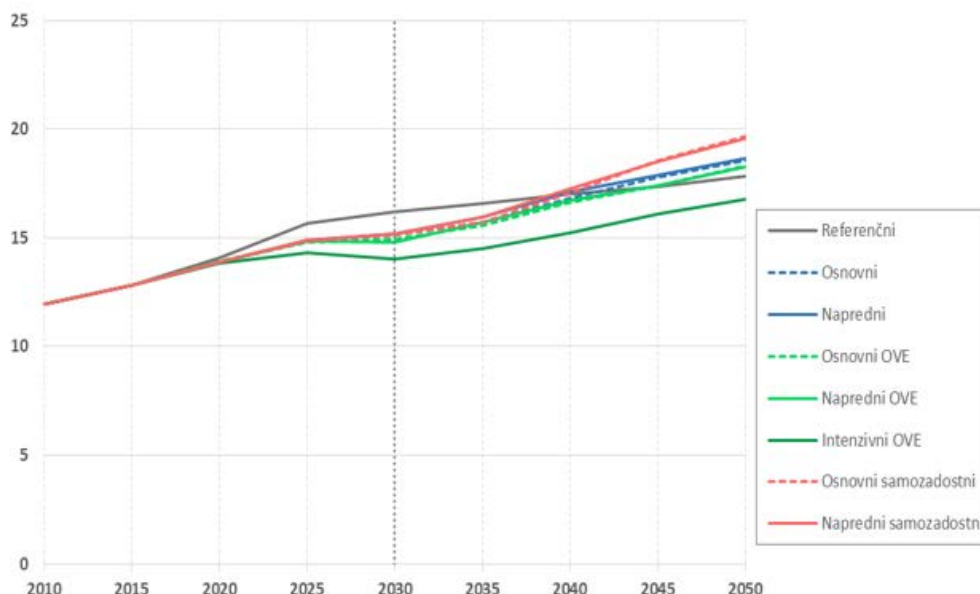
Potrebni vendar ne zadostni pogoj za t.i. dekarbonizacijo naše družbe je elektrifikacija prometa, saj se praviloma vsi obnovljivi viri energije pretvorijo v elektriko. Glavni izziv je seveda poiskati dovolj obnovljivih virov za varno, zanesljivo in ceneno zadovoljevanje rastočih potreb po energiji. Vendar bo tudi prenos in distribucija energije do vseh porabnikov predstavljala podvig, na katerega se je treba ustrezno pripraviti.

Proizvodnja električnih vozil (EV) je v porastu, številne blagovne znamke osebnih vozil vsako leto predstavijo vse več novih modelov. V Sloveniji se prodaja električnih vozil vsako leto podvoji. Njihov delež med novo prodanimi vozili sicer še ni tako velik, v prihodnje pa se bo znatno povečal. Realno lahko torej pričakujemo vsesplošno elektrifikacijo osebnih vozil. K trenutni večji prodaji električnih vozil vsekakor prispeva tudi možnost brezplačnega polnjenja na javnih polnilnicah ter nizka cena električne energije pri domačem polnjenju. Enako pa velja tudi za državne finančne spodbude.



Sl.1: Rast porabe električne energije na polnilnicah 'Gremo na elektriko'

Elektrifikacija prometa bo po predvidevanjih v naslednjih 30 letih povečala celotno porabo električne energije v Sloveniji za cca 4 TWh letno, kar je 25% današnje celotne porabe. Sicer pa nacionalni načrti segajo še višje in predvidevajo kar cca 7 TWh celotnega povečanja porabe električne energije v tem obdobju.



Sl.2: Predviden porast porabe električne energije v Sloveniji (vir NEP)

Vse to bo zahtevalo ustrezne ukrepe in razvoj distribucijskega omrežja.

2. PRIHODNOST JE ZAČRTANA

Slovenija mora slediti sprejeti Direktivi 2014/94/EU Evropskega parlamenta o vzpostavitvi infrastrukture za alternativna goriva ter zavez Evropske unije glede zniževanja toplogrednih plinov. Za prenos te Direktive v slovenski pravni red je Vlada Republike Slovenije sprejela Strategijo za alternativna goriva [1] v prometnem sektorju v Republiki Sloveniji. Po optimalnem scenariju bi moral do leta 2030 znašati delež vseh prvič registriranih baterijskih električnih osebnih vozil 33 %.

