



Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Boško Milešević

**ELEKTROMAGNETSKI UTJECAJ SUSTAVA  
ELEKTRIČNE ŽELJEZNICE NA METALNE  
STRUKTURE**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2014.



Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Boško Milešević

**ELEKTROMAGNETSKI UTJECAJ SUSTAVA  
ELEKTRIČNE ŽELJEZNICE NA METALNE  
STRUKTURE**

DOKTORSKI RAD

Mentor: Prof. dr. sc. Ivo Uglešić

Zagreb, 2014.



University of Zagreb

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTING

Boško Milešević

# **ELECTROMAGNETIC INFLUENCE OF ELECTRIC RAILWAY SYSTEM ON METALLIC STRUCTURES**

DOCTORAL THESIS

Supervisor: Professor Ivo Uglešić, Ph.D.

Zagreb, 2014

Doktorski rad izrađen je na Sveučilištu u Zagrebu na Fakultetu elektrotehnike i računarstva, na Zavodu za visoki napon i energetiku.

Mentor: prof. dr. sc. Ivo Uglešić

Doktorski rad ima: 163 stranica

Doktorski rad br.: \_\_\_\_\_

## ***Životopis mentora***

**Ivo Uglešić** rođen je u Zagrebu 1952. godine. Diplomirao je, magistrirao i doktorirao u polju elektrotehnike na Elektrotehničkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, 1976, 1981. odnosno 1988. godine. Od 1977. godine radi na Zavodu za visoki napon i energetiku ETF-a. Usavršavao se u Njemačkoj, na Sveučilištu Stuttgart - *Institut fuer Energieuebertragung und Hochspannungstechnik* i u Austriji na Tehničkom Sveučilištu Graz - *Institut fuer Hochspannungstechnik*. Godine 1989. izabran je u zvanje docenta, 1997. izvanrednog a 2002. redovitog profesora.

Od 2007 do 2013 bio je voditelj znanstvenog projekta „Udovoljavanje zahtjeva zaštite okoliša u visokonaponskom sustavu“, a trenutačno je voditelj istraživačkog projekta Hrvatske zaklade za znanost „*Development of advanced high voltage systems by application of new information and communication technologies*“. Autor je više od 120 znanstvenih radova u časopisima, na međunarodnim i domaćim konferencijama, te voditelj preko 50 studija i tehničkih rješenja izrađenih za potrebe elektroprivreda, električnih željeznica i industrije.

Prof. Uglešić hrvatski je predstavnik u studijskom komitetu međunarodne pariške Cigré C4 *System Technical performance*. Za doprinose u radu komiteta dobio je priznanja *Distinguish Member* i *The Cigre Technical Committee Award* 2012. godine. Iste godine nagrađen je zlatnom plaketom "Josip Lončar" FER-a za značajno unapređenje nastave i znanstvenoistraživački rad u području elektroenergetike, a posebno za ustrojstvo međunarodno prihvaćenog visokonaponskog laboratorija. Član je tehničkog komiteta međunarodne konferencije *International Conference on Power Systems Transients (IPST)*; u kojem je bio ko-predsjedatelj konferencije u Vancouveru (Kanada) 2013, te je izabran za predsjedatelja iste konferencije 2015 u Cavtatu. Recenzent je i gost urednik specijalnog izdanja časopisa *Electric Power System Research*, te recenzent časopisa *IEEE Transactions on Power Delivery*.

## ***Supervisor curriculum vitae***

**Ivo Uglešić** was born in Zagreb in 1952. He received his graduate's, master's and doctorate's degrees in the field of Electrical Engineering at the University of Zagreb, in 1976, 1981 and 1988, respectively. Since 1977 he has worked at the Department of Power Systems at Faculty of Electrical Engineering. He continued his studies in Germany at the University of Stuttgart - *Institut fuer Energieuebertragung und Hochspannungstechnik* and in Austria at the Technical University Graz - *Institut fuer Hochspannungstechnik*. In 1989 he was appointed assistant professor, associate professor in 1997 and in 2002 full professor.

From 2007 to 2013 he was head of the research project "Compliance with the requirements of environmental protection in the high-voltage system", and is currently the leader of the research project of the Croatian Science Foundation "Development of advanced high voltage systems by application of new information and communication technologies". He has written over 120 scientific papers in journals and at international and national conferences, and was the project leader of more than 50 studies and technical solutions made for the needs of power utilities, electric railways and industry.

Prof. Uglešić a Croatian representative in the International Study Committee C4 - System Technical performance of Cigré in Paris. For the contribution to the work of the committee he received two awards in 2012: Distinguish Member and the CIGRE Technical Committee Award. In the same year was awarded with the gold plaque "Josip Loncar" of Faculty of Electrical Engineering and Computing for his significant improvement of teaching and scientific research work in the field of electrical engineering, and in particular for the organization of internationally accepted high voltage laboratory. He is a member of the technical committee of the International Conference International Conference on Power Systems Transients; in which he was co- chairman in Vancouver (Canada) in 2013, and was elected to the Chair of the same conference in 2015 in Cavtat. He is the reviewer and the guest editor of a special edition of the journal Electric Power System Research, and reviewer of the journal IEEE Transactions on Power Delivery.

Slavite Gospoda jer je dobar  
Jer je do vijeka milost njegova

Hvala mentoru prof. dr. sc. Ivi Mglušiću  
na patnji, savjetima i vodstvu

Hvala kolegama iz grupe visokog naponskog, Viktoru Milardiću  
Božidaru Filipoviću-Groću, Bojani Francu i Miroslavu Šturlonu  
i svima koji su mi pomogli u istraživanjima

Blagodarim roditeljima, cijeloj rodbini i prijateljima  
na podršci i razumijevanju

## SAŽETAK

U radu je istražen elektromagnetski utjecaj sustava električne željeznice na metalne strukture s naglaskom na željeznički sustav kao izvor utjecaja. Opisan je ustroj sustava napajanja električne željeznice i načini prenošenja poremećaja na osjetljive sustave s posebnim naglaskom na magnetsku spregu.

Predložena je metodologija točnijeg određivanja elektromagnetskih utjecaja elektrovočne mreže i postrojenja na metalne strukture. Uvažene su karakteristike različitih konfiguracija sustava napajanja i međusobnog odnosa izvora smetnje i osjetljivih elemenata na kojima se promatrao iznos utjecaja.

Identificirani su parametri o kojima ovise elektromagnetski utjecaji poput različitih pogona elektrovočnog sustava, izvedaba kontaktne mreže, povratnog puta struje, svojstava tla i izvedaba osjetljive strukture. Pojedinačno je utvrđen značaj svakog od parametra te doneseni zaključci o mjerama kojima se postiže smanjenje utjecaja. Razvijen je model za proračun induciranih napona za karakteristične konfiguracije elektrificirane željeznice te su rezultati proračuna verificirani. Model je verificiran temeljem obavljenih mjerenja induciranih napona te je ustanovljeno dobro podudaranje izračunatih i izmjerenih vrijednosti.

Inducirani napon kvalitativno je analiziran za različita elektrovočna vozila ovisno o struji napajanja i struji rekuperacije. Prikazan je model lokomotive s diodnim ispravljačem i istosmjernim motorom te elektromotornog vlaka s asinkronim motorom. Uz različite modele sprege određen je oblik induciranih napona za ove tipove vučnih vozila. Uspoređeni su rezultati proračuna modelom i mjerenja struje napajanja u elektrovočnim podstanicama.

Radom je opisan cjelovit pristup problematici određivanja elektromagnetskih utjecaja sustava električne vuče na metalne strukture, razvijen i provjeren model određivanja tih utjecaja te predložene mjere za smanjenje utjecaja.

### **Ključne riječi:**

elektromagnetska kompatibilnost, električna željeznica, elektromagnetski utjecaj, proračun induciranih napona, modeliranje, verifikacija, kvantitativna analiza.



# **ELECTROMAGNETIC INFLUENCE OF ELECTRIC RAILWAY SYSTEM ON METALLIC STRUCTURES**

The dissertation is the result of research in the field of electromagnetic compatibility. The influence of AC electric railway system to the metallic structures is studied.

Common operation of the electric railway system and the sensitive metallic structures as a telecommunication lines and pipelines in the narrow corridors represents a potential risk to their safe and reliable operation. Electromagnetic effects of the electric railways are primarily manifested as an inductive coupling due to electric current flow through contact line. In accordance with the conditions of the electric railway system operation, power supply system causes the induction on the metallic structures in the common corridor. The induced voltage is directly proportional to the supply current value, but also depends on a numerous of other technical and geographical parameters. The aim of the thesis is to identify and quantify the variable parameters which affects to the value of the inductive coupling, and consequently the value of the induced voltage on sensitive structures. Geographic parameters are related to soil properties and environmental conditions and it is necessary to be thoroughly familiar with them. Technical parameters describe the construction of the railway power system, as well as additional elements which ensure the reduction of electromagnetic influences. In the doctoral thesis electric railway system is expounded on the components. The model of railway system includes the models of different elements whose parameters have an impact on the value of electromagnetic interference. Parametric analyses of certain technical parameters to the influence and induced voltage are performed. The value of the influence and operation conditions requested to ensure reliable and safe operation of a common interaction of electric railways and sensitive metal structures are determined and revised.

The dissertation consists of seven chapters. It begins with an introduction in which the problem of electromagnetic influences and motivation to research are clearly and transparently describes. The basic elements of the electric railway are briefly described. Assumptions for the development of the models are carried out and recent research are presented.

In the second chapter detailed structure of the electric railway system is presented. All elements for power supply in the electric railway system at the 25 kV, 50 Hz are

described. Geometric and electrical parameters of electric traction transformers, contact network, rails and return wire are given. Elements of electric traction vehicles and locomotives electric models with a diode rectifier and DC motor and with an induction motor are described in details. Current supply value and waveform for certain electric traction vehicle are determined and analysed.

The third chapter is devoted to the analysis of the modes of disturbance transmission to the sensitive metallic structures. The problematic of inductive coupling and theoretical description of the problem of protection from adverse influences are presented. The impact of the individual structure elements to inductive coupling is analysed. Technical systems commonly exposed to adverse influences of electric railway are described and modelled.

The fourth chapter is devoted to determining the electromagnetic influence. The procedure to determine the induced voltage is given. A model for determining the electromagnetic influence based on the theory of electrical circuits is developed and presented. The return current value in the rails and return wire for typical configuration is calculated depending on the variable parameters as a soil specific resistance, rail admittance and different parameters of return and protection wire. For each of the models the influence is determined and the effects of certain parameters to induced voltage are detected. The results of the calculation by the developed models is compared with values calculated using the applicable standards. It is concluded that the developed model provides a more complete view to the electromagnetic impact compared with standards in use.

Verification of the model is described in the fifth chapter. Two case studies of single track railway without a return conductor is presented. Based on the supply current measurements and induced voltage on telecommunication lines have been compared with the values obtained by model. It can be concluded that the calculation by model gives more accurate results. It is demonstrated that the electric railway is a dominant source of electromagnetic influences and the developed model describes modelled systems and the interface between them in a suitable manner.

Qualitative analysis of the measured results and calculations is made in the sixth chapter. Calculation results of induced voltage by the various models of transmission lines and sensitive metallic structures are compared. It can be concluded that the different

approaches of the induced voltage calculation are necessary depending on the type and the operation mode of electric traction vehicles. The harmonic analysis of the induced voltage is calculated. In addition, the effects of railway recovery current on the metal structure are analysed. The importance of the induced voltage calculation by real waveform of supply current is demonstrated regarding the different coupling of each harmonic.

The research summarization is given in the seventh chapter of the thesis with accent to the scientific contributions that are achieved.

**Key words:** electromagnetic compatibility, electric railway, electromagnetic influence, induced voltage calculation, modeling, verification, qualitative analysis.

# SADRŽAJ

<b>1</b>	<b>UVOD</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>ŽELJEZNIČKI ELEKTROTEHNIČKI SUSTAV</b>	<b>4</b>
<b>2.1</b>	<b>Elektrovučne podstanice</b>	<b>6</b>
<b>2.2</b>	<b>Kontaktna mreža</b>	<b>9</b>
2.2.1	Osnovni dijelovi i svojstva	9
2.2.2	Povrat energije u elektroenergetski sustav	13
2.2.3	Proračun impedancije kontaktne mreže	15
<b>2.3</b>	<b>Elektrovučna vozila</b>	<b>16</b>
2.3.1	Ispravljač	17
2.3.2	Istosmjerni međukrug	19
2.3.3	Izmjenjivač	19
2.3.4	Elektrovučna vozila s istosmjernim motorima	21
2.3.5	Elektrovučna vozila s asinkronim motorima	25
<b>3</b>	<b>PRENOŠENJE POREMEĆAJA I OSJETLJIVI SUSTAVI</b>	<b>31</b>
<b>3.1</b>	<b>Parametri induktivne sprege</b>	<b>34</b>
3.1.1	Međuinduktivitet	35
<b>3.2</b>	<b>Redukcijski faktori</b>	<b>37</b>
3.2.1	Definicija redukcijskog faktora	38
3.2.2	Uzemljeno zaštitno uže	39
3.2.3	Zaštitno uže uzemljeno na krajevima	45
<b>3.3</b>	<b>Osjetljivi sustavi u koridoru pruge</b>	<b>47</b>
3.3.1	Telekomunikacijski vodovi	47
3.3.2	Cjevovodi	50
<b>4</b>	<b>ODREĐIVANJE ELEKTROMAGNETSKIH UTJECAJA</b>	<b>55</b>
<b>4.1</b>	<b>Model za proračun</b>	<b>56</b>
4.1.1	Matrice impedancija	57
4.1.2	Određivanje odvoda tračnica i otpora uzemljivača stupova	58
4.1.3	Računalni model	61
4.1.4	Određivanje induciranog napona na podzemnom cjevovodu	81
<b>4.2</b>	<b>Zaključna razmatranja o određivanju elektromagnetskih utjecaja</b>	<b>84</b>
<b>5</b>	<b>VERIFIKACIJA MODELA ZA PRORAČUN UTJECAJA</b>	<b>86</b>
<b>5.1</b>	<b>Mjerenje struje napajanja</b>	<b>86</b>
<b>5.2</b>	<b>Mjerenje induciranog napona</b>	<b>88</b>
<b>5.3</b>	<b>Usporedba i provjera rezultata – primjer I</b>	<b>89</b>
<b>5.4</b>	<b>Usporedba i provjera rezultata – primjer II</b>	<b>96</b>
<b>5.5</b>	<b>Zaključak o verifikaciji modela za proračun utjecaja</b>	<b>102</b>

<b>6</b>	<b>KVALITATIVNA ANALIZA INDUCIRANOG NAPONA .....</b>	<b>105</b>
6.1	Određivanje oblika induciranog napona u ovisnosti o obliku struje smetnje.....	105
6.2	Određivanje oblika induciranog napona vučnog vozila s diodnim ispravljačem .....	110
6.3	Određivanje oblika induciranog napona vlaka na elektromotorni pogon .....	114
6.3.1	Inducirani napon uz struju napajanja elektromotornog vlaka .....	114
6.3.2	Inducirani napon uz struju rekuperacije elektromotornog vlaka.....	118
6.4	Zaključna razmatranja o kvalitetnoj analizi induciranog napona .....	121
<b>7</b>	<b>ZAKLJUČAK .....</b>	<b>123</b>
<b>8</b>	<b>LITERATURA .....</b>	<b>126</b>
	<b>POPIS OZNAKA I KRATICA.....</b>	<b>133</b>
	<b>PRILOG A .....</b>	<b>135</b>
	<b>ODREĐIVANJE IMPEDANCIJE KONTAKTNE MREŽE .....</b>	<b>135</b>
	<b>PRILOG B .....</b>	<b>141</b>
	<b>ODREĐIVANJE REDUKCIJSKOG FAKTORA USLIJED POVRATNE</b>	
	<b>STRUJE .....</b>	<b>141</b>
B1	Rubni učinci.....	141
B2	Određivanje redukcijskog faktora.....	146
	<b>ŽIVOTOPIS .....</b>	<b>147</b>
	<b>POPIS OBJAVLJENIH RADOVA.....</b>	<b>148</b>
	<b>CURRICULUM VITAE .....</b>	<b>150</b>

# 1 UVOD

Usklađenost rada tehničkih sustava te ispravan i siguran rad svih komponenata u njima temelj je njihove funkcionalnosti i učinkovitosti. Elektromagnetska kompatibilnost je svojstvo električnog uređaja da u danom elektromagnetskom okruženju zadovoljavajuće funkcionira i da pri tome ne izaziva nedopustive neželjene posljedice na drugim električnim uređajima [1]. Temeljita analiza elektromagnetske kompatibilnosti zahtjeva proučavanje ponašanja sustava koji su u interakciji te je potrebno dobro poznavanje sustava koji odašilje smetnje i sustava koji ih prima i na njih je osjetljiv. U ovom radu obrađuje se utjecaj sustava električne željeznice na osjetljive metalne strukture. [2] - [4]

Željeznički sustav zauzima značajan udio u raspodjeli transporta ljudi i roba. Elektrifikacija željezničkih pruga ima brojne pozitivne učinke na svojstva samog željezničkog sustava, ali i na okoliš [5]. Proširenjem mreže elektrificiranih pružnih pravaca i izgradnjom drugih transportnih sustava, posebice komunikacijskih, dovedena je u pitanje mogućnost zajedničkog rada različitih sustava u zajedničkim koridorima [6] - [10]. U koridorima elektrificirane željeznice susreću se telekomunikacijski vodovi, cjevovodi, signalizacijski i zaštitni uređaju cestovnog prometa kao i drugi tehnički sustavi. Kakav je međusobni utjecaj ovih sustava može se odgovoriti samo s detaljnim proučavanjem komponenata sustava, njihovog smještaja u prostoru i svojstava okoline [11]. Utjecaji se mogu podijeliti na dio koji izaziva posljedice u radu tehničkih sustava poput smanjenja učinkovitosti prijenosa ili povećanja rizika te na dio koji izaziva ugrozu ljudi [12].

U ovom radu istražit će se utjecaj pogona električne željeznice na metalne strukture za različite uvjete pogona i različita elektrovučna vozila u sustavu električne vuče koji se napaja iz elektroenergetskog sustava na naponskoj razini 25 kV, 50 Hz.

Ustroj željezničkog sustava prilagođen je u potpunosti funkciji učinkovitog pogona elektrovučnih vozila [13]. Vozila se kreću po tračnicama crpeći energiju iz kontaktnog voda [14], [15]. U elektrovučnim podstanicama ostvaruje se kontakt između elektroenergetskog sustava i elektrovučnog sustava preko energetske transformatora [16]. Kako se moraju zadovoljiti i brojni mehanički uvjeti kako bi prometovanje bilo sigurno, uz kontaktni vodič u sustavu 25 kV, 50 Hz postavlja se i nosivo uže te vješaljke koje povezuje kontaktni vodič i nosivo uže. Dio željezničkog sustava koji služi za prijenos električne energije od elektrovučne podstanice do elektrovučnog vozila naziva se vozni vod [17]. Povratni put struji napajanja

predstavljaju tračnice i zemlja [18]. U radu su prezentirani različiti ustroji elektrificirane željeznice te su određene razine struje smetnje za pojedine konfiguracije od interesa.

Osjetljivi sustavi u koridorima elektrificirane željeznice su najčešće telekomunikacijski vodovi i cjevovodi kao i druge metalne strukture koje svojim položajem mogu doći pod napon uslijed protjecanja struje voznim vodom i međuumpedancije [19]. Ovisnost induciranog napona o položaju osjetljive metalne strukture, svojstvima tla i ustroja željezničkog sustava određena je modelima razvijenima u računalnom programu zasnovanom na teoriji električnih krugova. Pokazano je kako se mjerama smanjenja struje smetnje može kontrolirati razina induciranog napona na osjetljivim metalnim strukturama.

Kako bi se točnije odredila razina utjecaja potrebno je razviti modele za proračun i simulaciju te rezultate eksperimentalno provjeriti mjerenjem struje napajanja u elektrovučnoj podstanici i induciranog napona [20]. Uspoređeni su različiti modeli s konstantnim i frekvencijski zavisnim parametrima te doneseni zaključci o prikladnosti svakog pojedinog modela za pojedine tipove elektrovučnih vozila. Parametri potrebni za izgradnju modela su promjenjivi. Ovisi, ne samo o geometriji sustava, već i o atmosferskim i prirodnim fenomenima. U istraživanjima, ključno je identificirati, dobro poznavati i kontrolirati parametre. Analiza se radi parametarski, a zaključci donose za okvire u kojima su parametri izabrani. Rezultati proračuna utjecaja sustava električne željeznice na metalne strukture uspoređeni su i s vrijednostima utjecaja dobivenim koristeći trenutno važeće norme i propise. Metodologija predložena, obrađena i provjerena u ovom radu pokazala se kao točnija i učinkovitija za određivanje elektromagnetskih utjecaja.

Kvantitativna i kvalitativna analiza nužne su za potpuno sagledavanje utjecaja u prvom redu kako bi se zaštitile osobe i oprema, ali i za poboljšanje učinkovitosti zaštite osjetljivih sustava. Ovisno o veličini i obliku induciranog napona mogu se poduzeti mjere zaštite s različitom učinkovitošću kao i različitom ekonomskom isplativošću. U radu su prepoznati parametri u elektrovučnom sustavu kojima se može kontrolirati veličina utjecaja, određeni i analizirani oblici induciranog napona na metalnim strukturama te određen i diskutiran utjecaj parametara na oblike napona. Zaštita se može provoditi u željezničkom sustavu, ali i u sustavima na kojima se očituje opasnost ili smetnja.

Doktorski rad usmjeren je na analizu željezničkog sustava, njegovih svojstava i operativnog rada s ciljem određivanja veličine izvora smetnje što je prije svega struja napajanja elektrovučnih vozila umanjena za povratnu struju kroz tračnice. Rad je baziran na podacima o

izvedbama sustava koji se uobičajeno koriste za prijevoz putnika i robe elektrificiranom željeznicom i to na sustavu napajanja 25 kV, 50 Hz. Povratno i zaštitno uže nisu nužno dio ovoga sustava, no mogu se instalirati kako bi se postiglo smanjenje elektromagnetskog utjecaja. Razvijeni su i korišteni modeli elektrovučnih vozila s diodnim ispravljačem i istosmjernim motorom te elektromotornog vlaka s asinkronim motorom. Osjetljivi sustavi su modelirani karakterističnom impedancijom dobivenom iz geometrijskih podataka dostupnih u katalozima proizvođača.



## 2 ŽELJEZNIČKI ELEKTROTEHNIČKI SUSTAV

Željeznički elektrotehnički sustav je skup komponenata koje omogućavaju napajanje elektrovojnog vozila električnom energijom u svrhu transporta.

Elektrifikacija željeznica započeta je krajem XIX. stoljeća, a nastavlja se i danas. Uvođenje električnog napajanja željeznice ima za posljedicu [21]:

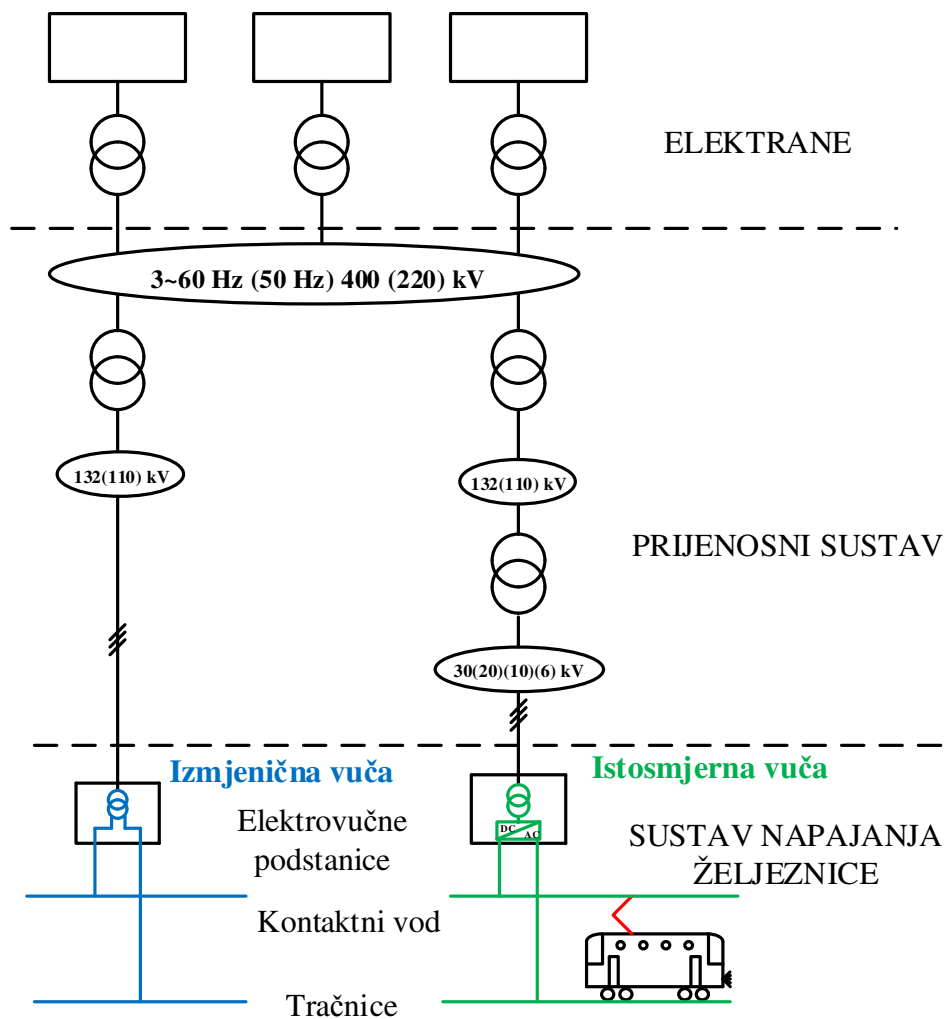
- višu tehničku razinu vuče,
- povoljnije korištenje energetske izvora,
- veću kvalitetu prijevoza putnika i robe radi brzine, udobnosti, čistoće i sigurnosti,
- šire prometne mogućnosti i povećanje prijevozne moći,
- smanjenje troškova prijevoza.

Sustavi elektrifikacije razvijali su se sukladno razvoju elektrotehničkih komponenata koje se koriste pri vuči vlakova. Tehnički problemi elektrifikacije željeznica sastojali su se u pronalaganju najpovoljnijeg izvora i prijenosa električne energije do vojnog vozila i zatim korištenja energije u samom vozilu. Odabir izvora napajanja znači odlučiti se za određeni izvor napona i struje te ostvariti prijenos električne energije do lokomotive uz najprikladniju transformaciju. Korištenje energije odnosno njezina pretvorba u mehanički rad odvija se u elektrovojnim motorima. Rad motora neprestano se poboljšava te se i učinkovitost elektrovojnog sustava povećava.

Razvojem elektrotehnike i elektroindustrije, razvijali su se sustavi elektrifikacije željeznica [22]:

- istosmjerni sustav 600 V (tramvajska mreža),
- trofazni sustav niske frekvencije 15 Hz, 3300 V,
- jednofazni sustav niske frekvencije  $16 \frac{2}{3}$  Hz, 15 kV,
- istosmjerni sustavi 3000 V i 1500 V,
- jednofazni sustav industrijske frekvencije 50 Hz, 25 kV.

Danas se u Europi u najvećoj mjeri koriste izmjenični sustavi električne vuče 15000 V,  $16 \frac{2}{3}$  Hz i 25 kV, 50 Hz te sustavi s istosmjernim napajanjem 3000 V. Moderni sustavi koriste i sustav 50 Hz, 2x25 kV koji omogućuje prometovanje vrlo brzih vlakova. Na slici 2.1 prikazana je pojednostavljena shema napajanja za istosmjernu i izmjeničnu vuču.



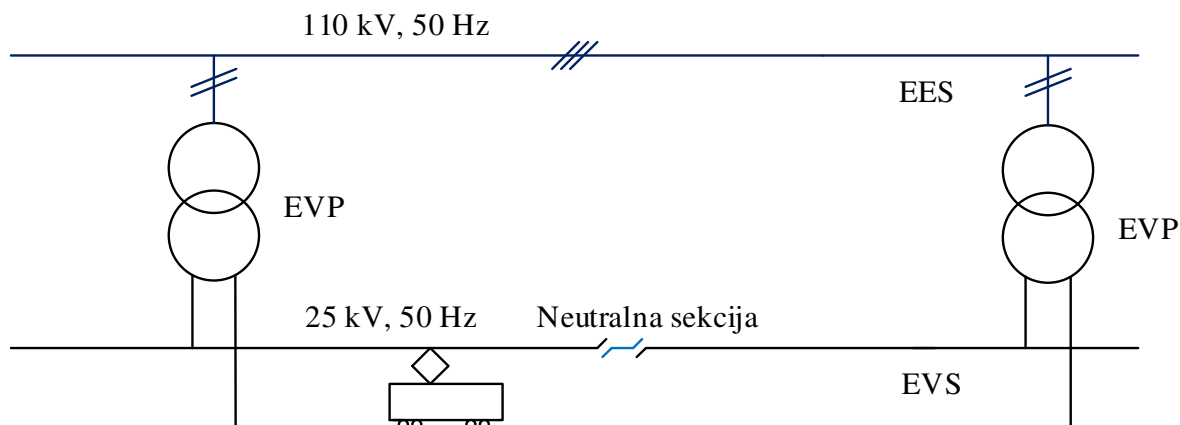
Slika 2.1 Shema napajanja za istosmjernu i izmjeničnu vuču

Elektrovučni sustav povezuje se u elektrovučnim podstanicama s elektroenergetskim sustavom. U elektrovučnim podstanicama sučeljavaju se elektroenergetski i elektrovučni sustav te se parametri napona prilagođavaju izvedbama sustava. Izmjenična i istosmjerna električna vuča razlikuju se u konstrukciji i načinu dovođenja energije do motora.

U ovome poglavlju opisan je pogon izmjenične vuče 25 kV, 50 Hz. Ovaj sustav sastoji se, u bitnome, od sljedeća tri dijela:

- elektrovučne podstanice;
- kontaktne mreže;
- elektrovučnog vozila.

Pojednostavljena shema ovog sustava prikazana je slikom 2.2.



Slika 2.2 Shema elektrovočnog sustava 25 kV, 50 Hz

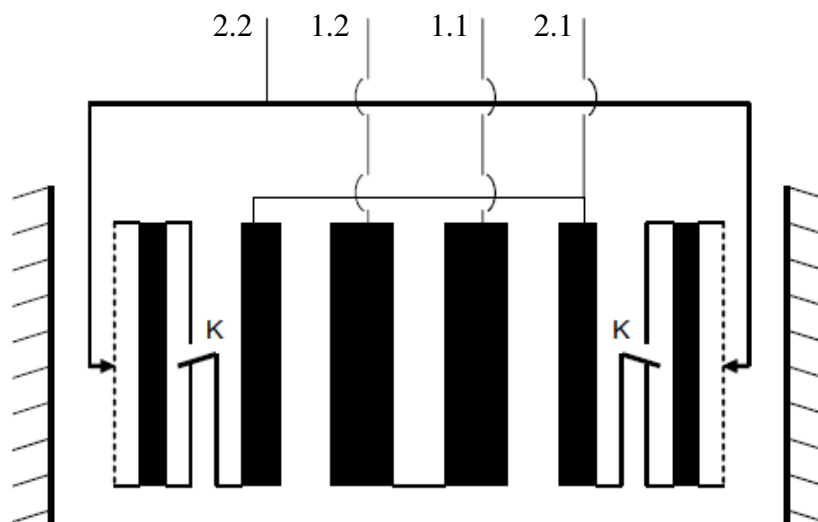
## 2.1 Elektrovočne podstanice

Elektrovočne podstanice su transformatorske stanice koje prilagođavaju veličinu napona za potrebe sustavu napajanja elektrovočnog vozila. U sustavu s pogonskom frekvencijom, elektrovočne podstanice spajaju se na dvije faze elektroenergetskog sustava. Često se koriste dva transformatora jednakih nazivnih snaga. Udaljenost susjednih podstanica može biti oko 15 km na brdskim prugama pa sve od 40 do 60 km na ravničarskim prugama.

Transformatori koji se danas koriste u Hrvatskoj za napajanje izmjeničnih elektrovočnih podstanica su nazivnih snaga 7,5 MVA, 10 MVA i 15 MVA prijenosnog omjera  $110/27,5 \text{ kV} \pm 10 \times 1,5\%$ , dakle s regulacijom pod teretom na niženaponskoj strani [23]. To su uljni transformatori standardne izolacijske razine LI550 AC230 / LI170 AC70. Hlađenje je ONAN, a rashladni sustav je dimenzioniran za preopterećenje 50% u trajanju 15 minuta ili 100% u trajanju 5 minuta. Mehanička izvedba transformatora mora biti takva da izdrži dinamička naprezana uzrokovana promjenjivim opterećenjem i strujama kratkog spoja bez da se ugrozi očekivani životni vijek transformatora. Slika 2.3 prikazuje raspored namota na stupu jezgre transformatora nazivne snage 15 MVA. Transformator je jezgraste izvedbe s dvostupnom jezgrom i namotima smještenim na oba stupa. Niženaponski namot 2.1-2.2 spojen je u paralelu, pri čemu se regulacija koja je izvedena prekretanjem nalazi uz jezgru. Višenaponski namot 1.1-1.2 je vanjski i spojen je u seriju. Osnovni nazivni podaci su dani u tablici 2.1. [16]

Tablica 2.1 Osnovni nazivni podaci transformatora 7,5 MVA i 15 MVA

<b>Transformator</b>	7,5 MVA	15 MVA
Gubici u transformatoru (kW)	10	15
Gubici zbog tereta (kW)	45	62
Napon kratkog spoja (%)	9,25-10,75	9,25-10,75
Ukupna masa (kg)	27000	31000



Slika 2.3 Raspored namota na jezgri transformatora 15 MVA

Može se uzeti da se impedancija transformatora sastoji samo od reaktivnog dijela obzirom da je djelatni otpor transformatora značajno manji od reaktancije. Reaktancija transformatora može se odrediti pomoću relativnog napona kratkog spoja [24]:

$$u_k = \frac{U_{k1}}{U_{n1}} \quad (2.1)$$

gdje je:

$U_{k1}$  napon kratkog spoja,

$U_{n1}$  nazivni napon.

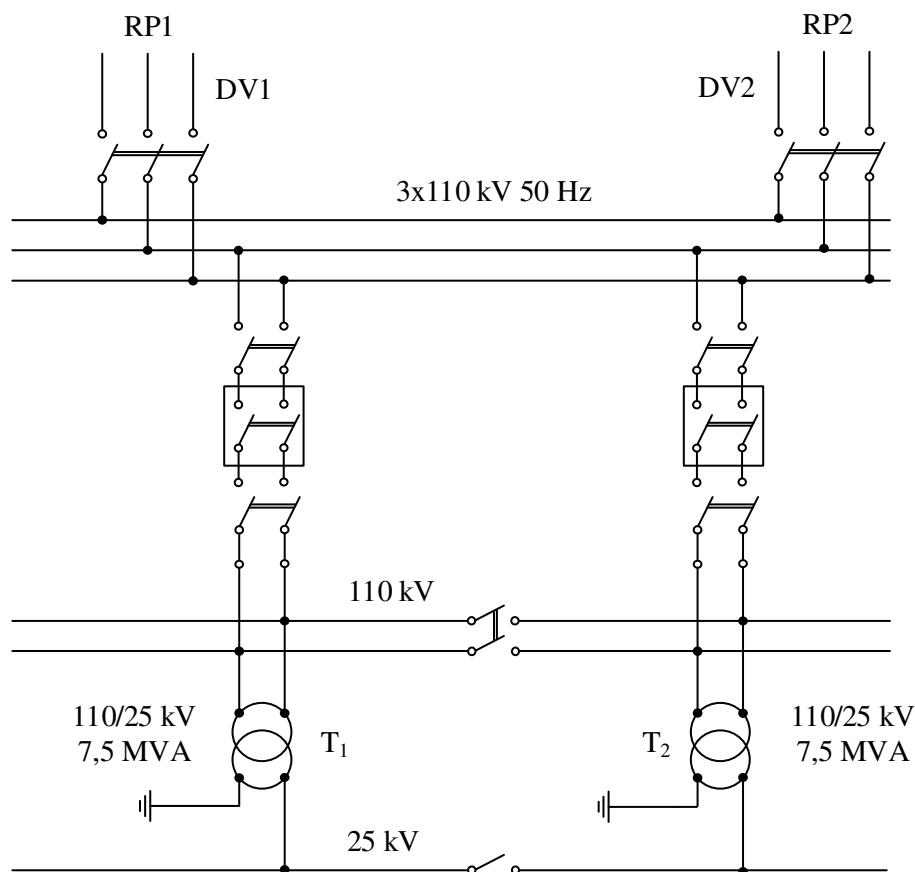
Dalje je:

$$X_{d1} = \frac{U_{k1}}{I_{n1}} = u_k \frac{U_{n1}}{I_{n1}} = u_k \frac{U_{n1}^2}{S_n} = Z_T \quad (2.2)$$

gdje je:

- $I_{n1}$  nazivna struja,
- $S_n$  nazivna snaga,
- $Z_T$  impedancija transformatora.

U elektrovnim podstanicama smješteni su prekidači i rastavljači kojim se mogu prespojiti sekcija napajanja. Spoj elektrovnog transformatora na kontaktnu mrežu ostvaren je spojem njegovih visokonaponskih stezaljki na dvije faze prijenosnog voda dok su niskonaponske stezaljke spojene na kontaktni vod i tračnice (slika 2.4) [25] – [27].



Slika 2.4 Shema spajanja elektrovnice podstanice na prijenosnu mrežu

## 2.2 Kontaktna mreža

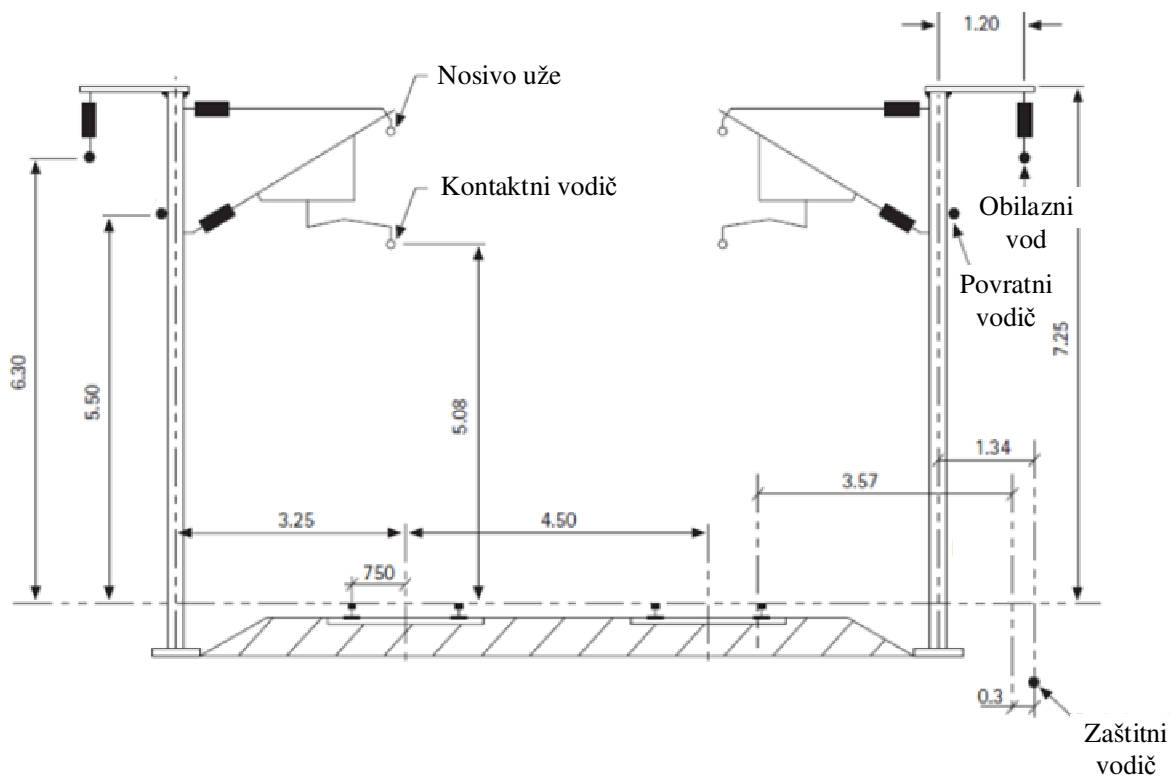
Zadatak kontaktne mreže u elektrotehničkom željezničkom sustavu je pouzdano opskrbljivati vučna vozila električnom energijom potrebnom za kretanje. U elektrovučnim podstanicama strujne i naponske prilike prilagođavanju se parametrima kontaktne mreže. Za razliku od prijenosne mreže elektroenergetskog sustava, kontaktna mreža u željezničkom sustavu radi u izoliranim sekcijama. Razlog tome je sprečavanje neželjenih tokova snaga po ovoj mreži uslijed različitih napona koji vladaju u elektrovučnim podstanicama.

Osnovna električna karakteristika kontaktne mreže je njezina impedancija. Impedancija mreže ovisi o njezinoj geometriji, načinu postavljanja i obilježjima prostora u koji je postavljena. U ovom podpoglavlju iznijet će se osnovne izvedbe kontaktne mreže elektroenergetskog sustava koja se postavlja iznad osi kolosijeka te izračunati pridružene impedancije.

Različite su izvedbe kontaktne mreže ovisno o naponskim razinama koje se koriste. Svaka se mreža sastoji od voznog voda i tračnica, a ovisno o praksi izvedbe dodaju se obilazni vod, povratno uže, zaštitno uže, booster transformatori i autotransformatori. Autotransformatori su svojstveni sustavu napajanja 2x25 kV.

### 2.2.1 Osnovni dijelovi i svojstva

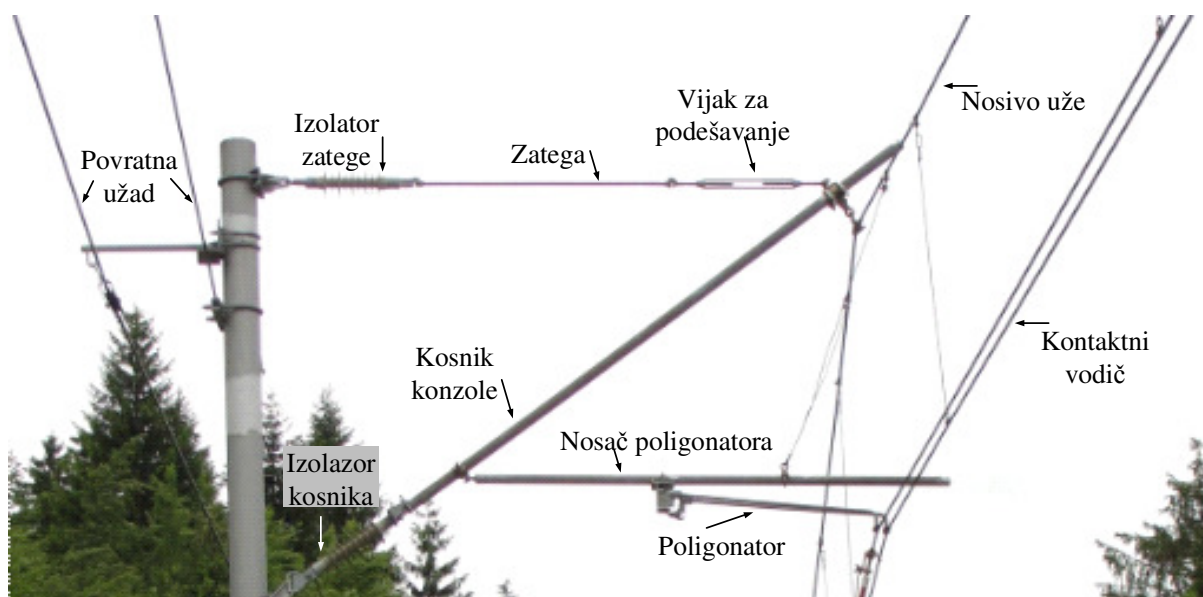
Kontaktna mreža u pravilu se postavlja iznad osi kolosijeka, a učvršćuje se na čelične stupovima preko zatege, konzole i poligonatora. Obvezno se sastoji od kontaktnog vodiča i nosivog užeta, ovisno o izvedbi, može se postavljati povratno uže i obilazni vod. Često se kontaktni vodič i nosivo uže promatraju kao jedan vodič, i nazivaju vozni vod, obzirom da su spojeni vješaljkom. Na slici 2.5 je prikazan presjek dvokolosiječne pruge sustava elektrificiranog naponom 25 kV, 50 Hz s podacima o položaju vodiča i njihovim svojstvima te uvećan segment konzole na kojeg su označeni njezini dijelovi [28]. Mjere su izražene u metrima. Sama izvedba voznog voda ovisi o planiranim brzinama vučnih vozila i očekivanim strujno-naponskim prilikama [29], [30]. Pregled podataka o vodičima kontaktne mreže tip V300 dan je u tablici 2.2.



Slika 2.5 Presjek dvokolosiječne elektrificirane pruge

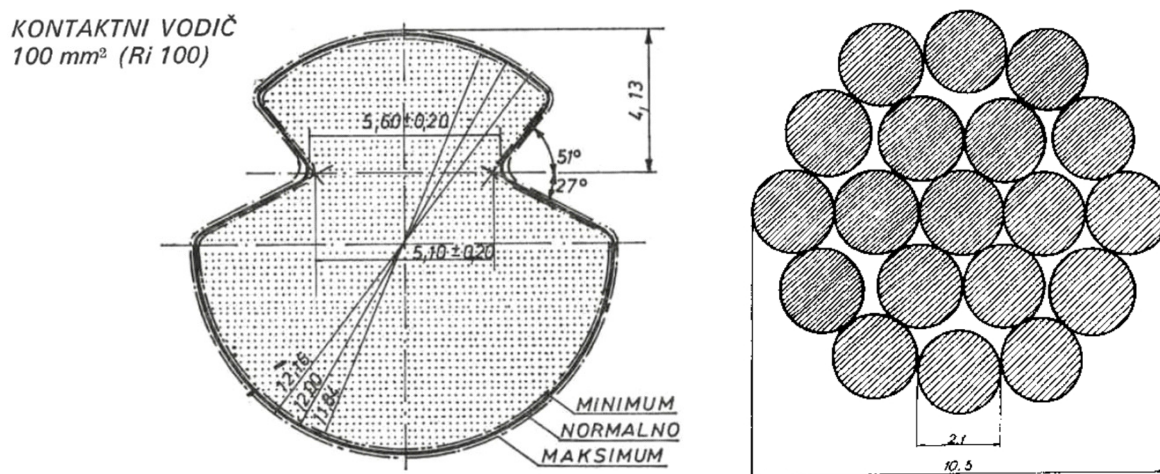
Tablica 2.2 Podatci o vodičima kontaktne mreže tipa V300

Vodič Obilježje	Nosivo uže	Kontaktni vodič	Povratni vodič	Obilazni vod
Materijal	bronca	bakar	Alu-čelik	Alu-čelik
Presjek [mm <sup>2</sup> ]	65,38	150	93,3 Al 58,90 Čelik 34,34	288 Al 233,8 Čelik 54,55
Promjer [mm]	10,5	14,5	12,5	22,05
Vodljivost (% od čistog bakra)	60	98	61 (Al)	61 (Al)
Otpornost [μΩ cm]	3,02076	1,777	4,57004	3,57548



Slika 2.6 Kontaktne mreže jednokolosiječne pruge uz stup

Vodič kontaktnog voda ima specifičan oblik obzirom da je potrebno ostvariti neprekinuto klizanje pantografa po njemu, a u isto vrijeme potrebno ga je mehanički učvrstiti na poligonator. Radi toga kontaktne vodiče se izvodi sa žljebovima prema slici 2.7. Izmjere su zapisane u milimetrima.



Slika 2.7 Presjek kontaktnog vodiča i nosivog užeta [21]

Izbor presjeka kontaktnog vodiča ovisi, prije svega, o očekivanom strujnom opterećenju. Uobičajeni presjeci su od  $100 \text{ mm}^2$  do  $150 \text{ mm}^2$  iz bakra, a rjeđe iz aluminija [31]. U tablici 2.3 su dani primjeri nekih presjeka kontaktnih vodiča i pripadajući otpor [32], [33].



Tablica 2.3 Presjeci i otpori kontaktnih vodiča [33]

Oznaka vodiča iz bakra		Oznaka vodiča iz aluminija	
Presjek [mm <sup>2</sup> ]	Otpor [Ω/km]	Presjek [mm <sup>2</sup> ]	Otpor [Ω/km]
80	0,229	95,4/15,9	0,33
85	0,210	116/26,6	0,27
100	0,177	117	0,27
107	0,171	148	0,21
120	0,153	183	0,17
150	0,118	-	-

Nosivo uža ima osnovni zadatak mehanički učvrstiti kontaktni vodič preko vješaljki koje ga s njim povezuju te spriječiti njegov provjes. Obično je manjeg presjeka nego kontaktni vodič, no izrađuje se iz čvršćih materijala poput bronce. U tablici su prikazana svojstva brončanog nosivog užeta tipa BzII.

Tablica 2.4 Presjeci i otpori nosive užadi iz bronce [33]

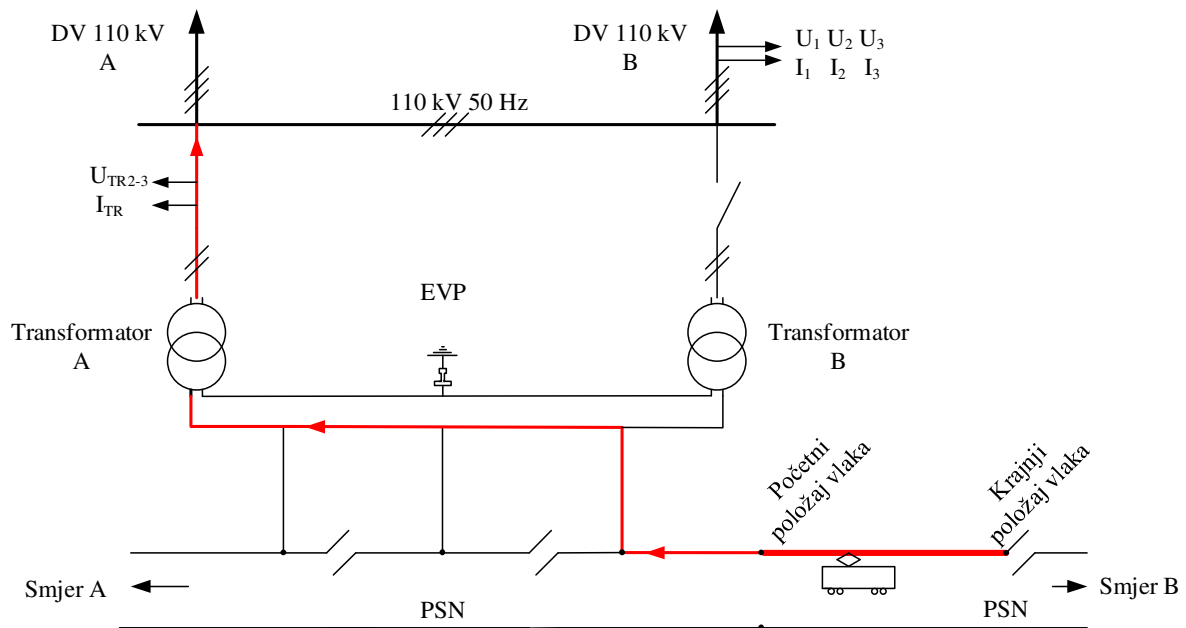
Nazivni presjek [mm <sup>2</sup> ]	Stvarni presjek [mm <sup>2</sup> ]	Broj vodiča	Promjer [mm]	Maksimalna trajna struja [A]
50	49,48	7	9,0	200
50	48,35	19	9,0	200
70	65,81	19	10,5	245
95	93,27	19	12,5	305
120	116,99	19	14,0	350
150	147,11	37	15,8	410

Povratno uža i obilazni vod obično se izrađuju s čeličnom jezgrom i vanjskim aluminijskim dijelom (Alu-čelik). Pri proračunima koji u ovome radu uzimaju se svojstva vodiča iz gornjih tablica.

U ovom dijelu treba spomenuti i tračnice. Iako ne služe izravno za napajanje vučnog vozila, njima se povratna struja vraća prema elektrovučno podstanici, te imaju bitnu ulogu u raspodjeli struja i napona u sustavu. Na slici je prikazan presjek tračnice koja se koristi u kontinentalnoj



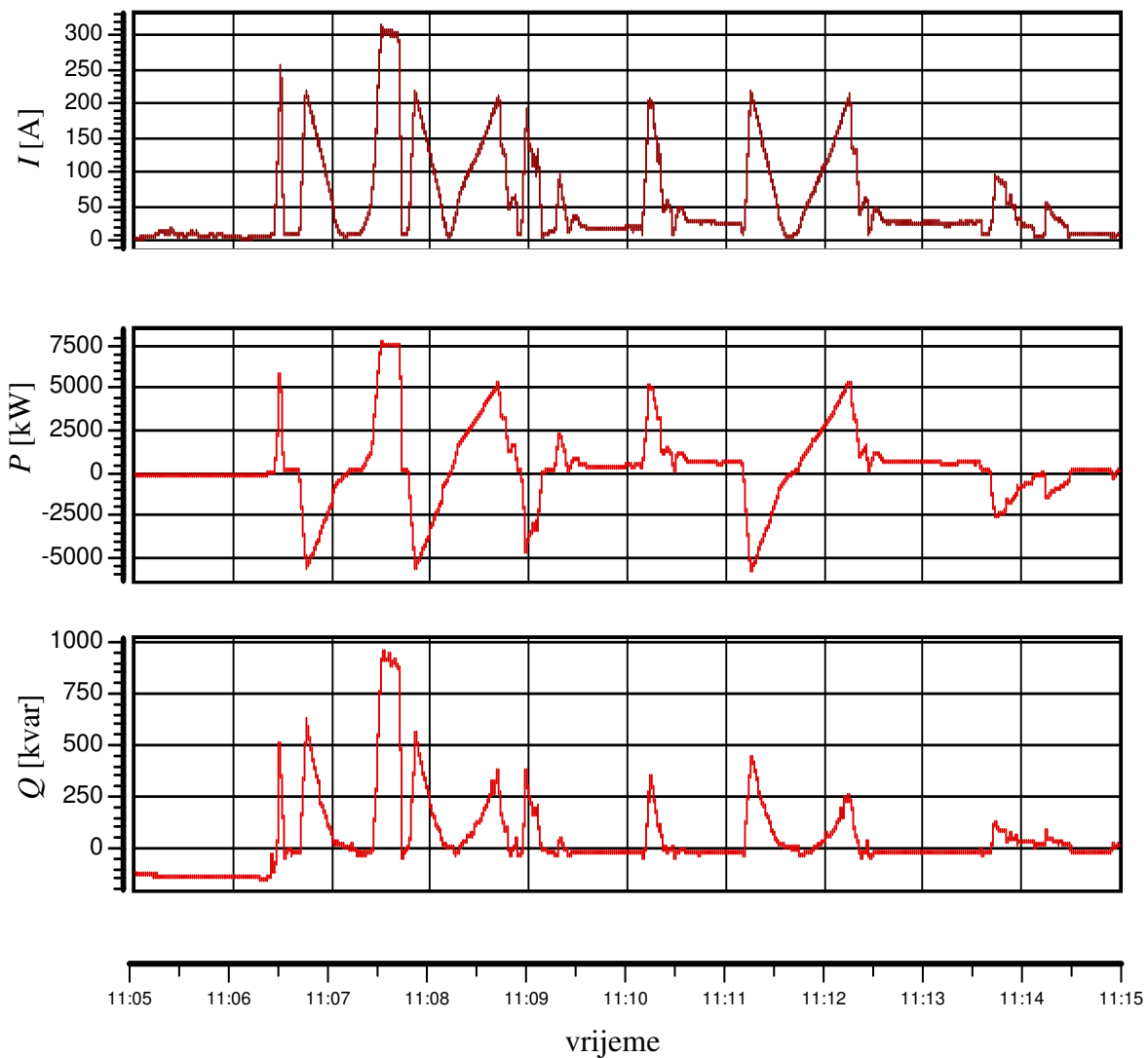
Na slici 2.9 prikazan je primjer uklopnog stanja i toka energije za vrijeme prometovanja lokomotive pri regenerativnom pogonu. Na 110 kV sabirnice elektroenergetskog sustava vezani su s jedne strane dva dalekovoda, a s druge elektrovučni transformator označen s A. Drugi elektrovučni transformator B je izvan pogona. Primjer prikazuje dvokolosiječnu prugu uz neovisan električni pogon kontaktne mreže iznad pojedinih kolosijeka. Pogonski strojevi lokomotive su asinkroni motori koji pri kočenju rade u generatorskom režimu i proizvode električnu energiju. Smjer energije prikazan je strelicama.



Slika 2.9 Smjer energije pri rekuperativnom pogonu

Energija koja se u nekom vremenu prenese od elektrovučnog vozila prema elektroenergetskom sustavu nešto je manja od energije potrebne za pogon vozila. Na slici 2.10 prikazan je grafikon s oscilogramima djelatne i jalove snage jednog vozila. Pozitivna djelatna snaga znači da je vozilo uzimalo energiju iz mreže, a negativna da ju je vraćalo u mrežu. Prikazana je i efektivna vrijednost struje u kontaktnoj mreži. Smjer struje može se dobiti promatrajući oscilogram djelatne snage.

Struja napajanja doseže vrijednosti preko 300 A dok struja rekuperacije ima vrijednosti do 220 A. Ovakva vrijednost struje u kontaktnoj mreži je značajna i razmatrat će se u nastavku rada. U poglavlju 2.3.5 prikazani su valni oblici struje rekuperacije. Jalova snaga uvijek ima pozitivnu vrijednost dok se predznak djelatne snage mijenja ovisno o toku energije. Vrijednosti snaga za vrijeme napajanja lokomotive dosežu sve do 7,5 MW i 0,95 Mvar odnosno pri rekuperativnom pogonu do 5,2 MW i 0,55 Mvar što je vidljivo sa slike 2.10.



Slika 2.10 Struja, djelatna i jalova snaga pri rekuperativnom pogonu lokomotive

### 2.2.3 Proračun impedancije kontaktne mreže

Osnovno električno svojstvo kontaktne mreže je njezina impedancija. Općenito, impedancija je mjera kojom se petlja suprotstavlja prolasku izmjenične struje. Kako bi se odredila impedancija nužno je poznavati otpor, induktivitet, kapacitet i odvod kontaktne mreže. Sve četiri veličine ovise o načinu postavljanja vodiča, svojstvima okoline i svojstvima samih vodiča. Impedancija se sastoji od realnog dijela koji predstavlja otpor pojedinog vodiča i imaginarnog dijela koji predstavlja induktivitet.

Impedanciju vodiča sa zemljom kao povratnim putem definirao je Carson [35]:

$$Z = R_k + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h}{r} + 2(\Delta R + j\Delta X) \left[ \frac{\Omega}{\text{km}} \right] \quad (2.3)$$

gdje je:

- $R_k$  djelatni otpor vodiča,
- $\omega$  kružna frekvencija,
- $h$  visina vodiča iznad zemlje,
- $r$  polumjer vodiča,
- $\Delta R, \Delta X$  korekcija obzirom na svojstva tla.

Detaljni opis određivanja impedancije prikazan je u Prilogu A.

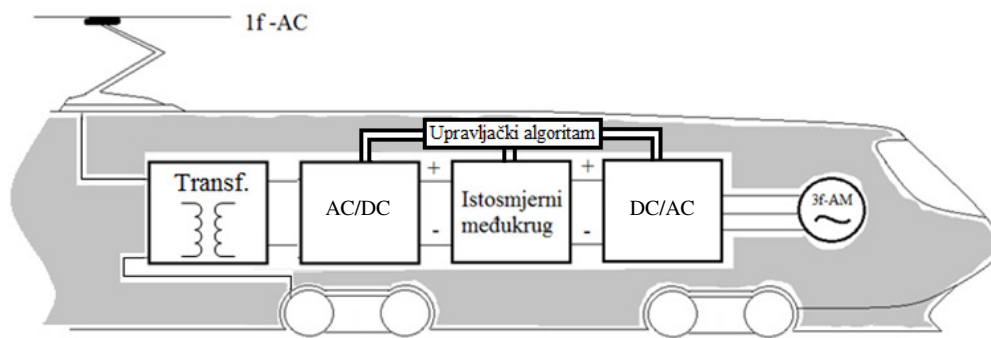
## 2.3 Elektrovučna vozila

U elektrovučnom sustavu koriste se električne lokomotive ili elektromotorni vlakovi kako bi se osiguralo kretanje kompozicije. U vozilima se električna energija pretvara u mehaničku energiju koja osigurava gibanje po tračnicama. Elektrovučna vozila imaju različite snage ovisno o broju i tipu motora koje se koriste za pokretanje. U starijoj tehnologiji vuče koriste se istosmjerni motori, a u novijoj susreću se asinkroni motori.

Osnovni dijelovi elektrovučnog vozila koji služe za provođenje i pretvorbu električne energije su [36]:

- Pantograf,
- Energetski transformator,
- Ispravljač,
- Istosmjerni međukrug,
- Izmjenjivač i
- Motor.

Istosmjerni međukrug i izmjenjivač se pojavljuju samo u elektromotornim vlakovima koji koriste asinkroni motor.



