

# UNAPRIJEĐENA METAHEURISTIČKA METODA ZA OPTIMALAN SMJEŠTAJ UREĐAJA ZA MJERENJE NAPONSKIH PROPADA

---

Šipoš, Mario

Doctoral thesis / Disertacija

2020

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:390840>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-09**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH  
TEHNOLOGIJA OSIJEK

Mario Šipoš

**UNAPRIJEĐENA METAHEURISTIČKA METODA ZA OPTIMALAN  
SMJEŠTAJ UREĐAJA ZA MJERENJE NAPONSKIH PROPADA**

Doktorska disertacija

Osijek, 2020.

---

Doktorska disertacija izrađena je na Zavodu za elektroenergetiku Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.

Mentor: izv.prof.dr.sc. Zvonimir Klaić

Doktorska disertacija ima 125 stranica.

Disertacija br.: 74

---

---

Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije:

1. Prof.dr.sc. **Damir Šljivac**, predsjednik
2. Izv.prof.dr.sc. **Zvonimir Klaić**, mentor
3. Prof.dr.sc. **Ivica Pavić**, FER Zagreb, član

---

Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije:

1. Prof.dr.sc. **Damir Šljivac**, predsjednik
2. Izv.prof.dr.sc. **Zvonimir Klaić**, mentor
3. Prof.dr.sc. **Ivica Pavić**, FER Zagreb, član
4. Doc.dr.sc. **Emmanuel Karlo Nyarko**, član
5. Doc.dr.sc. **Krešimir Fekete**, član

Datum obrane doktorske disertacije: 16. siječnja 2020.

---

---

Hvala mom mentoru, izv. prof. dr. sc. Zvonimiru Klaiću, na prijateljskom i stručnom vođenju od samog upisa na poslijediplomski doktorski studiji na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, do završetka izrade ove doktorske disertacije.

---

1. Uvod.....	1
1.1. Opis problema .....	1
1.2. Motivacija za istraživanje.....	2
1.3. Cilj disertacije .....	2
1.4. Hipoteza .....	2
1.5. Organizacija i struktura disertacije.....	3
2. Kvaliteta električne energije.....	4
2.1. Naponski propadi .....	5
2.2. Kratki spoj .....	7
2.3. Metoda simetričnih komponenata .....	9
2.3.1. Jednofazni kratki spoj u uzemljenoj mreži.....	13
2.3.2. Dvofazni kratki spoj .....	15
2.3.3. Dvofazni kratki spoj uz istovremeni dodir sa zemljom.....	17
2.3.4. Trofazni kratki spoj .....	18
2.4. Amplituda simetričnog naponskog propada.....	20
2.5. Amplituda nesimetričnog naponskog propada.....	21
2.6. Promjene napona uslijed jednofaznog kratkog spoja.....	22
2.7. Gradnja matrice impedancija nultoga slijeda .....	24
2.8. Klasifikacija i propagacija naponskih propada .....	26
3. Testni sustav .....	33
3.1. Opterećenje.....	35
3.1.1. Trofazno opterećenje spojeno u trokut.....	36
3.1.2. Transformatori.....	37
4. Optimizacija elektroenergetskog sustava .....	45
4.1. Meta-heurističke metode .....	48
4.2. Lokalni i globalni optimum.....	49
4.3. Varijante algoritma šišmiša.....	58