Pri uresničevanju te strategije pa je ključen razmislek o zagotavljanju in razvoju infrastrukture za polnjenje teh vozil. Za izvajanje 314. člena Energetskega zakona je Vlada Republike Slovenije izdala Uredbo o vzpostavitvi infrastrukture za alternativna goriva v prometu. Za razvoj polnilnih mest za preskrbo prometa z električno energijo so po tej uredbi in skladno z 78. členom Energetskega zakona zadolženi distribucijski operaterji električne energije. To v praksi pomeni, da so operaterji na avtocestnem križu zgradili ultra hitre polnilnice, namenjene predvsem spodbujanju tranzitnega prometa, polnjenje na njih pa je plačljivo.

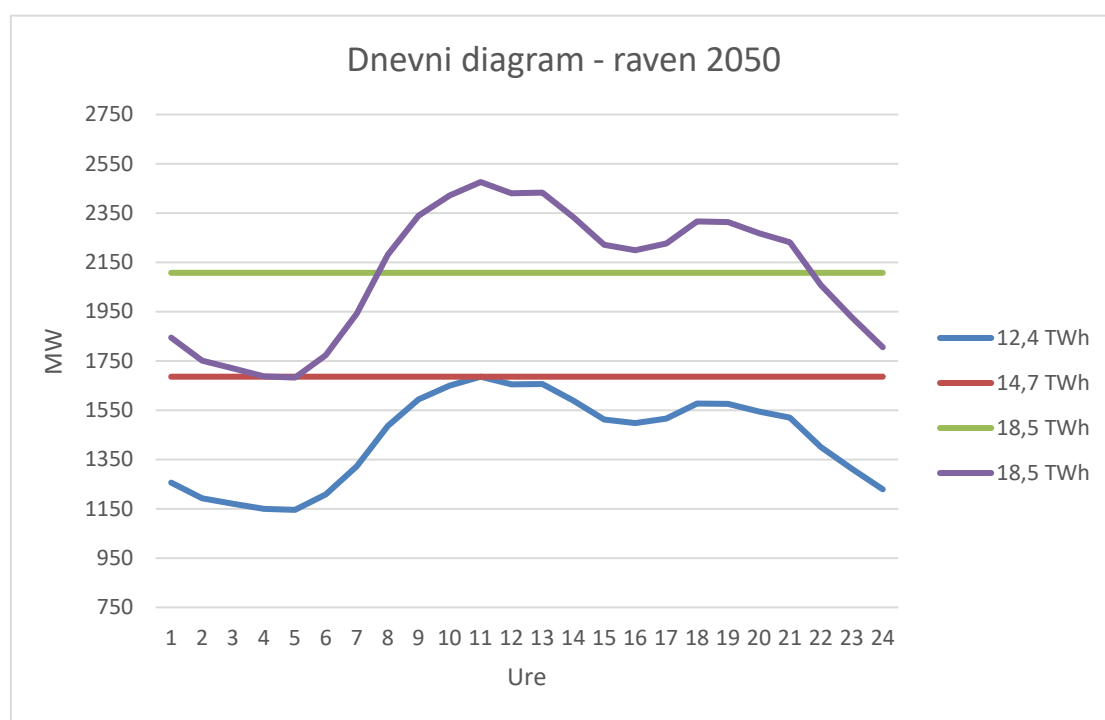
Nekoliko drugače pa je s polnilnicami v mestih. Lastniki EV bodo vozila zagotovo morali polniti tudi v urbanih središčih in tudi za to infrastrukturo bo treba poskrbeti. Države EU so jo v določeni meri dolžne zagotoviti, Slovenija bi tako morala do leta 2050 postaviti 22.000 javnih polnilnic.

Po strategiji razvoja e-mobilnosti v Mestni občini Ljubljana na primer naj bi imela parkirišča z:

- od 10 do 20 parkirnimi mesti najmanj eno parkirno mesto z možnostjo polnjenja električnih vozil,
- od 21 do 30 parkirnimi mesti najmanj dve parkirni mesti z možnostjo polnjenja električnih vozil,
- več kot 30 parkirnimi mesti najmanj 10 % parkirnih mest z možnostjo polnjenja električnih vozil.

Poseben izziv pa je dolžnost mest in hkrati interes investorjev v nepremičnine za postavitev polnilnih postaj na parkiriščih večstanovanjskih zgradb. Tam je lastnikov več, polnjenje pa bi potekalo iz skupnega priključka, kar pomeni zaračunavanje iz skupne rabe. Pri tem naletimo na zakonodajne ovire, medtem ko postavitev javnih polnilnic na zasebnih parkiriščih zakonsko ni sporno.

Za vse to bo treba nedvomno bistveno ojačati in razširiti distribucijsko omrežje, saj se poleg e-mobilnosti uveljavlja tudi ogrevanje na elektriko (toplotne črpalke) in vse večja elektrifikacija industrije..



