

# Metoda za optimiranje potrošnje energije električnih vlakova

---

**Mandić, Milivoj**

**Doctoral thesis / Disertacija**

**2010**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:144227>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-12**



*Repository / Repozitorij:*

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repozitory](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Milivoj Mandić

**METODA ZA OPTIMIRANJE POTROŠNJE  
ENERGIJE ELEKTRIČNIH VLAKOVA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Zagreb, 2010.

Doktorska disertacija je izrađena u **Zavodu za visoki napon i energetiku Fakulteta elektrotehnike i računarstva u Zagrebu.**

Mentor: **prof. dr. sc. Ivo Uglešić, dipl. ing.**

Doktorska disertacija ima 121 stranicu.

Disertacija br.:

Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije:

1. Dr. sc. Ante Marušić, redoviti profesor  
Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva
2. Dr. sc. Ivo Uglešić, redoviti profesor  
Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva
3. Dr.sc. Srđan Žutobradić, naslovni docent  
Hrvatska energetska regulatorna agencija

Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije:

1. Dr. sc. Zlatko Maljković, redoviti profesor  
Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva
2. Dr. sc. Ivo Uglešić, redoviti profesor  
Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva
3. Dr.sc. Srđan Žutobradić, naslovni docent  
Hrvatska energetska regulatorna agencija
4. Dr. sc. Zdravko Hebel, redoviti profesor  
Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva
5. Dr. sc. Viktor Milardić, docent  
Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva

Datum obrane doktorske disertacije: 08. srpnja 2010. godine

Zahvale:

"Jedino stvarno bogatstvo je bogatstvo duše, ostala su dobra podložna velikim gubitcima"  
Hvala mojim roditeljima što su me tako odgojili.

Tko ima "zašto" zbog kojeg živi, može se nositi s gotovo bilo kojim "kako".  
Hvala Marijeti i Ivoni koje su bile velika inspiracija i podrška izradi disertacije.

Zahvaljujem prof. dr. sc. Ivi Uglešiću na povjerenju, poticaju, sugestijama i stručnom  
vođenju prilikom izrade disertacije.

Hvala i ostalim kolegama koji su na bilo koji način pomogli pri izradi ove disertacije.

## Sadržaj:

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
1.1 Cilj i postupci razrade.....	3
<b>2. PROBLEMATIKA ELEKTROVUČNOG SUSTAVA I STANJE TEHNOLOGIJE.....</b>	<b>4</b>
<b>3. POTROŠNJA ENERGIJE ELEKTRIČNIH VLAKOVA .....</b>	<b>8</b>
3.1 Model kretanja vlaka .....	9
3.2 Impedancija kontaktne mreže.....	15
3.2.1 Impedancija vučnog transformatora .....	20
3.3 Mjerenje impedancije kontaktne mreže.....	21
3.4 Usporedba proračuna i mjerenja.....	26
3.5 Parametarska analiza potrošnje energije električnih vlakova .....	30
3.5.1 Radijus krivine.....	31
3.5.2 Nagib pruge .....	33
3.5.3 Rekuperacija .....	35
3.5.4 Brzina.....	36
3.6 Potrošnja djelatne električne energije elektrovučne podstanice .....	38
3.6.1 Elektrovučni proračun napajanja elektrovučne podstanice .....	38
<b>4. OPTIMIRANJE POTROŠNJE ENERGIJE .....</b>	<b>40</b>
4.1 Princip i osnove numeričke optimizacije.....	41
4.1.1 Faze postupka optimizacije.....	44
4.2 Dijagram toka za numeričko optimiranje potrošnje energije električnih vlakova .....	46
4.3 Modificirana SQP-metoda.....	49
4.3.1 Rješavanje kvadratnog potproblema.....	50
4.3.2 Ažuriranje Hesseove matrice .....	53
4.3.3 Određivanje minimuma funkcije pada.....	54
4.3.4 Dijagram toka "modificirane SQP-metode" .....	57
4.4 Programska podrška simulacije električne vuče .....	58
4.5 Primjena numeričkog alata u optimizaciji.....	60
4.5.1 Praktična primjena .....	60
<b>5. OPTIMIRANJE UTROŠENE ENERGIJE ZA RAZLIČITE VRSTE VUČNIH VOZILA I VLAKOVA .....</b>	<b>63</b>
5.1 Optimizacija potrošnje djelatne energije putničkog vlaka.....	69

---

5.1.1	Rezultati optimizacije potrošnje energije lokomotive.....	69
5.1.2	Rezultati optimizacije utrošene djelatne energije elektromotornog vlaka .....	76
5.2	Optimizacija potrošnje djelatne energije teretnog vlaka.....	82
<b>6.</b>	<b>OPTIMIRANJE UTROŠENE ENERGIJE ZA NAPAJANJE ELEKTROVUČNE PODSTANICE .....</b>	<b>88</b>
<b>7.</b>	<b>ZAKLJUČAK .....</b>	<b>92</b>
<b>8.</b>	<b>LITERATURA .....</b>	<b>96</b>
<b>9.</b>	<b>POPIS OZNAKA, KRATICA, TABLICA I SLIKA.....</b>	<b>101</b>
<b>10.</b>	<b>PRILOZI .....</b>	<b>106</b>
<b>10.</b>	<b>SAŽETAK .....</b>	<b>117</b>
<b>11.</b>	<b>SUMMARY .....</b>	<b>118</b>
<b>12.</b>	<b>ŽIVOTOPIS .....</b>	<b>120</b>
<b>13.</b>	<b>BIOGRAPHY .....</b>	<b>121</b>

## 1. Uvod

Učinkovito iskorištavanje električne energije predstavlja trend razvoja u novijem vremenu, širom svijeta. Ispunjenje toga cilja omogućuju napredne tehnologije vozila i organizacije prijevoza, a gotovo najvažniji faktor predstavlja optimalno iskorištavanje energije u željezničkim prijevoznim sredstvima.

Potrošnja energije električnih vlakova i ostalih postrojenja električne željeznice nastoji se optimirati u cilju racionalnog iskorištavanja električne energije i odgovarajućih ušteda. U usporedbi s osobnim prijevozom električne željeznice trebaju manje energije emitirajući pritom manje stakleničkih plinova, te imaju od tri do pet puta veću energetska učinkovitost.

Nakon procjene da će potrošnja energije u prometu rasti brže nego u ostalim sektorima, za cilj prometne i energetske politike u svijetu postavljeno je preusmjeravanje dijela cestovnog prometa na željeznički te elektrificiranje željezničke mreže i osiguravanje infrastrukture za kombinirani transport.

Željeznički je promet energetski učinkovit i ekološki prihvatljiv, ali zahtijeva i znatna proširenja kapaciteta za funkcioniranje u velikim razmjerima.

Činjenica je da se do sada nije pretjerano vodilo računa o štednji energije za vuču vlakova. S obzirom na nove uvjete poslovanja, potrebno je smanjivati troškove vuče vlakova. Između ostalog, treba učiniti znatan pomak u cilju smanjenja utroška energije za vuču vlakova, jer je to jedna od najznačajnijih stavki ukupnih troškova vuče vlakova.

Ušteda energije za vuču električnih vlakova treba biti svakodnevni zadatak svih zaposlenika, bilo na voditeljskoj, bilo na izvršnoj razini, ali i briga onih koji te troškove energije u konačnici plaćaju. Također, uštedu energije moguće je ostvariti tehnološki naprednim vučnim vozilima i obučenošću strojnog osoblja, njihovim poznavanjem vučnih osobina vozila, dobrim poznavanjem pruge, uvjeta vožnje itd. Rezultati koje su uštedama energije za vuču vlakova ostvarile neke željezničke uprave pokazuju isplativost uloženog truda.

Naime, Europska komisija financijski podupire projekte koji se odvijaju pod okriljem Internacionalne profesionalne organizacije za željezničko područje (Union Internationale des Chemins de fer - UIC).

UIC je još 2001. godine donio preporuke za izradu baze podataka o električnoj energiji za električnu vuču. Konstatirano je da baza podataka o električnoj energiji za električnu vuču može pružiti pouzdane informacije potrebne za planiranje i donošenje odluka u procesima na željeznici. Prema podacima prikupljenim od europskih članica UIC-a, u 2005. godini željeznice u Europi utrošile su 43.000 GWh električne energije.

Pod okriljem Europske unije 2006. godine započeo je projekt pod nazivom "Railenergy: Energetska učinkovitost, tehnologija za vozni park, infrastrukturu i vlak", koji sufinancira Europska komisija u sklopu 6. okvirnog programa za istraživanje i razvoj.



Cilj je projekta identificiranje neiskorištenog potencijala te razvijanje strategije za iskorištenje tog potencijala i smanjenje specifične potrošnje energije, po osobi (putniku) ili po tonkilometru, na elektrificiranim željeznicama do 6 %, do 2020. godine, uz istovremeno udvostručenje prijevoznog volumena. Smanjenjem specifične potrošnje smanjit će se i emisija stakleničkih plinova.

Štednja električne energije za vuču vlakova treba biti stalan proces. Kratkoročne uštede mogu se postići boljom organizacijom prijevoza, boljim gospodarenjem električnim vučnim vozilima, kvalitetnijim održavanjem te stimulacijom strojovođa za što ekonomičnije upravljanje vožnjom vlakova. Dugoročne se uštede mogu ostvariti uvođenjem u eksploataciju modernih vučnih vozila i unapređenjem infrastrukture.

Do sada je glavni pristup u uštedi energije elektrovučnog sustava predstavljalo energetske učinkovito oblikovanje lokomotiva i vagona, zatim djelotvorno smanjenje otpora pri kretanju vlaka i pravilno održavanje voznog parka i tračnica.

Sve veći porast cijene energije, sve veća potrošnja i ponekad ugrožene isporuke energije dovode do potrebe i drugih pristupa uštedi energije, kao što je npr. energetske učinkovito kretanje vlaka, na osnovi analize potrošnje energije.

Također se nameće potreba mjerenja potrošene električne energije pojedinog vučnog vozila, ugradnjom sustava za registriranje i očitavanje potrošene i vraćene energije vučnog vozila u ormar s upravljačkim komponentama.

Način ugradnje propisuje europska norma (EN) [1], što bi svakako trebalo pridonijeti racionalnijoj potrošnji energije. Ugradnja brojila električne energije na željeznička vozila omogućava preciznu bilancu energetske potrošnje pojedinog vozila, a također može poslužiti za identifikaciju i procjenu mjera štednje energije.

Do kraja 2007. godine u Europi brojila ugrađena u vozni park imale su željeznice u Njemačkoj, Španjolskoj, Sloveniji, Danskoj, Norveškoj i Švedskoj.

U većini željezničkih uprava, još se uvijek potrošena energija za vuču vlakova izražava brojem ostvarenih bruto tonskih kilometara (brttkm). Međutim, preciznija mjerenja potrošnje energije pokazuju da je taj način prilično nepouzdan. Mjerenja, također, pokazuju da je specifična potrošnja energije na putničkim vlakovima veća nego na teretnim vlakovima.

Ujedno su brzine putničkih vlakova veće od brzina teretnih vlakova, te putnički vlakovi često se zaustavljaju, ponovno pokreću i ubrzavaju. Upravo su zato potrebna precizna mjerenja utrošene energije. Jedna od mogućnosti za to je ugradnja brojila u vučna vozila.

Na temelju analize dobivenih podataka može se odlučiti kakvu vrstu vlaka upotrijebiti na određenoj relaciji. Dakle, potrebno je izmjeriti koliko se energije utroši za prijevoz jednoga putnika na neku određenu udaljenost.

U EN normi [2], koja je namijenjena za opskrbu električnom energijom elektrovučnog sustava, dani su tehnički kriteriji za koordinaciju između napajanja podstanica i željezničkih vozila radi postizanja interoperabilnosti.

Navedene su referentne veličine napona, struja i udjela viših harmonika koje ne bi smjele biti prekoračene u kontaktnoj mreži, a ujedno mogu poslužiti za testno mjerenje energetske karakteristika vučnog vozila pri vuči putničkog ili teretnog vlaka.

Iz iskustva nekih željezničkih uprava može se zaključiti da su klasični vlakovi s vagonima i lokomotivom neisplativi ako se vlakom ne vozi velik broj putnika, jer kada se vlastita masa vlaka podijeli na broj sjedala s putnicima, dobije se nepovoljan rezultat glede potrošnje energije. Za lake elektromotorne vlakove (EMV), čija se vlastita masa razdjeli na u pravilu uvijek popunjena sjedala, dobiju se puno bolji rezultati.

Dakle, EMV-i imaju znatno bolje odnose vlastite mase prema broju popunjenih putničkih sjedala od klasičnih vlakova vučenih lokomotivom.

Potrošnja energije predstavlja jednu trećinu svih troškova u životnoj dobi svakog EMV-a. Štednja energije i mogućnosti smanjenja potrošnje utječu na odluku pri nabavi novih vučnih vozila. Upravo zato brojila ugrađena na vučna vozila imaju značajnu ulogu jer omogućavaju provedbu potrebnih analiza. Brojilima se također može mjeriti električna energija koja se rekuperativnim kočenjem vraća u mrežu.

Dobiveni rezultati se mogu iskoristiti pri izradi programa obuke strojnoga osoblja. Potrebno je predvidjeti mogućnost stimuliranja strojnoga osoblja, jer se štedljivom vožnjom može uštedjeti oko 10 % električne energije. Može se očekivati daljnji razvoj tehnologije u regulaciji vuče vlakova, koja će omogućiti velike koristi od uštede energije.

Razvojem računala programi za simulaciju kretanja vlaka često su prihvaćeni kao standardno inženjersko sredstvo u analizi potrošnje električne energije, pri čemu treba uzeti u obzir ovisnost potrošnje energije o raznim parametrima, kao što su podaci o vlaku (djelotvornost vučnih komponenata, masa vlaka, aerodinamika, konfiguracija vlaka, brzina, udaljenost između zaustavljanja, vozni red), podaci o pruži (topografija, zavoji i sl.), utjecaj načina vožnje, utjecaj prometne situacije (neplanska zaustavljanja i sl.) [3], [4].

## 1.1 Cilj i postupci razrade

Optimiranje potrošnje energije predstavlja višedimenzionalni nelinearni problem s ograničenjima, pa će se u disertaciji istraživati prikladna metoda za tu vrstu problema. Cilj je disertacije razvoj metode optimizacije potrošnje električne energije za vuču vlakova.

Pri tome će se koristiti model za simulaciju kretanja vlaka na koji će se primijeniti metoda optimizacije potrošnje električne energije. Model za simulaciju kretanja vlaka usporedit će se s rezultatima mjerenja.

Nakon toga prikladnom će se metodom optimizacije nelinearnih više-dimenzionalnih problema, uz zadana ograničenja, provesti numerička optimizacija potrošnje energije vlaka. Glavni kriterij optimizacije bit će zadovoljavanje voznog reda.

Istražit će se uspješnost primjene razvijene metode na različite vrste vučnih vozila i vlakova, kao i željezničkih pruga i dati analiza rezultata optimizacije utrošene djelatne energije električnih vlakova.

Usporedit će se rezultati proračuna za utrošenu energiju elektrovučne podstanice, u određenom vremenu, s optimizacijskim postupkom i bez njega.

Na osnovi rezultata utvrdit će se uvjeti pogona (za razne vrste vučnih vozila, elektrificiranih pruga i režime vožnje) kod kojih je moguća djelotvorna primjena razvijene metode.

## 2. Problematika elektrovučnog sustava i stanje tehnologije

U ovom poglavlju navest će se faktori koji mogu imati utjecaja na potrošnju energije u elektrovučnom sustavu.

Sustav električne vuče složen je i specifičan električni sustav koji čine pružna vozila kao teret vrlo dinamičnog svojstva, tračnice, napojna infrastruktura (elektrovučne podstanice i kontaktna mreža) i sustav za signalizaciju.

Telekomunikacijska oprema (npr. telefon, radio, TV, računalne mreže) je također dio toga sustava. Svi ti podsustavi mogu se podijeliti u dvije klase:

- podsustave koji rade na visokom naponu, kao što su elektrovučne podstanice, napojni krugovi te pružna vozila
- podsustave koji rade na niskom naponu, i vrlo su osjetljivi. Ta klasa obuhvaća željezničke signalne instalacije unutar sustava te telekomunikacije u vanjskom sustavu.

Nekompatibilnosti između vozila i drugih podsustava željezničke mreže mogu ozbiljno utjecati na operativnu pouzdanost i sigurnost u željezničkom prijevozu. Nekompatibilnost može imati za posljedicu kašnjenja vlakova, a također umanjuje sigurnost putnika i osoblja.

Stoga je važno da budu ispunjeni sljedeći uvjeti u pogonu:

1. kompatibilnost vozila s napojnim sustavom
2. kompatibilnost vozila sa signalnim sustavom
3. kompatibilnost vozila s okolišem.

Elektrovučna podstanica (EVP) stabilno je postrojenje preko kojeg se kontaktna mreža napaja električnom energijom. U njoj se visoki napon pretvara u napon koji odgovara sustavu elektrifikacije pruge.

Uloga je sustava električne vuče da lokomotivama, pouzdano i ekonomično, isporuči, potrebnu energiju. Dva se glavna problema javljaju u tom sustavu, to su pad napona u kontaktnoj mreži i sadržaj viših harmonika u struji vuče.

Da bi se održao trajno dopušteni minimalni napon u kontaktnoj mreži, potrebno je smanjiti duljinu napojnog voda pojedinog EVP-a, tj. udaljenost između njih.

Vlakovi ujedno uzrokuju i nesimetrično opterećenje jer su napajani preko jednofaznog transformatora u elektrovučnim podstanicama, koji je na trofaznu mrežu elektroenergetskog sustava povezan na dvije faze.

Kvaliteta električne energije postala je vrlo važna osobina za potrošače na tržištu. U mnogim zemljama zadane su granične vrijednosti naponskih i strujnih nesimetrija. Glavne su im odrednice američka norma za kvalitetu električne energije [5] i europska norma [6].

Za moderna vučna vozila u sustavima električne vuče 25 kV, 50 Hz postavljaju se zahtjevi za smanjene potrošnje jalove energije i smanjenje sadržaja viših harmonika u struji vuče.

Povećanje složenosti sustava električne vuče zahtijeva proučavanje i uvođenje novih tehnika pri optimiranju sustava, da bi se zadovoljili propisi koje je donio Europski odbor za standardizaciju u elektrotehnici (CENELEC), koje su sadržane u hrvatskoj normi HRN EN 50121 [7].

Ta problematika također zahtijeva proučavanje i uvođenje simulacijskih tehnika s ciljem razvoja elektromagnetske kompatibilnosti u cijelom elektroenergetskom sustavu.

Poznato je da nelinearna trošila u sustavima električne vuče opterećuju mrežu strujom nesinusoidalnog valnog oblika pri čemu se smanjuje kvaliteta električne energije.

Tri ključna parametra utječu na ponašanje sustava električne vuče [8], [9]:

- pad napona kontaktne mreže,
- prenaponi u mreži uzrokovani injektiranim višim harmonicima u kontaktnu mrežu,
- gubitak srednje vrijednosti napona kontaktne mreže.

Nizak napon pojavljuje se na krajevima opterećene kontaktne mreže s dugačkim sekcijama, što rezultira povećanim gubicima u mreži.

Poseban su problem harmonici u struji vuče koji se injektiraju u mrežu pa time dolazi do rezonancije duž kontaktne mreže što uzrokuje prenapone pri čemu maksimalna vrijednost napona na pantografu može značajno premašiti nazivne vrijednosti.

To može dovesti do preranog otkazivanja opreme koja se upotrebljava u sustavima električne vuče [8].

Treći problem nastaje zbog komutacije u ispravljačima pri čemu se javljaju znatni propadi u ulaznom naponu, što rezultira nižom (ispravljenom) srednjom vrijednošću napona. Za idealni sinusoidalni valni oblik faktor oblika iznosi 1,11, a za izobličeni valni oblik napona mreže u sustavima električne vuče faktor oblika kreće se oko 1,25.

Razvoj energetske elektronike i sustava mikroprocesorskog upravljanja omogućio je da se danas velik broj novih vučnih vozila izvodi s asinkronim motorima umjesto s istosmjernim motorima s neovisnom uzbudom, koji su napajani preko tiristorskih ispravljača. Jednofazni izmjenični sustav nazivne frekvencije 50 Hz pretvara se u istosmjerni, a zatim u trofazni izmjenični sustav promjenjive frekvencije, koji napaja asinkrone vučne motore [10].

Regulacija napona na pantografu lokomotive omogućena je i tiristorski uklopljivom kondenzatorskom baterijom (eng. TCS - *Thyristor Switched Capacitor*). Njezin je nedostatak što ne omogućuje kontinuiranu, već skokovitu promjenu jalove snage.

Na osnovi simulacijskih rezultata dolazi se do zaključka da ovaj uređaj daje zavidne rezultate u kompenzaciji jalove snage, smanjenju naponskih nesimetrija, kao i poboljšanju faktora oblika napona kontaktne mreže [11].

Moderne lokomotive sadržavaju u sebi PWM pretvarače (eng. *Pulse Width Modulation*) s modulacijom širine impulsa, koji proizvode više harmonike, a oni se zatim šire kontaktnom i prijenosnom mrežom. Harmonici se javljaju kad ne postoji linearna veza između napona i struje kroz neki uređaj. Serijska i paralelna rezonantna frekvencija u elektrovučnom sustavu pokazala se kao značajan faktor koji utječe na iznos harmonika koji se šire prema prijenosnoj mreži [12].

Usporedba rezultata mjerenja impedancije harmonika u 25-kilovoltnom izmjeničnom elektrovučnom sustavu s rezultatima dobivenima simulacijom dana je u [13].

Rezultati stohastičke analize viših harmonika koje u mrežu injektiraju brzi prigradski vlakovi i utjecaj filtera za njihovu kompenzaciju prikazani su u [14].

U elektrovučnom sustavu udio harmonika ne ovisi samo o karakteristikama tereta, već i o položaju, vrsti vlaka te o režimu vožnje. Zato se sve više prelazi na probabilističke metode harmonijske analize u tom sustavu. Prikaz ovisnosti udjela harmonika o broju vlakova na pruži s ugrađenim filtrima i bez njih dan je u [15].

Kompenzacijski sustav, karakterističan za 25-kilovoltni izmjenični elektrovučni sustav, sastavljen od aktivnog filtera, čija je uloga da ograniči iznose viših harmonika u naponu kontaktne mreže i poboljša faktor oblika napona, i pasivnog filtera, za prigušenje rezonantnog harmonika frekvencije 1,3 kHz, prikazan je u [16]. Dani su simulacijski i eksperimentalni rezultati pri ugradnji tog hibridnog kompenzacijskog sustava.

Metoda za procjenu nesimetrije u prijenosnoj mreži uzrokovane prisutnošću harmonijskog izobličenja prikazana je u [17].

Viši harmonici ponekad mogu dovesti do nepravilnog rada zaštitnih releja. Simulacijom kvarova s pomoću numeričkog alata Matlab/Simulink, u različitim točkama kontaktne mreže prikazan je valni oblik struje kvara u tim točkama [18].

Model kombiniranog (sastavljenog od zavojnica i kondenzatora) LC-kompensatora za poboljšanje faktora snage nelinearnog trošila prikazan je u [19]. Vrijednosti parametara kondenzatora i zavojnice ograničeni su iznosima koji bi mogli dovesti do rezonancije. Rezultati usporedbe LC-kompensatora s kondenzatorskom baterijom pokazuju učinkovitija svojstva kombiniranog kompensatora u poboljšanju faktora snage [20]. Optimizacijska metoda za određivanje parametara LC-kompensatora zasnovana na minimiziranju troškova prikazana je u [21].

Princip rada i eksperimentalni rezultati višenamjenskog kompensatora u elektrovučnom sustavu prikazani su u [22]. Iznos kompenzirane snage prilagođen je prema vrsti tereta.

Vremenskim planiranjem voznog reda vlakova može se utjecati na smanjenje harmonijskog izobličenja u kontaktnoj mreži, poboljšati faktor snage i smanjiti struja viših harmonika u EVP-u [23]. S pomoću genetskog algoritma napravljen je optimalni vozni red s minimalnim udjelom viših harmonika. Također je pokazano kako se planiranje voznog reda može primijeniti na smanjenje harmonika te da je genetski algoritam kao metoda optimiranja prikladan za tu problematiku.

Model za proračun izobličenja napona i struje za nove vrlo brze lokomotive (oznake E404P) s PWM-pretvaračima prikazan je u [24], [25]. Rezultati simulacije uspoređeni su s mjerenim rezultatima u "ispitnoj prostoriji".

Jedan od poprečnih uređaja kompenzacije jalove snage koji se upotrebljava u elektrovučnom sustavu poznat je pod nazivom *statički var kompenzator* (SVC). To je statički generator jalove snage u poprečnom spoju koji se upotrebljava za razmjenu kapacitivne ili induktivne struje s elektrovučnim sustavom kako bi se održavao ili upravljalo naponom čvorišta [26], [27].

SVC se općenito odnosi na tiristorski upravljive ili tiristorski uklopive kondenzatore ili neku od kombinacija kondenzatora i prigušnica.

Kratki pregled i buduće smjernice u modeliranju pojedinih elemenata EES-a, pri analizi harmonika dani su u [28].

U [29] autori opisuju ponašanje elektrovuče na željeznici koja predstavlja specifičnog potrošača elektroenergetskog sustava. Prezentiran je algoritam za simulaciju kretanja vlakova kojim se određuje najprije mehanička, a potom i električna snaga potrebna za vuču.

Rezultati dobiveni algoritmom za simulaciju kretanja vlaka i elektrovučnim proračunom uspoređeni su s izmjerenim rezultatima pa je pokazano da se izračunate struje i naponi relativno dobro podudaraju s mjerenim strujama napojnih vodova i napona u elektrovučnoj podstanici.

Na osnovi algoritma kretanja vlaka provedena je analiza utjecajnih faktora na potrošnju energije elektromotornog vlaka. Rezultati pokazuju kako se uz pomoć rekuperativnog kočenja, tj. povrata električne energije u mrežu može značajno smanjiti potrošnja energije elektromotornog vlaka, u nekim slučajevima i do 30 %, što naravno zavisi od profila pruge.

Također je pokazano kako se optimiranjem voznih karakteristika vlaka (brzina i akceleracija) na pojedinoj dionici trase može uštedjeti na potrošnji energije za vuču vlakova, a da se zadovolji vozni red. Ušteda prvenstveno ovisi o masi vlaka i o profilu pruge.

Na osnovi tih zaključaka došlo se na ideju razvoja metodologije za optimiranje potrošnje energije električnih vlakova.

### 3. Potrošnja energije električnih vlakova

Električna vuča je specifični potrošač elektroenergetskog sustava zbog svog nesimetričnog (priključenje na dvije faze prijenosnog sustava) i dinamičkog karaktera. Zbog kontinuiranog trenda rasta cijene električne energije problemi ekonomične i pouzdane upotrebe električne vuče postaju sve veći izazov za korisnike i proizvođače električnih željeznica. Optimalnom potrošnjom energije električnih vlakova nastoje se ostvariti uštede i racionalizacija sveukupnog poslovanja uz uvjet djelotvornog i pravovremenog prometa vlakova.

Glavni pristup uštedi energije u željezničkom prometu ovisi o energetske uspješnoj konstrukciji lokomotiva, uspješnom reduciranju otpora pri kretanju vlaka kao i o odgovarajućem održavanju voznog parka i tračnica [39].

Zbog porasta cijene energije i sve većeg razvoja željezničkog prometa, sve više se pažnje posvećuje racionalnoj potrošnji električne energije električnih vlakova. Parametri koji utječu na potrošnju energije električnog vlaka su:

- vučne karakteristike vlaka (vučni pasoš),
- kočione karakteristike vlaka,
- faktor snage,
- masa vlaka,
- snaga pomoćnih pogona (rasvjeta, hlađenje motora, grijanje vagona i sl.),
- profil pruge (radijus krivine i nagib),
- maksimalno dopuštena brzina na nekoj dionici,
- rekuperacija (predviđeno vraćanje snage u kontaktnu mrežu pri kočenju),
- grafikon voznog reda.

Računske simulacije kretanja vlakova djelotvorno su i ekonomično sredstvo kojim se može odrediti potrošnja energije vlaka, uz određene ulazne parametre.

U nastavku ovog poglavlja najprije je dan model simulacije kretanja vlaka, a zatim model impedancije kontaktne mreže i jednofaznog vučnog transformatora u elektrovučnoj podstanici, potrebni za elektrovučni proračun.

Nakon toga je prikazana usporedba rezultata simulacija i mjerenja u elektrovučnom sustavu 25 kV, 50 Hz.

Također je dana parametarska analiza utjecajnih faktora na potrošnju energije za jednu vrstu vlaka i vremenski dvosatni prikaz utrošene djelatne energije jedne elektrovučne podstanice.

### 3.1 Model kretanja vlaka

Pri kretanju vozila prugom pojavljuju se različiti otpori vožnje koji se protive tom kretanju. Da bi otpori bili svladani, vučno vozilo mora na obodu pogonskih kotača ostvariti vučnu silu jednaku zbroju svih otpora. Otpori vožnje su promjenjivi, a ovisno o režimu vožnje i profilu pruge dijele se na *stalne otpore*, *povremene otpore* i *otpore ubrzavanja*.

*Stalni otpori* pojavljuju se uvijek pri kretanju vlaka i za njihovo izračunavanje upotrebljavaju se iskustveni izrazi koji mogu biti različiti.

U modelu koji je predložen u nastavku usvojen je izraz za specifični otpor po Strahlu [30]. Specifični otpori dobivaju se svođenjem otpora na jedinicu mase, te se posebno računaju za vučno vozilo, a posebno za vlak.

*Povremeni otpori* su otpori koji se pojavljuju ovisno o profilu pruge, a to su:

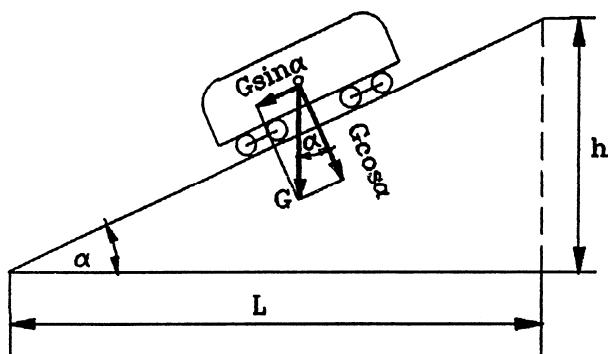
- otpori krivine
- otpori uspona.

U proračunu otpora krivine upotrebljavaju se eksperimentalne formule u kojima uglavnom egzistira polumjer zavoja kao najutjecajnija veličina, pa je za izračunavanje specifičnog otpora krivine u simulaciji kretanja upotrijebljen sljedeći izraz:

$$f_z = \frac{8000}{R} \cdot 10^{-3}, \quad (3.1.1)$$

gdje je:  $f_z$  - specifični otpor krivine izražen u [N/kg],  
 $R$  - radijus krivine izražen u [m].

Otpor uspona, čiji je nagib pod kutom  $\alpha$ , određuje se s pomoću sile  $F_i$  koja je paralelna tračnicama (slika 3.1.), a iznosi:  $F_i = \pm G \cdot \sin \alpha$ , [N].



Slika 3.1. Prikaz sila na usponu

Taj otpor mora biti svladan da bi se vozilo moglo kretati uz uspon. U slučaju kretanja niz uspon taj otpor ima negativan predznak i djeluje kao vučna sila.

Izraz za specifični otpor uspona upotrijebljen u algoritmu je:



$$f_i = \pm \frac{i}{100}, \quad (3.1.2)$$

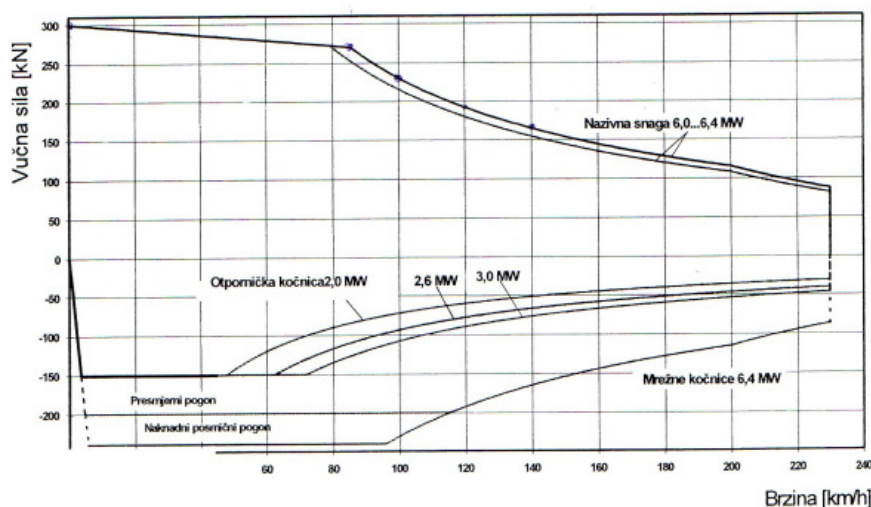
gdje je:  $f_i$  - specifični otpor na usponu izražen u [N/kg],  
 $i$  - uspon pruge izražen u [%].

Otpor ubrzavanja pojavljuje se pri svakoj promjeni brzine, a specifični otpor ubrzanja upotrijebljen u algoritmu je:

$$f_a = (1 + \varepsilon) \cdot a, \quad (3.1.3)$$

gdje je:  $f_a$  - specifični otpor ubrzanja izražen u [N/kg],  
 $\varepsilon$  - koeficijent rotirajućih masa (0,06 - 0,08),  
 $a$  - ubrzanje vlaka izraženo u [m/s<sup>2</sup>].

Nakon određivanja otpora koji se pojavljuju pri kretanju pojedinog vlaka potrebno je utvrditi posjeduje li elektrovučno vozilo dovoljnu vučnu silu za svladavanje otpora. U tu se svrhu provjerava tzv. vučni pasoš električnog vozila, koji po svojoj konturi predstavlja granične mogućnosti vučnog vozila. Grafički se prikazuje kao ovisnost vučne sile o brzini. Vučni pasoš daje osnovno obilježje vučnih mogućnosti i popratni je tehnički dokument svakog vučnog vozila. Na slici 3.2. prikazan je vučni pasoš asinkrone lokomotive.



Slika 3.2. Vučni pasoš asinkrone lokomotive [33]

Pri malim brzinama vučna sila može dostići veoma velike vrijednosti i premašiti silu adhezije, te će nastupiti proklizavanje i zbog toga postoji ograničenje vučne sile pri početnim brzinama.

Da ne bi došlo do proklizavanja pogonskih kotača po tračnicama, mora biti ispunjen slijedeći uvjet [31]:

$$F_v \leq \xi \cdot G_a = F_{at}, \quad (3.1.4)$$

gdje je:  $F_v$  - vučna sila izražena u [N],  
 $F_{at}$  - sila adhezije izražena u [N],  
 $G_a$  - adhezijska težina (težina vučnog vozila) izražena u [N],  
 $\xi$  - koeficijent adhezije [32].

Iz izraza (3.1.4) može se zaključiti da vučna sila mora biti manja ili jednaka sili adhezije  $F_{at}$ .

Koeficijent adhezije, osim o stanju tračnica, ovisi i o stanju kotača. Ako je kotač oštećen, osovinski pritisak varira pa se  $\xi$  smanjuje. Također postoji njegova ovisnost o brzini dobivena eksperimentalno kao:

$$\xi = \frac{\xi_0}{1 + 0,015 \cdot v [km/h]}, \quad (3.1.5)$$

gdje je:  $\xi_0$  - statički koeficijent adhezije za koji se uzima:

$$\begin{aligned} \xi_0 = 0.38 & \quad \text{za suhe tračnice,} \\ \xi_0 = 0.25 & \quad \text{za mokre tračnice,} \\ \xi_0 = 0.18 & \quad \text{za masne tračnice.} \end{aligned}$$

Izraz (3.1.5) pokazuje da se povećanjem brzine smanjuje koeficijent adhezije. Ograničeni koeficijent adhezije ograničava maksimalnu snagu, maksimalno ubrzanje i maksimalni uspon (nagib) koji se može savladati pa je maksimalna vučna snaga u zavisnosti od brzine  $v$  dana slijedećom formulom:

$$P_{vmax} = F_v \cdot v = \xi \cdot G_a \cdot v = \frac{\xi_0}{1 + 0,015 \cdot v [km/h]} \cdot G_a \cdot v, \quad (3.1.6)$$

Na osnovi izraza (3.1.6) može se zaključiti da je  $P_{vmax}$  ograničena zbog adhezije. Ovo znači da u laganu lokomotivu nema smisla ugrađivati motore velike instalirane snage. Zbog male adhezije pri velikim brzinama ne može se iskoristiti sva instalirana snaga vučnog motora.

Maksimalno ubrzanje vlaka dano je slijedećim izrazom iz [34]:

$$a_{max} = \frac{1000 \cdot \xi \cdot G_a}{102 \cdot (1 + \varepsilon) \cdot (G_a + G_v)}, \quad (3.1.7)$$

gdje je:  $G_v$  - težina tereta izražena u [N];  
 $(G_a + G_v)$  - ukupna težina vlaka izražena u [N].

Izraz (3.1.7) pokazuje da je maksimalno ubrzanje vlaka proporcionalno težini vučnog vozila, a obrnuto proporcionalno ukupnoj težini vlaka.

Ako uzmemo da ukupna težina elektromotornog vlaka ( $G_a + G_v$ ) iznosi 1800 [kN], a težina vučnog vozila ( $G_a$ ) 670 [kN], dobije se da maksimalno ubrzanje za elektromotorni vlak iznosi oko 1,14 [m/s<sup>2</sup>].

Isto tako se dobije da maksimalno ubrzanje teretnih vlakova tipično iznosi oko 0,5 [m/s<sup>2</sup>].

Maksimalno ubrzanje također je ograničeno zbog udobnosti putnika, pa je u simulaciji kretanja vlaka prihvaćeno maksimalno ubrzanje od 0,4 do 0,6 [m/s<sup>2</sup>] za putničke vlakove i od 0,2 do 0,4 [m/s<sup>2</sup>] za teretne vlakove [35].

Osim spomenutih graničnih crta u vučnom pasošu zbog sile adhezije, pojedina vučna vozila s elektrovučnim motorima često imaju ograničenu vučnu silu po termičkom kriteriju (granica dopuštenog zagrijavanja elektromotora).

Tako se definira trajna vučna sila ( $F_{tr}$ ) koju vučno vozilo može trajno ostvarivati, satna vučna sila ( $F_h$ ) kojom se vučno vozilo smije opteretiti najdulje jedan sat, a postoje i kraća vremenska ograničenja (30 minuta, 15 minuta, itd.). Potreba za povećanim vučnim silama pojavljuje se pri pokretanju vlaka, većem ubrzanju i na većim usponima.

Unutar površine vučnog pasoša, čija je kontura dana navedenim graničnim crtama, može se ostvariti velik broj radnih točaka (kombinacija vučne sile i brzine vožnje). Broj mogućih radnih točaka u vučnom pasošu ovisi o broju stupnjeva regulacije vučne sile i brzine što ih vučno vozilo ima ugrađeno.

Vučni pasoš električnih vozila razlikuje se od ostalih vučnih vozila po velikom broju stupnjeva regulacije, što omogućuje velik izbor radnih točaka.

Električna vozila također često omogućuju znatno preopterećenje vučnih motora u kratkotrajnim razdobljima, čime se još više proširuje područje izbora radnih točaka u vučnom pasošu.

Razlika između vučnih vozila namijenjenih za vuču teških teretnih kompozicija i onih namijenjenih za vuču putničkih vlakova u tome je što vozila za vuču teretnih kompozicija imaju veće vučne sile i manje maksimalne brzine, a vučna vozila za brze putničke vlakove imaju manje vučne sile, ali veće maksimalne brzine.

Poznavajući potrebnu vučnu silu za ostvarenje kretanja vlaka moguće je izračunati mehaničku snagu na obodu kotača prema izrazu (3.1.8):

$$P_m = F_v \cdot v, \quad (3.1.8)$$

gdje je:  $P_m$  - mehanička snaga izražena u [MW],

$F_v$  - vučna sila izražena u [kN],

$v$  - brzina izražena u [m/s].

Za izračunavanje djelatne snage koju vlak uzima iz mreže potrebno je poznavati faktor korisnosti ( $\eta$ ) vučnog vozila koji ovisi o brzini kretanja vlaka i naponu mreže. U slučaju da nije poznata krivulja promjene faktora  $\eta$  može se pretpostaviti neka konstantna vrijednost, npr. 0,8 ili slična.

Potrebno je još poznavati snagu pomoćnih pogona vlaka (hlađenje motora, grijanje vagona i sl.). Ta se snaga mijenja po mjesecima [36], a u simulacijama se može uzeti neka konstantna vrijednost snage pomoćnih pogona, npr. 250 kW za elektromotorni vlak.

Električna djelatna snaga koju vlak uzima iz mreže može se odrediti prema izrazu koji slijedi:

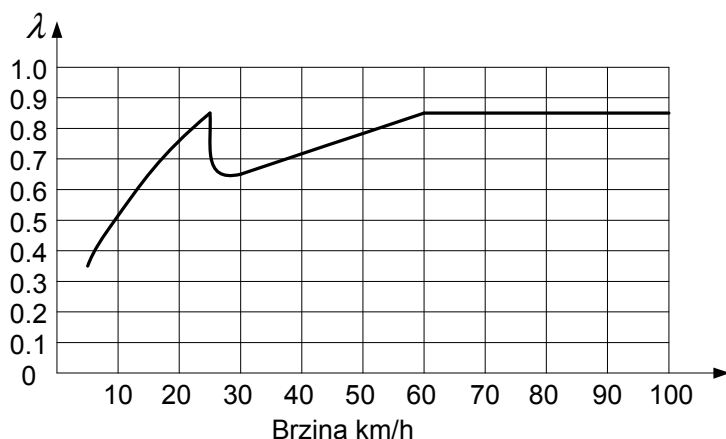
$$P_{el} = \frac{P_m}{\eta} + P_{pom}, \quad (3.1.9)$$

gdje je:  $P_{el}$  - električna djelatna snaga izražena u [MW],  
 $P_{pom}$  - snaga pomoćnih pogona izražena u [MW],  
 $\eta$  - faktor korisnosti vučnog vozila,

U slučaju izmjeničnog napajanja osim djelatne snage vlak uzima i jalovu snagu iz mreže. Jalova snaga računa se prema izrazu (3.1.10):

$$Q_{el} = P_{el} \cdot \tan(\arccos(\lambda)), \quad (3.1.10)$$

Faktor snage  $\lambda$  ovisan je o brzini kretanja vozila, a izgled te krivulje za elektromotorni vlak prikazan je na slici 3.3.  $\cos(\varphi)$  predstavlja faktor snage koji se odnosi samo na osnovni harmonik, a  $\lambda$  faktor uključuje i udjele viših harmonika koji su prisutni u struji vuče.



Slika 3.3. Krivulja faktora snage  $\lambda$  elektromotornoga vlaka

Poznavanje faktora  $\lambda$  naročito je važno u prometu s čestim pokretanjem i zaustavljanjem jer je pri malim brzinama faktor snage manji.

Za moderna vučna vozila u sustavima električne vuče 25 kV, 50 Hz postavljaju se zahtjevi za smanjenu potrošnju jalove energije i smanjen sadržaj viših harmonika u struji vuče. Moderne asinkrone lokomotive sadržavaju u sebi PWM-pretvarače koji omogućuju da faktor  $\lambda$  bude iznad 0,95 pa se potrošnja jalove energije može zanemariti za problematiku disertacije [37].

Potrošnja električne energije vlaka u vremenskom intervalu  $t$  računa se prema sljedećem izrazu:

$$E = \sum_{i=1}^n P_i \cdot \Delta t, \quad (3.1.11)$$

gdje je:  $\Delta t$  - korak proračuna izražen u [s],  
 $P_i$  - djelatna snaga za svaki korak proračuna izražena u [MW],  
 $n$  - broj diskretiziranih vremenskih podintervala ( $t/\Delta t$ ).

Ako se u izraz (3.1.9) uvrste prethodno navedeni izrazi za pojedine veličine dobije se ovisnost električne djelatne snage o brzini i akceleraciji za svaki korak proračuna prema sljedećem izrazu:

$$P_{el} = \frac{M_{vl}}{\eta} \cdot [1000 \cdot (1 + \varepsilon)] \cdot a_i + \frac{M_{vl}}{\eta} \cdot \left[ 10 \cdot i + \frac{80}{R} + 20 \right] \cdot v_i + \frac{M_{Lok} \cdot n_{Lok} + 24 \cdot k \cdot (M_{vl} - M_{Lok} \cdot n_{Lok})}{240 \cdot \eta} \cdot v_i^3 + P_{pom} \quad (3.1.12)$$

gdje je:  $i$  - uspon pruge izražen u [%o],  
 $R$  - radijus krivine izražen u [m],  
 $n_{lok}$  - broj vučnih vozila,  
 $M_{vl}$  - ukupna masa vlaka izražena u [t],  
 $M_{lok}$  - masa vučnog vozila izražena u [t],  
 $k$  - koeficijent koji ovisi o vrsti vlaka (0,032 - 0,108).