4.3.1. Kaotični algoritam šišmiša .....	58
4.3.2. Algoritam šišmiša s mutacijom .....	58
4.3.3. Algoritam šišmiša s mutacijom i križanjem .....	58
4.4. Pregled literature .....	58
5. Izloženo područje .....	63
6. Područje doseg nadziranja .....	65
7. Određivanje optimalne lokacije mjernih uređaja .....	71
7.1. Područja doseg monitora .....	73
7.2. Optimalan razmještaj mjernih uređaja kod trofaznih kratkih spojeva .....	74
7.3. Optimalan razmještaj i broj mjernih uređaja za otkrivanje naponskih propada kod trofaznih i jednofaznih kratkih spojeva .....	87
8. Određivanje mjesta kvara .....	91
8.1. Nadzirana klasifikacija .....	91
8.2. Stabla odlučivanja .....	91
8.3. Linearna regresija .....	96
8.4. Višestruka linearna regresija .....	99
9. Zaključak .....	104
Literatura .....	105
Popis slika .....	114
Popis tablica .....	116
Sažetak .....	118
Abstract .....	119
Životopis .....	120
Prilozi .....	122

## 1. Uvod

Ovisnost modernog društva o električnoj energiji najbolje pokazuju razdoblja kada njena isporuka nije moguća. Ti periodi se očituju velikim gubicima u industriji, također predstavljaju sigurnosni problem, ako su u pitanju zračne luke, vojna postrojenja, velike elektrane, bankama zbog rada u stvarnom vremenu i bolnicama. Kvaliteta električne energije može se jednostavno definirati kao stupanja otklona od nazivnih vrijednosti napona mreže. Sam pojam kvalitete električne energije s korištenjem mjernih uređaja za njeno praćenje, javlja se već u kasnim šezdesetim godinama 20. stoljeća.

Kvaliteta električne energije obuhvaća široki spektar problema električne energije među kojim su: naponski propadi i prekidi, prisutnost signalnih napona, prisutnost istosmjernog napona u izmjeničnom, naponska kolebanja, prijelazni prenaponi, valovitost, harmonici i međuharmonici, naponska nesimetrija i promjene osnovne frekvencije mreže.

Mjerni uređaji se koriste za mjerenje problema kvalitete električne energije i prvi su korak u otklanjanju navedenih problema. Zbog neisplativosti instaliranja mjernih uređaja na svaku sabirnicu elektroenergetskog sustava, potrebno je razviti metode za rješavanje problema optimizacije određivanja minimalnog broja mjernih uređaja i sabirnica na koje se moraju instalirati, kako bi se obuhvatio cijeli sustav.

Navedeni problem optimizacije u znanstveno istraživačkim radovima, rješavan je korištenjem egzaktnih i meta-heurističkih metoda, kao i hibridnih metoda optimizacije. Pregled znanstvenih radova za korištenje metoda optimizacije za rješavanje različitih problema optimizacije u elektroenergetskom sustavu dan je u ovoj doktorskoj disertaciji.

Ova doktorska disertacija bavit će se problemom određivanja optimalne lokacije i broja mjernih uređaja za otkrivanje naponskih propada. Kako je najčešći uzrok naponskih propada pojava kratkog spoja u mreži, bilo bi dobro odrediti mjesto nastanka kvara te ukoliko je vod zahvaćen kvarom klasificirati vod i odrediti mjesto kvara na vodu. Navedeni problem klasifikacije voda zahvaćenog kvarom, kao i određivanje mjesta kvara na dužini voda, također će biti obuhvaćeni ovom doktorskom disertacijom.

### 1.1. Opis problema

Naziranje kvalitete električne energije pomoću mjernih uređaja je prvi korak u otklanjanju navedenih problema. Idealni slučaj da su mjerni uređaji instalirani na svakoj sabirnici nije



ekonomski isplativ niti opravdan. U skladu s navedenim potrebno je razviti metodu koja će odrediti optimalan broj i lokacije uređaja za mjerenje naponskih propada.

## **1.2. Motivacija za istraživanje**

Naponski propadi i kratkotrajni prekidi opskrbe predstavljaju dva najveća problema kvalitete električne energije, koji uzrokuju nepravilan rad uređaja u industrijskom i uslužnom sektoru. Ekonomske posljedice dva navedena problema kvalitete električne energije uzrokuju gubitke koji se izražavaju u milijunima raznih valuta [1].