Slika 2.11 Elektrovučno vozilo s asinkronim motorom

Električna veza između sustava kontaktne mreže i vozila ostvaruje se preko pantografa koji klizi po kontaktnom vodiču. Pantograf služi isključivo kao oduzimač struje i njezin prijenosnik do vozila. Sa stajališta elektromagnetske kompatibilnosti, klizanje pantografa može generirati visokofrekvencijske smetnje preko proboja i iskrenja koje se javlja na zračnim rasporima uslijed odvajanja pantografa od kontaktnog vodiča [37]. Pantograf se može odvojiti fizički od kontaktnog vodiča ili električki razdvajanjem kontakata glavnog prekidača pantografa.

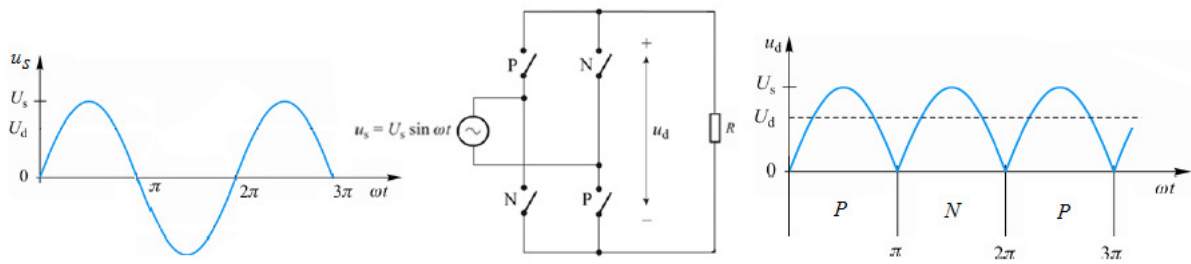
Na samom vozilu postavljen je transformator koji prilagođava iznos napona radnim svojstvima motora. Uobičajen prijenosni omjer u 25 kV, 50 Hz sustavu je 25 kV/2 kV. Razlika između elektrovučnih transformatora u podstanicama i transformatora u vozilima je u veličini, snazi, masi i zahtjevima za regulaciju. U vučnim vozilima s neupravljivim ispravljačima napon na pogonskim motorima se regulira upravo ovim transformatorom.

Za napajanje vučnih motora potrebno je prilagoditi i oblik napona. To se postiže uređajima učinske elektronike ispravljačem i izmjenjivačem [38].

### **2.3.1 Ispravljač**

Osnovna namjena ispravljača je pretvorba izmjeničnog napona u istosmjerni uz minimalnu valovitost. Ovisno o elementima od kojih je ispravljač načinjen, može biti upravljiv ili ne upravljiv. Ispravljač korišten za napajanje asinkronog vučnog motora spaja izmjeničnu mrežu s istosmjernim međukrugom. Ulaz ispravljača priključuje se na jednofaznu kontaktnu mrežu čiji napon i frekvencija ovise o odabranom sustavu elektrifikacije. Na izlazu ispravljača je pulsirajući valoviti istosmjerni napon, koji se dovodi do istosmjernog međukruga. Sve vrste vučnih motora koje se napajaju preko izmjenične kontaktne mreže koriste punovalni ispravljač [39], [40]. U početku elektrifikacije željeznice ispravljači koji su se koristili za napajanje vučnih motora bili su neupravljivi što znači da su za poluvodičke ventile koristili diode. Ispravljački spojevi dobivali su imena prema poluvodičkim ventilima koje su koristili tako se danas najčešće koriste tiristorski i tranzistorski ispravljači zbog boljih upravljačkih karakteristika i mogućnosti povrata energije u mrežu. Pojavom tiristorskog ispravljača, ubrzo su se uvidjele njegove brojne prednosti u odnosu na diodni pa su tako mnoge željezničke uprave donijele odluku o zamjeni diodnih ispravljača koji su već korišteni u vučnim vozilima s tiristorskim. Proces zamjene diodnih ispravljača s tiristorskim naziva se i tiristorizacija, no ovaj proces nije završen.

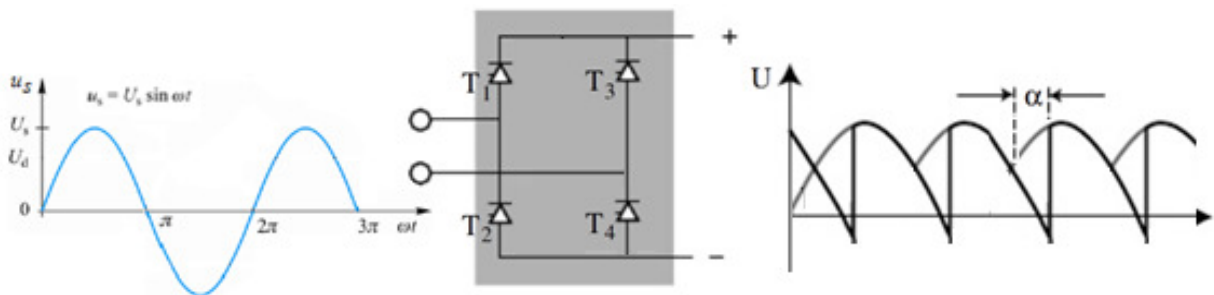
Princip rada ispravljača prikazan je na slici 2.12.



Slika 2.12 Princip rada ispravljača [39], [40]

Pomoću četiri sklopke moguće je načiniti punovalni ispravljački sklop, prikazan na slici 2.12. U vremenskom razdoblju kada je ulazni napon pozitivan uklopljene su sklopke P, a kada je ulazni napon negativan uklopljene su sklopke N. Prikazani sustav ispravljanja moguće je načiniti zamjenom sklopki diodama, čime nastaje diodni ispravljač. Nedostatak diodnog ispravljača je nemogućnost promjene amplitude izlaznog signala. Kako bi se mogla mijenjati amplituda izlaznog ispravljenog napona nužno je koristiti upravljane poluvodičke ventile.

Pojava tiristora s vremenom je istisnula diode u ulozi ispravljačkih elemenata. Tiristor, isto kao i dioda, ima mogućnost vođenja struje samo u jednom smjeru, od anode prema katodi, međutim tiristor ima jednu upravljačku elektrodu (gate). Dovođenjem strujnog signala na upravljačku elektrodu tiristor prelazi u stanje vođenja. Trenutak u kojem je doveden signal na upravljačku elektrodu naziva se trenutak vođenja, tj. kut paljenja. Kut paljenja je vrijeme kašnjenja između pobude na ulazu i trenutka početka vođenja tiristora. Upravo ova karakteristika tiristora omogućava realizaciju tiristorskog pretvarača i izmjenjivača. Tiristor je u stanju vođenja sve dok struja koja teče kroz njega ne padne na nulu, tj. ne može biti prekinuta signalom na upravljačkoj elektrodi. Jednofazni tiristorski ispravljač prikazan je na slici 2.13.



Slika 2.13 Jednofazni tiristorski ispravljač [39], [40]

Upravo nemogućnost prekidanja struje veliki je nedostatak tiristora. Kako bi uklonili taj nedostatak razvijen je GTO (engl. Gate Turn Off thyristor) koji ima mogućnost prekidanja struje prije nego što prođe kroz nulu. Prekidanje se ostvaruje dovođenjem na upravljačku elektrodu napona manjeg od napona na katodi (negativna struja).

### **2.3.2 Istosmjerni međukrug**

Izlazni napon iz ispravljača je ispravljen, ali valovit. Kako bi se smanjila valovitost napona potrebno je na izlaz ispravljača priključiti odgovarajući filter. Glavna komponenta filtera je kondenzator. Pri odabiru kondenzatora treba voditi računa da se ne pregrijava jer ukoliko je kondenzator elektrolitski, pregrijavanje može izazvati isparavanje elektrolita i eksploziju. Pregrijavanje i eksplozija mogu nastati prilikom izravnog spajanja pretvarača, koji je zaključen ovakvim kondenzatorom, na izmjeničnu napojnu mrežu. U tom trenutku kroz ispravljač i kondenzator proteče nedopustivo velika struja. Kako bi se ovaj događaj izbjegao prilikom pokretanja vlaka, kondenzator se nabija preko otpornika. Nakon što se kondenzator nabije na radni napon, poseban sklop koji mjeri napon istosmjernog međukruga uklapa relej koji svojim kontaktom kratko spoji otpornik da ne bi u trajnom radu gubici na otporniku smanjili djelotvornost pretvarača. Također je važno kondenzator isprazniti pri bilo kakvom radu na pogonskim i pretvaračkim elementima vlaka. Pražnjenje kondenzatora se ostvaruje njegovim uzemljenjem. Praksa je da izbijanje kondenzatora do vrijednosti napona bezopasnog za rukovanje mora trajati najdulje 5 minuta.

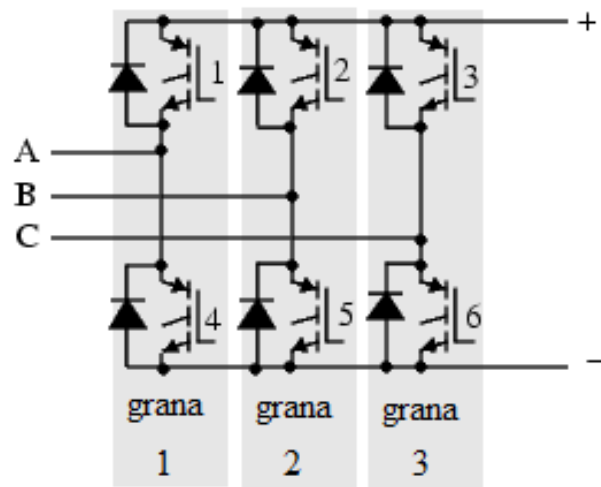
Valovitost izlaznog napona ovisi o veličini kondenzatora pa se tako u ispravljače ugrađuju kondenzatori od nekoliko tisuća mikrofarada [38]. U mnogim mrežama nije moguće ostvariti povrat energije u mrežu jer to zahtjeva redizajniranje zaštite elektroenergetskog sustava, stoga jedno od rješenja je ugradnja baterija u istosmjerni međukrug. Pohranjena energija iz baterija iskorištava se kada je to potrebno ili kada bi to zahtijevalo drugo vozilo koje se nalazi u istoj sekciji. Također čest je slučaj upotrebe LC filtera.

### **2.3.3 Izmjenjivač**

Izmjenjivač je posljednji dio frekvencijskog pretvarača prije motora, koji pretvara istosmjerni napon s izlaza ispravljača (istosmjernog međukruga) u izmjenični napon potrebnog valnog oblika za upravljanje asinkronim motorom. Kada je u pitanju upravljanje vučnim asinkronim motorom inverter ima najznačajniju ulogu. Trofazni inverter se sastoji od tri invertorska mosta s po dva prekidača elementa u svakoj grani što ukupno čini šest prekidačkih



elemenata [41]. Kontrolom trenutaka paljenja pojedinih prekidača, te kontrolom duljine trajanja uključenja pojedinog prekidača postižu se odgovarajući valni oblici na izlazu invertora. Na slici 2.14 je prikazana shema trofaznog IGBT izmjenjivača.

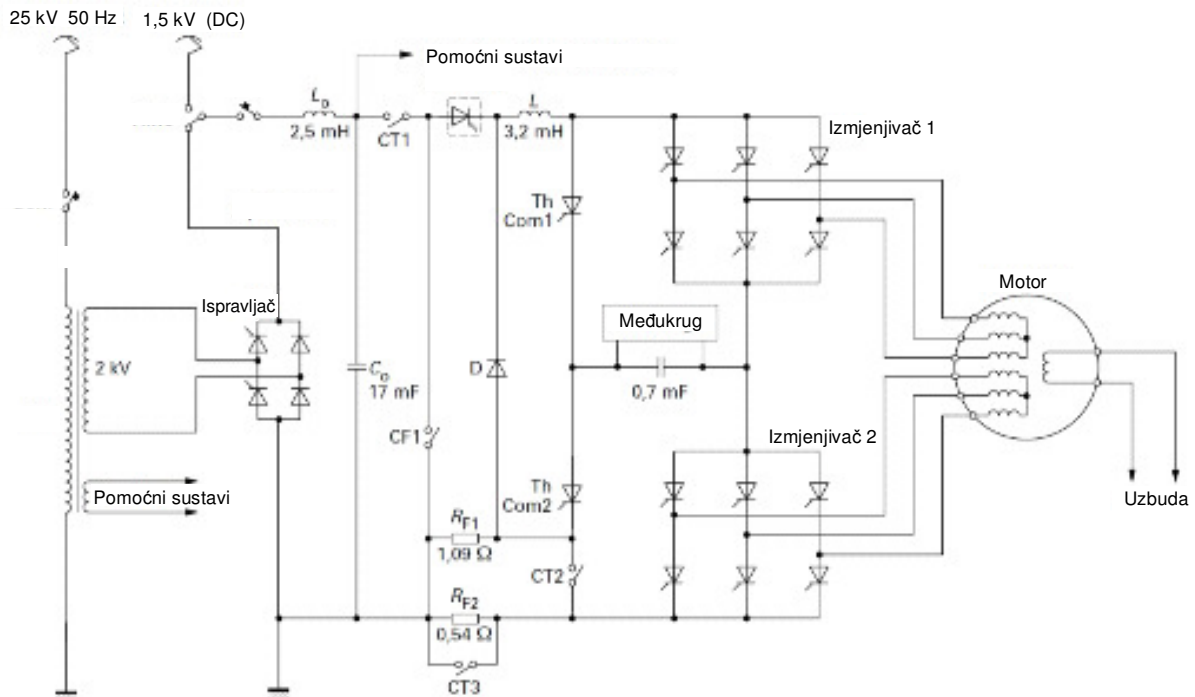


Slika 2.14 Shema trofaznog IGBT izmjenjivača

Jednako kao i u ispravljačima, pri uključivanju i isključivanju prekidača ne smije se dozvoliti takvo stanje u kojem su obadva prekidača u istoj grani uključena. U tom slučaju nastao bi kratki spoj izvora istosmjernog napona. U svakoj grani prekidači rade u inverznim stanjima, tj. ako je jedan uključen drugi je isključen pa je broj mogućih stanja šest prekidača jednak osam.

Generiranje upravljačkih signala slično je generiranju upravljačkih signala ispravljača (usmjerivača), ali modulacijski signali su željeni signali na izlazu iz izmjenjivača. Trofazni vučni asinkroni motor zahtijeva simetričan trofazni napon što znači da modulacijski signali trebaju biti sinusni i razmaknuti za  $120^{\circ}$ . Sklopni trenuci određuju se jednako kao i kod ispravljača (usmjerivača) usporedbom sa signalom nosiocem, tj. trokutastim signalom.

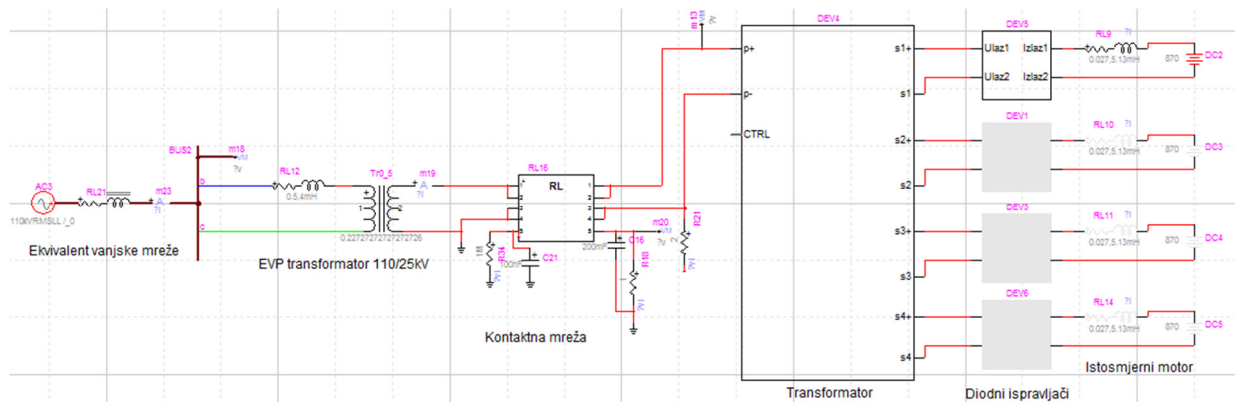
Kako se koriste različiti sustavi elektrifikacije, elektrovočna vozila mogu biti prilagođena preuzimanju električne energije s različitim svojstvima napona i struje. Takva se vozila nazivaju višesustavna. Primjer električne sheme lokomotive s asinkronim motorima namijenjene za pogon na sustavima elektrifikacije 25 kV, 50 Hz i 1,5 kV DC prikazan je na slici 2.15 [42] - [44].



Slika 2.15 Višesustavno elektrovočno vozilo s asinkronim motorom [44]

### 2.3.4 Elektrovočna vozila s istosmjernim motorima

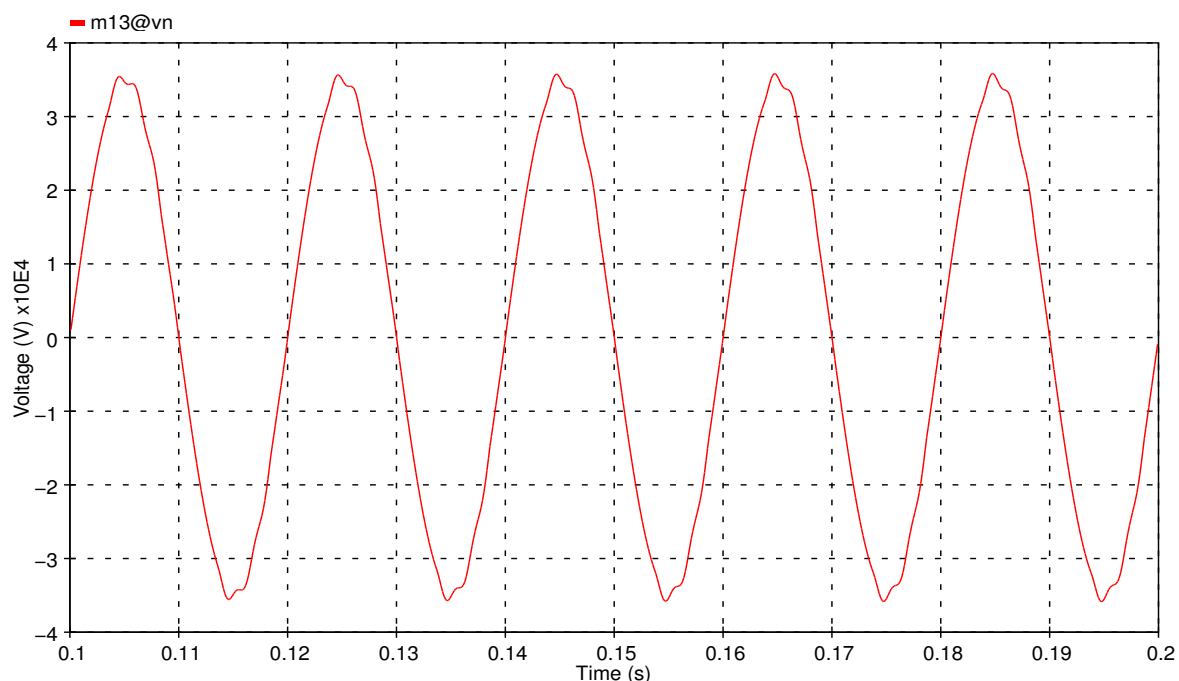
Vozila s istosmjernim motorima sadrže ispravljač kojim se izmjenični napon i struja pretvaraju u istosmjerni te se preko prigušnice napajaju istosmjerni motori [45], [46]. Kako bi se dobio valni oblik struje napajanja na kraku kojim prolazi elektrovočno vozilo s ispravljačima, potrebno je modelirati sve sastavne dijelove ili obaviti mjerenje u elektrovočnoj podstanici. Detaljno modeliranje vozila nije u fokusu ovoga rada, ali je potrebno razmotriti ovisnost oblika induciranog napona o obliku struje napajanja. Osnovni elementi modela dijela elektroenergetskog sustava i elektrovočnog sustava su prikazani slikom 2.16.



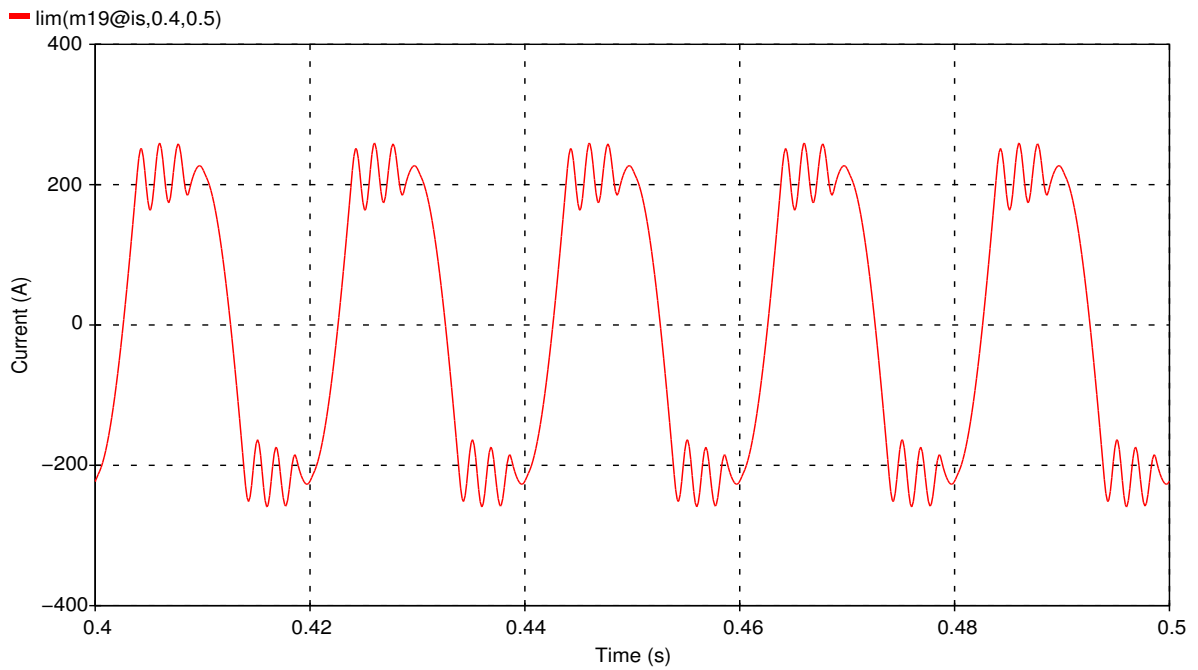
Slika 2.16 Model sustava napajanja lokomotive s diodnim ispravljačem [47]

Osnovni elementi modela su ekvivalent vanjske mreže, elektrovučni transformator, kontaktna mreža, transformator na vozilu, ispravljač i motor. Vrijednosti elemenata modela preuzete su iz [44] i [49]. Ekvivalent vanjske mreže predstavlja spoj na 110 kV razinu elektroenergetskog sustava koji je visokonaponskim vodom spojen na elektrovučnu podstanicu. Transformator u elektrovučnoj podstanici predstavljen je idealnim modelom transformatora nazivnih napona 110/25 kV. Visokonaponski vodovi, energetske transformator ne trebaju se detaljno modelirati jer je struja vuče određena elektromotornom silom koja predstavlja vučni motor. Najznačajniji dio modela su kontaktna mreža u čijem dijelu modela se nalazi i osjetljiva struktura te ispravljač. Kontaktna mreža može se modelirati preko različitih razvijenih modela u računalnom programu ili preko matrice impedancija. U nastavku će se razmotriti prikladnost pojedinih modela za različite vrste vozila. Ispravljač je mosni spoj koji može biti izveden iz dioda, tiristora ili drugih učinkovitih elemenata.

Pri određivanju elektromagnetskih utjecaja sustava električne vuče na osjetljive metalne strukture najvažnije je poznavati strujne i naponske prilike na kontaktnoj mreži koja uključuje, kako elemente koji omogućavaju dovođenje energije do vozila, tako i povratno put struje prema elektrovučnoj podstanici. Modeliranjem sustava dobiveni su valni oblici prema slikama 2.17 i 2.18. Napon na kontaktnoj mreži ima mali udio viših harmonika i gotovo idealno sinusan za razliku od struje koja ima visok udio viših harmonika.

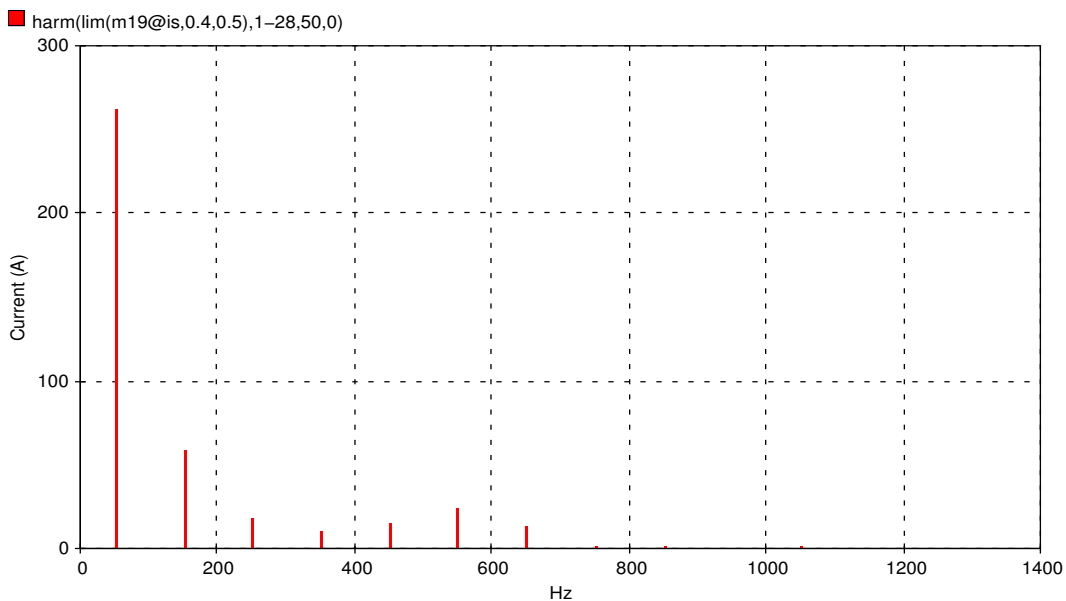


Slika 2.17 Napon kontaktne mreže pri prolasku vozila s diodnim ispravljačem (model)



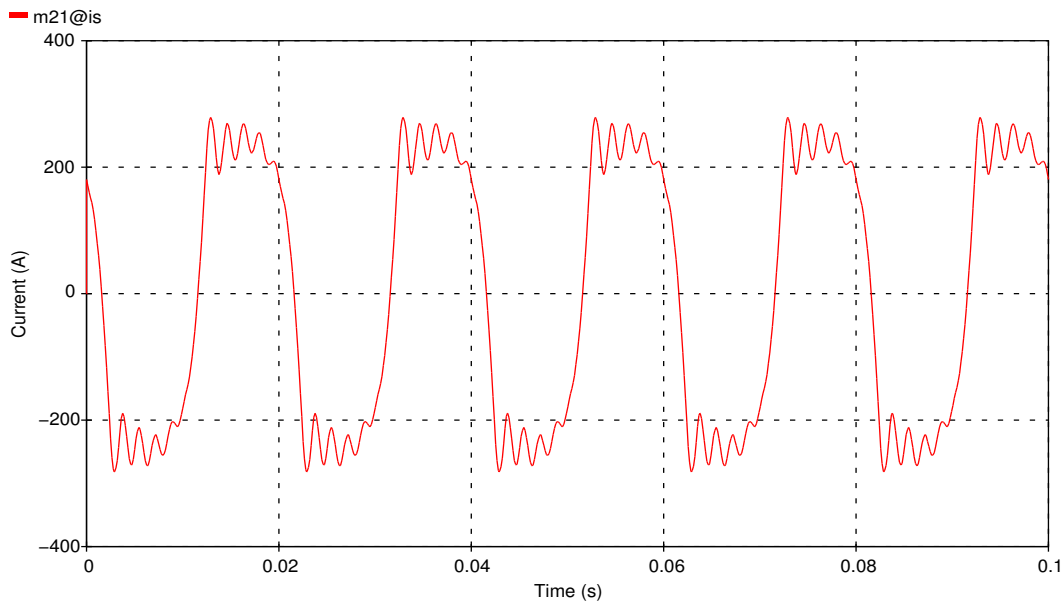
Slika 2.18 Struja kontaktne mreže pri prolasku vozila s diodnim ispravljačem (model)

Valni oblik struje napajanja uz elektrovučni transformator sa slike 2.18 razložen je harmonijskom analizom na udjele pojedinih harmonika ovisno o pogonskoj frekvenciji 50 Hz. Modelom je dobiven značajan udio samo neparnih harmonika i to do reda 25. Prikaz udjela pojedinih harmonika u struji napajanja vozila s diodnim ispravljačem prikazan je slikom 2.19. Uz prvi harmonik, najveću vrijednost doseže treći.



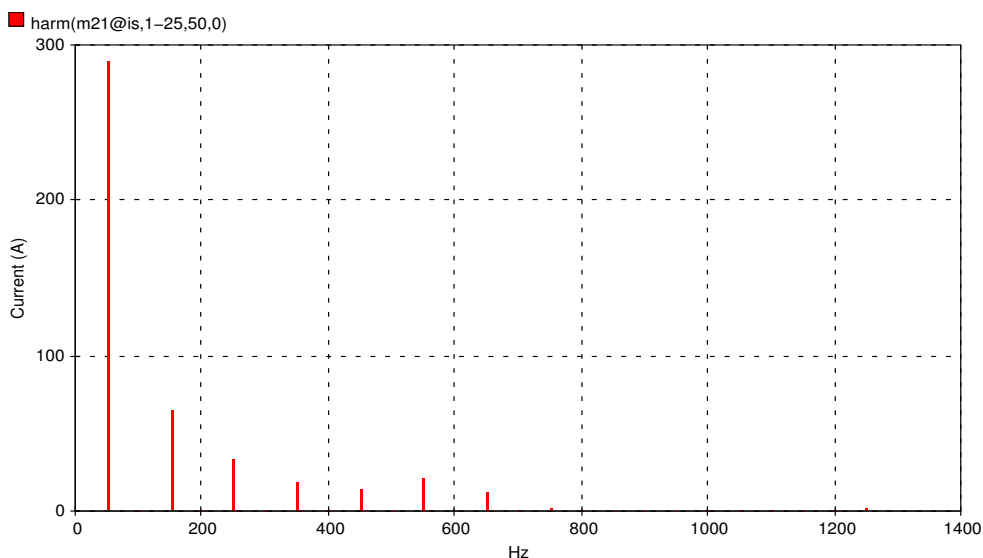
Slika 2.19 Harmonijska analiza struje kontaktne mreže (model)

Provjera dobivenih valnih oblika obavljena je mjerenjima napona kontaktne mreže i struje napajanja pri prolasku elektrovučnog vozila s diodnim ispravljačem. Na sljedećim slikama prikazani su mjerenjem dobiveni valni oblici koji su zatim uspoređeni s oblicima dobivenim modelom. Mjerenja su obavljena u elektrovučnoj podstanici.



Slika 2.20 Struja kontaktne mreže pri prolasku vozila s diodnim ispravljačem (mjerenje)

Uspoređujući valne oblike struje napajanja dobivene modelom i mjerenjem uočava se razlika u veličini oscilacija u vrhovima sinusoide. U tu svrhu napravljena je harmonijska analiza izmjerenog valnog oblika struje napajanja čiji rezultat je prikazan slikom 2.21.



Slika 2.21 Harmonijska analiza struje kontaktne mreže (mjerenje)

U tablici 2.5 su prikazani postotni udjeli viših harmonika struje napajanja u odnosu na osnovni harmonik.

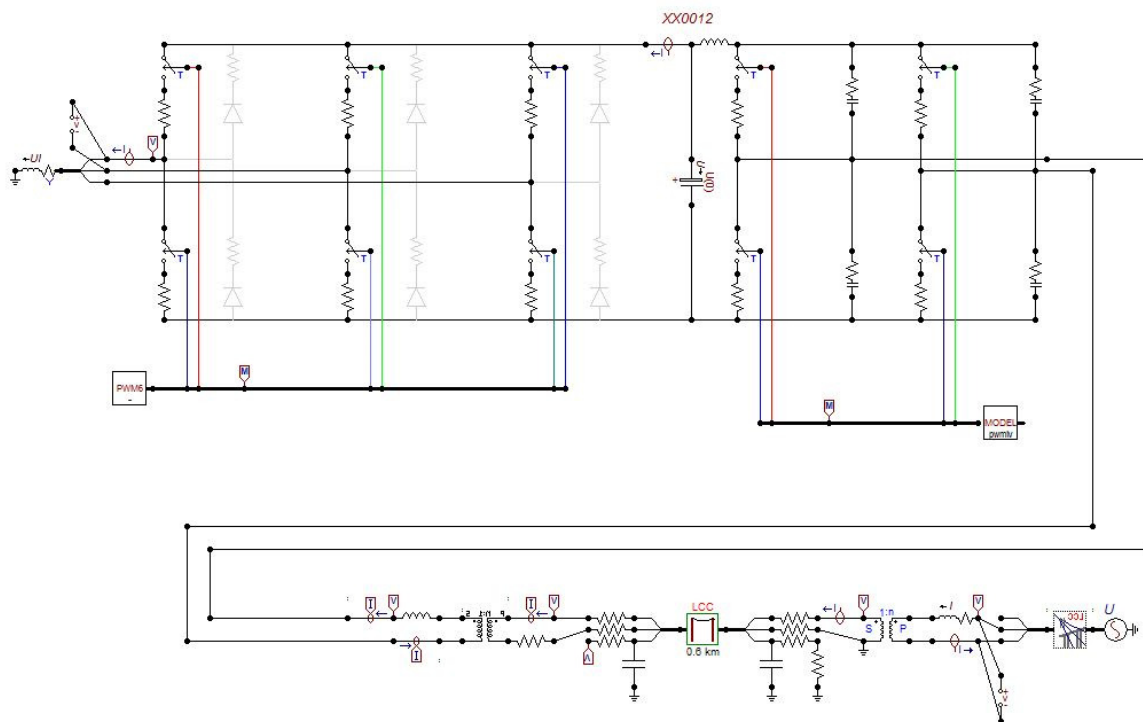
Tablica 2.5 Udio viših harmonika u struji napajanja – usporedba modela i mjerenja

Harmonik br.	model %	mjerenje %
1	100,00	100,00
3	32,68	22,41
5	20,98	11,03
7	20,00	6,55
9	46,83	4,48
11	3,90	7,59
13	1,76	4,14

Mjerenjem je dobiven valni oblik struje napajanja s manjim udjelom viših harmonika. Ovaj fenomen je očekivan i posljedica je pojednostavljenja u modeliranju pojedinih elemenata sustava koji su idealizirani. U realnim sustavima postoje prigušenja pojedinih harmoničnih članova koja su dominantnija za više članove. Kako su u modelu korišteni idealni transformatori u elektrovočnoj podstanici, na vozilu i pri mjerenju oblika struje, ovakav rezultat je očekivan. Pri korištenju dobivenih oblika struje za proračun induciranih napona valja voditi računa o ovome fenomenu te će se u nastavku rada usporediti rezultati dobiveni različitim valnim oblicima.

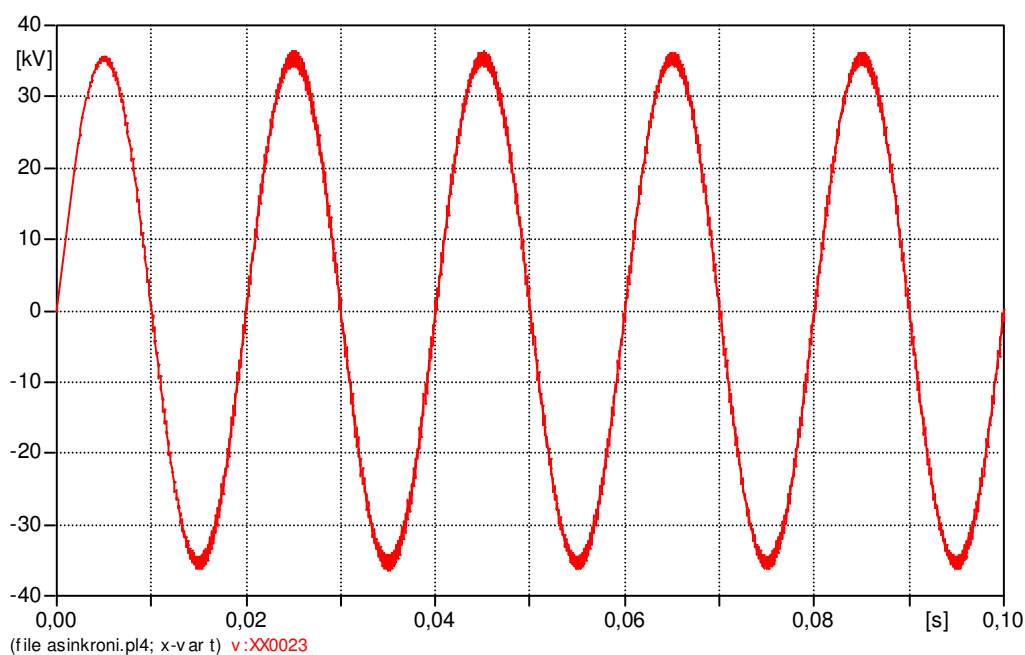
### **2.3.5 Elektrovočna vozila s asinkronim motorima**

U elektrovočnim vozilima s asinkronim motorima (elektromotorni vlak) dodatni element u odnosu na vozila s istosmjernim motorima je izmjenjivač čiji je rad prije pojašnjen. Električna shema modela elektromotornog vlaka prikazana je slikom 2.22. Podaci za model su jednaki kao i u modelu vozila s istosmjernim motorima u dijelu od ekvivalenta vanjske mreže do elektrovočnog vozila. Ispravljač je modeliran vremenski ovisnim sklopama.

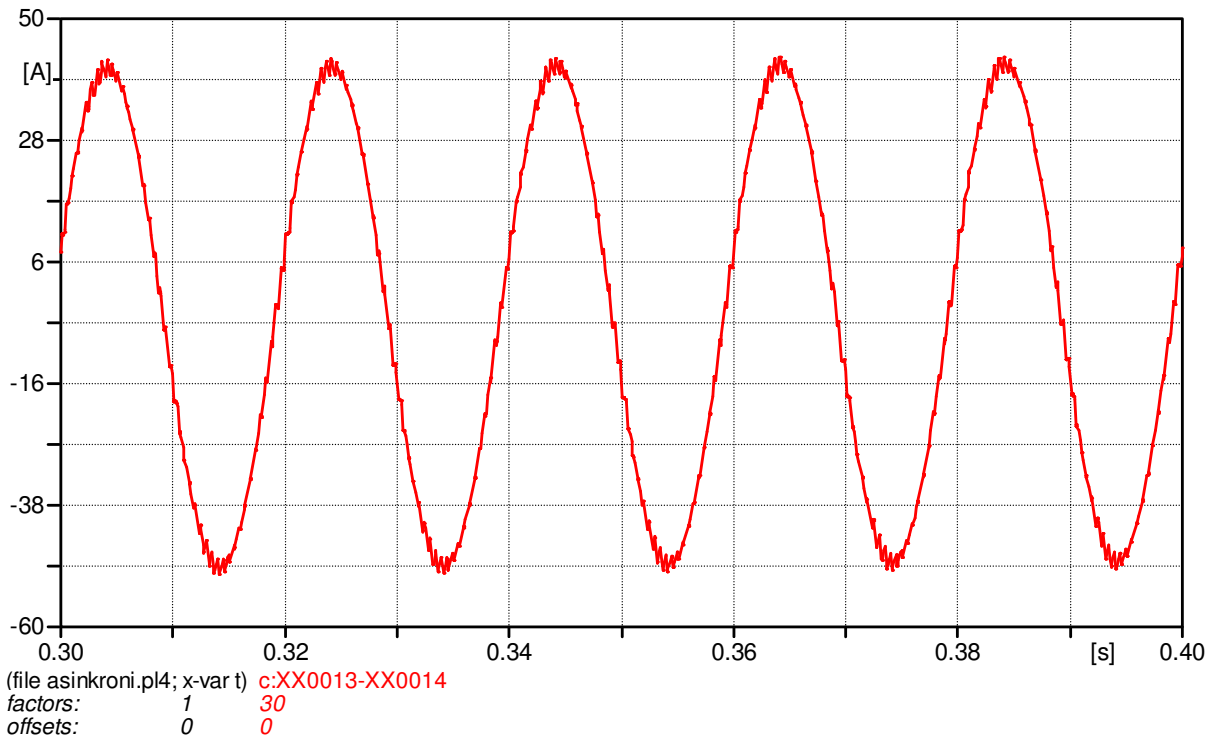


Slika 2.22 Model elektrovoćnog vozila s asinkronim motorom [48]

Dodatni ućinski element ima pozitivan ućinak na oblik struje napajanja koja je sada s manjim udjelom viših harmonika, no kako se povećanjem sklopki povećava broj rezanja struje, pojavljuju se vrlo visoki harmonićki ćlanovi [43], [50], [51]. Valni oblici napona kontaktne mreće i struje napajanja dobiveni modelom elektromotornog vlaka prikazani su na slikama 2.23 i 2.24, a dobiveni su uz frekvencijski indeks modulacije 60 (3000 Hz).



Slika 2.23 Napon kontaktne mreće pri prolasku elektromotorna vlaka (model)



Slika 2.24 Struja kontaktne mreže pri prolasku elektromotorna vlaka (model)

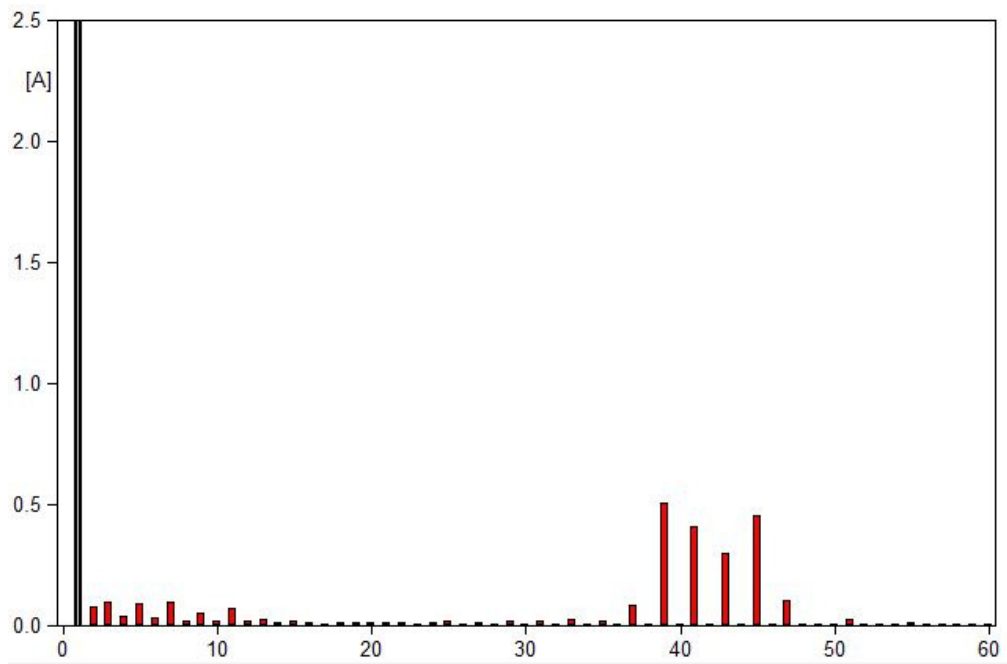
Za određivanje i analizu induciranog napona na metalnim strukturama u koridoru električne željeznice potrebno je struju napajanja razložiti na harmonike. U tablici 2.6 prikazan je udio značajnijih viših harmonika u struji napajanja.

Tablica 2.6 Udio viših harmonika u struji napajanja elektromotornog vlaka

Harmonik br.	model %
1	100,00
3	0,20
5	0,19
7	0,22
11	0,15
39	1,14
41	0,91
45	1,01

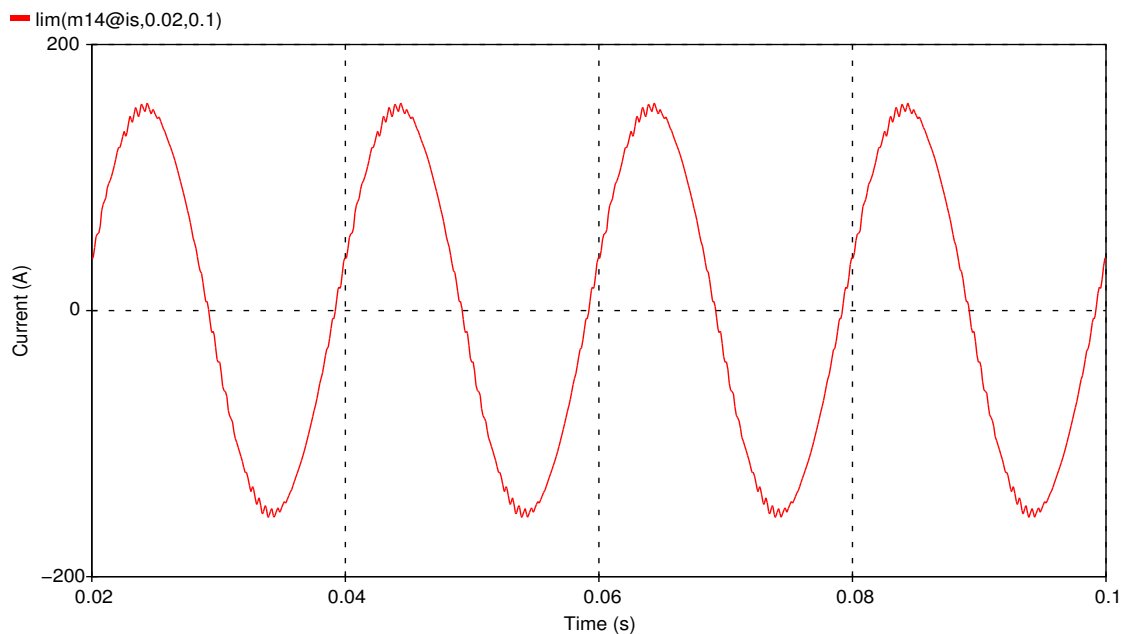
Udio pojedinog višeg harmonika u struji napajanja je značajno manji u usporedbi sa slučajem kada se elektrovučno vozilo pokreće istosmjerni motorima s diodnim ispravljačem. Bitna je razlika i u sastavu harmonika. Dok je kod istosmjernih motora harmonijsku analizu potrebno raditi do 13. harmonika, za slučaj elektromotornog vlaka pojavljuju se i harmonici iznad 40. Preglednosti radi, prikazani su slikom 2.25 udjeli pojedinih harmonika za struju prikazanu na slici 2.26. Harmonijski spektar usporediv je sa spektrom u [42].



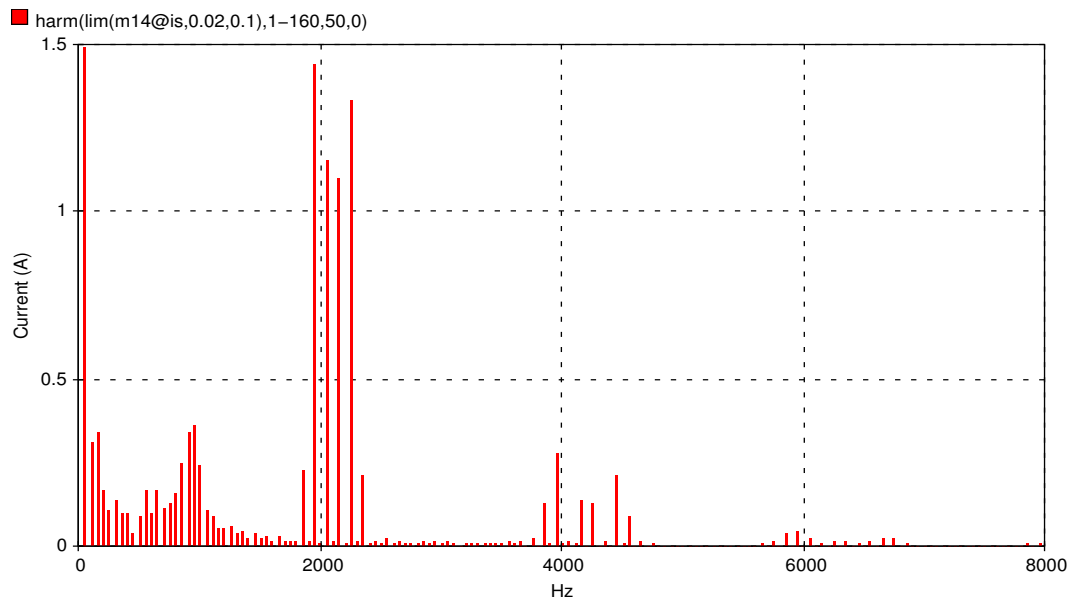


Slika 2.25 Udio pojedinih harmonika u struji napajanja elektromotornog vlaka

Potrebno je, koristeći mjerenja, dobivene valne oblike usporediti s dostupnim oblicima struje napajanja dobivenim mjerenjima i u literaturi [43]. Na slici 2.26 prikazan je oblik izmjerene struje na 25 kV strani u elektrovučnoj podstanici koji se može usporediti s oblikom dobivenim modelom u programu ATP. Kao i kod harmonijskog spektra, vidljivo je dobro poklapanje izmjerenih i izračunatih vrijednosti.

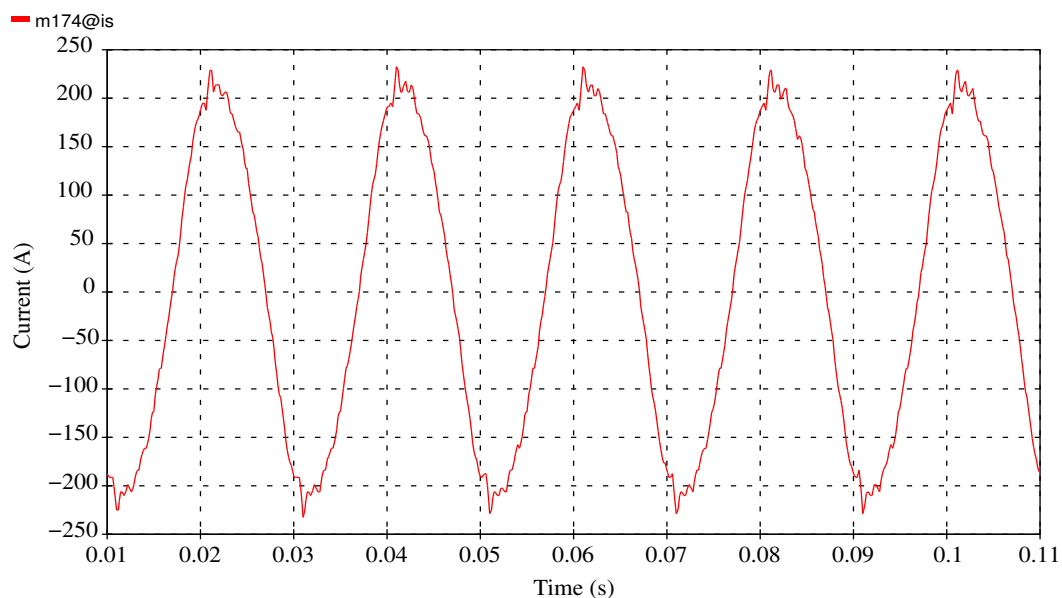


Slika 2.26 Izmjereni valni oblik struje napajanja elektromotornog vlaka u elektrovučnoj podstanici

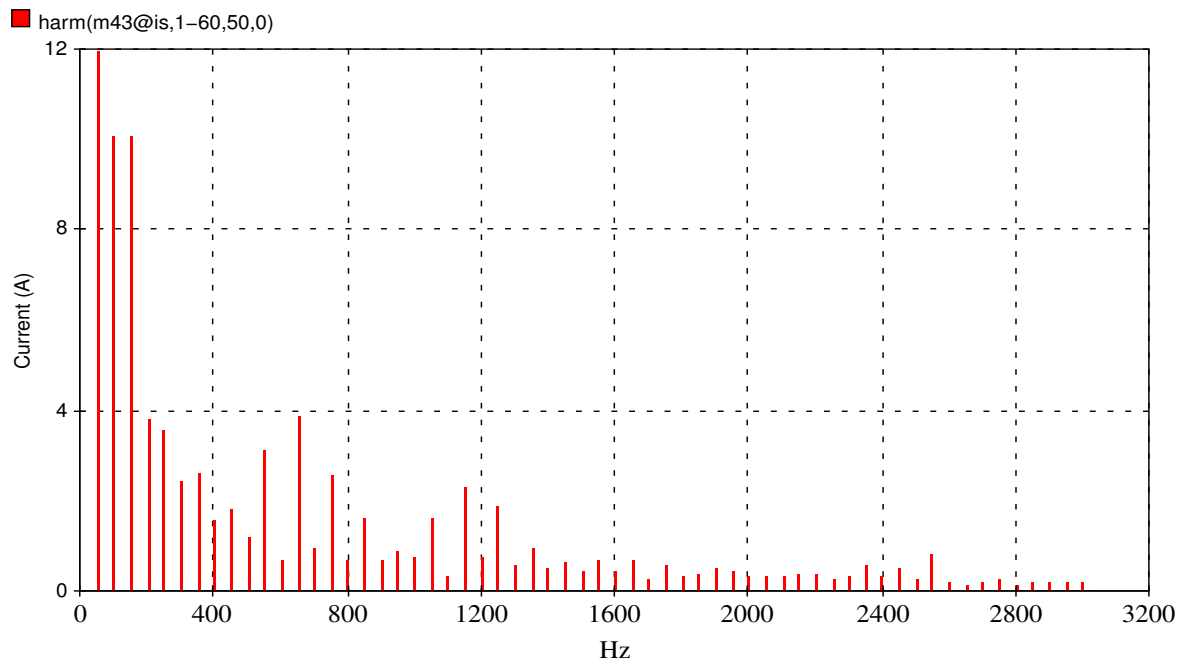


Slika 2.27 Harmonijska analiza struje napajanja elektromotornog vlaka (mjerenje)

Potrebno je, koristeći mjerenja, dobivene valne oblike usporediti s dostupnim oblicima struje napajanja dobivenim mjerenjima i u literaturi [43]. Na slici 2.26 prikazan je oblik izmjerene struje koji se može usporediti s oblikom dobivenim modelom u programu ATP te njezina harmonijska analiza slikom 2.27 Kao i kod harmonijskog spektra, vidljivo je dobro poklapanje izmjerenih i izračunatih vrijednosti. Mjerenje je obavljeno u elektrovučnoj podstanici preko mjernih transformatora na 25 kV strani.



Slika 2.28 Izmjereni valni oblik struje rekuperacije elektromotornog vlaka



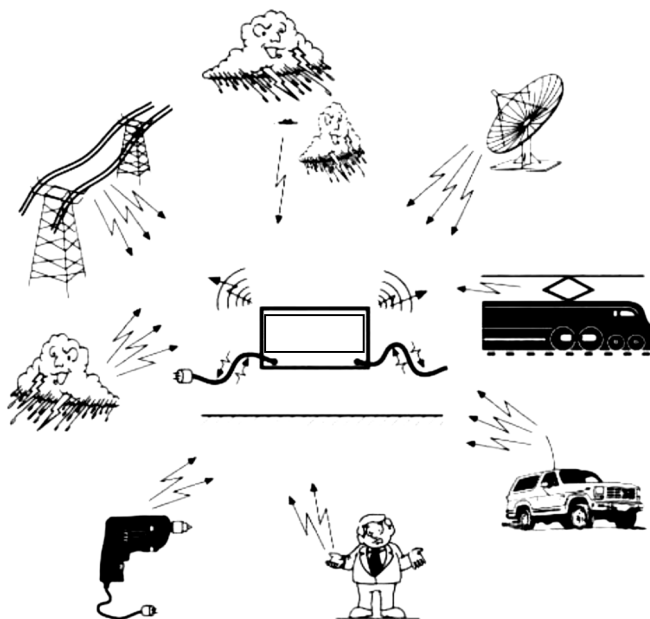
Slika 2.29 Harmonijska analiza struje rekuperacije elektromotornog vlaka (mjerjenje)

Struja napajanja elektromotornog vlaka i struja rekuperacije (slike 2.28 i 2.29) prikazane na prethodnim slikama imaju oblike koji se bitno ne razlikuju. Obje su izmjerene preko mjernog transformatora u elektrovučnoj podstanici. Maksimalna struja napajanja nekog elektrovučnog vozila veća je ili jednaka struji rekuperacije. Ovisno o pogonskom stanju, sadržaj viših harmonika može biti različit, no izrazito je dominantan osnovni harmonik. Omjer amplitude najznačajnijeg višeg harmonika ne prelazi 5% vrijednosti osnovnog harmonika za razliku od struje napajanja vozila s diodnim ispravljačem gdje se taj udio penje i iznad 20%.

U nastavku će se ocijeniti veza struje napajanja i struje rekuperacije s veličinom i oblikom induciranog napona. Oblici struja uzet će se u obzir pri proračunu sa stvarnim valnim oblicima.

### 3 PRENOŠENJE POREMEĆAJA I OSJETLJIVI SUSTAVI

Električna oprema dimenzionirana je i prilagođena radu na nominalnim naponskim i strujnim uvjetima. Ovi uvjeti se, ovisno o sustavu u kojem oprema obavlja svoju funkciju, bitno razlikuju. Različiti su utjecaji koji mogu imati negativan učinak na učinkovitost rada nekog osjetljivog sustava. Izvori smetnji mogu imati različite amplitude i frekvencije. Na slici 3.1 prikazani su neki od izvora smetnji poput udara munja, visokonaponskih vodova, uređaja s istosmjernim motorima, visokofrekvencijske antene, komunikacijski uređaji, itd. U ovome radu posebna pažnja posvećena je sustavu električne željeznice [52].



Slika 3.1 Izvori poremećaja [52]

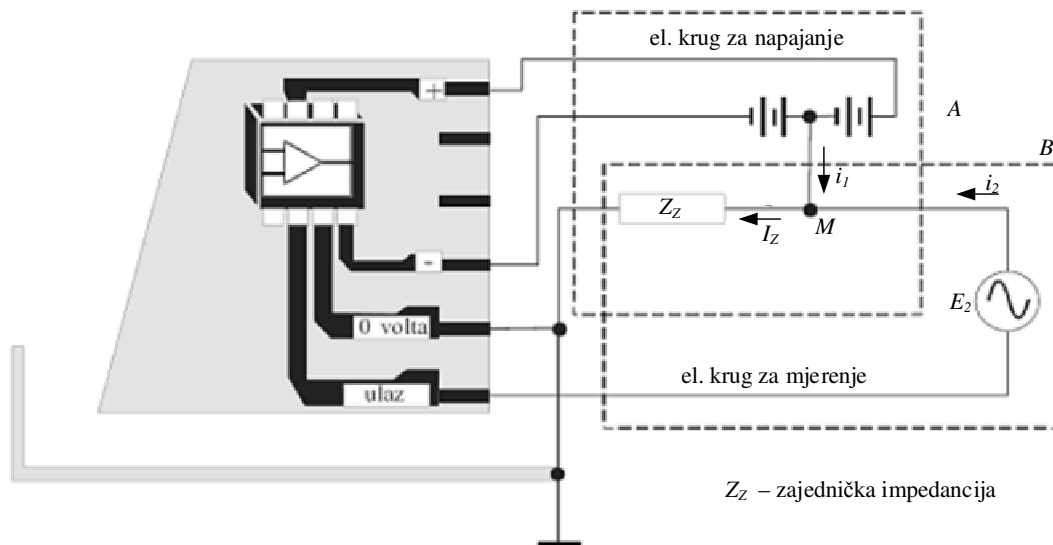
Ukoliko u sustavu postoji poremećaj ili smetnja, nameće se pitanje na koji način se može djelovati predostrožno te poduzeti mjere i radnje u cilju smanjenja negativnih učinaka. U osnovi djelovati se može u tri pravca:

- Smanjenje emisije neželjenog poremećaja,
- Onemogućavanje prijenosa poremećaja,
- Zaštita osjetljivog sustava.

U ovom poglavlju razmatrat će se druga i treća točka odnosno način prijenosa poremećaja i mogućnosti smanjenja učinkovitosti toga prijenosa i to prije svega induktivnom vezom koja je od posebnog interesa u željezničkom sustavu. Osim induktivne veze, postoje i galvanska te kapacitivna veza koje su posljedica veze dvaju nezavisnih sustava preko impedancije [11].

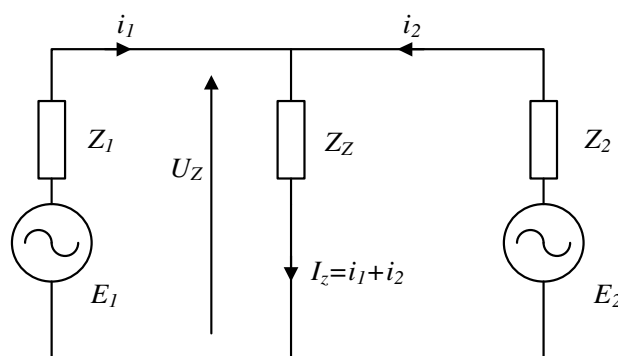
Galvanska sprega događa se u slučajevima kada postoji zajednička impedancija preko koje se zatvaraju dva ili više električnih krugova. Zajednička impedancija može biti zajednička masa, uzemljivač ili nešto treće.

Na slici 3.2 [53] prikazan je primjer kojim se zorno može objasniti važnost galvanske sprege. Struja smetnje u krugu napajanja A može u strujnom krugu B inducirati neželjene napone. Uzmemo li referentnu točku M u krugu B, njen će se napon, u tom slučaju, mijenjati što može uzrokovati poremećaj.