Sl.3: Ocenjen potreben dvig zmogljivosti omrežja v Sloveniji (vir ELES in lasten izračun)

3. RAZVOJ DISTRIBUCIJSKEGA OMREŽJA

3.1 Groba ocena stroškov

Na primeru Elektro Ljubljana lahko naredimo kratko analizo. Sredstva podjetja vezana neposredno na dejavnost so knjigovodsko vredna okrog 420 Mio EUR. Znatno del sredstev je že amortiziran, saj mnogi vodi in transformatorji presegajo življenjsko dobo in so stari tudi po 60 let. Zato nova vrednost opreme zanesljivo presega 1.000 Mio EUR in lahko računamo s to številko. Če bi upoštevali povprečno življenjsko dobo opreme, ki jo vgrajujemo v omrežje 30 let, bi morali samo za sprotno nadomeščanje le te letno investirati 33 Mio EUR.

Zavedati pa se moramo, da je sodobna oprema konstrukcijsko mnogo bolj optimirana in manj predimenzionirana in ne moremo pričakovati, da bo zdržala 40, 50 ali celo 60 let. Naprej se vgrajuje vedno več opreme s sodobno elektroniko, ki mnogo hitreje zastari in ima tudi formalno krajšo življenjsko dobo. Zato je v prihodnje pričakovati dvig potrebnih investicij že za vzdrževanje obstoječega obsega in kapacitete omrežja. Zelo približna ocena za to se suče med 10 in 15%

Ob tem pa je treba v naslednjih 30 letih zaradi prestrukturiranja energetike in usmeritve v intenzivnejšo elektrifikacijo prometa, ogrevanja in industrije računati še s prek 40% povečanja zmogljivosti/obsega omrežja (Slika 3), kar bi pomenilo dodatnih 30% investicij letno. Torej bi bilo treba skupaj v naslednjih 30 letih v našem podjetju dodatno investirati 13-16 Mio EUR letno oziroma skupaj blizu 50 Mio EUR letno.

Investicije v letu 2018 so dosegale 32,7 Mio EUR, kar je po izračunih komaj dovolj za vzdrževanje obstoječega stanja in bi torej za naprej potrebovali povečanje za cca 17 Mio EUR.

Če ugotovitev apliciramo na celotno distribucijo v Sloveniji, katere Elektro Ljubljana predstavlja 30%, pomeni to letno dodatnih prek 50 Mio EUR. V 30 letih torej cca 1.500 Mio EUR. Glede na trenutno stanje menimo, da lastnik teh sredstev ne bo zagotovil. Torej je treba iskati alternativne vire.

3.2 Vir financiranja

Povečanje omrežnine povzroči višje stroške gospodarstvu in to takoj vpliva na znižanje mednarodne konkurenčnosti, kar ni sprejemljivo. Dodatno zadolževanje pri trenutnem nivoju omrežnine pomeni nevarnost likvidnostnih težav distribucije in s tem ogrožanje varnosti preskrbe. Državni proračun pa je že zdaj obremenjen z bolj prioritetskimi zadevami, kot je na primer problematika starajočega se prebivalstva ali razvoj znanosti in sledenje tehnološkemu razvoju.

Če želimo doseči državne načrte predstavljene v osnutku Nacionalnega Energetskega Koncepta o elektrifikaciji prometa bomo v naslednjih 30 letih kupili vsaj cca 1.000.000 električnih vozil. Zdaj že same subvencije za baterijska osebna vozila znašajo do 7.500 EUR, ob tem pa se ponujajo še ugodni krediti, popusti pri dajatvah in podobno. V prihodnosti seveda pričakujemo manjše vzpodbude, povsem brez njih pa najbrž ne bo šlo. Če upoštevamo, da bodo

ukrepi vzpodbud v povprečju le eno tretjino subvencije, to še vedno pomeni vsaj 2.500 EUR in pri milijonu vozil 2.500 Mio EUR.

Vrednost, ki znatno presega potrebe po investicijah v omrežje.

3.3 Način izvajanja vzpodbud za elektrifikacijo prometa

Z subvencijo nakupa električnega vozila njegovemu lastniku/uporabniku znižamo celotne stroške posesti takšnega vozila (Total Cost of Ownership). Težava takšnega načina vzpodbujanja elektrifikacije prometa z vidika narodnega gospodarstva je, da se vložen denar takoj, še preden se poznajo učinki takšnega nakupa, prelije v tujino proizvajalcu vozila.

Zato predlagamo, da se elektrifikacijo prometa vzpodbuja skozi izgradnjo infrastrukture, torej samega distribucijskega omrežja, polnilne infrastrukture za vozila in objektov za izkoriščanje obnovljivih virov energije skozi nakupe 'zelene' energije.