Noviji znanstveno istraživački rad za optimalnu lokaciju uređaja za mjerenje naponskih propada [2] ukazuje na važnost navedenog problema optimizacije elektroenergetskog sustava, također pokazuje da je tema određivanja optimalne lokacije i broja uređaja za mjerenje naponskih propada aktualna.

## **1.3. Cilj disertacije**

Cilj ove doktorske disertacije je znanstveno-istraživačkim radom autora obrazložiti na koji način su ostvareni znanstveni doprinosi navedeni u nastavku:

- Unaprijeđena meta-heuristička metoda šišmiša za određivanje optimalnog broja i lokacije uređaja za mjerenje naponskih propada.
- Verifikacija unaprijeđene metode usporedbom s egzaktnom metodom linearnog programiranja.
- Određivanje mjesta kvara pomoću algoritma stabla odlučivanja i linearne regresije na temelju rezultata dobivenih unaprijeđenom metodom.

U nastavku doktorske disertacija opisana su ispunjenja gore navedenih znanstvenih doprinosa.

## **1.4. Hipoteza**

Problem određivanje optimalne lokacije i broja uređaja za mjerenje naponskih propada, može se odrediti korištenjem područja dosega nadziranja i unaprijeđenog binarnog algoritma šišmiša s težinskim koeficijentom izloženog područja.

## 1.5. Organizacija i struktura disertacije

Doktorska disertacija podijeljena je u devet poglavlja:

Prvo poglavlje obuhvaća uvod u doktorsku disertaciju, daje opis problema, motivaciju za istraživanje i sam cilj doktorske disertacije.

Drugo poglavlje opisuje probleme kvalitete električne energije, daje njenu definiciju i detaljno opisuje naponske propade, problem kvalitete električne energije s kojim se ova doktorska disertacija bavi. Također, opisane su vrste kratkih spojeva, metode simetričnih komponenata, predstavljeni su matematički modeli kratkih spojeva i dan je detaljan opis naponskih propada prema vrsti kratkog spoja i njihova propagacija na niže naponske razine.

Treće poglavlje donosi prikaz IEEE 39 sabirničkog sustava, koji se koristi za simulacije kratkih spojeva u PowerFactory DigSilent-u.

Četvrto poglavlje daje detaljan opis meta-heurističkih metoda s naglaskom korištenja algoritma šišmiša u rješavanju problema optimizacije elektroenergetskih sustava.

Peto poglavlje opisuje izloženo područje sabirnice i način njihove usporedbe.

Šesto poglavlje sadrži opis područja dosega naziranja.

Sedmo poglavlje opisuje razvijeni binarni algoritam šišmiša s težinskim koeficijentom izloženog područja. Također razvijena metoda se testira na IEEE 39 sabirničkom sustavu, a dobiveni rezultati se provjeravaju korištenjem GLPK.

Osmo poglavlje obuhvaća određivanje voda na kojem je nastupio kvara korištenjem klasifikacijskog algoritma stabla odlučivanja i određivanje mjesta kvara na vodu pomoću linearne regresije.

Deveto poglavlje daje zaključak znanstveno istraživačkog rada, obuhvaćenog ovo doktorskom disertacijom.

## 2. KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Pojam kvalitete električne energije s predloženom uporabom uređaja za mjerenje kvalitete električne energije po prvi put se javlja 1968. godine u studiji [3] mornarice SAD-a [4]. Neki od uzroka povećanja zainteresiranosti za kvalitetu električne energije dani su u nastavku:

- Električna oprema postala je osjetljivija na naponske smetnje,
- Električna oprema sama uzrokuje naponske smetnje,
- Sve veća potreba za standardizacijom i kriterijima izvođenja,
- Kvaliteta električne energije se može mjeriti [4].

Kako se električna energije isporučuje preko napona koji se sastoje od amplitude, frekvencije, valnog oblika i simetrije napona, kvaliteta električne energije se može definirati kao odklon od nazivnih vrijednosti navedenih pokazatelja napona [1].