Slika 3.2 Sprega preko zajedničke impedancije [53]

U primjeru sa slike 3.2 zajednička impedancija ( $Z_z$ ) može biti nekoliko metara zajedničkog kabela koji povezuje dva strujna kruga. Iznos perturbacije može se vidjeti iz nadomjesne sheme na slici 3.3 [53].



Slika 3.3 Struja kroz zajedničku impedanciju

Napon na zajedničkoj impedanciji je:

$$U_z = I_z \cdot Z_z \quad (3.1)$$

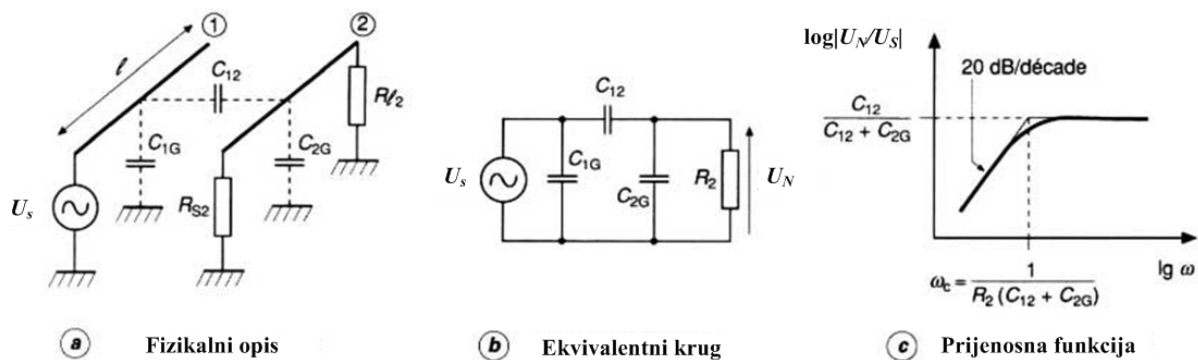
gdje je:

$U_Z$  napon na zajedničkoj impedanciji  $Z_Z$ ,

$I_Z$  struja kroz zajedničku impedanciju (struja perturbacije).

Vrijednost zajedničke impedancije općenito je malena na niskim frekvencijama. Tako pri pogonskoj frekvenciji iznos impedancije najčešće ne prelazi  $1 \Omega$ .

Kapacitivna sprega se odvija u slučaju nagle promjene napona, bilo između dvaju vodiča, bilo između vodiča i zemlje, prilikom čega se formira elektromagnetsko polje sa svojstvima električnog polja. Stvoreno polje se veže s metalnom strukturom bliskog objekta, čime se postiže kapacitivna sprega. Slikom 3.4 prikazana je ova sprega [52].

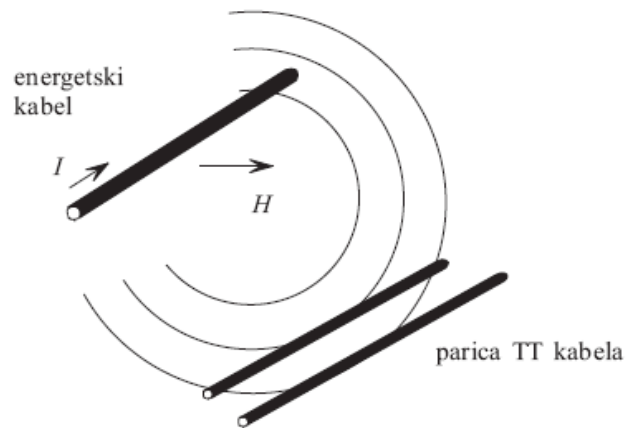


Slika 3.4 Kapacitivna sprega [52]

Napon induciran kapacitivnom spregom može se izračunati iz pojednostavljene sheme na slici 3.4b:

$$U_N = U_s \frac{j\omega R_2 C_{12}}{1 + j\omega R_2 (C_{12} + C_{2G})} \quad (3.2)$$

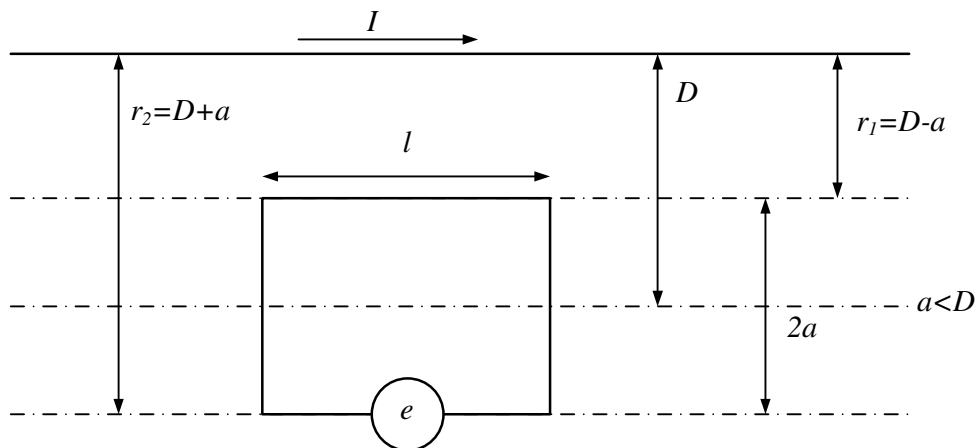
Na sličan način promjena struje u jednom strujnom krugu stvara elektromagnetsko polje koje se uz neka pojednostavljenja može smatrati čistim magnetskim poljem. Ovo se polje veže s drugim kabelima ili zračnim vodovima te inducira određeni napon. Ova se sprega naziva induktivnom (slika 3.5). U nastavku objasnit će se parametri ove vrste sprega [53].



Slika 3.5 Induktivna sprege [53]

### 3.1 Parametri induktivne sprege

Induktivnom vezom naziva se svaka povezanost dvaju sustava koji međusobno utječu jedan na drugoga uslijed protjecanja električne struje. Induktivna veza moguća je radi induciranja napona u petlji koja se nalazi u izmjeničnom magnetskom polju.



Slika 3.6 Model induktivne sprege

Magnetsko polje koje se javlja u okolini beskonačno dugog vodiča (slika 3.6 [54]) protjecanog strujom može se dobiti iz jednadžbe:

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (3.3)$$

gdje je:

$I = I_0 \sin(\omega t)$  struja kroz vodič,

$r$  udaljenost od vodiča.

Magnetski tok koji ovo polje uzrokuje u petlji ploštine  $S$  jednak je:

$$\Phi = \iint_S \mu_0 \mu_r H \cdot \vec{n} \cdot \vec{dS} \quad (3.4)$$

gdje je:

$\mu_0$  permeabilnost vakuuma,

$\mu_r$  relativna permeabilnost prostora,

$\vec{n}$  jedinični vektor u smjeru rasprostiranja magnetskog polja,

$\vec{dS}$  jedinična ploština petlje.

Dalje se može pisati:

$$\Phi = \iint_S \mu_0 \mu_r H \cdot \vec{n} \cdot \vec{dS} = \mu_0 \mu_r l \int_{D-a}^{D+a} \frac{I}{2\pi r} dr = \frac{\mu_0 \mu_r l \cdot I_0 \sin(\omega t)}{2\pi} \ln \frac{D+a}{D-a} \quad (3.5)$$

Inducirani napon jednak je, prema definiciji, promjeni magnetskog toka u vremenu:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = \frac{\mu_0 \mu_r l \cdot I_0 \omega \cos(\omega t)}{2\pi} \ln \frac{D+a}{D-a} = -\omega \cdot M \cdot I_0 \cos(\omega t) \quad (3.6)$$

gdje je:

$$M = \frac{\mu_0 \mu_r l}{2\pi} \ln \frac{D+a}{D-a} \quad \text{međusobna impedancija sustava.}$$

### 3.1.1 Međuintektivitet

Prema normi [55] međuintektivitet dvaju sustava može se odrediti ovisno o udaljenosti sustava  $a$  kao:

$$M(a) = 100 \ln \left( 1 + \frac{\lambda^2}{a^2} \right) \quad (3.7)$$

uz

$$\lambda = 10^2 \sqrt{\frac{60\rho}{f}} \quad (3.8)$$

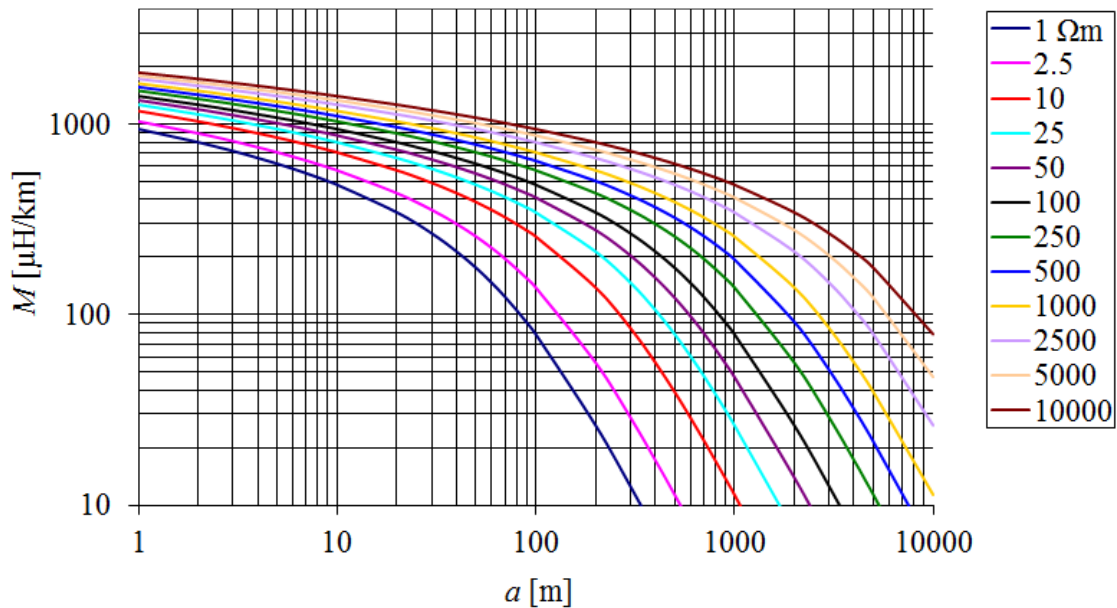
gdje je:

$\rho$  specifični otpor tla,

$f$  frekvencija.

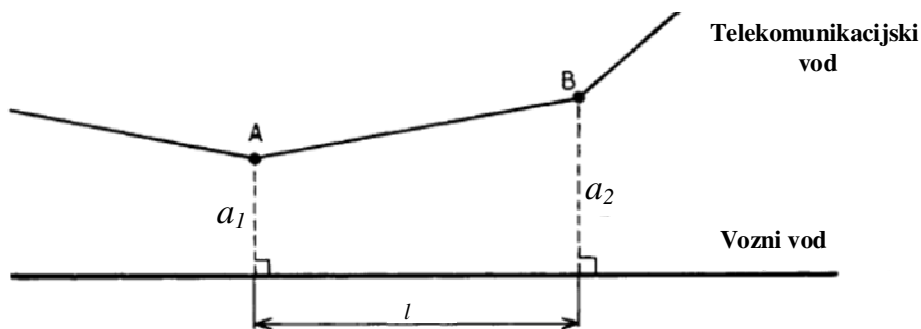


Pri frekvenciji 50 Hz, određene su vrijednosti međuinduktiviteta u ovisnosti o udaljenosti vodiča pri određenim vrijednostima specifičnog otpora tla.



Slika 3.7 Međuinduktivitet vodiča u ovisnosti o udaljenosti i specifičnom otporu tla [56]

U stvarnom pogonu udaljenost između izvora smetnje i osjetljivog sustava često nije stalna odnosno ovi sustavi se ne vode paralelno. Sustavi se mogu međusobno približavati ili udaljavati, a za proračun induciranog napona potrebno je odrediti srednju udaljenost preko koje će se doći do međuinduktiviteta [55].

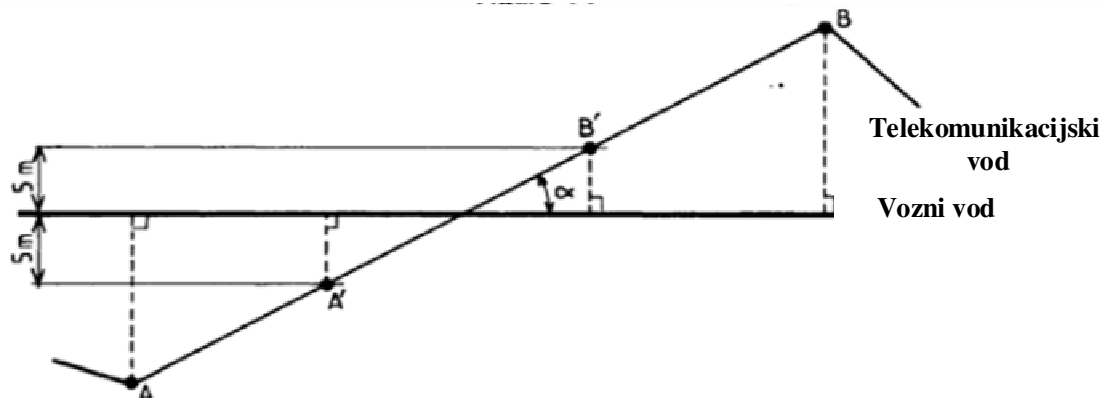


Slika 3.8 Koso približavanje sustava [55]

Neka je na promatranom segmentu duljine  $l$  udaljenost sustava  $a_1$  i  $a_2$ ,  $\frac{1}{3} \leq \frac{a_1}{a_2} \leq 3$ . Koristeći formulu (3.7), međuinduktivitet se u ovom slučaju kosog približavanja može izraziti u ovisnosti o geometrijskoj sredini krajnjih udaljenosti na segmentu:

$$M(a) = 100 \ln \left( 1 + \frac{\lambda^2}{a_1 \cdot a_2} \right) \quad (3.9)$$

U slučaju križanja vodova, proračun se treba prilagoditi načinu križanja odnosno kutu koji vodovi zatvaraju na presjecištu (slika 3.9).



Slika 3.9 Koso približavanje sustava [55]

Uz krajnje točke A i B, određene su i točke A' i B' koje označavaju mjesta na vođu osjetljivog sustava udaljene 5 m od voda izvora smetnje. Na dijelu AA' i BB' proračun se obavlja kao kod kosog približavanja, a na dijelu A'B' potrebno je razmotriti veličinu kuta  $\alpha$ .

Za slučaj kada je  $\alpha > 45^\circ$  utjecaj je zanemariv. U suprotnom, utjecaj se računa kao da su sustavi paralelni i međusobno udaljeni 5 m na duljini između oktogonálnih projekcija točaka A' i B'.

## 3.2 Redukcijski faktori

Kada se razmatra magnetski utjecaj, ključnu ulogu imaju podsustavi koji uzrokuju smetnje i podsustavi koji su na smetnje osjetljivi. Ipak, i drugi objekti u sustavu utječu na veličinu smetnje. Ovdje se, prije svega, misli na objekte koji imaju svojstvo vođenja električne struje poput vodiča i tračnica, ali i metalnih objekata koji nemaju izravne veze sa željezničkim elektrotehničkim sustavom. Svi ovi objekti utječu na smanjenje iznosa smetnje na osjetljivom podsustavu, a njihov se učinak može ocijeniti redukcijskim faktorima.

Tračnice i povratno užde utječu na smanjenje inducirano napona preko povratnih struja koji njima teku te smanjenja magnetskog polja. Zaštitna užad i ekrani kabela preuzimaju na sebe dio inducirane struje. Uzemljeni metalni objekti i ostali vodljivi objekti, poput drveća uz prugu, također djeluju na smanjenje veličine inducirane smetnje, no njihov je utjecaj teško procijeniti.

U ovom poglavlju razmatrat će se učinak različite konfiguracije željezničkog sustava na veličinu inducirane smetnje, a posebno učinci povratne i zaštitne užadi i tračnica.

### 3.2.1 Definicija redukcijskog faktora

Općenito pri proučavanju magnetskog utjecaja može se definirati izvor poremećaja kao podsustav u kojem protječe struja poremećaja i koji utječe na osjetljivi sustav na kojem se pojavljuju inducirane veličine napona i struje. Kada u okolini izvora poremećaja ili osjetljivog sustava (telekomunikacijski vodovi, cjevovodi, ...) postoje uzemljeni vodiči poremećaj se prenosi i na njih. Oni se nazivaju zaštitna užad pošto imaju zaštitni učinak i djeluju na smanjenje inducirano napona na osjetljivim sustavima.

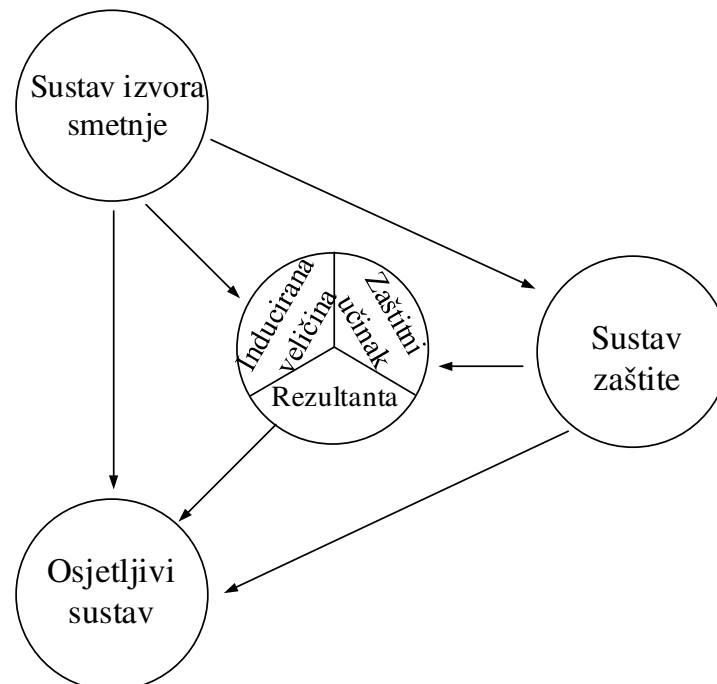
Veličina zaštitnog učinka se izražava faktorom redukcije koji pokazuje omjer inducirane veličine sa zaštitnim učincima i bez njih. Redukcijski faktor stoga se definira kao:

$$k = \frac{\text{inducirana veličina sa zaštitnim učincima}}{\text{inducirana veličina bez zaštitnih učinaka}} \quad (3.10)$$

Jasno je da manji redukcijski faktor predstavlja bolji zaštitni učinak uzemljenog vodiča. Vrijednost redukcijskog faktora kreće se u rasponu od 0 (savršena zaštita) do 1 (bez zaštite).

Redukcijski faktor je kompleksan broj jer predstavlja omjer dvaju vektora. U najvećem dijelu praktičnih slučajeva njegova apsolutna vrijednost je dovoljna za opis veličine zaštite te se često predstavlja kao realan broj ili u dB.

Na slici 3.10 [57] shematski je prikazan opis djelovanja redukcijskog faktora. Veza između uzročnika smetnje, osjetljivog podsustava i podsustava uzemljene zaštitne užadi je međuinduktivna.



Slika 3.10 Međudjelovanje sustava izvora smetnje na osjetljivi sustav preko sustava zaštite

Inducirana veličina ima dimenziju električnog polja, a opisuje veličinu inducirane smetnje po jedinici duljine osjetljivog sustava. Prema slici 3.10 može se pisati da je inducirani napon uz zaštitnu užad jednak:

$$E_R = E_A + E_B \quad (3.11)$$

pa se za reduksijski faktor može pisati:

$$k = \frac{E_R}{E_A} = \frac{E_A + E_B}{E_A} \quad (3.12)$$

gdje je:

$E_R$  rezultanta inducirane veličine,

$E_A, E_B$  inducirana veličina bez i sa zaštitnim učinkom.

Ova formula predstavlja reduksijski faktor na nekoj lokaciji utjecaja. Srednja vrijednost reduksijskog faktora na nekom dijelu između položaja  $l_1$  i  $l_2$  dobiva se kao:

$$k = \frac{\int_{l_1}^{l_2} E_R dl}{\int_{l_1}^{l_2} E_A dl} = \frac{\int_{l_1}^{l_2} E_A dl + \int_{l_1}^{l_2} E_B dl}{\int_{l_1}^{l_2} E_A dl} \quad (3.13)$$

gdje je  $dl$  infinitezimalni pomak po duljini vodiča izvora poremećaja.

Kakav će oblik imati formula za reduksijski faktor prije svega ovisi o složenosti promatranih podsustava i njihovom međusobnom položaju. U nastavku će se razmotriti specifični slučajevi koji se susreću u željezničkim sustavima.

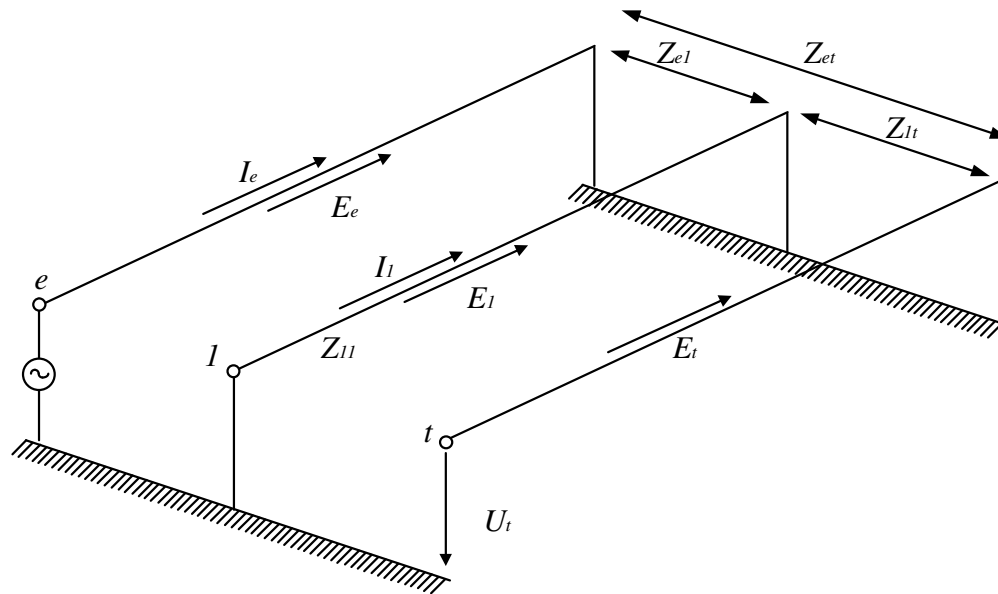
### 3.2.2 Uzemljeno zaštitno uže

Uz dijelove osjetljivih podsustava ili uz vodiče kojima teče struja koja može izazvati smetnje, postavljaju se zaštitna užad. U pravilu je riječ o neizoliranim vodičima položenim u zemlju ili blizu njezine površine te se može uzeti da su uzemljena po cijeloj duljini. Ovo je ispunjeno i u slučaju da je zaštitno uže uzemljeno, no ima spojeve sa zemljom preko uzemljivačkih elektroda. Ovakva užad mogu se smatrati savršenim vodičima ukoliko im je duljina dovoljno velika u odnosu na valnu konstantu jer se tada rubni učinci mogu zanemariti. Također, prigušenje na njima treba biti dovoljno veliko kako bi struja kroz njih slijedila promjene struje smetnje odnosno inducirano napona.

Kako bi se odredila veličina redukcije razmatrat će se specifične konfiguracije s različitim brojem i položajem povratnih vodiča ili zaštitne užadi [57].

### 3.2.2.1 Jedno zaštitno ili povratno uže

Razmotrimo sustav s jednim zaštitnim ili povratnim užetom kako je prikazano slikom 3.11. Vod pod naponom je označen s "e" i pretpostavljena je struja kroz njega „ $I_e$ “. Osjetljivi vod označen s "t" i predstavlja telekomunikacijski vod otvoren na jednom kraju. U sustav je postavljeno i zaštitno uže označeno s "l" koje je uzemljeno po cijeloj duljini i kojim teče struja „ $I_l$ “.



Slika 3.11 Zaštitni sustav s jednim zaštitnim užetom

Koristeći oznake za vlastitu i međusobnu impedanciju vodiča sa zemljom kao povratnim putem može se za izvor smetnje i osjetljivi sustav pisati:

$$\begin{cases} E_t = Z_{et}I_e + Z_{l1}I_l \\ 0 = Z_{e1}I_e + Z_{l1}I_l \end{cases} \quad (3.14)$$

gdje je:

$E_t$  inducirani napon na osjetljivom sustavu;

$Z_{e1}$  međuiimpedancija izvora smetnje i zaštitnog užeta;

$Z_{l1}$  međuiimpedancija zaštitnog užeta i osjetljivog sustava;

$Z_{et}$  međuiimpedancija izvora smetnje i osjetljivog sustava.

Iz druge jednadžbe dobiva se:

$$I_l = -\frac{Z_{e1}}{Z_{l1}}I_e \quad (3.15)$$

te se uvrštavanjem u prvu jednadžbu dobiva:

$$E_t = Z_{et} I_e \left( 1 - \frac{Z_{e1} Z_{1t}}{Z_{et} Z_{11}} \right) \quad (3.16)$$

kada zaštitno uže ne bi postojalo u promatranom sustavu, inducirani napon bi iznosio:

$$E_t' = Z_{et} I_e \quad (3.17)$$

pa je redukcijski faktor prema definiciji:

$$k = \frac{E_t}{E_t'} = 1 - \frac{Z_{e1} Z_{1t}}{Z_{et} Z_{11}} \quad (3.18)$$

Ovaj izraz općenito opisuje veličinu redukcijskog faktora za opisani sustav. Ipak, u praktičnim slučajevima mogu se uvesti pojednostavljenja. Zaštitno uže je u pravilu postavljeno u blizini izvora smetnje (voznog voda) (1) i tada se naziva povratno uže ili u blizini osjetljivog sustava (telekomunikacijski vod) (2). U ovim konfiguracijama postiže se značajno bolji učinak zaštite (smanjenje apsolutne vrijednosti redukcijskog faktora).

Za slučaj (1) može se pretpostaviti da je

$$Z_{et} = Z_{1t} \quad (3.19)$$

pa izraz (3.18) prelazi u

$$k = \frac{E_t}{E_t'} = 1 - \frac{Z_{e1}}{Z_{11}} \quad (3.20)$$

Za slučaj (2) vrijedi:

$$Z_{et} = Z_{e1} \quad (3.21)$$

pa izraz (3.18) prelazi u

$$k = \frac{E_t}{E_t'} = 1 - \frac{Z_{1t}}{Z_{11}} \quad (3.22)$$

Redukcijski faktor možemo za ovaj slučaj izraziti i preko veličina struja jer je:

$$E_t = Z_{et} (I_e + I_1) \quad (3.23)$$

te je redukcijski faktor

$$k = \frac{E_t}{E_t'} = \frac{Z_{et} (I_e + I_1)}{Z_{et} I_e} = \frac{I_e + I_1}{I_e} \quad (3.24)$$

Ovaj omjer sadrži vektorske veličine pri čemu struja kroz vodni vod i struja kroz zaštitno ili povratno uže imaju suprotan smjer, a samim time i suprotan predznak pa je vrijednost redukcijskog faktora uvijek manja od jedinice. Ovo daje opravdanje za računanje redukcijskog faktora preko struja koje se mogu odrediti proračunom ili mjerenjem u promatranom sustavu.

Pri proračunu redukcijskog faktora nužno je dakle poznavati impedancije i međuimpedancije u sustavu. U frekvencijskoj domeni izraz 3.22 je jednak

$$k = \frac{R_{11} - R_{1t} + j\omega(L_{11} - L_{1t})}{R_{11} + j\omega L_{11}} \quad (3.25)$$

Prema Carson-Clemovoj formuli opisanoj u poglavlju 2. imaginarni dio brojnika iznosi

$$\omega(L_{11} - L_{1t}) = \omega \cdot 2 \cdot 10^{-4} \left( \ln \frac{D_e}{r'_1} - \ln \frac{D_e}{d_{1t}} \right) = \omega \cdot 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{d_{1t}}{r'_1} \quad (3.26)$$

Imaginarni dio nazivnika iznosi:

$$\omega L_{11} = 2 \cdot \pi f \cdot 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{659}{r'_1} \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (3.27)$$

### 3.2.2.2 Dva zaštitna ili povratna užeta

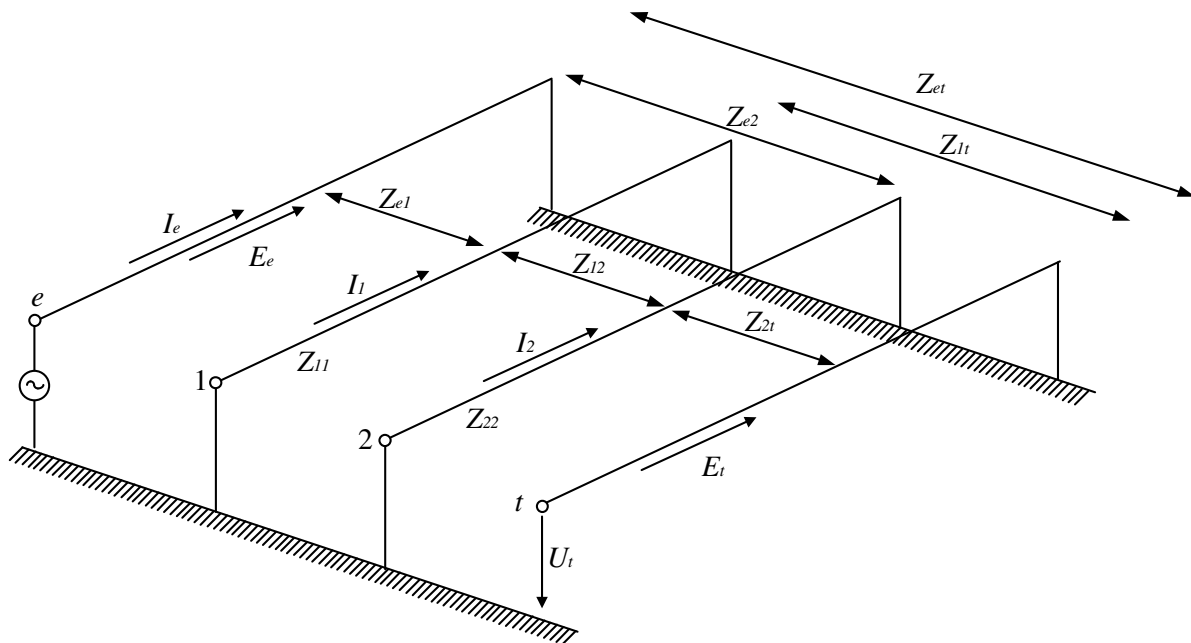
Postave li se u sustav s izvorom smetnje i osjetljivim sustavom dva užeta, zaštitna ili povratna, obadva će doprinijeti smanjenju vrijednosti redukcijskog faktora odnosno smanjenju utjecaja. Ovaj slučaj prikazan je slikom 3.12. Na slici su označene i impedancije pojedinih vodiča kao i međuimpedancije. Pretpostavljajući određene struje u svakom pojedinom vodiču može se pisati:

$$\begin{cases} E_t = Z_{et} I_e + Z_{t1} I_1 + Z_{t2} I_2 \\ 0 = Z_{1e} I_e + Z_{11} I_1 + Z_{12} I_2 \\ 0 = Z_{2e} I_e + Z_{21} I_1 + Z_{22} I_2 \end{cases} \quad (3.28)$$

uz pretpostavku da je  $Z_{t1} = Z_{1t}$ ,  $Z_{12} = Z_{21}$ , itd.

Inducirani napon bez postavljene zaštitne užadi je:

$$E'_t = Z_{te} I_e \quad (3.29)$$



Slika 3.12 Zaštitni sustav s dva zaštitna užeta [57]

Koristeći se prethodnim jednadžbama uz jednostavne aritmetičke operacije dobiva se da je omjer induciranog napona uz instalirana dva zaštitna užeta i bez zaštitne užadi jednak:

$$k_{12} = \frac{E_t}{E'_t} = 1 - \frac{Z_{t1}(Z_{e1}Z_{22} - Z_{e2}Z_{12}) + Z_{t2}(Z_{e2}Z_{11} - Z_{e1}Z_{12})}{Z_{e1}(Z_{11}Z_{22} - Z_{12}^2)} \quad (3.30)$$

Ova formula je općenita i ne pokazuje kako pojedino zaštitno uže utječe na vrijednost redukcijskog faktora. U praktičnim slučajevima obično se zaštitna užad postavlja u blizinu izvora smetnje i osjetljivog vodiča. U takvoj konfiguraciji (slika 3.13) moguće je uvesti sljedeće pretpostavke:

$$Z_{e1} = Z_{e2} = Z_{12} = Z_{1t} \quad (3.31)$$

Izraz (3.30) uz ove pretpostavke poprima jednostavniji oblik:

$$k_{12} = \frac{(Z_{11} - Z_{e1})(Z_{22} - Z_{2t})}{Z_{11}Z_{22} - Z_{12}^2} \quad (3.32)$$



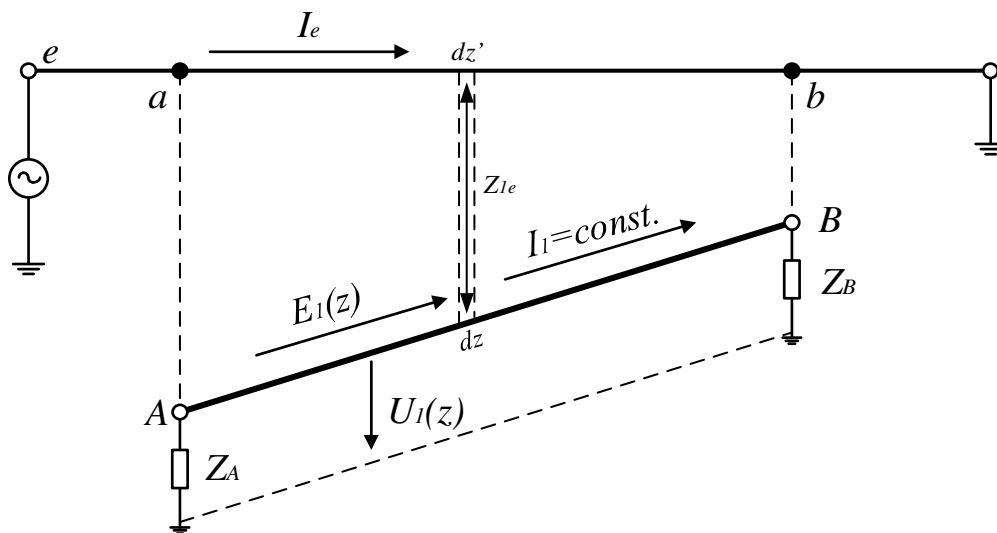


Valja uočiti da redukcijfski faktor, opisan formulama u ovom poglavlju, ne ovisi o udaljenosti izvora smetnje i osjetljivog sustava pa se ovako dobiveni faktori mogu koristiti i pri proračunima kod kosog približavanja. Ipak, s ovim zaključkom treba biti oprezan jer treba imati na umu pretpostavku pomoću kojih su izvedene formule, odnosno da je zaštitno uže postavljeno značajno bliže izvoru smetnje ili osjetljivom sustavu nego što je udaljenost izvora smetnje od osjetljivog sustava.

### 3.2.3 Zaštitno uže uzemljeno na krajevima

U prethodnom poglavlju pretpostavljeno je da je zaštitno uže kontinuirano uzemljeno po cijeloj svojoj duljini. To je ispunjeno ukoliko se ovo uže nalazi ukopano u zemlji ili je postavljeno na površinu zemlje uz osiguran stalan kontakt sa zemljom. Nerijetki su slučajevi da se zaštitno uže postavlja na stupove nadzemnih vodova. U tom slučaju stalno uzemljenje nije ostvareno, već se uže uzemljuje preko stupova na kojima je ovješeno. Njegova učinkovitost se u ovom slučaju smanjuje.

Pretpostavimo da je zaštitno uže spojeno na uzemljivač preko impedancija  $Z_A$  i  $Z_B$  kako je prikazano slikom 3.14. U praksi se obično radi o čistim otporima koji vrijednošću ne prelaze nekoliko desetaka  $\Omega$ .



Slika 3.14 Zaštitno uže uzemljeno na krajevima

Veličina struje kroz poprečne kapacitete obično ima značajno manji iznos od uzdužne struje te se može uzeti da je struja  $I_1$  kroz zaštitno uže stalna po amplitudi i kutu po cijeloj duljini  $l_{AB}$  i da njezin iznos:

$$I_1 = - \frac{\int_A^B E_1(z) dz}{Z_{11} \cdot l_{AB} + Z_A + Z_B} \quad (3.35)$$

Brojnik prethodnog izraza predstavlja ukupan napon induciran na zaštitnom užetu po jedinici duljine, a  $Z_{11}$  je vlastita impedancija zaštitnog užeta po jedinici duljine. Zbroj impedancija u nazivniku je ukupna impedancija petlje zaštitno uže – zemlja.

Ukoliko se izvor smetnje i osjetljivi vod koso približavaju (udaljuju) ukupan inducirani napon potrebno je računati kao sumu doprinosa svakog kratkog dijela na kojem se može pretpostaviti paralelan pogon, odnosno uz oznake sa slike 3.14:

$$\int_A^B E_1(z) dz = \int_a^b Z_{1e} I_e dz' \quad (3.36)$$

Na kraćim duljinama učinci prigušenja i faznog pomaka struje smetnje mogu se zanemariti pa se njezina vrijednost može smatrati stalnom te se piše:

$$\int_a^b Z_{1e} I_e dz' = I_e \int_a^b Z_{1e} dz' = \overline{Z_{1e}} \cdot l_{ab} \cdot I_e \quad (3.37)$$

gdje je:

$\overline{Z_{1e}}$  prosječna vrijednost međuimpedancije između izvora smetnje i zaštitnog užeta.

Uz ove oznake dobiva se vrijednost struje kroz zaštitno uže:

$$I_1 = - \frac{\overline{Z_{1e}} \cdot l_{ab}}{Z_{11} \cdot l_{AB} + Z_A + Z_B} I_e \quad (3.38)$$

odnosno pri paralelnom pogonu kada je  $l_{AB} = l_{ab}$ :

$$I_1 = - \frac{\overline{Z_{1e}}}{Z_{11} + \frac{Z_A + Z_B}{l_{AB}}} I_e = - \frac{\overline{Z_{1e}}}{Z_{11}} I_e \quad (3.39)$$

gdje je  $Z_{11}$  ekvivalentna vlastita impedancija zaštitnog užeta s povratnim putem kroz zemlju.

### 3.3 Osjetljivi sustavi u koridoru pruge

Metalne strukture u koridoru elektrificirane pruge mogu imati različite namjene, a upravo one određuju način izvedbe takvih struktura. Kada se govori o opasnosti od induciranja prevelikih vrijednosti napona na osjetljivim strukturama, onda položaj takve strukture u odnosu na prugu ima presudan značaj na veličinu utjecaja. Duljina paralelnog vođenja i srednja geometrijska udaljenost dionica od osi pruge određene su geografskim smještajem istih, a inducirani napon je tim veći što je udaljenost sustava manja i duljina paralelnog vođenja veća. U tom smislu, telefonski vodovi i cjevovodi predstavljaju strukture od posebnog interesa za izučavanje zbog duljine paralelnog vođenja uz pruge. Da bi se električki prikazale ove strukture, potrebno ih je predstaviti električkim svojstvima odnosno impedancijama. Općenito, impedancije ovise o geometriji sustava i svojstvima materijala iz kojeg su izvedeni vodiči.

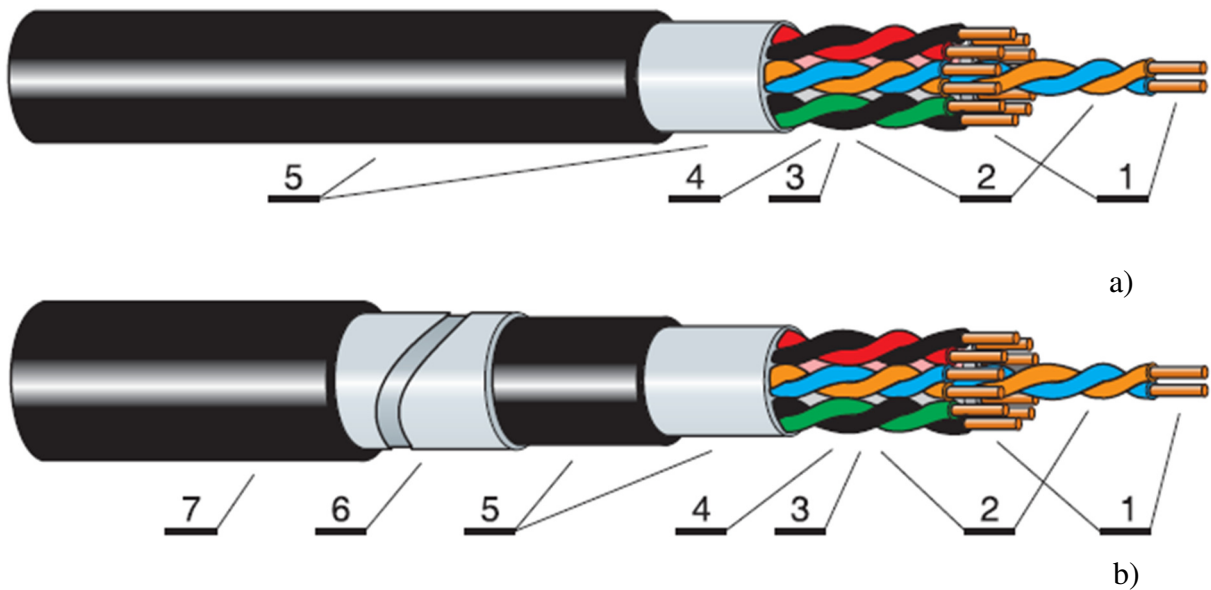
U ovom potpoglavlju dat će se pregled električnih svojstava telekomunikacijskih vodova i cjevovoda te opisat način određivanja uzdužne i poprečne impedancije.

#### 3.3.1 Telekomunikacijski vodovi

Razvoj telekomunikacijskog prometa doveo je do oblikovanja mnoštva različitih tipova kabela i zračnih vodova za prijenos informacija. Kada se telekomunikacijski vodovi razmatraju u kontekstu opasnosti od inducirano napona, potrebno je izdvojiti samo vodove koji svojom duljinom i položajem mogu postati dio međukruga u kojem bi se inducirao opasan napon. U gusto naseljenim mjestima vodovi su, u pravilu, kratki i spajaju centrale s korisnicima, postoje brojni uzemljivači i objekti koji sprečavaju induciranje napona. U tom smislu, potrebno je izdvojiti međumjesne vodove i razmotriti njihove uobičajene izvedbe. U ovom radu naglasak je na proučavanju izvora inducirano napona odnosno sustava električne željeznice te se neće detaljno ulaziti u izvedbe telekomunikacijskih vodova. Ipak, potpunosti radi, potrebno je naglasiti da se međumjesni vodovi izvode kao kabeli i da njihova konstrukcija može bitno utjecati na vrijednosti induciranih napona. Posebno je važan gradivni element kabela metalni oklop koji, ukoliko postoji, značajno smanjuje vrijednost inducirano napona. Kako bi se reducirali troškovi gradnje vodova često se koriste kabeli koji nemaju metalni oklop. Proizvođači kabela u svojim katalozima daju redukcijske faktore svakog pojedinog kabela stoga nije potrebno posebno promatrati utjecaj metalnog oklopa pa će se u ovom radu razmatranja ograničiti na kabele bez oklopa.

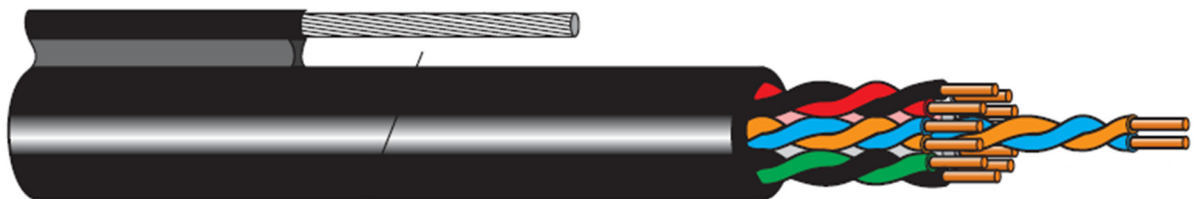
Na slici 3.15 prikazani su presjeci telekomunikacijskih kabela bez metalnog oklopa (a) tipa TK59 i s metalnim oklopom (b) tipa TK59PT [58]. Ovi se kabeli vrlo često koriste u

međumjesnom povezivanju. Ostali gradivni elementi su (1) vodič, (2) izolacija, (3) elementi použenja, (4) jezgra kabela i (5) plašt.



Slika 3.15 Konstrukcija telekomunikacijskih kabela bez (a) i s metalnim oklopom (b) [58]

Kabeli tipa TK59 i TK59PT polažu se u podzemne kanale. Kabel tipa TK53U [58] koristi se kao zračni vod te ima ugrađeno nosivo uže. Ono uz mehaničku ima i električnu ulogu te smanjuje elektromagnetske utjecaje kako je opisano u poglavlju 3.16 te se nazivna i zaštitno uže.



Slika 3.16 Konstrukcija telekomunikacijskih kabela sa zaštitnim užetom (nosivo uže) [58]

### 3.3.1.1 Električka svojstva telekomunikacijskih vodova

Osnovni električni parametri telekomunikacijskih vodova su otpor, induktivitet, kapacitet i odvod. Ovi parametri određuju se iz geometrije sustava prema izrazima koji su slični onima za određivanje impedancije vodiča električne željeznice kako je prikazano u poglavlju 2.2.3. Otpor i induktivitet čine uzdužnu granu, a kapacitet i odvod poprečnu granu modela telekomunikacijskog voda. Pri kvalitetnoj izolaciji, što je u pravilu ispunjeno, odvod se može zanemariti. Ipak, ovdje se radi o bitno drugačijim geometrijama i o izoliranim vodičima te se i

te činjenice trebaju uvažiti. Zbog toga će se u ovom dijelu ispisati izrazi vezani uz određivanje električnih svojstava telekomunikacijskih vodova pri prolaska izmjenične struje.

Vodičima telekomunikacijskih vodova pri prolasku izmjenične struje električni otpor se povećava uslijed skin efekta. U kablskim vodičima udaljenost između vodiča i metalnog plašta je relativno malena te dolazi do izražaja i pojava efekta bliskosti i efekta ekrana te pojave vrtložnih struja u vodičima i plaštu te nejednake raspodjele struje po presjeku vodiča što dodatno dovodi do porasta otpora [59]. Ova tri efekta karakteriziraju otpor vodiča pri prolasku izmjenične struje i dodaju se otporu koji vodič stvara prolasku istosmjernje struje  $R_0$ . Kako se pri izradi vodiči kabela upredaju povećava se njihova duljina, a samim time i otpor. Ovo povećanje je najveće za vodiče najudaljenije od osi kabela. Radi toga, uvodi se empirički korekcijski faktor  $\lambda > 1$  [59].

$$R = \lambda' R_0 \left[ 1 + F(x) + \frac{p \cdot G(x) \cdot \left(\frac{d}{s}\right)^2}{1 - H(x) \cdot \left(\frac{d}{s}\right)^2} \right] \left[ \frac{\Omega}{\text{km}} \right] \quad (3.40)$$

gdje je:

$\lambda'$  empirički korekcijski koeficijent,

$F(x)$  funkcije koje opisuju skin efekt i čije vrijednosti su tabelirane,

$G(x)$  i  $H(x)$  funkcije koje opisuju efekt bliskosti i čije vrijednosti su tabelirane,

$d$  promjer vodiča,

$s$  udaljenost između vodiča,

$p$  korekcijski faktor čije vrijednosti su tabelirane.

Za vodiče simetričnih kabela induktivitet se određuje prema izrazu iz [59] uz oznake kao u izrazu (3.40):

$$L = \lambda' \left[ 4 \cdot \ln \frac{2s-d}{d} + Q(x) \right] \cdot 10^{-4} \left[ \frac{\text{H}}{\text{km}} \right] \quad (3.41)$$

gdje je:

$Q(x)$  funkcija ovisna o frekvenciji i otporu  $R_0$  čije vrijednosti su tabelirane.

Kapacitet vodova ovisi o geometriji, ali i o vrijednosti dielektričnosti odnosno vrsti izolacije. Ukoliko u kابلu postoji više vrsta izolacije tada je potrebno odrediti srednju vrijednost kao omjer sume umnožaka pojedinih dielektričnosti i pripadnih površina izolacije te sume površina svih izolacija prema izrazu:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_1 S_1 + \varepsilon_2 S_2 + \dots}{S_1 + S_2 + \dots} \left[ \frac{\text{F}}{\text{km}} \right] \quad (3.42)$$

gdje je:

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$  dielektričnost pojedinog dielektrika,

$S_1, S_2$  površina poprečnih presjeka pojedinog dielektrika.

Sukladno oznakama korištenim u izrazima (3.41) i (3.42) može se za određivanje kapaciteta pisati izraz:

$$C = \frac{\lambda' \cdot \varepsilon}{36 \ln\left(\frac{2a}{d} \cdot \psi\right)} \cdot 10^{-4} \left[ \frac{\text{F}}{\text{km}} \right] \quad (3.43)$$

gdje je:

$\psi$  korekcijski koeficijent efekta bliskosti čije su vrijednosti tabelirane.

Koristeći ovdje navedene izraze može se za telekomunikacijski vod tipa TK59 dobiti vrijednost impedancije  $0,0116 + j0,628 \ \Omega/\text{km}$ .

### 3.3.2 Cjevovodi

Cjevovodi mogu imati različite namjene, no u suštini radi se o transportu znatnih količina plina ili tekućine (naftovodi, plinovodi, uljovodi, ...) Grade se iz čeličnih cijevi promjera od 200 mm do 1200 mm ovisno o potrebnoj propusnoj moći, a debljina stjenki je od 6 mm do 10 mm ovisno o pogonskom tlaku. Cijevi cjevovoda grade se u tvornicama gdje se premazuju antikorozivnom zaštitom od bitumenizirane staklene vune ili polivinilklorida debljine od 4 mm do 6 mm, a montiraju i povezuju na trasi. Ogoljeni ostaju samo krajevi cijevi radi zavarivanja prilikom montaže. Nakon ispitivanja varova obavlja se njihovo oblaganje i polaganje cjevovoda u rov.

U toku pogona na cjevovodima položenim u blizini sustava električne željeznice mogu se pojaviti opasni naponi. Pri međusobnom približavanju, paralelnog vođenja ili presijecanja trasa cjevovoda i voda visokog napona, mora se voditi računa o [60]:

- Prenosjenju potencijala s voda visokog napona na cjevovod kao uz njega položeni dojavni kabel, a preko njih i na postrojenja koja oni povezuju – rafinerije, toplane, plinare, spremišta, hidrante, ...

- Ugrožavanje statičke postojanosti stupova voda visokog napona ako se cjevovod polaže na premaloj udaljenosti odnosno ugrožavanje izolacije istog voda, ako se ispušna cijev plinovoda ili parovoda postavi na nedovoljnom razmaku.

U ovom radu od interesa je prva točka.

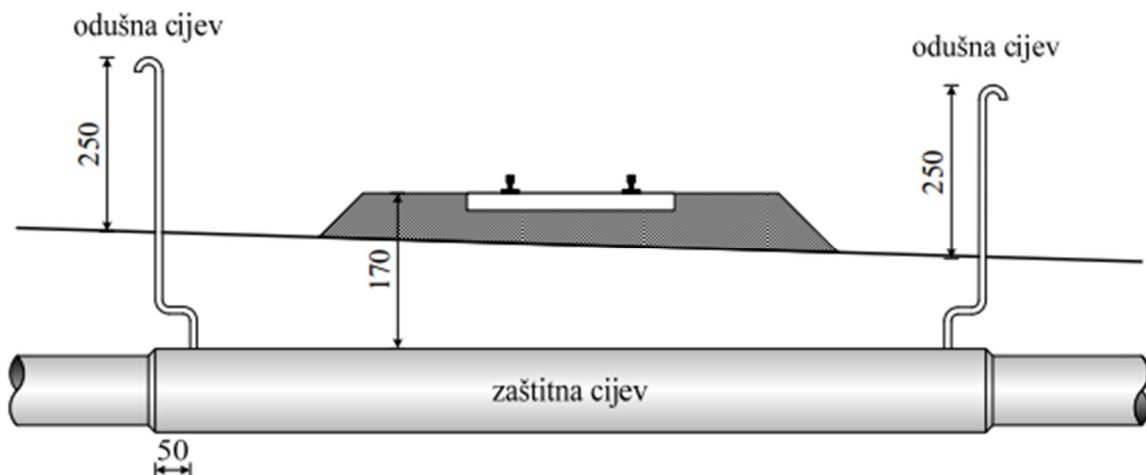
Najveća opasnost po ljudski život javlja se za vrijeme gradnje cjevovoda u trasu električne željeznice, a može biti izazvana:

- Nedoziivljenim približavanjima ili čak dodirom između cijevi cjevovoda i visokonaponskih vodova;
- Atmosferskim izbijanjima preko stupova kontaktne mreže;
- Preskokom ili probojem izolacije;
- Induciranjem napona na cijevima postavljenim na drvene kozlice prije spuštanja u rov.

Upravo zbog potonjih opasnosti potrebno je procijeniti veličinu induciranih napona i prije nego je cjevovod izgrađen odnosno prije nego su mogle biti primijenjene odgovarajuće mjere zaštite.

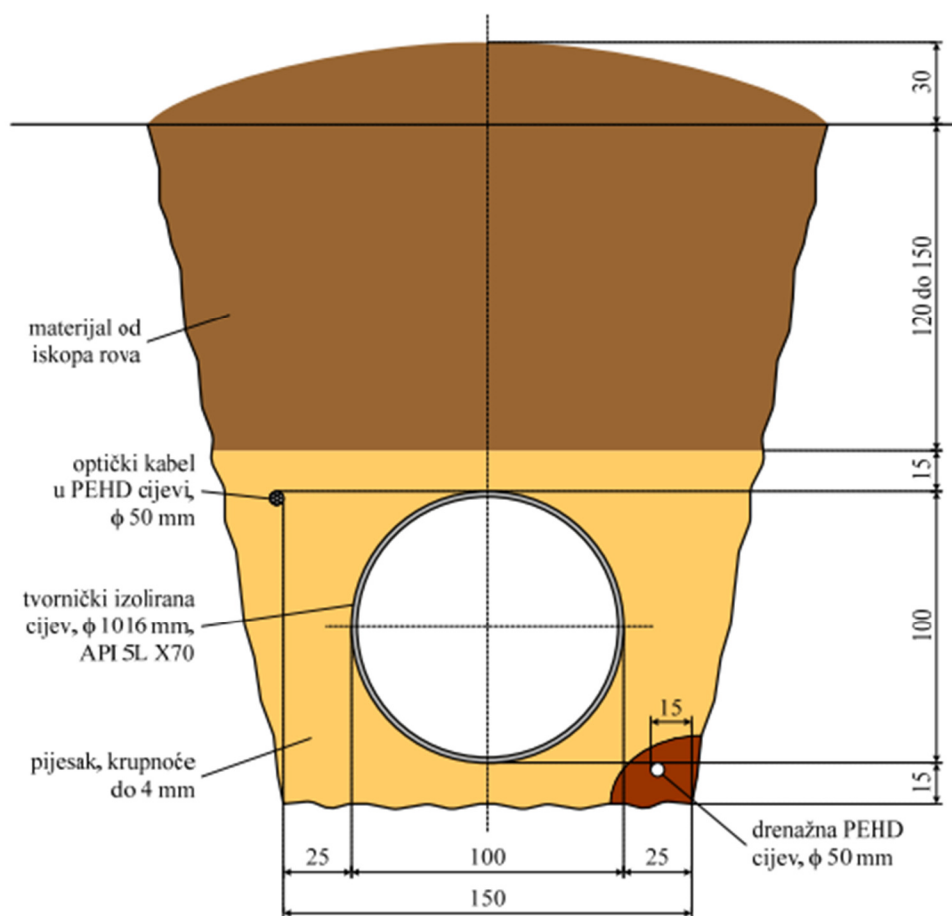
Iznos i raspodjela napona cjevovoda i plašta dojavnog kabela prema zemlji te napona žila dojavnog kabela prema njegovom plaštu ovise o pogonskim uvjetima visokonaponskog voda, geometrijskog rasporeda obje vrste vodova, električkim svojstvima nadzemnog voda i cjevovoda te tla na kojem su izgrađeni, uvjetima uzemljenja obje vrste vodova i raspodjeli struja.

Kut križanja cjevovoda i pruge treba biti čim bliži pravom kutu. Primjeri presjeka plinovoda i njegova prolaska ispod pruge prikazani su na slikama 3.17 i 3.18. Mjere su izražene u cm.



Slika 3.17 Prolaz plinovoda ispod željezničke pruge u zaštitnoj cijevi [61]





Slika 3.18 Poprečni presjek rova za polaganje plinovoda [61]

### 3.3.2.1 Električka svojstva cjevovoda

Od električnih svojstava cjevovoda neophodno je najprije izračunati njegovu uzdužnu impedanciju i poprečnu admitanciju po jedinici duljine, iz kojih onda, pod pretpostavkom jednolike rasprostranjenosti jediničnih stalnica duž čitave duljine cjevovoda, slijede njegova električna svojstva [62]. Ukoliko pretpostavka nije iz bilo kojeg razloga održiva, potrebno je sam cjevovod podijeliti na dionice od kojih svaka zadovoljava navedenu pretpostavku. Ovdje će se proračun ograničiti isključivo na, električki gledano, homogene cjevovod.

Uzdužni prividni otpor strujnog kruga cjevovod – tlo sastoji se od unutarnje impedancije cijevi i vanjske impedancije tla [63], [64].

Unutarnji uzdužni prividni otpor što ga cijev duljine  $l$  pruža prolazu izmjenične struje pogonske frekvencije ovisan je o specifičnom otporu materijala cijevi  $\rho_c$ , njezinog vanjskog promjera  $r_c$  i debljine stjenke  $d_c$ , temperaturi, a kod čeličnih cijevi i o gustoći struje. Za djelatni

otpor što ga promatrana cijev za koju vrijedi  $r_c \gg d_c$ , pruža na temperaturi 20°C prolazu istosmjernje struje vrijedi po jedinici duljine:

$$R_c = \frac{\rho_c}{2\pi \cdot d_c \cdot r_c} \quad (3.44)$$

Izmjenična struja, čija je efektivna vrijednost po iznosu jednaka istosmjernjoj struji, stvorit će na promatranoj cijevi, uz jednake uvjete, ovisno o frekvenciji veće gubitke topline, a što se matematički izražava preko većeg djelatnog otpora koji promatrana cijev pruža izmjeničnoj struji. U slučaju izmjeničnih struja, inducirat će dio struje koji teče u srednjim i vanjskim slojevima cijevi uzdužni napon u unutarnjim dijelovima cijevi, koji je veći od istovrsnog napona što ga u središnjim slojevima cijevi inducira dio struje koji teče u vanjskim slojevima pa radi izjednačenja ukupnog pada napona u uzdužnom presjeku stjenke cjevovoda dolazi do faznih i prostornih pomicanja koja imaju za posljedicu manju gustoću struje u unutarnjem odnosno veće gustoće struja u vanjskim slojevima cijevi. Ovaj učinak naziva se potiskivanje struje ili skin efekt [65]. U cijevima s relativno debelim stjenkama i pri struja viših frekvencija može potiskivanje struje prema vanjskoj površini postati čak i toliko veliko da unutarnji slojevi cijevi postanu beznačajni za prolaz struje. Stoga se za izračun impedancije koristi dubina prodiranja u cijev [63]:

$$\delta_c = \frac{1}{\sqrt{\frac{\omega}{2} \cdot \frac{\mu_0 \cdot \mu_c}{\rho_c}}} \quad (3.45)$$

gdje je:

$\omega$  kružna frekvencija;

$\mu_0$  permeabilnost vakuuma;

$\mu_c$  relativna permeabilnost materijala cijevi;

$\rho_c$  specifični otpor materijala cijevi.