Kljub temu, da imamo razmerje med električnimi vozili in javno dostopnimi polnilnicami v Sloveniji relativno ugodno, število javnih polnilnic še vedno močno zaostaja za nacionalnimi plani podanimi v strategiji za alternativna goriva, saj področje očitno ni zanimivo za investitorje.

V nadaljevanju podajamo primerjavo našega predloga glede na sedanjo prakso. Povedati je treba, da mnoge države dejansko že vzpodbujajo elektrifikacijo prometa na predlagan način.

Tabela 1: Primerjava

Sedanja praksa	Predlagan koncept
Denar subvencij gre proizvajalcu električnega vozila v tujini.	Denar subvencij gre za izgradnjo infrastrukture doma.
Le zelo majhen delež delov v vozilu je od SLO dobaviteljev.	Velik delež opreme in storitev za izgradnjo omrežja izvira iz Slovenije.
Naši dobavitelji morajo tekmovati na prostem trgu ne glede na subvencije, ki jih za ta vozila plačamo.	Proizvajalci vozil morajo tekmovati na prostem trgu vozil z drugimi pogoni.
Plačilo je takojšnje.	Subvencije se investirajo v daljšem časovnem obdobju.
Ko je vozilo po 3-6 letih iztrošeno, je učinek vloženih subvencij zaključen.	Infrastruktura ima dolgo življenjsko dobo, tudi več kot 30 let.
Subvencioniramo le lastništvo električnega vozila.	Subvencioniramo dejansko uporabo električnega vozila (zmanjšanje emisij).

4. JAVNA INFRASTRUKTURA

Pri tolmačenju zimskega paketa energetske zakonodaje EU se pogosto srečamo s trditvijo, da javna polnilna infrastruktura za električna vozila v lasti in/ali upravljanju distribucijskih podjetij predstavlja omejevanje trga. Pa vendar poteka celoten prosti trg električne energije in mnogih sistemskih storitev prav prek infrastrukture v lasti distribucije. Še več, distribucijska podjetja s svojo infrastrukturo in nadzorom regulatorja so celo garant dejansko prostega trga brez omejitev vsiljenih s strani akterjev na trgu. Dejansko se ne omogoča gradnje transformatorskih postaj komurkoli, pa to še vedno ne omejuje trga.

Analogijo vidimo tudi s polnilno infrastrukturo. Ker gre pri tem področju za zelo pomembno področje, kamor namerava država investirati precej sredstev, smo celo mnenja, da je nujno potrebno, da obdrži kontrolo nad področjem, saj lahko anomalije na trgu povzročijo zastoj v razvoju področja ali pa veliko narodno gospodarsko škodo. Zaenkrat namreč cene na t.i prostem trgu na zahodu EU dosegajo vrednosti, ki so za naše razmere nedopustne, saj je vožnja na elektriko, če se polni na javnih polnilnicah, višja, kot pri vožnji na fosilna goriva.

Zdi se nam pomembno, da je vstop na trg polnjenja električnih vozil omogočen kar se da veliko ponudnikom, tudi majhnim z morda le eno polnilnico. Mnogo ponudnikov je namreč garancija za konkurenco in nizke cene. Posamezni ponudnik pa ne more oziroma je to negospodarno vzpostavljati celoten sistem nadzora, zaračunavanja in povezovanja z drugimi sistemi ter mednarodnega gostovanja. Zato je prav, da v državi obstaja ponudnik, ki omogoča te storitve za majhne ponudnike storitev polnjenja električnih vozil. Glede na to, da so drugi ponudniki v principu konkurenca, je nemogoče pričakovati, da bodo to funkcijo opravili. Ponudnik, ki pa je regulirano državno podjetje pa je lahko k temu zavezan, hkrati pa je tudi njegova cena za te storitve lahko regulirana in tako ne more delovati kot konkurenca.

Zato smo prepričani, da mora opazen del polnilne infrastrukture za električna vozila ostati vsaj v dobi razvoja področja v državni kontroli, in distribucijska podjetja so po našem mnenju idealna za to nalogo.