Iz izraza (3.1.11) vidi se da se energija potrebna za vuču vlakova računa numerički za svaki korak proračuna  $\Delta t$  i na kraju se zbraja da bi se dobila ukupna potrošnja energije električnog vlaka.

U simulaciji kretanja vlaka također je razrađen povrat snage u mrežu, tj. rekuperacija pri kočenju vlaka. Krivulja elektrodinamičke kočnice za asinkronu lokomotivu je prikazana na slici 3.2, a za ostale vrste vučnih vozila se nalaze u [31].

Faktor korisnosti električne kočnice ( $\eta_k$ ) kreće se od 0,66 do 0,85 ovisno o konstrukciji kočnice. U algoritmu je pretpostavljena vrijednost  $\eta_k = 0,85$ . Snagu je moguće vratiti u mrežu u slučaju da vlak pri kretanju koči električnom kočnicom (na većim strminama) ili pri zaustavljanju, jer u tim slučajevima  $P_m < 0$ . Snaga kočnice računa se prema sljedećem izrazu:

$$P_{ek} = F_k \cdot v \quad (3.1.13)$$

gdje je:  $P_{ek}$  - snaga kočnice izražena u [kW],  
 $F_k$  - sila električne kočnice izražena u [kN],  
 $v$  - brzina u [m/s].

Budući da pri kočenju mehanička snaga na obodu kotača ima negativni predznak, u mrežu je moguće vratiti snagu ovisno o tome je li apsolutna vrijednost mehaničke snage veća ili manja od snage kočnice, pa imamo dva slučaja:

Ako je  $P_m$  veće od  $P_{ek}$ , u mrežu je moguće vratiti snagu:

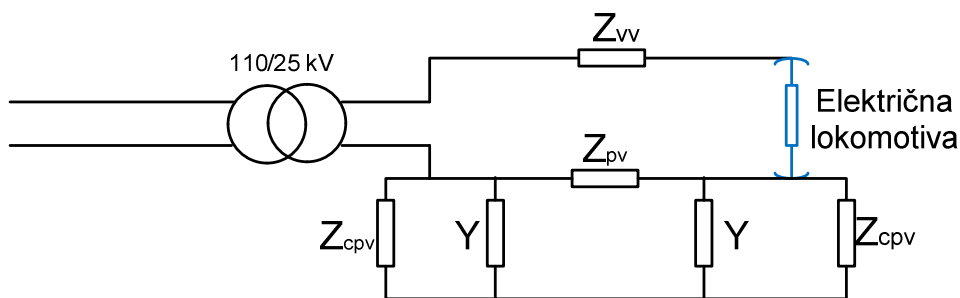
$$P_e = P_{ek} \cdot \eta_k - P_{pom} \quad (3.1.14)$$

Ako je  $P_m$  manje od  $P_{ek}$ , u mrežu je moguće vratiti snagu:

$$P_e = |P_m| \cdot \eta_k - P_{pom} \quad (3.1.15)$$

### 3.2 Impedancija kontaktne mreže

Zadatak je kontaktne mreže dovođenje potrebne snage vozilu električne vuče dok prometuje željezničkom prugom. Strujni krug takvog prijenosa energije čine sekundarni namot jednofaznog vučnog transformatora, vozni vod, elektrovučno vozilo, povratni vod koji čine okolni tračnice i zemljište, te spojni kabel od tračnice do transformatora (povratni vod EVP-a). Električna shema raspodjele struja u kontaktnoj mreži prikazana je na slici 3.4.



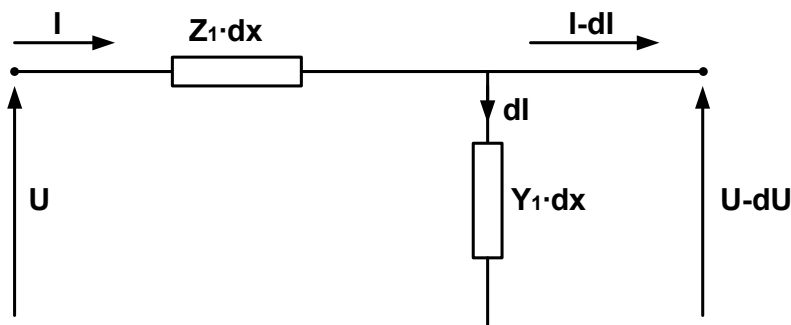
Slika 3.4. Električna shema raspodjele struja u kontaktnoj mreži

Oznake na slici 3.4. su sljedeće:

- $Z_{vv}$  - jedinična impedancija voznog voda [ $\Omega/\text{km}$ ],
- $Z_{pv}$  - jedinična impedancija povratnog voda [ $\Omega/\text{km}$ ],
- $Z_{cpv}$  - karakteristična impedancija povratnog voda [ $\Omega/\text{km}$ ],
- $Y$  - jedinični odvod tračnica prema zemlji [ $\text{S}/\text{km}$ ].

Specifičnost je takvog prijenosa energije u tome što u vođenju struje učešće imaju i okolni kolosijeci i zemljište, a zbog jakog elektromagnetskog i elektrostatskog djelovanja postoji opasnost od utjecaja na metalne konstrukcije i vodove (telekomunikacijske, niskonaponske i sl.) u blizini kontaktne mreže.

Raspodijeljenost parametara prijenosnog voda po jedinici duljine određuje naponske i strujne prilike duž tog voda koje su određene prijenosnim jednadžbama voda. To je sustav diferencijalnih jednadžbi II. reda koje proizlaze iz Ohmova i Kirchoffova zakona primijenjenog na diferencijalu voda s konstantama  $Z_1$  (uzdužna impedancija) i  $Y_1$  (poprečna admitancija). Shematski prikaz diferencijalne duljine voda nalazi se na slici 3.5.



Slika 3.5. Diferencijalna duljina voda s jediničnim konstantama  $Z_1$  i  $Y_1$

Sustav diferencijalnih jednadžbi II reda je dan u sljedećem izrazu:

$$\begin{aligned}\frac{d^2U}{dx^2} &= -Z_1 \cdot Y_1 \cdot U \\ \frac{d^2I}{dx^2} &= -Z_1 \cdot Y_1 \cdot I\end{aligned}\tag{3.2.1}$$

Opće rješenje sustava jednadžbi u izrazu (3.2.1) glasi:

$$\begin{aligned}U &= A_1 \cdot e^{-kx} + A_2 \cdot e^{kx} \\ I &= B_1 \cdot e^{-kx} + B_2 \cdot e^{kx},\end{aligned}\tag{3.2.2}$$

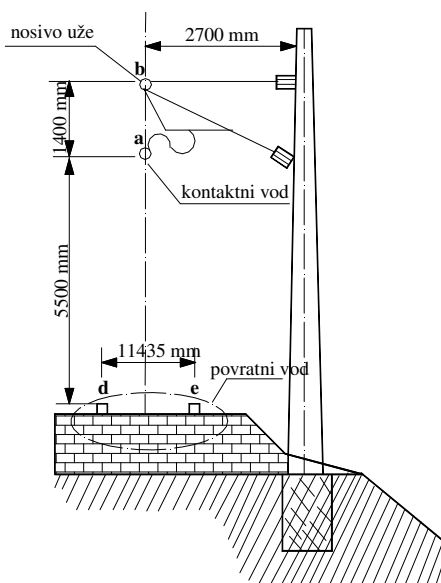
gdje je:  $k = \sqrt{Z_1 \cdot Y_1}$  - konstanta rasprostiranja (valna konstanta) izražena u  $[\text{km}^{-1}]$ .

Da bi se odredile nepoznate konstante trebaju biti poznati početni, odnosno granični uvjeti.

Impedancija kontaktne mreže sastoji se od:

- impedancije petlje kontakti vodič - zemlja  $Z_k$
- impedancije petlje nosivo uže - zemlja  $Z_u$
- međuiimpedancije kontakti vodič - nosivo uže  $Z_{ku}$
- impedancije voznog voda  $Z_v$
- međuiimpedancije voznih vodova dva kolosijeka  $Z_a$
- impedancije povratnog voda  $Z_p$
- međuiimpedancije vozni vod - povratni vod  $Z_{vp}$ .

Na slici 3.6. nalazi se poprečni presjek kontaktne mreže jednokolosiječne otvorene pruge za izmjenični sustav napajanja 25 kV, 50 Hz.



Slika 3.6. Poprečni presjek kontaktne mreže jednokolosiječne otvorene pruge za izmjenični sustav napajanja 25 kV, 50 Hz.

Izraz za impedanciju pojedine petlje dan je u [30], a izraz za impedanciju kontaktne mreže glasi:

$$Z_{KM} = Z_V - p \cdot Z_{vp} + q \cdot (1 - p) \cdot (Z_p - Z_{vp}), \quad (3.2.3)$$

pri čemu je:

$$p = \frac{Z_{vp}}{Z_p} \quad q = \frac{1 - e^{-k_p \cdot l}}{k_p \cdot l} \quad k_p = \sqrt{Z_{pv} \cdot Y_{pv}} \quad (3.2.4)$$

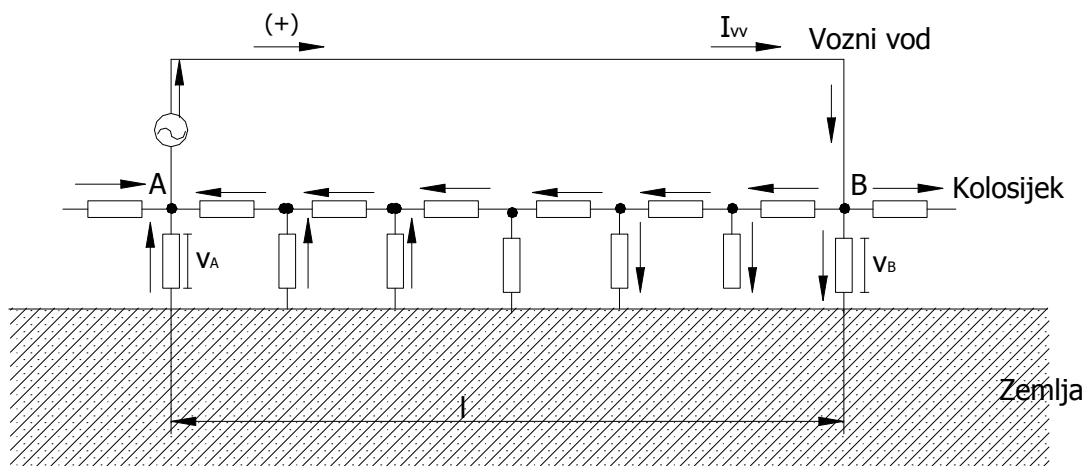
Iz izraza (3.2.4) može se zaključiti da ukupna impedancija kontaktne mreže ovisi o duljini napojnog kraka tj. o udaljenosti vučnog vozila od EVP-a.

Izraz za impedanciju pojedine petlje može se dobiti i na osnovi prijenosnih jednadžbi pojedinog vodiča kontaktne mreže.

Klasične prijenosne diferencijalne jednadžbe za kolosijek kao povratni vod glase [30]:

$$\begin{aligned} -\frac{\delta U_{pv}}{\delta x} &= Z_{pv} \cdot I_{pv} \\ -\frac{\delta I_{pv}}{\delta x} &= Y_{pv} \cdot U_{pv} \end{aligned} \quad (3.2.5)$$

Na slici 3.7. nalazi se pojednostavljena shema dijela kontaktne mreže.



Slika 3.7. Pojednostavljena shema jedne dionice kontaktne mreže

U točki B struja ulazi u kolosijek, a u točki A ona izlazi iz njega. Potencijali tračnica u odnosu na zemlju, u tim su točkama suprotnog predznaka. S navedenim oznakama sa slike 3.7. dolazi se do rješenja sustava jednadžbi u izrazu (3.2.5) [30]:



$$\begin{aligned}
 U &= U_A \operatorname{ch}kx - Z_{cpv} I_A \operatorname{sh}kx \\
 I &= I_A \operatorname{ch}kx - \frac{U_A}{Z_{cpv}} \operatorname{sh}kx \quad ,
 \end{aligned}
 \tag{3.2.6}$$

gdje je:  $U_A$  - nazivni napon EVP-a (priključak voznog voda na sabirnice KM-e),

$Z_{cpv}$  - karakteristična (valna) impedancija tračnica (  $Z_{cpv} = \sqrt{\frac{Z_{pv}}{Y_{pv}}}$  ),

$k_p$  - konstanta prostiranja povratnog voda (  $k_p = \sqrt{Z_{pv} \cdot Y_{pv}}$  ),

$Z_{pv}$  - impedancija povratnog voda (tračnica),

$Y_{pv}$  - odvod tračnica,

$x$  - udaljenost vučnog vozila od EVP-a.

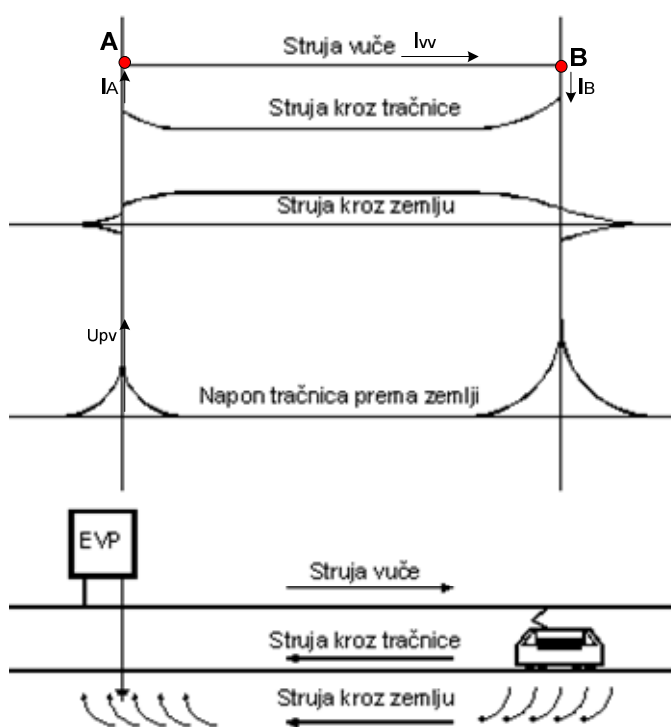
Rješenje sustava jednažbi (3.2.6) koji određuje raspodjelu struja i napona u tračnicama dobije se iz graničnih uvjeta koji rezultiraju iz njegove simetričnosti [30]. To rješenje glasi:

$$\begin{aligned}
 I_{pv} &= \frac{I_{vv}}{2} \left[ e^{-k_p L} + e^{-k_p(L-x)} \right] & U_{pv} &= Z_{cpv} \frac{I_{vv}}{2} \left[ e^{-k_p L} + e^{-k_p(L-x)} \right] ,
 \end{aligned}
 \tag{3.2.7}$$

gdje je :  $I_{vv}$  - struja voznog voda;

$L$  - duljina promatranog dijela kontaktne mreže.

Na slici 3.8. shematski je prikazana raspodjela struje i napona pri napajanju električne vuče.



Slika 3.8. Prikaz raspodjele struje i napona tračnica pri napajanju električne vuče  
Izraz za impedanciju povratnog voda glasi:

$$Z_p = \frac{U_{pv}}{I_{pv}}, \quad (3.2.8)$$

Na sličan bi se način mogle odrediti vlastite impedancije ostalih vodiča kontaktne mreže. Slika 3.8. pokazuje da je struja kroz tračnice najveća na mjestu utiskivanja struje vuče, a kasnije se postupno smanjuje, no na povratku u blizini EVP-a opet dolazi do porasta njene vrijednosti. Slični odnosi vrijede i za napon tračnice prema zemlji.

Proračun impedancije izveden je s pomoću numeričkog alata MATLAB postupnim postupkom i matricno. Također je napravljena usporedba dobivenih rezultata [30].

Umnožak  $k_p \cdot l$  često se naziva "karakterističnom konstantom pruge" koja karakterizira jednu prugu prema njenoj duljini i lokalnim parametrima. Tom se umnošku nikada ne može odrediti točna vrijednost jer se mijenja stalno, pa se uzimaju dva granična slučaja izračunavanja impedancije kontaktne mreže s obzirom na udaljenost od elektrovučne podstanice i veličinu prijelaznog otpora tračnica - zemlja ( $g$ ). Za slučaj opterećenja u blizini elektrovučne podstanice i dovoljno velikog prijelaznog otpora tračnica - zemlja tj. ako je ( $k_p \cdot l \rightarrow 0$ ) slijedi:

$$Z_{KM} = Z_{KM0} = Z_v + Z_p - 2 \cdot Z_{vp}, \quad \Omega/\text{km} \quad (3.2.9)$$

U ovom slučaju cjelokupna povratna struja  $I_{pv}$  protječe kroz kolosijek i djeluje na elektromagnetsko polje voznog strujnog kruga pa je induktivni pad napona u petlji vozni vod - tračnice - zemlja veći, a u proračunu impedancije mora se uzeti u obzir i pad napona što ga u kolosijeku stvara promjenjivi dio struje u tračnicama - zemljovodna struja.

Za suprotni slučaj, odnosno za slučaj značajno udaljenog opterećenja od EVP-a i zanemarivo malog prijelaznog otpora tračnica - zemlja može se pretpostaviti da  $k_p \cdot l \rightarrow \infty$  i tada izraz (3.2.3) prelazi u:

$$Z_{KM} = Z_{KM\infty} = Z_v - p \cdot Z_{vp}, \quad \Omega/\text{km} \quad (3.2.10)$$

U elektrovučnom proračunu upotrebljavaju se srednje vrijednosti impedancija dobivenih proračunom za pojedinu konfiguraciju kontaktne mreže prikazane u tablici 3-1.

Tablica 3-1. Pregled impedancija različitih konfiguracija kontaktne mreže za elektrovučni sustav 25 kV, 50 Hz

Vrsta pruge		$Z_{KM} = R + jX \text{ } \Omega/\text{km}$				
		$Z_{KM} =  Z_{KM}  \angle \varphi \text{ } \Omega/\text{km}$				
		kada $g \rightarrow 0$	kada $g \rightarrow \infty$	srednja vrijednost		
Jednokolosiječna	s jednom povratnom tračnicom	$0.35187 + j0.71066$	$0.19186 + j0.48200$	$0.27186 + j0.59633$		
		$0.79300 \angle 63.6587$	$0.51878 \angle 68.2950$	$0.65589 \angle 65.9769$		
	s dvije povratne tračnice	$0.24469 + j0.54816$	$0.17990 + j0.43961$	$0.21229 + j0.49388$		
		$0.60029 \angle 65.9446$	$0.47499 \angle 67.7443$	$0.53764 \angle 66.8444$		
Dvokolosiječna	s dvije povratne tračnice	vanjske	$0.24469 + j0.52203$	$0.18198 + j0.43569$	$0.21334 + j0.47886$	
			$0.57653 \angle 64.8861$	$0.47216 \angle 67.3301$	$0.52435 \angle 66.1081$	
	s dvije povratne tračnice	unutarnje	$0.24469 + j0.53867$	$0.18062 + j0.43903$	$0.21265 + j0.48885$	
			$0.59164 \angle 65.5701$	$0.47473 \angle 67.6377$	$0.53319 \angle 66.6039$	
	s dvije povratne tračnice	unutarnja i vanjska	$0.24469 + j0.53166$	$0.18120 + j0.43935$	$0.21294 + j0.48551$	
			$0.58527 \angle 65.2863$	$0.47525 \angle 67.5875$	$0.53026 \angle 66.4369$	
	s četiri povratne tračnice			$0.19110 + j0.44738$	$0.16728 + j0.40264$	$0.17919 + j0.42501$
				$0.48649 \angle 66.8701$	$0.43600 \angle 67.4392$	$0.46125 \angle 67.1546$

### 3.2.1 Impedancija vučnog transformatora

Jednofazni vučni transformator u elektrovučnoj podstanici, prijenosnog omjera 110/25 kV, modeliran je kao impedancija prema sljedećem izrazu:

$$Z_T = j \frac{u_k(\%)}{100} \cdot \frac{U^2}{S_T}, \quad (3.2.11)$$

gdje je:  $u_k(\%)$  - napon kratkog spoja transformatora,  
 $U$  - nazivni napon kontaktne mreže [kV],  
 $S_T$  - nazivna snaga transformatora [MVA].

Izraz (3.2.11) pokazuje da je impedancija transformatora pretežno induktivnog karaktera. Impedancija je svedena na napon kontaktne mreže. Ako se u izraz (3.2.11) uvrste realni podaci za vučni transformator ( $u_k = 10 \%$  i  $S_T = 7,5 \text{ MVA}$ ), dobije se za impedanciju transformatora  $Z_T = j 8,3333 \text{ } [\Omega]$ .

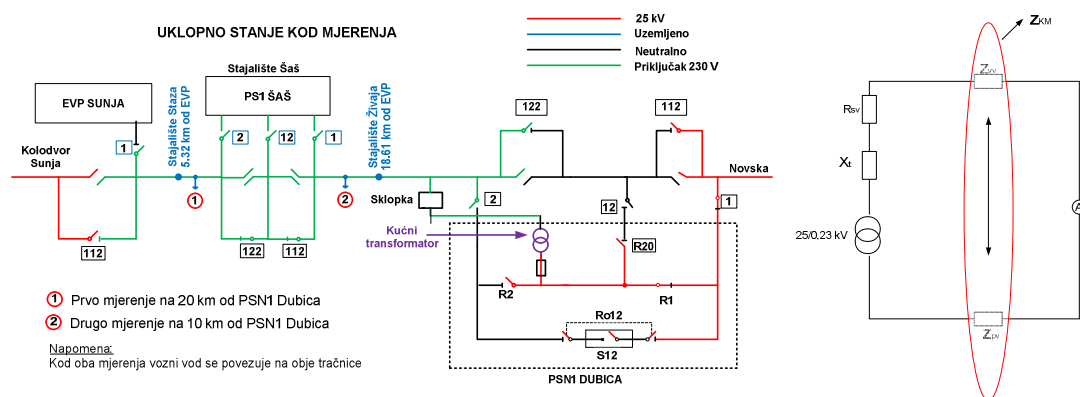
### 3.3 Mjerenje impedancije kontaktne mreže

U ovom će se poglavlju usporediti model za impedanciju kontaktne mreže, koji je implementiran u računalni program za elektrovučni proračun, s mjerenim rezultatima impedancije kontaktne mreže.

Mjerenje impedancije kontaktne mreže obavljeno je za jednokolosiječnu otvorenu prugu s dvije povratne tračnice s pomoću simuliranog kratkog spoja voznog i povratnog voda.

Shematski prikaz mjernog kruga za određivanje struje povratnog voda i uklopnog stanja aparata u postrojenju za sekcioniranje (PSN1), koji predstavlja izvor napajanja, i na kontaktnoj mreži dan je na slici 3.9.

Na slici 3.9. prikazana je i pozicija mjesta na kojemu su obavljena mjerenja. Na desnoj strani slike 3.9. dana je pojednostavljena shema mjernog kruga. Mjerenja su provedena 1. listopada 2009. pri zatvoru pruge.



Slika 3.9. Shema mjernog kruga i uklopnog stanja aparata u PSN1 i na KM

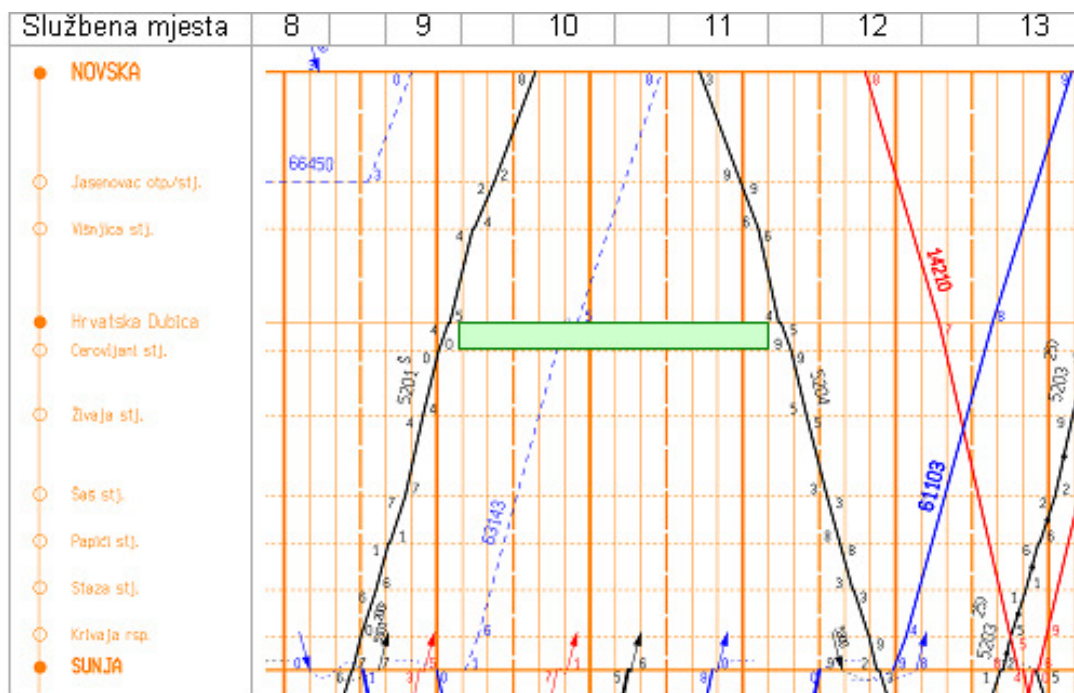
Struja simuliranog kratkog spoja je mjerena preko ampermetra, a impedanciju kontaktne mreže čine impedancija voznog i povratnog voda. Formula za pojedinu impedanciju dana je u sljedećem izrazu:

$$X_t = j \frac{u_k (\%) \cdot U^2}{100 \cdot S_t} = j \frac{5}{100} \cdot \frac{(0,23 \cdot 10^3)^2}{50 \cdot 10^3} = j0,0529$$

$$R_{sv} = \frac{\rho_{Cu} \cdot 10^3 \cdot l}{S_{sv}} = \frac{0,01759 [\Omega \text{mm}^2 / m]}{50 [\text{mm}^2]} \cdot 0,035 [\text{km}] = 0,01231 \cdot \quad (3.3.1)$$

Njihova zajednička impedancija iznosi:  $Z_{tsv} = 0,01231 + j0,0529 = 0,0543 \angle 76,9$ .

U izvodu grafikona reda vožnje (slika 3.10.) naznačeno je vrijeme od 9.10 do 10.40 kada je bilo moguće izvoditi mjerenja, uključujući i vrijeme uspostavljanja redovnog uklopnog stanja i ulazak pružnog vozila u promatrani kolodvor.



Slika 3.10. Grafikon reda vožnje na dionici promatrane trase

Na slici 3.10. vidljivo je da vrijeme zatvora pruge, koje je prikazano zelenim pravokutnikom, traje od 9.10 do 11.10 između prolaska vlakova 5201 i 5204. Izvor napajanja bio je kućni transformator u PSN1 (pozicija je prikazana na slici 3.9.), napona 230 V. Uklop i isklop strujnog kruga bio je ostvaren pomoću sklopke prikazane na slici 3.11.



Slika 3.11. Sklopka za uklop i isklop strujnog kruga i svitak Rogowski za mjerenje struje povratnog voda

Termička zaštita na sklopci se može podesiti od 100 A do 160 A, što je bilo zadovoljeno za očekivane mjerne struje simuliranog kratkog spoja pri niskom naponu kod prvog i drugog mjerenja.

Očekivane struje pri mjerenju izračunate su na osnovi vrijednosti impedancije kontaktne mreže (nosivo uže 65 mm<sup>2</sup> bronca + kontakti vodič 100 mm<sup>2</sup> Cu) za jednokolosiječnu prugu s dvije povratne tračnice (tablica 3-1.)

Za srednju vrijednost impedancije kontaktne mreže dobije se  $Z = 0,53764 \Omega/\text{km}$ , a za proračun struja je uzeta manja impedancija  $Z = 0,5 \Omega/\text{km}$ .

Za duljine petlje kratkog spoja od 20 km i 10 km dobiju se impedancije kontaktne mreže 10  $\Omega$ , i 5  $\Omega$  slijedno. Uz napon sekundara transformatora od 230 V slijede struje dobivene proračunom od **23 A** i **46 A**.

Nakon što je ostvareno uklopno stanje (za prvo mjerenje) na 20 km od PSN1 (stacionaža 350 +500 km), prema slici 3.9, izmjerena je struja na mjestu kratkog spoja (struja napojnog voda) od 23,5 A.

Mjerenje struje u obje tračnice izvedeno je s pomoću svitka Rogowski prikazanog na slici 3.11.

Oznake pojedinih impedancija s pojednostavljene sheme mjernog kruga, prikazane na slici 3.9. su sljedeće:

$X_t$  - reaktancija kućnog jednofaznog transformatora prijenosnog omjera 25/0,23kV;

$R_{sv}$  - otpor spojnog bakrenog vodiča ( $S = 50 \text{ mm}^2$ ,  $l = 35 \text{ m}$ ).

Izraz za napon u petlji mjernog kruga prikazanog na slici 3.9. glasi:

$$U = I_A \cdot (Z_{KM} \cdot L_{ks} + Z_{tsv}), \quad (3.3.2)$$

gdje je:  $I_A$  – mjerena struja simuliranog kratkog spoja;

$L_{ks}$  - udaljenost mjesta kratkog spoja od izvora napajanja.

Ako uvrstimo dobivenu mjerenu struju kratkog spoja u izraz (3.3.2), dobije se iznos impedancije kontaktne mreže prema sljedećem izrazu:

$$Z_{KM\_mj} = \frac{\frac{U}{I_A} - Z_{tsv}}{L_{ks}} = \frac{\frac{230V}{23,5A} - 0,0543\Omega}{20km} = 0,4866[\Omega / km] \quad (3.3.3)$$

Ako u izraz (3.2.4) pri određivanju konstante rasprostiranja povratnog voda ( $k_p$ ) za odvod tračnica uzmemo srednju vrijednost od 1 [S/km], dobije se slijedeća vrijednost za  $k_p \cdot L$ :

$$\begin{aligned} k_p \cdot L &= \sqrt{|Z_{p(1,2)} \cdot Y_p|} \cdot 20 = \sqrt{(0,15730 + j0,5689) \cdot 1} \cdot 20[km] = \\ &= 0,7863[km^{-1}] \cdot 20[km] = 15,726 \end{aligned} \quad (3.3.4)$$

Vrijednost parametra q prema izrazu (3.2.4) poprima vrijednost:

$$q = \frac{1 - e^{-k_p \cdot L}}{k_p \cdot L} = \frac{1 - e^{-(15,726)}}{15,726} = 0,0636 \quad (3.3.5)$$

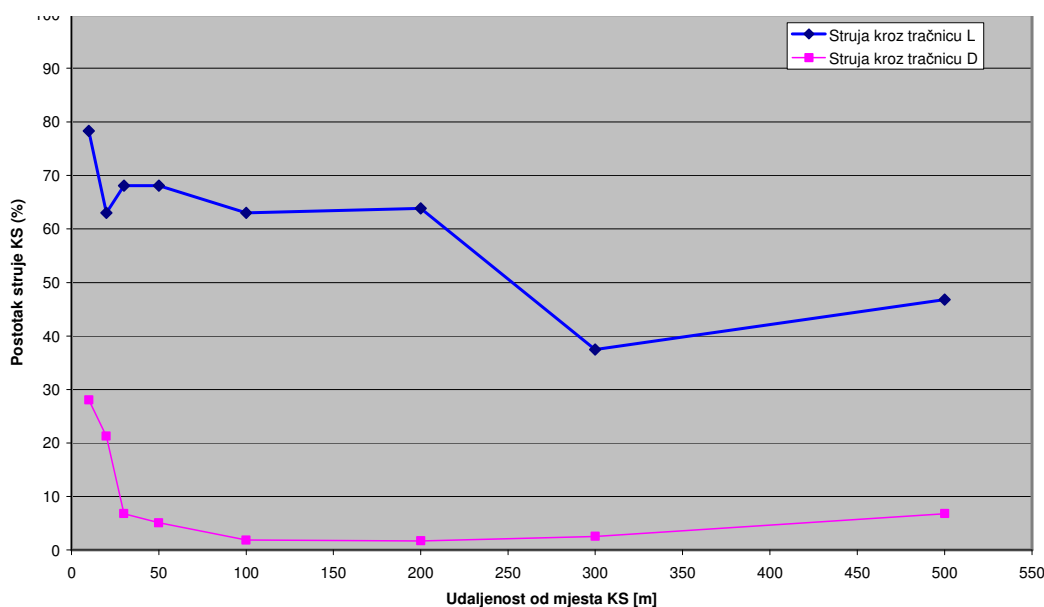
Na osnovi izraza za ekvivalentnu impedanciju kontaktne mreže (3.2.3) vrijedi:

$$Z_{KM} = 0.1842 + j0.4471 = 0.4836 \angle 67.61 \frac{\Omega}{km} \quad (3.3.6)$$

Usporedbom rezultata za impedanciju kontaktne mreže za jednokolosiječnu prugu s dvije povratne tračnice, dobivenih mjerenjem prema izrazu (3.3.3) i proračunom prema izrazu (3.3.6), može se zaključiti da su oni približno jednaki.

Malo odstupanje rezultata razumljivo je kada se uzme u obzir raspodjela povratne struje kroz obje tračnice koja je dobivena mjerenjem.

Na slici 3.12. prikazani su rezultati provedenog mjerenja struje povratnog voda (obje tračnice) na udaljenostima od 10 m, 20 m, 30 m, 50 m, 100 m, 200 m, 300 m i 500 m od mjesta kratkog spoja (mjerno mjesto 1. prikazano na slici 3.10) u smjeru PSN1, za struju napojnog voda od 23,5 A.



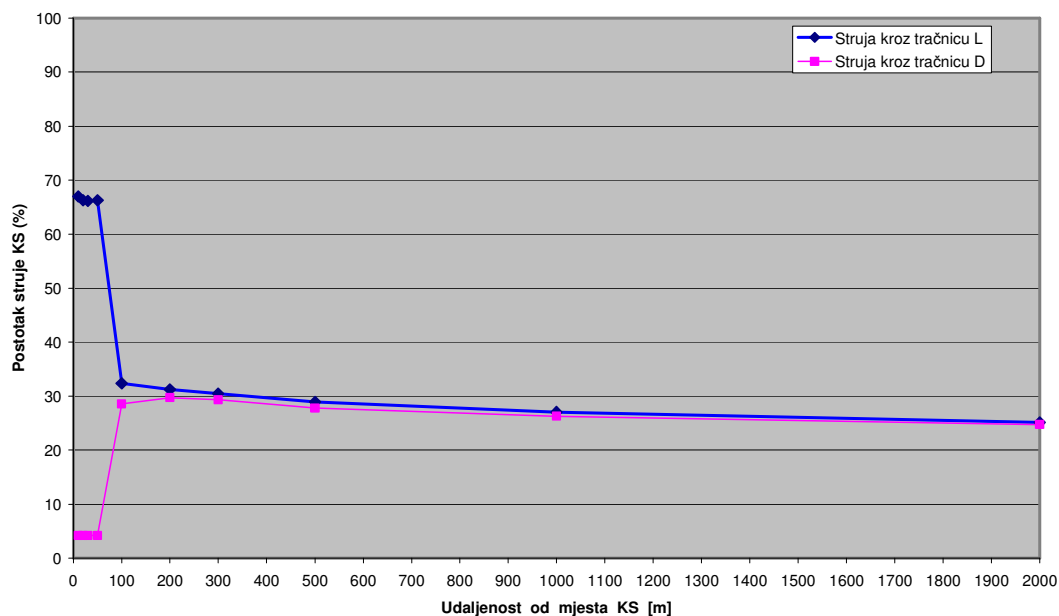
Slika 3.12. Udio struje kroz tračnice (%) od ukupne struje simuliranog kratkog spoja (23,5 A)

Na slici 3.12. vidljivo je da udio struje kratkog spoja kroz pojedinu tračnicu nije jednak, a uzrok je nepostojanje pravilnog galvanskog spoja među tračnicama na toj dionici pruge. Također, rezultati mjerenja pokazuju da se u blizini mjesta kratkog spoja najveći dio struje vraća kroz tračnice, a da se udaljavanjem taj iznos smanjuje i nakon neke udaljenosti stabilizira.

Drugo mjerenje bilo je na udaljenosti od 10 km od PSN1 (slika 3.9.), a izmjerena struja kratkog spoja iznosila je 52,5 A.

Impedancija kontaktne mreže dobivene mjerenjem prema izrazu (3.3.3) iznosi 0,4327 [ $\Omega$ /km], što je nešto manje od vrijednosti 0.4916 [ $\Omega$ /km], dobivene proračunom prema izrazu (3.3.6).

Uzrok je raspodjela povratne struje kroz obje tračnice koja je dobivena mjerenjem, a rezultati su prikazani na slici 3.13. Mjerenja su obavljena na sličan način kao u prethodnom slučaju.

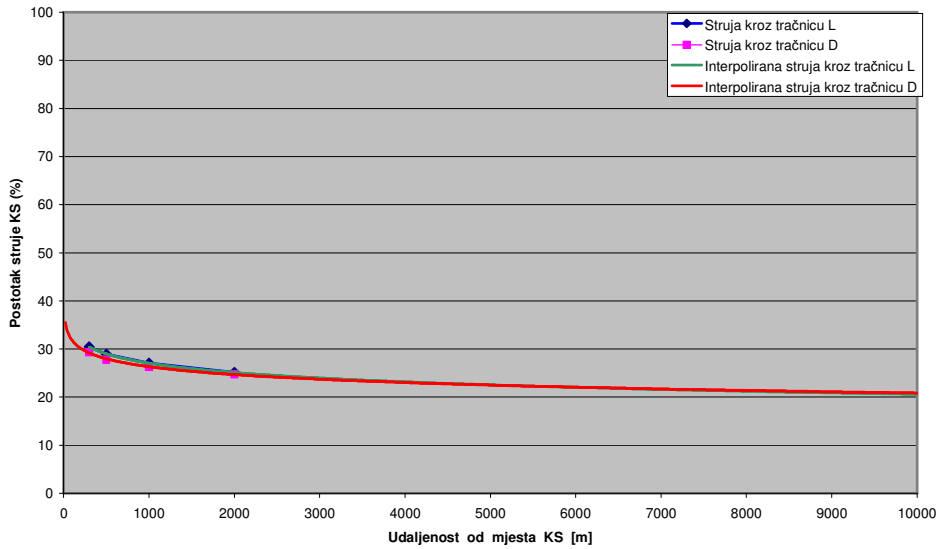


Slika 3.13. Udio struje kroz tračnice (%) od ukupne struje simuliranog kratkog spoja (52,5 A)

Slika 3.13. pokazuje da je na mjestu kratkog spoja iznos struje kroz pojedinu tračnicu različit, a ukupni je iznos struje kroz obje tračnice oko 70 % struje napojnog voda. Također se može zaključiti da udaljavanjem od mjesta kratkog spoja dolazi do smanjena iznosa struje kroz tračnice i njegova stabiliziranja na iznos od približno 50 % struje napojnog voda.

Interpolacijom izmjerenih vrijednosti dobivena je raspodjela struja kroz tračnice u preostalim 8 km, koja je prikazana na slici 3.14.



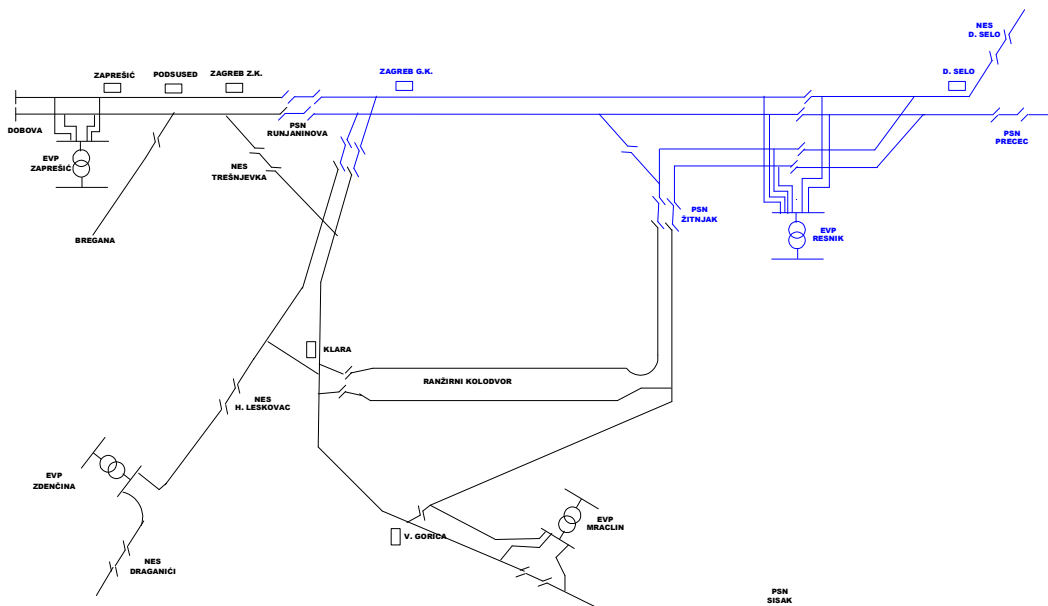


Slika 3.14. Udio struje kroz tračnice (%) od ukupne struje simuliranog kratkog spoja (52,5 A) dobiven interpolacijom

### 3.4 Usporedba proračuna i mjerenja

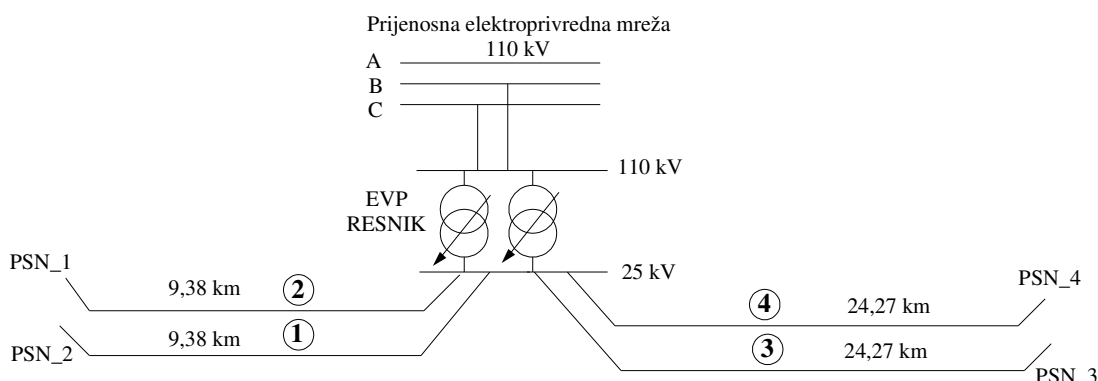
Usporedba će se provesti na osnovi iznosa struja napojnih vodova i napona elektrovučne podstanice 25 kV, dobivenih simulacijom i mjerenjem, u zadanom vremenskom intervalu [38].

Napajanje kontaktne mreže 25 kV, 50 Hz iz elektrovučnih podstanica može biti jednostrano (radijalno) ili dvostrano (paralelno). Na prugama 25 kV, 50 Hz najčešće se primjenjuje radijalno napajanje. Shema područja napajanja promatranog EVP-a 110 /25 kV (plava linija) i susjednih EVP-a prikazani su na slici 3.15 [29].



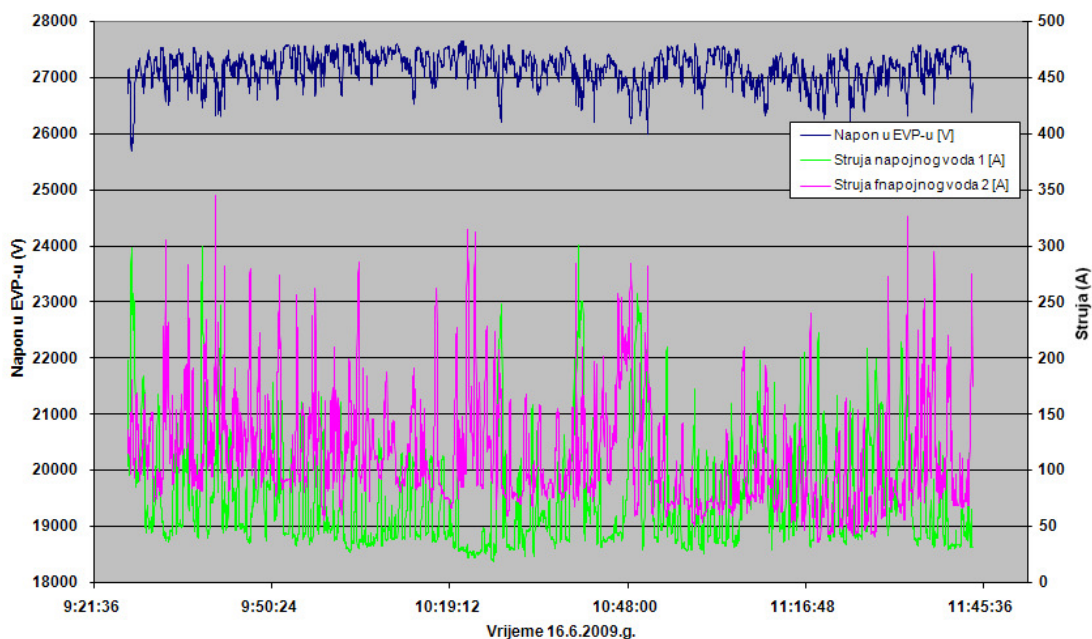
Slika 3.15. Shema područja napajanja EVP Resnik i susjednih EVP-a 110 /25 kV

Duljine napojnih vodova promatranog EVP-a prikazane su na slici 3.16. Usporedni rezultati će se provesti za napojne vodove 1 i 2 duljine 9,38 km.