Uz gornje pretpostavke, može se vlastita impedancija cijevi i međuimpedancija odrediti iz izraza:

$$Z_c = R_c + \frac{\mu_0 \cdot \omega}{8} + j \left( \frac{\mu_0}{2} \omega \cdot \left( \ln \frac{\delta_c}{r_c / 2} + \frac{\mu_c}{4} \right) \right) \quad (3.46)$$

gdje je:

$$\frac{\mu_0 \cdot \omega}{8} \quad \text{otpor povratnog puta zemlje;}$$

$$\frac{\mu_0}{2} \omega \cdot \left( \ln \frac{\delta_c}{r_c / 2} \right) \quad \text{vanjska reaktancija cjevovoda;}$$

$$\frac{\mu_0}{2} \omega \cdot \left( l \frac{\mu_c}{4} \right) \quad \text{unutarnja reaktancija cjevovoda.}$$

Koristeći izraz (3.46) uz pogonsku frekvenciju, specifični otpor tla  $50 \Omega\text{m}$  i relativnu permeabilnost 5 dobiva se impedancija cjevovoda:

$$Z_{c50} = 0,072 + j0,68 \quad \Omega/\text{km} \quad (3.47)$$

## 4 ODREĐIVANJE ELEKTROMAGNETSKIH UTJECAJA

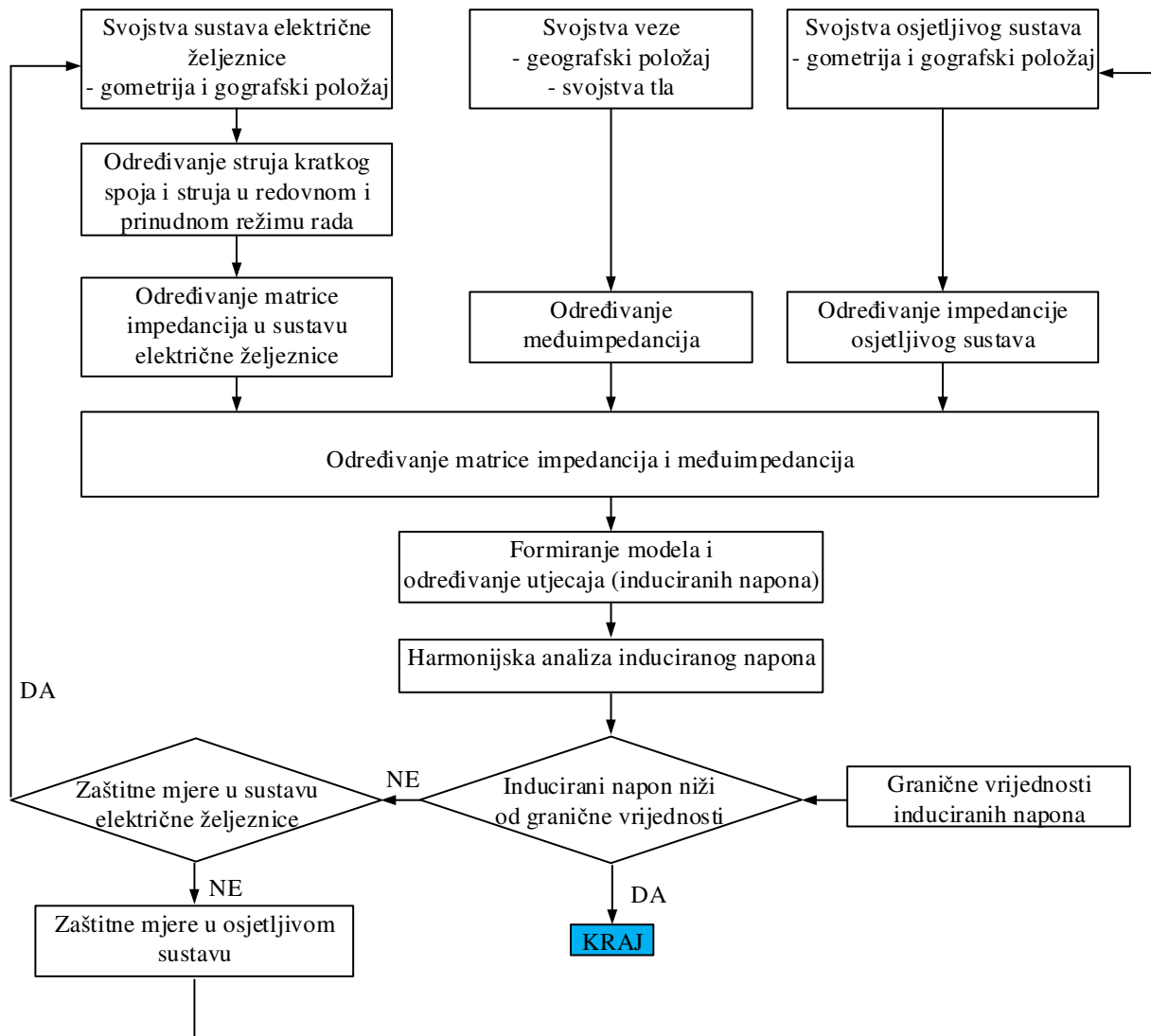
U svrhu određivanja utjecaja sustava električne željeznice na metalne strukture, potrebno je identificirati parametre o kojima ovaj utjecaj ovisi, napraviti prikladan model koji odgovara stvarnoj konfiguraciji sustavâ te provjeriti rezultate proračuna. U ovom poglavlju uspostaviti će se metodologija točnijeg određivanja elektromagnetskih utjecaja elektrovučne mreže i postrojenja na metalne strukture.

U poglavlju 3.1.1 prikazan je način proračuna induciranih napona pri induktivnoj sprezi. Prema tom prikazu, veličina induciranog napona ovisi o iznosu i frekvenciji struje u željezničkom sustavu te međuimpedanciji sustava električne željeznice i promatrane metalne strukture. U poglavlju 3.2 uvedeni su redukcijski faktori koji opisuju smanjenje veličine induciranog napona uslijed povratnih struja koje teku tračnicama ili povratnom užadi od lokomotive prema elektrovučnoj podstanici.

Međuimpedancija čini poveznicu željezničkog sustava s metalnom strukturom koja na njega nije galvanski vezana i ovisi o udaljenosti spregnutih elemenata, specifičnom otporu tla i frekvenciji struje. U poglavlju 2.2.3 izvedene su formule pomoću kojih se može odrediti međuimpedancija. Za pogonsku frekvenciju vrijednosti se mogu pronaći u tabelarnoj i grafičkoj formi kako je ranije prikazano.

Redukcijski faktori uslijed povratnih struja nisu konstantni. Oni se mijenjaju ovisno o načinu otpuštanja povratne struje u tlo, a što se može modelirati odvodom tračnica. Tračnice su uzemljene preko uzemljivačkih prstena stupova kontaktne mreže. Sa stajališta elektromagnetskih utjecaja, idealno bi bilo da su tračnice izolirane od zemlje te da nema otpuštanja povratne struje u zemlju. Međutim, takva konfiguracija nije prihvatljiva sa stajališta sigurnosti i pojave opasnih napona na tračnicama. Kako se tračnice nalaze na izoliranoj podlozi, povezuju se na stupove kontaktne mreže odnosno na zemlju. Ova veza nije kratkospojna te se značajan dio struje napajanja elektrovučnog vozila vraća tračnicama. Ukoliko je na stupove kontaktne mreže postavljeno povratno uže, struja će se osim po tračnicama u elektrovučnu podstanicu vraćati i preko njega. Tračnice i povratno uže su međusobno povezani na stupovima kontaktne mreže. I dok su tračnice standardne izvedbe, povratno uže može imati različite konstrukcije i položaje na stupu. Manja vlastita impedancija odnosno veća međuimpedancija s kontaktnim vodičem uvjetuje protjecanje veće povratne struje kroz povratno uže. Cilj je osigurati uvjete da se čim više struje napajanja vraća preko tračnica i povratnog užeta.

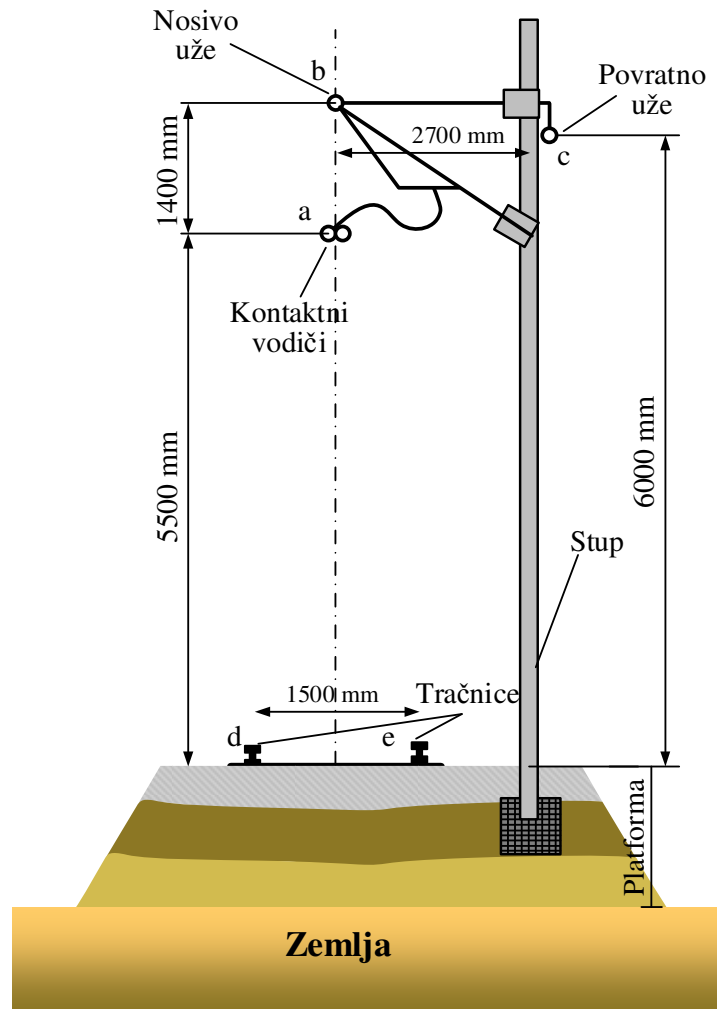
U ovom poglavlju prikazan je razvijeni model za proračun induciranih napona. Korišten je programski paket EMTP-RV [66], [47]. Pristup i metodologija proračuna prikazani su blok dijagramom na slici 4.1.



Slika 4.1 Postupak određivanja induciranih napona

## 4.1 Model za proračun

Sustav električne željeznice razdijeljen je na komponente; kontakti vodič, nosivo uže, tračnice i povratno uže te su određene vrijednosti vlastitih i međusobnih impedancija. Korištena je konfiguracija prema slici 4.1 [67].



Slika 4.2 Konfiguracija sustava električne željeznice korištena u modelu

Vodiči, užad i tračnice imaju sljedeće podatke [21], [33]:

- Kontaktni vodič iz bakra (dva vodiča međusobno razmaknuta 50 mm), nominalnog presjeka  $100 \text{ mm}^2$ , polumjera 6 mm, na visini 5,5 m i vlastitog otpora  $0,1759 \text{ } \Omega/\text{km}$ .
- Nosivo uže iz bronce nominalnog presjeka  $120 \text{ mm}^2$ , polumjera 7 mm, na prosječnoj visini 6,79 m i vlastitog otpora  $0,153 \text{ } \Omega/\text{km}$ .
- Povratno uže iz bronce presjeka  $65 \text{ mm}^2$ , polumjera 5,25 mm, na prosječnoj visini 6 m i vlastitog otpora  $0,386 \text{ } \Omega/\text{km}$ .
- Tračnice su usvojene s ekvivalentnim polumjerom 44,25 mm i vlastitim otporom  $0,025 \text{ } \Omega/\text{km}$ .

#### 4.1.1 Matrice impedancija

Koristeći formulu (2.3) i postupak opisan u Prilogu A može se formirati matrica vlastitih impedancija i međuumpedancija. Kako su tračnice iz feromagnetskog materijala, njihova se

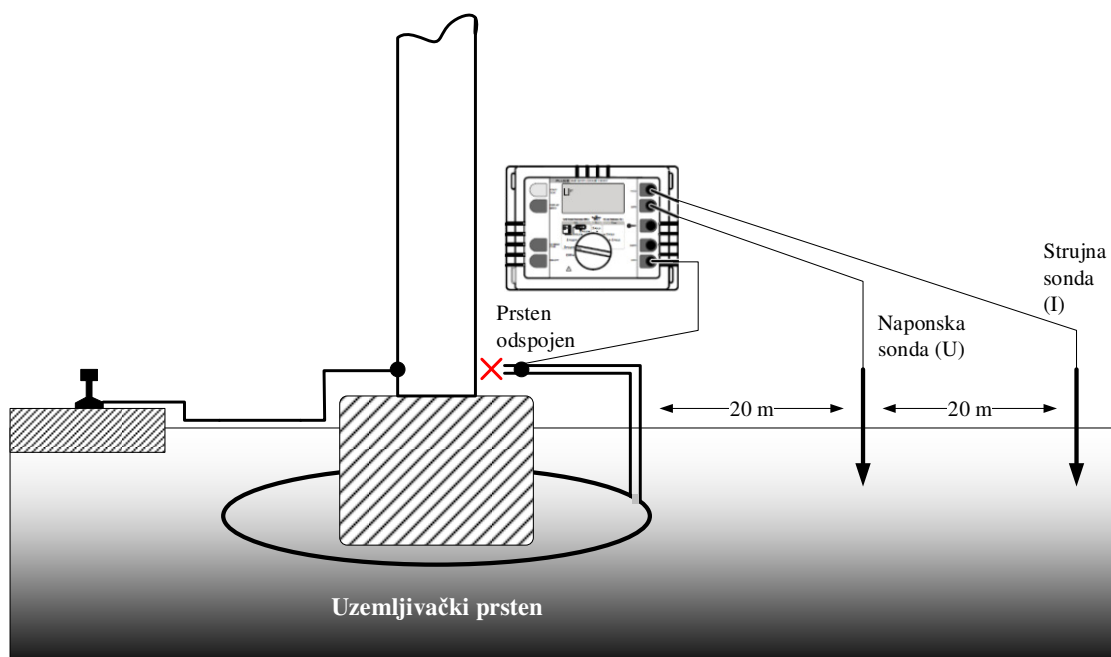
permeabilnost treba uzeti u obzir kako je spomenuto u opisu formule (2.5). Usvojene su vrijednosti unutarnjeg induktiviteta u vrijednosti 0,75 vlastitog otpora [32]. Matrice su određene za različite specifične otpore tla prikazane u Prilogu A. Ovdje je dana matrica impedancija za specifični otpor tla  $50 \Omega\text{m}$ :

$$Z = \begin{bmatrix} 0,138 + j0,685 & 0,05 + j0,391 & 0,05 + j0,344 & 0,05 + j0,300 & 0,05 + j0,300 \\ & 0,203 + j0,734 & 0,05 + j0,342 & 0,05 + j0,287 & 0,05 + j0,287 \\ & & 0,386 + j0,752 & 0,05 + j0,292 & 0,05 + j0,292 \\ & & & 0,075 + j0,622 & 0,05 + j0,384 \\ & & & & 0,075 + j0,622 \end{bmatrix} \frac{\Omega}{\text{km}}$$

#### 4.1.2 Određivanje odvoda tračnica i otpora uzemljivača stupova

Odvod se modelira otporom koji se veže paralelno uzdužnom RL elementu. Kako odvod ima različite vrijednosti, proračun je obavljen parametarski te je istražena ovisnost povratnih struja o veličini odvoda. Ipak, da bi se odredile granice parametra pristupilo se mjerenju otpora uzemljivačkih prstenova pojedinih stupova kontaktne mreže. Mjerenja su se obavljala klasičnom  $U-I$  metodom s dvije sonde ili indukcijskom metodom sa strujnim kliještima.

Mjerenje otpora uzemljenja  $R_z$  pomoću dvije sonde zasniva se na  $U-I$  metodi kao što prikazuje slika 4.3. Tračnice su povezane na stup kontaktne mreže, a uzemljivački prsten je odspojen od stupa kako bi se eliminirao utjecaj povratnog užeta. Naponska sonda zabodena je na 20 m od uzemljivača, a strujna na 40 m.



Slika 4.3 Mjerenje otpora uzemljenja s dvije sonde [68]

Pomoćni strujni krug uspostavlja se pomoću strujne sonde ( $I$ ), a napon se mjeri pomoću naponske sonde ( $U$ ) iz čega mjerni instrument izračunava otpor uzemljenja  $R_z$ .

Indukcijska metoda sa strujnim kliještima koristi se za mjerenje otpora uzemljenja pojedinačnog uzemljivača povezanog na sustav uzemljenja koji se sastoji od više pojedinačnih uzemljivača kao što prikazuje slika 4.4.

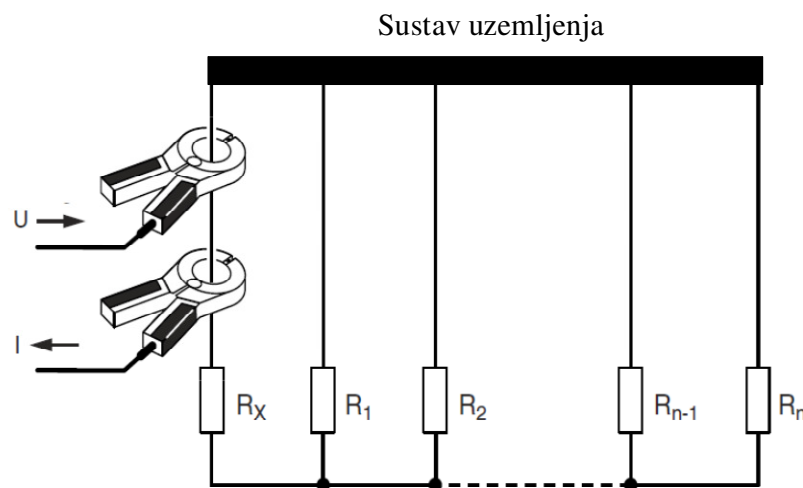
Ukoliko je otpor uzemljenja pojedinačnog uzemljivača  $R_x$  (uzemljivački prsten) znatno veći od ukupnog otpora rasprostiranja paralelnog spoja više uzemljivača ( $R_1, R_2, \dots R_n$ ) koji čine složeni sustav uzemljenja (povratno uže):

$$\frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}} \ll R_x \quad (4.1)$$

tada vrijedi:

$$R_x = \frac{U}{I} \quad (4.2)$$

Mjerni instrument generira struju  $I$  u uzemljivačkom vodu mjerenog uzemljivača  $R_x$  pomoću strujnih kliješta. Druga strujna kliješta koriste se za mjerenje induciranog napona koji ovisi o impedanciji strujnog kruga gdje prevladava otpor uzemljivača  $R_x$  (slika 4.3).

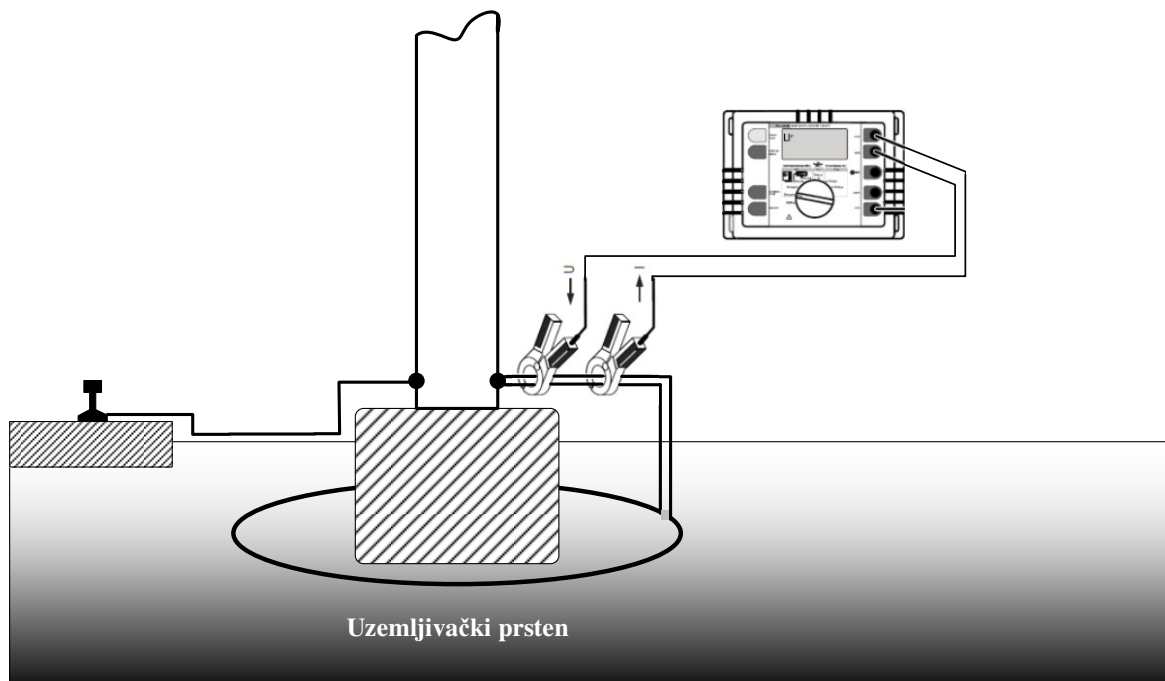


Slika 4.4 Princip mjerenja otpora uzemljenja pomoću strujnih kliješta [68]

Prednost korištenja ove metode je u tome što se prilikom mjerenja uzemljivački prsten ne odspaja od stupa (portala) čime se ubrzava provođenje mjerenja (slika 4.5)



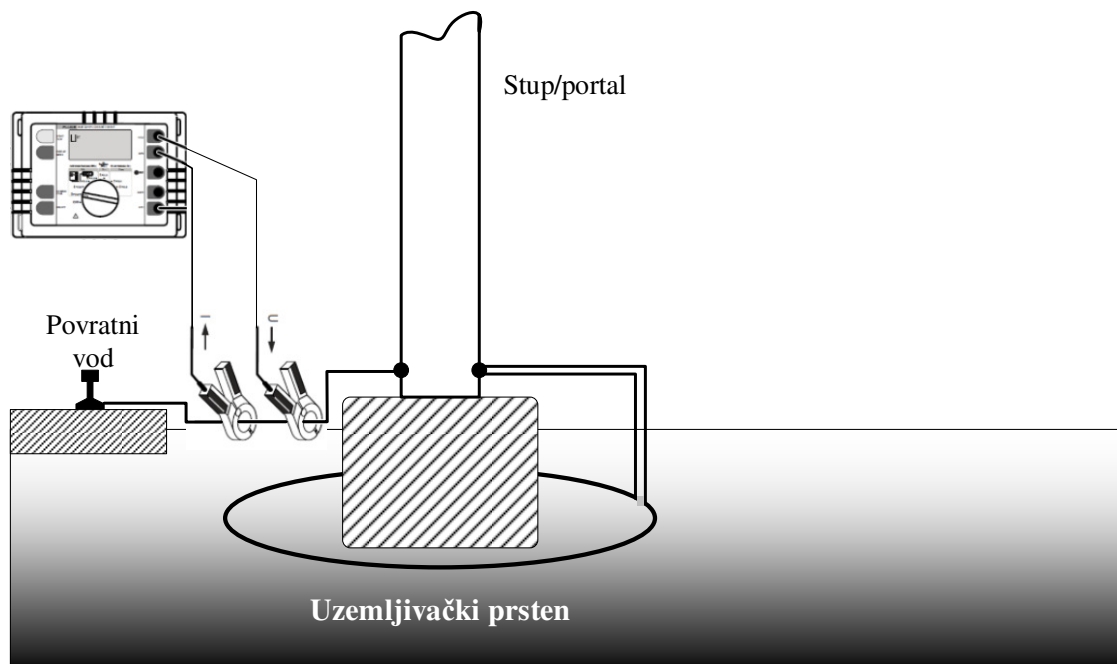
Nedostatak indukcijskog mjerenja otpora uzemljenja je gornja granica mjernog opsega instrumenta za mjerenje tako da se na taj način ne mogu mjeriti otpori uzemljenja većih iznosa ( $< 300 \Omega$ ).



Slika 4.5 Mjerenja otpora uzemljenja pomoću strujnih kliješta [68]

Svi metalni objekti u zoni 6 m od osi kolosijeka moraju iz sigurnosnih razloga biti povezani na tračnice, te je prilikom ispitivanja potrebno provjeriti kontinuitet te veze.

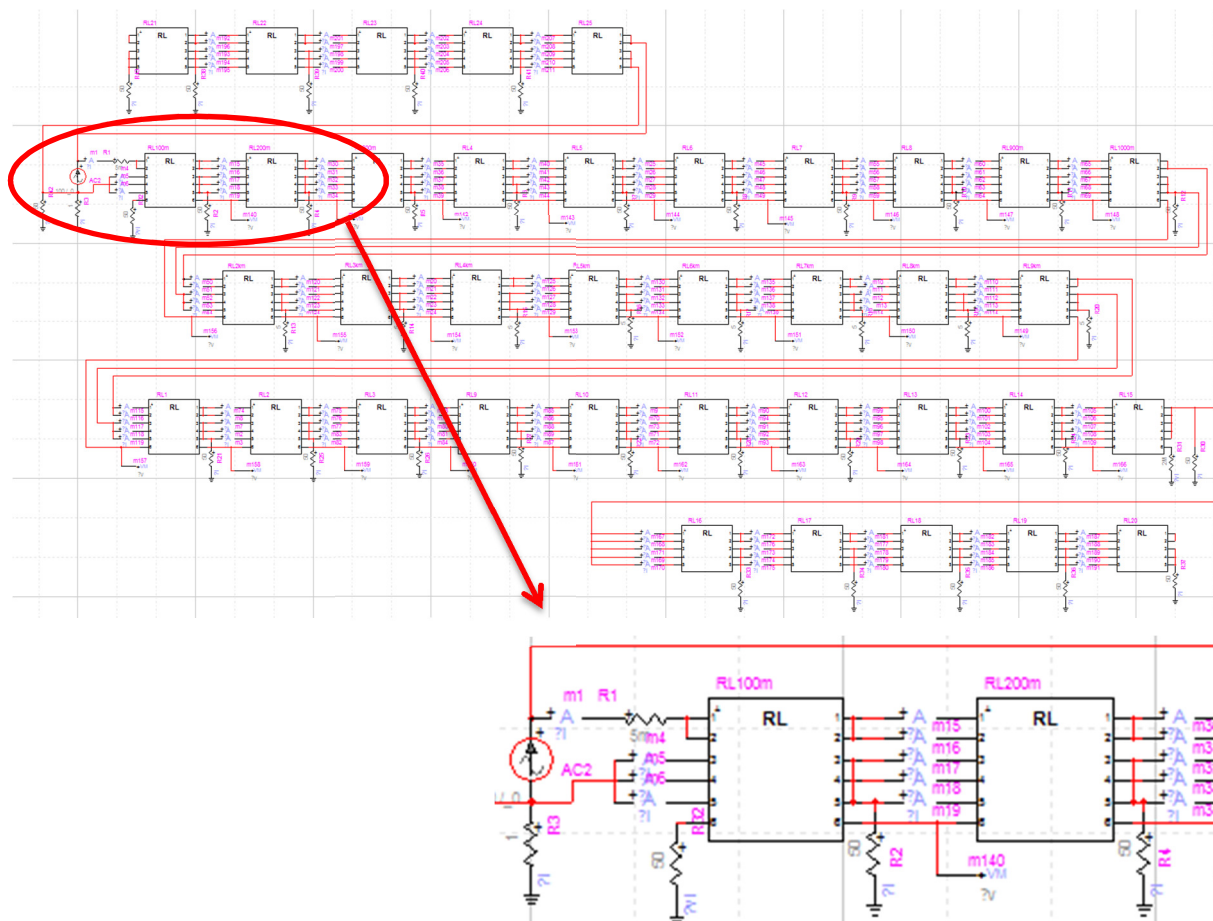
Provjera kontinuiteta obavlja se mjerenjem otpora uzemljivačkog voda koji spaja stup (portal) s povratnim vodom (slika 4.6). Ukoliko postoji dobar galvanski spoj između stupa i povratnog užeta, izmjereni otpor kretat će se u granicama od nekoliko desetaka  $m\Omega$  do nekoliko stotina  $m\Omega$ . Ovaj spoj omogućava ispravnu raspodjelu povratnih struja između tračnica i povratnog užeta.



Slika 4.6 Mjerenje kontinuiteta uzemlivačkog voda [68]

### 4.1.3 Računalni model

Nakon dobivenih matrica impedancija, upisuju se podatci opisani tim matricama u računalni program EMTP-RV. Element „RL coupled multiphase“ omogućava unos matrica kojima se predstavlja stvarna konfiguracija i omogućava potpuna kontrola strukturnih elemenata po teoriji električnih krugova. Dodatni element koji je potrebno modelirati je odvod. Modelirana je jednokolosiječna pruga duljine 10 km s parametrima danim ranije u ovom poglavlju. Prvi i posljednji kilometar su modelirani svakih 100 m dok je ostatak modeliran po kilometru. Dodatno, modelirano je po 0,5 km pruge ispred strujnog izvora i iza desetog kilometra kako bi se interpretirao tok struje tračnicama i povratnim užetom i u smjeru suprotnom od elektrovučne podstanice.

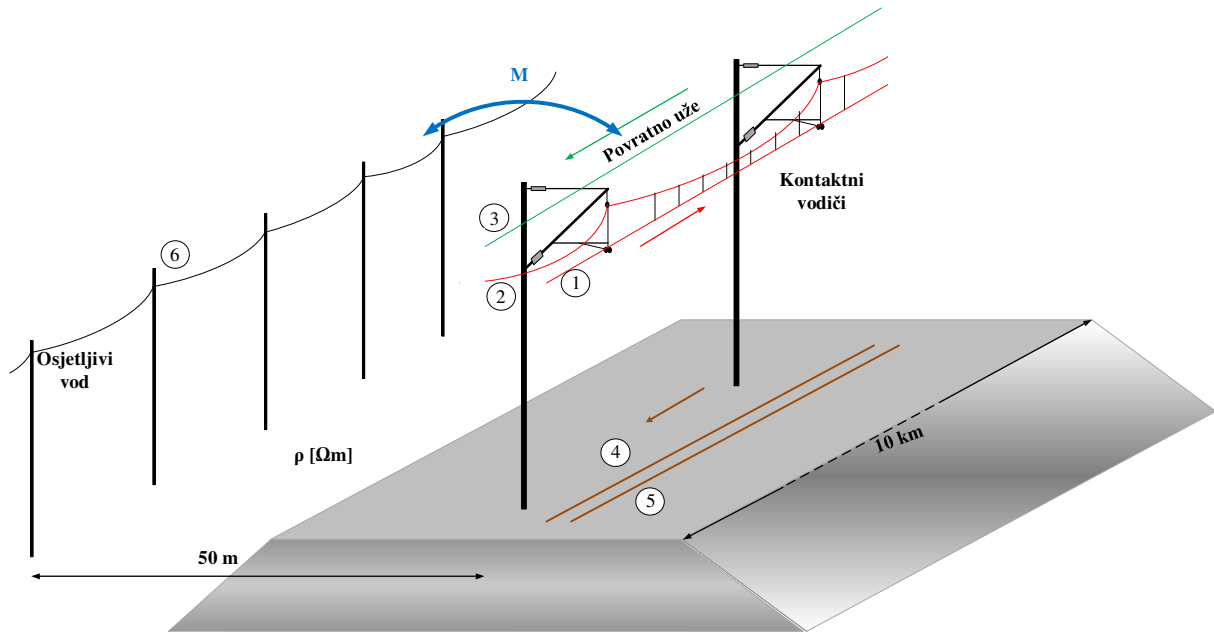


Slika 4.7 Izgled modela za određivanje povratnih struja

Na početku modela postavljen je strujni izvor s namjerom da se ispita veličina povratnih struja u ovisnosti o:

- Specifičnom otporu tla,
- Odvodu tračnica,
- Vrsti i položaju povratnog užeta.

Vrijednosti povratnih struja ključne su za određivanje redukcijskih faktora stoga je potrebno donijeti zaključke o ovisnosti veličine povratnih struja ovisno o promjenjivim parametrima željezničkog sustava.



Slika 4.8 Položaj osjetljivog voda u odnosu na prugu i oznake vodiča

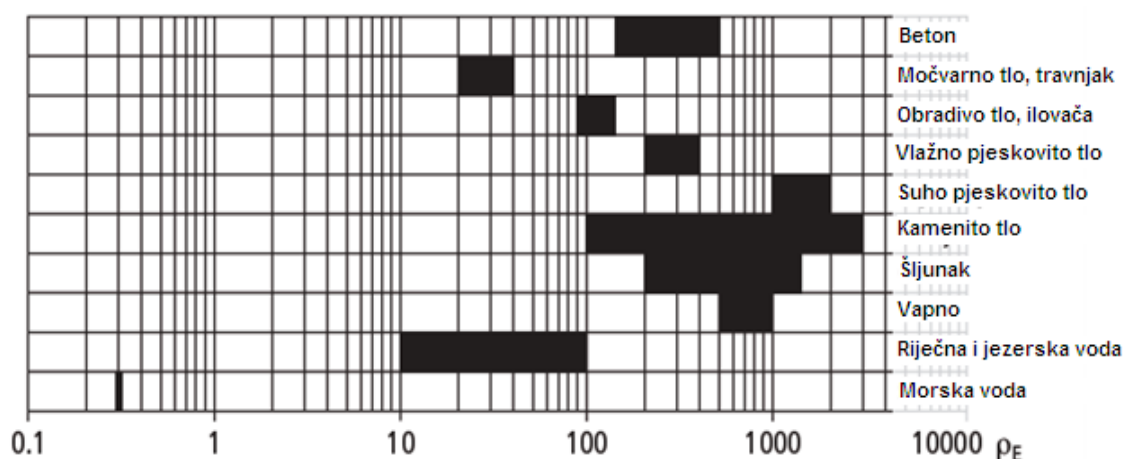
#### 4.1.3.1 Ovisnost veličine povratnih struja u ovisnosti o specifičnom otporu tla

Specifični otpor tla je svojstvo tla, a definira se kao otpor koji se suprotstavlja prolasku električne struje kroz zamišljenu kocka nekog potpuno homogenog tla stranice 1 m.

Problematika određivanja specifičnog otpora tla je vrlo složena zbog promjenjivosti svojstava tla ovisno o području i atmosferskim prilikama. Sa stajališta električne željeznice, specifični otpor tla može se kretati u najširem rasponu sukladno području kojim se prostire pruga. U tablici 4.1 i na slici 4.9 dane su neke vrijednosti specifičnog otpora tla [69].

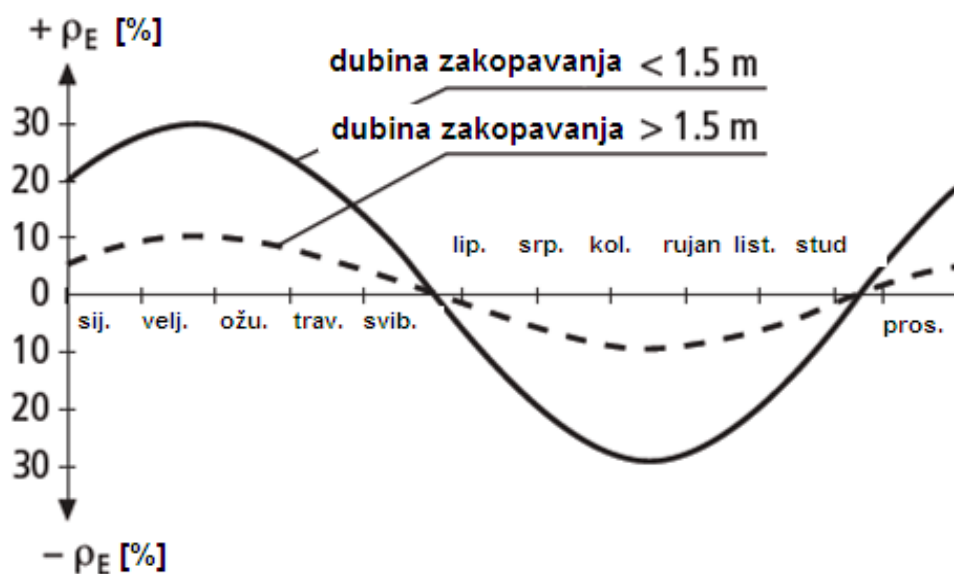
Tablica 4.1 Specifični otpor tla za neke vrste tla [69]

Vrsta tla	Specifični otpor [Ωm]
Morska voda	0,5
Vode jezera i rijeka	10 - 100
Močvara , Oranice, Vlažni sitni pijesak	90 - 150
Vlažni krupni pijesak	200 - 400
Suhi sitni pijesak	500
Kamenovito tlo	100 - 3000
Vapno	500 - 1000
Beton	150 - 500



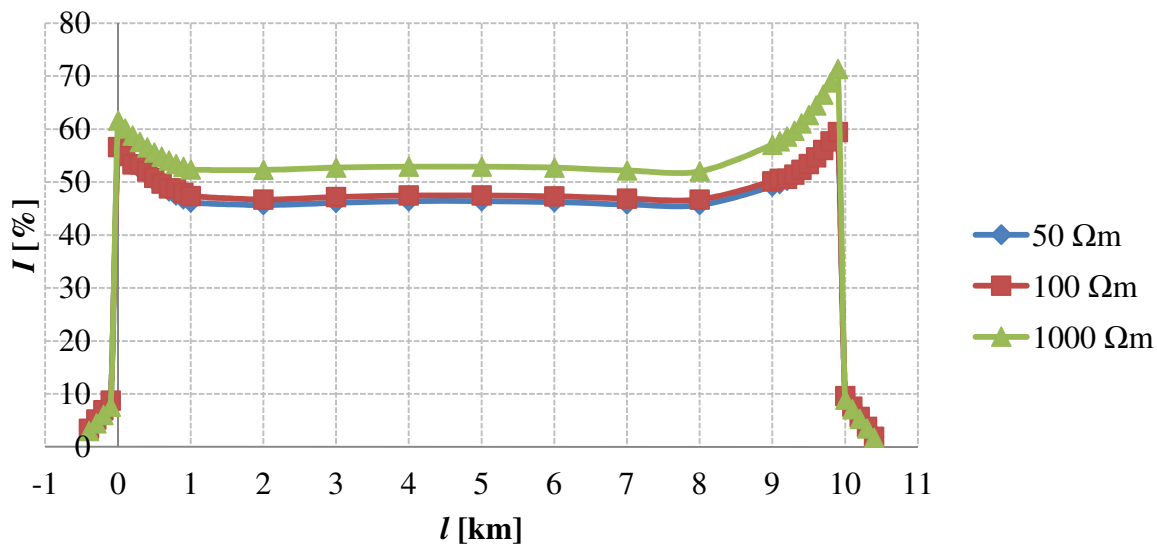
Slika 4.9 Specifični otpor tla za neke vrste tla [69]

Smrznuto tlo je izolator. Kako zimi može doći do smrzavanja površinskih dijelova tla, važno je imati na umu kako se specifični otpor tla može mijenjati i do  $\pm 30\%$  ukoliko je dubina zakopavanja manja od 1,5 m odnosno  $\pm 10\%$  pri većim dubinama (slika 4.10). Uzemljivači stupova kontaktne mreže su usađeni u nasip i često se dijelom nalaze iznad površine tla što sugerira velika kolebanja u specifičnom otporu tla odnosno otporu uzemljivača.



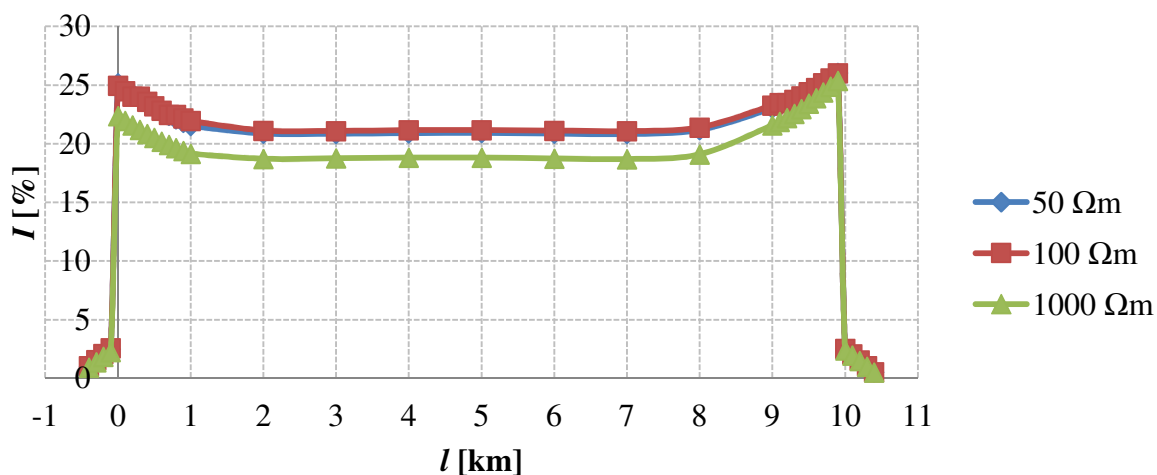
Slika 4.10 Kolebanje vrijednosti specifičnog otpor tla po mjesecima [69]

Proračun je obavljen za tri vrijednosti specifičnog otpora tla 50  $\Omega$ m, 100  $\Omega$ m i 1000  $\Omega$ m. Rezultati su prikazani na narednim slikama. Na slici 4.11 prikazana je promjena veličine povratne struje u tračnicama u ovisnosti o specifičnom otporu tla pri stalnoj vrijednosti odvoda 5 S/km uz instalirano povratno uže (Bz 65 mm<sup>2</sup>) prema slici 4.2.



Slika 4.11 Povratne struje u tračnicama u ovisnosti o specifičnom otporu tla

Slika 4.12 prikazuje postotnu vrijednost struje u povratnom užetu u odnosu na struju napajanja za različite specifične otpore tla.



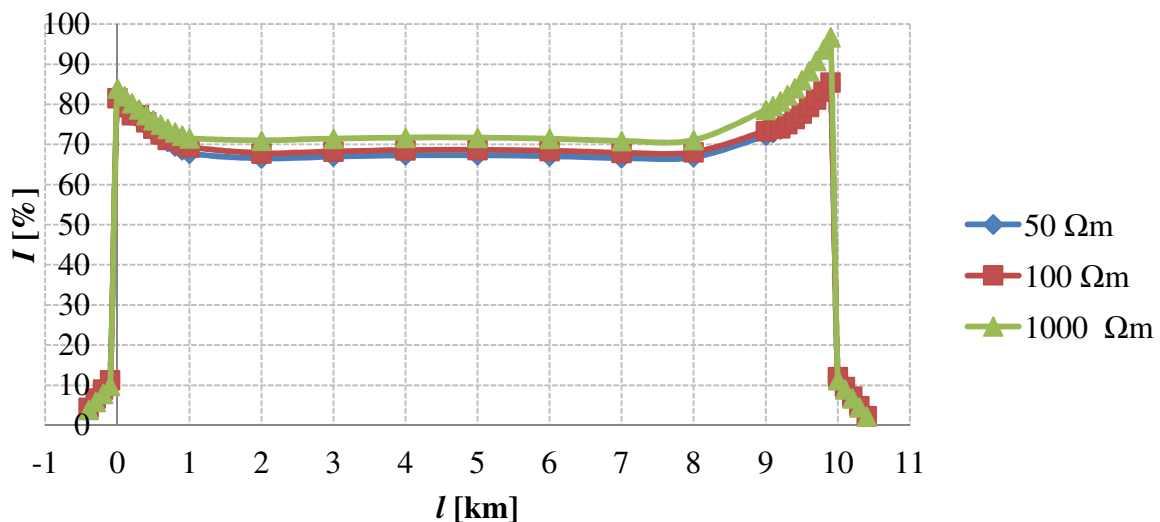
Slika 4.12 Povratne struje u povratnom užetu u ovisnosti o specifičnom otporu tla

Rezultati prikazani na slikama 4.11 i 4.12 dobiveni su za geometriju željezničkog sustava koja je opisana na početku ovog poglavlja. Odvod tračnica uzet je kao stalna vrijednost kako bi se dobila mogućnost analize utjecaja samo specifičnog otpora tla, proračun je obavljen kako je opisano.

Može se zamijetiti sa slike 4.13 da je ovisnost povratne struje o specifičnom otporu tla slaba. Veći specifični otpor tla znači i veću ukupnu povratnu struju. To se može objasniti činjenicom

da je impedancija povratnog puta (tračnice i povratno uže) relativno manja u odnosu na otpor tla pri višim vrijednostima specifičnog otpora tla.

Na rubnim dijelovima, uz elektrovučnu podstanicu i uz elektrovučno vozilo, povratna struja zanemarivo ovisi o specifičnom otporu tla. Na tim mjestima dominantna je galvanska veza kontaktnog vodiča i elemenata povratnog puta. Suma povratnih struja kroz tračnice i povratno uže je gotovo 70% struje napajanja na rubnim dijelovima. Promjena veličine povratne struje posebice je izražena na rubnim dijelovima. Može se zaključiti da na udaljenosti 2 km od elektrovučne podstanice i elektrovučnog vozila povratna struja ima stalnu vrijednost, neovisno o položaju na pruzi. Ukupna povratna struja prikazana je slikom 4.13.



Slika 4.13 Ukupna povratna struja kroz tračnice i povratno uže

Struja koja teče u suprotnom smjeru od struje napajanja poništava elektromagnetski utjecaj struje napajanja i osigurava bolje elektromagnetske uvjete rada sustava osjetljivih na smetnje. Struja smetnje je razlika između struje napajanja i povratne struje kroz tračnice i povratno uže, a koja prolazi kroz zemlju i vraća se preko uzemljivača elektrovučne stanice i stupova kontaktne mreže u blizini elektrovučne podstanice u elektrovučni sustav.

Kod kraćih dionica zajedničkog vođenja sustava električne željeznice i metalnih struktura, povratna struja ne poprima stalnu vrijednost već ima parboličan oblik i na svakom metru zajedničkog vođenja djeluje s različitom razinom redukcije elektromagnetske smetnje. Iz toga se zaključuje da korištenje konstantnih redukcijskih faktora [19], [56] nije primjereno obzirom da bi se na takav način uvela pogreška u proračun.

Prema [56] reduksijski faktor tračnica ne mijenja se bitno s promjenom frekvencije. U sustavima čije tračnice imaju metalne podloške na mjestu sastava ili sa zavarenim sustavima kao i s ugrađenim prespojima od bakrenog užeta, uzimaju se vrijednosti reduksijskog faktora tračnica kao:

- 0,5 za pruge s jednim ili dva kolosijeka;
- 0,35 za pruge s više kolosijeka.

U blizini elektrovučnih podstanica do oko 3 km udaljenosti vrijednosti reduksijskih faktora tračnica su manje i iznose:

- 0,25 za pruge s jednim ili dva kolosijeka;
- 0,15 za pruge s više kolosijeka.

Opravdanost uzimanja manjeg reduksijskog faktora u blizini elektrovučnih podstanica je nužna obzirom na raspodjelu struja u sustavu. Međutim, korištenje stalnih reduksijskih faktora nije primjereno zbog stalne promjene vrijednosti povratne struje u tračnicama. Štoviše, reduksijski faktor povratnog užeta uzima se prema [56] kao stalna vrijednost u cijelom području djelovanja i iznosi 0,65.

Struja kroz kontaktni vodič i povratne struje su fazno pomaknute i nije moguće iz apsolutnih vrijednosti precizno odrediti reduksijske faktore. U računalnim programima fazni se pomak može uzeti u obzir što je dodatni dokaz ispravnosti računanja inducirano napona modeliranjem željezničkog sustava.

Sukladno [56] obavljen je proračun inducirano napona na konfiguraciji opisanoj slikom 4.2 duljine 10 km. Udaljenost između kontaktnog vodiča i telefonskog voda uzeta je kao konstantna vrijednosti 50 m. Za različite vrijednosti specifičnog otpora tla određen je međuinduktivitet prema (3.7).

Tablica 4.2 Vrijednosti međuinduktivitet za odabranu konfiguraciju sustavâ

Specifični otpor tla $\rho$ [ $\Omega\text{m}$ ]	Udaljenost $a$ [m]	Međuinduktivitet $M$ [ $\mu\text{H}/\text{km}$ ]
50	50	548,48
100	50	617,59
1000	50	847,66

Koristeći nominalnu vrijednost struje napajanja 100 A, pogonske frekvencije, uz reduksijske faktore preuzete iz [56] i međuinduktivitete prikazane u tablici 4.2, može se odrediti vrijednost

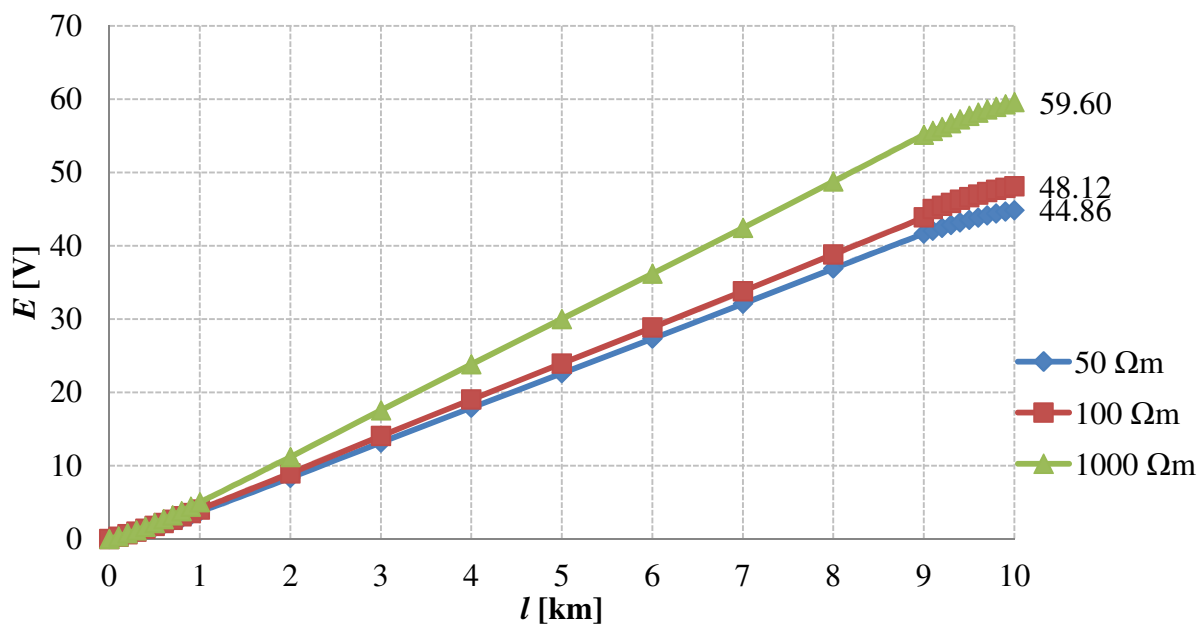


induciranog napona na telefonskom vodu bez oklopa prema (3.6). Rezultati su prikazani u tablici 4.3.

Tablica 4.3 Vrijednosti induciranih napona za odabrane konfiguracije prema normi [56]

$\rho$ [ $\Omega\text{m}$ ]	$M$ [ $\mu\text{H}/\text{km}$ ]	$r_t$	$r_e$	$E$ [V]
50	548,48	0,5 (0,25)	0,65	50,96
100	617,59	0,5 (0,25)	0,65	57,38
1000	847,66	0,5 (0,25)	0,65	78,76

Koristeći prije opisani model, inducirani napon može se odrediti modelom u EMTP-RV programu postavljanjem telefonskog voda na udaljenosti 50 m. Promjena induciranih napona može se pratiti po duljini, a prikazana je slikom 4.14.



Slika 4.14 Inducirani napon u ovisnosti o duljini i specifičnom otporu tla

Porast induciranih napona po cjelokupnoj duljini je promjenjiv. Nagib krivulje manji je uz elektrovočnu podstanicu (0 km) i uz elektrovočno vozilo (10 km) zbog većih povratnih struja odnosno manje magnetske indukcije.

Odvod tračnica ovisan je o specifičnom otporu tla, ali i o drugim električnim i geometrijskim parametrima sustava uzemljenja. Kako bi se odredila ovisnost induciranih napona o specifičnom otporu tla, korištena je stalna vrijednost odvoda 5 S/km. U ovom slučaju mijenja

se matrica impedancija i raspodjela struja po povratnim putovima. Pri povećanju specifičnog otpora tla, u razmatranom slučaju, za 100%, inducirani napon je povećan 6,3% dok je pri promjeni specifičnog otpora tla 10 puta inducirani napon povećan svega 24,5%.

Vrijednosti inducirano napona dobivene računalnim programom potrebno je usporediti s vrijednostima dobivenim proračunom prema normama. Usporedba ovih vrijednosti prikazana je tablicom 4.4. Računajući prema preporukama iz normi, dobivaju se značajno veće vrijednosti induciranih napona. Ovo navodi na potrebu daljnje analize modela, ali i provjere rezultata dobivenih ovim dvama načinima putem mjerenja u kontroliranim uvjetima uz poznate geometrije osjetljivih kabela.

Tablica 4.4 Vrijednosti induciranih napona za odabrane konfiguracije sustavâ

$\rho$ [ $\Omega\text{m}$ ]	$E$ [V] - EMTP	$E$ [V] - norma	Odstupanje %
50	44,86	50,96	13,6
100	48,12	57,38	19,2
1000	59,60	78,76	32,1

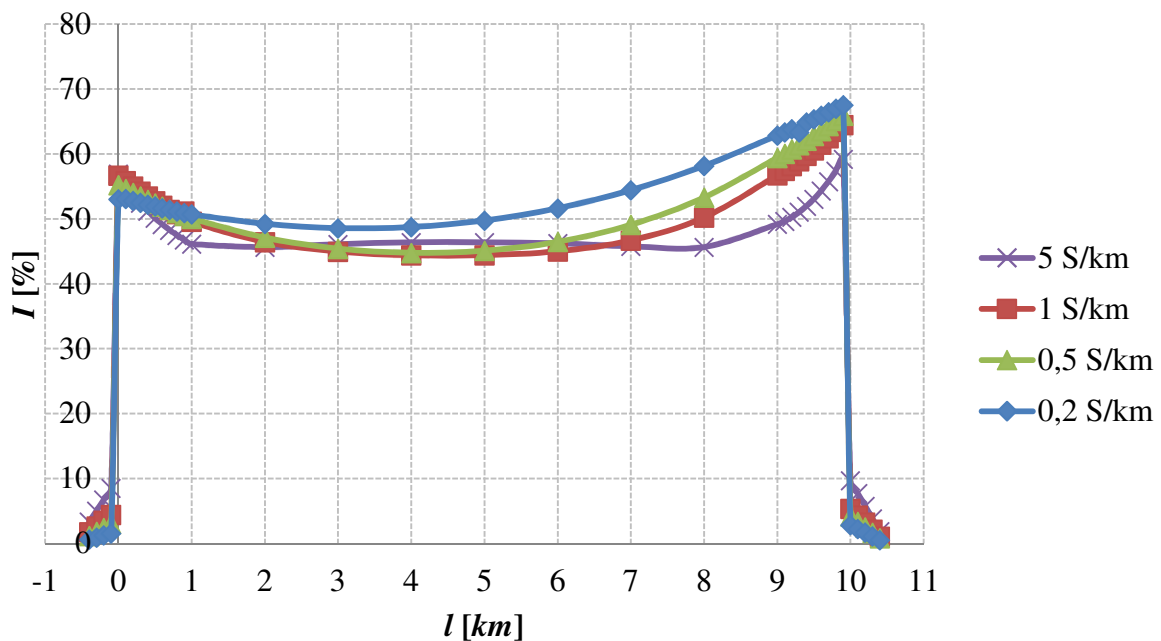
#### 4.1.3.2 Ovisnost veličine povratnih struja o odvodu tračnica

Tračnice, uz mehaničku funkciju podloge za kretanje i usmjeravanja elektrovučnog vozila, imaju i električnu ulogu jer se njima vraća struja od potrošača do elektrovučne podstanice. Prije je opisano kako se tračnice nalaze na pragovima ukopanim u tucanik što je električki gledano izolator. Ipak, i kroz izolaciju događa se provođenje malog dijela električne struje. Na stupovima kontaktne mreže, tračnice su spojene s uzemljivačem stupa. Na ovaj način one su uzemljene te je spriječen prijelazni porast potencijala koji bi mogao dovesti u opasnost osobe i imovinu. Pri ovakvoj vrsti uzemljenja potrebno je postići kompromis između zahtjeva za sigurnost pri prijelaznom porastu potencijala tračnica i elektromagnetskih utjecaja na metalne strukture u koridoru pruge. Veličina otpora preko kojeg su tračnice uzemljene prije svega ovisi o izvedbi uzemljivača i podlozi u koju je ukopan. U poglavlju 4.1.2 detaljno je opisan način mjerenja otpora uzemljenja.

Kako je otpor uzemljenja tračnica vrlo promjenjiv i ovisan o brojnim parametrima, odvod tračnica će biti modeliran parametarski. Razmotrit će se raspodjela povratnih struja i ovisnost

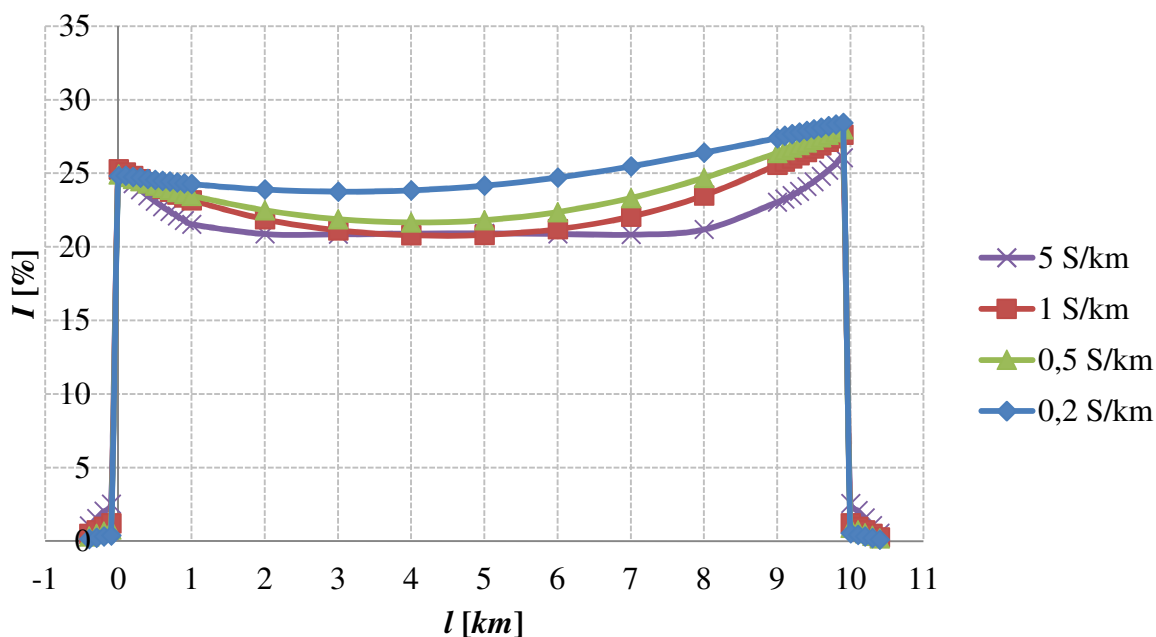
induciranog napona ovisno o sljedećim vrijednostima odvoda tračnica: 0,2 S/km, 0,5 S/km, 1,0 S/km i 5,0 S/km.

Na slici 4.15 prikazana je raspodjela povratnih struja po tračnicama u ovisnosti o odvodu tračnica sukladno konfiguraciji prikazanoj na slici 4.2. Pri većim vrijednostima odvoda, povratna struja je manja jer se veći dio povratne struje odvodi u tlo i zemljom vraća u elektrovučnu podstanicu. Promjena postotne vrijednosti povratne struje kroz obje tračnice u odnosi na struju napajanja ima sličan oblik za različite vrijednosti odvoda, no vrijednost je promjenjiva. Na udaljenostima većima od 2 km od elektrovučnog vozila i elektrovučne podstanice, vrijednost povratne struje je relativno stalna i iznosi 45% - 50 % struje napajanja.



Slika 4.15 Povratne struje u tračnicama u ovisnosti o odvodu tračnica

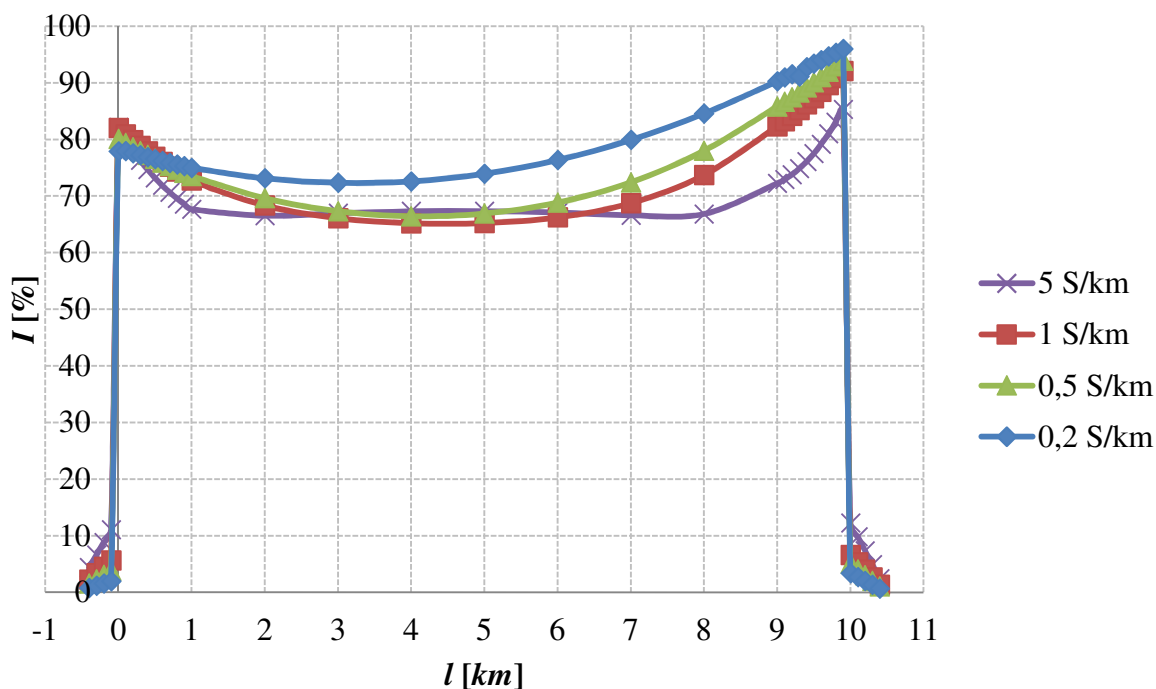
Na slici 4.16 prikazani su udjeli povratne struje kroz povratno uže (Bz 65 mm<sup>2</sup>). Oblici krivulja su jednaki kao i pri razmatranjima povratnih struja kroz tračnice što je očekivano obzirom da su tračnice i povratno uže kratko spojeni na stupovima kontaktne mreže.