5. ZAKLJUČEK

Prestrukturiranje energetike s poudarkom na elektroenergetiki temelječi na obnovljivih virih je na nivoju države sprejeto dejstvo. Gre za izjemo obsežno in za državo ter razvoj njenega gospodarstva življenjsko pomembno področje, ki lahko ob neustrezni izvedbi pomeni ekonomsko katastrofo za državo in nacijo. Eden ključnih dejavnikov tega prestrukturiranja je tudi elektrifikacija prometa. Za njo je potrebno:

- Zagotoviti intenziven razvoj obnovljivih virov v državi
- Ustrezno povečati zmogljivosti in gostoto distribucijskega omrežja za cca 40 % v naslednjih 30 letih
- Zagotoviti sredstva za razvoj distribucijskega omrežja

- Vzpodbujati razvoj elektrifikacije prometa z izgradnjo ustrezne infrastrukture ter to prenesti na uporabnike električnih vozil z nižjimi cenami za uporabo polnilnic in energijo
- V okviru regulirane dejavnosti distribucije zagotoviti ustrezno kontrolo trga polnjenja vozil z zadostno količino polnilne infrastrukture v njihovi lasti
- V okviru regulirane dejavnosti distribucije zagotoviti tudi ustrezno informacijsko podporo za majhne lastnike polnilne infrastrukture, da se lahko enakovredno vključijo v trg polnjenja električnih vozil.

6. VIRI, LITERATURA

- [1] Vlada republike Slovenije, "Strategija na področju razvoja trga za vzpostavitev ustrezne infrastrukture zvezi z alternativnimi gorivi v prometnem sektorju v Republiki Sloveniji" Oktober 2017
- [2] Ministrstvo za infrastrukturo, "Energetski koncept Slovenije," besedilo za javno obravnavo ob okoljskem poročilu, Ljubljana, Februar 2017
- [3] Republika Slovenija, "Energetski zakon – EZ-1", Uradni list RS, št. 17/14, Marec 2014
- [4] Elektro Ljubljana. "Letno poročilo 2017", www.elektro-ljubljana.si, April 2017

NASLOV AVTORJEV

Uršula Krisper univ. dipl. inž. el.

Dr. Jurij Curk univ. dipl. inž. el.

Elektro Ljubljana d.d.

Slovenska 56, 1000 Ljubljana, Slovenija

Tel: + 386 1 230 40 20

Elektronska pošta: jurij.curk@elektro-ljubljana.si

ANALIZA »PEDELEC-OV« IN ELEKTRIČNIH AVTOMOBILOV, KOT SESTAVNI DEL URBANIH TRANSPORTNIH SISTEMOV V IZBRANIH DRŽAVAH PODONAVSKE REGIJE

Iztok BRINOVAR, Gregor SRPČIČ, Katja HANŽIČ,
Miralem HADŽISELIMOVIĆ, Sebastijan SEME

POVZETEK

Članek govori o "pedelec-ih" in električnih avtomobilih v urbanih transportnih sistemih v izbranih državah Podonavske regije. Projekt eGUTS si prizadeva izkoristiti potencialne e-mobilnosti v osmih Podonavskih mestih, regijah in območjih izven njih. S tem namenom bo obstoječa mreža 22 partnerjev razvila inovativne standarde za mesta, ki podpirajo razvoj e-mobilnosti. V sklopu projekta se bodo na osnovi študij izvedljivosti pripravili lokalni akcijski načrti, razvila in testirala se bo pametna aplikacija, prav tako pa bodo izvedene različne pilotne aktivnosti na področju polnilnih postaj, najema e-vozil, prometne in parkirne politike. V omenjenem projektu je bilo narejenih 5 študij izvedljivosti na temo električne mobilnosti. Ena izmed študij je bila osredotočena na »pedelec-e« in električne avtomobile v urbanih transportnih sistemih devetih držav podonavske regije. V poglavju 2 so na kratko predstavljene zbrani podatki na temo e-mobilnosti (e-avtomobili in »pedelec-i«), ki so specifični za vsako izmed izbranih držav. V zaključku je predstavljena SWOT analiza, ki je skupna vsem državam in je bila narejena na podlagi izsledkov študije.

CURRENT STATE OF PEDELECS AND E-CARS IN SELECTED COUNTRIES OF THE DANUBE REGION

ABSTRACT

This paper deals with pedelecs and e-cars in urban transport systems in selected countries of the Danube region. Project eGUTS strives to exploit potentials of e-mobility in eight Danube cities, regions and beyond. To do so, the existing network of 22 partners will develop innovative eGUTS standards for cities supporting e-mobility, based on combined feasibility studies this project will elaborate and realize local action plans for deploying them, develop and test a smart tool, implement various pilot actions in the fields of road preference and parking policies, charging stations, rental spots, and more. Within the mentioned project 5 feasibility studies about electric mobility were developed. One feasibility study was focused on pedelecs and e-cars in urban transport systems in selected countries of the Danube region. Country specific information on e-mobility (pedelecs and e-cars) was gathered and is briefly presented in

chapter 2. In addition, a common SWOT analysis for all selected countries of the Danube region was made and is presented in the conclusion of the paper.