Slika 3.16. Duljine krakova napajanja EVP Resnik

Mjerenja struja i napona provedena su na sekundarnoj strani EVP-a, pri čemu su mjerni instrumenti bili priključeni na zaštitnu jezgru strujnog i naponskog mjernog transformatora u 25-kilovoltnom dijelu postrojenja. Rezultati mjerenja prikazani su na slici 3.17.



Slika 3.17. Napon EVP-a 110/25 kV i struje napojnih vodova dobiveni mjerenjem

Mjerenja su obavljena 16. lipnja 2009. u vremenskom intervalu od 9.30 do 11.30. Plava linija prikazuje promjene napona u EVP-u, a zelena i crvena linija struje napojnih vodova 1 i 2.

U tablici 3-2. dan je popis vlakova koji su prometovali na području napajanja promatranog EVP-a 16. lipnja 2009. u vremenu od 9.30 do 11.30, kada je prometovalo ukupno 17 vlakova, od kojih su 2 bila teretna, mase preko 700 t. Tablica 3-2. sadrži i masu i vrstu vučnog vozila pojedinog vlaka te vozno vrijeme.

Tablica 3-2. Popis vlakova koji su prometovali na području napajanja

Šifra vlaka	Masa vlaka (t)	Vrijeme polaska (h:m)	Vrijeme dolaska (h:m)	Vrsta vučnog vozila
8029	176	9:09	9:33	6111-023
741	273	9:15	9:35	1142-012
8030	176	9:55	10:21	6111-023
8031	176	9:25	9:50	6111-008
8032	176	10:22	10:47	6111-008
2013	134	9:46	10:10	1141-306
1751	198	10:03	10:20	1142-004
703	203	10:09	10:28	1141-004
744	210	10:40	10:59	1141-230
2012	135	11:00	11:24	1141-015
8034	176	11:08	11:34	6111-007
8035	176	10:13	10:39	6111-007
38025	82	9:38	9:57	462-002
47981	759	11:15	11:39	1141-007
45902	1245	10:45	11:08	1141-106
415	289	11:04	11:21	1142-015
2173	176	10:38	11:04	6111-024

Iz tablice 3-2. je vidljivo da se radi o 4 vrste lokomotiva i to: 6111 (elektromotorni vlak), 1141 (diodna lokomotiva), 1142 (tiristorska lokomotiva) i 462 (6-osovinska diodna lokomotiva).

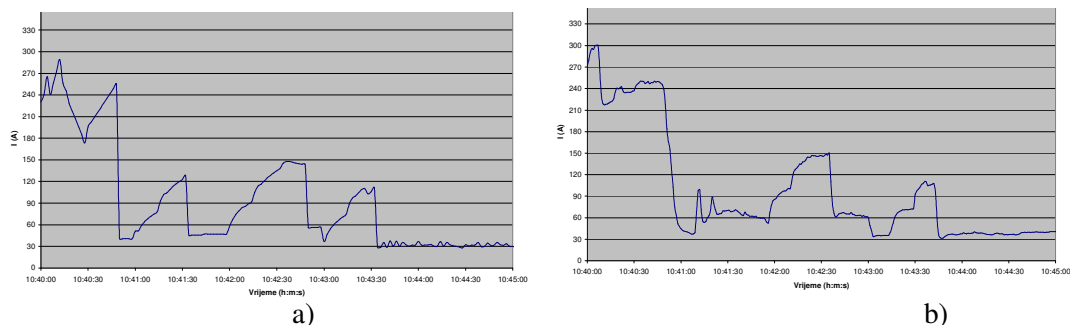
U prvoj fazi proračuna simulira se kretanje vlaka, a kao rezultat simulacije dobije se za svaki vlak njegova lokacija (udaljenost od EVP-a), brzina, zatim djelatna i jalova snaga potrebna za napajanje vlaka iz kontaktne mreže. Ti se podaci privremeno pohranjuju u bazu i kasnije se upotrebljavaju za druge proračune, pa se tako može na primjer dobiti podatak o vlakovima koji se istovremeno nalaze na pojedinom kraku napajanja EVP-a

Nakon simulacije kretanja svakog pojedinog vlaka slijedi formiranje električne mreže, koje je specifično jer se shema napajanja stalno mijenja (neki vlakovi ulaze, a neki izlaze iz područja napajanja).

Poslije formiranja električne mreže slijedi proračun tokova snaga i to se ponavlja za svaki korak proračuna (najčešće 2 sekunde) u promatranom vremenskom periodu simulacije elektrovučnog proračuna.

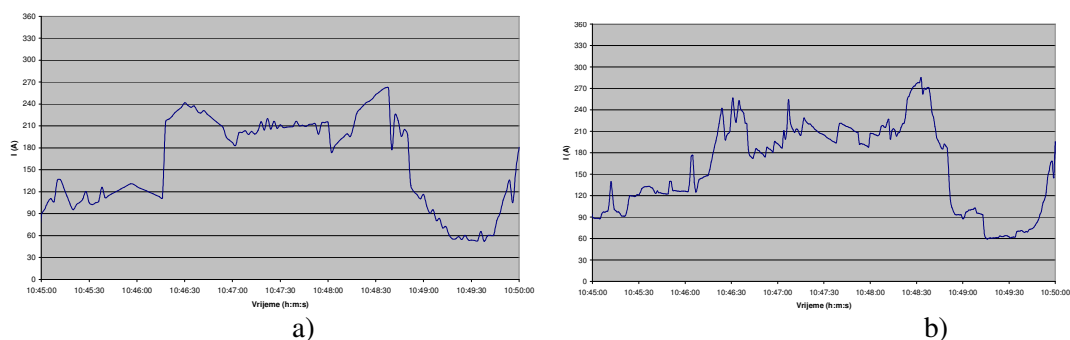
Rezultati proračuna uspoređeni su s mjerenim rezultatima u kraćim vremenskim periodima.

Za napojni vod 1 (slika 3.16.) promatran je vremenski interval od 10.40 do 10.45. Prikaz rezultata dobivenih proračunom i mjerenjem za taj vremenski period dan je na slici 3.18.



Slika 3.18. Struja napojnog voda 1: a) proračun b) mjerenje

Za napojni vod 2 (slika 3.16.) promatran je vremenski interval od 10.45 do 10.50, kada je prometovao teretni vlak mase 1245 tona i 6 elektromotornih vlakova. Prikaz rezultata dobivenih proračunom i mjerenjem za taj vremenski period je na slici 3.19.



Slika 3.19. Struja napojnog voda 2: a) proračun b) mjerenje

U proračunima je potrebno poznavati velik broj ulaznih parametara, a neki od njih su promjenjivi u vrlo širokim granicama, pa se tako za proračune uzimaju pretpostavljene srednje vrijednosti (kao npr. ubrzavanje).

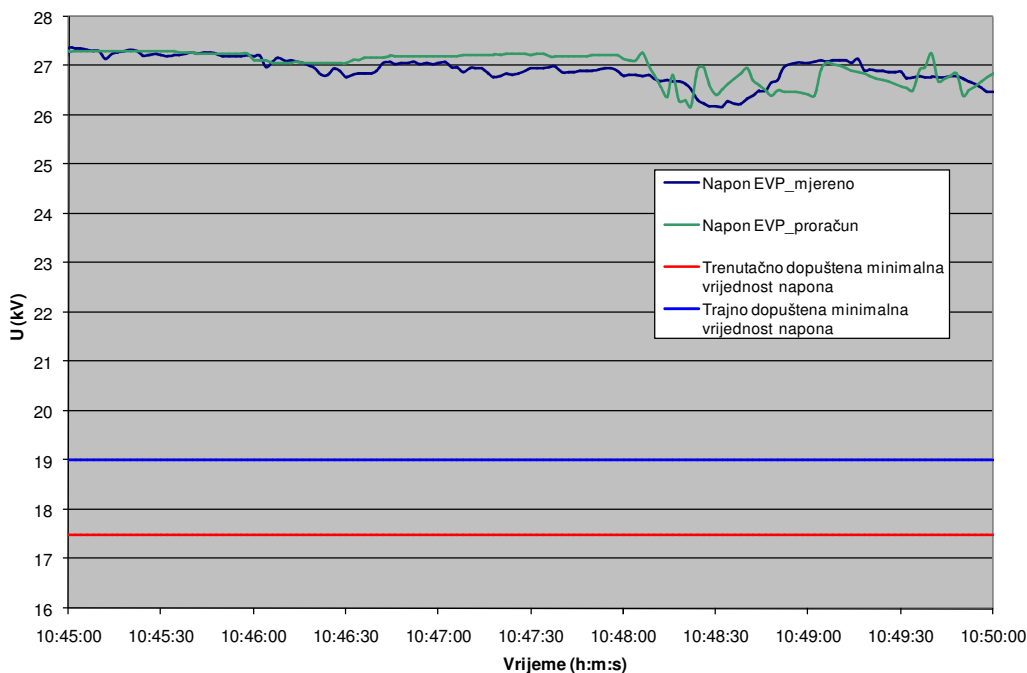
Izmjerene struje zavise i od načina upravljanja vučnim vozilom, a to je u proračunima pretpostavljeno.

Na slikama 3.18. i 3.19. se vidi da su struje napojnih vodova jako promjenjivog iznosa (vrijednosti se kreću od 30 A do 300 A).

Usporedni rezultati pokazuju da se struje napojnih vodova 1 i 2 dobivene mjerenjem i proračunom razlikuju do 5 %, te se može smatrati da se simulacijski rezultati struja napojnih vodova nalaze u prihvatljivim granicama razmatranog problema potrošnje energije električnih vlakova.

Naponi na 25-kilovoltnoj strani u EVP-u dobiveni proračunom i mjerenjem dani su na slici 3.20. na kojoj se može zaključiti da se iznosi napona kreću oko 27 kV, tj. nema velikih oscilacija kao kod struja napojnih vodova.

Usporedni rezultati mjerenja i proračuna napona EVP-a pokazuju da se razlike kreću do 5 %, te se može smatrati da se simulacijski rezultati napona EVP-a nalaze u prihvatljivim granicama razmatranog problema potrošnje energije električnih vlakova.



Slika 3.20. Napon na 25-kilovoltnoj strani EVP-a

Budući da je model simulacije kretanja vlaka jedan od bitnih sastavnica elektrovučnog proračuna, može se zaključiti da i on daje zadovoljavajuće rezultate koji će se kasnije upotrijebiti za optimizacijsku metodu.

### 3.5 Parametarska analiza potrošnje energije električnih vlakova

Nakon što je provedena usporedba modela kretanja vlaka s mjerenjem, u ovom će poglavlju biti dana analiza utrošene energije za vuču vlaka s obzirom na promjenjive utjecajne faktore.

Od svih utjecajnih faktora na potrošnju energije električnih vlakova, navedenih na početku trećeg poglavlja, samo neki mogu poslužiti za optimizaciju. To su profil pruge (radijus i nagib krivine), rekuperacija i maksimalno dopuštena brzina na određenoj dionici. Ostali su utjecajni faktori nepromjenjivi, a optimizacijski postupak zahtijeva promjenjive ulazne veličine.

U nastavku slijedi analiza utjecajnih faktora na potrošnju električne energije elektromotornog vlaka, kao vučnog vozila, na prigradskim željeznicama.

Parametri tog vlaka navedeni su u [31], a rezultati su dobiveni algoritmom za simulaciju kretanja vlaka s pomoću kojeg se izračunavaju položaji vlakova, kao i njihove mehaničke i električne snage potrebne za vuču [30]. Slični bi se rezultati dobili i za lokomotivu kao vučno vozilo.

### 3.5.1 Radijus krivine

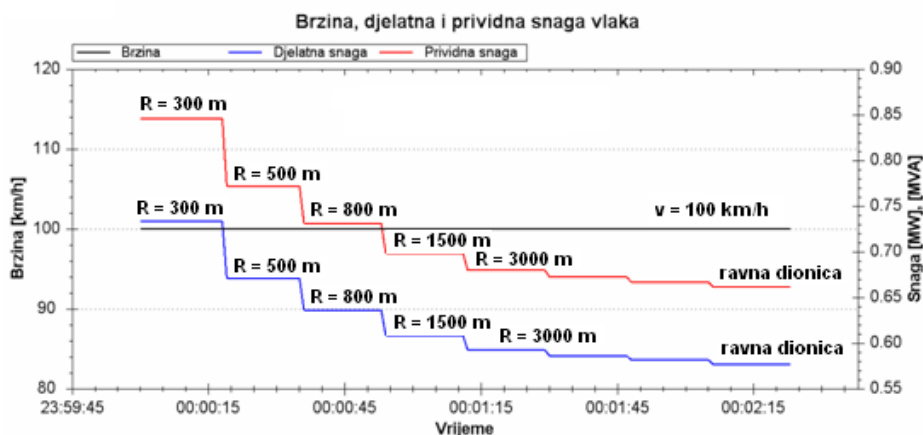
Ulazni podaci potrebni za simulator kretanja vlaka nalaze se u tablici 3-3.

Tablica 3-3. Ulazni podaci simulatora kretanja vlaka za parametarsku analizu radijusa krivine

Red. br. dion.	Duljina dionice (m)	Radijus krivine (m)	Nagib (‰)	Planirana brzina (km/h)
1.	500	300	0	100
2.	500	500	0	100
3.	500	800	0	100
4.	500	1500	0	100
5.	500	3000	0	100
6.	500	5000	0	100
7.	500	10000	0	100
8.	500	$\infty$	0	100

Proračun je proveden za prosječne brzine elektromotornog vlaka (70 - 100 km/h) uz pretpostavku da elektromotorni vlak cijelo vrijeme vozi planiranom brzinom.

Na slici 3.21. prikazani su rezultati ovisnosti djelatne i prividne snage o radijusu krivine za ulazne podatke (tablica 3-3.) dobiven s pomoću algoritma za simulaciju kretanja vlaka. Vidljivo je da je ta ovisnost zanemariva za velike radijuse krivine.



Slika 3.21. Ovisnost djelatne i prividne snage o radijusu krivine pri konstantnoj brzini

Slična bi se ovisnost dobila i za ostale brzine kretanja elektromotornog vlaka. Rezultati simulacije kretanja vlaka (potrošnja električne energije i djelatna električna snaga) za navedene planirane brzine nalaze se u tablici 3-4. U zadnjem su stupcu dobivene vrijednosti za ravnu dionicu pruge.

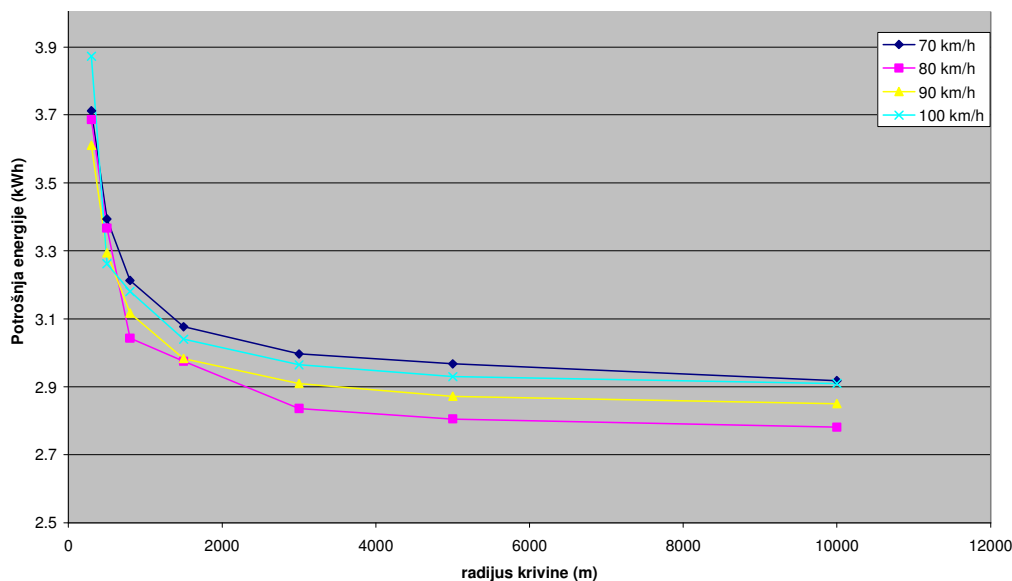
Na osnovi dobivenih rezultata se može zaključiti kako nema značajnije promjene u potrošnji energije elektromotornog vlaka za radijuse krivine iznad 5000 m. Proračuni pokazuju da razlika u potrošnji energije elektromotornog vlaka, za slučaj kada dionica ima radijus krivine od 300 m u odnosu na slučaj kada je dionica potpuno ravna, neovisno o brzini iznosi oko 27 %.

Tablica 3-4. Utjecaj različitog radijusa krivine pruge na potrošnju djelatne energije elektromotornog vlaka

Brzina vlaka (km/h)	Radijus krivine (m)	300	500	800	1500	3000	5000	10000	$\infty$
70	E (kWh)	3,712	3,394	3,213	3,077	2,997	2,968	2,939	2,918
	P(MW)	0,514	0,470	0,445	0,426	0,415	0,411	0,407	0,404
80	E (kWh)	3,526	3,221	3,043	2,909	2,836	2,805	2,781	2,756
	P(MW)	0,577	0,527	0,498	0,476	0,464	0,459	0,455	0,451
90	E (kWh)	3,611	3,294	3,117	2,983	2,910	2,872	2,850	2,828
	P(MW)	0,650	0,593	0,561	0,537	0,523	0,517	0,513	0,509
100	E (kWh)	3,670	3,355	3,180	3,040	2,965	2,930	2,910	2,885
	P(MW)	0,734	0,671	0,636	0,608	0,593	0,586	0,582	0,577

Prikaz ukupnih rezultata (tablica 3-4.) nalazi se na slici 3.22. i može se zaključiti da potrošnja energije za pojedini radijus krivine nije proporcionalna brzini (iako je potrebna djelatna snaga proporcionalna brzini, tablica 3-4.).

To pokazuje da je optimizacija potrošnje energije vlaka omogućena optimiranjem brzine na pojedinoj dionici [40].



Slika 3.22. Krivulja ovisnosti potrošnje djelatne električne energije elektromotornog vlaka o radijusu krivine

### 3.5.2 Nagib pruge

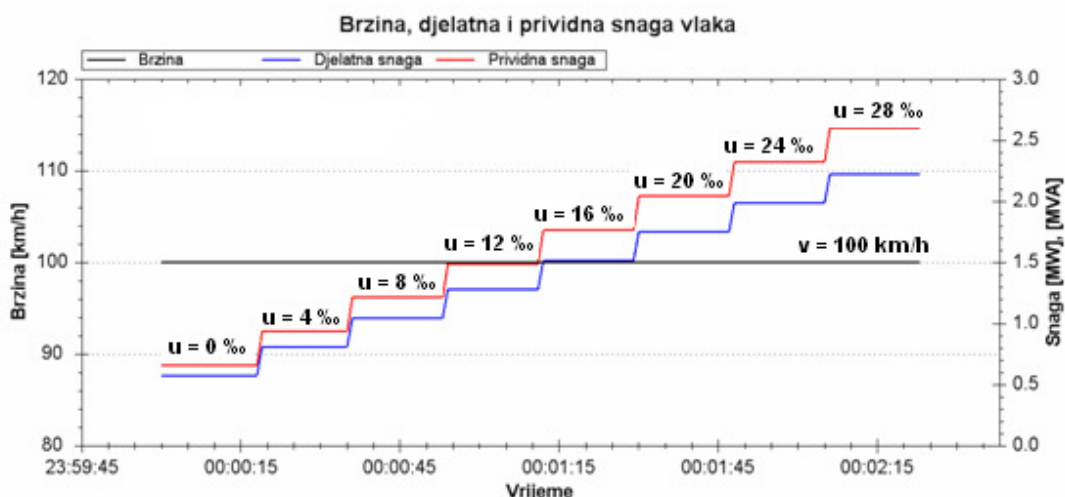
U nastavku će se promatrati ovisnost potrošnje energije elektromotornog vlaka o nagibu pruge. Ulazni podaci potrebni za simulator kretanja vlaka nalaze se u tablici 3-5. Budući da se vrijednost maksimalnog uspona za željeznicu kreće do 30 ‰ (proporcionalna adhezionoj težini vozila, a obrnuto proporcionalna ukupnoj težini vozila) za simulaciju su uzete vrijednosti nagiba pruge navedene u četvrtom stupcu tablice 3-5.

Proračun je proveden, kao u prethodnom slučaju, za prosječne brzine elektromotornog vlaka od 70 do 100 km/h, uz pretpostavku da elektromotorni vlak cijelo vrijeme vozi planiranom brzinom.

Tablica 3-5. Ulazni podaci za parametarsku analizu nagiba pruge

Red. br. dion.	Duljina dionice (m)	Radijus krivine (m)	Nagib (‰)	Planirana brzina (km/h)
1.	500	$\infty$	0	100
2.	500	$\infty$	4	100
3.	500	$\infty$	8	100
4.	500	$\infty$	12	100
5.	500	$\infty$	16	100
6.	500	$\infty$	20	100
7.	500	$\infty$	24	100
8.	500	$\infty$	28	100

Na slici 3.23. prikazani su rezultati ovisnosti djelatne i prividne snage o radijusu krivine za podatke dane u tablici 3-5. iz koje je vidljiva linearna ovisnost.



Slika 3.23. Ovisnost djelatne i prividne snage o usponu pruge pri konstantnoj brzini

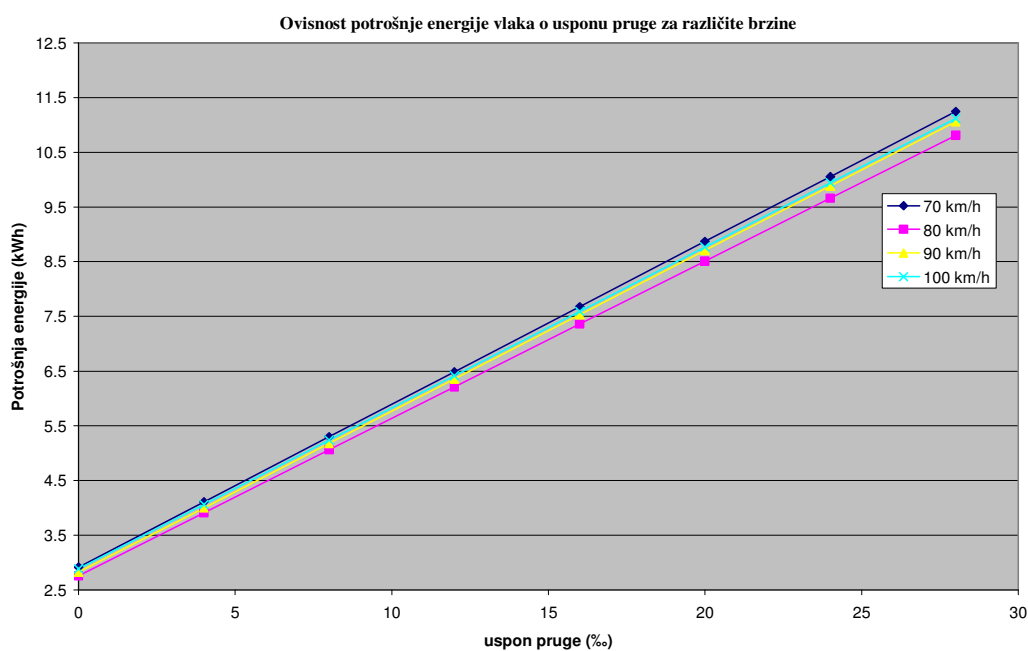
Slična bi se ovisnost dobila i za ostale brzine kretanja elektromotornog vlaka. Rezultati proračuna potrošnje električne energije i djelatne električne snage za navedene planirane brzine prikazani su u tablici 3-6.



Tablica 3-6. Utjecaj različitog uspona pruge na utrošenu djelatnu energiju elektromotornog vlaka

Brzina vlaka (km/h)	Uspon pruge (‰)	0	4	8	12	16	20	24	28
70	E (kWh)	2,918	4,109	5,301	6,486	7,677	8,869	10,05	11,245
	P(MW)	0,404	0,569	0,734	0,898	1,063	1,228	1,392	1,557
80	E (kWh)	2,756	3,911	5,060	6,209	7,358	8,513	9,662	10,811
	P(MW)	0,451	0,640	0,828	1,016	1,204	1,393	1,581	1,769
90	E (kWh)	2,828	4,000	5,178	6,356	7,533	8,706	9,883	11,061
	P(MW)	0,509	0,720	0,932	1,144	1,356	1,567	1,779	1,991
100	E (kWh)	2,885	4,060	5,240	6,415	7,590	8,770	9,945	11,120
	P(MW)	0,577	0,812	1,048	1,283	1,518	1,754	1,989	2,224

Prikaz ukupnih rezultata dan je na slici 3.24. iz koje je vidljivo da potrošnja energije elektromotornog vlaka linearno raste s porastom uspona promatrane dionice pruge.



Slika 3.24. Ovisnost utrošene djelatne električne energije elektromotornog vlaka o usponu pruge

Na slici 3.24. je vidljivo da postoji manja ovisnost potrošnje energije za određeni iznos uspona pruge o trenutnoj brzini vlaka nego u prethodnom poglavlju (krivulje su gušće raspoređene). Također se može uočiti da je na usponu od 10 ‰ utrošena dvostruko veća energija nego za ravnu dionicu.

### 3.5.3 Rekuperacija

Ako je vučno vozilo predviđeno za rekuperaciju tada je moguće vratiti dio snage električne kočnice u mrežu. Rekuperacija, odnosno povrat snage u mrežu može značajno utjecati na uštedu potrošnje energije u prigradskom prometu [41].

Primjena regenerativne kočnice na prugama elektrificiranim sustavom 25 kV 50 Hz ima sve širu primjenu na željeznicama širom svijeta. Poboľjšanom izvedbom kočionih diskova može se uštedjeti značajan iznos električne energije [42].

Iskustva pokazuju da pri takvu kočenju prigradska elektrovučna vozila mogu davati u mrežu i do 40 % ukupno preuzete energije.

Elektromotorni vlakovi imaju bolje rekuperativne kočione karakteristike od vlakova vučenih lokomotivama, jer je kod njih uključeno više osovina pri kočenju.

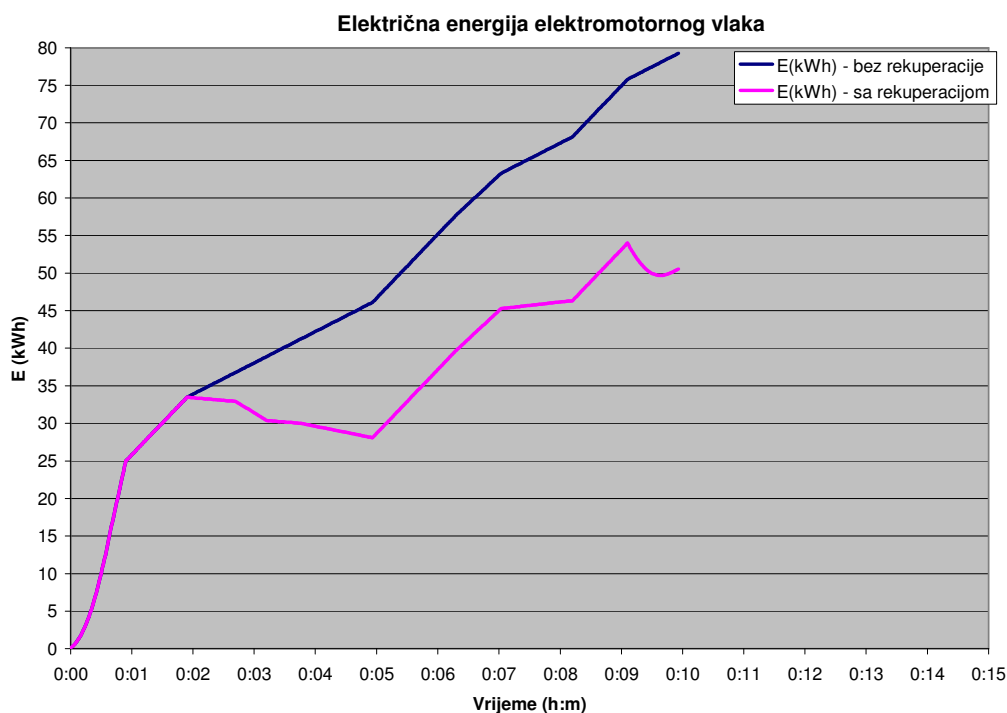
Što je veća snaga elektromotora, te uz veći broj osovina uključenih u kočenje, više energije može biti vraćeno u kontaktnu mrežu. U algoritmu je također omogućena rekuperacija pri kočenju vlaka i u nastavku će se na konkretnom primjeru simulacije vlaka razmotriti ušteda energije, ako je rekuperacija omogućena.

Ulazni podaci trase za koju je proveden proračun nalaze se u tablici 3-7. Ukupna duljina trase je 13,5 km.

Tablica 3-7. Profil pruge za simulator kretanja vlaka uz mogućnost rekuperacije

Red.br. dion.	Duljina dionice (m)	Radijus krivine (m)	Nagib (‰)	Planirana brzina (km/h)
1.	1298	$\infty$	0	90
2.	955	$\infty$	0	90
3.	1180	40000	-12,5	90
4.	750	38000	-19,4	90
5.	850	38000	-12,5	90
6.	1750	40000	-14	90
7.	1995	40000	0	90
8.	1150	40000	-1	90
9.	1750	40000	-10	90
10.	1995	40000	0	90

Treba napomenuti da se elektromotorni vlak kreće trasom smjerom na kojem nema nijednog uspona i da je na većem dijelu trase nizbrdica, na kojoj rekuperativno svojstvo vlaka dolazi do izražaja. Usporedba potrošnje energije elektromotornog vlaka s mogućnošću rekuperacije i bez nje prikazana je na slici 3.25. na kojoj je vidljivo da ušteda utrošene energije zbog rekuperacije za konkretan slučaj iznosi do 30 %.

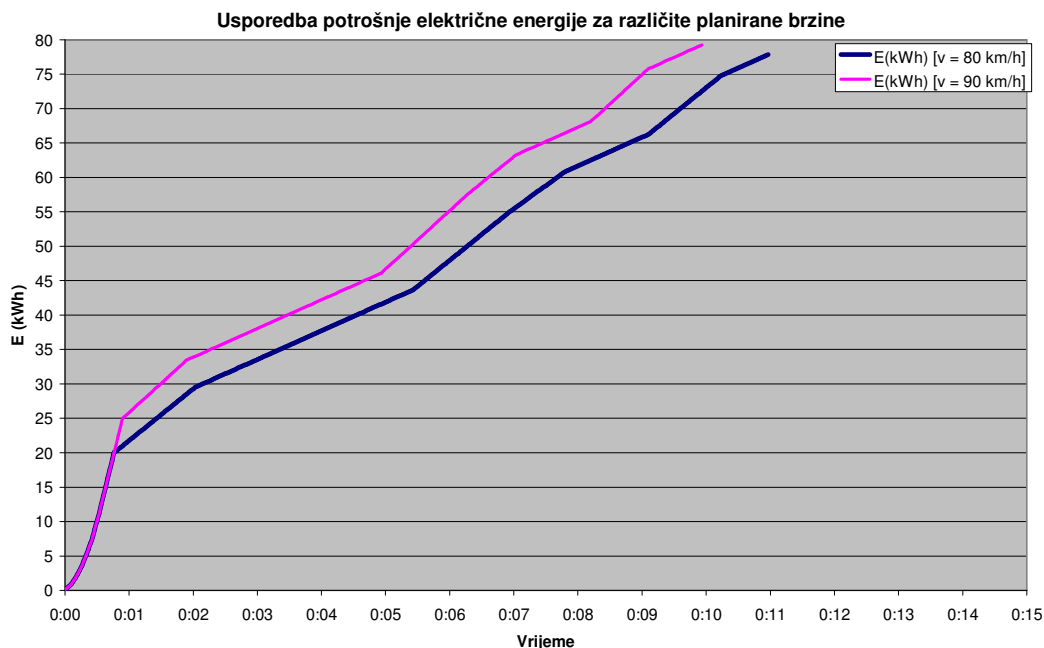


Slika 3.25. Utrošena djelatna energija elektromotornog vlaka s mogućnošću rekuperacije i bez nje

Naravno, ušteda energije ovisi o profilu pruge, smjeru kretanja i učestalosti potrebe za kočanjem elektromotornog vlaka. Rekuperacijom je omogućena ušteda energije i na postojećim trasama pruge, pa se mogućnost rekuperacije može uzeti u obzir pri projektiranju vučnog vozila i elektrovučnih podstanica.

### 3.5.4 Brzina

Ako planiranu brzinu iz prethodnog slučaja smanjimo s 90 km/h na 80 km/h (vrijeme trajanja puta povećalo se za oko 10 %), ušteda energije je oko 2%. Usporedba dobivenih rezultata prikazana je na slici 3.26, na kojoj je vidljivo da nije došlo do značajnije uštede energije pri proporcionalnom smanjenju brzine na svim dionicama za profil pruge naveden u tablici 3-6. Prema [43], ako se vrijeme trajanja puta vlaka produlji za 5 %, ili smanjenjem maksimalno dopuštene brzine vlaka, ušteda energije može iznositi i do 20 %.



Slika 3.26. Usporedba potrošnje energije za različite planirane brzine

Simulacija kretanja vlaka pokazuje da iznos uštede energije, pri proporcionalnom smanjenju planirane brzine dionica, ne ovisi značajno o profilu pruge već o masi vlaka. Uzimajući u obzir da ukupna masa elektromotornih vlakova nije velika, ta ušteda neće biti značajna za ovu vrstu vlakova.

Budući da se na profil postojeće pruge ne može bitno utjecati, kao parametar optimizacije ostaju uvjeti vožnje na promatranoj trasi pruge.

U nastavku će se dati vremenski prikaz utrošene djelatne energije jedne elektrovučne podstanice 25 kV, 50 Hz u dvosatnom vremenskom intervalu, dobiven elektrovučnim proračunom.

### 3.6 Potrošnja djelatne električne energije elektrovučne podstanice

Kontaktna mreža električne željeznice napaja se preko elektrovučnih podstanica, priključenih na elektroprivrednu mrežu. Postupci potrebni za dimenzioniranje i testiranje nove elektrovučne podstanice navedeni su u [38].

Na primjeru EVP-a 110/25 kV pokazati će se način proračuna potrošnje električne energije. Za proračun utrošene energije upotrebljava se prikazani algoritam simulacije kretanja vlaka iz kojeg se dobivaju podaci o vremenu, udaljenosti od EVP-a, potrebnoj djelatnoj i jalovoj snazi za kretanje vlaka. Iz podataka o svim vlakovima koji se kreću promatranom prugom može se formirati električna mreža. Za proračun su također neophodni podaci o transformatorima u EVP-ima, te duljinama krakova napajanja.

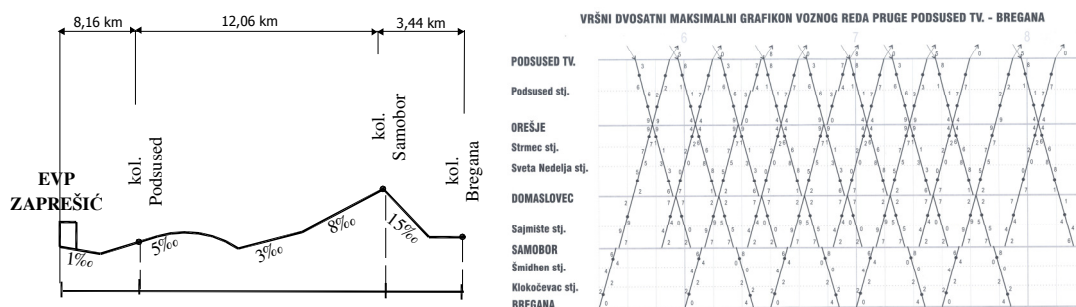
Formiranje je električne mreže u elektrovučnom sustavu na određeni način specifično, jer se shema napajanja mijenja u svakom trenutku. Pojedini vlakovi ulaze i izlaze iz područja napajanja, dok se drugi vlakovi zaustavljaju, pa na taj način nestaju kao potrošačko čvorište.

Nakon formiranja električne mreže slijedi elektrovučni proračun napajanja za pojedini EVP. Vremenski korak proračuna iznosi 2 sekunde za promatrani vremenski interval.

#### 3.6.1 Elektrovučni proračun napajanja elektrovučne podstanice

U nastavku će se prikazati rezultati elektrovučnog proračuna EVP-a, koji će napajati prigradsku prugu duljine 15,5 km namijenjenu isključivo za putnički prijevoz. Područje redovnog napajanja EVP-a 110/25 kV i lokacija navedene pruge shematski su prikazani na slici 3.15.

Pojednostavljeni uzdužni profil i dvosatni maksimalni grafikon voznog reda navedene pruge s ucrtanom lokacijom EVP-a prikazani su na slici 3.27.



Slika 3.27. Pojednostavljeni uzdužni profil i dvosatni maksimalni grafikon voznog reda promatrane pruge [44]

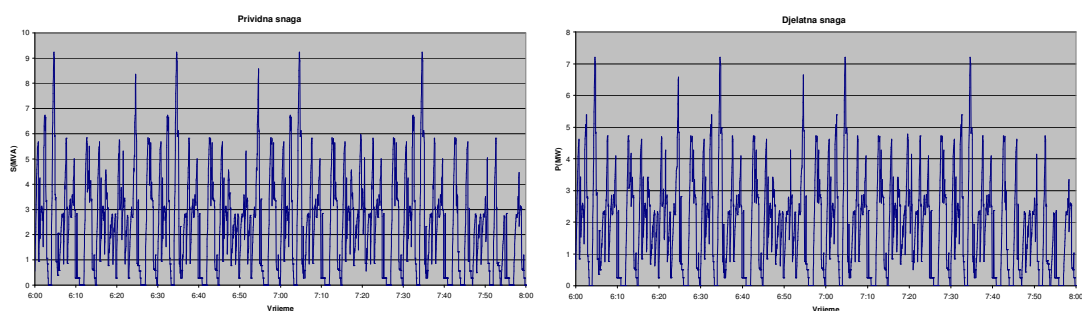
Promatrano je vrijeme najgušćeg prometa za dvosatni maksimalni grafikon reda vožnje (od 6.00 do 8.00 h).

Napajanje ove pruge odvija se voznim vodom (kontakti vodič  $100 \text{ mm}^2$  i nosivo uže  $75 \text{ mm}^2$  BZ II). Ukupna impedancija voznog voda iznosi  $0,181 + j0,447 \text{ } [\Omega/\text{km}]$ .

Duljina podstaničnog sektora EVP-a iznosi 23,8 km (8,3 km + 15,5 km).

U proračunu je pretpostavljeno da je EVP napajan s dva vučna transformatora nazivne snage  $S_n = 10 \text{ MVA}$  i napona kratkog spoja  $u_k = 10\%$ .

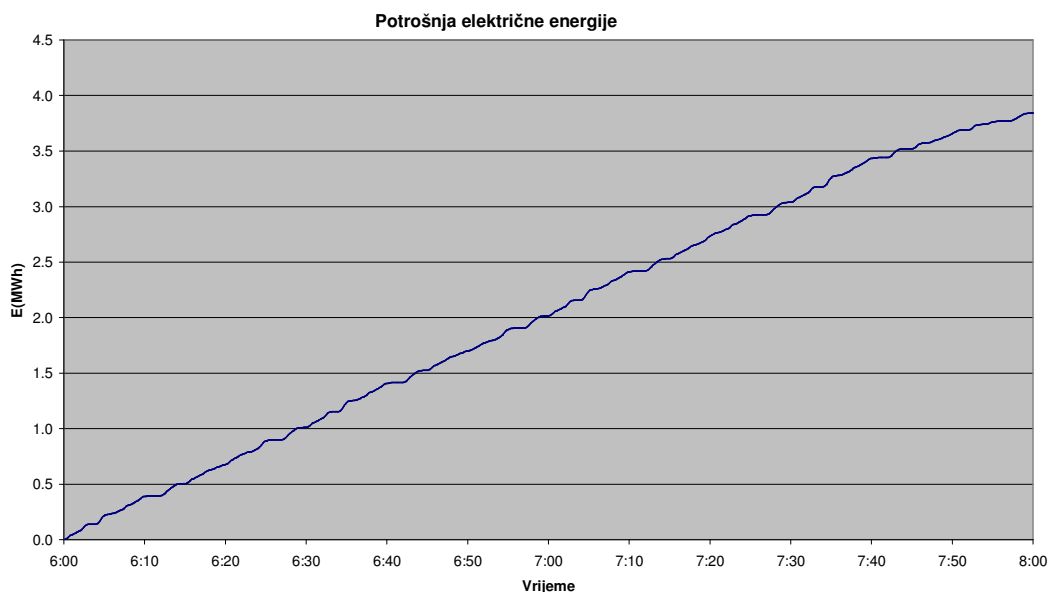
Prikaz nekih od rezultata dobivenih elektrovučnim proračunom za tu trasu pruge nalazi se na slikama 3.28.



Slika 3.28. Opterećenje EVP-a 110/25 kV prividnom i djelatnom snagom pri napajanju promatrane pruge

Iz slike 3.28. može se zaključiti da postoji razlika između prividne i djelatne električne snage, a time i potreba za kompenzacijom jalove snage pri napajanju električne vuče.

Potrošnja djelatne električne energije EVP-a 110/25 kV pri napajanju promatrane pruge, za dvosatni period, prikazana je na slici 3.29. U proračunima nije uzeta u obzir mogućnost rekuperacije.



Slika 3.29. Prikaz utrošene djelatne električne energije EVP-a

Uz pomoć elektrovučnog proračuna moguće je razmatrati utjecaj raznih faktora na potrošnju električne energije, poput brzine vlakova i načina njihova kretanja, gustoće prometa, rekuperacije, kompenzacije jalove energije i drugo.

## 4. Optimiranje potrošnje energije

Metode optimizacije omogućuju traženje najpovoljnijih rješenja različitih problema, a u današnje doba široka primjena metoda optimizacije, sa sve boljim rješenjima, omogućena je razvojem računala velike snage obrade podataka, koja je potrebna za postupke optimizacije, ali i razvojem odgovarajućih algoritama i programskih alata. Optimizacija zahtijeva određenu spregu znanja i dosta iskustva.

U nastavku će se izložiti kratki pregled problematike vezane uz metode optimizacije. Od evolucijskih metoda optimizacije, za analitičko istraživanje navedenog problema, do sada su se najčešće upotrebljavali *genetski algoritam* (GA) i *neizrazita logika*.

U [45] autori su razvili simulacijski model kretanja vlaka na osnovi genetskog algoritma za optimiranje voznog reda.

Autor u [46] uspoređuje primjenu najčešćih optimizacijskih metoda (dinamičko programiranje, neizrazita logika i genetski algoritam) na hibridnom višedimenzionalnom modelu troškova održavanja elektroenergetskog sustava sa zadanim ograničenjima. Rezultati usporedbe pokazuju da dinamičko programiranje daje najbolje rezultate.

Glavna primjena neizrazite logike u optimiranju je kod neprecizno definiranih sustava, tj. kada nije moguće postaviti model u obliku matematičkih izraza.

Kada se funkcije cilja sastoje od više varijabli optimizacije, kao što je u ovom slučaju, takvi vjerojatnosni modeli znatno su složeniji zbog matematičkog aparata vjerojatnosti i statistike pa će se u disertaciji nastojati nekom od numeričkih metoda optimizacije prikladno riješiti navedeni problem.

U [47] autori daju usporedbu između genetskog algoritma (GA) i metode sekvencijalnog kvadratnog programiranja (SQP) u rješavanju nelinearnih problema s ograničenjima. Na dva testna primjera dani su rezultati optimizacijskog postupka. Rezultati pokazuju da obje metode daju identične rezultate do određenog broja ulaznih varijabli. Za jako velike sustave genetski algoritam daje bolje rezultate funkcije cilja.