Slika 4.16 Povratne struje u povratnom užetu u ovisnosti o odvodu tračnica

Ukupna povratna struja kroz tračnice i povratno uže prikazana je slikom 4.17. U blizini elektrovočnog vozila povratna struja kroz tračnice i povratno uže doseže vrijednost blisku struji napajanja, no s udaljenošću brzo opada. Pri vrijednostima odvoda 0,5 S/km – 5 S/km udio povratne struje kroz tračnice i povratno uže je oko 67%. U tom dijelu može se ustanoviti da postoji reduksijski faktor uslijed povratne struje s iznosom 0,33. Redukcijski faktor prema normi [56] iznosi  $0,5 \cdot 0,65 = 0,325$ . Može se zaključiti da je normama dobro opisana situacija u dijelovima elektrovočnog sustava koji su udaljeni više od 2 km od elektrovočne podstanice odnosno elektrovočnog vozila. Promjenjiva povratna struja uvjetuje postojanje promjenjivih reduksijskih faktora i pri klasičnom računanju induciranih napona valja biti oprezan pri proračunu.

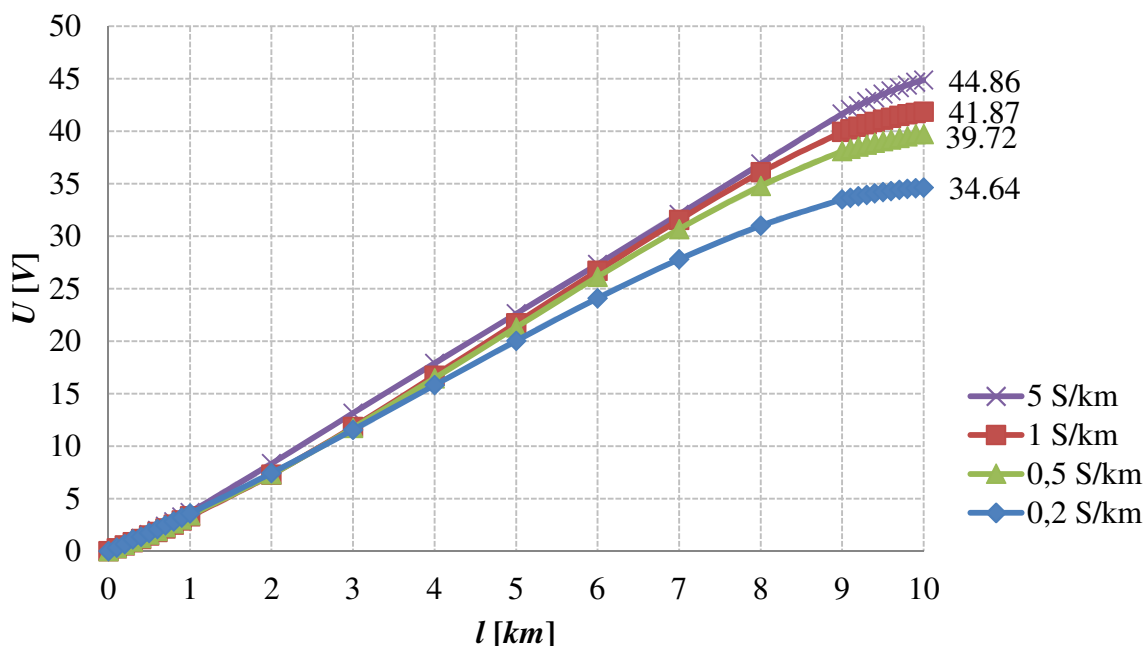
Udio povratnih struja značajno je ovisan o vrijednosti odvoda tračnica u području bliskom elektrovočnoj podstanici i elektrovočnom vozilu. Za kratke krakove napajanja (do 6 km) koji se mogu susresti na zahtjevnim dionicama pruga, vrijednost udjela povratne struje u tračnicama i povratnom užetu ne prima stalnu vrijednost i na svakoj dionici proračuna potrebno je uzimati različit reduksijski faktor što u mnogome usložnjava proračun.



Slika 4.17 Ukupna povratna struja kroz tračnice i povratno uže

Norme [55], [56] ne opisuju ovisnost induciranog napona o specifičnom otporu tla. Odvod tračnica ovisi o specifičnom otporu tla, ali i o drugim parametrima, a ponajviše izvedbi uzemljivača i materijalu u koji je temelj stupa kontaktne mreže ukopan.

U poglavlju 4.1.3.1. opisana je ovisnost induciranog napona o specifičnom otporu tla. Za konfiguraciju koja se razmatra u ovom primjeru, uz odvod 5 S/km i specifični otpor tla  $50 \Omega\text{m}$  dobiven je inducirani napon 44,86 V. Na slici 4.18 razmotreni su slučajevi s promjenjivom vrijednosti odvoda. Veći odvod tračnica uvjetuje pojavu većeg induciranog napona. Ovo se može objasniti činjenicom da pri većem odvodu veličina povratne struje kroz zemlju raste te se smanjuje reduksijski učinak povratne struje. Može se uočiti značajna ovisnost vrijednosti induciranog napona o odvodu tračnica. Za male vrijednosti odvoda od 0,2 S/km inducirani napon je 34,64 V, dok je pri odvodu 5 S/km 44,86 V. Razlika vrijednosti induciranog napona iznosi 29,1% pri promjeni odvoda 25 puta.



Slika 4.18 Inducirani napon u ovisnosti o odvodu tračnica

Prema tablici 4.4 inducirani napon dobiven prema normi [56] iznosi 50,96 V. Ova vrijednost značajno je veća od vrijednosti dobivene proračunima što je spomenuto i u poglavlju 4.1.3.1. Vrijednosti dobivene razvijenim modelom potrebno je provjeriti mjerenjima uz kontrolirane uvjete pogona elektrovočnog sustava.

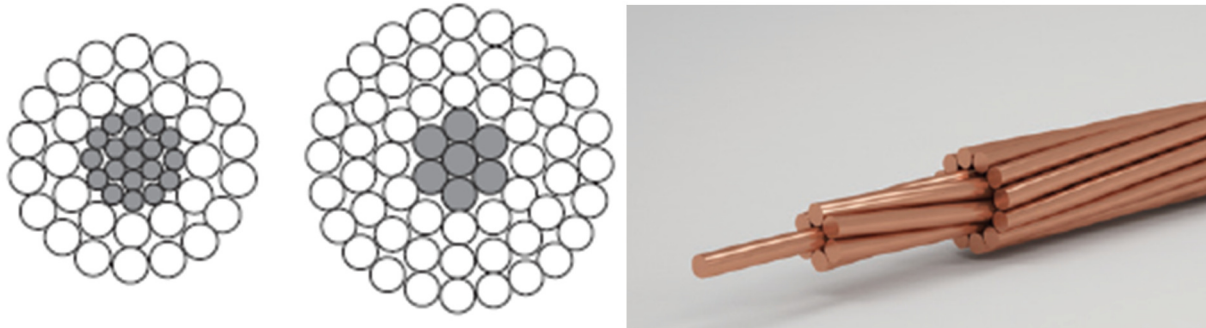
#### 4.1.3.3 Ovisnost veličine povratnih struja i induciranih napona o svojstvima povratnog užeta

Povratno uže nije obavezni sastavni dio elektrificiranih pruga, no njegova instalacija ima brojne prednosti poput smanjenja impedancije kontaktne mreže, smanjenja porasta potencijala tračnica pri kratkom spoju i redovnom pogonu, smanjenja magnetskog polja i induktivnog utjecaja, zaštite kontaktnog vodiča od udara munje ili mehaničkog oštećenja, povoljniju raspodjelu povratnih struja, ...

Postavljanjem povratnog užeta uz prugu od elektrovočnog vozila do elektrovočne podstanice formira se dodatni put za povratnu struju koja se usmjerava u suprotnom smjeru od struje napajanja. S elektromagnetskog stajališta, u ovom slučaju smanjuje se utjecaj sustava napajanja električne željeznice na metalne strukture.

U primjeru iz poglavlja 4.1.3.1 modelirano je povratno uže iz različitih materijala i presjeka na prosječnoj visini 6 m. Materijal izrade povratnog užeta i njegov presjek izravno određuju njegov otpor po jedinici duljine. U praksi se susreću razne izvedbe povratne užadi, a najčešće

užad iz bronce zatim alu-čelična te rjeđe bakrena užad. Kako bi se odredio utjecaj svojstava povratnog užeta na inducirani napon, modeliran je sustav s različitom užadi te bez užeta. Cjelovit prikaz modeliranih oblika s pripadajućim električnim svojstvima prikazan je tablicom 4.5. Prikaz presjeka alu-čeličnog i bakrenog užeta dan je na slici 4.19.



Slika 4.19 Izgled presjeka Alu-čelične i bakrene užadi

Tablica 4.5 Vrste i svojstva povratne užadi [33]

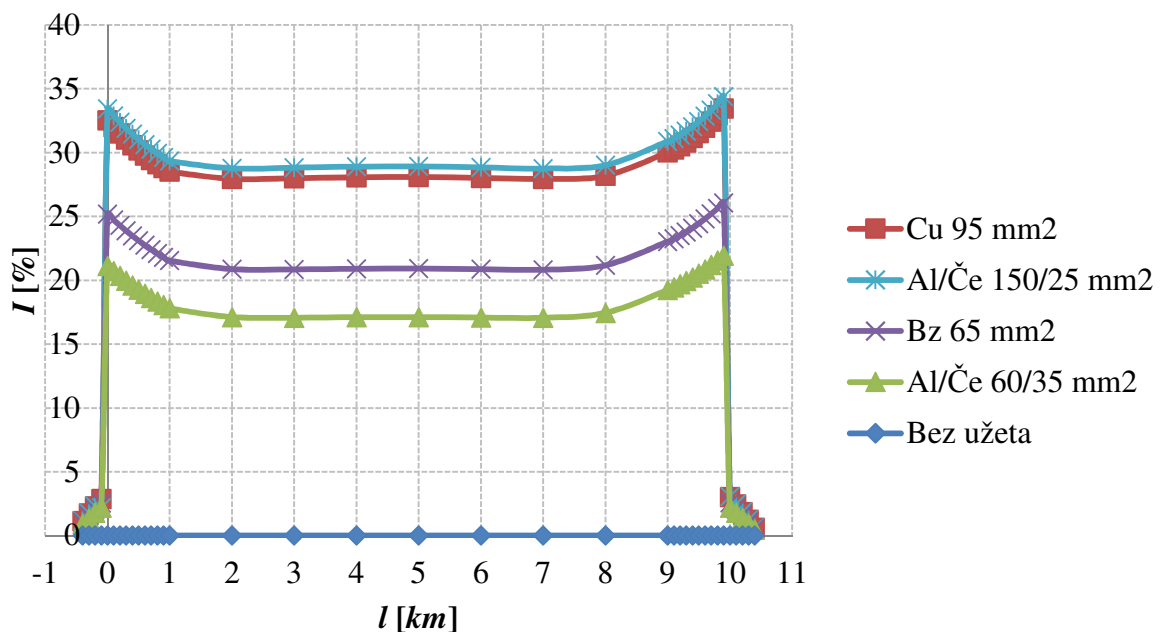
Materijal i presjek	Računski presjek [mm <sup>2</sup> ]	Polumjer $r$ [mm]	Otpor $R$ [Ω/km]	Vlastita impedancija $Z$ [Ω/km]
Bronca 65 mm <sup>2</sup>	65,8	5,25	0,3860	0,3860+j0,753
Alu-čelik 60/35 mm <sup>2</sup>	93,3	6,25	0,4898	0,4898+j0,742
Alu-čalik 150/25 mm <sup>2</sup>	173,1	8,55	0,1939	0,1939+j0,723
Bakar 95 mm <sup>2</sup>	93,3	6,25	0,1949	0,1949+j0,742

Prije je objašnjeno kako je impedancija povratnog puta ključno svojstvo koje određuje veličinu povratne struje po pojedinom povratnom putu (tračnicama ili povratnom užetu). Osmotre li se impedancije iz tablice 4.5 uočava se značajna razlika u realnom dijelu odnosno djelatnom otporu koji povratno uže pruža toku struje. Za razliku od realnog dijela, imaginarni dio impedancije se neznatno mijenja. Može se zaključiti da se promjenom presjeka i odabirom različitog materijala vrlo ograničeno može utjecati na imaginarni dio impedancije. Ovo nameće zaključak kako nije potrebno postavljati užad velikog presjeka, već koristiti materijale s manjim specifičnom otporom ili koristiti dva povratna užeta postavljena paralelno.

U ovom podpoglavlju obradit će se utjecaj povratnog užeta na inducirani napon u konfiguraciji jednokolosiječne pruge u slučajevima kada povratno uže nije postavljeno odnosno za slučajeve s povratnom užadi prema tablici 4.5. Prvo je potrebno odrediti raspodjelu struja u

sustavu prema modelu koji je opisan na početku ovog poglavlja. Raspodjela povratnih struja u odnosu na struju napajanja prikazana je narednim slikama.

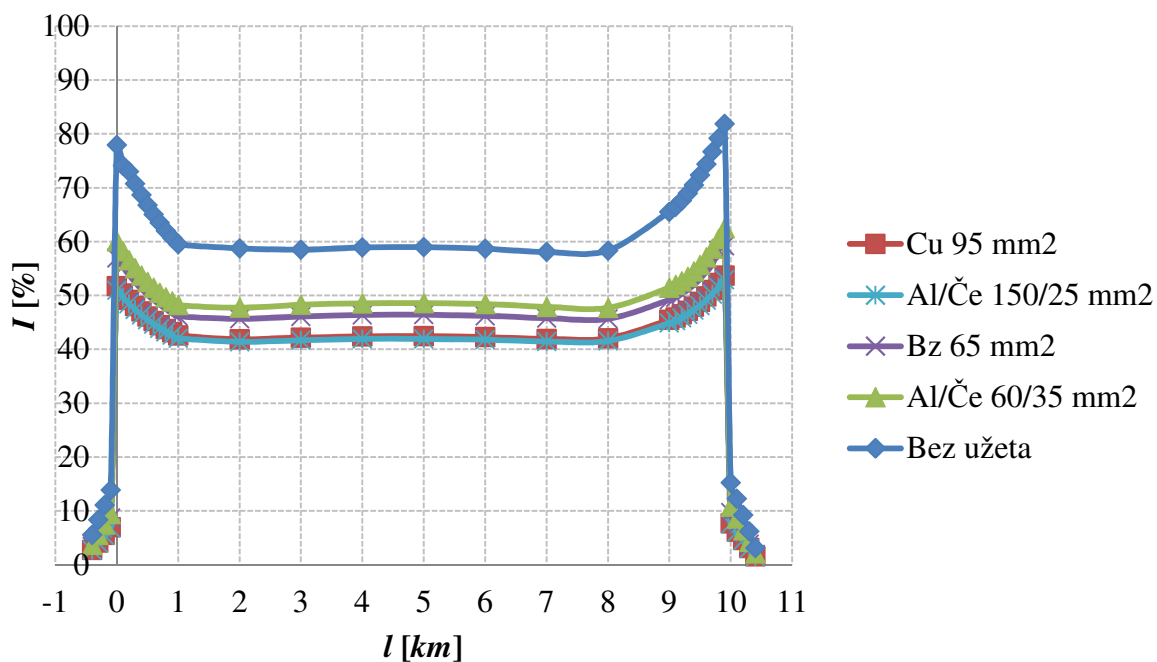
Povratna struja u povratnom užetu značajno se razlikuje ovisno o tipu povratnog užeta. Jasno, ukoliko povratno uže nije postavljeno kroz njega ne teče struja što je prikazano slikom 4.20. Povećanjem presjeka užeta povećava se udio povratne struje u povratnom užetu. Izvedba povratnog užeta iz bakra presjeka  $95 \text{ mm}^2$  i alu-čelik  $150/25 \text{ mm}^2$  imaju gotovo identičan učinak na raspodjelu struje. Ovo je uvjetovano vrlo sličnim vrijednostima vlastite impedancije ova dva tipa užeta.



Slika 4.20 Udio ukupne povratne struje u različitim povratnim užetima

Udio povratne struje kroz tračnice mijenja se u ovisnosti o izvedbi povratnog užeta (slika 4.21). Najveći je udio dobiven kada povratno uže nije postavljeno jer su u tom slučaju tračnice jedini povratni put. Udio struje kroz tračnice smanjuje se s povećanjem udjela u povratnom užetu. Radi toga je najrelevantnije razmotriti vrijednosti ukupne povratne struje.

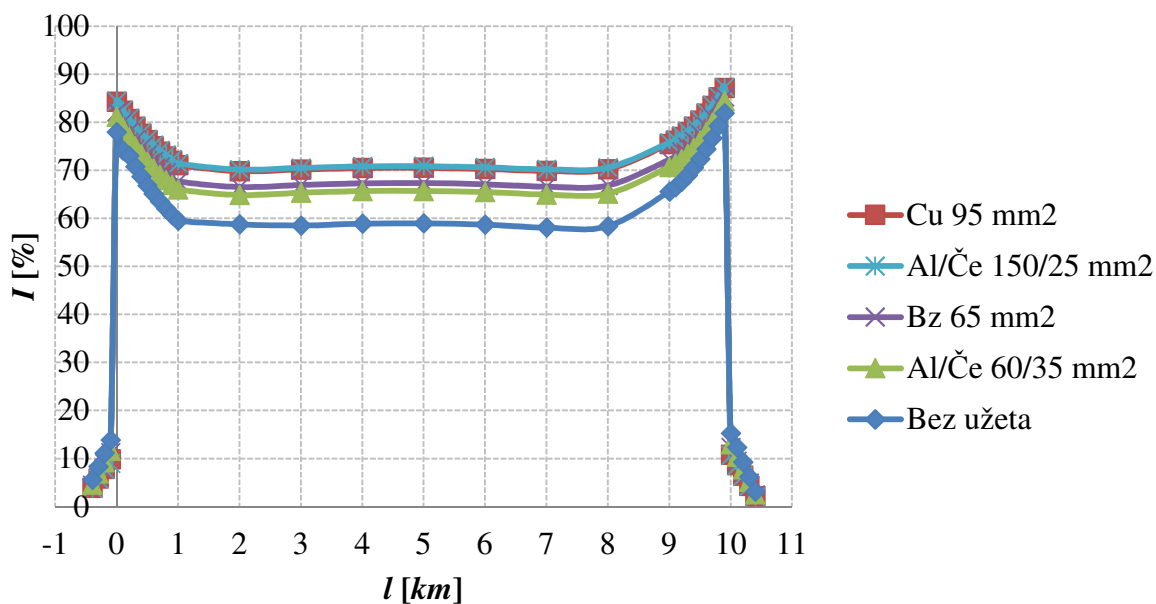




Slika 4.21 Udio ukupne povratne struje u tračnicama uz različite tipove povratne užadi

Na slici 4.22 prikazana je ukupna povratna struja koja teče tračnicama i povratnim užetom i to postotno u odnosu na ukupnu povratnu struju koja je jednaka struji napajanja. Dio struje koji se od elektrovočnog vozila vraća prema elektrovočnoj podstanici teče kroz zemlju. Čim je manji postotak povratne struje kroz tračnice i povratno uže, manji je pozitivni učinak instalacije povratnog užeta.

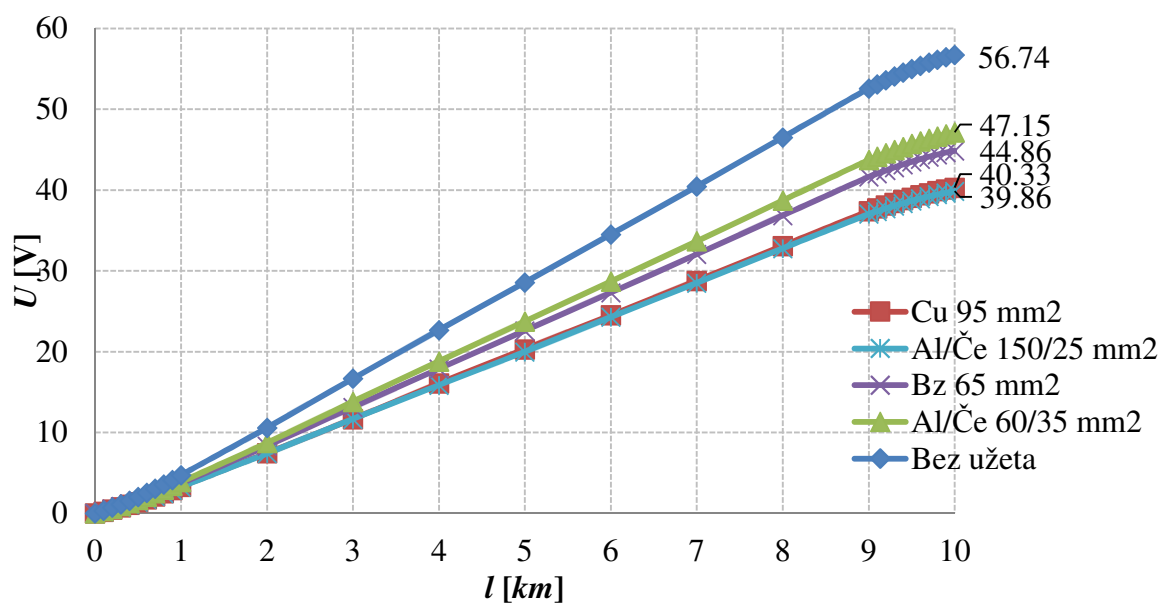
Povratna struja, kako je vidljivo sa slike 4.22 značajno teče tračnicama i povratnim užetom u blizini elektrovočnog vozila i podstanice, no s udaljenošću od ovih objekata udio opada da bi na udaljenostima većima od 2 km povratna struja imala stalan udio.



Slika 4.22 Udio ukupne povratne struje u tračnicama i različitim povratnim užetima

Dovedu li se u vezu podaci upisani u tablicu 4.5 i udjeli struja sa slike 4.22 jasna je korelacija manjeg specifičnog otpora užeta i većeg udjela povrate struje. Kako manji otpor povratnog užeta implicira manju ukupnu impedanciju povratnog kruga tračnice – povratno uže, to je ovakav rezultat očekivan.

Inducirani napon u konfiguraciji opisanoj u prethodnim podpoglavljima prikazan je na slici 4.23.



Slika 4.23 Inducirani napon u ovisnosti o svojstvima povratnog užeta

Pri klasičnom određivanju veličine utjecaja sustava električne željeznice ne uzima se u obzir presjek i materijal povratnog užeta što za posljedicu može imati značajne pogreške u proračunu utjecaja. Za odabranu konfiguraciju jednokolosiječne pruge, inducirani napon bez zaštitnog užeta iznosi 56,74 V. Koristeći povratnu užad napon se reducira na vrijednosti od 39,86 V do 47,15 V odnosno od 0,70 do 0,83. Ovaj raspon vrijednosti je značajan te je pri određivanju elektromagnetskih utjecaja na metalne strukture u koridoru elektrificirane pruge potrebno u obzir uzeti i svojstva povratnog užeta. Korištenje stalne vrijednosti redukcijuskog faktora je približno i potrebno ga je zamijeniti pristupom koji preko modela uzima promjenjiv udio povratne struje ovisan o tipu povratnog užeta.

#### **4.1.3.4 Ovisnost veličine inducirano napona o zaštitnom užetu telekomunikacijskog voda**

U dosadašnjim razmatranjima modelirali su se različiti oblici izvedbe jednokolosiječnog željezničkog sustava. Objasnjeno je kako postavljanje povratnog užeta može značajno smanjiti elektromagnetski utjecaj na metalne strukture. Ipak, povratno uže ne mora se nužno nalaziti u blizini kontaktnog voda. U poglavlju 3.2.2 dani su izrazi koji opisuju utjecaj povratnog užeta ovisno o veličini njegove vlastite impedancije i međuumpedancija s ostalim vodičima.

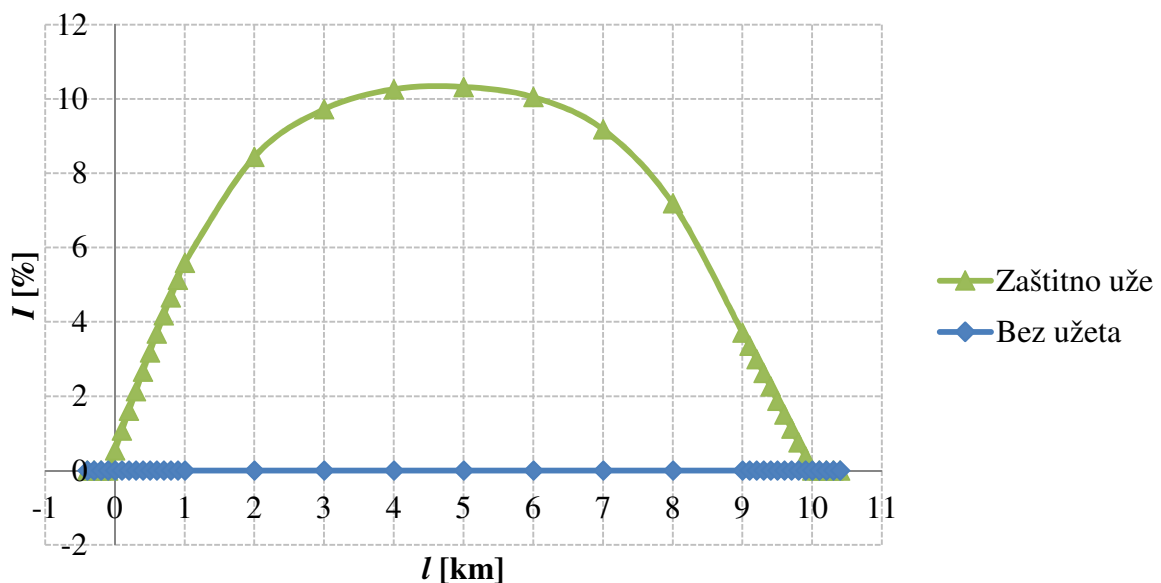
Telekomunikacijski vodovi za zračne linije mogu se izvesti sa zaštitnim užetom kako je prikazano slikom 3.16. Osnovna je uloga ovog zaštitnog užeta mehaničko pričvršćivanje na stupove telekomunikacijske mreže, no uz mehaničku ulogu ovo uže ima i električnu koja je vrlo značajna u razmatranju elektromagnetskih utjecaja. Zaštitno uže telekomunikacijskih vodova smješteno je vrlo blizu vodiča što ima pozitivan učinak na smanjenje utjecaja odnosno povećanje redukcijuskih svojstava.

Telekomunikacijski vodovi TK33U i TK53U su samonosivi kabeli s ugrađenim zaštitnim užetom použenim iz čeličnih pocinčanih žica promjera 1,0 i 1,2 mm. Broj pocinčanih žica u snopu zaštitnog užeta ovisi o masi kabela i može iznositi 3, 7, 12 ili 19, a što određuje promjer zaštitnog užeta odnosno njegovu impedanciju.

U prethodnom podpoglavlju razmatrana je veličina inducirano napona ovisno o vrsti povratnog užeta u željezničkom sustavu. Specijalan slučaj je kada povratno uže nije instalirano. U tom slučaju dobivena je najviša vrijednost inducirano napona. Kako bi se ispitaio učinak zaštitnog užeta telekomunikacijskog kabela, usporedit će se slučaj kada telekomunikacijski vod nije izveden sa zaštitnim užetom (tip kabela TK59) odnosno kada je ugrađeno zaštitno uže (tip kabela TK33U) i to uz geometriju željezničkog sustava kada povratno uže nije instalirano.

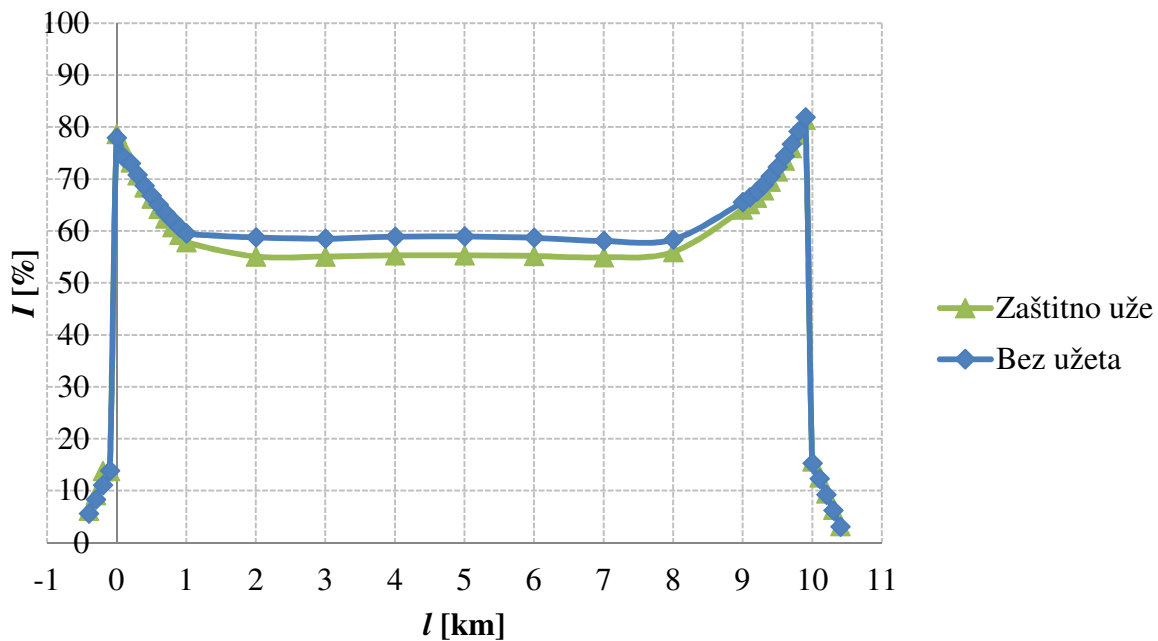
Ovdje treba imati na umu prije dobivene zaključke kako vrijednost povratne struje kroz tračnice i povratno uže nije stalna na cijeloj duljini utjecaja već se ona mijenja i povećava približavanjem elektrovučnoj podstanici ili elektrovučnom vozilu. Ovaj se učinak može uočiti i u ovom slučaju kada se zaštitno uže telekomunikacijskog voda nalazi u neposrednoj blizini osjetljivih struktura (slika 4.24). Ukupna struja koja teče od elektrovučnog vozila prema elektrovučnoj stanici prikazana je kao postotna vrijednost struje napajanja na slici 4.25. Udio povratne struje sličan je kao i u slučajevima kada je povratno uže instalirano na stupovima željezničkog sustava. Uz zaštitno uže udio povratne struje koji teče tračnicama i zaštitnim užetom veći je nego u slučaju da zaštitno uže ne postoji (slika 4.26). Ovo je očekivan rezultat jer se smanjenjem impedancije postiže veći udio povratne struje kroz metalne strukture kako je prije objašnjeno.

Inducirani napon, kao posljedica induktivne sprege izravno je ovisan o struji odnosno magnetskom polju. Iako je dio struje koji se vraća zaštitnim užetom telekomunikacijskog kabela mnogostruko manji od struje koja se vraća tračnicama, značaj struje kroz zaštitno uže je važan zbog njegove blizine osjetljivoj strukturi. Struja kroz zaštitno uže ima veći utjecaj na inducirani napon od struje u tračnicama. Kako povratna struja i struja napajanja imaju različit smjer to će na dijelovima doći do smanjenja ukupnog inducirano napona.

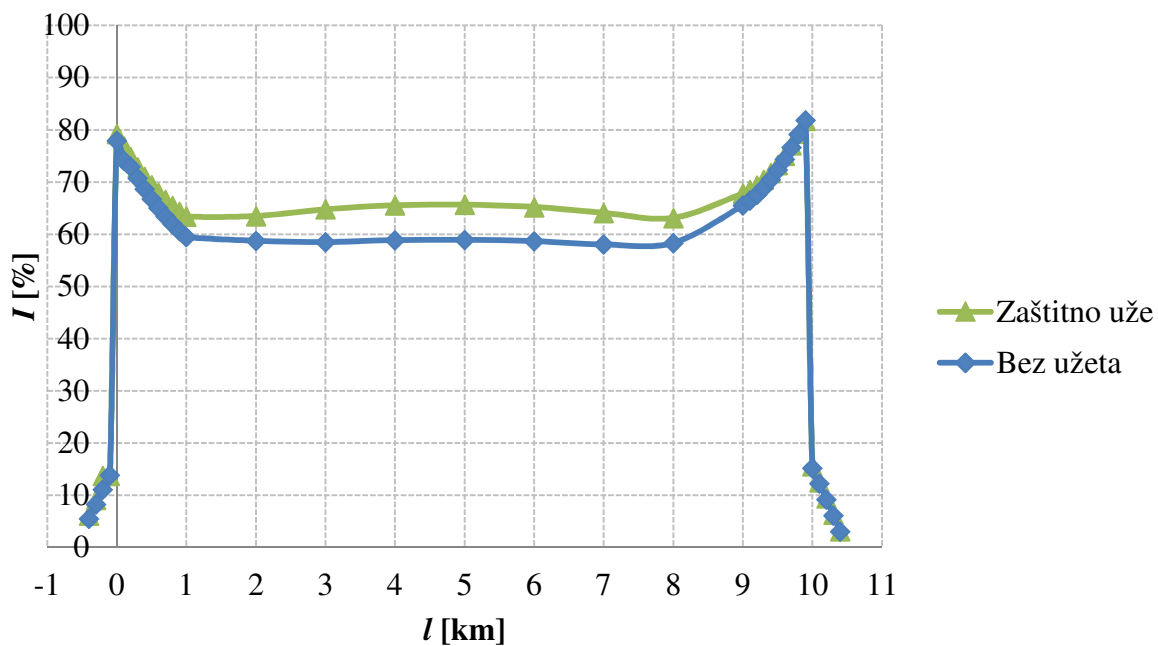


Slika 4.24 Udio ukupne povratne struje u zaštitnom užetu telekomunikacijskog voda

Najvišu vrijednost povratna struja u zaštitnom vodiču doseže na sredini razmatrane dionice. Uz elektrovučnu podstanicu i elektrovučno vozilo ova struja poprima male vrijednosti zbog udaljenosti zaštitnog užeta od željezničkog sustava i otpora koji prolasku struje pruža zemlja.



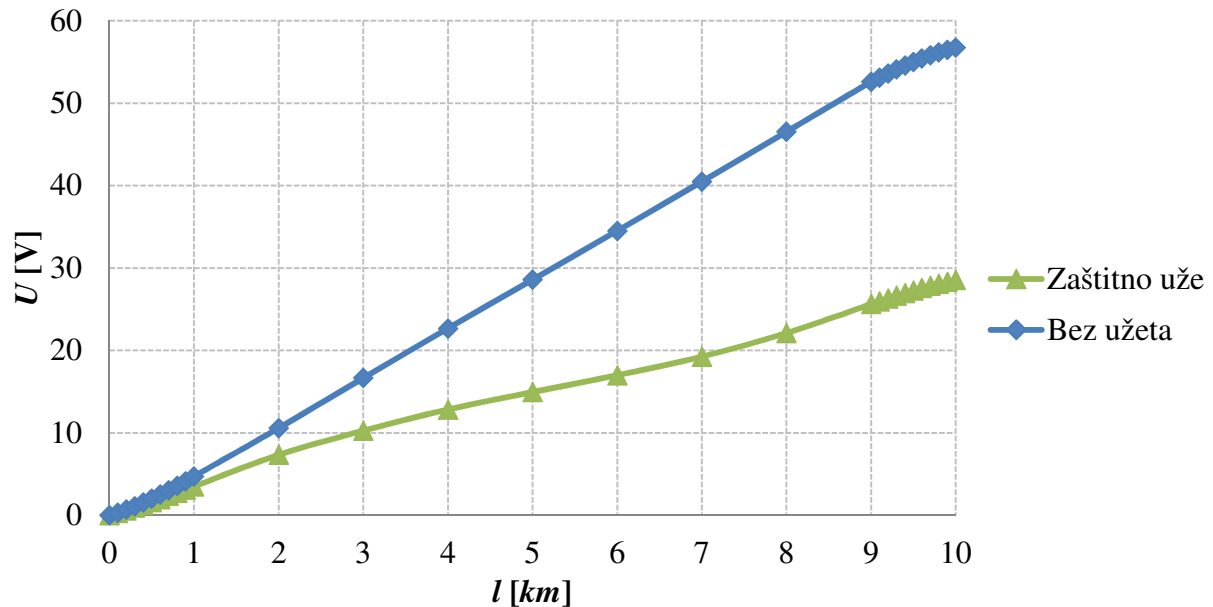
Slika 4.25 Udio ukupne povratne struje u tračnicama sa i bez zaštitnog užeta



Slika 4.26. Udio ukupne povratne struje u tračnicama i zaštitnom užetu

Obzirom da je udio struje koji se vraća zaštitnim užetom relativno malen, povratna struja kroz tračnice i ukupna povratna struja u razmatranom sustavu su vrlo sličnog iznosa što je prikazano slikama 4.25 i 4.26.

Veličina inducirano napona prikazana je slikom 4.27.



Slika 4.27 Udio ukupne povratne struje u tračnicama i zaštitnom užetu

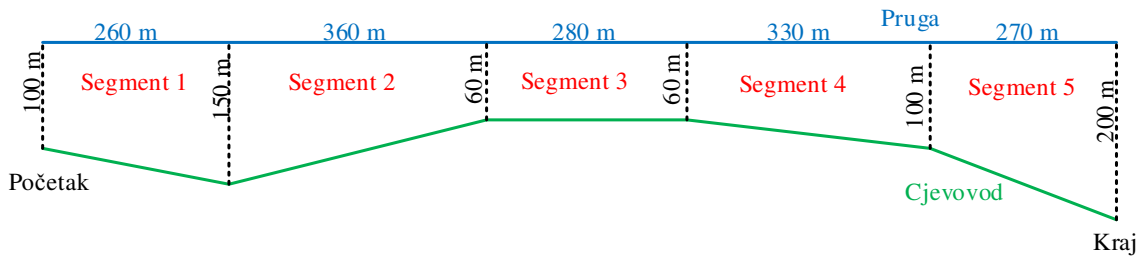
I dok je ukupni inducirani napon bez povratnog i zaštitnog užeta vrijednosti 56,47 V, ukupni inducirani napon uz zaštitno uže iznosi 28,54 V. Ovo potvrđuje da ugradnja dodatnog užeta, bilo ono povratno ili zaštitno uže, blagotvorno djeluje na smanjenje inducirano napona i elektromagnetskih utjecaja.

#### 4.1.4 Određivanje inducirano napona na podzemnom cjevovodu

Podzemni metalni cjevovodi mogu doći pod utjecaj sustava električne željeznice induktivnom spregom. Način određivanja veličine utjecaja sličan je opisanom postupku u ovom poglavlju. U [6] i [9] prikazan je način proračuna magnetskog polja u okolini elektrificirane željeznice te određen utjecaj na podzemni cjevovod korištenjem programa EMTP-ATP [48].

Sustav je modeliran LCC modelom (line-cable constant model) i pojednostavljen je kako bi se, prije svega, uočile tendencije i ovisnost inducirano napona o izvedbi uzemljenja cjevovoda. Sustav je podijeljen na 5 segmenata kako je prikazano slikom 4.28 te je svaki segment zasebno modeliran. Za struju napajanja uzeta je maksimalna dozvoljena vrijednost za prikazanu

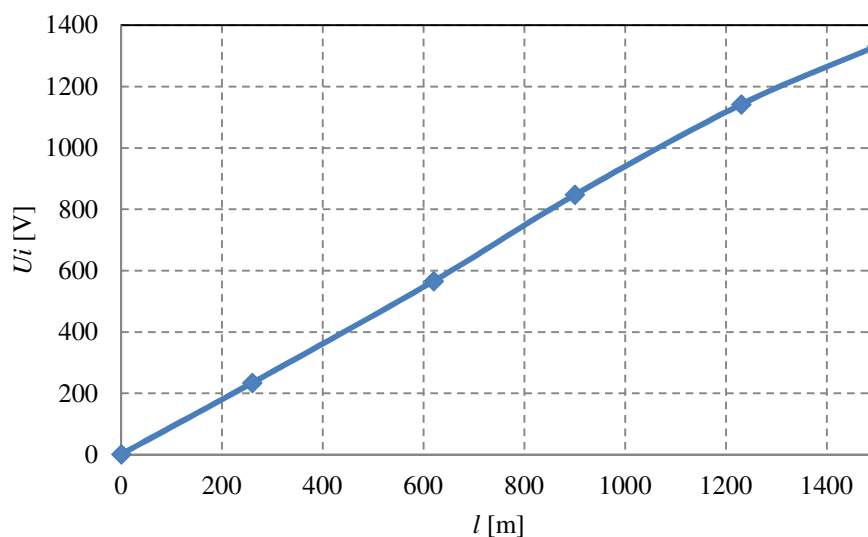
konfiguraciju mreže 660 A te je pretpostavljeno da se polovica te struje vraća tračnicama uz specifični otpor tla  $500 \Omega\text{m}$ .



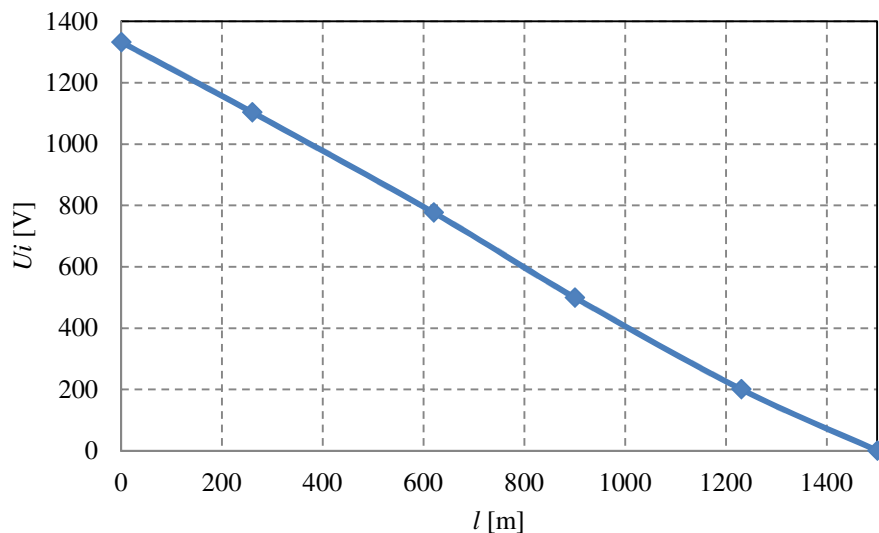
Slika 4.28 Položaj cjevovoda uz prugu

Ispitano je kako način uzemljenja cjevovoda utječe na porast napona. Izvedeno je uzemljenje na pojedinim krajevima i na oba kraja. Dobiveni inducirani naponi prikazani su narednim slikama i uspoređeni s dostupnim rezultatima [70].

Na slici 4.29 prikazan je porast napona na cjevovodu uzemljenom na početku. Uočljiv je veći nagib krivulje na segmentima gdje je udaljenost pruge i cjevovoda manja. Napon kontinuirano raste od točke uzemljenja prema otvorenom kraju. Slično je prikazano slikom 4.30 s tim da je ovdje cjevovod uzemljen na kraju te inducirani napon pada prema kraju. Ukupan inducirani napon je jednak bez obzira je li cjevovod uzemljen na kraju ili na početku.



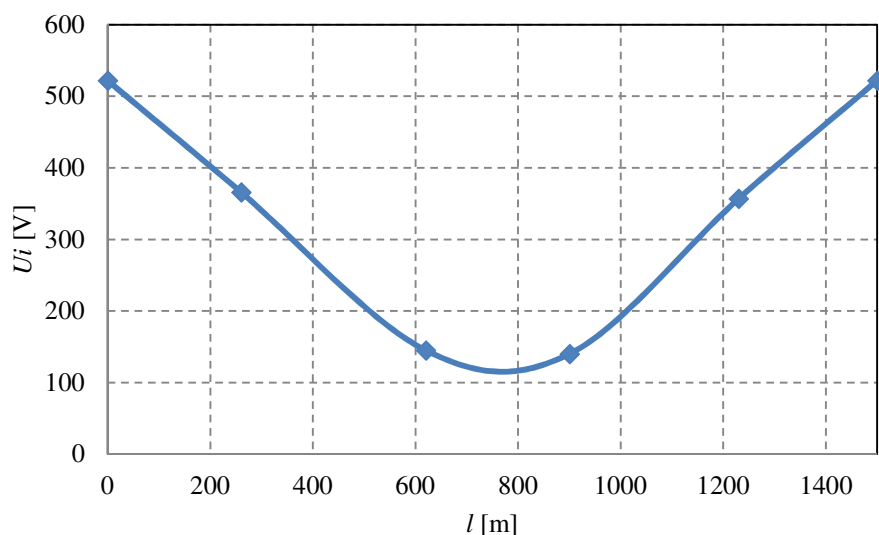
Slika 4.29 Inducirani napon na cjevovodu uzemljenom na početku



Slika 4.30 Inducirani napon na cjevovodu uzemljenom na kraju

Uzemlji li se cjevovod na oba kraja, napon će biti najveći na krajevima, a najmanji oko sredine (slika 4.31). Razlog tome je tok struje u suprotnim smjerovima i poništavanje utjecaja unutar samog cjevovoda. Ipak, napon na krajevima je značajno manji od napona u slučaju uzemljenja na samo jednom kraju.

Iz danih razmatranja i priloženih proračuna vidljivo je da se magnetska sprega jednako ponaša na telekomunikacijskim vodovima i podzemnim cjevovodima. Iz tog razloga pri provjeri točnosti rada modela pozornost je posvećena samo telekomunikacijskim vodovima.



Slika 4.31 Inducirani napon na cjevovodu uzemljenom na oba kraja



## 4.2 Zaključna razmatranja o određivanju elektromagnetskih utjecaja

U ovom poglavlju identificirani su ključni elementi koji utječu na veličinu induciranog napona na metalnim strukturama u koridoru elektrificirane pruge, razmotreni su njihovi učinci i doneseni zaključci o ovisnosti veličine induciranog napona o svakom pojedinom elementu nezavisno.

Dosadašnja istraživanja preporučuju korištenje redukcijskih faktora različitih, ali stalnih, vrijednosti ovisno o položaju osjetljive strukture na kojoj se računa utjecaj prema kontaktnoj mreži. Iz istraživanja prezentiranih u ovom poglavlju može se zaključiti da dosadašnji pristup dobro opisuje slučajeve u dijelovima elektrovočnog sustava koji su udaljeni više od 2 km od elektrovočnih podstanica i elektrovočnih vozila. U stvarnom pogonu osjetljive strukture se vrlo često nalaze na udaljenostima manjima od 2 km gdje je korištenje stalnih redukcijskih faktora pogrešno.

Relativna vrijednost povratne struje kroz tračnice i povratno uže u odnosu na struju napajanja prije svega ovisi o specifičnom otporu tla, odvodu tračnica te izvedbi povratnog užeta. U nekim slučajevima pored osjetljive strukture moguće je postaviti zaštitno ili povratno uže koje također ima značajan učinak na vrijednost povratnih struja i induciranog napona. Kako bi se odredila raspodjela struja kroz tračnice, povratno uže i zemlju razvijen je model na temelju vlastitih i međusobnih impedancija tračnica i vodiča.

Impedancije ovise o specifičnom otporu tla na kojem je izgrađena željeznička pruga. Vrijednosti specifičnog otpora tla mogu biti vrlo promjenjive i kreću se 10  $\Omega$ m do 5000  $\Omega$ m. Slijedom ove činjenice ovisnost raspodjele povratnih struja i induciranih napona o specifičnom otporu tla istražena je parametarski. Pokazalo se da specifični otpor tla nema značajan učinak na raspodjelu povratnih struja dok je utjecaj na vrijednost induciranog napona zamjetan. Ipak, ovaj utjecaj je svojstvo na koju se vrlo teško može utjecati jer je posljedica svojstava tla, a ne gradnje ili izvedbe elektrovočnog sustava.

Izvedba temelja i uzemljenja stupova kontaktne mreže izravno određuje veličinu odvoda tračnica. Uzme li se u obzir da i svojstva tla utječu na kvalitetu uzemljenja stupova, bilo je potrebno mjerenjima odrediti vrijednosti otpora odnosno odvoda tračnica. Veći odvod tračnica implicira manju povratnu struju kroz tračnice i povratno uže. Posljedica toga je veći inducirani napon na osjetljivoj metalnoj strukturi. Modelirana je kontaktna mreža elektrovočnog sustava s različitim vrijednostima odvoda tračnica te je izračunat inducirani napon. Pri vrijednostima odvoda od 0,2 S/km do 5 S/km inducirani napon se povećao 32%.

Povratno uže može se postaviti na stupove kontaktne mreže kako bi se smanjila impedancija povratnog puta struje. Dok je položaj na stupovima, u pravilu unaprijed definiran ovisno o tipu kontaktne mreže, presjek i materijal iz kojeg se povratno uže izvodi može biti različit. Istražio se utjecaj četiriju izvedaba povratnog užeta te usporedio sa slučajem u kojem povratno uže nije bilo postavljeno. Za uobičajene izvedbe povratnog užeta veličina induciranog napona može se razlikovati i do 40%.

Položaj povratne užadi definiran je odabranom konfiguracijom kontaktne mreže. Naprotiv, zaštitno uže postavlja se neposredno uz osjetljivu strukturu kablenskog snopa telekomunikacijskog voda. Na primjeru telekomunikacijskog kabela tipa TK33U pokazalo se kako se može postići vrlo značajna redukcija induciranog napona u slučaju korištenja kabela uz koji se postavlja zaštitno uže i uzemljuje na oba kraja.

Problematika elektromagnetskih utjecaja električne željeznice na podzemne cjevovode dotaknuto je o ovom poglavlju. Pokazalo se kako je proračun u ovom slučaju istovjetan proračunu na telekomunikacijskim vodovima te će se u nastavku rada model provjeriti na odabranim primjerima utjecaja na telekomunikacijske vodove.

## **5 VERIFIKACIJA MODELA ZA PRORAČUN UTJECAJA**

Razvijeni model za proračun utjecaja elektrovučne mreže i postrojenja na metalne strukture zasnovan je na međusobnoj vezi pojedinih vodova i sustava međuumpedancijom. U prethodnom poglavlju identificirani su parametri čija promjena najznačajnije utječe na vrijednost induciranog napona. Kako bi se utvrdila ispravnost modela potrebno je provesti njegovu verifikaciju odnosno provjeru točnosti rezultata.

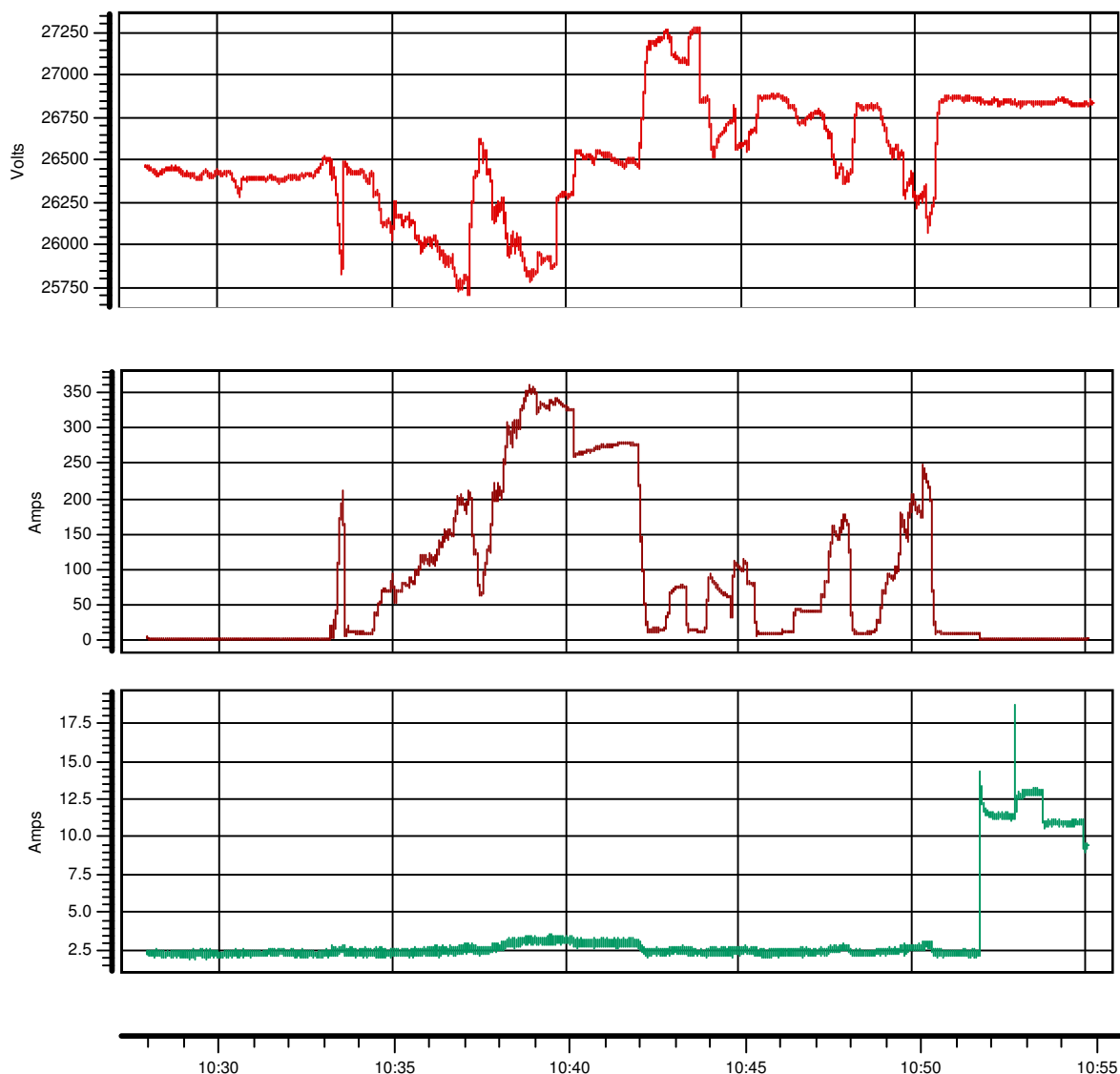
Struja napajanja elektrovučnog vozila, na pojedinom kraku na kojem se promatra utjecaj, ključan je podatak pri provjeri dobivenih vrijednosti induciranog napona. Mjerenje struje napajanja obavlja se u elektrovučnim podstanicama preko strujnih mjernih transformatora. Ovisno o režimu rada, broju elektrovučnih vozila i konfiguraciji pruge, struja napajanja može poprimati različite vrijednosti. Pri proračuna i provjere rezultata induciranog napona treba posebnu pozornost posvetiti određivanju stvarne struje napajanja pri mjerenju, a što se postiže vremenskom sinkronizacijom mjerenja.

Osjetljivi sustavi u koridoru pruge imaju ograničenu duljinu. Telekomunikacijski vodovi se protežu od centrala do korisnika, a cjevovodi se mogu razdijeliti na dionice prema položajima mjerno-redukcijskih i blokadnih stanica, ali i prema krakovima napajanja u sustavu električne željeznice. Izvedba osjetljivih sustava može bitno utjecati na smanjenje ili povećanje veličine utjecaja, no cilj ovog rada je prije svega ocijeniti utjecaj elektrovučnog sustava te će se proračun usredotočiti na osjetljive sustave bez izravne zaštite ekranima.

U ovom poglavlju objasnit će se postupak mjerenja relevantnih veličina i provjeriti rezultati dobiveni razvijenim modelom.

### **5.1 Mjerenje struje napajanja**

Određivanje struje napajanja u kontaktnoj mreži za vrijeme mjerenja induciranog napona potrebno je kako bi se omogućila kvalitetna usporedba s modelom. Instrumentima se mjeri efektivna vrijednost struje napajanja koja nije potpuno sinusoidalna. Oscilacije uzrokuju uređaji učinske elektronike ugrađeni u elektrovučnim vozilima, a koji ispravljaju napon. Na slici 5.1 prikazan je oscilogram vrijednosti napona i struje napajanja na jednom kraku napajanja.



Slika 5.1 Izmjereni oscilogrami napona i struje u elektrovučnoj podstanici

Struja napajanja mijenja se skokovito s promjenom režima vožnje vlaka. U trenucima pokretanja vlaka ili pri nailasku na uzbrdicu struja se naglo povećava, a napon pada. Sustav regulacije razine napona održava njegovu vrijednost oko 26,5 kV. Struja napajanja se mijenja ovisno o potrebnoj snazi vučnog vozila, karakteristikama vlaka, režimu vožnje i geometrijskim svojstvima pruge. Pri kretanju jednog vlaka na kraku napajanja tipične vrijednosti struja su do 400 A. Na slici 5.1 prikazani su oscilogrami struje na dva susjedna kraku napajanja pri nailasku jednog vlaka preko njih. Na apscisi je prikazano vrijeme. U trenutku prolaska vlaka pored elektrovučne podstanice, mijenja se krak napajanja. Struja na prvom kraku pada na 0, a na dugom kraku struja se naglo povećava na vrijednost struje napajanja. Efektivna vrijednost struje prikazane na slici 5.1 ne može se izravno koristiti u proračunu induciranog napona već je

potrebno utvrditi koji dio struje napajanja se vraća tračnicama i povratnim užetom ako je postavljeno.

U prethodnom poglavlju detaljno je opisano na koji način se dolazi do struje smetnje i koji redukcijски faktori se koriste pri njezinu određivanju. Koristeći model za proračun induciranih napona nije potrebno struju smetnje određivati preko redukcijских koeficijenata, već na prikladan model aplicirati struju napajanja u kontaktnu mrežu. Struja napajanja može se relativno jednostavno mjeriti u elektrovučnim podstanicama i u odabranom trenutku možemo pretpostaviti da ima stalan iznos na cijelom kraku dok struja smetnje ovisi o brojnim parametrima i promjenjiva je po duljini. Iz tog razloga modelom se postiže jednostavniji i precizniji proračun.

Struja napajanja mjeri se u elektrovučnoj podstanici na strujnom mjernom transformatoru postavljenom u 25 kV polju. Za kvantitativnu analizu značajna je efektivna vrijednost struje napajanja dok valni oblik nije od presudnog značenje stoga će se kvalitativna analiza induciranih napona obaviti u narednom poglavlju.

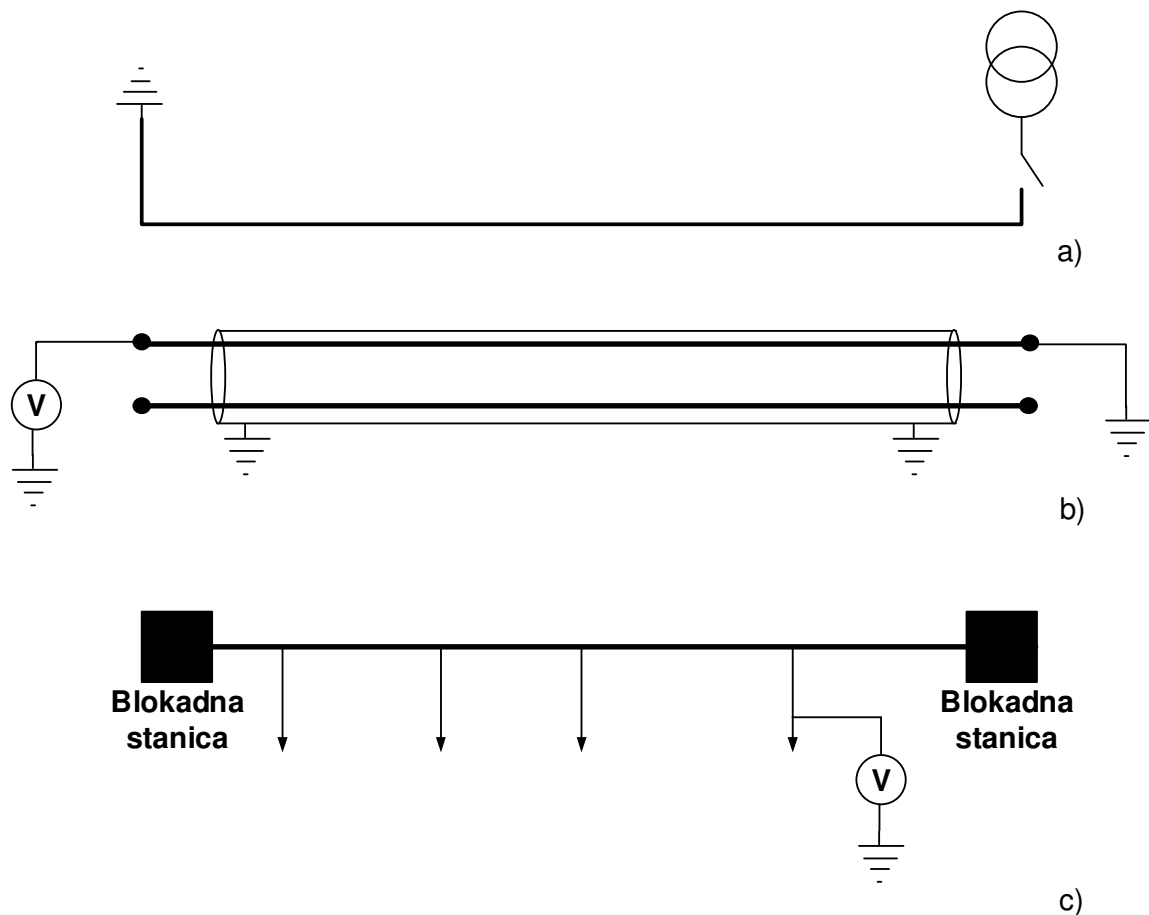
## 5.2 Mjerenje induciranih napona

Inducirani napon na metalnim strukturama mjerio se uz kontrolirane uvjete. Posebno je važno poznavati struju u kontaktnoj mreži. Struja u kontaktnu mrežu pri mjerenjima može se dovesti iz elektrovučne podstanice preko kućnog transformatora. Utjecaj drugih elektroenergetskih objekata treba pokušati smanjiti na najmanju mjeru kako bi dobiveni rezultati bili usporedivi s rezultatima dobivenim razvijenim modelima ili propisanim obrascima.