Drugim riječima, kvaliteta električne energije je pojam koji se odnosi na održavanje približno sinusoidnog oblika napona i struja sabirnice pri nazivnoj veličini i frekvenciji [5].

Za proučavanje kvalitete električne energije razvijene su različite grane, koje se bave različitim problemima kvalitete električne energije:

1. Temeljni koncepti - identificiraju parametre i stupanj njihove promjene varijacije od nazivne veličine, što je temeljni razlog za probleme kvalitete električne energije,
2. Izvori - su regije ili lokacije ili događaji koji uzrokuju neželjene varijacija tih parametara,
3. Efekti – na sustave i opremu potrošača nakon pojave različitih poremećaja,
4. Modeliranje i analiza - konfiguriranje poremećaja, njegovog pojavljivanja, izvora i učinka; uglavnom na temelju matematičke pozadine,
5. Instrumentacija - konstantna mjerenja električnih parametara,
6. Rješenja – isporuka električne energije idealne kvalitete energije potrošačkoj strani je praktički nemoguće. Cilj je smanjiti vjerojatnost pojave smetnji i učinke problema kvalitete električne energije.

Gore navedene grane su međusobno povezane i jako ovise jedna o drugoj [5].

Osobine napona obuhvaćene analizom kvalitete električne energije dane su u nastavku [1]:

- naponski propadi i prekidi,
- prisutnost signalnih napona,
- prisutnost istosmjernog napona u izmjeničnom,

- naponska kolebanja,
- prijelazni prenaponi,
- valovitost,
- harmonici i međuharmonici,
- naponska nesimetrija,
- promjene osnovne frekvencije mreže.

Postoji mnogo razloga i zahtjeva za praćenje kvalitete električne energije. Jedan od glavnih razloga za praćenje kvalitete električne energije je financijska šteta uzrokovana poremećajima kvalitete električne energije u kritičnoj i osjetljivoj opremi. Poremećaji kvalitete električne energije mogu uzrokovati kvarove, oštećenja, prekide procesa i druge nepravilnosti u opremi te njihovim operacijama. Nadziranje kvalitete električne energije može se koristiti kao alat za osiguravanje dostupnosti energije kupcima.

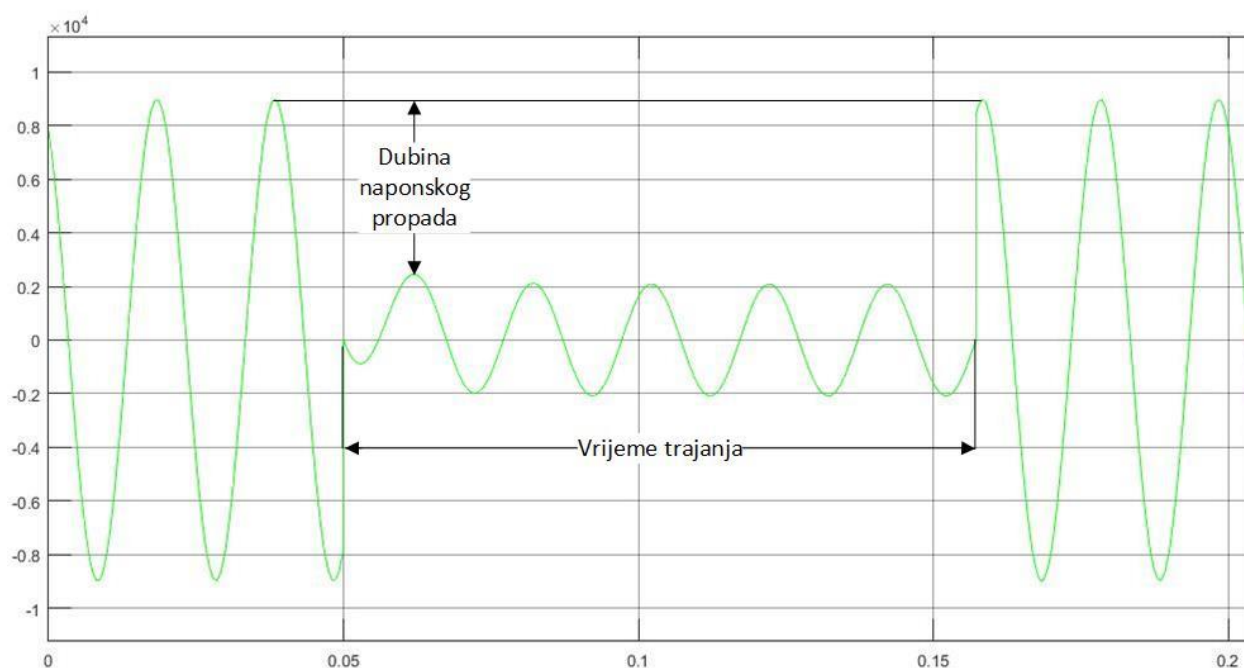
Neke od prednosti koje se mogu postići korištenjem nadziranja kvalitete električne energije su:

- Otkriti potrebu za ublažavanjem problema kvalitete električne energije,
- Za raspored preventivnog i prediktivnog održavanja,
- Osiguranje učinkovitosti opreme,
- Za procjenu osjetljivosti opreme na poremećaje kvalitete električne energije,
- Za identifikaciju događaja i problema kvalitete električne energije,
- Smanjenje gubitaka snage distribucijskom sustavu,
- Smanjiti gubitak u proizvodnji i poboljšati raspoloživost opreme [6].

U ovoj disertaciji za formiranje područja dosega nadziranja će se koristiti naponski propadi, tako da će biti opisani u nastavku.

## 2.1. Naponski propadi

Naponski propadi su kratkotrajna smanjenja efektivnog napona između 90 % i 1 %  $U_n$ . Ne postoji jasna definicija trajanja naponskog propada, ali obično je između 0,5 ciklusa i 1 minute. Slika 2.1. prikazuje dubinu naponskog propada i vrijeme trajanja [1] [5].



Slika 2.1. Naponski propad.

Glavni uzrok naponskih propada u elektroenergetskoj mreži su kratki spojevi. U ovoj disertaciji razmatrat će se nastanak naponskih propada prilikom kratkih spojeva, zato će oni biti detaljno opisani u potpoglavlju 2.2. Ostali uzroci naponskih propada su: uključivanje velikih opterećenja, pokretanje velikih indukcijskih motora, premještanje opterećenja s jednog izvora napajanja na drugi [5].

Posljedice koje mogu nastati u elektroenergetskom sustavu pojavom naponskog propada su:

- Utjecaj na stabilnost napona zbog sniženja napona sabirnice u kratkom vremenu,
  - Kvarovi električnih niskonaponskih uređaja,
  - Kvarovi neprekidnog napajanja,
  - Neispravnost mjerne i kontrolne opreme,
  - Povezivanje s komunikacijskim signalima (engl. Interfacing with communication signals)
- [5]

Naponski propadi mogu se odrediti na dva načina: deterministički – dugotrajnim mjerenjem i stohastički – matematičkim modeliranjem. Prednost matematičkih modeliranja je što omogućuju razne scenarije s proračunima za bilo koju točku u sustavu za postojeće sustave i sustave koji ne postoje [1].