1. UVOD

Zgodovina razvoja električnih vozil (e-vozil) sega vse do 19. stoletja, medtem ko se je njihova uporaba in prva večja proizvodnja pojavila v Ameriki v začetku 20. stoletja. Skozi celotno zgodovino se električni avtomobili (e-avtomobili) soočajo s problematiko družbene sprejemljivosti in iz različnih razlogov niso uspeli pridobiti javne podpore, na trgu cestnega prometa pa še dandanes prevladujejo vozila z motorji z notranjim izgorevanjem. Z naprednejšim razumevanjem negativnih učinkov transportnega sektorja na okolje in njihovega vpliva na podnebne spremembe je elektrifikacija cestnega prometa ena izmed prednostnih nalog trajnostnega razvoja. Elektrifikacija cestnega prometa je eden izmed ukrepov za zmanjšanje emisij toplogrednih plinov, zmanjšanje onesnaženosti zraka in zmanjšanje odvisnosti od fosilnih goriv, [1].

V sklopu evropskega projekta eGUTS (Electric, Electronic and Green Urban Transport Systems) je bila izvedena študija izvedljivosti z osredotočenostjo predvsem na področje uvedbe pedelec-ov in e-avtomobilov. V okviru študije izvedljivosti so bile za sodelujoče države iz Podonavske regije zbrane specifične informacije s tega področja, pri čemer je vsaka država izdelala tudi SWOT analizo. Na osnovi pridobljenih informacij pa je bila v nadaljevanju izdelana tudi skupna SWOT analiza za vse izbrane države Podonavske regije, [2].

2. PREGLED TRENUTNEGA STANJA NA PODROČJU UVEDBE PEDELEC-OV IN E-AVTOMOBILOV

Avstrija – Avstrijska energetska strategija podpira spodbujanje novih pogonskih sistemov (kot je električna mobilnost (e-mobilnost)) z namenom zmanjšanja emisij v prometnem sektorju in doseganja učinkov politike zaposlovanja. V letu 2017 je bilo v Avstriji registriranih 13350 e-avtomobilov. Najpogosteje uporabljeno vozilo z električnim motorjem v Avstriji je še vedno električno kolo, v večini primerov kar pedelec. V letu 2014 je bilo v Avstriji prodanih približno 50000 pedelec-ov, kar predstavlja 12,5% delež od skupno 400000 prodanih koles, [2, 4].

Hrvaška – Glede na Evropsko lestvico na področju uvajanja e-vozil se Hrvaška nahaja na spodnjem delu lestvice. Razlog za to je možno pripisati nižji kupni moči prebivalstva, nezadostni polnilni infrastrukturi za e-vozila ter na splošno majhnemu obsegu trga. E-vozila tako predstavljajo zelo majhen delež celotnega števila vozil na Hrvaškem. V letu 2017 je bilo na Hrvaškem registriranih le 87 e-avtomobilov, [2, 3, 4].

Češka – Glede uporabe pedelec-ov na Češkem ni uradnih niti neuradnih prodajnih statistik. Raziskave se običajno izvajajo na osnovi povpraševanj oziroma na osnovi strokovnih ocen vseh deležnikov. V letu 2016 je bila predvidena prodaja pedelec-ov ocenjena na približno 40000. V nasprotju s kolesi so statistični podatki za osebna vozila zelo podrobni. Pri čemer število prodanih baterijskih električnih vozil (BEV) od leta 2009 narašča. Izjemi sta bili leti 2013 in

2016, ko se je prodaja BEV zmanjšala. V letu 2017 je bilo na Češkem registriranih 1145 e-avtomobilov, [2, 4].

Madžarska – Na žalost je uporaba e-vozil na Madžarskem še vedno v zaostanku v primerjavi z bolj razvitimi državami. Na voljo imajo številne modele e-koles, kar nekaj tipov pedelec-ov pa je proizvedenih prav na Madžarskem, predvsem z namenom njihovega izvoza na tuje trge. Pri tem je samo 600-800 pedelec-ov prodanih na domačem trgu, kar pa je posledica trenutno visokih cen takšnih vrst koles. Podobna situacija je tudi na področju uporabe e-avtomobilov. V letu 2017 je bilo na Madžarskem registriranih 1145 e-avtomobilov, [2, 4].

Črna gora – V Črni gori ni razvoja niti proizvodnih enot na področju e-vozil, ki za svoje delovanje uporabljajo izključno baterije kot vir energije. V uporabi je le nekaj hibridnih e-vozil za potrebe taksi služb in nudenja storitev prevoza potnikov. Poleg tega pa je v uporabi tudi nekaj e-vozil za prevoz turistov na obalnem območju Črne gore, [2].