Jedan kraj metalnog voda se uzemljuje, a na drugi se priključi voltmetar [71]. Ovime se postiže porast induciranih napona od vrijednosti 0 u točki uzemljenja. Na cjevovodima se napon može mjeriti po dijelovima ovisno o dostupnim izvodima za priključak instrumenata između blokadnih stanica. Najčešće se cjevovodi i telekomunikacijski vodovi postavljaju paralelno pruzi i vrlo rijetko dolazi do smanjenja induciranih napona po dijelovima.

Na slici 5.2 prikazan je način mjerenja induciranih napona uz kontaktnu mrežu a), na telekomunikacijskim vodovima b) i cjevovodima c). Transformator na slici 5.2 a) predstavlja izvor struje kroz kontaktnu mrežu. Mjerenje induciranih napona telekomunikacijskim vodovima obavlja se na dostupnim izvodima u telefonskim centralama i na razdjelnicama. Ovisno o konfiguraciji voda, nije nužno da se najviši inducirani napon pojavi na otvorenom kraju, no u praksi je to najčešće slučaj. Vođenje osjetljive strukture u više smjerova različitih

obzirom na smjer struje dovodi do smanjenja inducirano napona. Jednako tako, pri vođenju vodova uz elektrovučne podstanice ili postrojenja s neutralnim sekcijama, struja može promijeniti smjer i po dijelovima poništavati utjecaj. Ovim činjenicama treba jednako baratati u fazi proračuna, ali i pri mjerenjima.

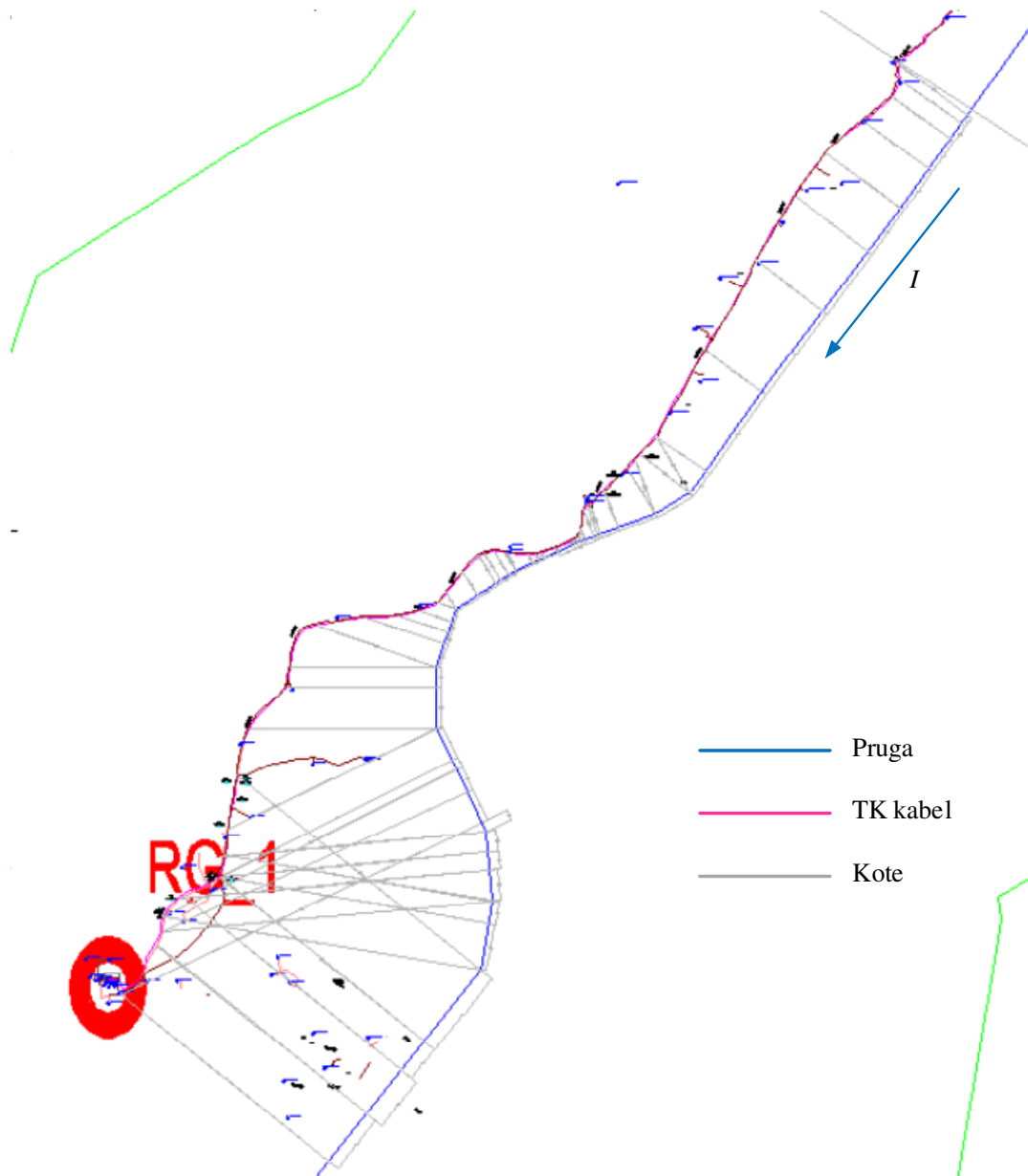


Slika 5.2 Shema spoja za mjerenje inducirano napona na telekomunikacijskom vodu i cjevovodu

### 5.3 Usporedba i provjera rezultata – primjer I

Verifikacija će se obaviti na odabranom telekomunikacijskom vodu koji se vodi paralelno pruzi. Vod je izveden kao kabel tipa TK59. Mjerenjem je utvrđen specifično otpor tla na području kojim prolazi kabel vrijednosti oko  $300 \Omega\text{m}$ . Smjer struje napajanja je određen položajem elektrovučne podstanice iz koje se krak napaja. Na slici 5.3 strelicom je prikazan smjer struje. Najnepovoljniji slučaj događa se pri protjecanju struje napajanja kontaktnom mrežom uzduž cjelokupne duljine kabela.

Položaj kabela u prostoru prikazan je slikom 5.3. Uz kabel, prikazan je položaj kontaktne mreže, početak i kraj kabela te kote ortogonalnih projekcija dijelova kontaktne mreže koji utječu na kabel. Ukupan broj segmenata određen je prema postavkama proračuna opisanim u poglavlju 3.1. Udaljenost svakog pojedinog segmenta kabela od kontaktne mreže  $a$  dobivena je kao geometrijska sredina udaljenosti krajeva segmenta od kabela.



Slika 5.3 Položaj telekomunikacijskog kabela uz prugu

Segmenti su opisani duljinom  $l$  i udaljenošću od kabela. Međuinduktivitet je ovisan o specifičnom otporu tla i udaljenosti sustava izvora smetnje i osjetljivog sustava. U tablici 5.1 prikazani su podatci o pojedinim segmentima te pripadajući međuinduktiviteti određeni kako je opisano u poglavlju 3.1.1.

Tablica 5.1 Segmenti kontaktne mreže uz kabel

Dionica	$a$ [m]	$M$ [ $\mu\text{H}/\text{km}$ ]	$l$ [m]
1	527,3	280,6	119,81
2	539,2	276,4	110,10
3	532,0	278,9	73,30
4	563,8	268,2	179,14
5	584,7	261,5	92,92
6	537,0	277,2	44,66
7	635,5	246,0	62,17
8	572,0	265,5	34,15
9	527,1	280,6	40,67
10	0,0	0,0	18,71
11	724,6	221,8	67,16
12	656,1	240,1	49,83
13	571,9	265,5	20,14
14	480,6	297,7	68,72
15	333,7	365,2	83,39
16	295,2	387,9	38,84
17	206,0	454,4	46,81
18	134,1	533,8	24,59
19	86,2	615,7	23,35
20	53,3	704,7	26,13
21	46,3	730,4	49,77
22	59,7	683,7	43,02
23	64,5	669,3	11,84
24	61,0	679,7	18,27
25	50,9	713,2	17,06
26	29,0	817,3	35,36
27	17,1	914,5	12,98
28	12,8	967,9	11,93
29	9,6	1020,8	30,73
30	7,2	1074,7	33,21
31	7,1	1076,2	8,10
32	10,3	1009,2	7,77
33	17,2	914,2	9,08
34	35,2	781,3	18,67
35	59,2	685,3	8,16
36	61,3	678,7	5,08
37	69,1	656,6	37,93
38	96,3	595,1	78,61
39	116,1	560,5	79,49
40	122,2	551,0	53,60
41	129,5	540,3	191,79
42	152,1	510,5	200,14
43	174,0	485,7	148,38
44	182,5	476,8	107,67
45	169,7	490,3	93,75
46	149,1	514,3	73,54
47	143,7	521,0	37,71
48	157,7	503,9	21,45



Pri modeliranju sustava u računalnom programu vrijednost međuinuktiviteta odnosno sprege sustava električne željeznice i telekomunikacijskog kabela određena je sukladno obrascima za međusobne impedancije vodiča danima u (2.3) i u Prilogu A.

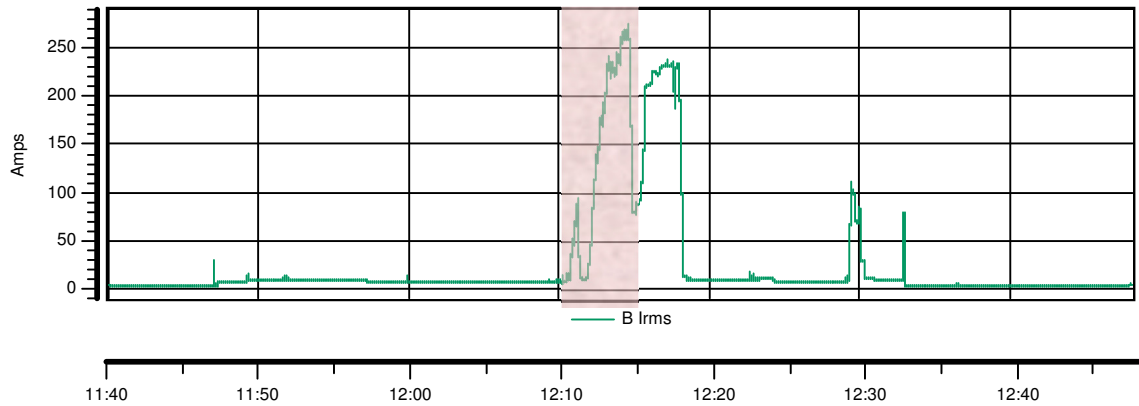
Kabel je izveden bez ekrana te ne postoji redukcija elektromagnetskih utjecaja samog kabela. Za najnepovoljniji slučaj, kada se utjecaj proteže na cjelokupnu duljinu kabela, vrijednosti redukcijskog faktora tračnica se uzimaju s vrijednošću 0,25 kako je opisano u poglavlju 4.1.3.1. jer je ukupna duljina kontaktne mreže u paralelnom vođenju 2,67 km.

Mjerenja su vremenski sinkronizirana. Prikaz položaja vlaka na pruzi u vremenu dan je na slici 5.4.



Slika 5.4 Položaj vlaka na pruzi pri mjerenju inducirano napona

Vlak se kretao po kraku napajanja prema elektrovučnoj podstanici. Sa slike 5.4 vidi se da se vlak prije 12:13 nalazi na dijelu pruge kojim se cijeli kabel nalazi pod utjecajem struje smetnje. Sinkrono s praćenjem kretanja vlaka mjerila se struja u elektrovučnoj podstanici, a grafikon je prikazan slikom 5.5.

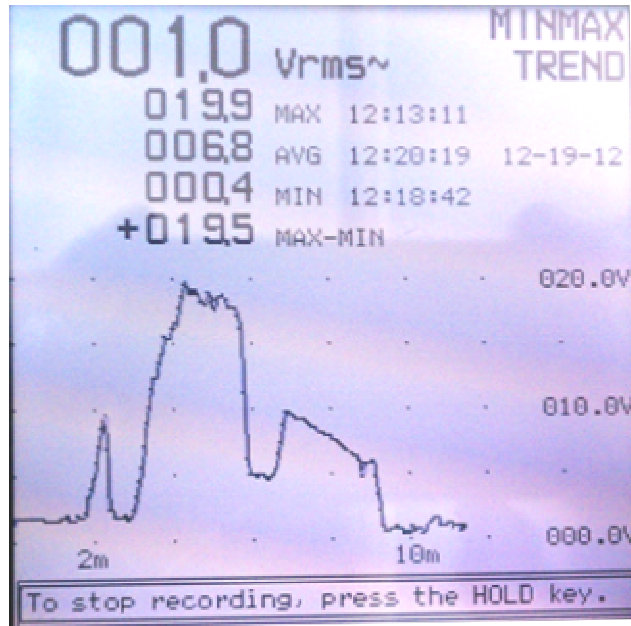


Slika 5.5 Struja napajanja vlaka za vrijeme mjerenja

Struja u kontaktnoj mreži naglo se mijenja nakon 12:11. Prije toga vlak je prometovao nizbrdo te je struja napajanja vrlo malena i određena potrošnjom pomoćnih pogona vlaka. Najviši iznos struja napajanja doseže u 12:13. Prema slici položaja vlaka 5.4 ova maksimalna struja teče segmentima iz tablice 5.1 i iznosi 280 A.

Cilj je provjeriti rezultate dobivene na standardan način prema usvojenim i opisanim obrascima i razvijenim modelom. Ukupan inducirani napon prema (3.6) i uz redukcijски faktor tračnica 0,25 iznosi 26,94 V. Kako bi usporedba bila valjana, korištena je vrijednost struje sukladno struji napajanja za vrijeme mjerenja 280 A.

Mjerenje induciranoг napona obavljeno je prema skici sa slike 5.2 te je dobivena vrijednost 19,5 V. Oscilogram induciranoг napona prikazan je slikom 5.6. Podudaranje oblika struje napajanja i induciranoг napona na kabelu je vrlo dobro. Uočava se jednaka tendencija ovih dvaju oblika u vremenu što je očekivano. Maksimalna vrijednost izmjerenog napona postignuta je u 12h13 što odgovara vremenu kada je izmjerena najviša vrijednost struje napajanja.



Slika 5.6 Inducirani napon izmjeren na telekomunikacijskom kabelu

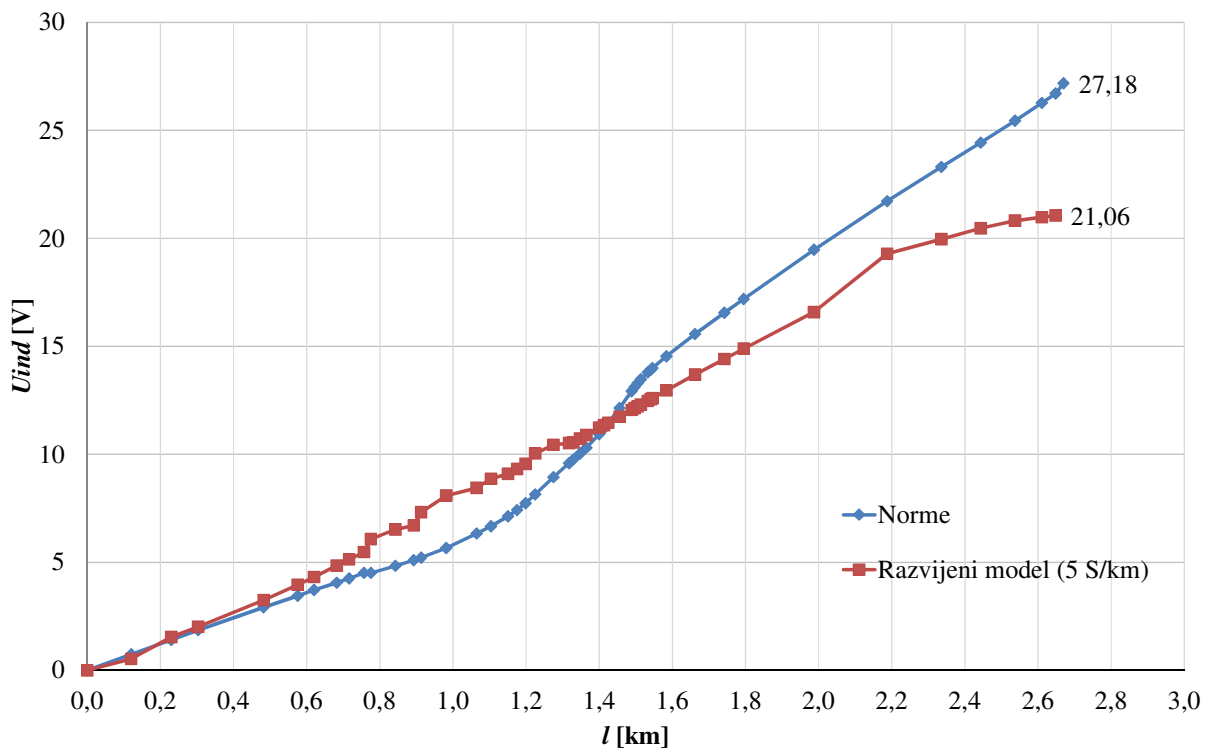
Razvijenim modelom modeliran je svaki segment zasebno. Odvod tračnica uvažen je po segmentima uz vrijednosti 5 S/km i 2 S/km. Model je zaključen otporom vrijednosti 5 Ω što predstavlja otpor uzemljivača prema slici 5.2, dok je napon mjeran na otporniku otpora 50 MΩ koji predstavlja ulazni otpor voltmetra. Međusobna sprega vodiča određena je matricom impedancija:

$$Z = \begin{bmatrix} 0,138 + j0,742 & 0,05 + j0,447 & 0,05 + j0,356 & 0,05 + j0,356 & 0,05 + jM_{15} \\ & 0,203 + j0,791 & 0,05 + j0,343 & 0,05 + j0,343 & 0,05 + jM_{25} \\ & & 0,075 + j0,678 & 0,05 + j0,440 & 0,05 + jM_{35} \\ & & & 0,075 + j0,678 & 0,05 + jM_{45} \\ & & & & 0,072 + j0,791 \end{bmatrix} \frac{\Omega}{km}$$

gdje je:

$M_{15} \dots M_{45}$  induktivna komponenta međuimpedancije određena udaljenošću telekomunikacijskog kabela i vodiča elektrovnog sustava.

Rezultat proračuna inducirano napona modelom je 21,06 V uz odvod 5 S/km. Na slici 5.7 prikazani su grafovi porasta inducirano napona dobiveni obrascima usvojenim u normama i razvijenim modelom. Vidljiva je jednaka tendencija porasta inducirano napona na prvom dijelu kabela dok je porast na drugom dijelu kabela manji pri proračunu razvijenim modelom. Ključna je, stoga, usporedba s vrijednošću izmjerenog napona.



Slika 5.7 Usporedba porasta induciranog napona dobivenog normama i razvijenim modelom

Pregled rezultata dan je u tablici 5.2. Svaki od dobivenih rezultata potrebno je kritički razmotriti. Izmjerena vrijednost može se uzeti kao referentna obzirom da su mjerenja obavljena sinkronizirano u kontroliranim uvjetima u sustavu električne željeznice. Pogreške pri mjerenju mogu se javi uslijed nepreciznosti mjernih instrumenata i pogreške očitavanja, no u ovom slučaju to se može zanemariti. Za usporedbu je potrebno poznavati izmjerenu vrijednost induciranog napona dobivenu osciloskopom ili drugim mjernim instrumentom standardne preciznosti i vremena uzorkovanja. U koridoru pruge mogu postojati i drugi izvori smetnje koji se najčešće ne mogu kontrolirati. Tu se prije svega radi o energetskim nadzemnim visokonaponskim vodovima i određenim niskonaponskim instalacijama. U blizini kabela na kojem je obavljeno mjerenje, na udaljenosti manjoj od 1000 m, nalaze se dva 110 kV i jedan 400 kV dalekovod. Ipak, vodovi u elektroenergetskom sustavu su, za razliku od elektrovučnog sustava, simetrirani te elektromagnetski utjecaj nije velik. Usprkos malom doprinosu ostalih izvora smetnje treba imati na umu da rezultat dobiven mjerenjem u sebi sadrže superponirane doprinose različitih izvora. Kako se vidi sa slika 5.5 i 5.6, valni oblici induciranog napona i struje napajanja se vrlo

dobro podudaraju. Iz toga se može zaključiti da je dominantan izvor induciranog napona na promatranom kabelu kontaktna mreža električne željeznice.

Tablica 5.2 Usporedba vrijednosti induciranog napona

Metoda	Inducirani napon [V]	Odstupanje
Mjerenje	19,50	
Model (5 S/km)	21,06	+8,0 %
Model (2 S/km)	19,67	+0,87 %
Norme	27,18	+39,4 %

Pri određivanju induciranog napona razvijenim modelom nisu poznati svi parametri, a najvažniji je odvod tračnica i stupova kontaktne mreže. Iz tog razloga izračunat je inducirani napon uz dvije vrijednosti odvoda. Dobiveni su rezultati 21,06 V i 19,67 V. Pri manjoj vrijednosti odvoda inducirani napon je manji kao što je prikazano u prethodnim razmatranjima. Dobivene vrijednosti veće su od izmjenjenog induciranog napona, no može se reći da su mu bliske. Što je izmjenjeni inducirani napon manji to je veći utjecaj izvora koji se ne mogu kontrolirati. Za točnija mjerenja bilo bi potrebno dovesti u kontaktnu mrežu veću vrijednost struje napajanja, a po mogućnosti i maksimalno dopuštenu struju kontaktne mreže. Uz odvod 2 S/km slaganje mjerenja i proračuna je izvrsno, a razlika iznosi svega 0,87 %. Pri povećanom odvodu razlika je nešto veća i iznosi 8,0 %.

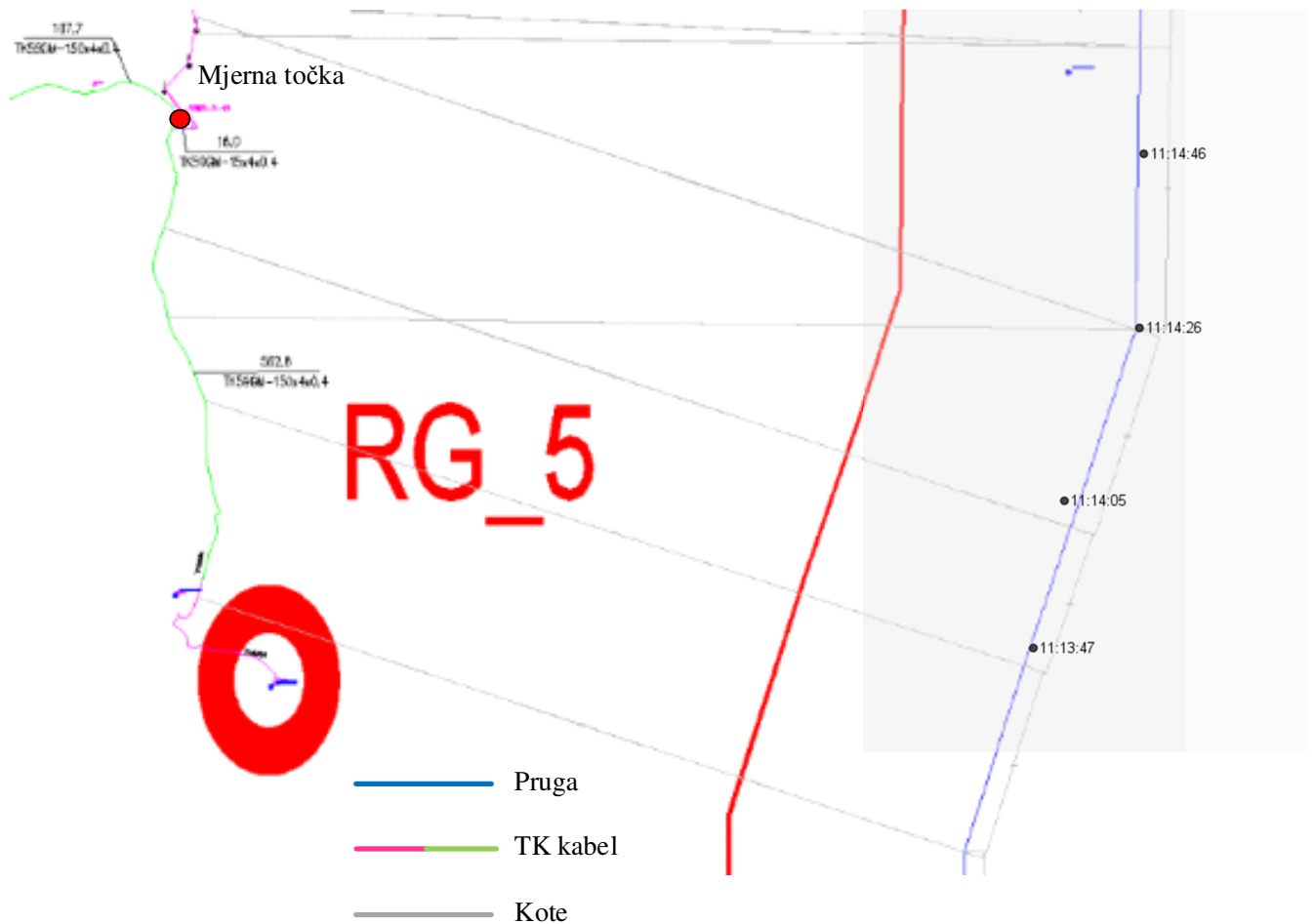
U poglavlju 3.1. detaljno je opisan način određivanja induciranog napona prema obrascima usvojenim u normama koristeći redukcijske faktore i tabelirane vrijednosti međuinduktiviteta. Ukupan inducirani napon dobiven na ovaj način iznosi 27,18 V što je 39,4% veći napon od napona dobivenog mjerenjem.

Iznijeti rezultati daju uporište za usvajanje razvijenog modela kao relevantnog za određivanje očekivanog induciranog napona na metalnoj strukturi na koju dominantan utjecaj ima elektrovočni sustav. Razvijeni model pruža mogućnost parametarskog određivanja utjecaja uz različite vrijednosti parametara koji se otežano mjere ili njihovo mjerenje nije moguće obaviti u primjerenim vremenskim i tehničkim okolnostima.

## 5.4 Usporedba i provjera rezultata – primjer II

Proračun modelom provjerit će se i na primjeru telekomunikacijskog voda tipa TK59 smještenom na velikoj udaljenosti od pruge i na vrlo velikom specifičnom otporu tla čija je

vrijednost utvrđena mjerenjem i iznosi oko 2500  $\Omega$ m. Položaj voda u odnosu na prugu prikazan je slikom 5.8. Vod se može podijeliti na 4 dionice kako je kotama označeno na slici 5.8.



Slika 5.8 Položaj TK voda uz prugu s položajem vlaka na dijelu kontaktne mreže

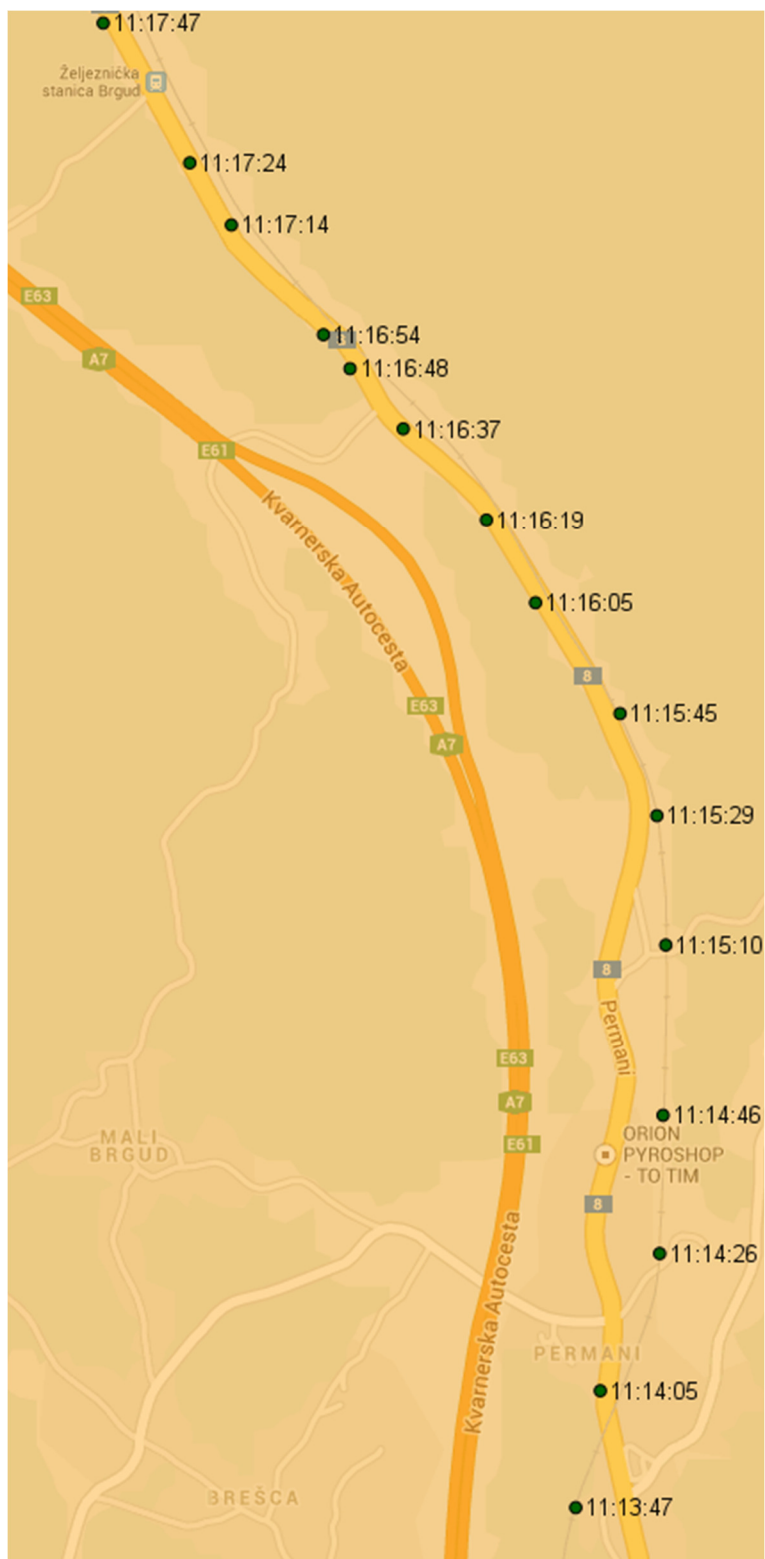
U tablici 5.3 prikazani su podaci o segmentima s pripadajućim vrijednostima međuinduktiviteta dobivenog iz tablica i duljine dijela kontaktne mreže.

Tablica 5.3 Segmenti kontaktne mreže uz kabel

Dionica	$a$ [m]	$M$ [ $\mu$ H/km]	$l$ [m]
1	885,0	372,5	206,3
2	961,8	355,6	154,5
3	1030,6	341,6	110,0
4	1016,3	344,4	148,0

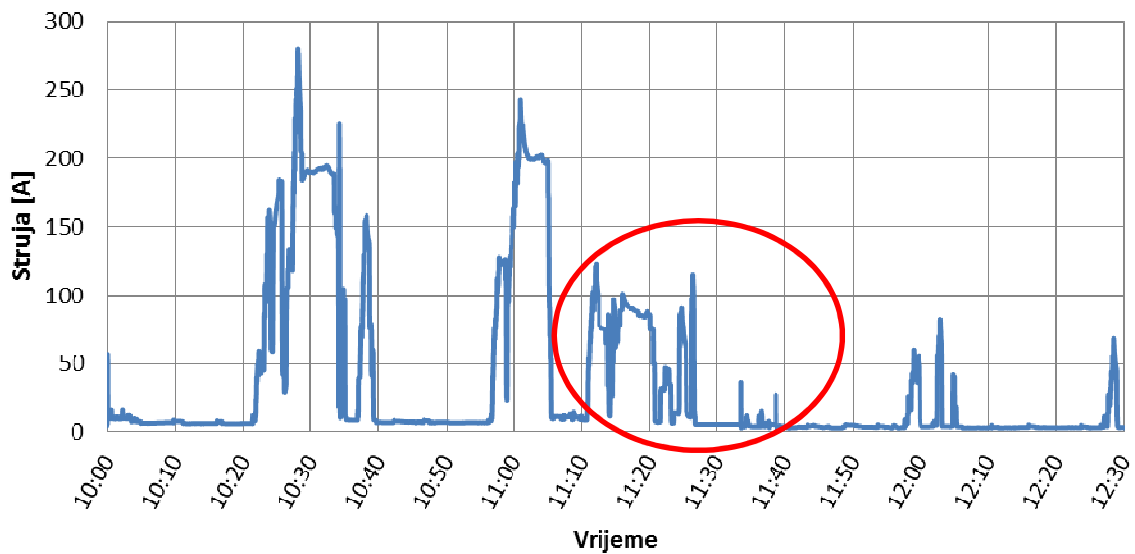
Vlak poznate mase i brzine kretao se u smjeru prostiranja kabela. Lokacije vlaka prikazane su slikom 5.9. U trenutku 11:13:47 vlak je došao na dio kontaktne mreže koji utječe na promatrani osjetljivi vod i zadržao se na tom dijelu do 11:15:10. Nakon prolaska dijela mreže

koji utječe na kabel utjecaj se nastavlja jer ovim dijelom i dalje teče struja od elektrovučne podstanice do elektrovučnog vozila.



Slika 5.9 Položaj vlaka na pruzi uz pripadna vremena

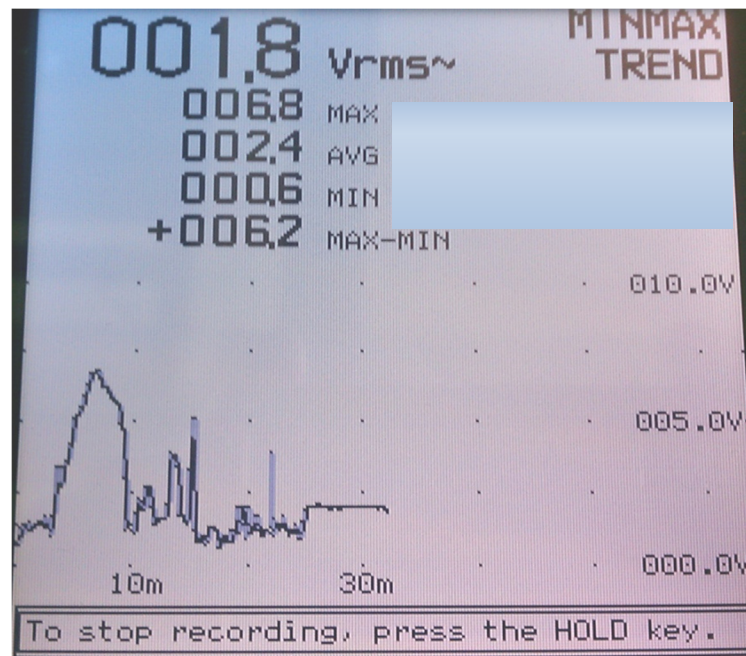
Promjena struje na kraku kojim se gibao vlak mjerena je u elektrovučnoj podstanici i prikazana slikom 5.10.



Slika 5.10 Struja kraka napajanja vlaka u elektrovučnoj podstanici pri mjeranju

Dio prikaza struje s prethodne slike prije 11:13 zanimljiv je za ovo razmatranje. Nakon 11:13 maksimalna struja doseže oko 110 A. U daljnjim razmatranjima zanimljiv je zaokruženi dio grafikona struje u vremenu koje odgovara periodu mjerenja inducirano napona.

Prikaz osciloskopa pri mjeranju inducirano napona dan je slikom 5.11.



Slika 5.11 Izmjereni inducirani napon na promatranom kabelu



Oblik prikazanog induciranog napona i zaokruženog dijela struje sa slike 5.10 je sličan što dovodi do zaključka da je struja vuče dominantan izvor induciranog napona. Relevantna najviša vrijednost induciranog napona je 6,2 V dobivena u 11:17 u trenutku kada je struja kroz kontaktnu mrežu iznosila 90 A. U tom je trenutku vlak bio na takvom položaju da je ova struja tekla cjelokupnim dijelom kontaktne mreže koji se projicira na osjetljivi kabel. Sam je vlak u kritičnom trenutku odmaknuo 1,7 km od posljednjeg projiciranog segmenta stoga će se ovaj dio mreže trebati modelirati u računalnom programu.

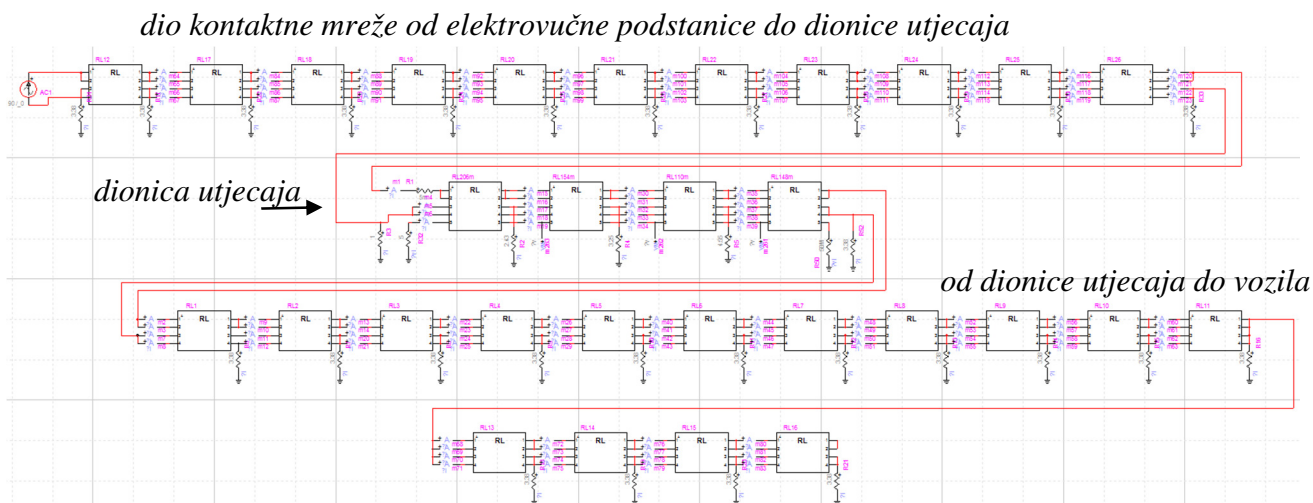
Nakon provedenih mjerenja struje napajanja i induciranog napona, a uz poznata svojstva vlaka i položaj na pruzi u vremenu, izrađen je model dijela sustava na kojem se određuje utjecaj. U trenutku mjerenja uz kontaktnu mrežu nije bilo postavljeno povratno uže tako da se u matrici impedancija pojavljuju vlastite i međusobne impedancije kontaktnog vodiča, nosivog užeta, tračnica i telekomunikacijskog kabela. Pri izmjerenom specifičnom otporu tla na promatranoj dionici oko 2500  $\Omega$ m matrica impedancija ima sljedeću vrijednost:

$$Z = \begin{bmatrix} 0,138 + j0,868 & 0,05 + j0,530 & 0,05 + j0,439 & 0,05 + j0,439 & 0,05 + jM_{15} \\ & 0,203 + j0,858 & 0,05 + j0,426 & 0,05 + j0,426 & 0,05 + jM_{25} \\ & & 0,075 + j0,742 & 0,05 + j0,521 & 0,05 + jM_{35} \\ & & & 0,075 + j0,742 & 0,05 + jM_{45} \\ & & & & 0,072 + j0,858 \end{bmatrix} \frac{\Omega}{\text{km}}$$

gdje je:

$M_{15} \dots M_{45}$  induktivna komponenta međuimpedancije određena udaljenošću telekomunikacijskog kabela i vodiča elektrovočnog sustava.

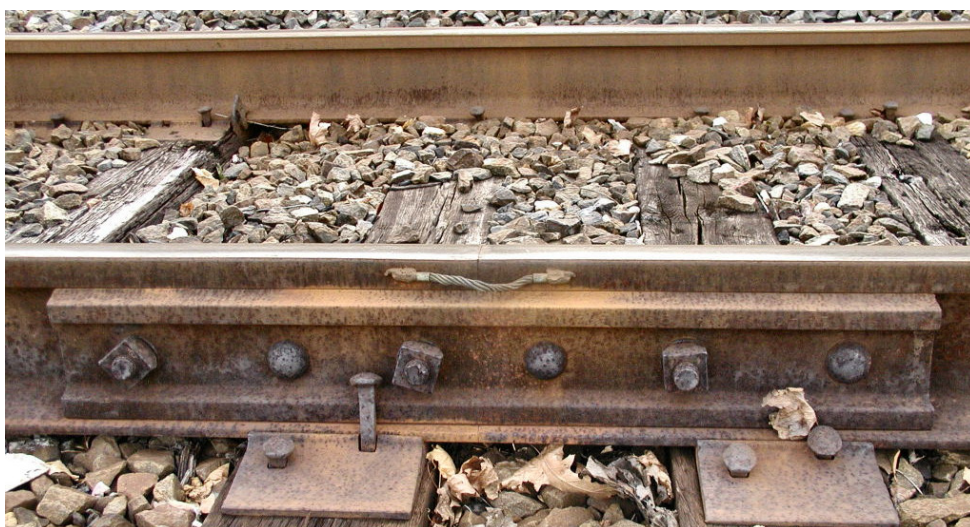
Modelom je predstavljena promatrana dionica utjecaja duljine 0,62 km, dio pruge od dionice utjecaja do elektrovočnog vozila u razmatranom trenutku duljine 1,7 km, dio pruge ispred promatrane dionice prema elektrovočnoj podstanici duljine 1,7 km te 0,6 km pruge od elektrovočnog vozila. Sve je ovo potrebno kako bi se predstavilo stvarno stanje u trenutku mjerenja. Obje tračnice koriste se kao povratni put struje. Na slici 5.12 prikazan je izgled modela te dodatni opis pojedinih dijelova.



Slika 5.12 Model za proračun induciranog napona na kabelu u primjeru II

Dobivene vrijednosti induciranog napona prema normama [55], [56] i sukladno segmentima prikazanima u tablici 5.3 iznosi 2,43 V. Modelom je dobivena vrijednost induciranog napona 2,32 V uz odvod 2 S/km. Odstupanje, dakle, iznosi oko 5%. Međutim, usporede li se ovako dobiveni rezultati s mjerenjem gdje je vrijednost induciranog napona iznosila 6,2 V, može se zaključiti da proračuni nisu obavljani za stanje sustava kakvo je vladalo za vrijeme mjerenja.

Pošto se tračnice nastavljaju varenjem ili povezivanjem bakrenom užadi kako je patentirano [72], postoji mogućnost oštećenja bakrenih spojki i prekida povratnog kruga. Primjer ovakvog povezivanja prikazan je slikom 5.13. Bakrene poveznice mogu se lako potrgati [73], a spojevi tračnica oksidirati što s mehaničkog stajališta za tračnice ne predstavlja gubitak funkcije, no povratna struja ne može se zatvoriti što ima vrlo nepovoljan učinak na vrijednost induciranog napona.



Slika 5.13 Električno povezivanje tračnica

Kako bi se odredio iznos inducirano napona u slučaju prekida spoja na tračnicama u modelu su tračnice dvaju segmenata odspojene. To je dovelo do prekida puta povratne struje i povećanja inducirano napona na vrijednosti od 6,19 V do 6,29 V ovisno o mjestu prekida. Uz ovako dobivene vrijednosti odstupanje od mjerenja je 1,5%. U tablici 5.4 objedinjeni su rezultati. Norme ne predviđaju proračun s prekidom povratnog puta stoga je u tablici navedena samo vrijednost uz redovno stanje s tračnicama kao povratnim putem. U tablici je prikazano i odstupanje pojedinih vrijednosti od izmjerene vrijednosti inducirano napona.

Tablica 5.4 Usporedba vrijednosti inducirano napona

Metoda	Inducirani napon [V]	Odstupanje
Mjerenje	6,20	
Model s tračnicama kao povratnim putem (2 S/km)	2,32	-62,6 %
Model s prekidom tračnicama (2 S/km)	6,19 – 6,29	0,2 % – 1,5 %
Norme	2,43	-60,8 %

Može se zaključiti da su vrijednosti dobivene modelom i mjerenjem uz prekid na tračnicama vrlo bliske pri modeliranju sustava u kojem je došlo do prekida tračnica odnosno povratnog puta. Ovime se izvan razumne sumnje može zaključiti da pogon elektrovočnog sustava u trenutku mjerenja nije bio redovan. Promjena konfiguracije na način da se prekinu povratni put struje dovodi do povećanja inducirano napona. Kako oštećenja dijelova elektrovočnog sustava nisu rijetkost izvjesno je da su mjerenja obavljena u ovako promijenjenoj konfiguraciji.

## 5.5 Zaključak o verifikaciji modela za proračun utjecaja

Provjera točnosti rada razvijenog modela provodi se kako bi se otkrile potencijalne slabe točke modela, poboljšala svojstva i utvrdila mogućnost njegove primjene u slučajevima određivanja utjecaja sustava električne željeznice na osjetljive metalne strukture. Mjerenja na instaliranim objektima mogu dati dobre pokazatelje ispravnosti modela, njegove fleksibilnosti i učinkovitosti. Pri mjerenjima, kao i u standardiziranim proračunima, potrebno je poznavati geometrijske i električne parametre. Geometrijski parametri su konfiguracija elektrovočnog sustava i položaj osjetljive strukture u odnosu na prugu. Ovi parametri su promjenjivi te je potrebno model podijeliti na segmente prikladnih duljina na kojima se sustav izvora smetnje i osjetljivi sustav vode paralelno te su vrijednosti međuimpedancija stalne. Najvažniji električni parametar je struja napajanja na kraku kontaktne mreže čiji se utjecaj promatra, a njezina vrijednost dobiva se mjerenjem u elektrovočnoj podstanici. Kretanjem vlaka na kraku

geometrija utjecaja se stalno mijenja te je potrebno osigurati poznavanje položaja vlaka kroz vrijeme u kojem se obavlja mjerenje. Koji dio osjetljive strukture će biti pod utjecajem struje napajanja izravno ovisi o položaju vlaka stoga se provjera treba obaviti uz kontrolirane i poznate uvjete pogona.

Razmatrana su dva slučaja utjecaja struje napajanja na telekomunikacijske kabele TK59. Izvedba ovih kabela osigurava uvid u veličinu utjecaja bez detaljnog modeliranja samog kabela obzirom da ne postoji ekran koji bi ga štiti od elektromagnetskih utjecaja. Kabeli imaju bitno drugačiji položaj u odnosu na prugu te se nalaze na geografskim područjima čiji se specifični otpor razlikuje za red veličine. Također, struje napajanja i položaji vlaka u odnosu na promatrane kabele su različiti. Rezultati proračuna inducirano napona standardiziranim obrascima i razvijenim modelima uspoređeni su s izmjerenim vrijednostima. Već je u prethodnom poglavlju uočeno kako se modelom dobivaju vrijednosti inducirano napona manje od vrijednosti proračunatih koristeći propisane redukcijske faktore. Isti odnos se očekuje i pri provjeri rezultata mjerenja. Također, u realnim sustavima na veličinu utjecaja učinak imaju i objekti koji nisu uzeti u proračun te bi se modelom trebale dobiti vrijednosti veće od izmjerenih. Ipak, u slučaju postojanja dodatnih elektromagnetskih utjecaja, poput visokonaponskih dalekovoda ili niskonaponskih instalacija uz osjetljive, strukture njihov utjecaj se superponira utjecaju električne željeznice. Kakva će biti resultantna vrijednost utjecaja na osjetljivoj strukturi, ne može se unaprijed znati jer to ovisi o tipu izvora i vrijednostima struja i napona na njima. Dominantan utjecaj očekuje se od sustava električne željeznice obzirom na uvjete pogona koji na njemu vladaju. Valni oblici struja napajanja i pripadajući oblici induciranih napona su uspoređeni i ustanovljeno je dobro podudaranje što potvrđuje prethodno očekivanje.

U prvom verifikacijskom primjeru uspoređene su vrijednosti inducirano napona na telekomunikacijskom kabelu koji se u duljini 2,67 km proteže uz prugu. Kabel je podijeljen u 48 dionica koje su modelirane. Dodatno, modeliran je i dio pruge izvan područja paralelnog vođenja kako bi se dobile što točnije vrijednosti povratnih struja. Mjerenjem je utvrđeno da pri struji napajanja 280 A inducirani napon iznosi 19,50 V. Vlak se u trenutku mjerenja nalazio na početku prvog segmenta s kojeg kontaktna mreža ima utjecaj na kabel te je cijeli kabel bio pod utjecajem. Model je razvijen uz vrijednosti odvoda 5 S/km i 2 S/km te su slijedno dobivene vrijednosti inducirano napona 21,06 V i 19,67 V. Sukladno predviđanju, vrijednosti izračunato inducirano napona su nešto veće od izmjerene vrijednosti. Proračunom prema normi dobivena je vrijednost inducirano napona 27,18 V što je za 39,4% veća vrijednost od

izmjerene. Može se zaključiti da su modelom dobivene vrijednosti bliske izmjerenoj vrijednosti koju možemo uzeti kao relevantnu pri usporedbi. Rezultati dobiveni modelom su na strani sigurnosti, no dovoljno precizni da bi se mogao donijeti zaključak kako razvijeni model ispravno funkcionira za konfiguraciju opisanu u primjeru I.

Drugim primjerom ispitana je ispravnost rada modela za telekomunikacijski kabel udaljen oko 1 km od pruge. Kabel je podijeljen na 4 dionice. Vlak se nalazio 1,7 km od posljednjeg segmenta kontaktne mreže koji utječe na kabel te je cijeli kabel bio pod utjecajem struje napajanja vrijednosti 90 A. Modelom su obuhvaćeni segmenti na kojima postoji utjecaj te dijelovi pruge izvan ovih segmenata i to do vlaka, iza vlaka te dio prije zone utjecaja prema elektrovučnoj podstanici. Mjerenjem je ustanovljen inducirani napon vrijednosti 6,20 V koji oblikom odgovara struji napajanja što nameće zaključak da je na promatranom kabelu dominantan utjecaj sustava električne željeznice. Model je razvijen uz odvod 2 S/km uz dvije povratne tračnice kako je uobičajeno pogonsko stanje te je dobivena vrijednost inducirano napona 2,32 V. Korištenjem standardnih obrazaca i redukcijских faktora dobivena je vrijednost 2,43 V što je za 4,74 % veća vrijednost od one dobivene modelom. Ipak, obje vrijednosti dobivene proračunom bitno odstupaju od izmjerene vrijednosti što nameće zaključak da pri mjerenju pogonsko stanje nije odgovaralo redovnom stanju kakvo je modelirano. Ispitujući moguće uzroke, ustanovilo se da u određenim situacijama može doći do električnog prekida povratnog puta odnosno u ovom slučaju tračnica, a što za posljedicu ima povećanje inducirano napona. Ukoliko se u modelu tračnice prekinu dobiva se inducirani napon vrijednosti od 6,19 V do 6,29 V ovisno o mjestu prekida. Vrijednosti dobivene pri ovakvoj konfiguraciji dobro se poklapaju s izmjerenom vrijednošću.

Razvijeni model ispitana je na dvama primjerima od kojih je na jednom ustanovljeno pogonsko stanje koje nije redovno. Dobivene vrijednosti inducirano napona u modelima vrlo dobro se slažu s izmjerenim vrijednostima. Model je fleksibilan i omogućava modeliranje različitih konfiguracija sustava električne željeznice i osjetljive metalne strukture. Također, izvanredna pogonska stanja mogu se brzo i jednostavno simulirati modifikacijom razvijenog osnovnog modela. Pokazalo se kako se razvijenim modelom dobivaju vrijednosti inducirano napona bliske izmjerenim vrijednostima i točnije u odnosu na standardizirane obrasce čime je postignut doprinos točnosti određivanja elektromagnetskih sustava električne željeznice na osjetljive metalne strukture.

## 6 KVALITATIVNA ANALIZA INDUCIRANOG NAPONA

Razvijeni model za proračun induciranih napona korišten je kako bi se utvrdila ovisnost veličine tog napona o različitim parametrima. Za identifikaciju i utvrđivanje ovih parametara korišten je valni oblik struje napajanja pogonske frekvencije. U pogonu električne željeznice struja napajanja i struja smetnje imaju određen udio viših harmoničnih članova. Kako bi se ustanovio stvarni valni oblik na osjetljivoj strukturi potrebno je prilagoditi model uz korištenje stvarnih oblika struje napajanja.

U ovom poglavlju razmotrit će se dobiveni oblici struje napajanja i prezentirati nadopunjeni model koji koristi stvarne oblike struje napajanja u kontaktnoj mreži. U tu svrhu može se koristiti model elektrovočnog vozila ili izravno izmjereni oblik struje napajanja.

Ovisno o izvedbi elektrovočnog vozila struja napajanja ima različit valni oblik kako je pokazano u poglavljima 2.3.4 i 2.3.5. U elektrovočnim podstanicama, na višenaponskoj strani, valni oblik struje odgovara struji u elektroenergetskom sustavu i u pravilu je pravilnog sinusnog oblika pogonske frekvencije. U vozilu napon i struja se transformiraju i ispravljaju. Ukoliko su motori istosmjerni, ispravljeni napon se izravno dovodi na stezaljke motora ili se pak izmjenjuje u izmjenični napon ukoliko se vozilo pokreće izmjeničnim asinkronim motorima. Udio vozila s asinkronim motorima raste, no značajan je broj vozila s istosmjernim motorima. Potrebno je, stoga, razmotriti valne oblike struje napajanja i povratne struje kroz tračnice i povratno uže. Za primjer će se uzeti lokomotiva s diodnim ispravljačem i vlak s asinkronim motorom. Modelima vozila određeni su i analizirani valni oblici struje. Napravljene su i harmonijske analize struja napajanja po cjelobrojnim višekratnicima pogonske frekvencije. Procijenit će se prikladnost razvijenog modela i odrediti stvarni oblik inducirano napona. Naglasak je stavljen na sustav u kojem je elektrovočno vozilo pogonjeno istosmjernim motorom s diodnim ispravljačem obzirom da su za ovaj tip vozila obavljena mjerenja i provjeravani rezultati u prethodnom poglavlju.

### 6.1 Određivanje oblika inducirano napona u ovisnosti o obliku struje smetnje

Struja smetnje sadrži uz osnovnu frekvenciju i udio viših harmoničnih članova stoga je potrebno razmotriti prikladnost razvijenog modela za proračun induciranih napona s ovom strujom. Pri identifikaciji i utvrđivanju utjecaja promjenjivih parametara na veličinu utjecaja korišten je razvijeni model koji egzaktno vrijedi pri pogonskoj frekvenciji. Razmotri li se

ovisnost matrice impedancija o frekvenciji, što je proizlazi iz izraza (2.3), dobiva se da otpor povratnog puta zemlje ima linearnu, a reaktancija logaritamsku ovisnost o frekvenciji. Kako je vrijednost otpora povratnog puta zemlje daleko manja od vrijednosti reaktancije, može se zaključiti da matrica impedancija ima logaritamsku ovisnost o frekvenciji. Za niže frekvencije do reda kHz neće biti značajnije promjene vrijednosti matrice impedancije u odnosi na osnovni harmonik struje smetnje.

Oblik struje smetnje u odnosu na oblik struje napajanja je jednak uz smanjenu amplitudu kako je objašnjeno u prethodnim poglavljima. Ova činjenica je bitna pri odluci koji model koristiti pri proračunu. U nastavku će se usporediti rezultati dobiveni trima metodama koristeći frekvencijski zavisne parametre (FD), konstantne parametre (CP) [66], [47] i razvijeni model s matricama impedancija. Prednost modela s matricama impedancija je mogućnost kontrole parametara i prilagođavanje modeliranih elemenata stvarnim karakteristikama dok mu je mana pridruženost pojedinoj frekvenciji. Ovdje su razvijenim modelom razmatrani slučajevi s izvorom struje napajanja pogonske frekvencije. Model s konstantnim parametrima samostalno određuje električnu prezentaciju sustava na temelju upisane geometrije za odabranu frekvenciju. Ovaj vid modeliranja nepovoljniji je od razvijenog jer radi za samo jednu frekvenciju, a električni parametri su nepregledni. Korištenje frekvencijski zavisnih parametara produžuje vrijeme proračuna obzirom da se proračun obavlja u zadanom frekvencijskom opsegu. Raspon frekvencija odabire se temeljem očekivanih frekvencija električnih pojava u izvorima i u rezultatima.

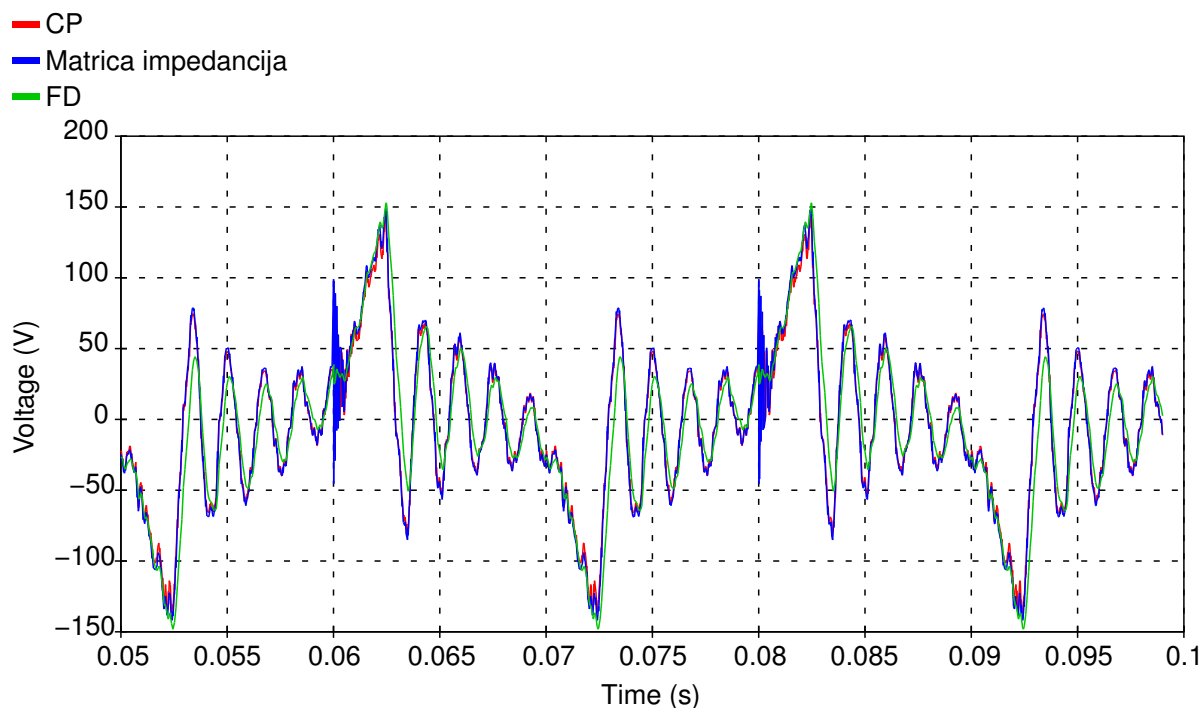
Tri načina modeliranja uspoređena su na jednostavnom primjeru gdje su dva ravna vodiča postavljena paralelno na međusobnoj udaljenosti 50 m iznad tla specifičnog otpora  $100 \Omega\text{m}$  što omogućava očitavanje vrijednosti međuinduktiviteta od  $939 \mu\text{H}/\text{km}$ . Duljina paralelnog vođenja je 1000 m. Vodič na kojem se promatra inducirani napon na jednom je kraju uzemljen, a na drugom zaključen velikom impedancijom. Oba vodiča imaju dozemne kapacitete  $10 \text{ nF}$  što je procijenjena vrijednost. Kao izvor napajanja korišten je valni oblik struje lokomotive s diodnim ispravljačem prezentiran u drugom poglavlju na slici 2.22. Frekvencijska analiza struje po veličini pojedinog harmonika prikazana je u tablici 6.1.

Tablica 6.1 Amplitude harmonika struje napajanja lokomotive s diodnim ispravljačem

Harmonik	I [A]	Udio harmonika [%]
1.	290,12	100,0
3.	65,06	22,4
5.	32,93	11,4
7.	18,81	6,5
9.	13,36	4,6
11.	21,67	7,5
13.	12,71	4,4

Dobiveni valni oblici prikazani su na istom grafu slikom 6.1.

Inducirani napon, na vodiču smještenom uz vodič kojim teče struja kako je opisano u prethodnom paragrafu, ima gotovo jednak oblik pri proračunu frekvencijski zavisnom parametrima (FD), konstantnim parametrima (CP) i matricom impedancija. Za detaljniju analizu potrebno je proučiti oscilatornost valnih oblika dobivenih prema svakoj pojedinoj metodi zasebno. Na uvećanom prikazu na slici 6.3 uočava se da je krivulja induciranog napona najgladja ukoliko se koriste frekvencijski zavisni parametri.