Prednosti i nedostaci SQP i GA-metode navedeni su u [48], gdje se autori koriste hibridnom metodom za rješavanje nelinearnog problema. Rezultati pokazuju kako je kombinacijom tih metoda potreban puno manji broj iteracija da bi se došlo do optimalnog rješenja nelinearnog problema.

Algoritam SQP-metode za rješavanje nelinearnih sustava prikazan je u [49], a algoritam metode projekcijskog gradijenta dan je u [50].

U [51] autori prezentiraju algoritam za Langrageovu metodu optimizacije primijenjene na nekonveksnim nelinearnim problemima.

Algoritam za poboljšanu Newtonovu metodu optimizacije nelinearnih problema kao i numerički rezultati dobiveni tom metodom za konkretni problem prikazani su u [52].

Pregled dosadašnjih pristupa u dinamičkom optimiranju nelinearnih problema naveden je u [53]. Prikazani su algoritmi za rješavanje nelinearnih problema s velikim brojem kontrolnih varijabli (eng. *large-scale problems*).

U [54], [55], [56] autori prezentiraju algoritam za modificiranu i kvazi-Newtonovu SQP metodu za optimizaciju problema s ograničenjima. Dani su usporedni numerički rezultati s tri algoritma prikladna za tu problematiku. Pokazano je, da uz neke pretpostavke, algoritam pokazuje jako dobru konvergentnost optimalnom rješenju.

Algoritam modificirane SQP-metode za nelinearno programiranje je prikazan u [57], [58], [59]. Numerički rezultati na testnom primjeru optimizacije nelinearnog problema s ograničenjima pokazuju dobru konvergentnost primijenjenog algoritma. U [60] autori prezentiraju primjenu SQP-metode na matematičkom modelu, a model sadržava nelinearna ograničenja. Rezultati optimizacije pokazuju uspješnu primjenu metode u optimiranju industrijskih postrojenja. U [61] su prikazani usporedni numerički rezultati metode dinamičke optimizacije i SQP-metode kao alternativne metode za optimizaciju nelinearnih problema.

## 4.1 Princip i osnove numeričke optimizacije

Optimizacija je u inženjerskom smislu postupak "maksimiziranja" ili "minimiziranja" nekog cilja u okvirima raspoloživih resursa, odnosno uz zadovoljavanje ograničenja koja objektivno postoje. To podrazumijeva sustavno traženje optimalnog rješenja zadanog inženjerskog problema s obzirom na definirane kriterije optimalnosti, a u uvjetima zadovoljavanja zadanih ograničenja [55].

Ukupni proces optimizacije sastoji se od slijedećih koraka:

- (1) odabira prikladne metode za razmatrani problem;
- (2) odabira parametara metode i dobre početne točke;
- (3) formiranja kvalitetnog modela s dobro definiranim varijablama te kriterijima optimalnosti i ograničenjima, te fizikalnog modela;
- (4) praćenje tijeka postupka;
- (5) interpretacije rezultata.

Numeričke su metode samo jedna od mogućnosti kako se mogu rješavati inženjerski problemi uz pomoć računala. Rješenje koje daje numerički postupak uvijek je aproksimacija čija točnost zavisi od definiranom kriteriju zaustavljanja. Osnovna prednost numeričkih postupaka je u tome da se rješenje može dobiti čak i u slučajevima kada nije moguće pronaći analitičko rješenje.

Za razliku od klasičnih primjena numeričkih postupaka u analizi, kod optimizacije je riječ o sintezi koja u svakoj iteraciji uključuje nužnost provedbe analize (simulacije odziva) promatranog sustava. Kod numeričke optimizacije, sinteza se, naravno, ne radi iskušavanjem svih mogućih rješenja niti na osnovi iskustva, nego su razvijeni postupci koji nova rješenja generiraju sustavno i učinkovito kako bi se do optimalnog rješenja došlo uz što manji utrošak računalnih resursa.

Kod postupka optimizacije specifično je da model problema ne obuhvaća samo fizikalno-matematički model razmatranog problema, već je potrebno definirati i elemente potrebne za sam proces optimiranja.

Dosadašnja istraživanja, čija je problematika bila teoretska analiza potrošnje energije u vuči električnih vlakova dovela su do zaključka da je moguća ušteda energije optimiranjem voznih karakteristika lokomotive.

Proračun potrošnje energije za vuču vlaka zahtijeva integraciju električne djelatne snage po vremenu. Budući da se snaga ne može egzaktno funkcijski odrediti, integracija se obično zamjenjuje numeričkim proračunom.



Budući da su ulazni parametri promjenjivi za svaki korak proračuna, treba razraditi dinamički model potrošnje energije vlaka.

Model za procjenu potrošnje energije vlaka sastoji se od tri dijela [43]:

1. Proračun energije potrebne za vučne motore;
2. Proračun potrošnje energije pomoćnih pogona;
3. Proračun energije dobivene rekuperacijom.

Energija za kretanje vlaka najviše ovisi o režimu kretanja vlaka i predstavlja najveći dio ukupne energije. Dio energije iskorištava se za pomoćne pogone vlaka (rasvjeta, klimatizacija...) i on ovisi o vrsti lokomotive i tipu vlaka.

Treći dio energije omogućen je ako je vučno vozilo predviđeno za rekuperaciju kada je moguće vratiti dio snage električne kočnice u mrežu.

U posljednje vrijeme računalni alati za simulaciju potrošnje energije vlaka najčešće se razvijaju u programskom jeziku C++ ili MATLAB.

Osnovni ulazni podaci za simulaciju kretanja vlaka su: profil pruge, vučne karakteristike lokomotiva, ograničenje brzina po dionicama i planirano vozno vrijeme. Kao parametri optimizacije nameću se vozne karakteristike lokomotiva (brzine na pojedinoj dionici kao i iznos akceleracije u režimu ubrzanja i iznos deceleracije u režimu kočenja vlaka), [40].

U [63], autori su analitičkim istraživanjem potrošnje energije za vuču vlaka pokazali da su maksimalno dopuštena brzina pojedine dionice i minimalno dopuštena brzina vožnje sa zaletom odlučujući faktori za potrošnju energije vlaka.

Optimiranje akceleracije i deceleracije putanje pojedinog vlaka na određenoj dionici također dovodi do uštede energije, posebno kod vlakova sa čestim pokretanjem i zaustavljanjem. Ujedno to dovodi do duljeg trajanja izvršavanja programskog koda za optimizaciju.

Definicija optimizacijskog problema u ovoj disertaciji je slijedeća: vlak kreće sa stajališta ili kolodvora početnom brzinom  $v_0 = 0$ . Nakon prijeđene udaljenosti  $S$ , dolazi na slijedeće stajalište ili kolodvor sa konačnom brzinom  $v_n = 0$ . Ukupno vrijeme potrebno da vlak prijeđe tu udaljenost  $S$  iznosi  $t_{uk}$  i ono je zadano voznim redom.

Kriterij optimalnosti ima opći oblik prema izrazu (4.1.1):

$$E(C) = \sum_{i=1}^n P_i \cdot \Delta t \rightarrow \min, \quad (4.1.1)$$

gdje je:  $E$  - funkcija cilja,

$C$  - vektor varijabli optimizacije,

$P_i$  - potrebna djelatna snaga za vuču vlaka u svakom koraku proračuna [MW],

$n$  - broj diskretiziranih vremenskih podintervala ( $T/\Delta t$ ),

$\Delta t$  - vremenski korak proračuna.

U ovom će se poglavlju provesti numerička optimizacija potrošnje energije za vuču pojedinog vlaka. Optimizacijski model dobiven je na osnovi matematičkog modela simulacije kretanja vlaka prikazanog u poglavlju 3.1.

U svakom koraku optimizacije uzimaju se u obzir optimalna rješenja u prethodnom koraku. Za optimiranje će se koristiti "modificirana SQP-metoda" numeričke optimizacije, koja je implementirana u programski jezik MATLAB. To je prvenstveno numerički alat koji uključuje specijalizirani paket funkcija za optimizaciju.

U nastavku će se navesti kategorije potrebne za definiranje optimizacijskog modela. *Varijable optimizacije* veličine su čije se vrijednosti određuju postupkom optimizacije i one predstavljaju slobodne veličine čiji broj određuje dimenzionalnost problema.

*Funkcija cilja*  $f(x)$  je funkcija čije vrijednosti odražavaju stupanj optimalnosti nekog rješenja s obzirom na zadane kriterije optimalnosti. Ovisno o definiciji problema može se tražiti minimum ili maksimum funkcije  $f$ .

Funkcija cilja obično je ekonomska kategorija (minimalni trošak, minimalna investicija, maksimalna dobit) i mora se formulirati zavisno od varijabala optimiranja. U standardnoj definiciji problema optimiranja traži se  $\min \{f(x)\}$ .

Ta se funkcija u literaturi još naziva *fitness-funkcija* ili *funkcija sposobnosti* i ona je ekvivalent funkcije  $f$  koju treba optimizirati.

*Ograničenja* su uvjeti koje rješenje mora zadovoljiti. Važno je napomenuti da ograničenja ne moraju biti linearna. Obično su zadana kao ograničenja nejednakosti u obliku nejednadžbi:

$$g(x) \leq 0, \quad (4.1.2)$$

odnosno ograničenja jednakosti u obliku jednadžbi:

$$h(x) = 0, \quad (4.1.3)$$

Navedene kategorije za optimizacijski problem razmatran u ovoj disertaciji, prikazane su sljedećim izrazom:

$$\begin{aligned} x &= \begin{bmatrix} v \\ a \end{bmatrix} \Rightarrow \text{vektor varijabli optimizacije} \\ \min E &= \sum \Delta E \Rightarrow \text{funkcija cilja} \\ \sum_{i=1}^n t_i &= \sum_{i=1}^n \frac{s_i}{v_i} - \frac{3}{4} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{v_i}{a_i} + \frac{5}{8} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{v_{i+1}^2}{a_i \cdot v_i} + \frac{v_1}{a_1} + \frac{v_n}{a_n} \leq t_{vr} \Rightarrow \text{ograničenje} \\ \left. \begin{aligned} n &= t_{vr} / \Delta t, \Delta t = t_{i+1} - t_i \\ 0 &\leq v_i \leq v(s_i), v_0 = 0, v_n = 0 \\ 0 &\leq t_i \leq t_{vr}, t_0 = 0, t_n = t_{vr} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \text{rubni uvjeti} \end{aligned} \quad (4.1.4)$$

gdje je:  $x = \begin{bmatrix} v \\ a \end{bmatrix}$  - vektor brzina i akceleracija pojedine dionice,

$[s]$  - vektor duljina pojedine dionice izražen u [km],

$t_{vr}$  - ukupno vrijeme simulacije kretanja vlaka izraženo u [h],

$v(s_i)$  - maksimalno dopuštena brzina pojedine dionice.

#### 4.1.1 Faze postupka optimizacije

Proces optimizacije počinje razmatranjem problema pri čemu se na temelju poznatih postavki iz teorije postavlja *fizikalni model* problema. Taj dio postupka rješavanja problema, modeliranje, najsloženiji je korak u procesu optimizacije i uključuje definiranje osnovnih fizikalnih veličina potrebnih za opis problema te njihovih međusobnih funkcionalnih ovisnosti, kao i različita ograničenja i ulazne parametre modela.

Drugi je korak formiranje adekvatnog *matematičkog modela* problema na temelju spomenutog fizikalnog modela. On služi za izvođenje potrebnih analiza na osnovi kojih se može doći do traženih odgovora u vezi s postavljenim problemom. Tu se postavljaju matematički izrazi i definiraju međusobne ovisnosti varijabli, na temelju kojih se može riješiti zadani problem.

Idući je korak postavljanje *algoritma* za rješavanje problema koji mora definirati računске korake, redosljed potrebnih radnji i druge elemente nužne za dobivanje rješenja na jednoznačan način koji se može izvršiti numeričkim putem. Današnji su algoritmi prilagođeni izvršavanju na računalu i u velikoj se mjeri temelje na numeričkim postupcima analize. Dobar algoritam mora se, između ostaloga, odlikovati slijedećim bitnim svojstvima:

- točnost dobivenog rješenja,
- općenita primjenjivost za pripadnu kategoriju problema,
- robusnost odnosno neosjetljivost na numeričke probleme,
- jednostavnost algoritma i primjene,
- brzina odnosno numerička učinkovitost,
- što manja potreba podešavanja parametara algoritma.

Simulacijski algoritmi najčešće su zasnovani na modelima uz određene pretpostavke s obzirom na stvarne uvjete. Tako u ovom algoritmu nisu uzeti u obzir neki specifični vanjski čimbenici koji utječu na potrošnju energije potrebne za vuču vlaka kao npr. jačina vjetrova pri kretanju vlaka (uzeta je neka srednja vrijednost), stanje pruga (provodi li se redovno održavanje kao i modernizacija) i sl.

Slično vrijedi i za neke unutarnje čimbenike koji se prvenstveno odnose na način vožnje strojovođe (koliko često koristi režimom rada sa zaletom, stil ubrzavanja i kočenja). S obzirom na to da ne postoje algoritmi koji idealno istovremeno zadovoljavaju sve ove zahtjeve, postoji cijeli niz metoda sa svojim prednostima i preporučenim područjima primjene. Kod numeričkih algoritama za traženje optimuma funkcije s ograničenjima iznimno su važni pojmovi "smjerovi pada funkcije" i "dopustivi smjerovi". Algoritmi traženja optimuma moraju poštovati ta svojstva i na odgovarajući se način kretati kroz domenu problema prema optimumu.

Slijedeći je korak izrada *programa* koji implementira algoritam i rješavanje problema na računalu. Budući da će se u ovoj disertaciji upotrijebiti gotovi specijalizirani programski paket za optimizaciju, programiranje se svodi na programsko kodiranje matematičkog modela promatranog problema, odnosno funkcije cilja, ograničenja te simulacije odziva sustava za različite vrijednosti varijabli optimizacije.

Na kraju slijedi korak *testiranja* programa koji indirektno verificira kako postavljeni matematičko-fizikalni model, tako i algoritam i programski postupak dobivanja rješenja. Testiranje se obavlja na skupovima podataka za koje su poznate ulazne veličine i pripadno fizikalno rješenje. Ako su utvrđene pogreške u rezultatima, moraju se selektivno pridijeliti pripadnom mjestu nastajanja, npr. postavljenom modelu, algoritmu ili programskoj realizaciji. Tada je moguće napraviti i određene korekcije modela i algoritma ako testovi pokažu potrebu [65].

Nalaženjem optimalnog rješenja nije završena analiza rješenja problema, već se ona upotpunjuje izvođenjem *analize osjetljivosti*, čiji je cilj ispitivanje problema u izlaznim vrijednostima modela kao posljedice promjena u pojedinačnim ulaznim parametrima simulacijskog modela. S pomoću nje dobije se stupanj osjetljivosti rezultata modela na male promjene ulaznih parametara modela.

Dijagram toka za navedene korake postupka optimizacije nalazi se na slici 4.1.

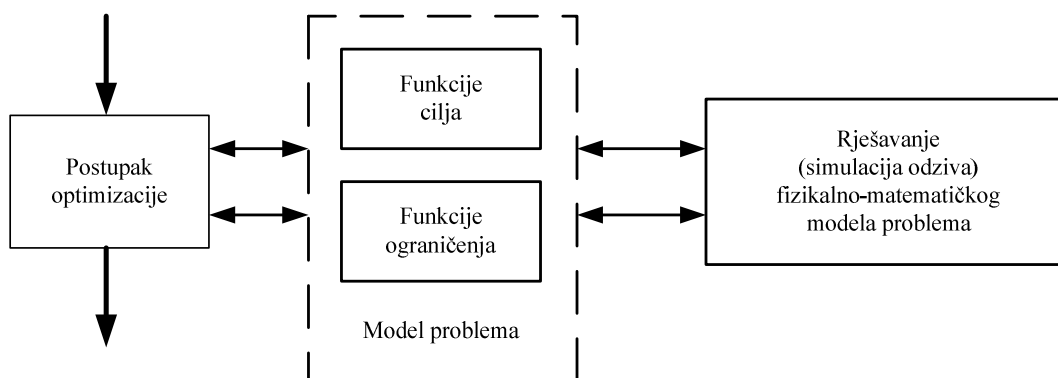


Slika 4.1. Dijagram toka postupka optimizacije

Kompletiranjem svih koraka prema prethodnom razmatranju nastaje specijalizirani optimizacijski numerički alat, u obliku programa na računalu, koji može rješavati probleme iz kategorije postavljenog modela.

## 4.2 Dijagram toka za numeričko optimiranje potrošnje energije električnih vlakova

Određivanje optimuma nelinearnih n-dimenzionalnih problema s ograničenjima najzastupljenije je u inženjerskoj praksi jer je većina fizikalnih modela nelinearna. Većina tehničkih problema zahtijeva formulaciju s ograničenjima. U konačnici je stoga riječ o rješavanju sustava s velikim brojem varijabli u nizu iteracija, što je uvjetovano kako optimizacijom tako i modelom sustava koji se optimira. Kod te kategorije problema proces optimizacije obično se može prikazati sljedećom shemom prikazanom na slici 4.2.



Slika 4.2. Dijagram toka optimizacije kod nelinearnih n-dimenzionalnih problema s ograničenjima

Fizikalni model problema često ne postoji u obliku gdje su funkcije cilja i ograničenja raspoložive u eksplicitnom obliku kao funkcionalna ovisnost odziva sustava na ulazne varijable. Tada su nužne numeričke simulacije odziva matematičkog modela koji često zahtijeva iterativno rješavanje, numeričku integraciju po vremenu, itd.

Optimizacija kod stvarnih problema zahtijeva kvalificirano praćenje i interveniranje na više razina u samom procesu, te je stoga samo stručnjak u tom području može provoditi kvalitetno. Odabir konkretne metode optimizacije, početnih točaka, kontrolnih parametara metode i niz drugih elemenata zahtijevaju kako poznavanje konkretnog tehničkog problema koji se rješava, tako i postupaka optimizacije, te uz to iziskuje i određeno iskustvo.

Postupci numeričke optimizacije kod problema s ograničenjima često vode i do numerički "slabo uvjetovanih" problema, a to označava situaciju kada mala promjena vrijednosti varijabli ili parametara problema (ulaz modela) uzrokuje veliku promjenu rješenja odnosno numeričkog odziva sustava (izlaz modela), [65].

Postojanje ograničenja unosi niz promjena u strategiju optimizacije jer ona definiraju dopustivu domenu problema te ih se mora uzeti u obzir za vrijeme cijelog postupka traženja optimuma. Prije same primjene postupka optimizacije potrebno je, naravno, provjeriti definiciju problema, jer loše postavljena ograničenja mogu dopustivu domenu pretjerano reducirati, te u krajnjem slučaju problem učiniti nerješivim.

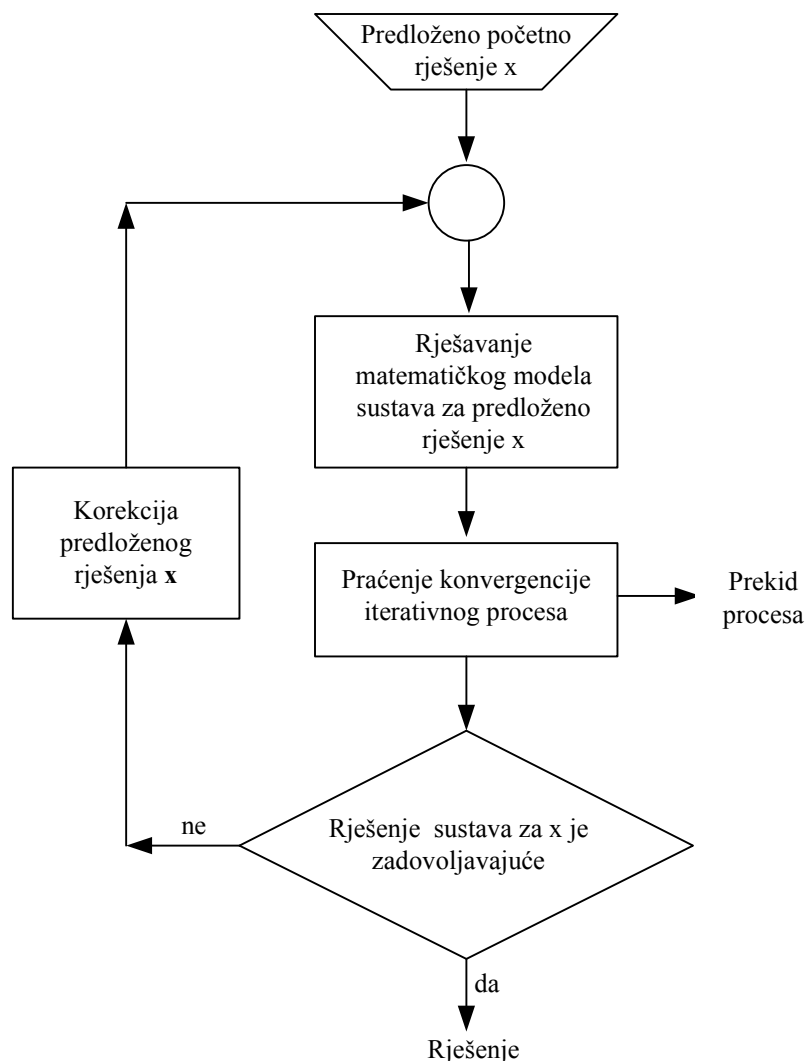
Kod optimiranja problema s ograničenjima glavni je cilj transformirati problem u lakše potprobleme koji se mogu riješiti i kasnije upotrijebiti kao osnova iterativnog procesa.

Iteracije su algoritamska shema rješavanja uzastopnim poboljšanjima predloženog rješenja prema shemi na slici 4.3.

Iterativni postupak rješavanja konvergira ako slijed rješenja u uzastopnim iteracijama teži prema optimalnom rješenju, odnosno greška se kroz iteracije smanjuje.

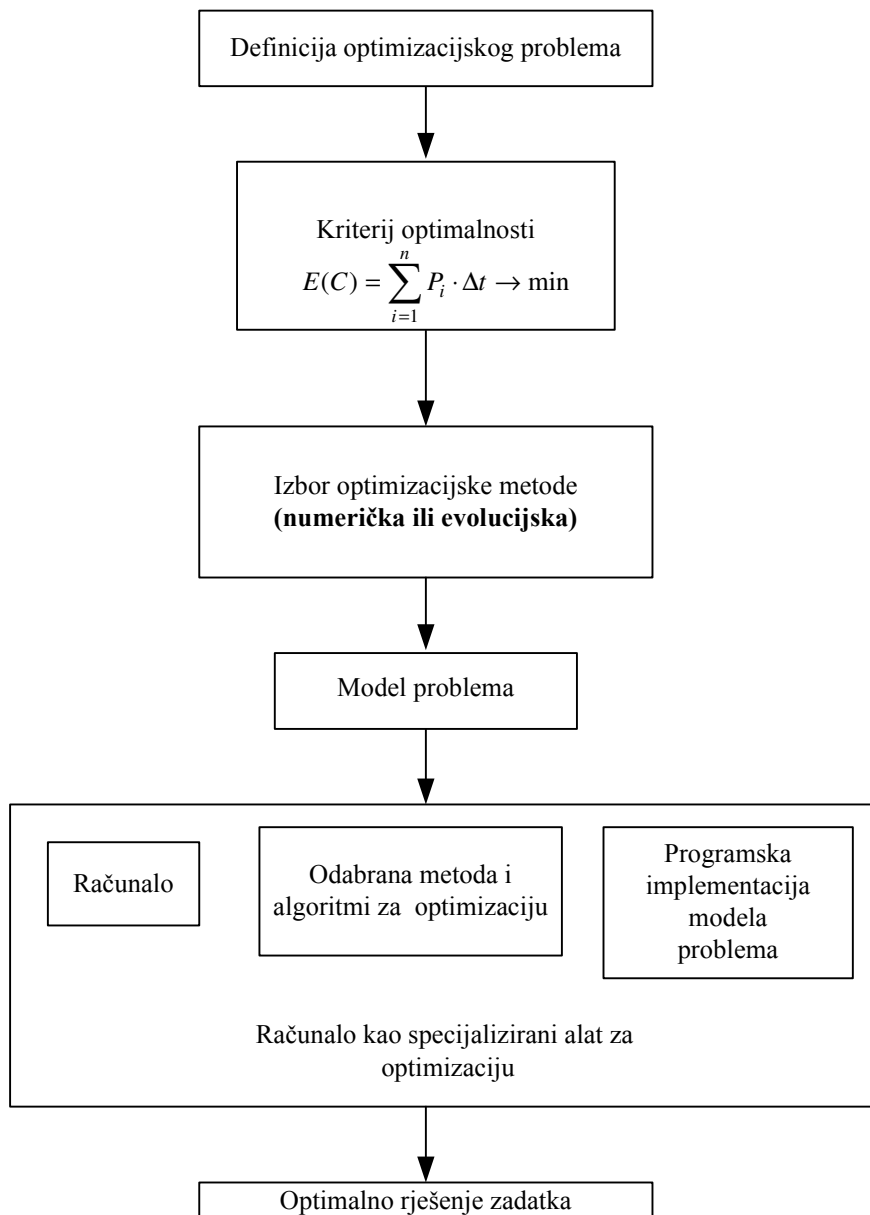
Proces konvergencije može se pratiti kroz iteracije i to kroz uzastopne promjene vrijednosti nekog od kriterija prihvaćanja rješenja (promjena vrijednosti funkcije cilja ili norma promjene vrijednosti vektora varijabli).

U suprotnom postoji divergencija pri čemu treba pokušati promijeniti početno rješenje, metodu rješavanja ili drukčije formulirati model problema.



Slika 4.3. Shema procesa iterativnog rješavanja

Numerička optimizacija predstavlja skup odgovarajućih metoda, algoritama te programa koji računalo nadograđuju u specijalizirani alat za optimiranje problema u praksi. Na slici 4.4. dana je infrastruktura numeričke optimizacije.



Slika 4.4. Infrastruktura numeričke optimizacije

Budući da je problem optimiranja potrošnje energije nelinearni problem s ograničenjima, u ovoj doktorskoj disertaciji istraživat će se prikladna metoda optimizacije za tu vrstu problema.

Složenost nelinearnog optimizacijskog problema ne zavisi samo od broja ulaznih varijabli optimizacije, već i o stupnju nelinearnosti.

U osnovi postoje dva različita pristupa u optimizaciji kod problema s ograničenjima. Prvi je izravno određivanje uz zadovoljavanje ograničenja, a drugi je transformacija problema na način da se zadovoljavanje ograničenja "ugradi" u funkciju cilja, kada se transformirani problem rješava kao problem bez ograničenja. U disertaciji će se upotrijebiti jedan od direktnih pristupa optimizaciji navedenog problema. Razvijena metoda je temeljena na dinamičkom programiranju i naziva se "modificirana SQP-metoda" zasnovana na sekvencijano kvadratnom programiranju.

### 4.3 Modificirana SQP-metoda

Ova metoda spada među klasične metode za optimizaciju nelinearnih problema s nelinearnim ograničenjima. To je iterativna metoda koja u svakoj iteraciji rješava kvadratni potproblem, a nelinearno ograničenje nastoji linearizirati. Prednosti su "modificirane SQP-metode" da početna točka ne mora biti u dopustivom području, potrebni su gradijenti samo aktivnih ograničenja, mogu se obuhvatiti ograničenja jednakosti i nejednakosti i definirana je funkcija pada.

Općeniti oblik optimizacijskog nelinearnog problema može se matematički izraziti kao [65]:

$$\begin{aligned} & f(x) \rightarrow \min \\ \text{uz: } & g_i(x) = 0 \quad i = 1, \dots, n \\ & h_i(x) \leq 0 \quad i = 1, \dots, m \end{aligned} \quad (4.3.1)$$

gdje je:  $f: R^n \mapsto R$  - nelinearna funkcija cilja;

$g: R^n \mapsto R^m$  - skup nelinearnih ograničenja jednakosti;

$h: R^n \mapsto R^m$  - skup nelinearnih ograničenja nejednakosti.

Uz pretpostavku da postoje samo ograničenja nejednakosti Langrangeova funkcija za optimizacijski nelinearni problem (4.3.1) dana je slijedećim izrazom.

$$L(x, \lambda) = f(x) + \lambda^T h(x) = f(x) + \sum_{j=1}^m \lambda_j \cdot h_j(x) \quad (4.3.2)$$

gdje je:  $\lambda$  – vektor Langrangeovih množitelja.

Izraz (4.3.2) pokazuje da je Langrangeova funkcija kombinacija funkcije cilja i ograničenja pomnoženih s Langrangeovim množiteljima  $\lambda$ , i da je broj varijabli u tog funkciji sada proširen za m Langrangeovih množitelja ( $\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_m$ ).

Nužni uvjeti za optimum Langrangeove funkcije glase:

$$\left. \begin{aligned} 0 = \nabla_x L(x^*, \lambda^*) &= \nabla f(x^*) + \nabla h(x^*)^T \lambda^* \\ 0 = \nabla_\lambda L(x^*, \lambda^*) &= h(x^*) \end{aligned} \right\} \rightarrow \text{nužni uvjeti} \quad (4.3.3)$$

Dodatni je uvjet kod ograničenja nejednakosti da odgovarajući Langrangeovi množitelji ( $\lambda_i$ ) moraju biti nenegativni tj.  $\lambda_i \geq 0$ .

Nužni uvjeti i dodatni uvjet predstavljaju Kuhn-Tuckerove (KT) nužne uvjete za optimum funkcije s ograničenjima.

SQP-metoda (u literaturi poznata po nazivu iterativna, sukcesivna ili rekurzivna) primjenjuje modificiranu Newtonovu metodu za rješavanje KT-uvjeta na izvornom problemu.



Metoda se svodi na određivanje *smjera kretanja* u svakoj iteraciji i nakon toga, uzduž tog smjera, 1D postupcima traženja određenje *minimuma funkcije pada*.

Da bi se to postiglo, potrebno je u svakoj iteraciji provesti tri glavne faze [62]:

- (1) rješavanje kvadratnog potproblema,
- (2) ažuriranje Hesseove matrice,
- (3) određivanje minimuma funkcije pada.

### 4.3.1 Rješavanje kvadratnog potproblema

Rješenje kvadratnog potproblema zasnovano je na kvadratnoj aproksimaciji Langrangeove funkcije (4.3.2) tj. rješavanju nužnih uvjeta za optimum te funkcije (4.3.3).

Riječ je o modifikaciji smjera najbržeg spusta (Cauchyev postupak) tako da budu zadovoljena aktivna ograničenja.

Rješavanjem tog problema, u svakoj iteraciji nastaje optimalni smjer kretanja ( $d^k$ ). U općem slučaju kvadratni potproblem poprima slijedeći oblik:

$$QP(x^k, \lambda^k) = \min_{d^k} \left\{ \nabla f(x^k)^T d^k + \frac{1}{2} (d^k)^T \nabla_{xx}^2 L(x^k, \lambda^k) d^k \right\} \quad (4.3.4)$$

$$\text{uz: } h_i(x) + \nabla h_i(x^k)^T d^k \leq 0, \quad i = 1, \dots, n_h$$

gdje je:  $\nabla_{xx}^2 L(x^k, \lambda^k) \rightarrow$  Hesseova matrica Langrangeove funkcije,  
 $d^k$  - vektor smjera kretanja.

Langrangeova funkcija i nužni uvjeti za optimum za sustav jednačbi (4.3.4) prikazani su u nastavku [62].

$$\begin{aligned} \tilde{L}(d, \mu) &= \nabla f(x)^T d + \frac{1}{2} d^T \nabla_{xx}^2 L(x, \lambda) d + \mu^T (h(x) + \nabla h(x)^T d) \\ 0 = \nabla_d \tilde{L}(d, \mu) &= \nabla f(x)^T + \nabla_{xx}^2 L(x, \lambda) d + \mu \nabla h(x)^T \\ 0 = \nabla_\mu \tilde{L}(d, \mu) &= h(x) + \nabla h(x)^T d \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} \tilde{L}(d, \mu) &= \nabla f(x)^T d + \frac{1}{2} d^T \nabla_{xx}^2 L(x, \lambda) d + \mu^T (h(x) + \nabla h(x)^T d) \\ 0 = \nabla_d \tilde{L}(d, \mu) &= \nabla f(x)^T + \nabla_{xx}^2 L(x, \lambda) d + \mu \nabla h(x)^T \\ 0 = \nabla_\mu \tilde{L}(d, \mu) &= h(x) + \nabla h(x)^T d \end{aligned}} \right\} \rightarrow \text{nužni uvjeti} \quad (4.3.5)$$

U nastavku slijedi kako se dolazi do izraza (4.3.5). Sustav jednačbi (4.3.3) koji je nužni uvjet za optimum Langrangeove funkcije rješava se Newtonovom metodom.

Postupak se sastoji od slijedećih koraka:

- (1)  $(x^0, \lambda^0)$  zadani,
- (2) u svakoj iteraciji iz  $(x^k, \lambda^k)$  računa se  $(x^{k+1}, \lambda^{k+1})$  pomoću jednačbi danih u izrazu (4.3.6),

$$\begin{aligned} F(x) &= 0 \\ DF(x^k)(x^{k+1} - x^k) &= -F(x^k) \end{aligned} \quad (4.3.6)$$

$$\text{pri čemu je : } DF(x^k) = \begin{pmatrix} \nabla_{xx}^2 L(x, \lambda) & \nabla_{\lambda x}^2 L(x, \lambda) \\ \nabla_{x\lambda}^2 L(x, \lambda) & \nabla_{\lambda\lambda}^2 L(x, \lambda) \end{pmatrix} \quad (4.3.7)$$

Kada se izraz (4.3.7) uvrsti u (4.3.6) i (4.3.3) dobije se sljedeći nelinearni sustav jednažbi matrično zapisan.

$$\begin{pmatrix} \nabla_{xx}^2 L(x, \lambda) & \nabla h(x^k)^T \\ \nabla h(x^k) & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x^{k+1} - x^k \\ \lambda^{k+1} - \lambda^k \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \nabla_x L(x^k, \lambda^k) \\ \nabla_\lambda L(x^k, \lambda^k) \end{pmatrix} \quad (4.3.8)$$

Uvrštavanjem  $d^k = x^{k+1} - x^k$ , slijedi matrično zapisan sustav nelinearnih jednažbi.

$$\begin{pmatrix} \nabla_{xx}^2 L(x, \lambda) & \nabla h(x^k)^T \\ \nabla h(x^k) & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d^k \\ \lambda^{k+1} - \lambda^k \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \nabla f(x^k) + \nabla h(x^k)^T \lambda^k \\ h(x^k) \end{pmatrix} \quad (4.3.9)$$

Sustav jednažbi (4.3.9) ekvivalentan je sljedećem sustavu:

$$\begin{aligned} \nabla_{xx}^2 L(x^k, \lambda^k) \cdot d^k + \nabla h(x^k)^T (\lambda^{k+1} - \lambda^k) &= -\nabla f(x^k) - \nabla h(x^k)^T \lambda^k \\ \nabla h(x^k) \cdot d^k &= -h(x^k) \end{aligned} \quad (4.3.10)$$

Rješavanjem zagrada u prvoj jednažbi sustava (4.3.10) dobije se sustav jednažbi:

$$\begin{pmatrix} \nabla_{xx}^2 L(x, \lambda) & \nabla h(x^k)^T \\ \nabla h(x^k) & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d^k \\ \lambda^{k+1} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \nabla f(x^k) \\ h(x^k) \end{pmatrix} \quad (4.3.11)$$

Nakon što se u k-toj iteraciji odredi vektor smjera kretanja  $d^k$ , prelazi se na (k+1) iteraciju, u kojoj se za vektor varijabli optimizacije postavi  $x^{k+1} = x^k + d^k$ . Proces se ponavlja sve dok vektor  $d^k$  ne poprimi vrijednost približno nula.

Izraz (4.3.11) ekvivalentan je izrazu (4.3.5), pa je time dokazana opravdanost izraza (4.3.4) za općeniti kvadratni potproblem.

Općeniti oblik kvadratnog potproblema, koji se rješava u svakoj iteraciji, može se jednostavnije zapisati kao:

$$\begin{aligned} \min_{d \in \mathbb{R}^n} q(d) &= \frac{1}{2} d^T H d + c^T d \\ A_i d &\leq b_i \quad i = 1, \dots, m \end{aligned} \quad (4.3.12)$$

gdje je:  $c = \nabla f(x)$  - gradijent funkcije cilja,

$H$  - Hesseova matrica Langrangeove funkcije.

U svakoj iteraciji izraz (4.3.11) nastoji se minimizirati i na taj način odrediti optimalni smjer kretanja  $d^k$ .

Faza određivanja smjera kretanja bitan je korak kod n-dimenzionalnih (nD) problema s ograničenjima, jer mora osigurati kako pad funkcije tako i zadovoljavanje ograničenja.

Glavna razlika u odnosu na postupke kod nD-optimizacije bez ograničenja je u određivanju smjera kretanja, koje ovdje mora obuhvatiti i učinak ograničenja.

Dopustivi smjer  $d$  definira se iz neke dopustive početne točke, odnosno točke u dopustivom području koja zadovoljava ograničenja zadana izrazom (4.3.3).

Smjer  $d$  je dopustiv ako postoji neki  $\alpha > 0$  tako da i nova točka  $(x_i + \alpha \cdot d)$  bude u dopustivom području.

Postupak rješenja kvadratnog potproblema uključuje dvije faze. U prvoj fazi odabire se početni vektor varijabli optimizacije  $x^0$ , koji se nalazi u dopustivom području s obzirom na ograničenje (ako takav postoji).

Druga faza uključuje generiranje iterativnog slijeda mogućih rješenja optimiranog vektora  $x$  koji konvergiraju prema optimalnom rješenju.

Matrica  $A_k$  ažurira se u svakoj iteraciji s pomoću QR-rastava, i u osnovi se upotrebljava za određivanje vektora smjera kretanja  $d^k$ .

QR-rastavom matrica  $A_k$  rastavlja se na produkt matrica  $Q$  (ortogonalna matrica) i  $R$  (gornje trokutasta matrica). Pri tome je:

$$Q^T A_k^T = \begin{bmatrix} R \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.3.13)$$

Dopustivi smjer  $d^k$  određuje se na osnovi matrice  $Z_k$ , čiji su stupci ortogonalni s obzirom na matricu  $A_k$ , tj. vrijedi  $A_k Z_k = 0$ .

Matrica  $Z_k$  formirana je od zadnjih  $m-l$  stupaca matrice  $Q$ , pri čemu  $l$  predstavlja broj aktivnih ograničenja.

$$Z_k = Q[:, l+1 : m] \quad (4.3.14)$$

Kada je matrica  $Z_k$  formirana, vektor  $d^k$  nastoji se prikazati kao linearnu kombinaciju stupaca matrice  $Z_k$  za neki vektor  $p$ .

$$d^k = Z_k^T p \quad (4.3.15)$$

Tada izraz (4.3.12) prelazi u:

$$q(p) = \frac{1}{2} p^T Z_k^T H Z_k p + c^T Z_k p \quad (4.3.16)$$

Gradijent od izraza (4.3.16) u odnosu na  $p$  iznosi:

$$\nabla q(p) = Z_k^T H Z_k p + Z_k^T c \quad (4.3.17)$$

Izraz (4.3.17) predstavlja projicirani gradijent kvadratnog potproblema, a izraz  $Z_k^T H Z_k$  naziva se projicirani Hessian. Uz pretpostavku da je matrica  $H$  pozitivno definitna, minimum funkcije  $q(p)$  definiran je matricom  $Z_k$ , dobivenom kada se izraz (4.3.17) izjednači s nulom. Tada se dobiva linearni sustav jednažbi:

$$Z_k^T H Z_k p = -Z_k^T c \quad (4.3.18)$$

Iznos vektora optimizacije u sljedećem koraku uzima se prema sljedećem izrazu.

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \alpha \cdot d^{(k)} \quad (4.3.19)$$

gdje je:  $\alpha$  - parametar koji predstavlja duljinu koraka po smjeru kretanja  $d^k$ .

Vektor  $d^k$  određen je prema izrazu (4.3.15). S obzirom na vrstu potproblema postoje dva izbora za određivanje parametra  $\alpha$ . To je jedinični korak duž smjera kretanja ( $\alpha = 1$ ) ili prema sljedećem izrazu:

$$\alpha = \min_i \left\{ \frac{-(A_i x_k - b_i)}{A_i d_k} \right\} \quad i = (1, \dots, m) \quad (4.3.20)$$

Algoritam zahtijeva da se početna točka nalazi u dopustivom području. Ako se ulazni vektor varijabli u nekoj od iteracija ( $x^k$ ) ne nalazi u dopustivom području, nastoji se postojeći potproblem riješiti s pomoću jedne od metoda linearnog programiranja.

### 4.3.2 Ažuriranje Hesseove matrice

U modificiranoj SQP-metodi primjenjuje se *kvazi-Newtonov* postupak konvergencije. Kod tog postupka pokušava se Newtonov postupak modificirati na način da se druge derivacije (Hesseova matrica) Langrangeove funkcije ne računaju analitički, već se matrica aproksimira primjenom prvih derivacija i upotrebom informacija iz prethodnih iteracija.

Time je uklonjen glavni nedostatak Newtonovog postupka kod kojeg su potrebna izračunavanja Hesseove matrice u svakoj iteraciji. Pri tome se najčešće upotrebljava Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS) formula za aproksimaciju Hesseove matrice [62]:

$$H^{(k+1)} = H^{(k)} + \frac{y^{(k)} y^{(k)T}}{(y^{(k)} \cdot s^{(k)})} + \frac{c^{(k)} c^{(k)T}}{(c^{(k)} \cdot d^{(k)})}$$

$$s^{(k)} = x_{k+1} - x_k = \alpha_k \cdot d^{(k)} \quad , \quad (4.3.21)$$

$$y^{(k)} = c^{(k+1)} - c^{(k)}$$

gdje je:  $H$  - aproksimacija Hesseove matrice (pozitivno definitna matrica),  
 $c$  - gradijent funkcije  $f$ ,  
 $k$  - redni broj iteracije,  
 $y$  - vektor promjene gradijenta,  
 $s$  - vektor promjene bazne točke u domeni.

Za to je važno odrediti vektor gradijenta i Hesseovu matricu funkcije Langrangeove funkcije. To je simetrična matrica čiji su elementi druge parcijalne derivacije funkcije. Ona je važna i zbog određivanja svojstva ekstrema. U svakoj iteraciji nastoji se matrica  $H$  modificirati da bude pozitivno definitna jer je to dovoljan uvjet za optimum funkcije.

Ako je ona pozitivno definitna (sve vlastite vrijednosti pozitivne) u nekoj točki  $x$  u kojoj je gradijent (parcijalne derivacije prvog reda funkcije po varijablama) nula, riječ je o lokalnom ili globalnom minimumu.

U prvoj se iteraciji za  $H$  odabire neka simetrična pozitivno definitna matrica, npr. matrica identiteta  $I$ .

### 4.3.3 Određivanje minimuma funkcije pada

Kod problema s ograničenjima, napredovanje prema minimumu uz zadovoljavanje ograničenja može se pratiti kroz vrijednost *funkcije pada*, koja se formulira tako da integralno obuhvaća izvornu funkciju cilja i iznos narušavanja ograničenja.

Ovdje je potrebno istovremeno zadovoljiti smanjivanje vrijednosti funkcije cilja i uvjete zadovoljavanja ograničenja.

S obzirom na to da gradijent funkcije ima smjer najbržeg rasta funkcije, smjer pada funkcije  $d$  mora ležati u poluravnini suprotnoj od gradijenta funkcije  $f$ , tj. s njim zatvarati kut od  $90^\circ$  do  $270^\circ$ .

Općeniti oblik funkcije pada prikazuje se kao:

$$\Phi(x) = f(x) + R \cdot V(x) \quad (4.3.22)$$

gdje je:  $R$  - kazneni parametar (suma svih Langrangeovih množitelja),  
 $V(x)$  - najveće prekoračenje (narušavanje) ograničenja u cijelom skupu ograničenja.

Kazneni parametar izračunava se s pomoću sljedećeg izraza [66], [67].

$$R = \frac{\|\nabla f(x)\|}{\|\nabla h(x)\|} \quad (4.3.23)$$

gdje je:  $\| \cdot \|$  - euklidova norma vektora.

*Smjer pada funkcije* je bilo koji smjer  $d$  iz trenutačne točke  $x_i$ , u kojem funkcija cilja smanjuje vrijednost u odnosu na trenutačnu točku, što se može prikazati slijedećim izrazom:

$$f(x_i + \alpha \cdot d) < f(x_i), \quad (4.3.24)$$

gdje je:  $\alpha$  - parametar koji predstavlja duljinu koraka po pravcu  $d$ .