Romunija – Romunski trg z električnimi kolesi (e-kolesi) je trenutno še vedno v fazi razvoja. V letu 2016 je bilo prodanih približno 2000 e-koles, kar uvršča Romunijo, po podatkih Evropske kolesarske konfederacije, zelo visoko na ravni Evropske unije. Leta 2017 se je prodaja e-avtomobilov v Romuniji povečala za 24% v prvih sedmih mesecih, kljub temu pa Romunija na tem področju še vedno zastoja za ostalimi evropskimi državami. V letu 2017 je bilo v Romuniji registriranih 335 e-avtomobilov, [2, 4].

Srbija – V Srbiji je registriranih le okoli 30 e-avtomobilov. Trenutno v Srbiji ni možno registrirati e-avtomobilov, registrira se jih lahko samo začasno. Na srbskem trgu je kar velika ponudba pedelec-ov proizvedenih na območju Evropske unije in Kitajske, vendar je njihova prodaja zelo omejena.

Slovaška – E-mobilnost pridobiva na Slovaškem izredno večji pomen. Kljub relativnemu nizkemu številu registriranih e-avtomobilov je prišlo v letih 2011-2015 do njihovega porasta, kar kaže na napredek v razvoja v smislu globalnega trenda. V letu 2017 je bilo na Slovaškem registriranih 439 e-avtomobilov, [2, 4].

Slovenija – V Sloveniji so e-avtomobili še vedno v manjšini v primerjavi z konvencionalnimi avtomobili. Glede na statistične podatke je v Sloveniji registriranih 706 e-avtomobilov, prav tako je na slovenskih cestah vedno večje število e-koles. Veliko pa je tudi podjetij, ki se ukvarjajo z najemom e-koles. Večina slovenskih prodajalcev običajnih koles ima v svoji ponudbi tudi možnost nakupa e-koles.

3. ZAKLJUČEK – SWOT ANALIZA

Kot je bilo že omenjeno je vsaka izmed sodelujočih držav izvedla SWOT analizo na področju uvedbe e-avtomobilov in pedelec-ov, pri čemer so bile izpostavljene ključne prednosti, slabosti, priložnosti in nevarnosti. Na osnovi pridobljenih informacij pa je bila v nadaljevanju izdelana tudi skupna SWOT analiza za vse izbrane države Podonavske regije, ki je predstavljena v preglednici I. Na osnovi študije izvedljivosti ter SWOT analize so bile med drugim identificirane tudi ključne ovire na področju uvedbe e-avtomobilov in pedelec-ov.

Preglednica I: SWOT analiza na področju uvedbe e-avtomobilov in pedelec-ov [2].

Prednosti	Slabosti
- E-avtomobili imajo, v primerjavi s konvencionalnimi vozili, višji izkoristek. - Uporaba e-avtomobilov vodi k zmanjšanju odvisnosti od fosilnih goriv in znižanju emisij toplogrednih plinov. - E-avtomobili zmanjšujejo obremenjenost okolja s hrupom. - Razpoložljivost električne energije in relativno ugodna cena le-te v primerjavi s konvencionalnimi gorivi (nižji stroški energije na km). - Električne motorje odlikuje enostavna konstrukcija in s tem tudi enostavnejše vzdrževanje, kar ima za posledico nižje stroške obratovanja/vzdrževanja. - Pedelec-i omogočajo, v primerjavi s konvencionalnimi kolesi, daljšo vožnjo z enako stopnjo napora, lažje premagovanje ovir, prevoz težjega blaga in so ena izmed možnosti za reševanje problemov z zastoji v mestnih središčih.	- Visoki investicijski stroški. - Nezadostna geografska pokritost polnilne infrastrukture za e-vozila. - Majhno udobje uporabnikov z vidika pogoste potrebe po polnjenju. - Neusklajenost standardov in normativov. - Visoki stroški najema oz. nakupa novih baterij. - Nesprejemljivost različnih kartic za dostop na polnilnih postajah (problematika glede storitev gostovanja za polnjenje e-vozil). - Okolju neprijazna proizvodnja baterij. - E-avtomobili ne rešujejo problematike na področju zastojev v mestnih središčih za razliko od e-koles (pedelec-ov). - Nezadostna geografska pokritost servisnih storitev za e-vozila. - Odvisnost uporabe pedelec-ov od vremenskih razmer.
Priložnosti	Nevarnosti
- Močan interes Evropske unije na področju e-mobilnosti. - Velik interes avtomobilskih podjetij za razvoj in serijsko proizvodnjo lastnih e-vozil. - Oblikovanje novih inovativnih poslovnih modelov in storitev (izposoja e-vozil/baterij, koncept skupne uporabe e-vozil (ang. "car-sharing), ipd.). - Uporaba e-vozil v pametnih omrežjih. - Obstoj raznih spodbud in finančnih mehanizmov na področju e-mobilnosti. - Možnost koriščenja lokalno proizvedene električne energije predvsem iz obnovljivih virov energije. - Omejevanje uporabe konvencionalnih vozil v mestnih območjih (npr. uvedba con z nizkimi emisijami v mestnih središčih).	- Nizka kupna moč prebivalstva in podjetij. - Prekomerna potreba po električni energiji in nezmožnost zagotavljanja zadostne količine električne energije iz obnovljivih virov. - Upad cen naftnih derivatov oz. zviševanje cen električne energije. - Nezadostno razvita kolesarska infrastruktura v nekaterih državah/regijah/mestih. Nerazvita kolesarska kultura ter nespoštovanje kolesarjev s strani uporabnikov motornih vozil. - Problematika kompatibilnosti polnilnih postaj (uporaba različnih vtičev in vtičnic za polnjenje e-vozil).