Slika 6.1 Inducirani napon na vodiču pri struji lokomotive s diodnim ispravljačem



Provjera ovog oblika induciranog napona može se obaviti analitički koristeći izraz (3.6) zapiše li se struja kao:

$$i(t) = I_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + I_3 \sin(\omega_3 t + \varphi_3) + I_5 \sin(\omega_5 t + \varphi_5) + I_7 \sin(\omega_7 t + \varphi_7) + I_9 \sin(\omega_9 t + \varphi_9) + I_{11} \sin(\omega_{11} t + \varphi_{11}) + I_{13} \sin(\omega_{13} t + \varphi_{13})$$

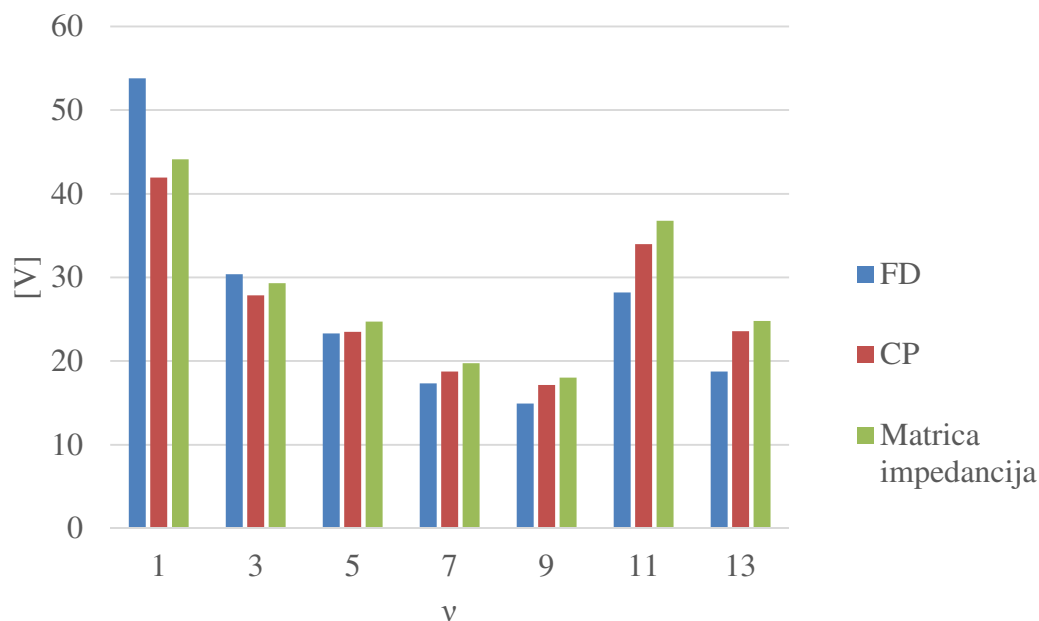
odnosno koristeći podatke iz tablice 6.1:

$$i(t) = 290,1 \sin(2\pi \cdot 50t + \varphi_1) + 65,1 \sin(2\pi \cdot 150t + \varphi_3) + 32,9 \sin(2\pi \cdot 250t + \varphi_5) + 18,8 \sin(2\pi \cdot 350t + \varphi_7) + 13,36 \sin(2\pi \cdot 450t + \varphi_9) + 21,7 \sin(2\pi \cdot 550t + \varphi_{11}) + 12,7 \sin(2\pi \cdot 650t + \varphi_{13})$$

dobiva se:

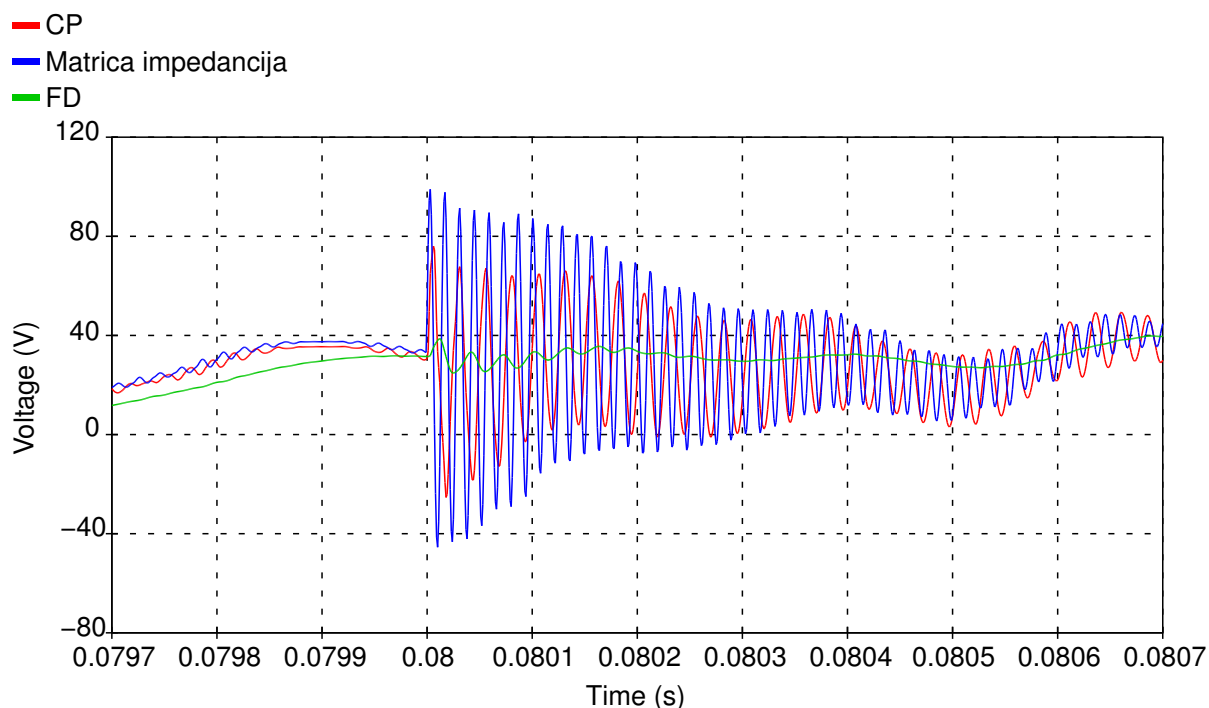
$$u(t) = 42,7 \sin(2\pi \cdot 50t + \varphi_1) + 28,8 \sin(2\pi \cdot 150t + \varphi_3) + 24,3 \sin(2\pi \cdot 250t + \varphi_5) + 19,6 \sin(2\pi \cdot 350t + \varphi_7) + 17,3 \sin(2\pi \cdot 450t + \varphi_9) + 34,0 \sin(2\pi \cdot 550t + \varphi_{11}) + 23,0 \sin(2\pi \cdot 650t + \varphi_{13})$$

Na slici 6.2 dan je pregled udjela harmonika u valnom obliku induciranog napona. Može se uočiti da se preko metoda koje koriste matricu impedancija ili konstantne parametre dobivaju rezultati vrlo bliski analitičkoj metodi. Razlike su posljedica nepreciznosti u određivanju međuinduktiviteta pri očitavanju s grafikona.



Slika 6.2 Harmonijska analiza induciranog napona prema metodama proračuna

Ovime je potvrđena ispravnost određivanja trenutnih vrijednosti induciranog napona uzrokovanog strujom napajanja lokomotive s diodnim ispravljačem metodama opisanim u ovom poglavlju.



Slika 6.3 Uvećani prikaz dijela krivulje inducirano napona na vodiču

Dodatno su metode uspoređene na uvećanom prikazu na slici 6.3. Koristeći matricu impedancija i konstantne parametre dobiju se gotovo identični rezultati za razliku od metode s frekvencijski zavisnom parametrima koja daje slične rezultate. Pri frekvencijama bliskima pogonskoj može se bez značajne pogreške koristiti razvijena metoda s matricom impedancija.

Efektivne i maksimalne vrijednosti struje i napona sa slike 6.1 dane su u tablici 6.2. Za jednaku struju kroz vodič i nepromijenjene geometrijske uvjete, inducirani naponi i po efektivnoj i po maksimalnoj vrijednosti su vrlo bliski, osobito uspoređuju li se efektivne vrijednosti. Prema harmonijskoj analizi struje koja uzrokuje induciranje napona (slika 2.21) vidi se da se ne radi o visokofrekvencijskoj struji smetnje što objašnjava bliskost rezultata.

Tablica 6.2 Usporedba vrijednosti inducirano napona

Veličina	Efektivna vrijednost	Maksimalna vrijednost
Struja	213 A	279 A
Inducirani napon – konstantni parametri	53,1 V	140,8 V
Inducirani napon – frekvencijski zavisni parametri	55,5 V	140,1 V
Inducirani napon – matrica impedancija	55,9 V	152,9 V

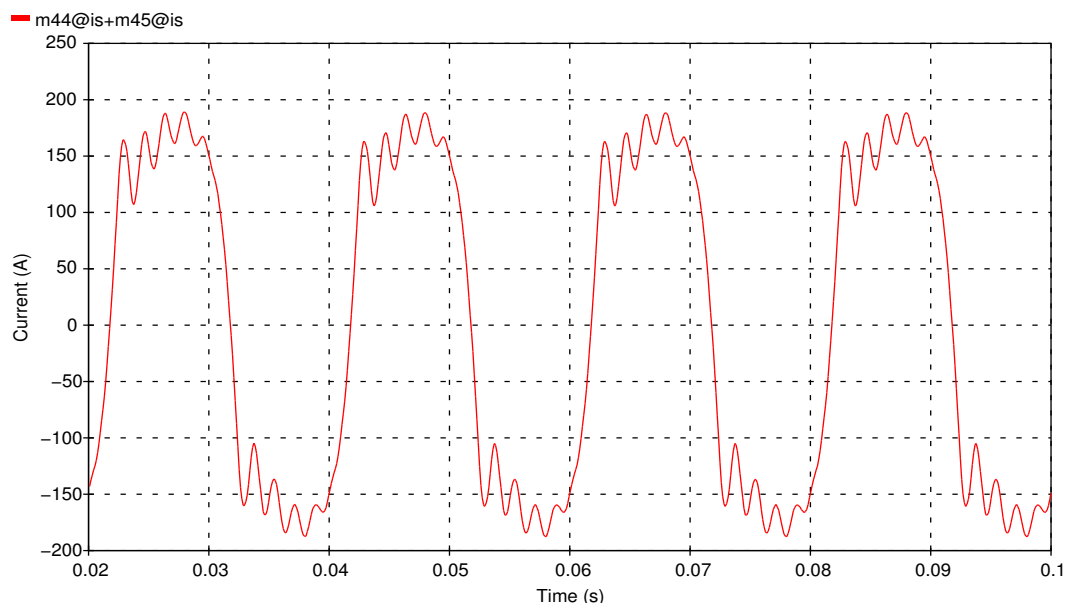
Analiza inducirano napona dobivenog preko prije spomenutih metoda pokazuje stanovite razlike, no sva tri rezultata odgovaraju struji smetnje u kojoj su prisutni neparni harmonici do

trinaestog što je prikazano. Također, može se izravno koristeći izraz (3.6) za ovaj jednostavan slučaj odrediti inducirani napon. Tako dobiven rezultat u skladu je s ovdje prezentiranim rezultatima dobivenima računalnim programom.

## 6.2 Određivanje oblika inducirano napona vučnog vozila s diodnim ispravljačem

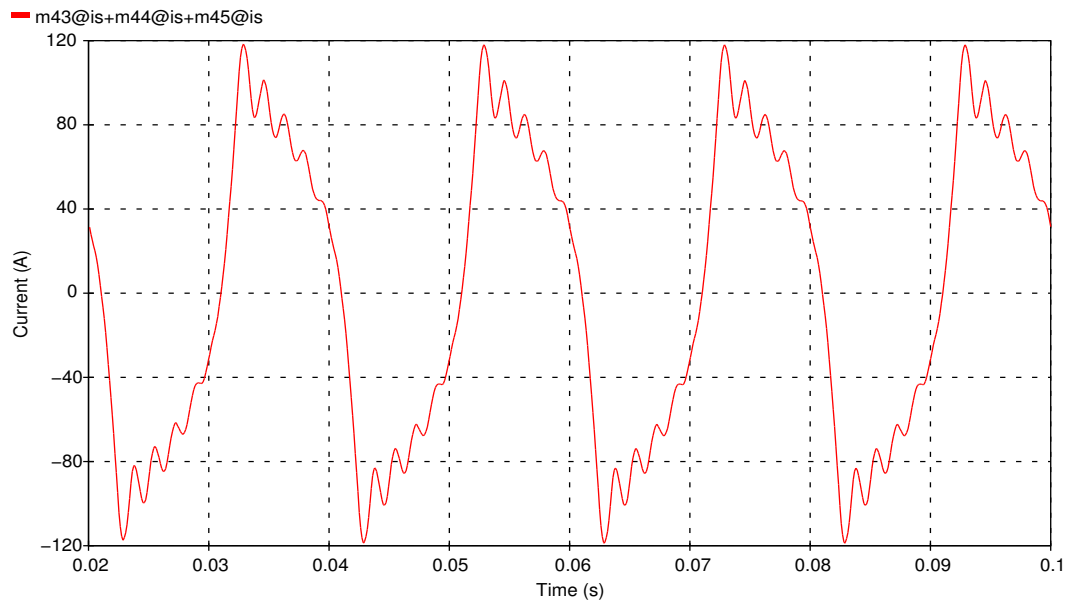
U prethodnom poglavlju obrađena su dva slučaja potkrijepljena mjerenjima inducirano napona na telekomunikacijskim vodovima. Struja smetnje je sadržavala samo osnovni harmonik i cilj je bio prikazati kako napon ovisi o iznosu struje i stvarnim parametrima koji su obrađeni u četvrtom poglavlju. Pokazala se dobra podudarnost između izmjerenih i izračunatih rezultata. U ovom poglavlju proučit će se utjecaj uz valni oblik struje napajanja lokomotive s diodnim ispravljačem, koji je ranije prezentiran, u konfiguraciji primjera II iz prethodnog poglavlja.

Valni oblik struje kroz vozni vod analiziran je ranije, no za određivanje utjecaja potrebno je odrediti valni oblik struje smetnje odnosno struje koja se prema podstanici ne vraća tračnicama i povratnim užetom. Oblik povratne struje kroz tračnice prikazan je slikom 6.4. Povratna struja izračunata je uz struju napajanja dobivenu mjerenjima u elektrovučnoj podstanici. Uz poznatu struju napajanja i povratnu struju, može se doći do struje smetnje koja se od vozila prema elektrovučnoj podstanici vraća kroz zemlju.



Slika 6.4 Povratna struja kroz tračnice određena modelom

Na slici 6.5 prikazan je valni oblik struje smetnje određen strujom napajanja prikazanom slikom 2.20 i povratne struje sa slike 6.4. Njezin se oblik razlikuje od struje napajanja te će se u nastavku ovaj valni oblik analizirati kako bi se došlo do valnog oblika induciranog napona za opisano pogonsko stanje.



Slika 6.5 Struja smetnje pri pogonu lokomotive s diodnim ispravljačem

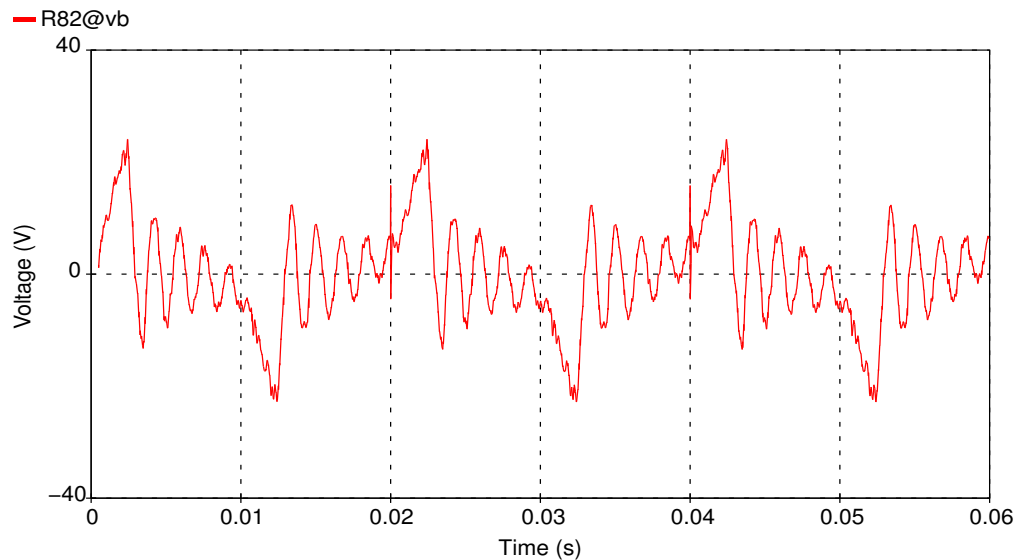
Harmonijskom analizom dolazi se do udjela pojedinih harmonika u struji smetnje. U tablici 6.3 prikazani su podaci o amplitudi i udjelu svakog pojedinog harmonika.

Tablica 6.3 Amplitude harmonika struje smetnje pri pogonu lokomotive s diodnim ispravljačem

Harmonik	$I$ [A]	Udio harmonika [%]
1.	95,74	100,0
3.	22,22	23,0
5.	11,14	11,6
7.	6,20	6,5
9.	4,09	4,3
11.	6,82	7,1
13.	4,01	4,2

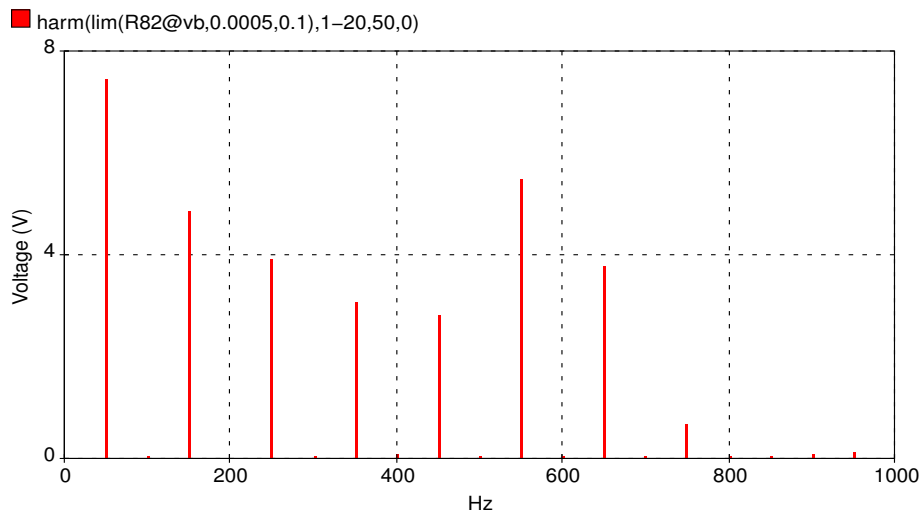
Nakon provedene analize oblika struje napajanja i struje smetnje, može se odrediti inducirani napon. Geometrijski i električni podaci preuzeti su iz primjera II gdje je određena veličina induciranog napona pri strujama pogonske frekvencije. Kako je prikazano u poglavlju 6.1 pri

pogonu lokomotive s diodnim ispravljačem s dovoljnom točnošću može se koristiti model s matricom impedancija. Valni oblik induciranog napona na metalnoj strukturi prikazan je slikom 6.6. Efektivna vrijednost ovog napona iznosi 8,92 V pri efektivnoj vrijednosti struje napajanja 212,86 A uz tračnice kao povratni put.



Slika 6.6 Izračunati inducirani napon pri pogonu lokomotive s diodnim ispravljačem

Inducirani napon je izravna posljedica protjecanja struje smetnje te njegov harmonijski sastav odgovara sastavu struje smetnje. Sa slike 6.7, koja prikazuje udio pojedinih harmonika u induciranom naponu, uočavaju se neparni harmonici do trinaestog.



Slika 6.7 Harmonijska analiza induciranog napona pri pogonu lokomotive s diodnim ispravljačem

Ukoliko bi električni kontinuitet tračnica bio prekinut, inducirani napon bi se povećao zbog povećanja magnetskog toka oko metalne strukture. U slučaju električnog prekida tračnica uz jednaku struju napajanja inducirani napon bi iznosio 21,82 V.

Vrijednosti dobivene uz struju napajanja pri pogonu lokomotive s diodnim ispravljačem potrebno je usporediti s vrijednostima dobivenim u prethodnom poglavlju kada je korištena struja napajanja pogonske frekvencije. Inducirani napon ovisi o struji te se vrijednosti trebaju skalirati po struji. Protjecanje povratne struje tračnicama smanjuje inducirani napon te je uz struju lokomotive s diodnim ispravljačem dobivena efektivna vrijednost 8,92 V dok je uz struju pogonske frekvencije i iste efektivne vrijednosti dobivena vrijednost 5,49 V. U slučaju električnog prekida tračnica dobivene su vrijednosti inducirano napona 21,82 V uz struju lokomotive s diodnim ispravljačem i 14,79 V uz struju koja sadrži samo osnovni harmonik. Može se zaključiti da se uz jednaku efektivnu vrijednost struje napajanja i jednaku konfiguraciju sustava korištenjem struje lokomotive s diodnim ispravljačem dobivaju vrijednosti inducirano napona oko 30% veće u odnosu na slučaj kada je struja napajanja pogonske frekvencije. Ovakav rezultat je očekivan obzirom da struja lokomotive s diodnim ispravljačem sadrži određen udio viših harmoničkih članova koji se bolje prenose od osnovnog harmonika. Ipak, kako su rezultati dobiveni uz struju pogonske frekvencije vrlo bliski mjerenim vrijednostima potrebno je razmotriti uzrok odstupanja koje vrijednosti inducirano napona imaju od mjerenja uz struju lokomotive s diodnim ispravljačem. U modelima za izračun inducirano napona na metalnoj strukturi nisu u obzir uzeti relevantni čimbenici koji djeluju na smanjenje utjecaja poput građevina ili prirodnih prepreka. Kako u svakom okolišu postoje elementi koji djeluju na smanjenje utjecaja može se uzeti da su upravo ti elementi glavni čimbenici odstupanja izmjerenih i izračunatih vrijednosti. Koliko se smanjenje utjecaja može očekivati vrlo je teško opisati redukcijskim koeficijentom. U određenim slučajevima, kao što je prolazak voznog voda kroz tunel jasno je da je smanjenje utjecaja vrlo veliko te se može govoriti o velikom smanjenju dok se u slučajevima drvoreda radi o malom smanjenju. Problematika proučavanja utjecaja susjednih objekata na inducirani napon je nezahvalna i iz razloga što se ta situacija može brzo promijeniti stoga se u pravilu ne računa s redukcijama susjednih objekata te je proračun konzervativan.

## **6.3 Određivanje oblika induciranog napona vlaka na elektromotorni pogon**

Elektromotorni vlakovi pronalaze svoje mjesto u raspodjeli putničkog prometa. S elektroenergetskog stajališta ova vrsta elektrovučnog vozila bitno se razlikuje od klasičnih lokomotiva načinom pogona jer se kretanje ostvaruje asinkronim motorima. Napajanje elektromotornih vlakova i upravljanje njima prilagođeno je elektromotorima, a njihovi osnovni konstrukcijski elementi opisani su u poglavlju 2.3. Uz ispravljač u krugu se pojavljuju istosmjerni međukrug i izmjenjivač radi pogonskih motora koji se napajaju izmjeničnom strujom. Vozila na elektromotorni pogon mogu raditi i u generatorskom režimu te proizvoditi električnu energiju. To za posljedicu ima protjecanje struje rekuperacije od vozila prema elektrovučnoj podstanici.

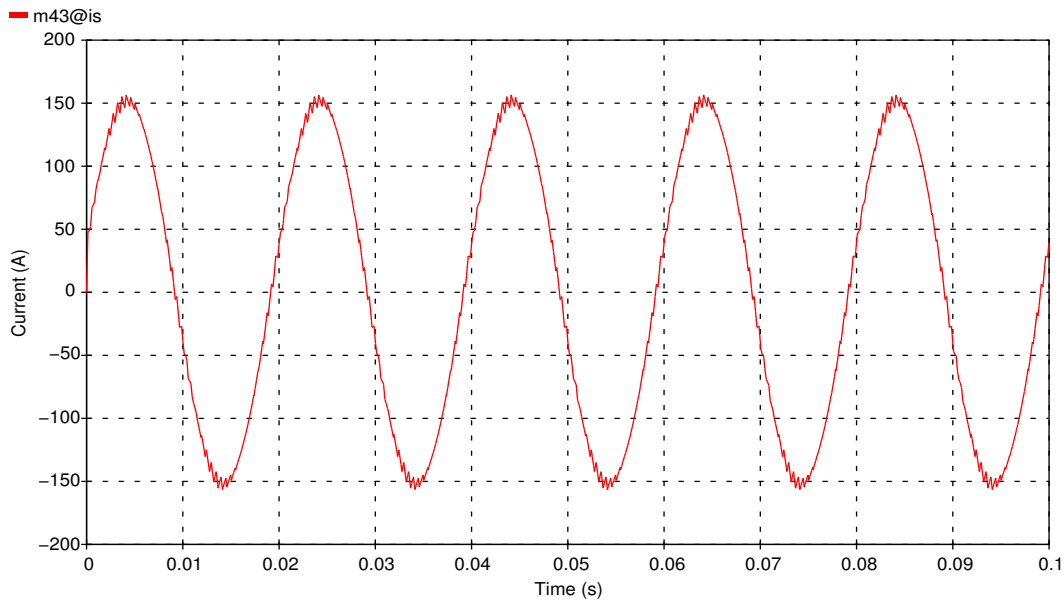
Pri razmatranju elektromagnetskih utjecaja ove vrste elektrovučnog vozila na metalne strukture potrebno je odrediti oblik struje napajanja i struje rekuperacije koja teče voznim vodom. Struje se mogu ustanoviti mjerenjem valnog oblika u elektrovučnim podstanicama ili koristeći model s komponentama elektromotornog vlaka. Kako se izmjenjivačem valni oblik struje napajanja motora pretvara u trofazni sinusni oblik, očekuje se struja napajanja s manjim udjelom viših harmonika. U literaturi [43], [50], [51] mogu se pronaći valni oblici struje ove vrste vučnog vozila što je prikazano slikom 6.8. Uočava se da je izračunata struja sinusnog oblika s udjelom viših harmonika. Za razliku od lokomotive s diodnim ispravljačem gdje je harmonijsku analizu dovoljno raditi do trinaestog harmonika, iz [50] je razvidno kako je struju elektrovučnog vozila s asinkronim motorom potrebno razložiti sve do 90. harmoničkog člana. Sadržaj viših harmoničkih članova struje napajanja elektromotornog vlaka uvjetovan je radom ispravljača i izmjenjivača koji izvornu sinusnu struju iz elektrovučne podstanice uzorkuju uređajima energetske elektronike. Rezanje struje napajanja dovodi do distorzije valnog oblika kako je prikazano slikom 6.8 [50].

U ovom dijelu će se razmotriti posebno utjecaj struje napajanja i struje rekuperacije elektromotornog vlaka.

### **6.3.1 Inducirani napon uz struju napajanja elektromotornog vlaka**

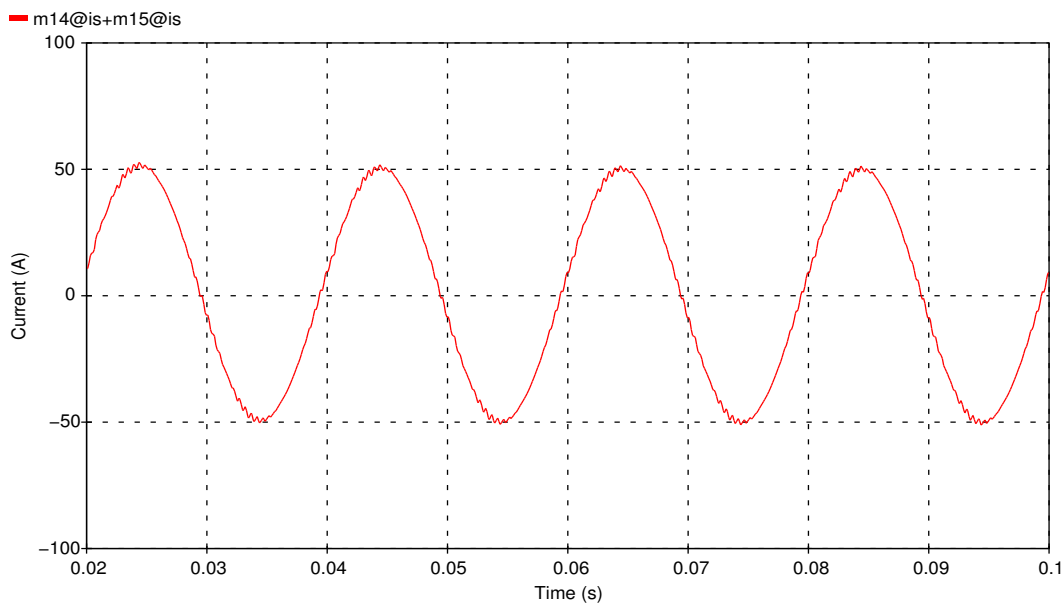
U poglavlju 2.3.5 dan je oblik struje dobiven modelom pomoću računalnog programa ATP. Jednako je potrebno pronaći oblik struje smetnje te ga harmonijski rastaviti kako bi se dobio podatak o očekivanim induciranim naponima i njihovom sastavu. Model s frekvencijski zavisnim parametrima, koji je ovdje nužno koristiti, uvažava i izobličenja struje napajanja na

kontaktnom vodu. Na slici 6.8 prikazan je oblik struje napajanja, dobiven modelom, na dionici na kojoj će se računati elektromagnetski utjecaj.



Slika 6.8 Valni oblik struje napajanja elektromotornog vlaka dobiven proračunom

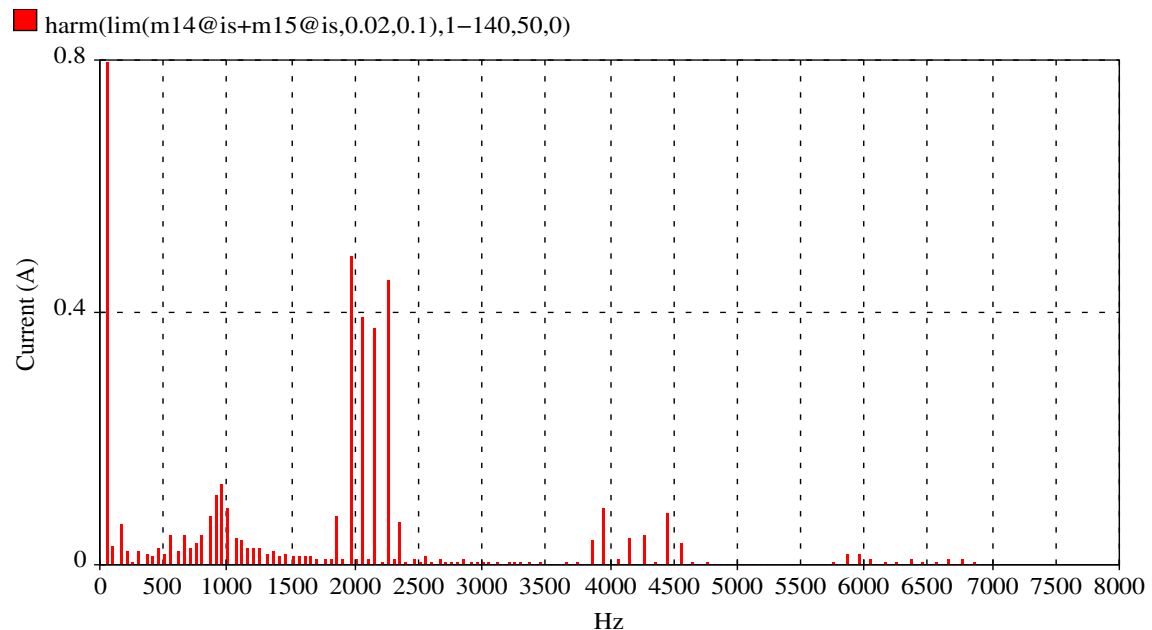
U konfiguraciji bez povratnog užeta i uz korištenje obiju tračnica za povratak struje dobiva se struja smetnje kao na slici 6.9. Povratna struja kroz zemlju oblikom odgovara struji napajanja, no njezina je vrijednost određena razlikom vrijednosti struje napajanja i povratne struje kroz tračnice.



Slika 6.9 Valni oblik struje smetnje pri kretanju elektromotornog vlaka



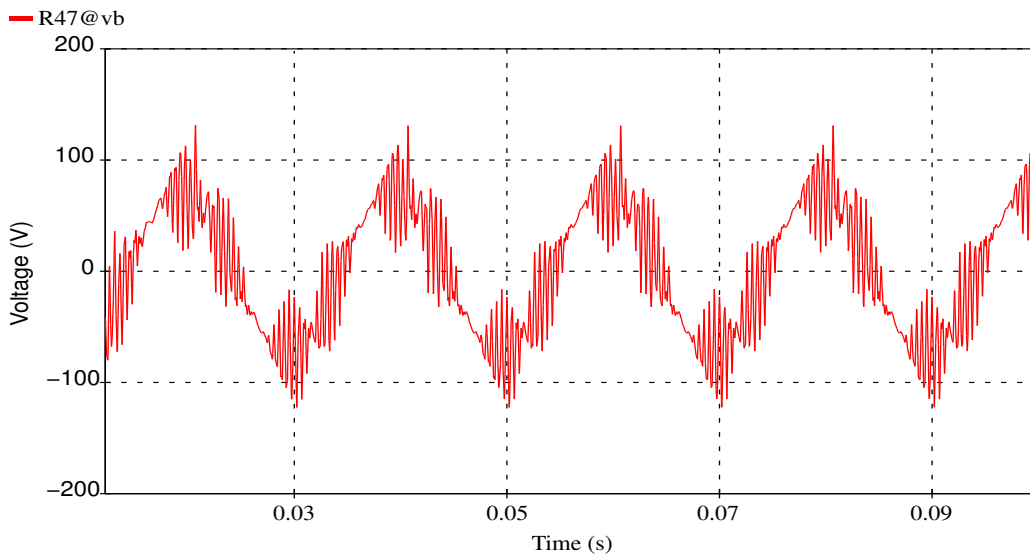
Kako bi se provjerio dobiveni oblik inducirano napona i jednostavnije obavila provjera proračuna razložit će se ova struja smetnje na harmoničke članove. Amplituda osnovnog harmonika je 50,16 A , a udjeli ostalih članova su prikazani slikom 6.10.



Slika 6.10 Harmonijska analiza struje smetnje elektromotornog vlaka

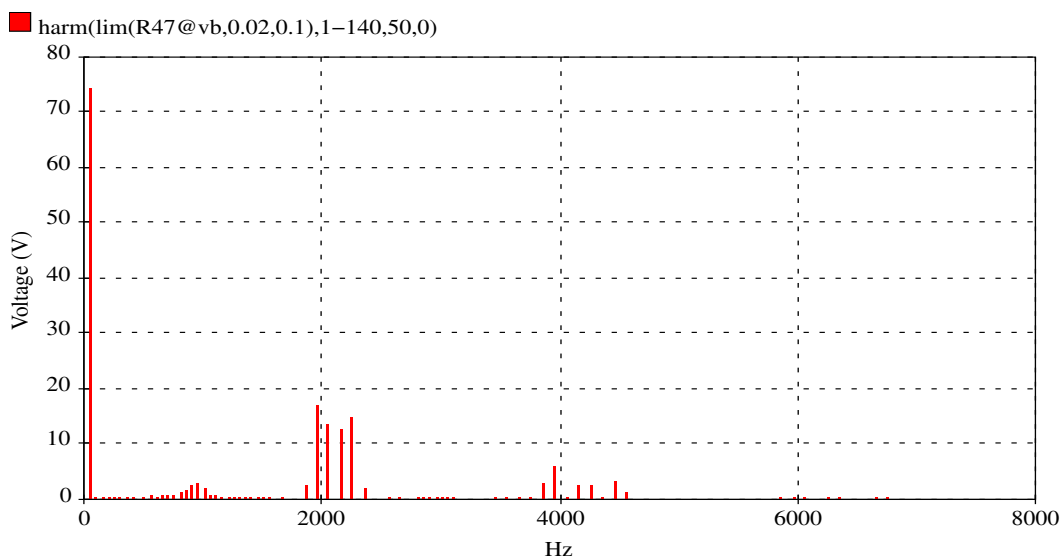
Struja smetnje očekivano ima dominantan prvi harmonik osnovne frekvencije. Ostali harmonički članovi imaju male udjele. Tako je nakon prvog najznačajniji 39. harmonik s udjelom 1,05%. Za razliku od lokomotive s diodnim ispravljačem gdje su viši harmonici imali značajniji udjel u struji smetnje, oni su bili nižih frekvencija nego harmonički članovi struje smetnje elektromotornog vlaka. Pošto se više frekvencije bolje prenose i imaju relativno veći značaj na inducirani napon, potrebno je provesti analizu i utvrditi iznos inducirano napona za slučaj kada se na kraku nalazi elektromotorni vlak.

Proračun utjecaja obavljen je na dionici s četiri segmenta duljine svakog pojedinog segmenata 0,5 km i ukupne duljine paralelnog vođenja 2 km i udaljenosti osjetljive strukture 50 m od voznog voda. Vlak se nalazio na kraju četvrtog segmenta. Segmenti su modelirani frekvencijski zavisnim parametrima. Primijenjena je struja napajanja dobivena modelom elektromotornog vlaka sa slike 6.8. Inducirani napon dobiven na osjetljivom vodu prikazan je slikom 6.11.



Slika 6.11 Izračunati inducirani napon pri protjecanju struje elektromotornog vlaka

Kako se vidi sa slike, inducirani napon ima sinusoidalan oblik pogonske frekvencije koji potječe od osnovnog harmonika struje napajanja. Odstupanja koja se na struji smetnje mogu uočiti kao odstupanje od idealne sinusoide pogonske frekvencije u induciranom naponu multipliciraju se frekvencijom i postaju dodatno izraženi. Napravi li se harmonijska analiza može se preciznije odrediti kako viši harmonici struje smetnje induciraju napon na osjetljivoj metalnoj strukturi (slika 6.12). Povećanjem frekvencije smanjuje se međuinduktivitet prema izrazima (3.7) i (3.8). Sa slike 6.12 vidi se da postoje udjeli viših harmonijskih članova u induciranom naponu sve do 91.

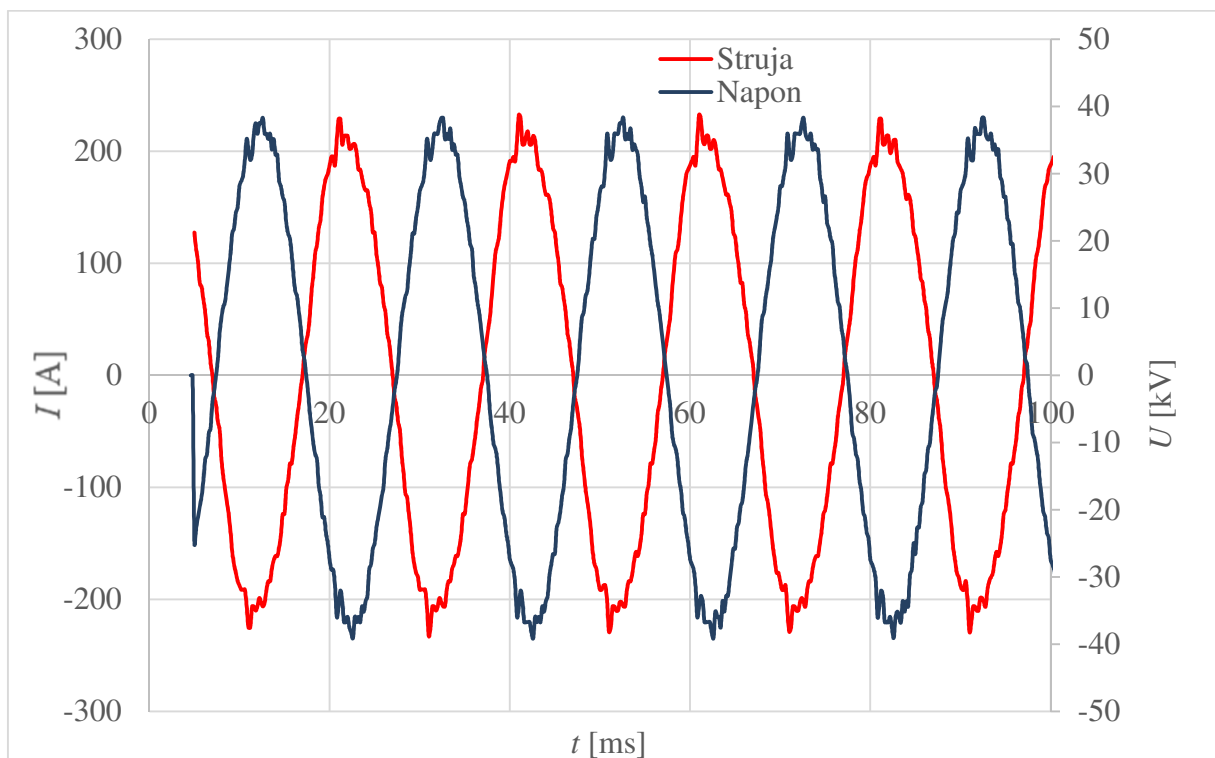


Slika 6.12 Harmonijska analiza induciranog napona pri pogonu elektromotornog vlaka

Frekvencijski spektar inducirano napona uslijed protjecanja struje napajanja vlaka s asinkronim motorima potrebno je razviti do frekvencija reda 8 kHz. U ovim području uočavaju se povećane razine harmonika oko 1 kHz, 2 kHz i 4 kHz. Različiti sustavi ispravljanja i izmjenjivanja izmjeničnog napona u istosmjerni i obrnuto uzrokovat će različite oblike struje napajanja odnosno različite oblike inducirano napona. Nedvojbeno se pri pogonu vlaka s asinkronim motorima stvaraju smetnje viših frekvencija nego pri pogonu vlaka progonjenog lokomotivom s diodnim ispravljačem.

### 6.3.2 Inducirani napon uz struju rekuperacije elektromotornog vlaka

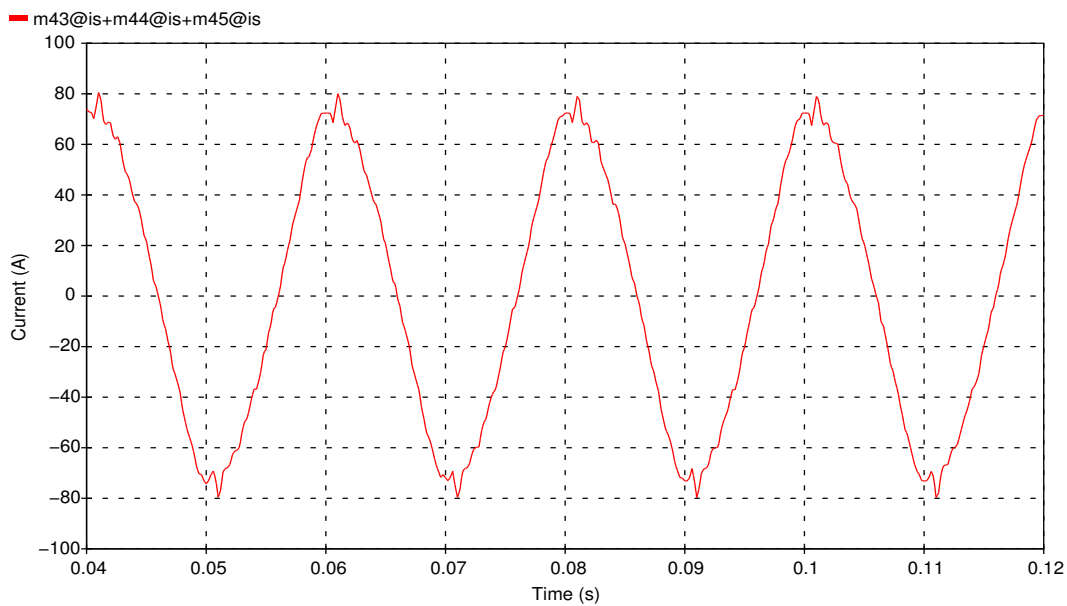
Elektromotorni vlakovi pokretani asinkronim motorima pri kočenju mogu raditi u generatorskom režimu i ostvariti povrat energije u prienosnu mrežu. Maksimalna povratna struja, koja se uobičajeno naziva struja rekuperacije, manja je od maksimalne struje napajanja, no može dosegnuti vrlo visoke vrijednosti. Na slici 6.13 prikazani su valni oblici struje rekuperacije i napona u elektrovučnoj podstanciji. Napon i struja su u protufazi za razliku od motorskog režima rada kada su u fazi.



Slika 6.13 Struja rekuperacije i napon izmjereni u elektrovučnoj podstanciji

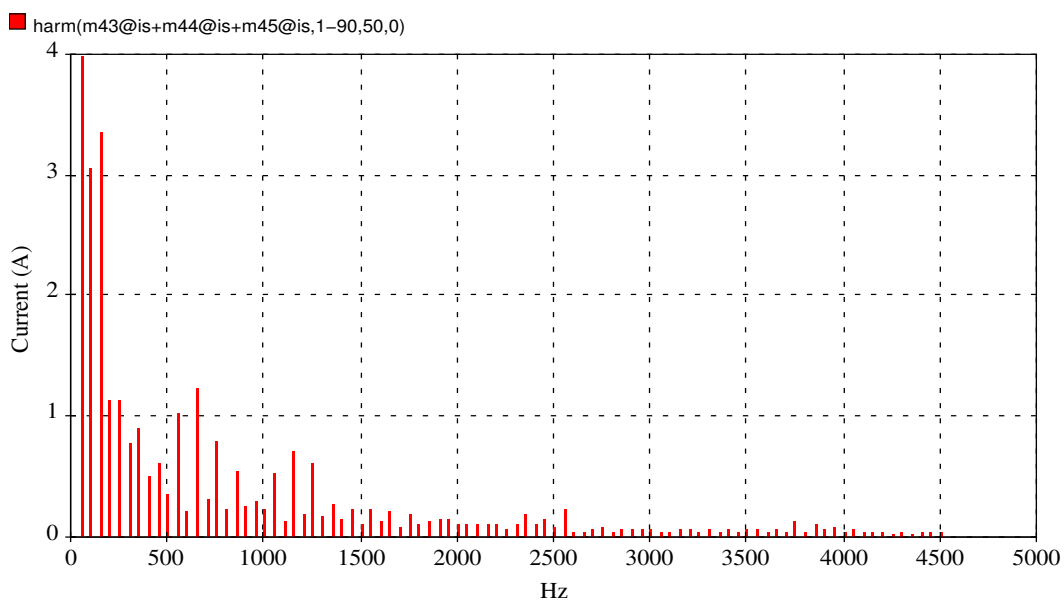
Struja smetnje odredit će se kao i u prethodnim slučajevima preko razvijenog modela kao razlika struje rekuperacije koja teče voznim vodom i struja koje teku prema elektrovučnom

vozilu tračnicama. Oblik struje smetnje izazvane protjecanjem struje rekuperacije prikazan je slikom 6.14.



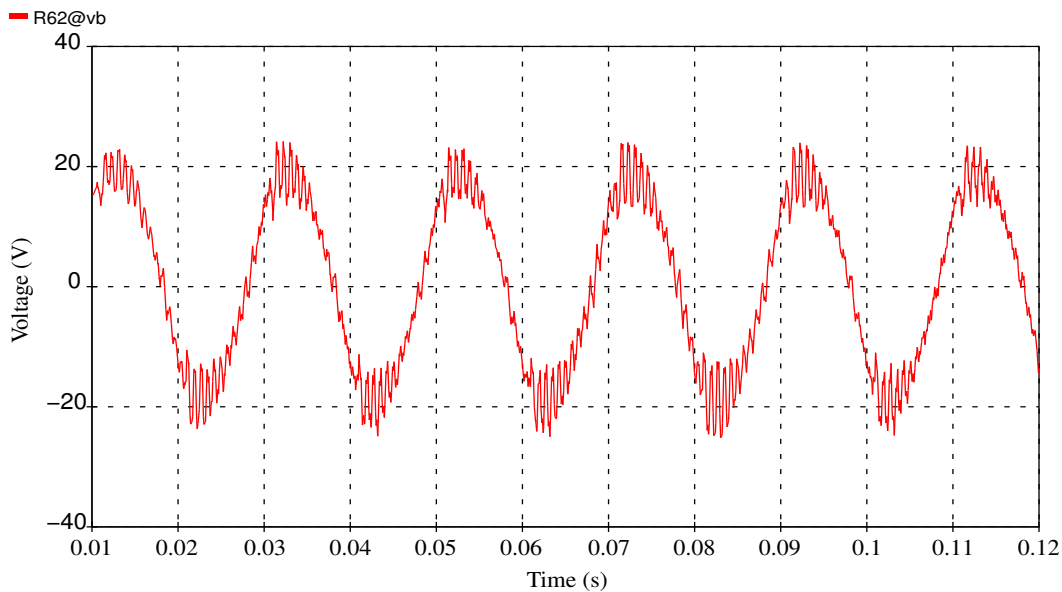
Slika 6.14 Struja smetnje pri protjecanju struje rekuperacije

Struja smetnje može se harmonički rastaviti kako bi se lakše dobio oblik induciranog napona. Na slici 6.15 prikazan je udio pojedinih viših harmonika u struji smetnje uzrokovane protjecanjem struje rekuperacije voznim vodom. Amplituda osnovnog harmonika je 66,09 A.



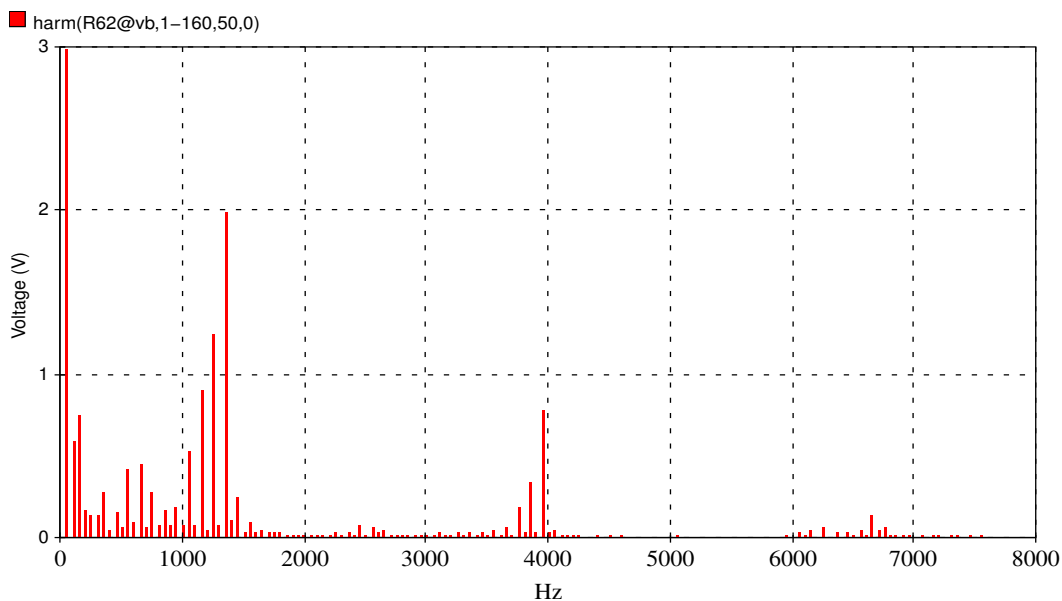
Slika 6.15 Harmonijska analiza struje smetnje pri protjecanju struje rekuperacije

Inducirani napon na osjetljivoj strukturi uzrokovan protjecanjem struje rekuperacije i povezane struje smetnje prikazan je slikom 6.16.



Slika 6.16 Izračunati inducirani napon uslijed protjecanja struje rekuperacije

Zamjetan je udio viših harmonika u induciranom naponu. Rastavi li se na harmoničke članove dobiju se udjeli prema slici 6.17. amplituda osnovnog harmonika je 17,5 V.



Slika 6.17 Harmonijska analiza inducirano napona uslijed protjecanja struje rekuperacije

Pojava viših harmoničnih članova izravno je povezana s valnim oblikom struje smetnje. Amplitude neparnih harmonika su značajno veće od amplituda parnih u istom frekvencijskom opsegu što odgovara većim amplitudama neparnih harmonika u struji smetnje. Usporede li se inducirani naponi uzrokovani pogonom elektromotornog vlaka u motornom i generatorskom režimu rada, vide se određene razlike koje su prije svega posljedica načina pogona i radne točke

elektrovučnog vozila. Suštinski su inducirani naponi u oba režima rada slični i bitno se razlikuju od oblika inducirano napona pri pogonu lokomotive s diodnim ispravljačem.

## **6.4 Zaključna razmatranja o kvalitetnoj analizi inducirano napona**

Oblik struje napajanja odnosno struje smetnje izravno definira oblik inducirano napona. Za obavljanje kvalitativne analize ovog napona na metalnoj strukturi potrebno je poznavati oblik struje napajanja koji, prije svega, ovisi o tipu elektrovučnog vozila. U prethodnim poglavljima posvetila se pozornost gradivnim komponentama lokomotive s diodnim ispravljačem koja se pokreće istosmjernim motorima i elektromotornog vlaka pokretanog izmjeničnim asinkronim motorima. Ova dva tipa vozila zanimljiva su za odvojeno i usporedno razmatranje radi bitno drugačijih električnih svojstava. Oblik struje napajanja lokomotive s diodnim ispravljačem i elektromotornog vlaka bitno se razlikuje.

Pogon lokomotive s diodnim ispravljačem izobličuje struju napajanja te njezin oblik uz osnovni harmonik ima značajan udio viših harmonika do reda 13. S druge strane, struja napajanja asinkronih elektrovučnih motora elektromotornog vlaka ima manji udio viših harmonika, no u njezinu obliku pojavljuju se harmonici sve do reda 90. Struja smetnje ima sličan oblik kao i struja napajanja uz smanjenu amplitudu za vrijednost povratne struje kroz tračnice i povratno uže. Prihvati li se načelo superpozicije pojedinih harmoničkih članova, pokazano je kako se viši harmonici struje smetnje prenose na osjetljive strukture s različitim vrijednostima međuumpedancije koja se multiplicira redom harmonika koji se prenosi.

U ovom poglavlju uspoređena su tri modela koji se mogu koristiti za proračun elektromagnetskih smetnji. Prvi je razvijeni model s matricama impedancija, drugi model s konstantnim parametrima, a treći s frekvencijski zavisnim parametrima. Za niže frekvencije, do reda 1 kHz pokazalo se kako svi modeli za jednaku konfiguraciju sustava izvora smetnje i osjetljivog sustava daju približno jednake rezultate. Analitički je pokazano kako modeli ispravno određuju veličinu smetnje uz razlike u rezultatima do 5%. Pri višim frekvencijama koje se javljaju u struji smetnje elektromotornog vlaka, potrebno je koristiti model s frekvencijski zavisnim parametrima koji u određenom frekvencijskom opsegu računa elektromagnetski utjecaj posebno po frekvencijama.

Struja napajanja lokomotive s diodnim ispravljačem provjerena je izravno mjerenjima te je pri proračunima korišten upravo taj izmjereni oblik struje napajanja. Za struju elektromotornog vlaka korištena je struja napajanja dobivena njegovim modelom koja je uspoređena s

izmjerenim strujama prikazanima u literaturi. Mjerenja induciranog napona prikazana u primjerima iz prethodnog poglavlja obavljena su pri prometovanju lokomotive s diodnim ispravljačem što omogućuje usporedbu rezultata dobivenih modelima za proračun i mjerenjima. U prethodnom poglavlju pokazano je dobro slaganje izmjerenog napona s naponom dobivenim proračunom uz struju smetnje koja sadržava samo osnovni harmonik. Koristeći stvarni oblik struje napajanja dobivene su vrijednosti induciranog napona 30% veće od vrijednosti dobivenih mjerenjima. Iako se ovo odstupanje čini velikim i može dovesti do zaključka da je ispravno raditi samo sa strujama koje sadrže isključivo osnovni harmonik, treba imati na umu da pri mjerenju okolina pozitivno utječe na smanjenje inducirano napona te se može očekivati da se modelom dobiva veća vrijednost inducirano napona nego mjerenjima. Tako primjerice građevine, drvoredi ili tuneli smanjuju inducirani napon što se modelima ne uzima u obzir. Koliki je utjecaj pojedinog dijela okoline na inducirani napon nezahvalno je procjenjivati obzirom na učestale promjene elemenata okoliša te se uvažava konzervativnost proračuna imajući na umu da izostavljanje svojstava okoline iz proračuna dovodi do većih iznosa smetnje.

Harmonički članovi struje smetnje uslijed prometovanja elektromotornog vlaka iznad frekvencije 2 kHz dobivaju na važnosti upravo pri određivanju inducirano napona. Iako je njihov udio u struji oko 1%, u inducirano naponu pojedini harmonički članovi sudjeluju i s više od 20%. Ova činjenica nedvojbeno dovodi do zaključka da je proračun utjecaja sustava električne vuče potrebno provesti sa stvarnim oblicima struje napajanja. Što je harmonički član struje smetnje višeg reda to je njegov prijenos na osjetljivu metalnu strukturu veći.

Električna vuča svojim pogonom i specifičnim oblicima struja napajanja različitih elektrovučnih vozila ima znatno drugačiji utjecaj na osjetljive strukture od drugih potrošača električne energije. Za dobro razumijevanje i točno određivanje utjecaja pojedinog tipa elektrovučnog vozila potrebno je utjecaje odrađivati sa stvarnim oblicima struja napajanja koji se javljaju u pogonu. U protivnom može se doći do pogrešnih zaključaka o veličini utjecaja.

## 7 ZAKLJUČAK

U doktorskom radu istraženo je područje elektromagnetskih utjecaja sustava električne željeznice na metalne strukture. Analizirana je elektromagnetska kompatibilnost sustava napajanja elektrovučnih vozila i osjetljivih sustava poput telekomunikacijskih vodova i cjevovoda. Identificirani su ključni parametri koji utječu na veličinu induciranog napona na metalnim strukturama u koridoru elektrificirane pruge, razmotreni su njihovi učinci i doneseni zaključci o ovisnosti veličine induciranog napona o svakom pojedinom parametru zasebno.

Za razumijevanje utjecaja ključno je poznavati raspodjelu struja odnosno veličina povratne struje. Dosadašnji pristup koristio je stalne redukcijske faktore za opis omjera struje napajanja i povratne struje. Kako bi se odredila raspodjela struja kroz tračnice, povratno uže i zemlju, razvijen je model na temelju vlastitih i međusobnih impedancija tračnica i vodiča. Ovisnost raspodjele povratnih struja i induciranih napona o specifičnom otporu tla istražena je parametarski. Pokazalo se da specifični otpor tla nema značajan učinak na raspodjelu povratnih struja dok je utjecaj na vrijednost induciranog napona zamjetan. Izvedba temelja i uzemljenja stupova kontaktne mreže izravno određuje veličinu odvoda tračnica. Veći odvod tračnica implicira manju povratnu struju u elektrovučnom sustavu, a posljedica toga je veći inducirani napon na osjetljivoj metalnoj strukturi. Modelirana je kontaktna mreža elektrovučnog sustava s različitim vrijednostima odvoda tračnica te je izračunat inducirani napon. Pri vrijednostima odvoda od 0,2 S/km do 5 S/km inducirani napon se povećao 32%. Istražio se utjecaj četiriju izvedaba povratnog užeta te usporedio sa slučajem u kojem povratno uže nije bilo postavljeno. Promjenom presjeka i odabirom različitog materijala može se, vrlo ograničeno, utjecati na induktivni dio vlastite impedancije povratnog užeta te nije potrebno postavljati užad velikog presjeka već koristiti materijale s manjim specifičnim otporom ili koristiti dva povratna užeta postavljena paralelno. Za uobičajene izvedbe povratnog užeta veličina induciranog napona može se razlikovati i do 40%. Na primjeru telekomunikacijskog kabela sa zaštitnim užetom pokazalo se kako se može postići vrlo značajna redukcija induciranog napona u slučaju korištenja kabela uz koji se postavlja ili ugrađeno uže uzemljeno na krajevima.

Koristeći predloženi model kontaktne mreže, uz stvarne geometrijske i električne vrijednosti parametara, iznosi induciranog napona su bliski stvarnim vrijednostima i omogućavaju kvalitetno planiranje i donošenje odluka o gradnji, rekonstrukciji ili zaštiti u elektrotehničkom željezničkom sustavu.



Provjera točnosti rada razvijenog modela provodi se kako bi se otkrile potencijalne slabe točke modela, poboljšala svojstva i utvrdila mogućnost njegove primjene u slučajevima određivanja utjecaja sustava električne željeznice na osjetljive metalne strukture. Rezultati proračuna inducirano napona standardiziranim obrascima i razvijenim modelima uspoređeni su s izmjerenim vrijednostima. U realnim sustavima na veličinu utjecaja učinak imaju i objekti koji nisu uzeti u proračun te bi se modelom trebale dobiti vrijednosti veće od izmjerenih. Ipak, u slučaju postojanja dodatnih elektromagnetskih utjecaja, poput visokonaponskih dalekovoda ili niskonaponskih instalacija uz osjetljive strukture njihov utjecaj se superponira utjecaju električne željeznice. Dominantan utjecaj očekuje se od sustava električne željeznice obzirom na uvjete pogona koji na njemu vladaju. Valni oblici struja napajanja i pripadajući oblici induciranih napona su uspoređeni i ustanovljeno je dobro podudaranje. Modelom dobivene vrijednosti su bliske izmjerenim vrijednostima koje možemo uzeti kao relevantne pri usporedbi. Rezultati dobiveni modelom su na strani sigurnosti, no dovoljno precizni da bi se mogao donijeti zaključak kako razvijeni model ispravno funkcionira.