Parametar  $\alpha \geq 0$  određuje se jednom od metoda 1D-postupka optimizacije i pri tome treba zadovoljiti uvjet zadan slijedećim izrazom, koristeći se informacijama iz prethodnih iteracija.

$$\|\Phi(x_{k+1})\| \leq \|\Phi(x_k)\| \quad (4.3.25)$$

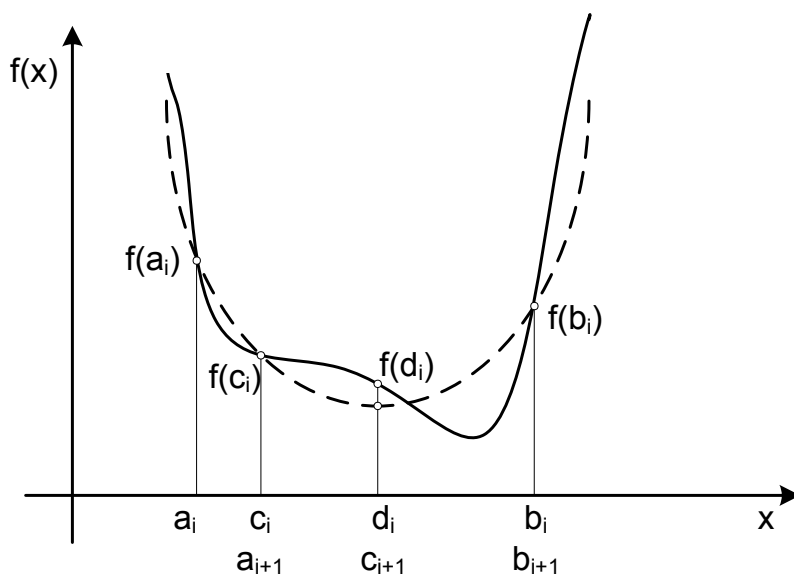
Nakon što se rješenjem prethodnog kvadratnog potproblema odredi smjer kretanja ( $d$ ), potrebno je uzduž tog smjera, 1D-postupcima traženja, odrediti minimum funkcije pada.

Jedan od tih postupaka, kod određivanja 1D-minimuma, je *postupak kvadratne interpolacije* koji se zasniva na pretpostavci da ako se funkcija u okolišu minimuma ponaša približno kvadratno onda se redukcija intervala u kojem leži minimum može provesti kvadratnom interpolacijom. Postupak kvadratne interpolacije (slika 4.5.) primjenjuje se na unaprijed zadanom unimodalnom intervalu ( $a, b$ ), unutar kojeg se nalazi samo jedan minimum te funkcije i unutar kojeg je odabrana jedna točka  $c$ . Kroz točke  $a, b$  i  $c$  definira se parabola. Tada se prema slijedećem izrazu odredi minimum interpolirane parabole ( $d$ ).

$$d = \frac{1}{2} \cdot \frac{(c^2 - b^2) \cdot f(a) + (a^2 - c^2) \cdot f(b) + (b^2 - a^2) \cdot f(c)}{(c - b) \cdot f(a) + (a - c) \cdot f(b) + (b - a) \cdot f(c)}, \quad (4.3.26)$$

Nakon toga provodi se redukcija intervala odbacivanjem jednog od rubnih podintervala ovisno o odnosima točaka  $c$  i  $d$  te odnosima vrijednosti funkcije u tim točkama.

Taj postupak završava kada se minimum ograniči s unaprijed zadanim, po volji malim intervalom.



Slika 4.5. Postupak kvadratne interpolacije

Kada se dobije duljina koraka po pravcu  $d^k$  koji osigurava pad funkcije cilja, odnosno minimum funkcije pada po tom pravcu, ide se u sljedeću iteraciju po algoritmu SQP-metode, tj. slijedi rješavanje novog QP-potproblema u novodobivenoj točki za određivanje novog smjera  $d^{(k+1)}$ .

Nakon tog postupka, u  $(k+1)$  iteraciji, vektor varijabli optimizacije poprima vrijednost prema izrazu (4.3.19) [67].

Iznos parametra  $\alpha$  predstavlja najčešće računalnu efikasnost i konvergentnost izabrane iterativne metode. Ako je  $\alpha$  jako mali, to može dovesti do spore konvergencije optimizacijskog postupka, ako je prevelik, može doći do divergencije. Ponekad je potrebno više iteracija da bi se odredio optimalni parametar  $\alpha$ , pa se s obzirom na složenost optimizacijskog postupka često upotrebljava izraz (4.3.20) za njegovo određivanje u pojedinoj iteraciji.

Kriterij zaustavljanja optimizacijskog postupka određen je formulama u sljedećem izrazu.

$$\begin{aligned} \left| \frac{f(x^k) - f(x^{(k-1)})}{f(x^k)} \right| &< \varepsilon \\ \left| \frac{x^k - x^{(k-1)}}{x^k} \right| &< \varepsilon \\ |V| &\leq \psi \end{aligned} \tag{4.3.27}$$

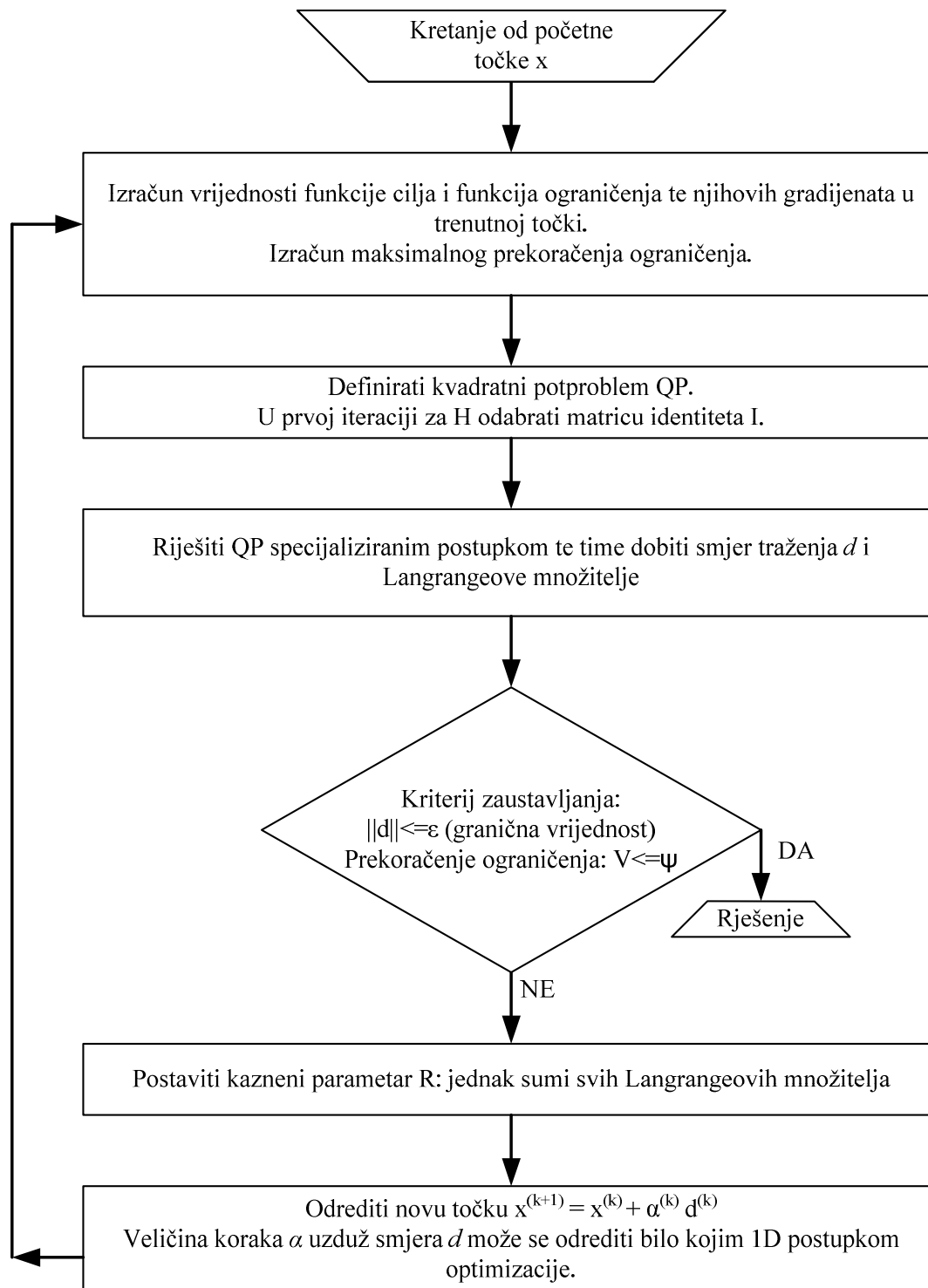
gdje je:  $\varepsilon$  - mali pozitivni broj,  
 $\psi$  - dopušteno narušavanje ograničenja.

Broj matematičkih operacija potrebnih u svakoj iteraciji proporcionalan je broju diskretiziranih vremenskih podintervala.

"Modificirana SQP-metoda" spada među bolje opće metode optimizacije jer kombinira prednosti metoda najbržeg pada i Newtonove metode.

#### 4.3.4 Dijagram toka "modificirane SQP-metode"

Na slici 4.6. prikazan je pojednostavljeni dijagram toka "modificirane SQP-metode" koji obuhvaća tri glavne faze u postupku optimizacije.



Slika 4.6. Pojednostavljeni dijagram toka SQP-metode



## 4.4 Programska podrška simulacije električne vuče

Budući da softver MATLAB uključuje specijalizirani paket funkcija za optimizaciju, programski kod modela za simulaciju kretanja vlaka napisan je u tom programskom jeziku, koristeći se grafičko korisničkim sučeljem (GKS) [64].

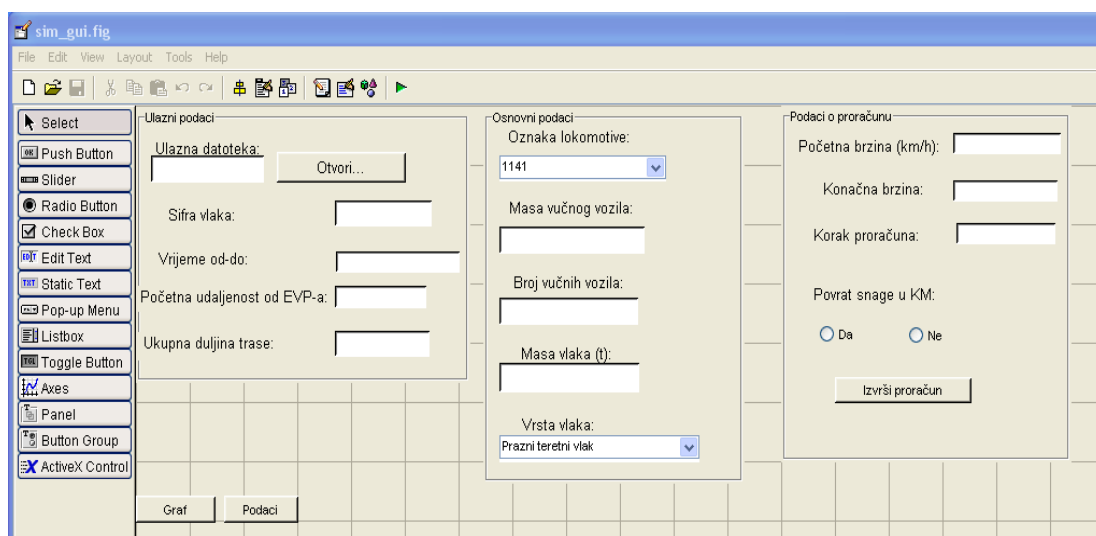
Za zadanu dionicu pruge i zadani vlak računaju se položaji i snage koje vlak uzima iz mreže. Vremenski korak proračuna zadaje korisnik prije početka proračuna.

Algoritam je prilagođen za nazivne karakteristike električnih lokomotiva tipa 1141, 1142, 1161, ES64U4 (asinkrona lokomotiva) te za elektromotorni vlak tipa 6111.

U matematičkom modelu izrađenom u C# [30], za akceleraciju i deceleraciju uzima se konstantna vrijednost zbog tromosti samog sustava, a ovom će se modelu iznos akceleracije i deceleracije optimirati za pojedini tip lokomotive.

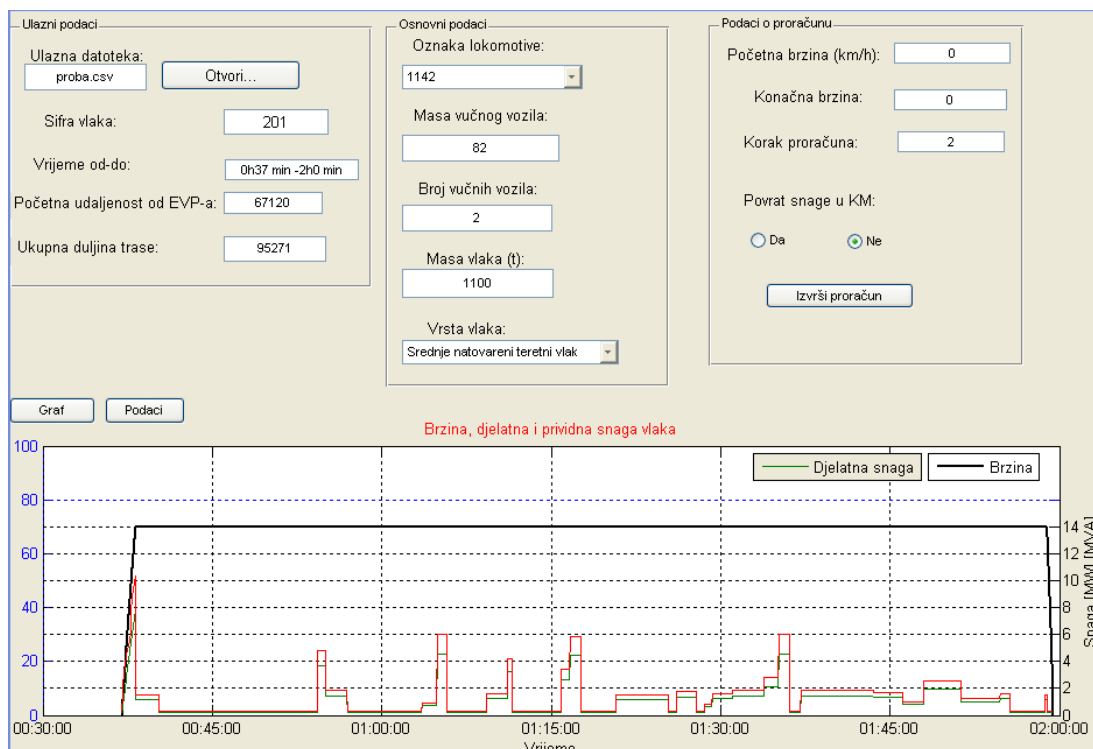
Simulator kretanja vlaka pokreće se iz komandnog prozora MATLAB-a (File - New - GUI) odabirom fila *sim\_gui.fig*. Nakon toga otvora se prozor prikazan na slici 4.7.

Na slici 4.7. vidi se da se prozor sastoji od tri dijela, to su ulazni podaci (profil pruge), osnovni podaci (karakteristike lokomotive i vlaka) i podaci o proračunu.



Slika 4.7. Izgled prozora pri pokretanju MATLAB GKS-alata

Nakon unosa potrebnih podataka i pokretanjem naredbe za izvršavanje programa dobije se prikaz izlaznih podataka simulatora kao što je prikazano na slici 4.8.



Slika 4.8. Izgled prozora simulatora kretanja vlaka

Simulator kretanja vlaka određuje, u svakom koraku proračuna, položaj i brzinu vlaka, zatim potrošnju djelatne i jalove snage pojedinog vlaka. Nakon toga određuje se potrošnja energije vlaka prema izrazu (3.1.11).

Rezultati simulatora kretanja vlaka pokazuju da je iznos energije potrebne za vuču vlaka na određenoj relaciji najmanji ako je brzina pojedine dionice konstantna, tj. ako cijelim putem vlak vozi konstantnom brzinom.

Do istog se zaključka dolazi na osnovi izraza za matematički model simulacije kretanja vlaka. Međutim, zbog različitog profila pruge maksimalna dopuštena brzina na pojedinoj dionici najčešće nije istog iznosa.

Rezultati simulacije također pokazuju da ušteda energije za vuču teretnih vlakova može iznositi i do 9 % ako se izbjegnu nepotrebna kočenja zbog restrikcije brzine na pojedinim dionicama i tome adekvatno poveća udio vožnje sa zaletom prije kočenja. Pri tome se vrijeme vožnje neznatno poveća, a da pri tome vozni red nije narušen [63].

Programski kod za uređivanje podataka nalazi se u datoteci (M-file) `sim_gui.m`. Izvršavanje tog programa traje dulje nego kod C# zbog same konfiguracije programskog jezika MATLAB-a, ali dobiveni rezultati potpuno su identični.

Rezultati simulatora kretanja vlaka dobiveni na slici 4.8. ne uključuju optimiranje. Optimiranje dolazi do izražaja posebno kod putničkih i elektromotornih vlakova zbog njihova intenzivnijeg pokretanja i zaustavljanja. Dobiveni rezultati pokazuju da vlak najveću snagu iz mreže uzima pri samom pokretanju.

## 4.5 Primjena numeričkog alata u optimizaciji

Rješavanje mnogih praktičnih optimizacijskih problema danas je moguće s pomoću računala, uporabom nekih od komercijalnih programa, a jedan od njih je i MATLAB.

Kao što je prethodno navedeno, MATLAB između ostalog sadržava i komercijalni programski paket *Optimization Toolbox*, koji uključuje specijalizirane funkcije za optimizaciju. Te funkcije implementiraju cijeli niz algoritama. Pregled cijelog paketa dobiva se naredbom *help optim*.

Uz primjenu gotovih funkcija za optimizaciju može se, naravno, izraditi i vlastita funkcija, a također je moguće modificirati postojeće funkcije.

Nakon primjene funkcija za optimizaciju nužno je provesti ispravnost rješenja u čemu pomažu i rezultati ponuđeni u strukturama *OUTPUT* (daje informaciju o broju obavljenih iteracija i izračuna funkcije te parametrima primijenjenog algoritma), *EXITFLAG* (daje informaciju o konvergenciji procesa).

Složenost procesa numeričke optimizacije posljedica je niza činjenica, kao što su:

1. Složenost fizikalno-matematičkog modela problema (velik broj varijabli optimizacije, visoka nelinearnost problema...),
2. Numerički zahtjevno rješavanje matematičkog modela problema (postupci optimiranja višestruko su iterativni),
3. Složenost samog postupka optimizacije.

U osnovi, nakon definiranja optimizacijskog problema slijedi programiranje funkcije cilja i ograničenja, a zatim definiranje odgovarajućih parametara potrebnih za optimizacijski postupak. Problem optimizacije za funkciju cilja, u ovoj disertaciji, ima minimum potrošnje energije vlaka uz zadovoljavanje voznog reda. Programski kod funkcije cilja nalazi se u datoteci (M-file) pod nazivom "Energ\_opt.m" i prikazan je u Prilogu I.

Algoritmi za nekoliko metoda namijenjenih za rješavanje ovakve vrste problema navedeni su u [66], [67], [68].

### 4.5.1 Praktična primjena

Za optimizaciju se koristio solver *fmincon* () koji je implementiran u *Optimization Toolbox* i upotrebljava se za minimizaciju nelinearnih višedimenzionalnih problema uz ograničenja tipa linearnih i nelinearnih jednadžbi odnosno nejednadžbi i fiksnih limita na optimirani vektor.

Primijenjeni algoritam ("*medium scale*" opcija) u tom *solveru* postupak je sekvencijalno kvadratnog programiranja. Taj je algoritam odabran jer samo on omogućuje ograničenja i rubne uvjete optimiranog vektora u optimizacijskom postupku.

Prilikom pokretanja optimizacijskog postupka u "radnom prozoru" MATLAB-a se otvori prozor prikazan na slici 4.9, koji predstavlja grafičko korisničko sučelje za optimizacijski postupak.

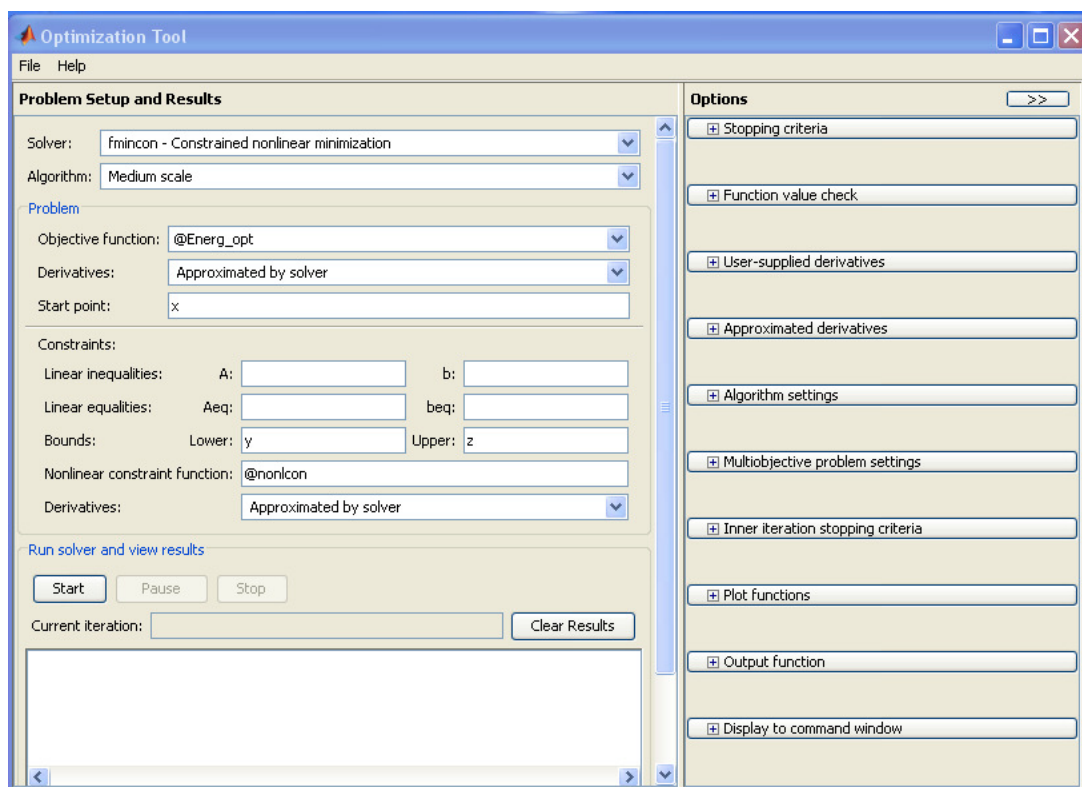
Nakon što se ispune izbornici u drugom okviru koji omogućuju stvaranje i uređivanje opcija optimizacijskog postupka, pokreće se optimizacijski postupak.

Za vrijeme trajanja optimizacijskog postupka omogućen je prikaz kretanja vrijednosti vektora varijabli optimizacije, za svaku iteraciju, i na kraju se prikazuje optimalna vrijednost funkcije cilja. Ako su utvrđene neke pogreške u optimizacijskom postupku, dolazi do prekida optimizacije i tada se mora utvrditi uzrok toga prekida koji može biti višestruk.

Na slici 4.9. vidi se da postoje dva okvira (svaki od njih sadržava veći broj izbornika) u sklopu glavnog prozora za optimizacijski postupak, a to su:

- odabir prikladnog optimizacijskog algoritma i prikaz rezultata optimizacije,
- odabir kriterija optimizacijskog postupka.

Prvi izbornik omogućuje odabir prikladne funkcije za optimizaciju navedenog problema, a zatim i algoritma. Nakon toga treba navesti naziv funkcije cilja u kojoj se nalazi programski kod optimizacijskog problema, vrstu optimizacijskog postupka, a zatim i vektor varijabli optimizacije.



Slika 4.9. Prikaz grafičkog sučelja programskog alata "Optimization Toolbox"

Vektor varijabli optimizacije označen je sa  $[x]^T$  :

gdje je:  $x = \begin{bmatrix} v \\ a \end{bmatrix}$  - vektor brzina i akceleracija pojedine dionice ukupne trase.

Dimenzija vektora varijabli optimizacije iznosi  $[(2n+1) \times 1]$ , gdje  $n$  predstavlja broj dionica. Iz dimenzije vektora se može zaključiti da sadrži po  $n$  varijabli brzina i akceleracija, a dodatni redak je nul-redak koji je potreban da bi u programskom kodu bilo omogućeno zaustavljanje.

Početne vrijednosti vektora varijabli optimizacije vrijednosti su srednjih brzina pojedine dionice, dobivenih na osnovi ukupne duljine svih dionica i zadanog vremena potrebnog da se prevali taj put. Za početnu akceleraciju pojedine dionice uzeta je vrijednost od  $0,5 \text{ [m/s}^2\text{]}$  za putničke vlakove i  $0,3 \text{ [m/s}^2\text{]}$  za teretne vlakove. Vrijednosti su akceleracije skalirane (pomnožene s  $10^2$ ), da bi bile istog reda veličine kao vrijednosti srednjih brzina pojedine dionice. To pridonosi preglednijem prikazu rezultata optimalnog vektora varijabli optimizacije, a sam optimizacijski postupak traje nešto kraće.

Budući da se radi o nelinearnom problemu s ograničenjima, treba navesti ograničenje kao i rubne granice vektora optimizacije.

Gornja granica vektora varijabli optimizacije definirana je na osnovi predviđenih maksimalno dopuštenih brzina na pojedinoj dionici, a za akceleraciju pojedine dionice uzeta je vrijednost od  $0,6 \text{ [m/s}^2\text{]}$  za putničke vlakove, odnosno  $0,4 \text{ [m/s}^2\text{]}$  za teretne vlakove.

Donja granica vektora varijabli optimizacije definirana je na osnovi predviđenih minimalno dopuštenih brzina na pojedinoj dionici ispod kojih se narušava vozni red, a za akceleraciju pojedine dionice uzeta je vrijednost od  $0,2 \text{ [m/s}^2\text{]}$  za putničke vlakove, odnosno  $0,1 \text{ [m/s}^2\text{]}$  za teretne vlakove.

Za optimizacijski postupak navedenog problema zadano je nelinearno ograničenje nejednakosti:

$$\sum_{i=1}^n t_i = \sum_{i=1}^n \frac{s_i}{v_i} - \frac{3}{4} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{v_i}{a_i} + \frac{5}{8} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{v_{i+1}^2}{a_i \cdot v_i} + \frac{v_1}{a_1} + \frac{v_n}{a_n} \leq t_{uk}, \quad (4.5.1)$$

gdje je:  $t_i$  - vrijeme potrebno da vlak prijeđe pojedinu dionicu izraženo u [h],  
 $t_{uk}$  - ukupno vrijeme potrebno da vlak prijeđe određenu trasu izraženo u [h],  
 $s_i$  - duljina pojedine dionice izražena u [km],  
 $v_i$  - brzina pojedine dionice izražena u [km/h],  
 $a_i$  - akceleracija pojedine dionice izražena u  $[\text{m/s}^2]$ .

Prva tri pribrojnika na desnoj strani jednadžbe predstavljaju srednje vrijeme potrebno da se prijeđe određena dionica (uključujući slučaj  $v_i < v_{i+1}$  i  $v_i > v_{i+1}$ ), a zadnja dva pribrojnika predstavljaju vrijeme potrebno da vlak ubrza do brzine zadane za prvu dionicu, odnosno da se zaustavi na kraju trase.

Programski kod za nelinearno ograničenje nalazi se u datoteci (M-file) pod nazivom "nonlcon.m" koji je dan u Prilogu I.

## 5. Optimiranje utrošene energije za različite vrste vučnih vozila i vlakova

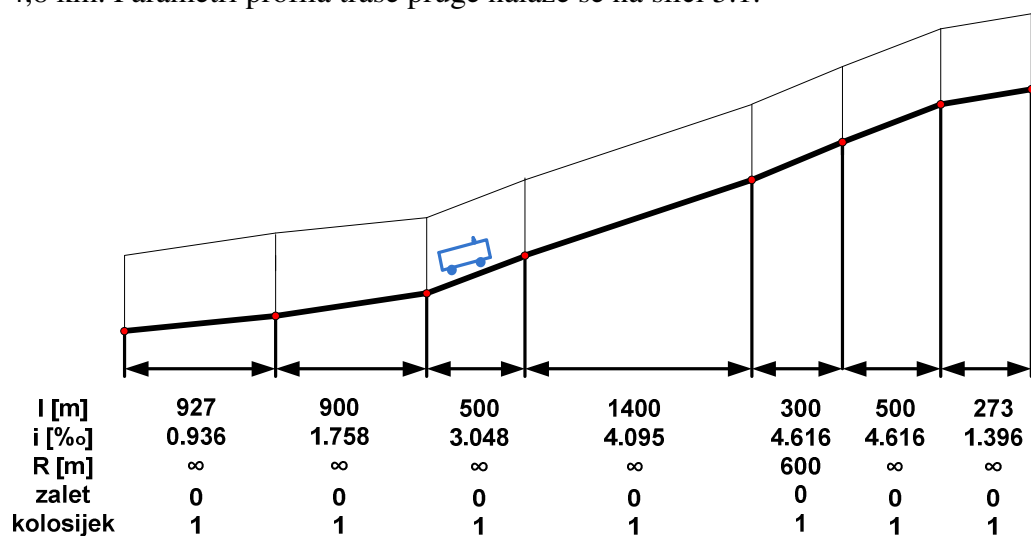
Kao što je navedeno u izrazu (3.1.11), za proračun potrošnje energije električnih vlakova uzeta je u obzir samo djelatna električna snaga.

Izvještaj s mjerenja energetskih karakteristika moderne asinkrone lokomotive, s mogućnošću rekuperativnog kočenja, pokazuje da je utrošena jalova energija zanemariva u odnosu na djelatnu [69]. Mjerenja su obavljena na dvije karakteristične elektrificirane dionice pruge. Prvo mjerenje je obavljeno za vrijeme prolaza same lokomotive, a drugo za vrijeme prolaza karakteristične kompozicije teretnih vagona mase 1536 t.

Rezultati mjerenja pokazuju da je srednja vrijednost ukupnog faktora snage u vremenskom intervalu vožnje veća od 0,95, ako je trenutna djelatna snaga za vuču vlakova veća od 6 [MW]. Međutim, ako je trenutna djelatna snaga potrebna za napajanje vuče vlakova manja od 2 [MW], tada je srednja vrijednost faktora snage manja od 0,95.

Iz mjernih rezultata se može zaključiti kako je pri većem opterećenju kontaktne mreže udio jalove energije u ukupnoj potrošnji smanjen.

"Modificirana SQP-metoda" za optimiranje potrošnje energije električnih vlakova bit će najprije primijenjena na testnom primjeru od nekoliko dionica ukupne duljine 4,8 km. Parametri profila trase pruge nalaze se na slici 5.1.



Slika 5.1. Profil trase pruge za testni primjer

Prvi redak sadrži duljinu pojedine dionice izražene u metrima, u drugom retku je zadan uspon u promilima. Treći redak sadrži radijus krivine izražen u metrima (znak "∞" predstavlja ravnu dionicu).

U četvrtom retku je određena mogućnost modela vožnje sa zaletom na pojedinoj dionici. Za to su predviđene dvije mogućnosti:

- "0" - nije omogućen model vožnje sa zaletom,
- "1" - omogućen je model vožnje sa zaletom.

Peti redak sadrži šifru kolosijeka odnosno napojnog voda elektrovučne podstanice na kojem se trenutno nalazi vlak. Taj podatak je potreban za formiranje električne mreže i za elektrovučni proračun.

Ti podaci se u simulacijski program unose preko ulazne datoteke prikazane u tablici 5-1. Osim parametara profila trase pruge, u prvom retku se nalaze slijedeći podaci:

- "1141" - šifra vučnog vozila,
- "14h 11min - 14h 15min" - planirano vozno vrijeme,
- "6900" - udaljenost vlaka od elektrovučne podstanice izražena u metrima.

Vučno vozilo je diodna lokomotiva oznake 1141, a masa vlaka je 135 t. Oznaka "0" u trećem stupcu označava ravnu dionicu, a u petom stupcu ta oznaka predstavlja vožnju vlaka bez režima vožnje "zalet". U zadnjem stupcu prikazana je šifra kolosijeka na kojem se nalazi promatrani vlak.

Tablica 5-1. Ulazna datoteka za simulacijski program

1141	14	11	14	15	6900
Redni broj dionice	Duljina dionice (m)	Radius krivine (m)	Uspon (0/00)	Dozvola voznje zaletom	Kolosijek
1	927	0	0.936	0	1
2	900	0	1.758	0	1
3	500	0	3.048	0	1
4	1400	0	4.095	0	1
5	300	600	4.616	0	1
6	500	0	4.616	0	1
7	273	0	1.396	0	1

Najprije će se prikazati potrošnja energije promatranog vlaka, dobivena bez optimizacijskog postupka, pri određenim brzinama pojedine dionice. Za akceleraciju je uzeta vrijednost od 0,5 [m/s<sup>2</sup>], a u tablici 5-2. prikazani su rezultati za 10 različitih slučajeva.

Za sve slučajeve navedene u tablici 5-2. zadovoljen je vozni red, a crveno su označeni slučajevi (slučaj 2. i 9.) maksimalne potrošnje energije potrebne za vuču putničkog vlaka na promatranoj trasi pruge.

Tablica 5-2. pokazuje da je najveći iznos utrošene energije potrebne za vuču promatranog putničkog vlaka dobiven za slučajeve kada su brzine početnih dionica najvećeg iznosa 100 km/h.

Tablica 5-2. Utrošena energija putničkog vlaka pri određenim brzinama pojedine dionice bez primjene "modificirane SQP-metode"

Slučaj	Red.br. dion.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	$\sum E$ (kWh)
1.	Brz_dion (km/h)	90	90	90	90	90	90	90	42
2.	Brz_dion (km/h)	100	100	100	100	80	80	80	46
3.	Brz_dion (km/h)	95	95	95	95	85	85	85	44.6
4.	Brz_dion (km/h)	80	80	80	95	95	95	95	40
5.	Brz_dion (km/h)	85	85	90	90	90	80	80	40.9
6.	Brz_dion (km/h)	75	75	85	100	100	90	90	38.2
7.	Brz_dion (km/h)	75	75	80	110	110	80	80	38.2
8.	Brz_dion (km/h)	80	80	90	90	95	85	80	40
9.	Brz_dion (km/h)	100	100	90	85	80	80	80	46
10.	Brz_dion (km/h)	75	75	85	90	95	95	95	38.2

U nastavku slijede rezultati dobiveni "modificiranom SQP-metodom" uz pomoć programskog alata "*Optimization Toolbox*" za neke od slučajeva navedenih u tablici 5-2.

Za "Slučaj 2." iz tablice 5-2. kada je utrošena energija za vuču putničkog vlaka mase 135 t najveća (46 kWh), rezultati dobiveni "modificiranom SQP-metodom" prikazani su na slici 5.2.

Promatrana trasa pruge sastoji se od 7 dionica tako da je ulazni vektor varijabli optimizacije dimenzija [15 x 1]. Prvih sedam vrijednosti su brzine pojedine dionice, zatim slijedi "0", da bi u simulacijskom programu bilo omogućeno zaustavljanje, a zatim vrijednosti akceleracije pojedine dionice.

Vrijednosti akceleracije skalirane su faktorom  $10^2$  da bi prikaz rezultata bio pregledniji, a pokazalo se da je time trajanje optimizacijskog postupka skraćeno na nekoliko minuta, ovisno o dimenziji ulaznog vektora varijabli optimizacije.

Može se zaključiti da su komponente ulaznog vektora planirane brzine i akceleracije kretanja vlaka na pojedinim dionicama, a to su neophodni parametri za proračun utrošene energije za vuču vlaka.

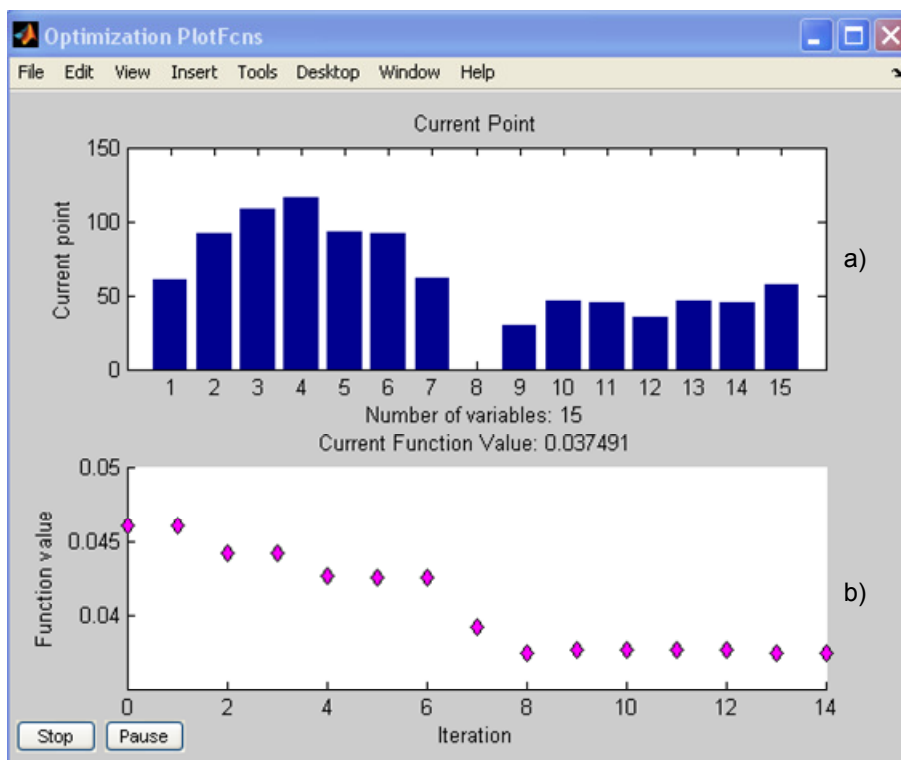
Komponente ulaznog vektora varijabli optimizacije nalaze se u drugom stupcu slike 5.2., a dalje po stupcima slijede komponente optimiranog vektora varijabli optimizacije, granične komponente vektora varijabli optimizacije (donja i gornja), iznos utrošene energije bez optimizacijske metode dobivene za komponente ulaznog vektora, zatim iznos potrošene energije uz optimizaciju i na kraju ušteda energije primjenom "modificirane SQP-metode". Ušteda energije je prikazana u postocima od ukupne utrošene energije potrebne za vuču promatranog vlaka.



Red. br. dion.	x_ul	x_opt	x_dg	x_gg	E_ul [kWh]	E_opt [kWh]	$\Delta E(\%)$
1.	100	60	60	120	45.9864	37.4909	18.47
2.	100	91	60	120			
3.	100	108	60	120			
4.	100	116	60	120			
5.	80	93	60	120			
6.	80	92	60	120			
7.	80	61	60	120			
Nul redak	0	0	0	0			
1.	50	30	30	60			
2.	50	46	30	60			
3.	50	45	30	60			
4.	50	36	30	60			
5.	50	46	30	60			
6.	50	45	30	60			
7.	50	58	30	60			

Slika 5.2. Rezultati "modificirane SQP-metode" za optimizaciju potrošnje energije putničkog vlaka mase 135 t - "Slučaj 2." iz tablice 5-2.

Komponente optimalnog vektora varijabli optimizacije prikazane pomoću stupčanog grafikona nalaze se u gornjem dijelu slike 5.3., a u donjem dijelu prikazan je dijagram ovisnosti vrijednosti funkcije cilja (izražene u MWh) o pojedinoj iteraciji. Gornji dio slike 5.3. pokazuje da je došlo do smanjena vrijednosti brzina početnih dionica u odnosu na ulazni vektor varijabli optimizacije. Na donjem dijelu slike 5.3. se vidi da je optimizacijski postupak završio u 14. iteraciji.



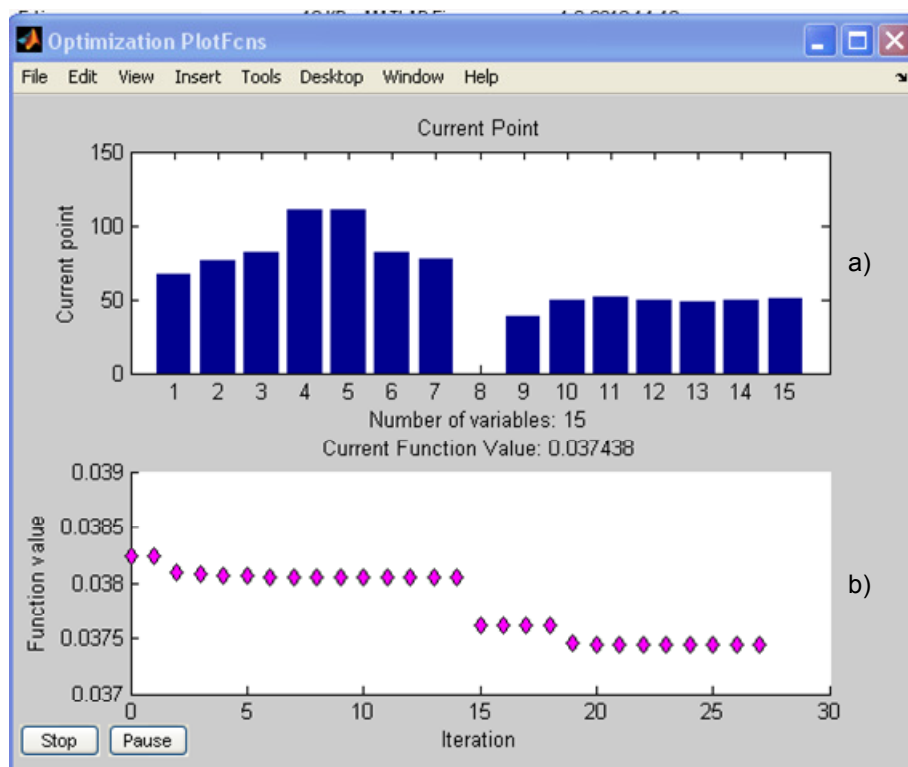
Slika 5.3. Rezultati optimizacije: a) optimalni vektor varijabli optimizacije b) dijagram ovisnosti funkcije cilja o pojedinoj iteraciji

Za "Slučaj 7." iz tablice 5-2. kada je utrošena energija za vuču vlaka najmanja (38,2 kWh), rezultati optimizacijskog postupka prikazani su na slikama 5.4. i 5.5.

Red. br. dion.	x_ul	x_opt	x_dg	x_gg	E_ul [kWh]	E_opt [kWh]	ΔE(%)
1.	75	67	60	120	38.2338	37.4379	2.08
2.	75	77	60	120			
3.	80	82	60	120			
4.	110	111	60	120			
5.	110	110	60	120			
6.	80	82	60	120			
7.	80	78	60	120			
Nul redak	0	0	0	0			
1.	50	39	30	60			
2.	50	50	30	60			
3.	50	51	30	60			
4.	50	50	30	60			
5.	50	48	30	60			
6.	50	50	30	60			
7.	50	51	30	60			

Slika 5.4. Rezultati "modificirane SQP-metode" za optimizaciju potrošnje energije putničkog vlaka mase 135 t - "Slučaj 7." iz tablice 5-2.

Slika 5.5. pokazuje da je optimizacijski postupak završen u 28. iteraciji, s manjim promjenama komponenti vektora varijabli optimizacije nego za "Slučaj 2.", ali sa skoro identičnom vrijednošću funkcije cilja (37,438 kWh).



Slika 5.5. Rezultati optimizacije: a) optimalni vektor varijabli optimizacije b) dijagram ovisnosti funkcije cilja o pojedinoj iteraciji

Prethodni rezultati pokazuju da su u oba slučaja (slučaj 2. i 7. iz tablice 5.2.) primjenom "modificirane SQP-metode" za funkciju cilja dobivene približno identične vrijednosti.

Može se također zaključiti da su vrijednost optimalnog vektora varijabli optimizacije kao i ušteda utrošene energije u postocima (zadnji stupac na slikama 5.2. i 5.4.) ovisile o vrijednostima ulaznog vektora optimizacije.

Rezultati dobiveni primjenom "modificirane SQP-metode" za ostale slučajeve iz tablice 5-2. prikazani su u tablici 5-3.

Iz tablice 5-3. se vidi da je vrijednost funkcije cilja za ostale slučajeve navedene u tablici 5-2. približno ista što dokazuje primjenjivost "modificirane SQP-metode" na ovu vrstu problema.

Tablica 5-3. Rezultati "modificirane SQP-metode" za testne primjere

"Primjer"	1.	3.	4.	5.	6.	8.	9.	10.
E_ul [kWh]	42,319	44,560	40,042	40,905	39,232	40,772	47,213	39,356
E_opt[kWh]	37,461	37,491	37,558	37,491	37,461	37,461	37,636	37,523
$\Delta E$ (%)	11,48	15,86	6,20	8,35	4,51	8,12	20,28	4,66

Na osnovi dobivenih rezultata može se zaključiti da je razvijena "modificirana SQP-metoda" zasnovana na sekvencijalno kvadratnom programiranju prikladna za optimizaciju utrošene energije za vuču električnih vlakova.