4. ACKNOWLEDGMENTS

The research was carried out within the eGUTS project co-financed by the European Regional Development Fund under Interreg DANUBE programme 2014-2020.



5. VIRI, LITERATURA

- [1] Department of energy, (2015). The history of the electric car. Available at: <https://www.energy.gov/articles/history-electric-car>
- [2] eGUTS project, (2017). D4.2.2 "Pedelecs vs e-cars in urban transport systems".
- [3] Smart City Wien. Stadtentwicklung Wien, (2016). E-mobilitätsstrategie. Available at: <https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/studien/pdf/b008435.pdf>
- [4] EAFO, (2018). Electric vehicle charging infrastructure. Available at: European Alternative Fuels Observatory: <http://www.eafo.eu/>



**Meritve
Preskušanja
Raziskave in razvoj**

v energetiki

ICEM-TC
Celovška cesta 1
2351 Kamnica

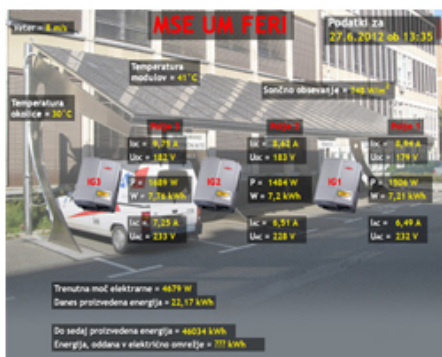
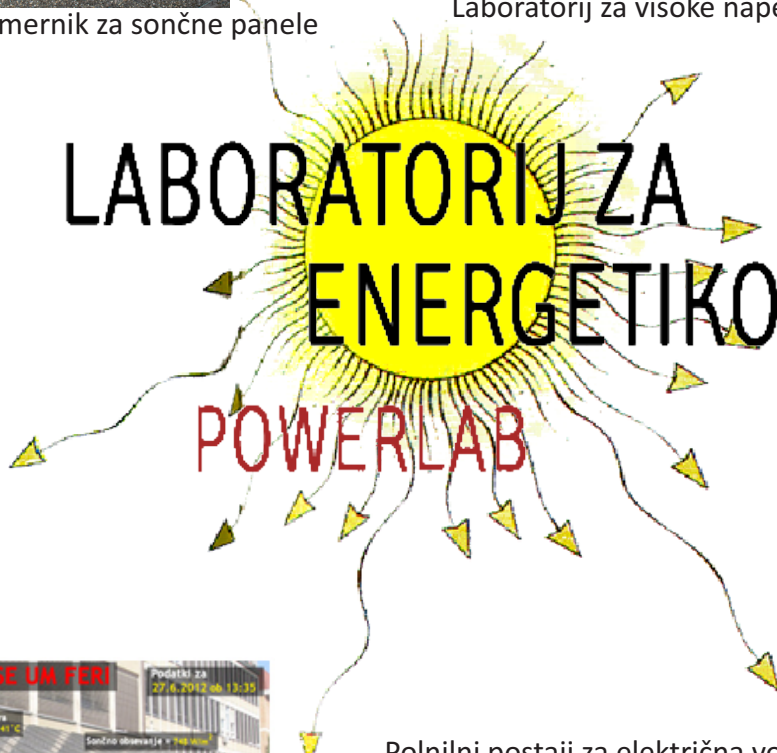
T: +386 2 234 23 80
F: +386 2 234 23 82
E: info@icem-tc.si
W: www.icem-tc.si



Projekt Mikro-razsmernik za sončne panele



Laboratorij za visoke napetosti in velike toke



Mikro sončna elektrarna UM FERi

Polnilni postaji za električna vozila UM FERi