Razvijeni model ispitan je na dvama primjerima. Dobivene vrijednosti inducirano napona u modelima vrlo dobro se slažu s izmjerenim vrijednostima. Model je fleksibilan i omogućava modeliranje različitih konfiguracija sustava električne željeznice i osjetljive metalne strukture. Također, izvanredna pogonska stanja mogu se brzo i jednostavno simulirati modifikacijom razvijenog osnovnog modela. Pokazalo se kako se razvijenim modelom dobivaju vrijednosti inducirano napona bliske izmjerenim vrijednostima i točnije u odnosu na standardizirane obrasce čime je postignut doprinos točnosti određivanja elektromagnetskih sustava električne željeznice na osjetljive metalne strukture.

Oblik struje napajanja odnosno struje smetnje izravno definira oblik inducirano napona. Za obavljanje kvalitativne analize ovog napona na metalnoj strukturi potrebno je poznavati oblik struje napajanja. Pri kvalitativnoj analizi utjecaja nužno je provjeriti ispravnost proračuna obzirom na frekvencijski zavisne parametre. Uspoređena su tri modela koji se mogu koristiti za proračun elektromagnetskih smetnji. Prvi je razvijeni model s matricama impedancija, drugi model s konstantnim parametrima, a treći s frekvencijski zavisnim parametrima. Za niže frekvencije, do reda 1 kHz pokazalo se kako svi modeli za jednaku konfiguraciju sustava izvora smetnje i osjetljivog sustava daju približno jednake rezultate. Analitički je pokazano kako modeli ispravno određuju veličinu smetnje uz razlike u rezultatima do 5%. Analiza utjecaja struje smetnje vlaka s asinkronim motorom s višim frekvencijskim članovima, potrebno je

koristiti model s frekvencijski zavisnim parametrima koji u određenom frekvencijskom opsegu računa elektromagnetski utjecaj posebno po frekvencijama.

Koristeći stvarni oblik struje napajanja dobivene su vrijednosti inducirano napona 30% veće od vrijednosti dobivenih mjerenjima što se može rastumačiti blagotvornim utjecajem okoline na smanjenje utjecaja. Harmonički članovi struje smetnje uslijed prometovanja vlaka s asinkronim motorom iznad frekvencije 2 kHz dobivaju na važnosti upravo pri određivanju inducirano napona. Iako je njihov udio u struji oko 1%, u inducirano naponu pojedini harmonički članovi sudjeluju i s više od 20%. Ova činjenica nameće zaključak kako je proračun utjecaja sustava električne vuče potrebno provesti sa stvarnim oblicima struje napajanja. Što je harmonički član struje smetnje višeg reda to je njegov prijenos na osjetljivu metalnu strukturu veći.

Električna vuča svojim pogonom i specifičnim oblicima struja napajanja različitih elektrovučnih vozila ima znatno drugačiji utjecaj na osjetljive strukture od drugih potrošača električne energije. Za dobro razumijevanje i točno računanje utjecaja pojedinog tipa elektrovučnog vozila preporuča se utjecaje odrađivati modelima sa stvarnim oblicima struja napajanja koje se javljaju u pogonu.

## 8 LITERATURA

- [1] C. R. Paul, Introduction to Electromagnetic Compatibility, Wiley-Interscience, New Jersey, USA, 2006.
- [2] C.A. Marshman, EMC in Railways, IET Professional Development Course on Electric Traction System, pp. 283 – 290, Manchester, UK, November 2010
- [3] J. Blin, J. Menez, Perturbations électriques et protections dans le réseau local, L'Echo des Recherches No. 107, pp. 35 – 44, Janvier 1982
- [4] D.D. Micu, G.C. Christoforidis and L. Czumbil, Artificial Intelligence Techniques Applied to Electromagnetic Interference Problems Between Power Lines and Metal Pipelines, Recurrent Neural Networks and Soft Computing, Dr. Mahmoud ElHefnawi (Ed.), InTech, March 2012
- [5] G. McFadden, Sustainability and Carbon Reduction on Electrified Railways, IET Conference on Railway Traction System, pp. 1 – 9, Birmingham, April 2010
- [6] B. Milešević, B. Filipović-Grčić, T. Radošević, Analysis of Low Frequency Electromagnetic Field and Calculation of Induced Voltages to an Underground Pipeline, IYCE2011, Leiria, Portugal, 2011
- [7] K.J. Satsios, D.P. Labridis, P.S. Dokopoulos, Inductive Interference caused to Telecommunication Cables by Nearby AC Electric Traction Lines. Measurements and FEM Calculation, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, No. 2, April 1999
- [8] I. Uglešić, I. Pavić, V. Milardić, B. Milešević, *Elektromagnetski utjecaj 2x110 kV dalekovoda na okolne telekomunikacijske mreže i vodove*, Zbornik radova 10. savjetovanja HRO Cigré, Cavtat, 2011.
- [9] B. Milešević, B. Filipović-Grčić, T. Radošević, Electromagnetic Fields and Induced Voltages on Undergrounded Pipeline in the Vicinity of AC Traction System, Journal of Energy and Power System, Vol. 8, No. 7, July 2014
- [10] G.C. Christoforidis, D.P. Labridis, P.S. Dokopoulos, Inductive Interference of Power Lines on Buried Irrigation Pipelines, IEEE Power Tech Conference Proceedings, Bologna, June 2003
- [11] S. Jaćimović, Elektromagnetsni uticaj vodova električne vuče jednofaznog sistema 25 kV 50 Hz na vodove elektroveza, Zavod za novinsko-izdavačku i propagandnu djelatnost JŽ, Beograd, 1976.

- [12] B. Milešević, N. Haddad, Estimation of current through human body in case of contact with pipeline in the vicinity of a 50 Hz electrified railway, Int. Symposium on Electromagnetic Compatibility, Brugge, September 2013
- [13] S. Frey, Railway Electrification System & Engineering, White Word Publication, Delhi, 2012.
- [14] F. Kiesseling, R. Puschmann, A. Schmieder, Contact Lines for Electric Railways: planning, design, implementation, Wiley, June 2009
- [15] Y. Oura, Y. Mochinaga, H. Nagasawa, Railway Electric Power Feeding System, Japan Railway & Transport Review, No. 16, June 1998.
- [16] I. Sitar, Izvedbe i karakteristike transformatora za vučne podstanice, 8. Savjetovanje HRO CIGRÉ, Cavtat, 2007.
- [17] M. Muždalo, Kontaktna mreža 25 kV, 50 Hz, Zavod za novinsko-izdavačku i propagandnu djelatnost JŽ, Beograd, 1982.
- [18] M.A. Mora, N. Haddad, M. Ney, Evaluation of the Current in the Rail by 2D and 3D Methods: Influence of the Railway Platform, IEEE Int. Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 167 – 172, Pittsburgh, PA, USA, August 2012
- [19] A. Mariscotti, Induced Voltage Calculation in Electric Traction Systems: Simplified Methods, Screening Factors, and Accuracy, IEEE Tran. On Intelligent Transportation System, Vol. 12, No. 1, March 2011
- [20] A.P.J. van Deursen, P.A.A.F. Wouters, H.W.M. Smulders, J.B.M. van Waes, EMC measurements in railway power system, Int. Symposium on EMC, Rome, Sep. 2012
- [21] Č. Čavlina, Elektrifikacija željeznica, Poseban otisak iz časopisa Elektrotehnika, br. 1 i 2, Zagreb, 1970.
- [22] P. Chapas, Composantes et applications électriques du system ferroviaire, Technique de l'ingénieur – Génie électrique, vol. D12, No. D5510, p. 1-16, Paris, 2003
- [23] J.C. Farr, A.C. Hall, Design consideration for 25 kV traction – supply transformers, Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, Vol. 122, Issue 7, pp. 727 – 732, July 1975
- [24] H. Požar, Visokonaponska rasklopna postrojenja, Tehnička knjiga, Zagreb, 1990.
- [25] B. Ž. Radojković, Električna vuča, Naučna knjiga, Beograd, 1974.
- [26] V. Kolar, J. Paleček, V. Styskala, J. Kypus, Electric railways operation from the perspective of EMC, 9th Int. Conference on Environment and Electrical Engineering, Prague, May 2010

- [27] V. A. Profillidis, *Railway Management and Engineering*, Ashgate Publishing Company, Burlington, USA, 2006
- [28] *Network Protection & Automation Guide*, Areva, ISBN 2-9518589-0-6, Paris La Défense, July 2002
- [29] W. Zhang, N. Zhou, R. Li, G. Mei, D. Song, Pantograph and centenary system with double pantographs for high-speed trains at 350 km/h and higher, *Journal of modern Transportation*, Vol. 19, No. 1, pp 7-11, March 2011
- [30] A. Carnicero, J.R. Jimenez-Octavio, M. Such, A. Ramos, C. Sanchez-Rebollo, Influence of static and dynamics on high performance catenary designs, *Pantograph Catenary Interaction Framework for Intelligent Control*, December 8th, Amiens, France, 2011
- [31] EN 50149, *Railway applications – Fixed installations – Electric traction – Copper and copper alloy grooved contact wires*, CENELEC, March 2001
- [32] K.G. Markvardt, *Energosnabženije električeskich železnych dorog*, Transport, Moskva, 1982.
- [33] *Contact wire and standard conductors for overhead catenary systems*, Liljedahl Bare Wire, katalog, Internet, 9. listopada 2014.  
<http://energievoorziening.funnymedia.nl/pdf%20folders/Contact%20Wire%20and%20Stranded%20Conductors%20for%20Overhead%20Catenary%20Systems.pdf>,  
 19. kolovoza 2014.
- [34] EN 13674 - 1:2003, *Railway applications - Track - Rail - Part 1, Vignola railway rails 46 kg/ m and above*
- [35] J. R. Carson, *Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return*, *Bell System Tehnical Journal*, Vol. 5, October 1926.
- [36] A. Steimel, *Electric Traction – Motive Power and Energy Supply*, Karl Heinz Pantke, Munich, 2008
- [37] R. J. Hill, *Electrification railway traction – Electromagnetic compatibility – disturbance sources and equipment susceptibility*, *Power Engineering Journal*, Vol. 11, No. 1, February 1997
- [38] D.W. Hart, *Introduction to power electronics*, Prentice-Hall, 1997
- [39] A.P. Kosarev, A.G. Volkov, G.S. Zinoviev, *Analysis of New Multizone Rectifier for Electric Locomotives of V185 Type*, *Int. Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electronic Devices*, Novosibirsk, July 2010

- [40] K. Sepetci, B. Tamyurek, Design and Simulation of a High Power Quality Regenerative PWM Rectifier System for 1 MW Electric Locomotives, 3<sup>rd</sup> Int. Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, Istanbul, October 2013
- [41] F. Flinders, W. Oghanna, Energy efficiency improvements to electric locomotives using PWM rectifier technology, Int. Conference on Electric Railways in a United Europe, Amsterdam, Mart 1995
- [42] J. Shen, J.A. Taufiq, A.D. Mansell, Analytical solution to harmonic characteristics of traction PWM converters, IEE Proceedings of Electric Power Applications, Vol. 144, Issue 2, Mart 1997
- [43] R. Bojoi, A. Tenconi, G. Griva, F. Profumo, Vector Control of Dual-Three-Phase Induction-Motor Drives Using Two Current Sensors, IEEE Trans. on Industry Application, Vol. 42, No. 5, October 2006
- [44] V. Sabate, Traction électrique ferroviaire – Convertisseurs et moteurs, Technique de l'ingénieur – Génie électrique, vol. D12, No. D5502, p. D5502.1-D5502.38, Paris, 1998
- [45] R.J. Hill, Electric railway traction – Electric traction and DC traction motor drives, Power Engineering Journal, Vol. 8, Issue 1, February 1994
- [46] J. Michalik, J. Molnar, Z. Peroutka, Optimal control of traction single-phase current-source active rectifier, 14<sup>th</sup> Int. Power Electronics and Motion Control Conference, Ohrid, September 2010
- [47] J. Mahseredjian, C. Dewhurst, EMTP-RV User Manual, version 2.4, Powersys, Le Puy-Sainte-Réparate, France, 2012
- [48] L. Prikler, H.K. Hoidalén, ATPDRAW Users' Manual, version 5.6, Norway, 2009
- [49] A. Župan, A. Tomasović Teklić, B. Filipović-Grčić, Modeling of 25 kV Electric Railway System for Power Quality Studies, EuroCon 2013, Zagreb, July 2013
- [50] B. Yang, H. Zelaya, J.A. Taufiq, Computer simulation of three-phase induction motor traction system fed by single-phase AC/DC pulse converters with current control scheme, IEEE Industry Application Society Annual Meeting, Seattle, WA, USA, 1990
- [51] J.L. Oldenkamp, S.C. Peak, Selection and Design of an Inverter-Driven Induction Motor for a Traction Drive System, IEEE Trans. on Industry Application, Vol. IA-21, Issue 1, January 1985
- [52] F. Chauvet, Compatibilité électromagnétique : Modes de transmission, Technique de l'ingénieur – Génie électrique, vol. 5, No. E3750, p. D1900E3750.1-D1900E3750.20, Paris, 1993

- [53] M. Puharić, Elektromagnetska kompatibilnost u elektroenergetskim postrojenjima, *Energija*, god. 51., br. 3, lipanj 2002.
- [54] G.G. Champiot, Compatibilité électromagnétique : Modes de transmission , *Technique de l'ingénieur – Génie électrique*, vol. D2, No. D1305, p. 1305.1-1305.20, Paris, 1988
- [55] Railway fixed equipment and rolling stock – Electromagnetic disturbances in electrification 25 kV, 50 Hz – Low frequencies phenomenons – Calculation tutor, *Normalisation Français F 07-11*, October, 1993
- [56] HRN.N.C0.103 Zaštita telekomunikacijskih postrojenja od utjecaja postrojenja i vodova elektrovuče – zaštita od opasnosti, Savezni zavod za normizaciju, 1989.
- [57] ITU Directives concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electric power and electrified railway lines – Volume II Inducing Currents and Voltages in Electrified Railway Systems, ITU, Geneva, 1989
- [58] Telekomunikacijski kabeli Elka, Katalog B, web  
[http://www.elka.hr/media/katalog\\_full/4.pdf](http://www.elka.hr/media/katalog_full/4.pdf), 2. siječnja 2014.
- [59] D. Ćosić, D. Todorović, O. Salihović, V. Gojović, R. Korač, K. Simić, *Vazdušne i kablovske TT linije*, Zajednica Jugoslovenskih pošta, telegrafa i telefona, Beograd, 1972.
- [60] Guide on Influence of High Voltage AC Power Systems on Metallic Pipelines, CIGRE 95, Working Group 36.02, 1995.
- [61] I. Dragičević, M. Živković, M. Golub, J. Rašić, *Studija utjecaja na okoliš magistralnog plinovoda Zlobin – Omišalj*, Sveučilište u Zagrebu Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, rujan 2008.
- [62] M. Kolbadinejad, A. Zabihollah, A. A. Akbar Khayyet, M. O. Mahmoud Pour, An equivalent electric circuit design for pipelines corrosion monitoring based on piezoelectric elements, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 27, Issue 3, pp 799-804, March 2013
- [63] J. Schlabbach, *Short-circuit Currents*, The Institute of Engineering and Technology, 2005
- [64] M. Jung, *Naponi opasnosti na naftovodima inducirani strujama jednopolnog kratkog spoja u vodovima visokog napona*, Institut za elektroprivredu, Zagreb, 1975.
- [65] Z. Haznadar, Ž. Štih, *Elektromagnetizam*, Školska knjiga, Zagreb, 1997.
- [66] H.W. Dommel, *ElectroMagnetic Transient Program – Theory Book*

- [67]M. Mandić, I. Uglešić, V. Milardić, Design and testing of 25 kV AC electric railway power supply systems, Tehnički vjesnik, Vol. 20, No. 3, 2013.
- [68]FLUKE 1625 Earth/Ground Tester, User Manual, January 2006.
- [69]Lightning Protection Guide, 2<sup>nd</sup> updated edition, DEHN, Neumarkt, September 2007.
- [70] G.C. Christoforidis, D.P. Labridis, P.S. Dokopoulos, A Hybrid Method for Calculation the Inductive Interference Caused by Faulted Power Lines to Nearby Buried Pipelines, IEEE trans. On Power delivery, Vol. 20, No. 2, April 2005
- [71] L.M. McCormack, P.W. Hooper, Railway electrical systems integration and electromagnetic compatibility, 5<sup>th</sup> IET Professional Development Course on Railway Electrification Infrastructure and Systems, London, June 2011
- [72]US Patent US1533279A, Jeremiah Strugon, Electric connection for railway rails, State of Oklahoma, 1925.
- [73]M.J. Koob, The Development of a Vibration Technique for Estimation of Neutral Temperature in Continuously welded Railroad Rail, Master Thesis, University of Illinois, Urbana-Champaign, 2005
- [74]R. J. Hill, D. C. Carpenter, Rail Track Distributed Transmission Line Impedance and Admittance: Theoretical Modelling and Experimental Results, IEEE Trans. on Vehicular Tehnology, Vol. 42, No. 2, May 1993
- [75]R. J. Hill, S. Brillante, P. J. Leonard, Railway track transmission line parameters from finite element field modelling: Series impedance, IEEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 146, No. 6, November 1999
- [76]H. R. J. Klewe, Interference between power systems and telecommunication lines, Report M/T 126, Electrical Research Association, London, 1958.
- [77]C. L. Holloway, G. A. Hufford, Internal Inductance and Conductor Loss Associated with the Ground Plane of a Microstrip Line, IEEE Trans. On EMC, Vol. 39, No. 2, May 1997.
- [78]M. Nakagawa, K. Iwamoto, Earth-return Impedance for the Multi-layer Case, IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-95, No. 2, March/April, 1976
- [79]D.A. Tsiamitros, G.K. Papagiannis, P.S. Dokopoulos, Earth Return Impedances of Conductor Arrangement in Multilayer Soils – Part I: Theoretical Model, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 23, No. 4, October 2008
- [80]R. J. Hill, Determination of rail internal impedance for electric railway traction system simulation, IEE Proceedings of Electric Power Application, Vol. 138, Issue 6, 1991



- [81] A. Dolara, S. Leva, Calculation of Rail Internal Impedance by Using Finite Elements Methods and Complex Magnetic Permeability, *Int. Journal of Vehicular Technology*, Vol. 2009, Special Section pp 1-10, 2009
- [82] M. Ožegović, K. Ožegović, *Električne energetske mreže I.*, Sveučilište u Splitu Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split, 1996.

## POPIS OZNAKA I KRATICA

$\mu_0$	permeabilnost vakuumu
$\mu_r$	relativna permeabilnost
$a$	udaljenost izvora smetnje i osjetljivog sustava
$A$	udaljenost vodiča parice
AC	Alternating Current (izmjenična struja)
AM	Asynchronous Machine (asinkroni stroj)
CP	Constant Parameters (stalni parametri)
$D$	međusobna udaljenost vodiča
$d$	promjer vodiča
$d_1, d_2$	udaljenosti krajeva segmenata od pruge
DC	Direct Current (istosmjerna struja)
DV	DalekoVod
$E_A$	elektromotorna sila inducirana od izvora smetnje
$E_B$	elektromotorna sila inducirana od sustava zaštite
$E_e$	napon sustava izvora smetnje
EES	Elektroenergetski Sustav
$E_R$	ukupna elektromotorna sila
$E_t$	inducirani napon na osjetljivom sustavu
$E_t$	elektromotorna sila inducirana na osjetljivom sustavu uz zaštitno uže
$E_t'$	elektromotorna sila inducirana na osjetljivom sustavu bez zaštitnog užeta
EVP	ElektroVučna Podstanica
EVS	ElektroVučni Sustav
$f$	frekvencija
FD	Frequency Depended (frekvencijski ovisan)
$G_{II}$	odvod
$h$	visina vodiča iznad zemlje
$I$	struja
$I_1$	struja u zaštitnom užetu
$I_e$	struja u izvoru smetnje
$k$	faktor redukcije
$l$	duljina
$l_1, l_2$	oznake položaja duljine utjecaja
$L_{II}$	induktivitet vodiča izvora smetnje
$L_{It}$	međuintuktivitet vodiča izvora smetnje i zaštitnog sustavu
LI	Lightning Impulse (udarni atmosferski val)
$M$	međuintuktivitet
$m_a$	amplitudni indeks modulacije
$m_f$	frekvencijski indeks modulacije
ONAN	Oil Natural Air Natural (ulje prirodno, zrak prirodno)
PEHD	High-Density PolyEthylene
$r$	polumjer vodiča

$r'$	reducirani polumjer vodiča
$R_k$	djelatni otpor vodiča
RP	Rasklopno Postrojenje
$R_Z$	otpor povratnog puta zemlje
$s$	udaljenost između vodiča
$S_k$	presjek vodiča
$S_n$	nazivna prividna snaga
$U$	inducirani napon
UIC	Union International des Chemins de fer (Međunarodna unija željeznica)
$U_k$	napon kratkog spoja
$U_n$	nazivni napon
$X$	ukupna reaktancija vodiča
$X_d$	reaktancija transformatora
$X_m$	reaktancija međuimpedancije
$X_u$	unutarnja reaktancija vodiča
$X_v$	vanjska reaktancija vodiča
$Y_{11}$	admitancija
$Z_{11}, Z_{12}$	vlastita impedancija vodiča
$Z_{1t}$	mađuimpedancija izvora smetnje i osjetljivog sustava
$Z_{e1}$	mađuimpedancija izvora smetnje i zaštitnog užeta
$Z_{et}$	mađuimpedancija izvora smetnje i osjetljivog sustava
$Z_m$	međuimpedancija
$Z_T$	impedancija transformatora
$\alpha$	koeficijent prigušanja
$\beta$	fazna konstanta
$\delta_c$	dubina prodiranja
$\varepsilon_l$	dielektričnost izolatora
$\kappa$	specifična vodljivost tla
$\lambda'$	korekcijski koeficijent pri proračunu parametara telekomunikacijskog voda
$\rho$	specifični otpor tla
$\rho_k$	specifični otpor vodiča
$\chi$	koeficijent rasprostiranja
$\Psi$	korekcijski koeficijent efekta bliskosti
$\omega$	kružna frekvencija

## PRILOG A

### ODREĐIVANJE IMPEDANCIJE KONTAKTNE MREŽE

Impedanciju vodiča sa zemljom kao povratnim putem definirao je Carson [35]:

$$Z = R_k + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h}{r} + 2(\Delta R + j\Delta X) \left[ \frac{\Omega}{\text{km}} \right] \quad (\text{A1})$$

gdje je:

- $R_k$  djelatni otpor vodiča,
- $\omega$  kružna frekvencija,
- $h$  visina vodiča iznad zemlje,
- $r$  polumjer vodiča,
- $\Delta R, \Delta X$  korekcija obzirom na svojstva tla

$$\Delta R = \omega \cdot 2 \cdot 10^{-4} \left\{ \begin{array}{l} \frac{\pi}{8} - b_1 \cos \theta \\ + b_2 p^2 [(c_2 - \ln p) \cos 2\theta + \theta \sin 2\theta] \\ + b_3 p^3 \cos 3\theta \\ - d_4 p^4 \cos 4\theta \\ - b_5 p^5 \cos 5\theta \\ + b_6 p^6 [(c_6 - \ln p) \cos 6\theta + \theta \sin 6\theta] \\ + b_7 p^7 \cos 7\theta \\ - d_8 p^8 \cos 8\theta \\ - \dots \end{array} \right\} [\Omega / \text{km}]$$

$$\begin{aligned} \Delta X = \omega \cdot 2 \cdot 10^{-4} & \left\{ \frac{1}{2} (0.6159 - \ln p) \right. \\ & + b_1 p \cos \theta \\ & - d_2 p^2 \cos 2\theta \\ & + b_3 p^3 \cos 3\theta \\ & - b_4 p^4 [(c_4 - \ln p) \cos 4\theta + \theta \sin 4\theta] \\ & + b_5 p^5 \cos 5\theta \\ & - d_6 p^6 \cos 6\theta \\ & + b_7 p^7 \cos 7\theta \\ & - b_8 p^8 [(c_8 - \ln p) \cos 8\theta + \theta \sin 8\theta] \\ & \left. + \dots \right\} [\Omega / \text{km}] \end{aligned}$$

Koeficijenti  $b_i$ ,  $c_i$  i  $d_i$  su stalnice i mogu se izračunati iz sljedećih izraza:

$$b_1 = \frac{\sqrt{2}}{6}$$

$$b_2 = \frac{1}{16}$$

$$b_i = |b_{i-2}| \frac{\text{sign}}{i(i+2)}$$

$$\text{sign} = \begin{cases} 1 & \text{za } i = 1, 2, 3, 4 \quad 9, 10, 11, 12 \dots \\ -1 & \text{za } i = 5, 6, 7, 8 \quad 13, 14, 15, 16 \dots \end{cases}$$

$$c_i = c_{i-2} + \frac{1}{i} + \frac{1}{i+2}, \quad c_2 = 1,3659315$$

$$d_i = \frac{\pi}{4} b_i$$

Djelatni otpor se računa na dobro poznati način:

$$R_k = \frac{\rho_k}{S_k} \cdot 10^3 \left[ \frac{\Omega}{\text{km}} \right] \quad (\text{A2})$$

gdje je:

$$\rho_k \text{ specifični otpor vodiča } \left[ \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{km}} \right],$$

$$S_k \text{ presjek vodiča } [\text{mm}^2].$$

Induktivni dio sastoji se od unutarnje i vanjske komponente. Unutarnja komponenta je vezana uz raspodjelu magnetskog polja u vodiču, a može se odrediti kao [74] – [77]:

$$X_u = 2\omega \frac{\mu_r}{4} \cdot 10^{-4} \quad (\text{A3})$$

gdje je:

$\mu_r$  relativna permeabilnost vodiča.

Uz pretpostavke da je:

- Struja ravnomjerno raspodijeljena po presjeku vodiča i
- Vodič je izrađen iz neferomagnetskog materijala ili ukoliko je feromagnetičan, njegova se permeabilnost treba uzeti u obzir.

Dio izraza (A3) može se pisati:

$$\frac{\mu_r}{4} = \ln e^{\mu_r/4} = \ln \frac{r}{r \cdot e^{-\mu_r/4}} = \ln \frac{r}{r'} \quad (\text{A4})$$

pa uz ovu zamjenu imamo:

$$X_u = 2 \cdot 10^{-4} \omega \ln \frac{r_i}{r'_i} \quad (\text{A5})$$

gdje je

- $r_i$  polumjer vodiča,
- $r'_i$  srednji geometrijski polumjer vodiča.

Vanjska komponenta jednaka je umnošku kružne frekvencije i induktiviteta vodiča koji se računa prema Pollaczeku [74]:

$$L = \left( 1 + 2 \ln \frac{10^4}{\gamma \sqrt{10\pi\omega\kappa}} - j \frac{\pi}{2} \right) \quad (\text{A6})$$

gdje je:

$\gamma$  Besselova konstanta (1.7811),

$r$  polumjer vodiča [m],

$\kappa$  specifična vodljivost zemlje.

iz izraza (A1) dobiva se za frekvenciju 50 Hz izvesti općenito:

$$R_Z + jX_V = 0.0493 + j0.1446 \cdot (1.97 - \log r + 0.5 \log \rho) \quad (\text{A7})$$

gdje je:

$\rho$  specifični otpor tla ( $\rho = \frac{1}{\kappa}$ ) [ $\Omega\text{m}$ ].

Sada se za ukupnu impedancija vodiča može pisati:

$$R_z + jX = R_z + j(X_v + X_u) = 0.0493 + j0.1446 \cdot (2.08 - \log r + 0.5 \log \rho) \quad (\text{A8})$$

Realni dio u prethodnom izrazu predstavlja djelatni otpor zemlje:

$$R_z = \frac{\mu_0 \mu_r \pi f}{4} \quad (\text{A9})$$

gdje je:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m permeabilnost vakuuma.}$$

Za vrijednost relativne permeabilnosti jedan i uz pogonsku frekvenciju, ovaj otpor ima vrijednost:

$$R_z = \frac{\mu \omega}{2} \cdot 10^{-4} = 0.0493 \text{ } \Omega/\text{km} \quad (\text{A10})$$

Sada možemo napisati pojednostavljenu formulu za proračun impedancije dugog vodiča postavljenog iznad zemlje uz uvjet da mu je polumjer mnogo manji od visine na koju je postavljen.

$$Z = R_k + R_z + jX \text{ } [\Omega/\text{km}] \quad (\text{A11})$$

U prethodnim formulama nema ovisnosti impedancije o visini vodiča iznad tla. Međutim, ukoliko je ispunjena pretpostavka da je visina vodiča iznad zemlje mnogo veća od polumjera vodiča, što je u pravilu točno, ova ovisnost može se zanemariti. Pretpostavljeno je da je tlo homogeno. Ukoliko tlo ima više slojeva potrebno je korigirati izraz (A1) prema [78], [79].

Analogno izrazu (A6) vrijede za međinduktivitet dvaju vodiča izraz:

$$M = \left( 1 + 2 \ln \frac{10^4}{\gamma D \sqrt{10 \pi \omega \kappa}} - j \frac{\pi}{2} \right) \quad (\text{A12})$$

gdje je:

$D$  međusobna udaljenost dvaju vodiča [m].

Kod određivanja međuimpedancije nema doprinosa djelatnog otpora niti unutarnje reaktancije vodiča te se izravno može pisati:

$$Z_m = R_z + jX_m = 0.0493 + j0.1446 \cdot (1.97 - \log D + 0.5 \log \rho) \quad (\text{A13})$$

Tračnice su izrađene od feromagnetskog materijala te je pri računanju otpora tračnica tu činjenicu potrebno uzeti u obzir [80], [81].

Sada je moguće odrediti impedanciju bilo koje kontaktne željezničke mreže uz poznavanje njezinih parametara.

Koristeći formulu (A13) može se formirati matrica vlastitih impedancija i međui impedancija. Kako su tračnice iz feromagnetskog materijala, njihova se permeabilnost treba uzeti u obzir kako je spomenuto u opisu formule (2.5). Usvojeno je vrijednost unutarnjeg induktiviteta u vrijednosti 0,75 vlastitog otpora [32]. Matrice su određene za različite specifične otpore tla 50 Ωm, 100 Ωm, 200 Ωm, 300 Ωm i 1000 Ωm kako slijedi:

- Uz frekvenciju f=50 Hz i ρ=50 Ωm

$$Z = \begin{bmatrix} 0,138 + j0,685 & 0,05 + j0,391 & 0,05 + j0,344 & 0,05 + j0,300 & 0,05 + j0,300 \\ & 0,203 + j0,734 & 0,05 + j0,342 & 0,05 + j0,287 & 0,05 + j0,287 \\ & & 0,386 + j0,752 & 0,05 + j0,292 & 0,05 + j0,292 \\ & & & 0,075 + j0,622 & 0,05 + j0,384 \\ & & & & 0,075 + j0,622 \end{bmatrix} \frac{\Omega}{\text{km}}$$

- Uz frekvenciju f=50 Hz i ρ=100 Ωm

$$Z = \begin{bmatrix} 0,138 + j0,707 & 0,05 + j0,413 & 0,05 + j0,366 & 0,05 + j0,321 & 0,05 + j0,321 \\ & 0,203 + j0,756 & 0,05 + j0,364 & 0,05 + j0,308 & 0,05 + j0,308 \\ & & 0,386 + j0,774 & 0,05 + j0,313 & 0,05 + j0,313 \\ & & & 0,075 + j0,643 & 0,05 + j0,406 \\ & & & & 0,075 + j0,643 \end{bmatrix} \frac{\Omega}{\text{km}}$$

- Uz frekvenciju f=50 Hz i ρ=200 Ωm

$$Z = \begin{bmatrix} 0,138 + j0,729 & 0,05 + j0,435 & 0,05 + j0,387 & 0,05 + j0,343 & 0,05 + j0,343 \\ & 0,203 + j0,778 & 0,05 + j0,386 & 0,05 + j0,330 & 0,05 + j0,330 \\ & & 0,386 + j0,796 & 0,05 + j0,335 & 0,05 + j0,329 \\ & & & 0,075 + j0,665 & 0,05 + j0,427 \\ & & & & 0,075 + j0,665 \end{bmatrix} \frac{\Omega}{\text{km}}$$

- Uz frekvenciju f=50 Hz i ρ=300 Ωm

$$Z = \begin{bmatrix} 0,138 + j0,742 & 0,05 + j0,447 & 0,05 + j0,400 & 0,05 + j0,356 & 0,05 + j0,356 \\ & 0,203 + j0,791 & 0,05 + j0,399 & 0,05 + j0,343 & 0,05 + j0,343 \\ & & 0,386 + j0,809 & 0,05 + j0,348 & 0,05 + j0,342 \\ & & & 0,075 + j0,678 & 0,05 + j0,440 \\ & & & & 0,075 + j0,678 \end{bmatrix} \frac{\Omega}{\text{km}}$$

- Uz frekvenciju f=50 Hz i ρ=1000 Ωm



$$Z = \begin{bmatrix} 0,138 + j0,779 & 0,05 + j0,485 & 0,05 + j0,387 & 0,05 + j0,394 & 0,05 + j0,394 \\ & 0,203 + j0,828 & 0,05 + j0,436 & 0,05 + j0,381 & 0,05 + j0,381 \\ & & 0,386 + j0,846 & 0,05 + j0,386 & 0,05 + j0,380 \\ & & & 0,075 + j0,716 & 0,05 + j0,478 \\ & & & & 0,075 + j0,716 \end{bmatrix} \frac{\Omega}{\text{km}}$$

## PRILOG B

### ODREĐIVAJE REDUKCIJSKOG FAKTORA USLIJED POVRATNE STRUJE

Povratna struja u elektrovučnom sustavu protječe tračnicama i povratnim užetom ukoliko je postavljeno. Koliki će se iznos struje vraćati ovim povratnim putem, a koliko kroz zemlju ovisi o brojnim parametrima, a najvažniji su impedancija tračnica i povratnog užeta, njihov geometrijski položaj i specifična otpornost tla. Pojava povratne struje u tračnicama i povratnom užetu može se tumačiti postojanjem induktivne i galvanske veze između sustava napajanja električnih vozila i vodiča na povratnom putu struje.

U ovom podpoglavlju dat će se osnovni podaci o veličini povratne struje i redukcijskim faktorima uslijed njezina protjecanja. Naime, povratna struja ima smjer suprotan struji napajanja te time smanjuje vrijednost magnetskog polja i induciranog napona na osjetljivim telekomunikacijskim vodovima i cjevovodima.

#### **B1 Rubni učinci**

U slučajevima kada izvor poremećaja djeluje na ograničenom dijelu povratnog puta (tračnica i povratno uže) ili kada je povratno uže postavljeno samo na dijelu pruge, događa se takozvani rubni učinak. Slučajevi spomenuti u prethodnoj rečenici prikazani su slikama B1 i B2.

Na ograničenoj duljini  $2l$  nalaze se na nekoj udaljenosti izvor smetnje i vodič povratnog puta struje. Pretpostavimo da vodičem povratnog puta teče struja:

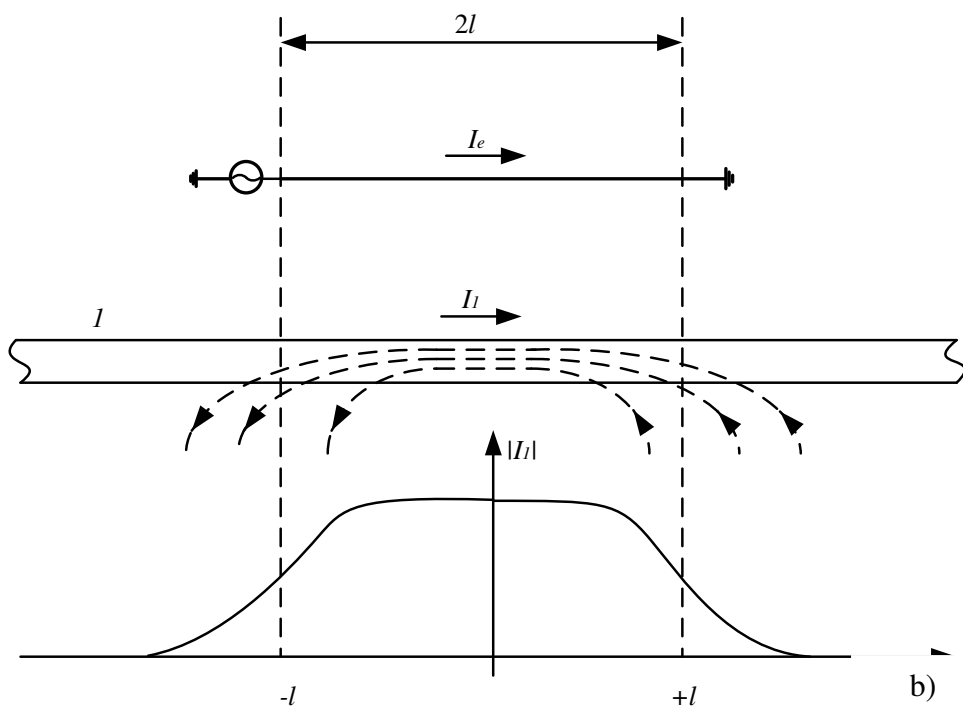
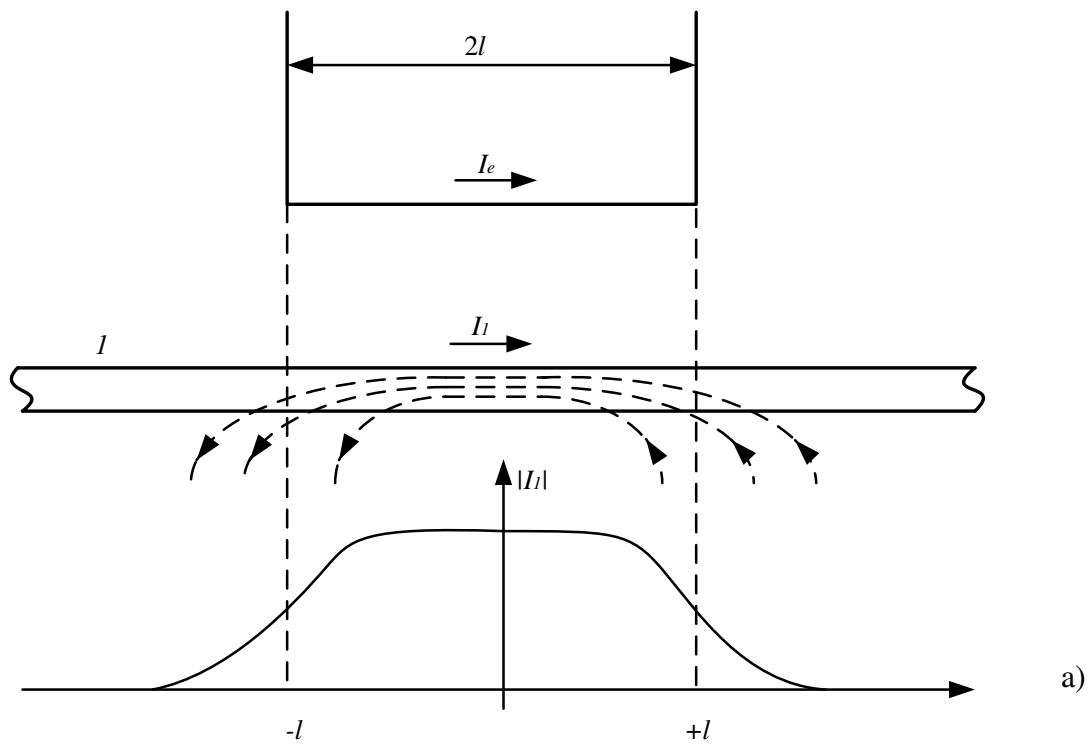
$$I_1 = -\frac{E_1}{Z_{11}} \quad (\text{B1})$$

gdje je:

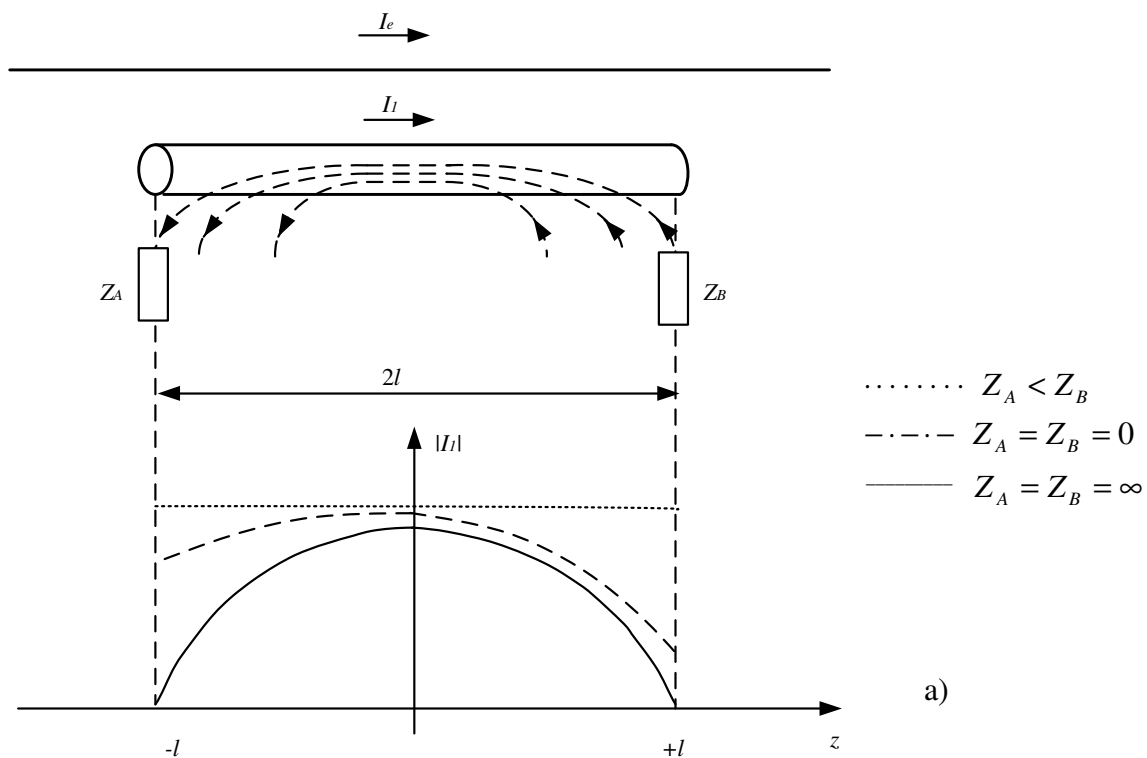
$E_1$  - inducirani napon,

$Z_{11}$  - vlastita impedancija vodiča.

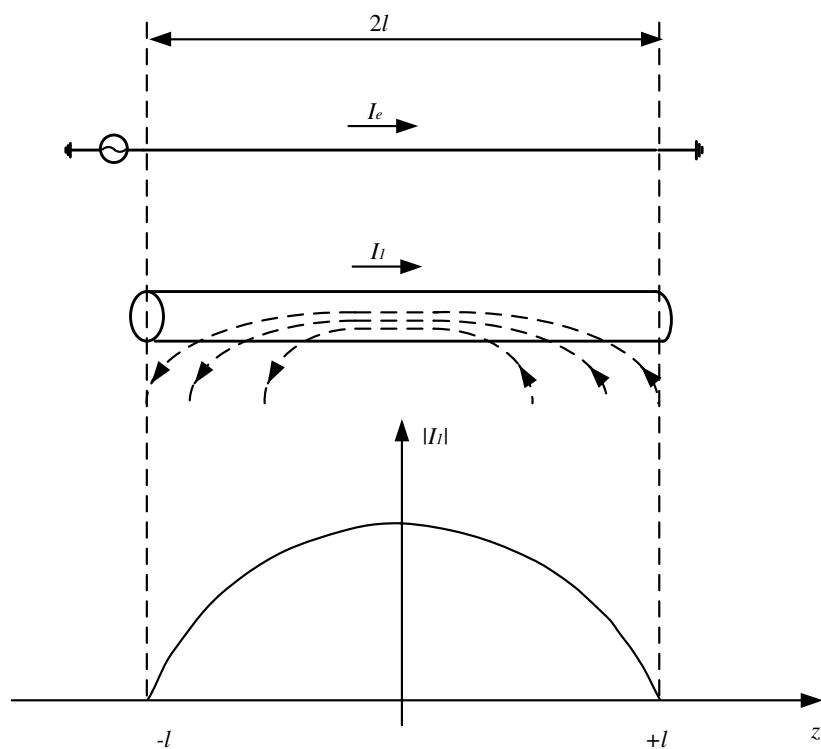
Ova struja teče uslijed induciranog napona prenesenog induktivnom vezom. Najvišu vrijednost struja  $I_1$  ima na sredini promatranog dijela zajedničkog koridora, dok prema rubovima njezina vrijednost opada.



Slika B1 Rubni učinak za slučaj djelovanja na ograničenom dijelu povratnog voda



a)



b)

Slika B2 Rubni učinak za slučaj djelovanja na ograničenom dijelu

Slike B1 i B2 prikazuju općenite položaje izvora smetnje i vodiča povratnog puta struje. Na dijelu a) i b) slike B1 prikazani je slučajevi kada povratno uže ima duljinu veću od vodiča izvora

smetnje. Dio a) slike B2 prikazuje slučaj kada je povratno uže uzemljen preko impedancije. Ovo je u praksi najčešći slučaj jer su u željezničkom sustavu tračnice i povratno uže, koji je s njima spojen, postavljeni na platformi koja je uvjetno rečeno izolirana od zemlje. Veći otpor uzemljenja uvjetuje manju povratnu struju. Može se zaključiti da kod savršeno uzemljenog vodiča ne bi dolazilo do pojave rubnog učinka.

Prikazi na prethodnoj slici su načelni. Za određivanje točne vrijednosti povratne struje, potrebno je poznavati parametre sustava. Koristeći već navedene oznake za inducirani napon  $E_1$  i vlastitu impedanciju povratnog užeta  $Z_{11}$ , uvest ćemo oznake za admitanciju povratnog voda  $Y_{11}$ , njegovu karakterističnu impedanciju  $Z_C$  i koeficijent prodiranja  $\chi$  sa sljedećim definicijama [82]:

$$Z_{11} = R_{11} + j\omega L_{11} \quad (B2)$$

$$Y_{11} = G_{11} + j\omega C_{11} \quad (B3)$$

$$Z_C = \sqrt{\frac{Z_{11}}{Y_{11}}} \quad (B4)$$

$$\chi = \sqrt{Z_{11} \cdot Y_{11}} = \alpha + j\beta \quad (B5)$$

gdje je:

$\alpha$  koeficijent prigušenja,

$\beta$  fazna konstanta.

Odvod povratnih vodova je značajno veći od kapaciteta prema zemlji te se za koeficijent rasprostiranja može pisati:

$$\chi = \alpha + j\beta = \sqrt{(R_{11} + j\omega L_{11}) \cdot G_{11}} \quad (B6)$$

iz čega se dobiju izrazi za koeficijent prigušenja i faznu konstantu:

$$\alpha = \sqrt{R_{11} \cdot G_{11}} \sqrt{\frac{1 + \sqrt{1 + (\omega L_{11} / R_{11})^2}}{2}} \quad (B7)$$

$$\beta = \frac{\omega L_{11} G_{11}}{2\alpha} \quad (B8)$$

Izraz za koeficijent prigušenja može se pojednostaviti ako je ispunjena pretpostavka da je:

$$\omega L_{11} / R_{11} \gg 1 \quad (\text{B9})$$

slijedi:

$$\alpha = \sqrt{R_{11} \cdot G_{11}} \sqrt{\frac{1 + (\omega L_{11} / R_{11})}{2}} = \sqrt{\frac{\omega L_{11} G_{11}}{2}} = \frac{1}{\tau} \quad (\text{B10})$$

Za povratne struje može se pisati [76]:

$$I_1 = -\frac{E_1}{Z_{11}} (1 - e^{-\chi z} \cosh(\chi z)) \text{ za } |z| < l \quad (\text{B11})$$

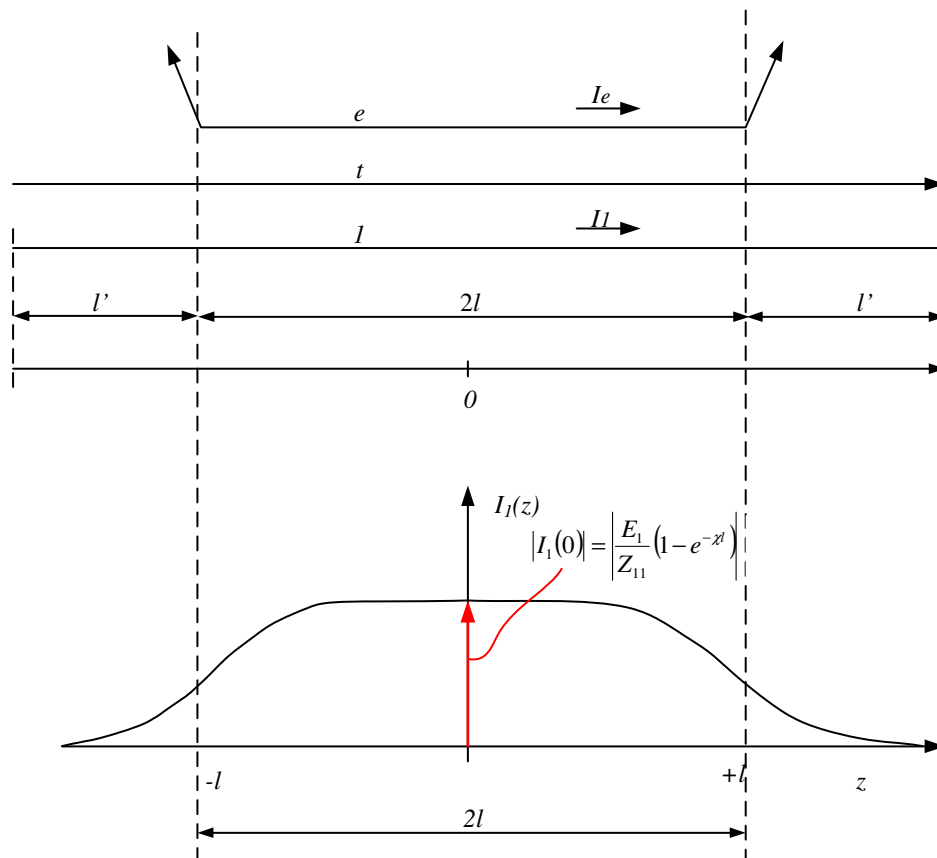
i

$$I_1 = -\frac{E_1}{Z_{11}} e^{-\chi|z|} \sinh(\chi z) \text{ za } |z| > l \quad (\text{B12})$$

Vrijednost struje doseže maksimum za  $z = 0$  i iznosi:

$$I_1 = -\frac{E_1}{Z_{11}} (1 - e^{-\chi l}) = -\frac{E_1}{Z_{11}} (1 - e^{-j\beta l} \cdot e^{-l/\tau}) \quad (\text{B13})$$

što je prikazano slikom B3.



Slika B3 Struja povratnog voda za slučaj djelovanja na ograničenom dijelu

## B2 Određivanje redukcijuskog faktora

Kako bi se odredile formule za redukcijuski faktor uslijed povratne struje pretpostavit ćemo da je struja koja uzrokuje indukciju stalna po iznosu i faznom pomaku te da su vodiči u sustavu međusobno paralelni. Uz ove uvjete inducirani napon po jedinici duljine na povratnom užetu  $E_1 = Z_{1e} \cdot I_1$  je promjenjiv preko struje zbog rubnih učinaka. U prethodnom podpoglavlju određena je ovisnost povratne struje o položaju na povratnom užetu preko hiperbolnih i eksponencijalnih funkcija [57]:

$$I_1 = -\frac{Z_{1e}}{Z_{11}} I_e f(z) \quad (\text{B14})$$

Definirajmo srednju povratnu struju kao:

$$I_{1SR} = \frac{1}{2l} \int_{-l}^{+l} I_1(z) dz \quad (\text{B15})$$

odnosno:

$$\frac{I_1}{I_e} = \frac{-\frac{Z_{1e}}{Z_{11}} I_e \frac{1}{2l} F(z)}{I_e} = -\frac{Z_{1e}}{Z_{11}} \frac{1}{2l} F(z) = -q \frac{1}{2l} F(z) \quad (\text{B16})$$

Sada je moguće odrediti redukcijuski faktor uslijed povratne struje kao:

$$k = \frac{Z_{et} \cdot 2l \cdot I_e \cdot Z_{1t} \cdot 2l \cdot I_{1SR}}{Z_{et} \cdot 2l \cdot I_e} = 1 + \frac{I_{1SR}}{I_e} \cdot q_t = 1 - q \cdot q_t \frac{F(z)}{2l} \quad (\text{B17})$$

gdje su:

$$q = \frac{Z_{1e}}{Z_{11}} \text{ i } q_t = \frac{Z_{1t}}{Z_{et}}$$

## ŽIVOTOPIS

Boško Milešević rođen je u Bosanskoj Krupi 1984. godine. Osnovnu i srednju školu završio u Zagrebu. Diplomirao je 2008. godine na Sveučilištu u Zagrebu Fakultetu elektrotehnike i računarstva. Od 2008. godine radi na Sveučilištu u Zagrebu Fakultetu elektrotehnike i računarstva, Zavod za visoki napon i energetiku.

Glavna područja znanstveno istraživačkog i stručnog rada su električna željeznica, elektromagnetska kompatibilnost, visokonaponska laboratorijska ispitivanja, tehnika visokog napona, prijelazne pojave u elektroenergetskom sustavu, prenaponska zaštita te koordinacija izolacije. Autor je i koautor 17 znanstvenih i stručnih radova objavljenih u međunarodnim časopisima te na međunarodnim i domaćim znanstvenim i stručnim skupovima. Sudjelovao je u izradi većeg broja elaborata i studija primijenjenih u praksi.

Sudjeluje u predavanjima i laboratorijskim vježbama na sljedećim predmetima s preddiplomskog i diplomskog studija elektrotehnike i informacijske tehnologije: „Tehnika visokog napona“, „Prenaponska zaštita“, „Prijelazne pojave i elektromagnetska kompatibilnost“ i „Laboratorij elektroenergetike 2“.

Od 2008. godine sudjeluje u radu na znanstvenom projektu „Udovoljavanje zahtjeva zaštite okoliša u visokonaponskom sustavu“ Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske. Zamjenik je voditelja kvalitete u Visokonaponskom laboratoriju na Fakultetu elektrotehnike i računarstva gdje se bavi visokonaponskim ispitivanjima.

Član je međunarodnih strukovnih udruga IEEE i CIGRÉ. Dobitnik je priznanja Josip Lončar za uspjeh na dodiplomskom studiju, nagrada Hrvoje Požar za uspjeh u studiju i zapažen rad iz područja energetike. Član je Vijeća tehničkog područja Sveučilišta u Zagrebu i Fakultetskog vijeća Fakulteta elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu. Obnašao je dužnost predsjednika Studentskog Zbora Fakulteta elektrotehnike i računarstva od 2011. do 2012. godine. Predsjednik je udruge Filipid za promicanje izvrsnosti među studentima.



## POPIS OBJAVLJENIH RADOVA

- **Znanstveni radovi u časopisima:**

- 1) B. Milešević, B. Filipović-Grčić, T. Radošević, *Electromagnetic Fields and Induced Voltages on Undergrounded Pipeline in the Vicinity of AC Traction System*, Journal of Energy and Power Engineering, Vol. 8, No. 7, pp. 1333-1340, July 2014
- 2) A. Horvat-Sedlić, N. Mandić, B. Milešević, *Types of the National Markets of Ancillary Services and Balancing Energy*, Journal of Energy and Power Engineering, Vol. 7, No. 10, pp. 1884-1891, October 2013
- 3) A. Xémard, S. Dennetière, I. Uglešić, V. Milardić, B. Milešević, P. Grand, F. Sauvegrain, P. Stevenin, M. Mesić, *The Protection against Lightning of an Overhead Line Upgraded from 225 kV to 400 kV*, Journal of Energy and Power Engineering, Vol. 6, No. 2, pp. 267-275, February 2012

- **Znanstveni radovi u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom:**

- 1) Milešević, Boško, Haddad, Noël; *Estimation of current through human body in case of contact with pipeline in the vicinity of a 50 Hz electrified railway*, Proceedings of the 2013 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp 877-882, Brugge, Belgija, 2013
- 2) Milešević, B; Filipović-Grčić, B.; Radošević, T., *Analysis of Low Frequency Electromagnetic Field and Calculation of Induced Voltages to an Underground Pipeline*, IYCE2011, Leiria, Portugal, 2011
- 3) Uglešić, Ivo, Milardić, Viktor, Milešević, Boško, *Surge Protection of Generators Directly Connected to a Medium Voltage Network*, ICLP, Cagliari, Italy, 2010
- 4) D. Mileta, B. Milešević, S. Sučić, *Application of Neural Network for Zagreb Load Forecasting*, 5<sup>th</sup> Dubrovnik Conference on SDEWES, Dubrovnik 2009
- 5) I. Uglešić, A. Xémard, V. Milardić, B. Milešević, B. Filipović-Grčić, I. Ivanković, *Reduction of Flashovers on 220 kV Double-Circuits Line*, IPST 2009, Kyoto, Japan
- 6) A. Xémard, S. Dennetière, I. Uglešić, V. Milardić, B. Milešević, P. Grand, F. Sauvegrain, P. Stevenin, M. Mesić, *The protection against lightning of an overhead line upgraded from 225 kV to 400kV*, IPST 2009, Kyoto

- **Ostali radovi u zbornicima skupova s recenzijom:**

- 1) A. Horvat, N. Mandić, B. Milešević, *Oblici nacionalnih tržišta pomoćnih usluga sustava i energije uravnoteženja*, 10. simpozij o vođenju EES-a, Zadar, 2012.
- 2) G. Levečić, S. Bojić, B. Milešević, *Metode ispitivanja klasičnih i metaloksidnih odvodnika prenapona*, Zbornik radova 10. savjetovanja HRO Cigré, Cavtat, 2011.
- 3) V. Milardić, I. Uglešić, B. Milešević, L. Delbianco, *Prenaponska zaštita generatora izravno spojenih na SN mrežu*, Zbornik radova 10. savjetovanja HRO Cigré, Cavtat, 2011.
- 4) I. Uglešić, I. Pavić, V. Milardić, B. Milešević, *Elektromagnetski utjecaj 2x110 kV dalekovoda na okolne telekomunikacijske mreže i vodove*, Zbornik radova 10. savjetovanja HRO Cigré, Cavtat, 2011.
- 5) B. Milešević, A. Pavić, I. Periša, D. Hrkec, *Postrojenje za sankcioniranje željezničke 25 kV, 50 Hz mreže kao izvor elektromagnetskih polja*, Zbornik radova 2. savjetovanja HRO CIRED, Umag, 2010.
- 6) I. Uglešić, B. Filipović-Grčić, V. Milardić, B. Milešević, M. Mandić, *Primjena odvodnika prenapona na dvostrukom DV 220 kV*, Zbornik radova 9. savjetovanja HRO Cigré, Cavtat, 2009.
- 7) I. Uglešić, M. Krepela, V. Milardić, B. Milešević, G. Gudelj, *Raspodjela potencijala uzemljivača vjetroparka*, Zbornik radova 9. savjetovanja HRO Cigré, Cavtat, 2009.
- 8) I. Uglešić, V. Milardić, B. Franc, B. Filipović-Grčić, B. Milešević, *Uspostava sustava za lociranje udara munja u RH*, Zbornik radova EIS 2009, Zagreb, 2009.
- 9) I. Uglešić, V. Milardić, B. Franc, B. Filipović-Grčić, B. Milešević, *Uspostava sustava za lociranje udara munja u Hrvatskoj*, Zbornik radova 9. savjetovanja HRO Cigré, Cavtat, 2009.

## CURRICULUM VITAE

Boško Milešević was born in Bosanska Krupa in 1984. He completed elementary school and grammar school in Zagreb. He graduated in 2008 at the University of Zagreb Faculty of electrical engineering and computing. Since 2008 he has been employed at the University of Zagreb Faculty of electrical engineering and computing Department of Energy and Power Systems.

The main topics of scientific research and professional work are electrical railway, electromagnetic compatibility, high voltage laboratory testing, high voltage engineering, power system transients, overvoltage protection and insulation coordination. He is the author and co-author of 17 scientific and technical papers published in international journals and at international and national scientific and technical meetings. He has participated in a large number of reports and studies applied in practice.

He participates in the lectures and laboratory exercises in the following courses within undergraduate and graduate study: „High Voltage Engineering“, „Overvoltage Protection“, „Electromagnetic Transients and Electromagnetic Compatibility“ and „Laboratory of Electrical Power Engineering 2“.

Since 2008 he has been participating in the research project „Compliance with environmental protection requirements in the high-voltage system” of the Croatian Ministry of Science, Education and Sports. He is a Deputy of Head of Quality in the High Voltage Laboratory at the Faculty of Electrical Engineering and Computing where he deals with high voltage testing.

He is a member of international vocation association IEEE and CIGRÉ. He was awarded by acknowledgement Josip Lončar for excellence in graduate study, and awards Hrvoje Požar for excellence in study and notable diploma thesis in the area of energetics. He is a member of the University of Zagreb Technical Council and of the Faculty of electrical engineering and computing Faculty Council. He was a president of the Student Union of the Faculty of electrical engineering and computing from 2011 to 2012. He is a president of the civic association Filipid which promote excellence within students.