U nastavku slijede rezultati utrošene energije, dobiveni optimizacijom potrošnje energije primjenom "modificirane SQP-metode" za pojedino vučno vozilo (lokomotiva i elektromotorni vlak) i vrstu vlaka (putnički i teretni) na nekoj trasi pruge.

## 5.1 Optimizacija potrošnje djelatne energije putničkog vlaka

Nakon procjene ispravnosti "modificirane SQP-metode" na testnom primjeru, razvijena metoda će se primijeniti na realne slučajeve optimizacije potrošnje energije za vuču putničkih i teretnih vlakova.

Podaci za simulacijski program kretanja putničkog vlaka mase 200 t prikazani su u tablici 5-4. Oni sadržavaju parametre profila promatrane trase pruge i vrijeme potrebno da vlak prijede trasu pruge.

Iz podataka je vidljivo da je promatrana trasa pruge ukupne duljine 6,9 km i da planirano vozno vrijeme iznosi 6 minuta. Oznaka "644" predstavlja asinkronu lokomotivu (tip ES64U4).

U petom stupcu tablice 5-4. omogućen je izbor vožnje vlaka u režimu zaleta, kada nije potrebna vučna sila. Oznaka "0" označava vožnju bez zaleta.

Tablica 5-4. Podaci za simulacijski program kretanja putničkog vlaka mase 200 t

644	14	19	14	25
Redni broj dionice	Duljina dionice (m)	Radijus krivine (m)	Uspon (0/00)	Dozvola vožnje zaletom
1	173	0	0	0
2	650	0	-2.946	0
3	277	0	0	0
4	273	0	0	0
5	727	0	-0.427	0
6	273	3000	-3	0
7	827	0	0	0
8	423	0	0	0
9	450	0	0.933	0
10	625	0	0	0
11	625	0	0	0
12	500	0	-1.619	0
13	400	0	-0.653	0
14	677	0	0.262	0

U nastavku će najprije biti prikazani rezultati "modificirane SQP-metode" za asinkronu lokomotivu mase 90 t, koja se upotrebljava kao vučno vozilo u modernim elektrificiranim sustavima, za vuču putničkih i teretnih vlakova. Vučni pasoš asinkrone lokomotive prikazan je na slici 3.2, a model lokomotive implementiran je u simulaciji kretanja vlaka i proračuna potrebne djelatne energije.

### 5.1.1 Rezultati optimizacije potrošnje energije lokomotive

Rezultati optimizacijskog postupka za tri različita ulazna vektora varijabli optimizacije prikazani su u nastavku. Na slici 5.6. u drugom stupcu prikazan je ulazni vektor varijabli optimizacije, za prvi slučaj optimizacijskog postupka.

Promatrana trasa pruge sastoji se od 14 dionica, tako da je ulazni vektor dimenzija [29 x 1]. U trećem stupcu nalaze se komponente optimiranog vektora varijabli optimizacije. Usporedbom komponenti ulaznog i optimiranog vektora varijabli optimizacije (2. i 3. stupac na slici 5.6.) vidi se da je došlo do značajnog smanjenja iznosa prve i zadnje komponente u optimiranom vektoru, tj. do smanjenja planirane brzine prve i zadnje dionice na promatranoj trasi pruge. Također je došlo do smanjenja akceleracije za prvu dionicu u odnosu na ulazni vektor.

Budući da je u prvoj dionici potrebno ubrzati vlak, te se tada koristi najviše energije, rezultati optimizacije pokazuju da se treba smanjiti planirana brzina kao i dopuštena akceleracija na prvoj dionici trase pruge.

Red. br. dion.	x_ul	x_opt	x_dg	x_gg	E_ul [kWh]	E_opt [kWh]	ΔE(%)
1.	80	50	50	100	61.0993	56.9809	6.74
2.	80	65	50	100			
3.	80	87	50	100			
4.	80	92	50	100			
5.	80	97	50	100			
6.	80	89	50	100			
7.	85	98	50	100			
8.	85	94	50	100			
9.	85	95	50	100			
10.	85	98	50	100			
11.	85	98	50	100			
12.	85	96	50	100			
13.	85	93	50	100			
14.	85	59	50	100			
Nul redak	0	0	0	0			
1.	50	25	20	60			
2.	50	53	20	60			
3.	50	52	20	60			
4.	50	53	20	60			
5.	50	48	20	60			
6.	50	50	20	60			
7.	50	48	20	60			
8.	50	49	20	60			
9.	50	50	20	60			
10.	50	47	20	60			
11.	50	46	20	60			
12.	50	45	20	60			
13.	50	20	20	60			
14.	50	55	20	60			

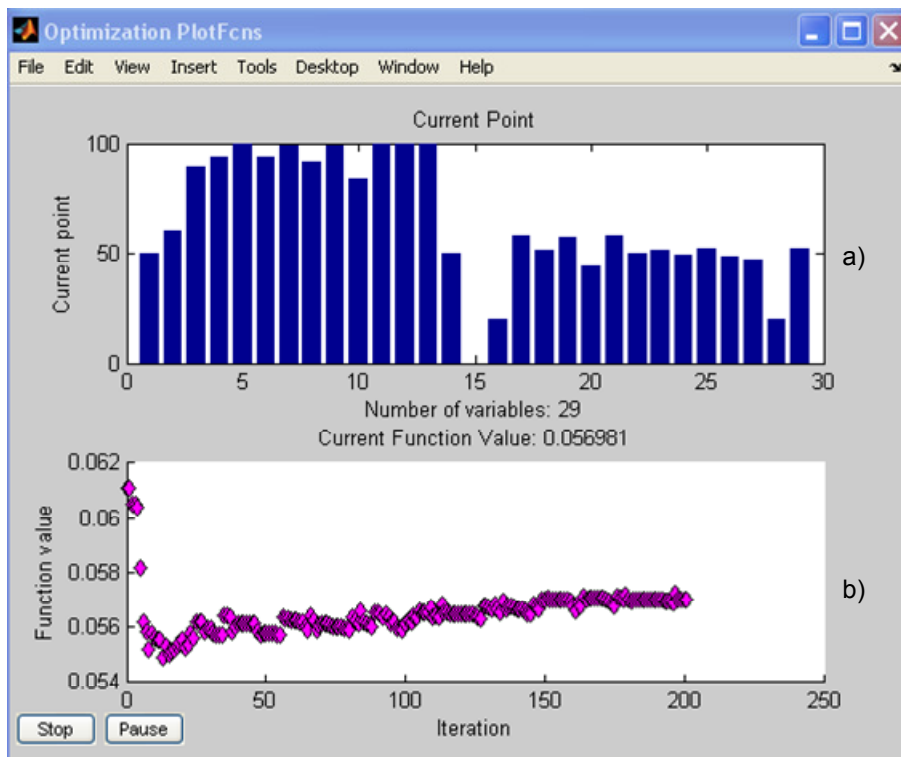
Slika 5.6. Rezultati "modificirane SQP-metode" za optimizaciju potrošnje energije putničkog vlaka mase 200 t

Komponente optimalnog vektora varijabli optimizacije prikazane pomoću stupčanog grafikona nalaze se u gornjem dijelu slike 5.7., a u donjem dijelu prikazan je dijagram ovisnosti vrijednosti funkcije cilja (izražene u MWh) o pojedinoj iteraciji. Gornji dio slike 5.7. pokazuje da je došlo do smanjenja vrijednosti brzina početnih dionica u odnosu na ulazni vektor varijabli optimizacije.

Na donjem dijelu slike 5.7. se vidi da je optimizacijski postupak završio nakon 200 iteracija, a vrijeme trajanja je bilo 10-ak minuta.

Također se vidi da nakon desete iteracije dolazi do osciliranja vrijednosti funkcije cilja, a razlog tome je navedeni kriterij zaustavljanja tj. razlika u iznosu funkcije cilja i funkcije ograničenja između dvije iteracije od  $10^{-6}$ . Da je kriterij zaustavljanja bio za koji red veličine veći optimizacijski postupak bi završio nakon desetak iteracija.

To pokazuje da broj iteracija optimizacijskog postupka prvenstveno ovisi o zadanom kriteriju zaustavljanja.



Slika 5.7. Rezultati optimizacije: a) optimalni vektor varijabli optimizacije  
b) dijagram ovisnosti funkcije cilja o pojedinoj iteraciji

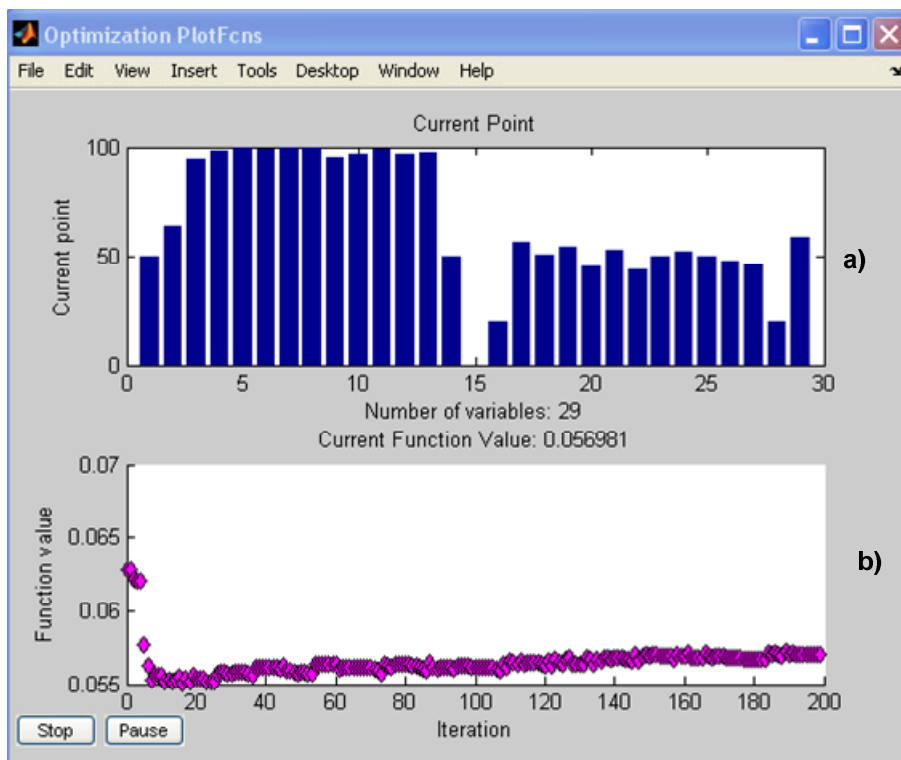
Rezultati optimizacije za drugi slučaj ulaznog vektora varijabli optimizacije (drugi stupac na slici 5.8.) nalaze se na slikama 5.8. i 5.9.

Ulazni vektor u ovom slučaju ima veće planirane brzine prvih nekoliko dionica od prethodnog slučaja (85 km/h umjesto 80 km/h), a utrošena energija se time povećala za 3,28 % (šesti stupac na slikama 5.6. i 5.8.).

Rezultati optimizacije pokazuju da je vrijednost funkcije cilja nakon primjene "modificirane SQP-metode" identična i iznosi 56,981 kWh (sedmi stupac na slikama 5.6. i 5.8.).

Red. br. dion.	x_ul	x_opt	x_dg	x_gg	E_ul [kWh]	E_opt [kWh]	ΔE(%)
1.	85	50	50	100	62.787	56.9809	9.5
2.	85	64	50	100			
3.	85	95	50	100			
4.	85	98	50	100			
5.	85	100	50	100			
6.	85	99	50	100			
7.	85	100	50	100			
8.	80	100	50	100			
9.	80	96	50	100			
10.	80	97	50	100			
11.	80	99	50	100			
12.	80	97	50	100			
13.	80	97	50	100			
14.	80	50	50	100			
Nul redak	0	0	0	0			
1.	50	20	20	60			
2.	50	56	20	60			
3.	50	51	20	60			
4.	50	55	20	60			
5.	50	46	20	60			
6.	50	53	20	60			
7.	50	44	20	60			
8.	50	50	20	60			
9.	50	52	20	60			
10.	50	50	20	60			
11.	50	48	20	60			
12.	50	46	20	60			
13.	50	20	20	60			
14.	50	59	20	60			

Slika 5.8. Rezultati "modificirane SQP-metode" za optimizaciju potrošnje energije putničkog vlaka mase 200 t



Slika 5.9. Rezultati optimizacije: a) optimalni vektor varijabli optimizacije  
b) dijagram ovisnosti funkcije cilja o pojedinoj iteraciji

Rezultati optimizacije za treći slučaj ulaznog vektora varijabli optimizacije (drugi stupac na slici 5.10.) nalaze se na slikama 5.10. i 5.11.

Ulazni vektor u ovom slučaju ima najveći iznos planiranih brzine u prvih nekoliko dionica, a utrošena energija se time povećala za 6,55 % u odnosu na prvi slučaj (šesti stupac na slikama 5.6. i 5.10.).

Rezultati optimizacije pokazuju da je vrijednost funkcije cilja nakon primjene "modificirane SQP-metode" približno ista i iznosi 57,804 kWh (sedmi stupac na slikama 5.6. i 5.8.). Konačna vrijednost funkcije cilja zavisi od koraka proračuna, a ovaj iznos se može smatrati zadovoljavajućim.

Red. br. dion.	x <sub>ul</sub>	x <sub>opt</sub>	x <sub>dg</sub>	x <sub>gg</sub>	E <sub>ul</sub> [kWh]	E <sub>opt</sub> [kWh]	ΔE(%)
1.	90	76	50	100	65.0414	57.8038	11.13
2.	90	89	50	100			
3.	90	100	50	100			
4.	90	92	50	100			
5.	80	96	50	100			
6.	80	94	50	100			
7.	80	75	50	100			
8.	80	95	50	100			
9.	80	85	50	100			
10.	80	97	50	100			
11.	75	98	50	100			
12.	75	71	50	100			
13.	75	87	50	100			
14.	75	71	50	100			
Nul redak	0	0	0	0			
1.	50	58	20	60			
2.	50	42	20	60			
3.	50	44	20	60			
4.	50	52	20	60			
5.	50	55	20	60			
6.	50	52	20	60			
7.	50	56	20	60			
8.	50	57	20	60			
9.	50	55	20	60			
10.	50	58	20	60			
11.	50	51	20	60			
12.	50	57	20	60			
13.	50	58	20	60			
14.	50	60	20	60			

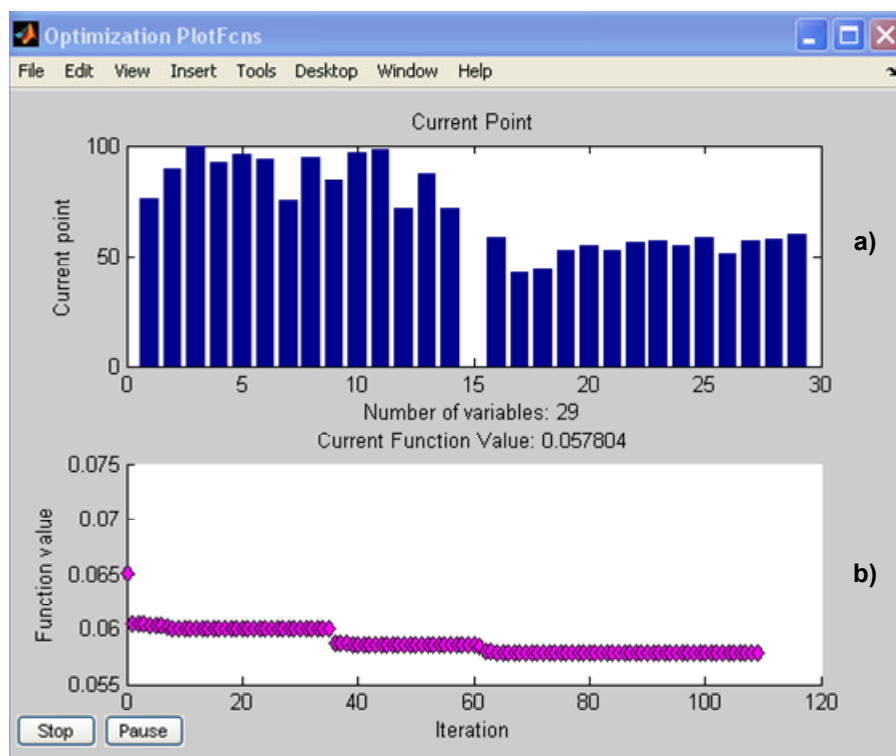
Slika 5.10. Rezultati "modificirane SQP-metode" za optimizaciju potrošnje energije putničkog vlaka mase 200 t

Na donjem dijelu slike 5.11. se vidi da je optimizacijski postupak završio nakon 110 iteracija, a vrijeme trajanja je bilo oko 5 minuta.

Ako se usporede rezultati dobiveni za utrošenu djelatnu energiju za ulazni vektor optimizacije (šesti stupac na slikama 5.6., 5.8. i 5.10, može se zaključiti da je najviše energije potrebno za slučaj kada su planirane brzine početnih dionica najvećeg iznosa.

Komponente optimiranog vektora varijabli optimizacije pokazuju da je kod sva tri promatrana ulazna vektora varijabli optimizacije došlo do smanjenja planiranih brzina i akceleracija na početnim dionicama.





Slika 5.11. Rezultati optimizacije: a) optimalni vektor varijabli optimizacije  
b) dijagram ovisnosti funkcije cilja o pojedinoj iteraciji

Na slikama 5.6. do 5.111. vidljivo je da rezultati "modificirane SQP-metode" za sva tri slučaja ulaznog vektora varijabli optimizacije daju približno istu vrijednost funkcije cilja, tj. utrošenu energiju za vuču putničkog vlaka na promatranj trasi pruge, koja iznosi približno 57 [kWh].

Ušteda utrošene energije za vuču promatranog putničkog vlaka zavisi od vrijednosti ulaznog vektora varijabli optimizacije, a iznos je uštede u postocima veći što su početne komponente ulaznog vektora većeg iznosa.

Na osnovi dobivenih rezultata dolazi se do zaključka da je primijenjena "modificirana SQP-metoda" prikladna za ovu vrstu problema.

Ako se u ulaznoj datoteci, za simulacijski program putničkog vlaka (tablica 5-4.) u peti stupac umjesto oznake "0" postavi oznaka "1", tj. omogući se režim vožnje sa zaletom, dobiju se rezultati optimizacije prikazani na slici 5.12.

Usporedbom komponenti ulaznog vektora varijabli optimizacije (drugi stupac na slici 5.8.) kada nije bila omogućena vožnja sa zaletom i komponenti ulaznog vektora drugi stupac na slici 5.8.) kada je to omogućeno, može se zaključiti da su potrebne veće brzine pojedine dionice (u slučaju vožnje sa zaletim) da bi se zadovoljio vozni red.

Na slici 5.12. je vidljivo (šesti stupac) da se utrošena djelatna energija za vuču putničkog vlaka mase 200 t na promatranj trasi pruge duljine 6,9 km, vozeći po mogućnosti sa zaletom, smanjuje s 62,787 kWh (šesti stupac na slici 5.8.) na 52,175 kWh . To je ušteda od približno 16 % ukupno utrošene energije.

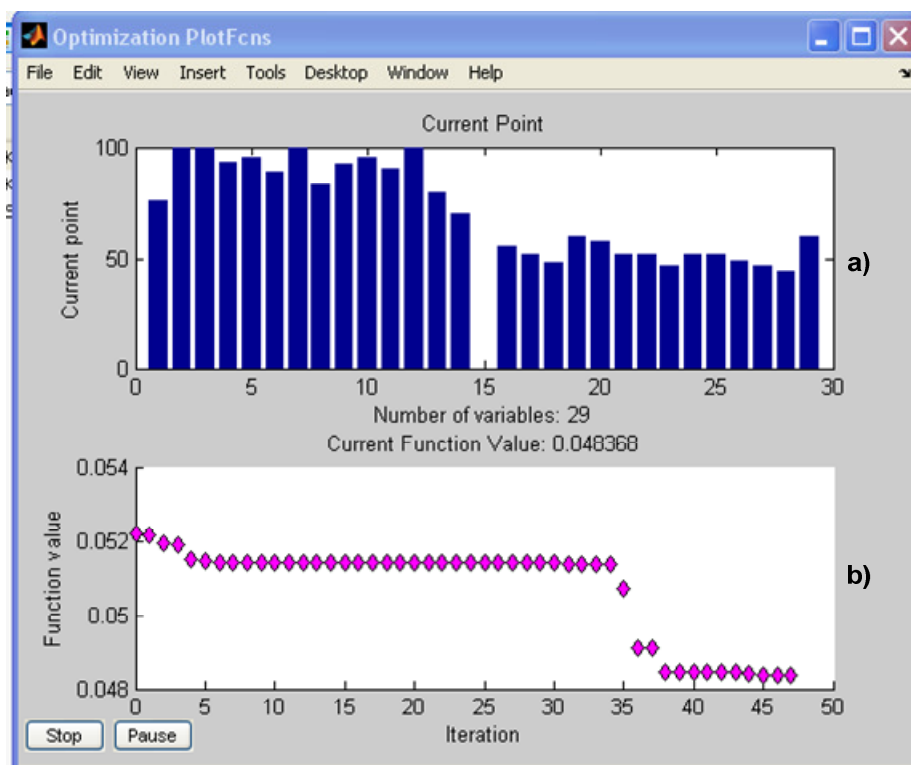
Primjenom "modificirane SQP-metode" ta se vrijednost smanjuje na 48,368 kWh, što predstavlja dodatnu uštedu od 7,3 %.

Red. br. dion.	x_ul	x_opt	x_dg	x_gg	E_ul [kWh]	E_opt [kWh]	ΔE(%)
1.	85	76	50	100	52.1747	48.3682	7.3
2.	85	100	50	100			
3.	85	100	50	100			
4.	85	93	50	100			
5.	90	95	50	100			
6.	90	89	50	100			
7.	90	100	50	100			
8.	90	83	50	100			
9.	90	92	50	100			
10.	90	95	50	100			
11.	90	90	50	100			
12.	90	100	50	100			
13.	90	80	50	100			
14.	90	70	50	100			
Nul redak	0	0	0	0			
1.	50	56	20	60			
2.	50	52	20	60			
3.	50	48	20	60			
4.	50	60	20	60			
5.	50	57	20	60			
6.	50	52	20	60			
7.	50	52	20	60			
8.	50	47	20	60			
9.	50	52	20	60			
10.	50	52	20	60			
11.	50	49	20	60			
12.	50	47	20	60			
13.	50	44	20	60			
14.	50	60	20	60			

Slika 5.12. Rezultati "modificirane SQP-metode" za optimizaciju potrošnje energije putničkog vlaka mase 200 t uz dopuštenje režima vožnje sa zaletom

Komponente optimalnog vektora varijabli optimizacije prikazane pomoću stupčanog grafikona nalazi se u gornjem dijelu slike 5.13., a u donjem dijelu prikazan je dijagram ovisnosti vrijednosti funkcije cilja (izražene u MWh) o pojedinoj iteraciji. Gornji dio slike 5.13. pokazuje da je došlo do smanjenja vrijednosti brzina početnih dionica u odnosu na ulazni vektor varijabli optimizacije. Na donjem dijelu slike 5.13. se vidi da je optimizacijski postupak završio nakon 47 iteracija i da optimalna vrijednost funkcije cilja sada iznosi 48,368 kWh.

Dobiveni rezultati pokazuju da se optimizacijskim postupkom, uključujući i režim vožnje sa zaletom, može uštedjeti oko 23 % utrošene djelatne energije za vuču putničkog vlaka.



Slika 5.13. Rezultati optimizacije: a) optimalni vektor varijabli optimizacije  
b) dijagram ovisnosti funkcije cilja o pojedinoj iteraciji

### 5.1.2 Rezultati optimizacije utrošene djelatne energije elektromotornog vlaka

Ulazna datoteka za simulacijski program kretanja elektromotornog vlaka mase 180 t je ista kao za putnički vlak i prikazana je u tablici 5-4. U nastavku slijedi prikaz rezultata optimizacijskog postupka za tri ulazna vektora optimizacije koja su također upotrijebljeni za asinkronu lokomotivu.

Rezultati optimizacije za prvi slučaj ulaznog vektora varijabli optimizacije (drugi stupac na slici 5.14.) nalaze se na slikama 5.14. i 5.15.

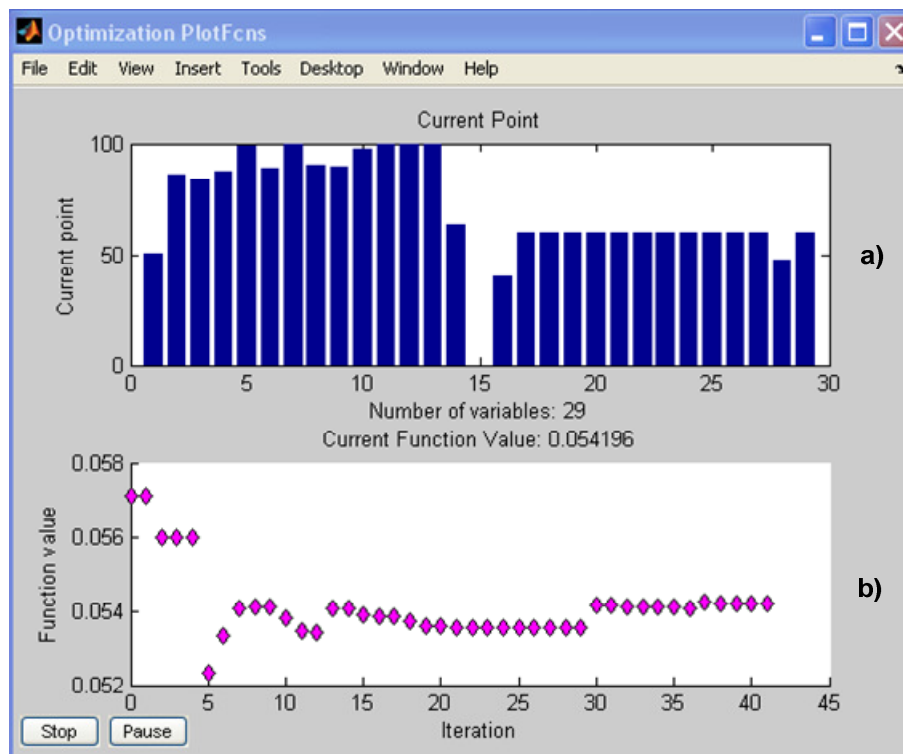
Utrošena energija potrebna za vuču elektromotornog vlaka za isti ulazni vektor sada iznosi 57,1 kWh (šesti stupac na slici 5.14.) u odnosu na putnički vlak kada je iznosila 61,1 kWh (šesti stupac na slici 5.6). Razlog tome je manja masa elektromotornog vlaka. Rezultati pokazuju da je također došlo do promjene komponenti optimiranog vektora varijabli u odnosu na putnički vlak.

Gornji dio slike 5.15. pokazuje da je došlo do smanjenja vrijednosti brzina početnih dionica u odnosu na ulazni vektor varijabli optimizacije. Na donjem dijelu slike 5.15. se vidi da je optimizacijski postupak završio nakon 42 iteracije.

Rezultati optimizacije pokazuju da je vrijednost funkcije cilja nakon primjene "modificirane SQP-metode" sada iznosi 54,2 kWh (sedmi stupac na slici 5.14.).

Red. br. dion.	x_ul	x_opt	x_dg	x_gg	E_ul [kWh]	E_opt [kWh]	ΔE(%)
1.	80	50	50	100	57.0977	54.1957	5.08
2.	80	87	50	100			
3.	80	87	50	100			
4.	80	87	50	100			
5.	80	96	50	100			
6.	80	89	50	100			
7.	85	100	50	100			
8.	85	94	50	100			
9.	85	95	50	100			
10.	85	98	50	100			
11.	85	98	50	100			
12.	85	96	50	100			
13.	85	92	50	100			
14.	85	60	50	100			
Nul redak	0	0	0	0			
1.	50	41	20	60			
2.	50	49	20	60			
3.	50	50	20	60			
4.	50	51	20	60			
5.	50	49	20	60			
6.	50	54	20	60			
7.	50	49	20	60			
8.	50	50	20	60			
9.	50	50	20	60			
10.	50	50	20	60			
11.	50	50	20	60			
12.	50	50	20	60			
13.	50	47	20	60			
14.	50	60	20	60			

Slika 5.14. Rezultati "modificirane SQP-metode" za optimizaciju potrošnje energije elektromotornog vlaka



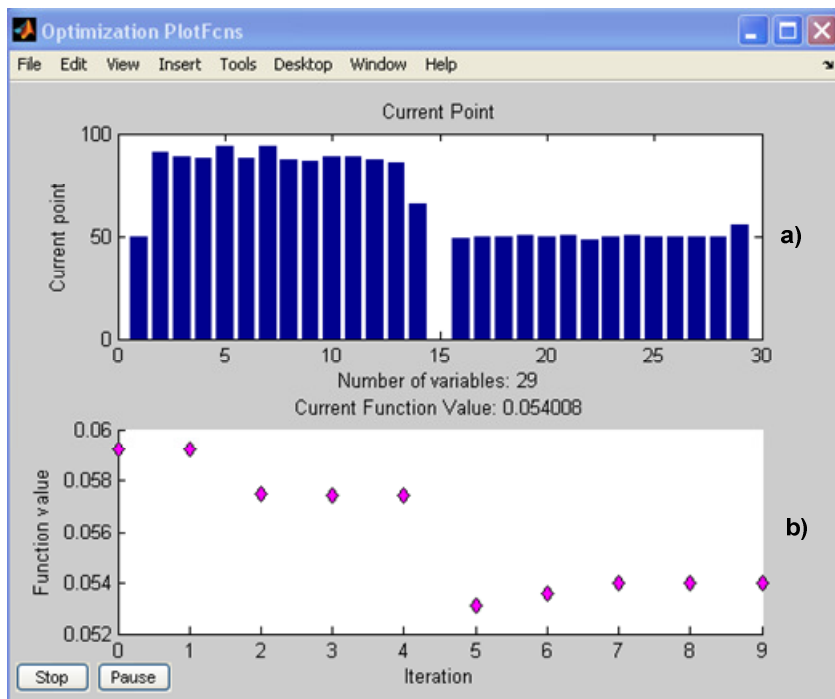
Slika 5.15. Rezultati optimizacije: a) optimalni vektor varijabli optimizacije b) dijagram ovisnosti funkcije cilja o pojedinoj iteraciji

Rezultati optimizacije za drugi slučaj ulaznog vektora varijabli optimizacije (drugi stupac na slici 5.116.) nalaze se na slikama 5.16. i 5.17.

Red. br. dion.	x_ul	x_opt	x_dg	x_gg	E_ul [kWh]	E_opt [kWh]	ΔE(%)
1.	85	50	50	100	59.2109	54.0084	9.09
2.	85	91	50	100			
3.	85	88	50	100			
4.	85	88	50	100			
5.	85	94	50	100			
6.	85	88	50	100			
7.	85	94	50	100			
8.	80	87	50	100			
9.	80	86	50	100			
10.	80	89	50	100			
11.	80	89	50	100			
12.	80	87	50	100			
13.	80	86	50	100			
14.	80	65	50	100			
Nul redak	0	0	0	0			
1.	50	49	20	60			
2.	50	50	20	60			
3.	50	50	20	60			
4.	50	50	20	60			
5.	50	50	20	60			
6.	50	50	20	60			
7.	50	48	20	60			
8.	50	50	20	60			
9.	50	50	20	60			
10.	50	50	20	60			
11.	50	50	20	60			
12.	50	50	20	60			
13.	50	50	20	60			
14.	50	56	20	60			

Slika 5.16. Rezultati "modificirane SQP-metode" za optimizaciju potrošnje energije elektromotornog vlaka

Gornji dio slike 5.17. pokazuje da je došlo do smanjena vrijednosti brzina početnih dionica u odnosu na ulazni vektor varijabli optimizacije. Na donjem dijelu slike 5.17. se vidi da je optimizacijski postupak završio nakon 9 iteracija.

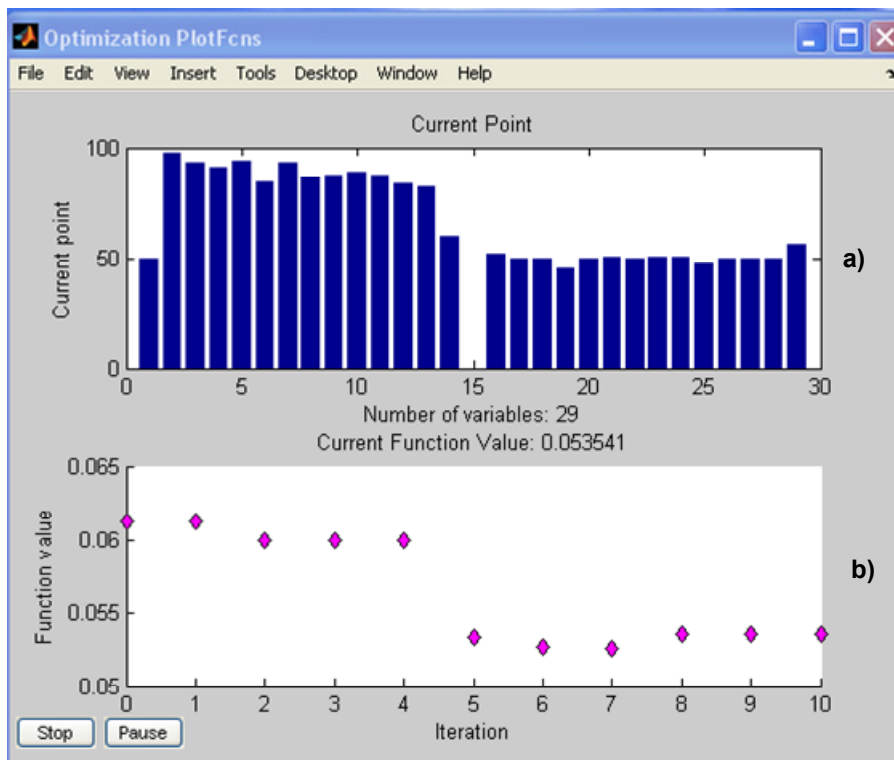


Slika 5.17. Rezultati optimizacije: a) optimalni vektor varijabli optimizacije  
b) dijagram ovisnosti funkcije cilja o pojedinoj iteraciji

Za treći slučaj ulaznog vektora varijabli optimizacije rezultati optimizacije potrošnje energije elektromotornog vlaka primjenom "modificirane SQP-metode" nalaze se na slikama 5.18. i 5.19.

Red. br. dion.	x_ul	x_opt	x_dg	x_gg	E_ul [kWh]	E_opt [kWh]	ΔE(%)
1.	90	50	50	100	61.2445	53.5412	9.13
2.	90	97	50	100			
3.	90	93	50	100			
4.	90	91	50	100			
5.	80	94	50	100			
6.	80	84	50	100			
7.	80	93	50	100			
8.	80	87	50	100			
9.	80	87	50	100			
10.	80	88	50	100			
11.	75	88	50	100			
12.	75	84	50	100			
13.	75	82	50	100			
14.	75	60	50	100			
Nul redak	0	0	0	0			
1.	50	52	20	60			
2.	50	50	20	60			
3.	50	50	20	60			
4.	50	46	20	60			
5.	50	50	20	60			
6.	50	50	20	60			
7.	50	50	20	60			
8.	50	50	20	60			
9.	50	50	20	60			
10.	50	48	20	60			
11.	50	50	20	60			
12.	50	50	20	60			
13.	50	50	20	60			
14.	50	56	20	60			

Slika 5.18. Rezultati "modificirane SQP-metode" za optimizaciju potrošnje energije elektromotornog vlaka



Slika 5.19. Rezultati optimizacije: a) optimalni vektor varijabli optimizacije  
b) dijagram ovisnosti funkcije cilja o pojedinoj iteraciji

Na slikama od 5.14. do 5.19. vidljivo je da rezultati nakon primjene "modificirane SQP-metode" na potrošnju energije elektromotornog vlaka za sva tri slučaja ulaznog vektora varijabli optimizacije daju približno istu vrijednost funkcije cilja, tj. potrošnju energije za vuču elektromotornog vlaka na promatranoj trasi pruge, koja iznosi 54 [kWh].

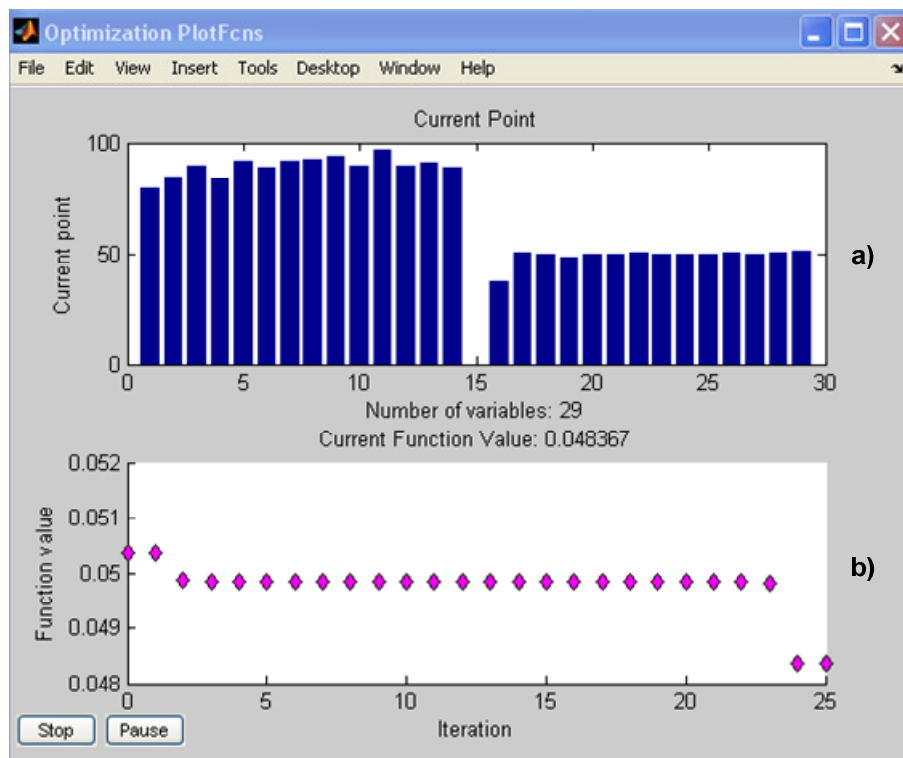
U nastavku su dani rezultati optimizacijskog postupka drugog ulaznog vektora varijabli optimizacije, za slučaj kada je u vožnji elektromotornog vlaka omogućena vožnja sa zaletom.

Na slikama 5.20. i 5.21. je vidljivo da optimalna vrijednost funkcije cilja za ovaj slučaj iznosi 48,36 [kWh]. Dobiveni rezultati pokazuju da se optimizacijskim postupkom, uključujući i režim vožnje sa zaletom, može uštedjeti oko 18 % utrošene djelatne energije za vuču elektromotornog vlaka.

Također se može zaključiti da je optimalna vrijednost funkcije cilja uz dopuštenje vožnje sa zaletom, za elektromotorni vlak i putnički vlak mase 200 t približno ista.

Red. br. dion.	x_ul	x_opt	x_dg	x_gg	E_ul [kWh]	E_opt [kWh]	ΔE(%)
1.	85	79	50	100	50.3627	48.3671	3.96
2.	85	84	50	100			
3.	85	89	50	100			
4.	85	84	50	100			
5.	90	91	50	100			
6.	90	89	50	100			
7.	90	92	50	100			
8.	90	93	50	100			
9.	90	94	50	100			
10.	90	90	50	100			
11.	90	97	50	100			
12.	90	90	50	100			
13.	90	91	50	100			
14.	90	88	50	100			
Nul redak	0	0	0	0			
1.	50	37	20	60			
2.	50	50	20	60			
3.	50	50	20	60			
4.	50	48	20	60			
5.	50	50	20	60			
6.	50	50	20	60			
7.	50	50	20	60			
8.	50	50	20	60			
9.	50	50	20	60			
10.	50	50	20	60			
11.	50	50	20	60			
12.	50	50	20	60			
13.	50	50	20	60			
14.	50	51	20	60			

Slika 5.20. Rezultati "modificirane SQP-metode" za optimizaciju potrošnje energije elektromotornog vlaka uz dopuštenje režima vožnje sa zaletom



Slika 5.21. Rezultati optimizacije: a) optimalni vektor varijabli optimizacije b) dijagram ovisnosti funkcije cilja o pojedinoj iteraciji



## 5.2 Optimizacija potrošnje djelatne energije teretnog vlaka

Duljina trase pruge koju teretni vlak prijeđe bez zaustavljanja u pravilu je veća nego kod putničkog vlaka. Podaci za simulacijski program kretanja teretnog vlaka prosječne mase 700 t, prikazani su u tablici 5-5. U njoj su dani parametri profila promatrane pruge. Vučno vozilo je asinkrona lokomotiva energetskih karakteristika kao kod putničkog vlaka.

Tablica 5-5. Podaci za simulacijski program kretanja teretnog vlaka mase 700 t

644	13	54	14	23
Redni broj dionice	Duljina dionice (m)	Radijus krivine (m)	Uspon (0/00)	Dozvola voznje zaletom
1	10970	0	0	0
2	227	0	-3.628	0
3	500	2277	-3.628	0
4	200	0	-1.316	0
5	1100	0	-0.344	0
6	500	2000	0.359	0
7	950	2000	-0.105	0
8	1000	0	0.18	0
9	350	8000	1.516	0
10	400	0	2.74	0
11	550	0	-0.232	0
12	623	0	0.936	0
13	927	0	0.936	0
14	900	0	1.758	0
15	500	0	3.048	0
16	1400	0	4.095	0
17	300	600	4.616	0
18	500	0	4.616	0
19	273	0	1.396	0
20	123	0	1.396	0
21	300	0	1.3	0
22	100	1200	-0.604	0
23	200	1200	-1.36	0
24	300	1200	2.3	0
25	573	0	2.4	0
26	500	0	0	0
27	150	8000	0	0
28	377	0	0	0
29	173	0	0	0
30	650	0	-2.946	0
31	277	0	0	0
32	273	0	0	0
33	727	0	-0.427	0
34	273	3000	-3	0
35	1250	0	0	0
36	450	0	0	0
37	1250	0	0	0
38	500	0	-1.619	0
39	400	0	-0.653	0
40	677	0	0.262	0

Promatrana trasa pruge ukupne je duljine 31,7 km i sastoji se od 40 dionica, tako da je ulazni vektor dimenzija [81 x 1].

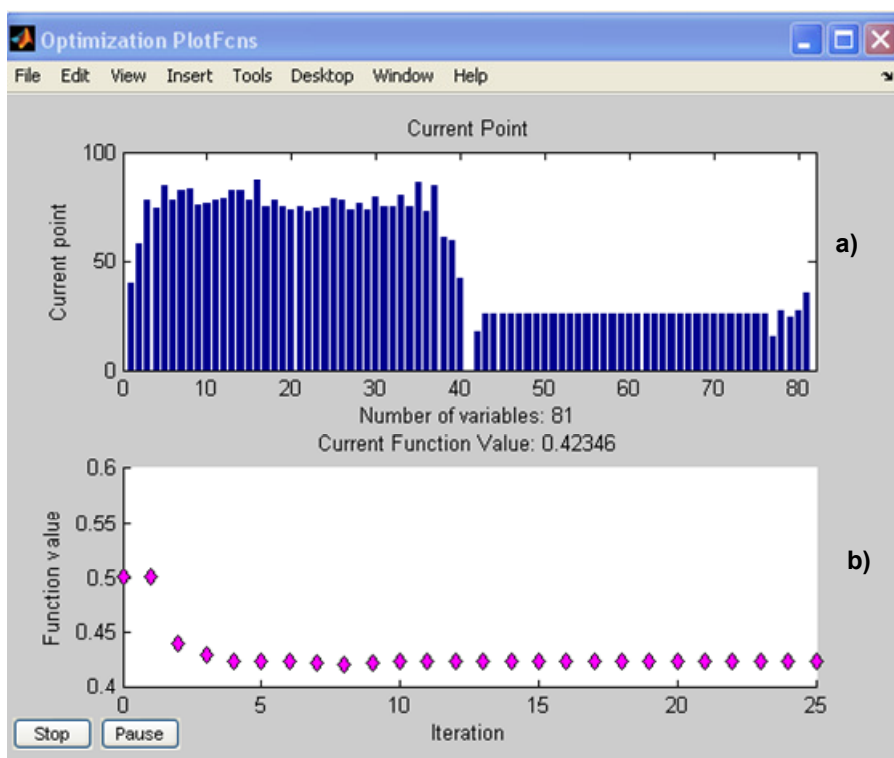
Ukupno vrijeme trajanja vožnje prema planiranom voznom redu iznosi 29 minuta. Rezultati optimizacijskog postupka za dva različita ulazna vektora optimizacije prikazana su u nastavku. Uvjet za oba ulazna vektora varijabli optimizacije je da zadovoljavaju planirani vozni red. Na slici 5.22. vidljivo je da gornja granična akceleracija teretnog vlaka, za razliku od putničkog vlaka, ima vrijednost od 0,4 [m/s<sup>2</sup>], koja je skalirana na iznos 40.



Najveća promjena u optimiranom vektoru varijabli optimizacije u odnosu na ulazni vektor dogodila se za planiranu brzinu i akceleraciju prve dionice.

Komponente optimalnog vektora varijabli optimizacije prikazane pomoću stupčanog grafikona nalaze se u gornjem dijelu slike 5.23., a u donjem dijelu prikazan je dijagram ovisnosti vrijednosti funkcije cilja (izražene u MWh) o pojedinoj iteraciji.

Gornji dio slike 5.23. pokazuje da je došlo do smanjenja vrijednosti brzina početnih dionica u odnosu na ulazni vektor varijabli optimizacije. Na donjem dijelu slike 5.23. se vidi da je optimizacijski postupak završio nakon 25 iteracija.



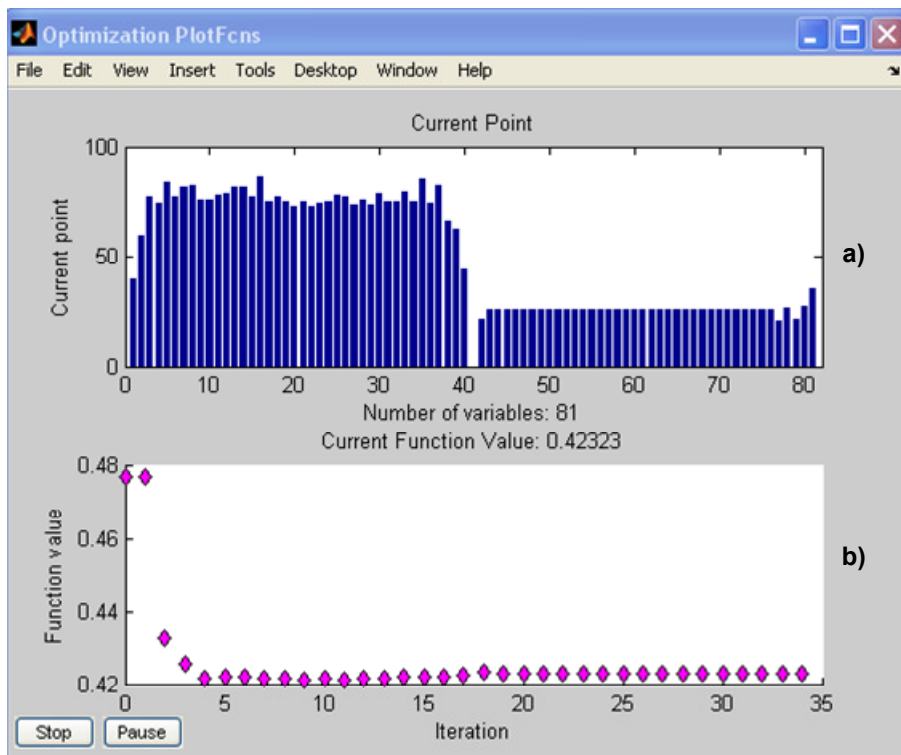
Slika 5.23. Rezultati optimizacije: a) optimalni vektor varijabli optimizacije  
b) dijagram ovisnosti funkcije cilja o pojedinoj iteraciji

Rezultati optimizacijskog postupka za drugi slučaj ulaznog vektora varijabli optimizacije nalaze se u prilogu II.

Komponente optimalnog vektora varijabli optimizacije, za taj slučaj, prikazane pomoću stupčanog grafikona nalaze se u gornjem dijelu slike 5.24., a u donjem dijelu prikazan je dijagram ovisnosti vrijednosti funkcije cilja (izražene u MWh) o pojedinoj iteraciji.

Gornji dio slike 5.24. pokazuje da je optimalna vrijednost funkcije cilja približno ista kao za prvi slučaj i iznosi 0,423 [MWh].

Na donjem dijelu slike 5.24. se vidi da je optimizacijski postupak završio u 34. iteraciji.



Slika 5.24. Rezultati optimizacije: a) optimalni vektor varijabli optimizacije  
b) dijagram ovisnosti funkcije cilja o pojedinoj iteraciji

Ako se usporedi broj potrebnih iteracija za ovaj slučaj (ulazni vektor ima 81 komponentu) i za slučaj optimizacije potrošnje energije putničkog vlaka (ulazni vektor ima 15 komponenti), može se zaključiti da broj iteracija ne ovisi o dimenziji ulaznog vektora.

Prikaz vrijednosti ostalih parametara koji utječu na rezultate "modificirane SQP-metode" po pojedinoj iteraciji dan je na slici 5.25.

Drugi stupac na slici 5.25. pokazuje da se u svakoj sljedećoj iteraciji povećava broj potrebnih računskih varijabli, jer se modificirana Hesseova matrica određuje na osnovi vrijednosti varijabli vektora optimizacije iz prethodnih iteracija. U petom stupcu naveden je iznos parametra  $\alpha$  (predstavlja duljinu koraka po pravcu traženja  $d^k$ ), a u zadnjem je stupcu navedeno je li došlo do potrebnog ažuriranja Hesseove matrice. Kao izlazni podatak naveden je i uzrok prekida optimizacijskog postupka.

Za teretni vlak nije razmatrana vožnja sa zaletom jer kod takve vrste vlakova nema čestih pokretanja i zaustavljanja, pa bi ušteda energije zbog dopuštene vožnje sa zaletom bila zanemariva u odnosu na uštedu utrošene energije dobivenu optimizacijskim postupkom.

Iter	F-count	f(x)	Max constraint	Line search steplength	Directional derivative	First-order optimality	Procedure
0	82	0.477206	0				
1	164	0.4771	0	1	-0.000106	0.0099	
2	247	0.433113	0	0.5	-0.239	0.0579	Hessian modified
3	330	0.425928	0	0.5	-0.0708	0.0311	
4	412	0.422147	0.001057	1	-0.0272	0.00172	
5	494	0.42247	4.199e-006	1	0.00161	0.000655	
6	576	0.422473	2.908e-011	1	2.48e-006	0.000654	Hessian modified
7	661	0.42212	0.0001127	0.125	-0.054	0.00593	Hessian modified
8	746	0.421907	0.0001902	0.125	-0.0471	0.0258	
9	831	0.421749	0.0002405	0.125	-0.0411	0.0248	
10	917	0.421973	0.0002403	0.0625	-0.036	0.025	
11	1002	0.421751	0.0002637	0.125	-0.0336	0.0229	
12	1088	0.422044	0.0002579	0.0625	-0.0294	0.0222	
13	1173	0.421929	0.0002639	0.125	-0.0275	0.0202	
14	1258	0.422223	0.0002613	0.125	-0.0241	0.0181	
15	1343	0.422277	0.0002527	0.125	-0.0211	0.0164	
16	1428	0.42235	0.00024	0.125	-0.0184	0.0147	
17	1512	0.422747	0.0002398	0.25	-0.0161	0.0112	
18	1594	0.423683	0	1	-0.012	0.00142	Hessian modified
19	1676	0.423445	0	1	-0.000236	0.00141	Hessian modified
20	1759	0.423262	0	0.5	-0.000932	0.00139	Hessian modified
21	1846	0.423247	0	0.0313	-0.000468	0.00139	Hessian modified
22	1934	0.42324	0	0.0156	-0.000456	0.00139	Hessian modified
23	2023	0.423236	0	0.00781	-0.000454	0.00139	Hessian modified
24	2113	0.423235	0	0.00391	-0.000458	0.00139	Hessian modified
25	2206	0.423234	0	0.000488	-0.000473	0.00139	Hessian modified
26	2305	0.423234	0	7.63e-006	-0.000533	0.00139	Hessian modified
27	2404	0.423234	0	7.63e-006	-0.000604	0.00139	Hessian modified twice
28	2507	0.423234	0	4.77e-007	-0.00519	0.00139	Hessian modified twice
29	2604	0.423234	0	3.05e-005	-9.57e-005	0.00139	Hessian modified twice
30	2709	0.423234	0	1.19e-007	-0.00267	0.00139	Hessian modified twice
31	2808	0.423234	0	7.63e-006	-3.2e-005	0.00139	Hessian modified twice
32	2905	0.423234	0	3.05e-005	-1.37e-005	1.85e+003	Hessian modified twice
33	3006	0.423234	0	1.91e-006	-3.21e-005	1.41e+008	Hessian modified twice
34	3099	0.423234	0	0.000488	-1.15e-007	1.85e+003	Hessian modified twice

Optimization terminated: magnitude of directional derivative in search direction less than 2\*options.TolFun and maximum constraint violation is less than options.TolCon.

Slika 5.25. Prikaz optimizacijskih parametara u pojedinoj iteraciji

U tablici 5-6. prikazani su rezultati primijenjene metode "modificirane SQP-metode" za optimizaciju utrošene djelatne energije za vuču putničkih i teretnih vlakova.

U četvrtom stupcu tablice 5-6. dani su rezultati utrošene energije pojedinog vlaka za razmatrane slučajeve ulaznih (neoptimiranih) vektora varijabli optimizacije, a u petom stupcu iznos funkcije cilja nakon optimizacije za te slučajeve.

U zadnjem stupcu prikazana je ušteda utrošene energije u postocima nakon primjene "modificirane SQP-metode".

Tablica 5-6. pokazuje da se vožnjom sa zaletom može uštedjeti i do 10 % utrošene djelatne energije za vuču putničkih vlakova bez optimizacijskog postupka.

Budući da je utrošena energija za vuču teretnih vlakova puno većeg iznosa od potrebne energije za vuču putničkih vlakova promatrano za istu trasu pruge, može se zaključiti da efikasnost primijenjene "modificirane SQP-metode" raste s porastom broja teretnih vlakova.

Tablica 5-6. Rezultati "modificirane SQP-metode" za optimiranje utrošene djelatne energije za vuču putničkih i teretnih vlakova

Vrsta i masa vlaka	Vrsta vučnog vozila	Dopuštenje vožnje sa zaletom	$E_{ul}$ (kWh)	$E_{opt}$ (kWh)	$\Delta E$ (%)
Putnički (200 t)	Lokomotiva	NE	61,099	56,981	6,7
			62,787		9,5
			65,041		11,1
Putnički (200 t)	Lokomotiva	DA	62,787	48,368	23,0
Putnički (180 t)	Elektromotorni vlak	NE	57,098	54,068	5,1
			59,211		9,1
			61,245		9,1
Putnički (180 t)	Elektromotorni vlak	DA	59,211	48,367	18,3
Teretni (700 t)	Lokomotiva	NE	500,989	423,310	15,35
			477,206		11,31

Iz zadnjeg stupaca tablice 5-6. je vidljivo da rezultati dobiveni optimizacijskim postupkom za putnički i teretni vlak pokazuju zadovoljavajuću uspješnost razvijene metode "modificirane SQP-metode" za optimiranje utrošene energije potrebne za vuču električnih vlakova.

U nastavku će se razvijena metoda primijeniti na potrošnju energije elektrovučne podstanice koja napaja određeni dio trase pruge. Uz dani vozni red vlakova na trasi pruge koju napaja promatrana elektrovučna podstanica, u promatranom vremenskom periodu, odrediti će se potrošnja energije najprije bez optimizacije, a zatim uz primjenu "modificirane SQP-metode".

## 6. Optimiranje utrošene energije za napajanje elektrovučne podstanice

Za proračun potrošnje električne energije za električnu vuču vlakova na podstaničnom sektoru EVP-a upotrebljava se formula prema izrazu (6.1).

$$E = a \cdot B, \quad [\text{MWh/god}] \quad (6.1)$$

gdje je:

$E$  - ukupna godišnja potrošnja električne energije za elektrovuču vlakova na napajanom području dotičnog EVP u (MWh),

$a$  - specifična potrošnja električne energije po jedinici rada električne vuče (Wh/brttkm),

$B$  - ukupni godišnji rad prijevoza vlakova s električnom vučom (brttkm).

Specifična potrošnja električne energije za vuču vlakova definirana je kao količina energije izražene u (Wh) za izvršeni jedinični rad električne vuče izražen u (brttkm). Iznos specifične potrošnje energije najčešće se određuje na osnovi podataka o potrošnji električne energije za promatrana dva sata maksimalnog voznog reda i o izvršenom radu vlakova s električnom vučom u ta dva sata, na podstaničnom sektoru promatranog EVP-a izraženom u (1000 brttkm), prema sljedećem izrazu:

$$a = \frac{E_{2h}(\text{Wh})}{B_{2h}(\text{brttkm})}, \quad (6.2)$$

Taj iznos najviše zavisi od profila pruge, tako da se na brdskim prugama kreće od 40 do 50 [Wh/brttkm], a na pretežno nizinskim prugama od 20 do 30 [Wh/brttkm].

Na osnovi podataka o specifičnoj potrošnji električne energije i predviđenom godišnjem prijevozu teretnih i putničkih vlakova, na podstaničnom napojnom području određuje se potrebna godišnja potrošnja električne energije za promatrani EVP 110/25 kV.

U proračunu za ukupnu potrošnju električne energije na podstaničnom sektoru promatranog EVP-a treba dodati i ostale potrošače koji se mogu priključiti na kontaktnu mrežu (električno grijanje skretnica, predgrijavanje vagona, rezervno napajanje signalno-sigurnosnih uređaja i sl.). Ta potrošnja predviđena je u iznosu od 2 % potrošnje električne energije za električnu vuču i dodana ukupnoj godišnjoj potrošnji.

Na osnovi prethodno navedenoga može se izvesti formula za uštedu utrošene djelatne energije za vuču vlakova na promatranoj dionici prema sljedećem izrazu:

$$\Delta E = k(\%) \cdot a \cdot B \quad (6.3)$$

gdje je:

$\Delta E$  - ušteda utrošene djelatne energije za vuču vlakova u [MWh/god],

$k(\%)$  - ušteda utrošene djelatne energije za vuču vlakova u [%],

$B$  - planirani godišnji prijevoz putničkog i teretnog prometa u (brttkm).

Izraz (6.3) pokazuje da je godišnja ušteda energije za vuču vlakova izraženija za brdske pruge i pruge s velikim prometom, na kojima prometuju pretežno teretni vlakovi.

U poglavlju 3.6. opisan je algoritam za proračun utrošene djelatne energije za napajanje elektrovočne podstanice, koji uključuje elektrovočna vozila, elektrovočnu podstanicu i kontaktnu mrežu električne željeznice.

U nastavku će se najprije prikazati rezultati utrošene djelatne energije za elektrovočnu podstanicu bez primijenjene optimizacijske metode "modificirane SQP-metode", koja napaja jednokolosiječnu prugu.

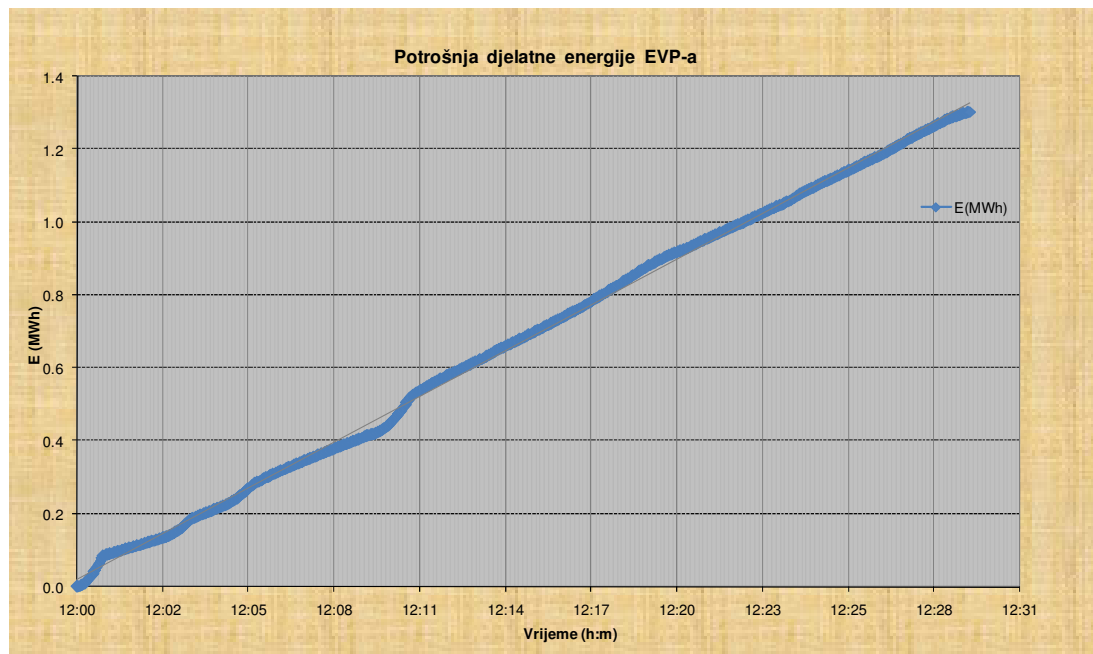
Duljina podstaničnog sektora iznosi 25 km, a elektrovočnim proračunom, u vremenskom intervalu od 30 minuta, bit će obuhvaćena 2 putnička vlaka (masa 200 t), 1 elektromotorni vlak i 2 teretna vlaka (masa 700 t i 1000 t).

Ulazne datoteke za simulaciju kretanja pojedinog vlaka (profil pruge i vožno vrijeme) navedene su u prethodnom poglavlju.

Budući da je razvijena programska podrška prilagođena za simulaciju kretanja jednog vlaka, u obzir nije uzeta ovisnost vučnog pasoša o naponu kontaktne mreže.

Vremenski prikaz utrošene djelatne energije EVP-a u intervalu od 12.00 do 12.30 sati nalazi se na slici 6.1.

Slika 6.1. pokazuje da je za vuču promatranih vlakova potrebno 1,303 [MWh] djelatne energije ne uzimajući u obzir razvijenu metodu za optimizaciju potrošnje energije pojedinog vlaka. Uvjet koji je trebao biti zadovoljen je da svi vlakovi dođu na odredište prema voznom redu.

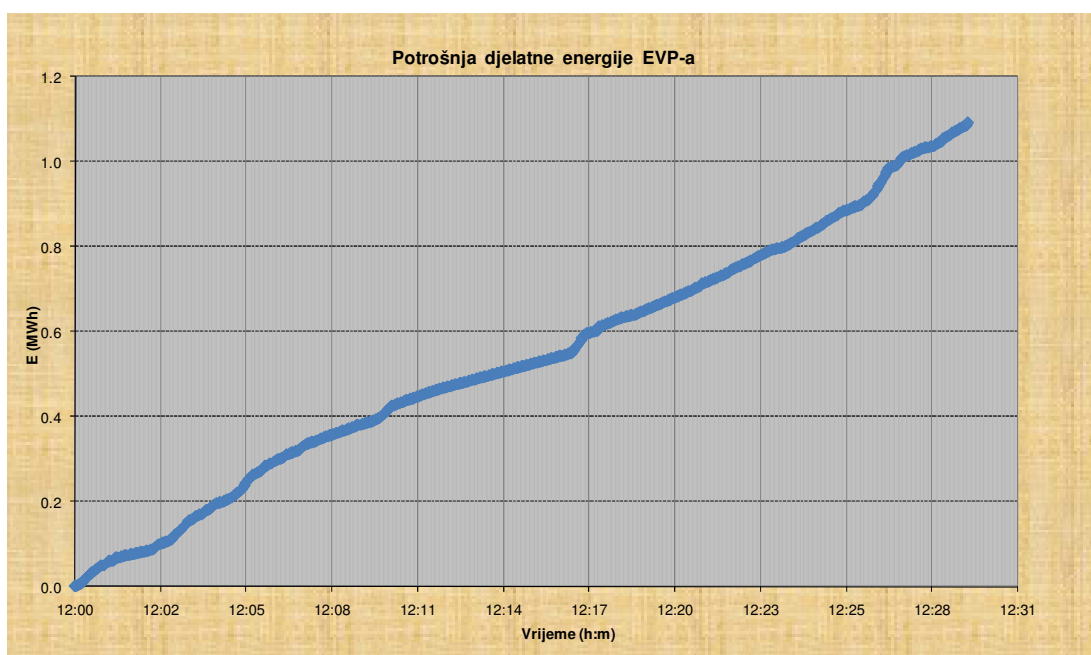


Slika 6.1. Prikaz utrošene djelatne energije EVP-a bez optimizacijskog postupka



Ako se u simulaciju kretanja vlaka uzmu, za planirane brzine i akceleracije pojedine dionice, vrijednosti dobivene "modificiranom SQP-metodom" (optimirani vektor varijabli optimizacije), vremenski prikaz utrošene djelatne energije EVP-a za napajanje promatranih vlakova nalazi se na slici 6.2.

Na slici 6.2. vidljivo je da, optimizacijom potrošnje djelatne energije za vuču pojedinog promatranog vlaka utrošena djelatna energija elektrovučne podstanice sada iznosi 1,09 [MWh], što je ušteda od 16,3 % utrošene djelatne energije. Budući da potrošnja energije EVP-a zavisi od vremenskog intervala napajanja promatranih vlakova, ušteda energije prikazana je u postocima.



Slika 6.2. Prikaz utrošene djelatne energije EVP-a uz optimizacijski postupak

Dobiveni rezultati optimizacijskog postupka utrošene djelatne energije elektrovučne podstanice pokazuju da se uz primjenu "modificirane SQP-metode" može uštedjeti značajan iznos energije, koja se može upotrijebiti za druge gospodarske svrhe. To posebno vrijedi za trase pruge gdje prometuju pretežno teretni vlakovi.

Na potrošnju energije EVP-a utječe i režim vožnje pojedinog napajanog vlaka u nekom trenutku. Najveća je potrošnja ako se više vlakova u istom trenutku nalazi u režimu vožnje "ubravanje". Rezultati optimizacije pokazuju da se upotrebom režima vožnje "zalet", posebno za putničke vlakove, dolazi do uštede utrošene energije pojedinog vlaka do 10 %. Ta ušteda dolazi posebno do izražaja u prigradskom prometu gdje pretežno prometuju putnički vlakovi, a na ostalim prugama uz prevladavanje teretnog prometa utjecaj je tog režima vožnje zanemariv.

Naime, optimizacijskim se postupkom kod putničkih vlakova zbog čestih pokretanja i zaustavljanja, može uštedjeti veći iznos energije u postocima utrošene energije za istu duljinu trase.

Ukupna ušteda utrošene energije EVP-a u apsolutnom iznosu, nakon primjene "modificirane SQP-metode", zavisi od omjera broja putničkih i teretnih vlakova i njihovih masa. Rezultati optimizacijskog postupka pokazuju da taj iznos raste s porastom broja teretnih vlakova.

Analizom dobivenih rezultata optimizacijskog postupka za utrošenu djelatnu energiju elektrovučne podstanice može se zaključiti slijedeće:

- Ušteda utrošene energije primijenjenom optimizacijskom metodom zavisi od vrsti vlakova koji prometuju trasom pruge koju napaja EVP;
- Učinkovitost primijenjene metode, u postotnom iznosu uštede energije, dolazi do izražaja u prigradskom prometu, gdje prometuju pretežno putnički vlakovi za koje je moguće uzeti u obzir i vožnju sa zaletom;
- Naglo ubrzavanje i kočenje vlaka treba svesti na najmanju razinu jer je pri takvim režimima rada potrebno najviše energije za vuču vlakova;
- Primjena razvijene metode dolazi do izražaja na prugama s izrazito teretnim prometom jer je moguća ušteda energije u apsolutnom iznosu tada najveća;
- Smanjenje utrošene djelatne električne energije potrebne za napajanje EVP-a 110/25 kV nije samo ekonomski nego je i ekološki značajno, u smislu smanjenja ispuštanja stakleničkih plinova u atmosferu i globalnog zatopljenja;
- Ušteda utrošene energije za vuču vlakova će na kraju rezultirati boljom efikasnošću u poslovanju željeznice.

Proizvodnja, prijevoz i iskorištavanje energije u velikoj mjeri utječu na okoliš i ekosustave. Ekološka svijest sve je jača u svim aspektima života.

Budući da će energetske potrebe čovječanstva nastaviti rasti u idućih nekoliko desetljeća, nužno su neophodne mjere kojima bi se utjecaj eksploatacije energije na okoliš smanjio na najmanju moguću mjeru.

Može se očekivati da će na željezničkim prugama doći do povećanja brzine vlakova, što će zahtijevati dodatnu količinu energije za vuču vlakova. Tu energiju bit će potrebno što racionalnije iskoristiti što će dovesti do smanjenja rizika u opskrbi energije elektrovučnog sustava [70], [71].

Izbjegavanje nepotrebnog rasipanja već proizvedene energije daleko je najisplativiji način poboljšanja sveukupne energetske učinkovitosti elektrovučnog sustava.

Stvarno postizanje uštede energije i zaštite okoliša primjenom željezničkog prometa zavisi od učinkovitosti uprava poduzeća željezničkog prometa za potrebe elektrovuče i provedbi dokazanih tržišnih pravila o superiornosti elektrificirane željeznice u ispunjavanju zahtijeva kupaca, bilo za prijevoz putnika ili tereta [72].

Povećana energetska učinkovitost elektrovučnog sustava također pridonosi energetske sigurnosti neke zemlje, tj. smanjuje energetske ovisnost o uvoznim fosilnim gorivima.

Na uštedu utrošene energije može se utjecati i primjenom rekuperativnog kočenja, tj. vraćanja električne energije u kontaktnu mrežu, ali u disertaciji nije razmatran taj utjecaj. Da bi ta primjena u potpunosti bila omogućena, osim lokomotiva (moderne asinkrone lokomotive imaju tu mogućnost) i stabilna postrojenja električne vuče tome trebaju biti prilagođena.

## 7. Zaključak

Ekonomična i pouzdana upotreba električne vuče postaje sve veći izazov za korisnike i proizvođače željezničkih vozila.

U novije se vrijeme u željezničkoj industriji širom svijeta poduzimaju značajne mjere za učinkovito iskorištavanje električne energije. Izbjegavanje nepotrebnog rasipanja već proizvedene energije daleko je najisplativiji način poboljšanja sveukupne energetske učinkovitosti elektrovoćnog sustava.

Optimalnom potrošnjom energije elektrićnih vlakova nastoje se ostvariti uštede i racionalizacija sveukupnog poslovanja uz uvjet djelotvornog i pravovremenog prometa vlakova.

Proizvodnja energije povrh toga što zahtijeva velika materijalna ulaganja, nepovoljno djeluje na okoliš pa smanjenje utrošene djelatne elektrićne energije potrebne za napajanje elektrovoćne podstanice nije samo ekonomski nego je i ekološki značajno.

U disertaciji je razvijen model kretanja vlaka koji se temelji na podacima o parametrima profila pruge, planiranim brzinama kretanja na pojedinim dionicama, te karakteristikama vlaka i lokomotive.

Najprije se određuju otpori voćnje koje vlak mora savladati, a nakon toga na osnovi voćnog pasoša, raspoložive adhezione sile te režima voćnje, potrebnu voćnu silu za svladavanje tih otpora.

Poznavajući potrebnu voćnu silu za ostvarenje kretanja vlaka moguće je izračunati mehanićku snagu na obodu kotaća.

Za izračunavanje elektrićne djelatne snage koju vlak uzima iz mreže potrebno je poznavati faktor korisnosti ( $\eta$ ) voćnog vozila koji ovisi o brzini kretanja vlaka i naponu mreže kao i snagu pomoćnih pogona vlaka.

Pokazano je da elektrićna djelatna snaga predstavlja nelinearnu funkciju brzine i akceleracije u odrećenom trenutku. U modelu je razraćen povrat snage u mrežu koji se javlja pri koćenju vlaka. Simulacija daje u svakom trenutku položaj vlaka, brzinu vlaka kao i snage potrebne za vuću vlaka.

U disertaciji je prikazan proraćun impedancije kontaktne mreže, te je proveden proraćun impedancija razlićitih konfiguracija kontaktne mreže za elektrovoćni sustav 25 kV, 50 Hz. Impedancija kontaktne mreže prvenstveno ovisi o broju povratnih traćnica.

Usporećeni su rezultati proraćuna i mjerenja impedancije kontaktne mreže jednokolosijećne pruge s dvije povratne traćnice.

Mjerenje je obavljeno na udaljenostima 10 km i 20 km od izvora napajanja (kućni transformator napona 230 V).

Izraćunate struje za navedenu mjernu konfiguraciju bile su 23 A i 46 A, a mjerenjem su dobivene struje od 23,5 A i 52,5 A.

Razlog većeg odstupanja pri drugom mjerenju od rezultata dobivenih proraćunom je u nejednolikoj raspodjeli povratne struje kroz obje traćnice dobivene mjerenjem.

Model za simulaciju kretanja vlaka uspoređen je s rezultatima mjerenja u elektrovučnom sustavu 25 kV. Usporedba je provedena na osnovi iznosa struja napojnih vodova i napona elektrovučne podstanice 25 kV.

Pokazano je da su struje napojnih vodova promjenjivog iznosa (vrijednosti su se kretale od 30 A do 300 A), a iznosi napona EVP-a oko 27 kV, tj. nije bilo većih oscilacija napona kao kod struja napojnih vodova.

Usporedba je pokazala da se struje napojnih vodova 1 i 2 kao i napon EVP-a dobiveni mjerenjem i proračunom razlikuju do 5 %.

Simulacijski rezultati struja i napona nalaze se u prihvatljivim granicama razmatranog problema potrošnje energije električnih vlakova.

Nakon usporedbe rezultata proračuna i mjerenja provedena je parametarska analiza utjecajnih faktora na potrošnju električne energije za elektromotorni vlak, kao vučno vozilo koje prometuje na prigradskim željeznicama.

Proračuni pokazuju da razlika u potrošnji energije elektromotornog vlaka, za slučaj kada dionica ima radijus krivine od 300 m u odnosu na slučaj kada je dionica potpuno ravna, neovisno o brzini iznosi oko 27 %. Iz rezultata se može zaključiti kako nema značajnije promjene u potrošnji energije elektromotornog vlaka za radijuse krivine iznad 3000 m.

Pri parametarskoj analizi uspona simulacijski rezultati pokazuju da je na usponu od 10 % utrošena dvostruko veća energija nego za ravnu dionicu i da potrošnja energije za vuču elektromotornog vlaka linearno i neproporcionalno raste s porastom uspona promatrane dionice pruge.

Također je pokazano da se uz mogućnost rekuperativnog kočenja, tj. povrata električne energije u mrežu, može znatno smanjiti potrošnja energije elektromotornog vlaka, u nekim slučajevima i do 30 %, što najviše ovisi o profilu pruge.

Na osnovi elektrovučnog proračuna dobiven je izračun potrošnje električne energije za period dvosatnog prometa vlakova napajanih iz elektrovučne podstanice. Prikazani elektrovučni proračun može poslužiti za razmatranje raznih faktora koji utječu na potrošnju električne energije s ciljem optimalne potrošnje.

Navedena je definicija optimizacijskog problema, kriterija optimalnosti te kategorije potrebne za definiranje optimizacijskog modela. Kao glavni kriterij optimizacije navedeno je zadovoljavanje voznog reda, a ulazni vektor varijabli optimizacije sadrži brzine i akceleracije pojedine dionice.

Na osnovi toga se došlo do zaključka da je optimiranje utrošene energije za vuču vlakova nelinearni višedimenzionalni problem uz zadana ograničenja.

Nakon toga su navedene faze postupka optimizacije pomoću dijagrama toka, a to su redosljedom definicija optimizacijskog problema, definiranje fizikalnog i matematičkog modela, razvoj algoritma i njegova implementacija u nekom od programskih alata, te na kraju analiza i testiranje metode na skupovima ulaznih podataka.

Jedan od kriterija izbora optimizacijske metode bila je mogućnost njene implementacije nekom prikladnom programskom podrškom.

Na osnovi navedenih kriterija je razvijena "modificirana SQP-metoda", zasnovana na dinamičkom programiranju, jer se optimalno rješenje dobiva podjelom nelinearnog problema na kvadratne potprobleme. Ta iterativna metoda u svakoj iteraciji rješava kvadratni potproblem, a nelinearno ograničenje nastoji linearizirati.

Prezentirane su tri glavne faze koje se provode u svakoj iteraciji "modificirane SQP-metode", a to su: rješavanje kvadratnog potproblema, ažuriranje Hesseove matrice i određivanje minimuma funkcije pada.

Razvijena metoda implementirana je na modelu za simulaciju kretanja vlakova u elektrovoćnom sustavu, a za programsku implementaciju izabran je programski paket *Optimization Toolbox*, u sklopu numeričkog alata MATLAB.

Testiranje "modificirane SQP-metode" je izvedeno za putnički vlak mase 135 t na trasi pruge ukupne duljine 4,8 km. Kao vućno vozilo odabrana je diodna lokomotiva. Najprije su navedene utrošene energije za vuću promatranog putničkog vlaka, bez primjene "modificirane SQP-metode" za 10 razlićitih slučajeva (razlićite planirane brzine na pojedinoj dionici), za koje je zadovoljen vozni red.

Za svaki od navedenih slučajeva je proveden optimizacijski postupak, a rezultati optimizacije su pokazali slijedeće:

- iznos funkcije cilja nakon optimizacije, za sve navedene slučajeve, je približno identičan što je pokazatelj ispravnosti razvijene metode;
- komponente optimiranog vektora varijabli optimizacije koje su se najviše razlikovale od ulaznog (neoptimiranog) vektora su brzine i akceleracije prvih nekoliko početnih dionica u kojima dolazi do ubrzavanja vlaka, kao i zadnjih par dionica gdje dolazi do koćenja vlaka.

Na osnovi toga se došlo do zaključka o režimima vožnje u kojima je najefikasnija primjena razvijene "modificirane SQP-metode", a to su ubrzavanje i koćenje.

Optimizacijski rezultati su također pokazali da je ušteda utrošene energije za vuću putničkog vlaka ovisila o ulaznom vektoru varijabli optimizacije i kretala se od 2 % do 18,5 % ukupno utrošene energije.

Dobiveni rezultati na testnom primjeru pokazali su da je razvijena "modificirana SQP-metoda" zasnovana na sekvencijalno kvadratnom programiranju prikladna za optimizaciju utrošene energije za vuću elektrićnih vlakova.

Nakon testnog primjera, razvijena metoda je primijenjena na realne slućajeve optimizacije potrošnje energije, za vuću putnićkih i teretnih vlakova. Za razlićite ulazne vektore varijabli optimizacije odrećeni su optimirani vektor kao i optimalna vrijednost utrošene energije za vuću putnićkog vlaka mase 200 t, elektromotornog vlaka i teretnog vlaka mase 700 t.

Rezultati su pokazali da se vožnjom sa zaletom, bez optimizacijskog postupka, moće uštedjeti oko 10 % utrošene djelatne energije za vuću putnićkog vlaka mase 200 t, a ukupna ušteda utrošene energije je iznosila oko 23 %.

Za teretni vlak nije razmatrana vožnja sa zaletom jer kod takve vrste vlakova nema čestih pokretanja i zaustavljanja, pa bi ušteda energije zbog dopuštene vožnje sa zaletom bila zanemariva u odnosu na uštedu utrošene energije dobivenu optimizacijskim postupkom.

Optimizacijski rezultati za dva različita slučaja su pokazala da ušteda utrošene energije teretnog vlaka mase 700 t može iznositi i do 15 %, što je u apsolutnom iznosu puno više nego kod putničkog vlaka.

Pokazano je da broj iteracija optimizacijskog postupka prvenstveno ovisi o zadanom kriteriju zaustavljanja, a ne o dimenzijama ulaznog vektora varijabli optimizacije.

Na kraju je "modificirana SQP-metoda" primijenjena za optimizaciju utrošene energije potrebne za napajanje elektrovučne podstanice.

Uz poznati vozni red vlakova na trasi pruge koju napaja promatrana elektrovučna podstanica, u nekom vremenu, određena je potrošnja energije najprije bez optimizacije (1,303 MWh), a zatim uz primjenu "modificirane SQP-metode" (1,09 MWh), što predstavlja uštedu od 16,3 % .

Analizom dobivenih rezultata optimizacijskog postupka za utrošenu djelatnu energiju elektrovučne podstanice se došlo do zaključka da je učinkovitost primijenjene metode, u postotnom iznosu uštede energije, veća u prigradskom prometu, gdje prometuju pretežno putnički vlakovi za koje je moguće uzeti u obzir i vožnju sa zaletom. Također je zaključeno da je apsolutni iznos uštede energije primjenom "modificirane SQP-metode" veći na prugama s pretežno teretnim prometom.

Može se zaključiti da je razvijena "modificirana SQP-metoda" prilagodljiva za većinu nelinearnih problema s ograničenjima.

## 8. Literatura

- [1] EN 50463, *Railway applications - Energy measurement on board trains*, 2007.
- [2] EN 50388:2005, *Power supply and rolling stock. Technical criteria for the coordination between power supply (substation) and rolling stock to achieve interoperability*, 2005.
- [3] C. J. Goodman, L. K. Siu, T. K. Ho, *A review of simulation models for railway systems*, Developments in Mass Transit Systems, 1998. International Conference.
- [4] K. Li, Z. Gao, *An improved equation model for train movement*, Simulation Modeling Practice and Theory 15, 31 July 2007.
- [5] IEEE 519-1992, *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1992.
- [6] EN 50160, *Voltage characteristics in Public Distribution Systems*, 1994.
- [7] Hrvatski normativni dokument : HRN EN 50121 : *Željezničke primjene - Elektromagnetska Kompatibilnost*
- [8] R. E. Morrison, *Parameters that influence power quality on industrial frequency AC traction systems*, Power Engineering Society Summer Meeting, 2001. IEEE, Volume 1, 15-19 July 2001 Page(s):204 – 209.
- [9] P.C Tan, R.E.Morrison, D.G. Holmes, *Voltage form factor control and reactive power compensation in a 25 kV electrified railway system using a shunt active filter based on voltage detection*, Power Electronics and Drive Systems, 2001. Proceedings., 2001 4th IEEE International Conference on, Volume 2, Date: 22-25 Oct. 2001, Pages: 605 - 610 vol.2.
- [10] J. G. Mayordomo, R. Asensi, A. Hernandez, L.F. Beites, M. Izzeddine, *Iterative harmonic analysis of line side commutated converters used in high speed trains*, Harmonics and Quality of Power, 2000. Proceedings. Ninth International Conference on, Volume 3, 1-4 Oct. 2000 Page(s):846 – 851.
- [11] G. Celli, F. Pilo, S. B. Tennakoon, *Voltage regulation on 25 kV AC railway systems by using thyristor switched capacitor*, Harmonics and Quality of Power, 2000. Proceedings. Ninth Volume 2, 1-4 Oct. 2000 Page(s): 633 – 638.
- [12] J. C. Dennis, T. K. Saha, *Investigation of the propagation of harmonic distortion from traction converters into traction and transmission systems*, Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE, 18-22 June 2006 Page(s):8.
- [13] C. Xie, S. B. Tennakoon, R. Lamgella, D. Gallo, A. Testa, A. Wixon, *Harmonic impedance measurement of 25 kV single phase AC supply systems*, Harmonics and Quality of Power, 2000. Proceedings. Ninth International Conference on, Volume 1, Issue , 2000 Page(s):214 – 219.
- [14] H. J. Chuang, C. S. Chen, C. H. Lin, H. M. Shiau, *Stochastic harmonic load flow analysis and distortion mitigation of mass rapid transit systems*, Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna, Publication Date: 23-26 June 2003, Volume: 3, On page(s): 6.

- [15] J. Casteren, F. Groeman, *Harmonic Analysis of Rail Transportation Systems With Probabilistic Techniques*, Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2006. PMAPS 2006. International Conference on, 11-15 June 2006 Page(s):1 – 4.
- [16] P. C. Tan, P. C. Loh, D. G. Holmes, *A robust multilevel hybrid compensation system for 25 kV electrified railway applications*, Power Electronics Specialist Conference, 2003. PESC 2003. 2003 IEEE 34th Annual Volume 3, Issue , 15-19 June 2003 Page(s): 1020 – 1025.
- [17] T. Zheng, E. B. Makram, A. A. Girgis, *Evaluating power system unbalance in the presence of harmonic distortion*, Power Delivery, IEEE Transactions on Publication Date: April 2003 Volume: 18. On page(s): 393- 397.
- [18] I. Zamora, E. Fernandez, E. Torres, A. J. Mazon, *Influence of faults in electric railway systems*, Power Electronics, Machines and Drives, 2004. (PEMD 2004). Second International Conference on (Conf. Publ. No. 498), Volume 2, 31 March-2 April 2004 Page(s):504 – 509.
- [19] M. M. A. Aziz, E. E. A. El-Zahabab, A. A. Ibrahim, A. F. Zobaa, *LC compensators for power factor correction of nonlinear loads*, Power Delivery, IEEE Transactions on Volume 19, Issue 1, Jan. 2004 Page(s):331 – 336.
- [20] M. M. A. Aziz, E. E. A. El-Zahabab, A. A. Ibrahim, A. F. Zobaa, *Comparing capacitive and LC compensators for power factor correction*, Harmonics and Quality of Power, 2002. 10th International Conference on, Volume 1, 2002 Page(s):42 - 45 vol.1.
- [21] M. M. A. Aziz, E. E. A. El-Zahabab, A. A. Ibrahim, A. F. Zobaa, *LC compensators based on cost minimization for nonlinear loads*, Power Engineering, 2003 Large Engineering Systems Conference on, 7-9 May 2003 Page(s):143 – 147.
- [22] Y. Wang, Z. Wang, J. Yang, J. Liu, Z. Fu, Y. Duan, Y. Hua, *A novel comprehensive compensator for electrified railway system*, Power Electronics Specialist Conference, 2003. PESC '03. 2003 IEEE 34th Annual, Volume 3, 15-19 June 2003 Page(s):1032 - 1037 vol.3.
- [23] Y. Zhongming, L. Edward, M. H. Pong, K. H. Yuen, *Traction system scheduling to minimize harmonic current level at substation by genetic algorithm*, Power Engineering Society Summer Meeting, 1999. IEEE, Volume 1, 18-22 July 1999 Page(s):384 – 389.
- [24] P. Caramia, G. Carpinelli, P. Varilone, P. Verde, D. Gallo, R. Langella, A. Testa, *High speed AC locomotives: harmonic and interharmonic analysis at a vehicle test room*, Harmonics and Quality of Power, 2000. Proceedings. Ninth International Conference on, Volume 1, 1-4 Oct. 2000 Page(s): 347 – 353.
- [25] R. Carbone, F. De Rosa, R. Langella, A. Sollazo, A. Testa, *Modeling waveform distortion produced by high speed AC locomotive converters*, Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna, Volume 3, 23-26 June 2003 Page(s):7 pp.
- [26] S. Zemerick, P. Klinkhachorn, A. Feliachi, *Design of a microprocessor-controlled personal static VAR compensator (PSVC)*, Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE, Volume AES-15, Issue 6, Nov. 1979 Page(s):908 – 911.



- [27] K. Kawahara, S.-I.Hase, Y. Mochinaga, Y. Hisamizu, T. Inoue, *Compensation of voltage drop using static VAr compensator at sectioning post in AC electric railway system*, Power Conversion Conference - Nagaoka 1997., Proceedings of the Volume 2, Date: 3-6 Aug 1997, Pages: 955 - 960 vol.2.
- [28] W. Xu, *Status and future directions of power system harmonic analysis*, Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE, Volume 2, 13-17 July 2003 Page(s): 1179 – 1184.
- [29] M. Mandić, I. Uglešić, V. Milardić, *Potrošnja energije električne željeznice*, Časopis Hrvatske elektroprivrede ENERGIJA, god.58(2009), br.4.,str. 384. - 407.
- [30] M. Mandić, *Magistarski rad - Elektroenergetski proračun napajanja kontaktne mreže 25 kV, 50 Hz*, FER Zagreb: uvez, 2006.
- [31] I. Švaljek, T. Kožulj, M. Bošnjak, *Tehničko-eksploatacijski pokazatelji i značajke vučnih vozila Hrvatskih željeznica*, Zagreb: HŽ -Hrvatske željeznice, 2003.
- [32] E. Maguel, Tajaddini A. Tajaddini, M. Trosino, J. Kalousek, *Traction, forces, wheel climb and damage in high-speed railway operations*, ScienceDirect, Wear 265 (2008) 1446–1451, May 2008.
- [33] Siemens, *Tehnički opis univerzalne višesustavne lokomotive ES64U4, verzija 1.3*.
- [34] B. Radojković, *Električna vuča*, Naučna knjiga, Beograd, 1986.
- [35] V.A. Profillidis, *Railway Management and Engineering – third edition* British Library cataloguing in Publication Data, 2006.
- [36] W. K. Chow, P. C. H. Yu, *Simulation on energy use for mechanical ventilation an air-conditioning (MVAC) systems in train compartments*, Department of Building Services Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, PR China, March 1999.
- [37] J. C. Dennis, T. K. Saha, *Investigation of the propagation of harmonic Distortion from traction converters into traction and transmission systems*, Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE, 18-22 June 2006 Page(s):8.
- [38] K. Karwowski, A. Szelag, *Modern electric traction power supply*, Chapter 1. I. Uglešić, M. Mandić, V. Milardić, *Design and testing of 25 kV 50 Hz traction power system*, Gdansk University of Technology, ISBN: 83-911669-7-X, 2009.
- [39] R. Liu, I. M. Golvitcher, *Energy-efficient operation of rail vehicles*, Transportation Research Part A 37 (2003) 917–932, 7. July 2003.
- [40] H. S. Hwang, *Control Strategy for Optimal Compromise Between Trip Time and Energy Consumption in a High-Speed Railway*, IEEE Transaction on systems, man, and cybernetics -part A: systems and humans, vol. 28, no. 6, november 1998.
- [41] L. Haidonog, M. Baohua, D. Yong, J. Wenzheng, L. Shukun, *Train Energy-Saving Scheme with Evaluation in Urban Mass Transit Systems*, Journal of Transportation systems engineering and information technology, Volume 7, Issue 5, October 2007.
- [42] M. Tirović, *Energy thrift and improved performance achieved through novel railway brake discs*, ScienceDirect, Applied Energy 86 (2009) 317–324, June 2008.

- [43] J. C. Jong, E. F. Chang, *Models for estimating energy consumption on electric trains*, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 6, pp. 278 - 291, 2005.
- [44] I. Uglešić, I. Pavić, V. Milardić, M. Mandić, *Elektroenergetski proračun napajanja električne vuče na pruzi Podsused Tvornica - Samobor - Bregana*, FER Zagreb, ožujak 2006.
- [45] S. - C. Chang, Y. - C. Chung, *Fromtimetabling to train regulation – a new train operation mode*, ScienceDirect, Information and Software Technology 47 (2005) 575-585, April 2005.
- [46] N. P. Padhy, *Unit commitment using hybrid models: a comparative study for dynamic programming, expert system, fuzzy system and genetic algorithms*, Department of Electrical Engineering, University of Roorkee, India, Electrical Power and Energy Systems 23 (2000) 827-836, October 2000.
- [47] A. Sheta, H. Turabieh, *A Comparison between Genetic Algorithms and Sequential Quadratic programming in Solving Constrained Optimization Problems*, Prince Abdullah Bin Ghazi Faculty of Science and Information Technology, Al-Balqa Applied University, Al-Salt Jordan, 2002.
- [48] B. Mansoornejad, N. Mostoufi, F. Jalali-Farahani, *A hybrid GA-SQP optimization technique for determination of kinetic parameters of hydrogenation reactions*, ScienceDirect, Computers and Chemical Engineering 32 (2008) 1447-1455, June 2007.
- [49] P.-Y. Nie, *An SQP approach with line search for a system of nonlinear Equation*, ScienceDirect, Mathematical and Computer Modelling 43 (2006) 368 – 373, October 2005.
- [50] J.- B. Jian, Y. - F. Zeng, C. - M. Tang, *A generalized super-memory gradient projection method of strongly sub-feasible directions with strong convergence for nonlinear inequality constrained optimization*, Computers and Mathematics with Applications 54 (2007) 507-524, January 2007.
- [51] J. Gu, L. Zhang, X. Xiao, *Log-Sigmoid nonlinear Lagrange method for nonlinear optimization problems over second-order cones*, ScienceDirect, Journal of Computational and applied Mathematics, October, 2008.
- [52] L. Zhang, S.-Y. Wu, T. Gao, *Improved smoothing Newton methods for  $P_0$  nonlinear complementarity problems*, ScienceDirect, Applied Mathematics and Computation 215 (2009) 324-332, 2009.
- [53] L. T. Biegler, *An overview of simultaneous strategies for dynamic optimization*, ScienceDirect, Chemical Engineering and Processing 46 (2007) 1043-1053, March 2007.
- [54] K. Su, Z. Yu, *A modified SQP method with nonmonotone technique and its global convergence*, ScienceDirect, Computers and Mathematics with Applications 57 (2009) 240-247, April 2008.
- [55] Z. Wei, L. Liu, S. Yao, *The superlinear convergence of a new quasi-Newton-SQP method for constrained optimization*, Applied Mathematics and Computation 196 (2008) 791-801, 2008.
- [56] W. Sun, *Newton's method and quasi – Newton-SQP method for general LC constrained optimization*, Applied Mathematics and Computation 92 (1998) 69-84, 1998.

- [57] Z. Zhu, K. Zhang, *A new SQP method of feasible directions for nonlinear programming*, Applied Mathematics and Computation 148 (2004) 121-134, 2004.
- [58] Z. Zhu, W. Zhang, Z. Geng, *A feasible SQP method for nonlinear programming*, Applied Mathematics and Computation 215 (2010) 3956-3969, 2010.
- [59] Z. Zhu, J. Jian, *An efficient feasible SQP algorithm for inequality constrained optimization*, ScienceDirect, Nonlinear analysis: Real World Application 10 (2009) 1220-1228, January 2008.
- [60] M. A. Rodriguez-Toral, W. Morton, D. R. Mitchell, *The use of new SQP methods for the optimization of utility systems*, Computer and Chemical Engineering 25 (2001) 287-300, 2001.
- [61] J. A. Snyman, A. M. Hay, *The Dynamic-Q Optimization Method: An Alternative to SQP?*, Computers and Mathematics with Applications 44 (2002) 1589-1598, July 2001.
- [62] D. Vučina, *Metode inženjerske numeričke optimizacije*, FESB, Split, 2005.
- [63] B. Yun, N. Baohua, Z. Fangming, D. Yong, D. Chengbing, *Energy-Efficient Driving Strategy for Freight Trains based on Power Consumption Analysis*, ScienceDirect, Journal of transportation systems engineering and information technology, Volume 9, Issue 3, June 2009
- [64] MATLAB User`s Guide: The Mathworks, „Optimization Toolbox“, 2003.
- [65] B. C. Chachuat, *Nonlinear and dynamic optimization: from theory to practice*, Automatic Control Laboratory , EPFL, Switzerland, 2007.
- [66] S.S Rao, *Engineering Optimization: theory and practice (Fourth Edition)*, Online ISBN: 9780470549124, New Jersey, 2009.
- [67] J. F. Bonnans, J. C. Gilbert, C. Lemarechal, C. A. Sagastizabal, *Numerical Optimization: Theoretical and Practical Aspects (Second Edition)*, ISBN: 3-540-35445, Berlin, 1997.
- [68] M. A. Bhatti, *Practical Optimization Methods with Mathematica Applications*, ISBN: 0-387-98631-6, New York, 2000.
- [69] N. Parat, I. Spajić, *Izveštaj: Mjerenje energetske karakteristike električne višesustavne lokomotive ES64U4-F u EVP Donji Andrijevi*, Siemens d.d. TS prometna tehnika, veljača 2008.
- [70] G. Acampora, C. Landi, M. Luiso, N. Pasquino, *Optimization of Energy Consumption in a Railway Traction System*, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, SPEEDAM 2006.
- [71] J. Shunping, P. Hongquin, L. Shuang, Z. Xiaojie, *Review of Transportation and Energy Consumption Related Research*, Journal of transportation systems engineering and information technology, Volume 9, Issue 3, June 2009.
- [72] K. M. Gwilliam, Z. Shalizi, L. S. Thomson, *Railways, Energy and Environment, Report TWU 6*, Transportation, Water & Urban Development Department, The world bank: Environmentally sustainable development, March 1994.

## 9. Popis oznaka, kratica, tablica i slika

### Popis oznaka i kratica

#### Poglavlje I

UIC	Union Internationale des Chemins de fer - Internacionalna profesionalna organizacija za željezničko područje
EN	europska norma
brttkm	bruto tonski kilometri
EMV	elektromotorni vlak

#### Poglavlje II

EVP	elektrovučna podstanica
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers - Institut inženjera elektrotehnike
CENELEC	Comite European de Normalisation Electrotechnique – Europski odbor za standardizaciju u elektrotehnici
PWM	Pulse Width Modulation - pulsno širinska modulacija
SVC	statički var kompenzator

#### Poglavlje III

$R$	radijus krivine [m]
$f_z$	specifični otpor krivine [N/kg]
$i$	uspon pruge [%o]
$f_i$	specifični otpor na usponu [N/kg]
$a$	ubrzanje vlaka [ $m/s^2$ ]
$\varepsilon$	koeficijent rotirajućih masa (0,06 - 0,08)
$f_a$	specifični otpor ubrzanja [N/kg]
$F_v$	vučna sila [N]
$F_{at}$	sila adhezije [N]
$G_a$	adhezijska težina (težina vučnog vozila) [N]
$\zeta$	koeficijent adhezije [27]
$P_m$	mehanička snaga [MW]
$P_{el}$	električna djelatna snaga [MW]
$Q_{el}$	električna jalova snaga [Mvar]
$P_{pom}$	snaga pomoćnih pogona [MW]
$\eta$	faktor korisnosti vučnog vozila
$\lambda$	faktor snage vučnog vozila
$E$	utrošena djelatna energija vlaka u vremenskom intervalu $t$
$\Delta t$	korak proračuna [s]
$P_i$	djelatna snaga za svaki korak proračuna [MW]
$n$	broj diskretiziranih vremenskih podintervala ( $t/\Delta t$ )
$P_{ek}$	snaga kočnice [MW]
$F_k$	sila električne kočnice [kN]
$n_{lok}$	broj vučnih vozila
$M_{vl}$	ukupna masa vlaka [t]

$M_{lok}$	masa vučnog vozila izražena u [t]
$k$	koeficijent koji ovisi o vrsti vlaka (0,032 - 0,108)
$Z_{vv}$	jedinična impedancija voznog voda [ $\Omega$ /km]
$Z_{pv}$	jedinična impedancija povratnog voda [ $\Omega$ /km]
$Z_{cpv}$	karakteristična impedancija povratnog voda [ $\Omega$ /km]
$Z_{KM}$	jedinična impedancija kontaktne mreže [ $\Omega$ /km]
$Y$	jedinični odvod tračnica prema zemlji [S/km]
$I_{vv}$	struja voznog voda [A]
$I_{pv}$	struja povratnog voda [A]
$L$	duljina promatranog dijela kontaktne mreže [km]
$k_p$	konstanta rasprostiranja povratnog voda
$Z_t$	impedancija vučnog transformatora [ $\Omega$ ]
$u_k$	napon kratkog spoja transformatora [%]
$U$	nazivni napon kontaktne mreže [kV]
$S_T$	nazivna snaga vučnog transformatora [MVA]
PSN	postrojenje za sekcioniranje s neutralnim vodom

#### Poglavlje IV

[ $x$ ]	vektor brzina i akceleracija pojedine dionice,
[ $s$ ]	vektor duljina pojedine dionice
$t_{vr}$	ukupno vrijeme simulacije kretanja vlaka [h],
$v(s_i)$	maksimalno dopuštena brzina pojedine dionice [km/h]
GKS	grafičko korisničko sučelje
SQP	<b>S</b> equential (successive) <b>Q</b> uadratic <b>P</b> rogramming
[ $d$ ]	vektor smjera kretanja
$H$	aproksimacija Hesseove matrice (pozitivno definitna matrica)
$\psi$	dopušteno narušavanje ograničenja

## Popis tablica

Tablica 3-1. Pregled impedancija različitih konfiguracija kontaktne mreže za elektrovučni sustav 25 kV, 50 Hz

Tablica 3-2. Popis vlakova koji su prometovali na području napajanja

Tablica 3-3. Ulazni podaci simulatora kretanja vlaka za parametarsku analizu radijusa krivine

Tablica 3-4. Utjecaj različitog radijusa krivine pruge na potrošnju djelatne energije elektromotornog vlaka

Tablica 3-5. Ulazni podaci za parametarsku analizu nagiba pruge

Tablica 3-6. Utjecaj različitog uspona pruge na utrošenu djelatnu energiju elektromotornog vlaka

Tablica 3-7. Profil pruge za simulator kretanja vlaka uz mogućnost rekuperacije

Tablica 5-1. Ulazna datoteka za simulacijski program

Tablica 5-2. Utrošena energija putničkog vlaka pri određenim brzinama pojedine dionice bez primjene "modificirane SQP-metode"

Tablica 5-3. Rezultati "modificirane SQP-metode" za testni primjer

Tablica 5-4. Podaci za simulacijski program kretanja putničkog vlaka mase 200 t

Tablica 5-5. Podaci za simulacijski program kretanja teretnog vlaka mase 700 t

Tablica 5-6. Rezultati "modificirane SQP-metode" za optimiranje utrošene djelatne energije za vuču putničkih i teretnih vlakova

## Popis slika

- Slika 3.1. Prikaz sila na usponu  
Slika 3.2. Vučni pasoš asinkrone lokomotive [33]  
Slika 3.3. Krivulja faktora snage  $\lambda$  elektromotornoga vlaka  
Slika 3.4. Električna shema raspodjele struja u kontaktnoj mreži  
Slika 3.5. Diferencijalna duljina voda s jediničnim konstantama  $Z_1$  i  $Y_1$   
Slika 3.6. Poprečni presjek kontaktne mreže jednokolosiječne otvorene pruge za izmjenični sustav napajanja 25 kV, 50 Hz.  
Slika 3.7. Pojednostavljena shema jedne dionice kontaktne mreže  
Slika 3.8. Prikaz raspodjele struje i napona tračnica pri napajanju električne vuče  
Slika 3.9. Shema mjernog kruga i uklopnog stanja aparata u PSN1 i na KM  
Slika 3.10. Grafikon reda vožnje na dionici promatrane trase  
Slika 3.11. Sklopka za uklop i isklop strujnog kruga i svitak Rogowski za mjerenje struje povratnog voda  
Slika 3.12. Udio struje kroz tračnice (%) od ukupne struje simuliranog kratkog spoja (23,5 A)  
Slika 3.13. Udio struje kroz tračnice (%) od ukupne struje simuliranog kratkog spoja (52,5 A)  
Slika 3.14. Udio struje kroz tračnice (%) od ukupne struje simuliranog kratkog spoja (52,5 A) dobiven interpolacijom  
Slika 3.15. Shema područja napajanja promatranog i susjednih EVP-a 110 /25 kV  
Slika 3.16. Duljine krakova napajanja EVP Resnik  
Slika 3.17. Napon EVP-a 110/25 kV i struje napojnih vodova dobiveni mjerenjem  
Slika 3.18. Struja napojnog voda 1: a) proračun b) mjerenje  
Slika 3.19. Struja napojnog voda 2: a) proračun b) mjerenje  
Slika 3.20. Napon na 25-kilovoltnoj strani EVP-a  
Slika 3.21. Ovisnost djelatne i prividne snage o radijusu krivine pri konstantnoj brzini  
Slika 3.22. Krivulja ovisnosti potrošnje djelatne električne energije elektromotornog vlaka o radijusu krivine  
Slika 3.23. Ovisnost djelatne i prividne snage o usponu pruge pri konstantnoj brzini  
Slika 3.24. Ovisnost utrošene djelatne električne energije elektromotornog vlaka o usponu pruge  
Slika 3.25. Utrošena djelatna energija elektromotornog vlaka s mogućnošću rekuperacije i bez nje  
Slika 3.26. Usporedba potrošnje energije za različite planirane brzine  
Slika 3.27. Pojednostavljeni uzdužni profil i dvosatni maksimalni grafikon voznog reda promatrane pruge [44]  
Slika 3.28. Opterećenje EVP-a 110/25 kV prividnom i djelatnom snagom pri napajanju promatrane pruge  
Slika 3.29. Prikaz utrošene djelatne električne energije EVP-a  
Slika 4.1. Dijagram toka postupka optimizacije  
Slika 4.2. Dijagram toka optimizacije kod nelinearnih n-dimenzionalnih problema s ograničenjima  
Slika 4.3. Shema procesa iterativnog rješavanja  
Slika 4.4. Infrastruktura numeričke optimizacije  
Slika 4.5. Postupak kvadratne interpolacije

- Slika 4.6. Pojednostavljeni dijagram toka SQP-metode
- Slika 4.7. Izgled prozora pri pokretanju MATLAB GKS-alata
- Slika 4.8. Izgled prozora simulatora kretanja vlaka
- Slika 4.9. Prikaz grafičkog sučelja programskog alata "*Optimization Toolbox*"
- Slika 5.1. Profil trase pruge za testni primjer
- Slika 5.2. Rezultati "modificirane SQP-metode" za optimizaciju potrošnje energije putničkog vlaka mase 135 t - "Slučaj 2." iz tablice 5-2.
- Slika 5.3. Rezultati optimizacije: a) optimalni vektor varijabli optimizacije
- Slika 5.4. Rezultati "modificirane SQP-metode" za optimizaciju potrošnje energije putničkog vlaka mase 135 t - "Slučaj 7." iz tablice 5-2.
- Slika 5.5. Rezultati optimizacije: a) optimalni vektor varijabli optimizacije
- Slika 5.6. Rezultati "modificirane SQP-metode" za optimizaciju potrošnje energije putničkog vlaka mase 200 t
- Slika 5.7. Rezultati optimizacije: a) optimalni vektor varijabli optimizacije
- Slika 5.8. Rezultati "modificirane SQP-metode" za optimizaciju potrošnje energije putničkog vlaka mase 200 t
- Slika 5.9. Rezultati optimizacije: a) optimalni vektor varijabli optimizacije
- Slika 5.10. Rezultati "modificirane SQP-metode" za optimizaciju potrošnje energije putničkog vlaka mase 200 t
- Slika 5.11. Rezultati optimizacije: a) optimalni vektor varijabli optimizacije
- Slika 5.12. Rezultati "modificirane SQP-metode" za optimizaciju potrošnje energije putničkog vlaka mase 200 t uz dopuštenje režima vožnje sa zaletom
- Slika 5.13. Rezultati optimizacije: a) optimalni vektor varijabli optimizacije
- Slika 5.14. Rezultati "modificirane SQP-metode" za optimizaciju potrošnje energije elektromotornog vlaka
- Slika 5.15. Rezultati optimizacije: a) optimalni vektor varijabli optimizacije
- Slika 5.16. Rezultati "modificirane SQP-metode" za optimizaciju potrošnje energije elektromotornog vlaka
- Slika 5.17. Rezultati optimizacije: a) optimalni vektor varijabli optimizacije
- Slika 5.18. Rezultati "modificirane SQP-metode" za optimizaciju potrošnje energije elektromotornog vlaka
- Slika 5.19. Rezultati optimizacije: a) optimalni vektor varijabli optimizacije
- Slika 5.20. Rezultati "modificirane SQP-metode" za optimizaciju potrošnje energije elektromotornog vlaka uz dopuštenje režima vožnje sa zaletom
- Slika 5.21. Rezultati optimizacije: a) optimalni vektor varijabli optimizacije
- Slika 5.22. Rezultati "modificirane SQP-metode" za optimizaciju potrošnje energije teretnog vlaka mase 700 t
- Slika 5.23. Rezultati optimizacije: a) optimalni vektor varijabli optimizacije
- Slika 5.24. Rezultati optimizacije: a) optimalni vektor varijabli optimizacije
- Slika 5.25. Prikaz optimizacijskih parametara u pojedinoj iteraciji
- Slika 6.1. Prikaz utrošene djelatne energije EVP-a bez optimizacijskog postupka
- Slika 6.2. Prikaz utrošene djelatne energije EVP-a uz optimizacijski postupak



## **10. Prilozi**

Prilog I: Struktura i opis programskog koda simulacijskog modela;

Prilog II: Rezultati optimizacije potrošnje energije teretnog vlaka mase 700 t;

Popis funkcija koje se upotrebljavaju za simulacijski model kretanja vlaka i proračun utrošene energije za vuču vlakova:

1. Energ\_opt.m - funkcija cilja
2. nonlcon.m - funkcija u kojoj su definirana ograničenja
3. ConstBrzina.m - funkcija-potprogram koja opisuje režim vožnje vlaka s konstantnom brzinom
4. Ubrzavanje.m - funkcija-potprogram koja opisuje režim vožnje vlaka pri ubrzavanju
5. Kocenje.m - funkcija-potprogram koja opisuje režim vožnje vlaka pri kočenju)
6. SaZaletom.m - funkcija-potprogram koja opisuje režim vožnje vlaka sa zaletom
7. Otpori.m - funkcija-potprogram koja izračunava ukupne otpore vožnje koje vučno vozilo treba svladati
8. Sila.m - funkcija-potprogram koja prikazuje raspoloživu vučnu silu na osnovi vučnog pasoša za određenu brzinu
9. SilaKoc.m - funkcija-potprogram koja prikazuje raspoloživu kočionu silu na osnovi krivulje elektrodinamičkog kočenja pojedinog vučnog vozila za određenu brzinu

#### Programski kod funkcije cilja "Energ\_opt.m" u programskom jeziku MATLAB:

```
function E = Energ_opt(x)
    global MLoc MVlak BrojLok PocetnaBrzina KonacnaBrzina
    KorakProracuna epsilon eta a CosFiPom Ppom
    global poc_sat poc_min kon_sat kon_min s_poc BrD FAth R Uspon k
    trKolosjek ModelVoznje SifraLok
    global SKocT UkupniPut VTren VPlan VIduca SPrijedjeni SKocioni
    UkupniPutDoIduceD UD E_uk
    % BrzinaPlanirana = 1./x;
    PocetnaBrzina = 0;
    KorakProracuna = 2;
    KonacnaBrzina = 0;
    % BrzinaPlanirana = [BrzinaPlanirana' KonacnaBrzina]';

    UD = xlsread('proba.xls');
    [m, n] = size(UD);
    BrD = m - 2;

    for i = 1:BrD+1
        BrzinaPlanirana(i) = x(i);
    end

    for i = 1:BrD
        akc(i) = x(i+15)/100;
    end

    SPrijedjeni = 0;
    % k = 0.040;
    k = 0.057;
    MLoc = 90;
    MVlak = 1626;
```

```

BrojLok = 1;

for i = 3:m
    SPrijedjeni = SPrijedjeni + UD(i, 2);
end
epsilon = 0.06;
eta = 0.85;
CosFiPom = 0.9;
Ppom = 0.25;
SifraLok = UD(1, 1);
poc_sat = UD(1, 2);
poc_min = UD(1, 3);
kon_sat = UD(1, 4);
kon_min = UD(1, 5);
s_poc = UD(1, 6);

uk_vrijeme = (kon_sat*3600 + kon_min*60) - (poc_sat*3600 +
poc_min*60);
DuljinaDionice = UD(3:m, 2)';
RKrivine = UD(3:m, 3)';
PromilUspona = UD(3:m, 4)';
Zalet = UD(3:m, 5)';
Kolosjek = UD(3:m, 6)';

UkupniPut = 0;
for i = 1:1:BrD
    if(i == 1)
        SumaDionica(i) = DuljinaDionice(i);
    else
        SumaDionica(i) = SumaDionica(i - 1) + DuljinaDionice(i);
    end

    UkupniPut = UkupniPut + DuljinaDionice(i);
end
% SumaDionica = zeros(1, BrD);
VTren = PocetnaBrzina;
SPrijedjeni = 0;
SKocioni = 1;
% SumaDionica(1) = DuljinaDionice(1);
ModelVoznje = 0;
FAth = BrojLok * (MLok * 3.3 / (1 + 0.01 * VTren)) * 1000;
VPlan = BrzinaPlanirana(1);
VIduca = BrzinaPlanirana(2);
R = RKrivine(1);
Uspon = PromilUspona(1);
trKolosjek = Kolosjek(1);
a = akc(1);
E_uk = 0;

BrDi = 1;
while (SPrijedjeni < UkupniPut
    if (SPrijedjeni >= SumaDionica(BrDi))

        VPlan = BrzinaPlanirana(BrDi);
        VIduca = BrzinaPlanirana(BrDi + 1);
        R = RKrivine(BrDi);
        Uspon = PromilUspona(BrDi);
        trKolosjek = Kolosjek(BrDi);
    end
end

```

```

        a = akc(BrDi);
    end

    if (VTren > VIduca)
        SKocT = (VIduca^2 - VTren^2)/(3.6 * 3.6 * 2 * a);
        % F=m*a, W=F*s, E=(m*v^2)/2 => m*a*s=(m*v^2)/2 => s = v^2/(2*a)
        UkupniPutDoIduceD = SumaDionica(BrDi);
        SKocioni = SumaDionica(BrDi) + SKocT - SPrijedjeni;
    else
        SKocioni = 1;
    end

    if (SKocioni <= 0)
        ModelVoznje = -1;
        [SPrijedjeni, VTren, E_ret] = Kocenje(VTren,
        UkupniPutDoIduceD, SPrijedjeni);
        E_uk = E_uk + E_ret;
    else
        if (ModelVoznje == 2 && Zalet(BrDi) == 1)
            if (VTren <= 0.8 * VPlan)
                [SPrijedjeni, VTren, E_ret] = Ubrzavanje(VTren,
                SPrijedjeni);
                E_uk = E_uk + E_ret;
            else
                [SPrijedjeni, VTren, E_ret] = SaZaletom(VTren,
                SPrijedjeni);
                E_uk = E_uk + E_ret;
            end
        else
            if (VTren == VPlan)
                if (Zalet(BrDi) ~= 0)
                    [SPrijedjeni, VTren, E_ret] =
                    SaZaletom(VTren, SPrijedjeni);
                    E_uk = E_uk + E_ret;
                else
                    [SPrijedjeni, E_ret] = ConstBrzina(VTren,
                    SPrijedjeni);
                    E_uk = E_uk + E_ret;
                end
            else
                if (VTren > VPlan)
                    [SPrijedjeni, VTren, E_ret] = Kocenje(VTren,
                    UkupniPutDoIduceD, SPrijedjeni);
                    E_uk = E_uk + E_ret;
                else
                    [SPrijedjeni, VTren, E_ret] =
                    Ubrzavanje(VTren, SPrijedjeni);
                    E_uk = E_uk + E_ret;
                end
            end
        end
    end

    if (SPrijedjeni >= SumaDionica(BrDi))
        BrDi = BrDi + 1;
    end;
end
E = E_uk;

```

Programski kod funkcije ograničenja "nonlcon.m" u programskom jeziku MATLAB:

```
function [c, ceq] = nonlcon(x)
Tuk = 0.1333;
S = [0.173; 0.65; 0.277; 0.273; 0.727; 0.273; 0.827; 0.423; 0.45;
0.625; 0.625; 0.5; 0.4; 2.377];
c = [sum(S./x(1:14)) - 3/4 * sum(x(1:14)./(129.6 * x(16:29))) + 5/8
* sum((x(2:15).^2)./(129.6 * x(16:29).* x(1:14))) + x(1)/(129.6 *
x(16)) + x(14)/(129.6 * x(29))- Tuk];
ceq = [];
```

Programski kod potprograma „ConstBrzina.m“ u programskom jeziku MATLAB:

```
function [SPrijedjeni, E_ret] = ConstBrzina(VTren, SPrijedjeni)
global SifraLok Brzina KorakProracuna Ppom ModelVoznje FAth PMeh k R
Mvlak Uspon MLoc BrojLok
eta = 0.85;
Brzina = VTren / 3.6;
ModelVoznje = 0;
FAth = BrojLok * (MLok * 3.3 / (1 + 0.01 * VTren)) * 1000;
SumaOtpora = Otpori(k, R, Mvlak, Uspon, VTren, MLoc, BrojLok);
FLok = SumaOtpora;
FKocTemp = SilaKoc(SifraLok, VTren);
SilaLok = Sila(SifraLok, VTren);
if (FLok < 0)
    FKoc = - FKocTemp;
    if (FAth < abs(FLok))
        FLok = -FAth;
    end
    if (abs(FLok) < abs(FKoc))
        FKoc = FLok;
    end
    E_ret = Ppom * KorakProracuna/3600;
else
    if (FAth < FLok)
        FLok = FAth;
    end
    if (FLok > SilaLok)
        FLok = SilaLok;
    end
    PMeh = FLok * Brzina / 1000000;
    PE1 = PMeh / eta + Ppom;
    E_ret = PE1 * KorakProracuna/3600;
end
SPrijedjeni = SPrijedjeni + Brzina * KorakProracuna;
```

Programski kod potprograma "Ubrzavanje.m" u programskom jeziku MATLAB:

```
function [SPrijedjeni, VTren, E_ret] = Ubrzavanje(VTren,
SPrijedjeni)
global k R Uspon KorakProracuna Ppom
    global SifraLok MLok MVlak BrojLok epsilon eta a
    global FLok FATH ModelVoznje
    global VPlan

atemp = a;
eta = 0.85;
epsilon = 0.06;
Brzina = VTren / 3.6;
ModelVoznje = 1;
[SumaOtpora] = Otpori(k, R, MVlak, Uspon, VTren, MLok, BrojLok);
[SilaLok] = Sila(SifraLok, VTren);
FLok = MVlak * (1 + epsilon) * atemp * 1000 + SumaOtpora;
if (FATH < FLok)
    FLok = FATH;
end
if (FLok > SilaLok)
    FLok = SilaLok;
    atemp = (FLok - SumaOtpora) / (MVlak * (1 + epsilon) * 1000);
end
PMeh = FLok * Brzina / 1000000;
PEl = PMeh / eta + Ppom;
E_ret = PEl * KorakProracuna/3600;
if (Brzina + atemp * KorakProracuna > VPlan / 3.6)
    t = (VPlan / 3.6 - Brzina) / atemp;
    SPrijedjeni = SPrijedjeni + Brzina * t + 0.5 * atemp * pow2(t);
    Brzina = VPlan / 3.6;
    VTren = VPlan;
    FLok = MVlak * (1 + epsilon) * a * 1000 + SumaOtpora;
    if (FATH < FLok)
        FLok = FATH;
    end
    if (FLok > SilaLok)
        FLok = SilaLok;
        atemp = (FLok - SumaOtpora) / (MVlak * (1 + epsilon) * 1000);
    end
    PMeh = FLok * Brzina / 1000000;
    PEl = PMeh / eta + Ppom;
    E_ret = PEl * KorakProracuna/3600;
    SPrijedjeni = SPrijedjeni + Brzina * (KorakProracuna - t) + 0.5
* atemp * pow2((KorakProracuna - t));
else
    SPrijedjeni = SPrijedjeni + Brzina * KorakProracuna + 0.5 * atemp
* pow2(KorakProracuna);
    Brzina = Brzina + atemp * KorakProracuna;
    VTren = Brzina * 3.6;
end
```

Programski kod potprograma "Kocenje.m" u programskom jeziku MATLAB:

```
function [SPrijedjeni, VTren, E_ret] = Kocenje(VTren,
UkupniPutDoIduceD, SPrijedjeni)
global k R Uspon KorakProracuna Ppom ModelVoznje FAth VIduca MVlak
MLok BrojLok SifraLok UkupniPut a
epsilon = 0.6;
atemp = a;
ModelVoznje = -1;
FAth = BrojLok * (MLok * 3.3 / (1 + 0.01 * VTren)) * 1000;
if ((UkupniPutDoIduceD - SPrijedjeni < 200))
if (UkupniPutDoIduceD ~= SPrijedjeni)
    atemp = (VTren * VTren - VIduca * VIduca) / (2 *
(UkupniPutDoIduceD - SPrijedjeni) * 3.6 * 3.6);
    end
end
SumaOtpora = Otpori(k, R, MVlak, Uspon, VTren, MLok, BrojLok);
FKocTemp = SilaKoc(SifraLok, VTren);
Brzina = VTren / 3.6;
FLok = -MVlak * (1 + epsilon) * a * 1000 + SumaOtpora;
FKoc = -FKocTemp;
if (FAth < abs(FLok))
    FLok = -FAth;
end
if (abs(FLok) < abs(FKoc))
    FKoc = FLok;
end
E_ret = Ppom * KorakProracuna;
if (Brzina - atemp * KorakProracuna < VIduca / 3.6 && (SPrijedjeni <
UkupniPut))
    t = -(VIduca / 3.6 - Brzina) / atemp;
    SPrijedjeni = SPrijedjeni + Brzina * t - 0.5 * atemp * (t^2);
    Brzina = VIduca / 3.6;
    VTren = VIduca;
    FLok = -MVlak * (1 + epsilon) * atemp * 1000 + SumaOtpora;
    FKoc = -FKocTemp;
    if (FAth < abs(FLok))
        FLok = -FAth;
    end
    if (abs(FLok) < abs(FKoc))
        FKoc = FLok;
    end
    E_ret = Ppom * KorakProracuna;

    if (SPrijedjeni < UkupniPut)
        SPrijedjeni = SPrijedjeni + Brzina * (KorakProracuna - t) -
0.5 * atemp * (KorakProracuna - t)^2;
    end
else
    SPrijedjeni = SPrijedjeni + Brzina * KorakProracuna + 0.5 * atemp
* (KorakProracuna)^2;
    Brzina = Brzina - atemp * KorakProracuna;
    VTren = Brzina * 3.6;
end
```

Programski kod potprograma "SaZaletom.m" u programskom jeziku MATLAB:

```
function [SPrijedjeni, VTren, E_ret] = SaZaletom(VTren, SPrijedjeni)
global k R Uspon KorakProracuna Ppom ModelVoznje MVlak MLok BrojLok
epsilon = 0.6;
ModelVoznje = 2;
Brzina = VTren / 3.6;
SumaOtpora = Otpori(k, R, MVlak, Uspon, VTren, MLok, BrojLok);
asz = -SumaOtpora / (MVlak * 1000 * (1 + epsilon));
E_ret = Ppom * 2 / 3600;
SPrijedjeni = SPrijedjeni + Brzina * KorakProracuna + 0.5 * asz *
(KorakProracuna)^2;
Brzina = Brzina + asz * KorakProracuna;
VTren = Brzina * 3.6;
```

Programski kod potprograma "Otpori.m" u programskom jeziku MATLAB:

```
function SumaOtpora = Otpori(k, R, MVlak, Uspon, VTren, MLok,
BrojLok)
if (R == 0)
    OtporPR = MVlak * Uspon * 10;
else
    OtporPR = MVlak * (Uspon + (800 / R)) * 10;
end
OtporST = (20 + (VTren * VTren / 240)) * MLok * BrojLok + (20 + (k
* VTren * VTren / 10)) * (MVlak - MLok * BrojLok);
SumaOtpora = OtporPR + OtporST;
```



**Programski kod potprograma "Sila.m" u programskom jeziku MATLAB:**

```
function SilaLok = Sila(SifraLok, VTren)
global BrojLok
SilaLok = 0;
switch SifraLok
    case 1141
        if (VTren <= 88.57)
            SilaLok = 150;
        elseif (VTren <= 110)
            SilaLok = -1.41657 * VTren + 275.465;
        elseif (VTren <= 140)
            SilaLok = -0.000595 * (VTren^3) + 0.24991 * (VTren^2) -
36.1792 * VTren + 1867.39;
        else SilaLok = 0;
        end
    case 1142
        if (VTren <= 81.25)
            SilaLok = 166.25;
        elseif (VTren <= 200)
            SilaLok = 4.4735 * (10^-12) * (VTren^8) - 4.37454 * (10^-9)
*(VTren^7) + 1.85933 * (10^-6) * (VTren^6) - 0.000448607 * (VTren^5) +
0.0671942 * (VTren^4) - 6.39767 * (VTren^3) + 378.129 * (VTren^2) -
12687.2 * VTren + 185274;
        else SilaLok = 0;
        end
    case 1161
        if (VTren <= 58.89)
            SilaLok = 236.5;
        elseif (VTren <= 84.44)
            SilaLok = 0.0000979835 * (VTren^4) - 0.0289928 * (VTren^3) +
3.25908 * (VTren^2) - 167.299 * VTren + 3528.95;
        elseif (VTren <= 118.06)
            SilaLok = -0.000459768 * (VTren^4) + 0.175031 * (VTren^3) -
24.8272 * (VTren^2) + 1551.64 * VTren - 35840.7;
        else SilaLok = 0;
        end
    case 6111
        if (VTren <= 60.00)
            SilaLok = 100.00;
        elseif (VTren <= 110)
            SilaLok = -79.166 * (10^-6) * (VTren^4) + 0.02558333
*(VTren^3) - 3.05208333 * (VTren^2) + 158.241667 * VTren - 2907;
        elseif (VTren <= 120)
            SilaLok = 0.015 * (VTren^2) - 4.45 * VTren + 358;
        else SilaLok = 0;
        end
    case 644
        if (VTren <= 85.00)
            SilaLok = 300 - 0.353 * VTren ;
        elseif (VTren > 85 && VTren <= 200)
            SilaLok = 4958.42 - 174.29 * VTren + 2.591 * (VTren^2) -
0.019 * (VTren^3) + 7.11 * (10^-5) * (VTren^4) - 10.4 * (10^-8)
*(VTren^5);
        elseif (VTren > 200 && VTren <= 220)
            SilaLok = 370 - 1.25 * VTren;
        else SilaLok = 0;
        end
end
SilaLok = BrojLok * SilaLok * 1000;
```

Programski kod potprograma "SilaKoc.m" u programskom jeziku MATLAB:

```
function FKocTemp = SilaKoc(SifraLok, VTren)
global BrojLok
FKocTemp = 0;
switch SifraLok
    case 1161
        if (VTren <= 40)
            FKocTemp = 6.16 * VTren;
        else
            FKocTemp = 0.016 * (VTren^2) - 4.408 * VTren + 397.04;
        end
    case 1141
        if (VTren <= 40)
            FKocTemp = 4.4 * VTren;
        else
            FKocTemp = 0.0114 * (VTren^2) - 3.1486 * VTren + 283.6;
        end
    case 1142
        if (VTren <= 70)
            FKocTemp = 1.8722 * VTren;
        else
            FKocTemp = 0.0059 * (VTren^2) - 2.2241 * VTren + 257;
        end
    case 6111
        if (VTren <= 40)
            FKocTemp = 0.9808 * VTren;
        else
            FKocTemp = -0.0076 * (VTren^2) + 1.2588 * VTren + 1.2318;
        end
    case 644
        if (VTren <= 5)
            FKocTemp = -30 * VTren;
        elseif (VTren > 5 && VTren <= 50)
            FKocTemp = -150;
        elseif (VTren > 50 && VTren <= 220)
            FKocTemp = -1855 + 88.25 * VTren - 1.83 * (VTren^2) +
0.0198 * (VTren^3) - 1.177 * (10^-4) * (VTren^4) + 36.2 * (10^-8) *
(VTren^5) - 4.495 * (10^-10) * (VTren^6);
        end
        FKocTemp = BrojLok * FKocTemp * 1000;
end
```



## 10. Sažetak

U disertaciji je najprije dan osvrt na problematiku elektrovučnog sustava koja može imati utjecaja na potrošnju energije u tom sustavu.

Simulacijski model kretanja vlaka i impedancije kontaktne mreže detaljno su izloženi u trećem poglavlju kao i parametarska analiza utjecajnih faktora na potrošnju energije za jednu vrstu vlaka. Oba modela usporedit će se s rezultatima mjerenja u elektrovučnom sustavu 25 kV.

U četvrtom poglavlju disertacije detaljno su razrađene faze od kojih se sastoji razvijena "modificirana SQP-metoda" za optimiranje potrošnje energije električnih vlakova, te prikazan dijagram toka za tu metodu.

U petom poglavlju je prezentirano testiranje metode na putničkom vlaku mase 135 tona na trasi pruge ukupne duljine 4,8 kilometara.

Na osnovi dobivenih rezultata na testnom primjeru se došlo do zaključka da je razvijena "modificirana SQP-metoda" zasnovana na sekvencijalno kvadratnom programiranju prikladna za optimizaciju utrošene energije za vuču električnih vlakova.

Nakon procjene ispravnosti metode na testnom primjeru, razvijena metoda je primijenjena na realne slučajeve optimizacije potrošnje energije za vuču putničkih i teretnih vlakova.

U šestom poglavlju dani su rezultati "modificirane SQP-metode" za optimizaciju utrošene energije potrebne za napajanje elektrovučne podstanice.

Zaključak disertacije ističe djelotvornu primjenu razvijene "modificirane SQP-metode" posebno za pruge na kojima prometuju pretežno teretni vlakovi.

## 11. Summary

Dissertation Title: Method for Optimization of Energy Consumption of Electrical Trains

In this dissertation a review of the issues in traction system that can have an impact on energy consumption in this system is presented first.

A simulation model of the train movement and impedance catenary are displayed in detail in chapter three as well as the parametric analysis of the influencing factors on energy consumption for one type of the train. Both models are verified with experimental measurements in 25 kV AC traction system.

In the fourth chapter of the dissertation, there is an elaborate presentation of the "modified SQP-method" phases, since the method is used to optimize electric train energy consumption. A flow chart for this method is also given.

The fifth chapter offers a test of the method on a passenger train that weighs 135 tons on a railway route whose total length is 4.8 kilometers.

The results of the test case show that the developed "modified SQP-method" based on sequential quadratic programming is suitable for the optimization of the energy consumed by electrical trains.

After evaluating the accuracy of methods on the test case, the developed method is applied to real cases of energy consumption optimization for traction passenger and freight trains.

The sixth chapter presents the results of "modified SQP-method" for optimization of active energy consumed during the traction power supply.

The conclusion puts an accent on the effective application of the developed "modified SQP-method" specifically for railways on which freight trains operate.

**Ključne riječi:** elektrovučni sustav, elektrovučna podstanica, električni vlakovi, simulacijski model kretanja vlaka, modificirana SQP-metoda, potrošnja energije.

**Keywords:** electric traction system, traction substation, electric trains, train movement simulator, modified SQP-method, energy consumption.

## 12. Životopis

Milivoj Mandić rođen je 4. prosinca 1978. godine u Splitu. Osnovnu školu završio je u Krivodolu. U razdoblju od 1993. do 1997. godine pohađao je gimnaziju "Dr. Mate Ujević" u Imotskom, prirodoslovno-matematički smjer.

Studirao je na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu od 1997. do 2002. Upisuje završetak studija na Zavodu za visoki napon i energetiku s naglaskom na znanstveno-istraživačkom radu s temom "Elektromagnetska kompatibilnost u visokonaponskim postrojenjima", pod vodstvom prof. dr. sc. Ive Uglešića. Diplomirao je na smjeru Energetika 2002. godine s izvrsnim uspjehom. Dobitnik je godišnje nagrade "Hrvoje Požar", za 2002. godinu za izvrstan uspjeh na studiju energetskega usmjerenja.

Od listopada 2002. godine zaposlen je kao znanstveni novak na Fakultetu elektrotehnike i računarstva (Zavod za visoki napon i energetiku).

Magistarski rad pod naslovom "Elektroenergetski proračun u elektroenergetskom sustavu 25 kV, 50 Hz" obranio je 2006. godine.

Sudjeluje u nastavi na sljedećim predmetima: Tehnika visokog napona, Laboratorij elektroenergetike 2, Prijelazne pojave i elektromagnetska kompatibilnost i Napajanje električne vuče.

Koautor je više od četrdeset studija i elaborata vezanih uz elektrifikaciju željezničkih pruga, ispitivanje otpora uzemljenja, prenaponsku zaštitu postrojenja i transformatorskih stanica te dvanaest članaka objavljenih na domaćim i međunarodnim konferencijama i jednog poglavlja u knjizi. Također je istraživao probleme električne vuče. Govori aktivno engleski i pasivno francuski jezik.

### 13. Biography

Milivoj Mandić was born on December 4<sup>th</sup> 1978 in Split. He finished primary school in Krivodol. From 1993 to 1997 he attended grammar high school "Mate Ujević" in Imotski, department of Natural Sciences.

At the Faculty of Electrical Engineering and Computing, University of Zagreb, he studied from 1997 to 2002.

He completed his studies at the Department of Power Systems with scientific research titled "Electromagnetic compatibility in high voltage installations" led by prof. Ivo Uglešić, PhD. and graduated with excellent grades in 2002.

In 2002, he was awarded the annual award "Hrvoje Požar" for achievements in the field of power engineering studies.

Since 2002, he has been working as a scientific researcher at the Department of Power Systems of the Faculty of Electrical Engineering and Computing.

In 2006, he completed his Master thesis "Calculation on power supply for 25 kV, 50 Hz electric railway system".

Milivoj Mandić is one of the assistant teachers of the following courses: High Voltage Engineering, Laboratory of Electrical Power Engineering 2, Electromagnetic Transients and Electromagnetic Compatibility and Electric Traction Power Supply.

As a co-author, he has worked on more than forty studies and elaborates related to the electrification of railway lines, testing resistance grounding, surge protection of plants and substations; on twelve papers published at international conferences and conferences in Croatia and a chapter in the book "Modern electric traction-power supply". He has also been doing research on problems related to electric traction. He speaks English (fluently and actively) and French (passively).