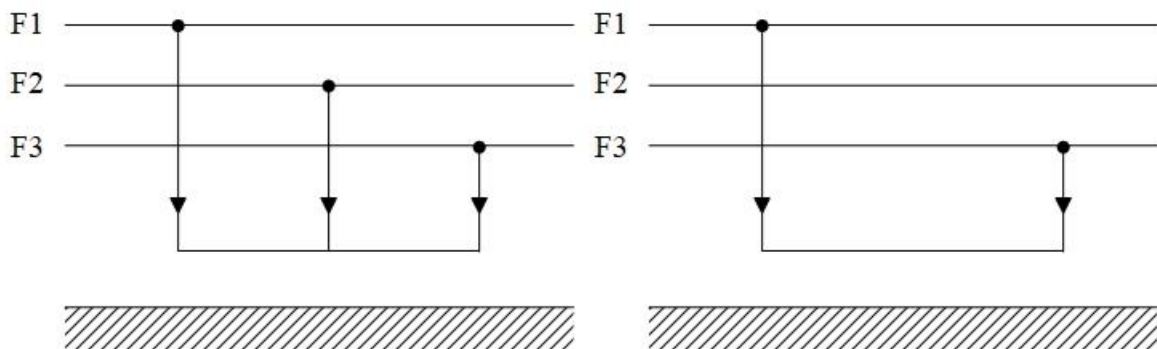
## 2.2. Kratki spoj

Normalni pogon elektroenergetskog sustava može biti narušen pojavom kvara, koji nastaje djelomičnim ili potpunim probojem izolacije. Potpuni proboj izolacija naziva se kratki spoj i pojavljuje se u mreži kod spoja jedan ili više vodiča s drugim vodičem ili uzemljenjem. Kod proboja izolacije, nije nužno da se vodiči dodiruju, kratki spoj može nastati protokom struje kroz ionizirani put, kroz medij koji je inače izolator. Kratki spoj utječe na pojavu protoka struje vrlo visokih iznosa kroz sustav do mjesta kvara [7] i predstavljaju važan dio analize elektroenergetskog sustava [1].

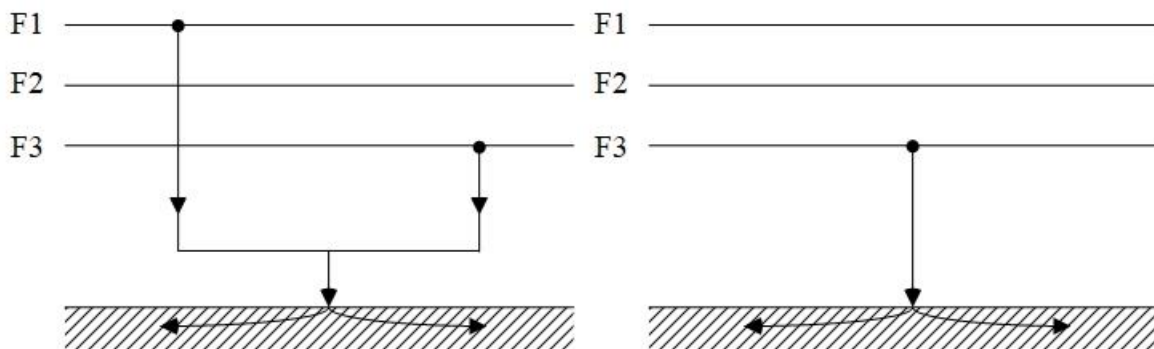
Svrha analize kratkih spojeva je odabir odgovarajuće zaštitne sheme (releja, prekidača), kako bi se sustav u što kraćem vremenu zaštitio od odstupanja od normalnog pogona, a to se postiže proračunom minimalnih i maksimalnih struja i napona kratkih spojeva na različitim mjestima u sustavu pri različitim vrstama kratkih spojeva [7].

U trofaznoj mreži pojavljuju se sljedeće vrste kratkih spojeva prikazanih slikama 2.2. i 2.3. [7], [1], [8]:

1. Simetrični kratki spojevi:
  - a. Trofazni kratki spoj,
2. Nesimetrični kratki spojevi:
  - a. Jednofazni kratki spoj (u uzemljenoj mreži),
  - b. Dvofazni kratki spoj,
  - c. Dvofazni kratki spoj uz istovremeni dodir sa zemljom (u uzemljenoj mreži)

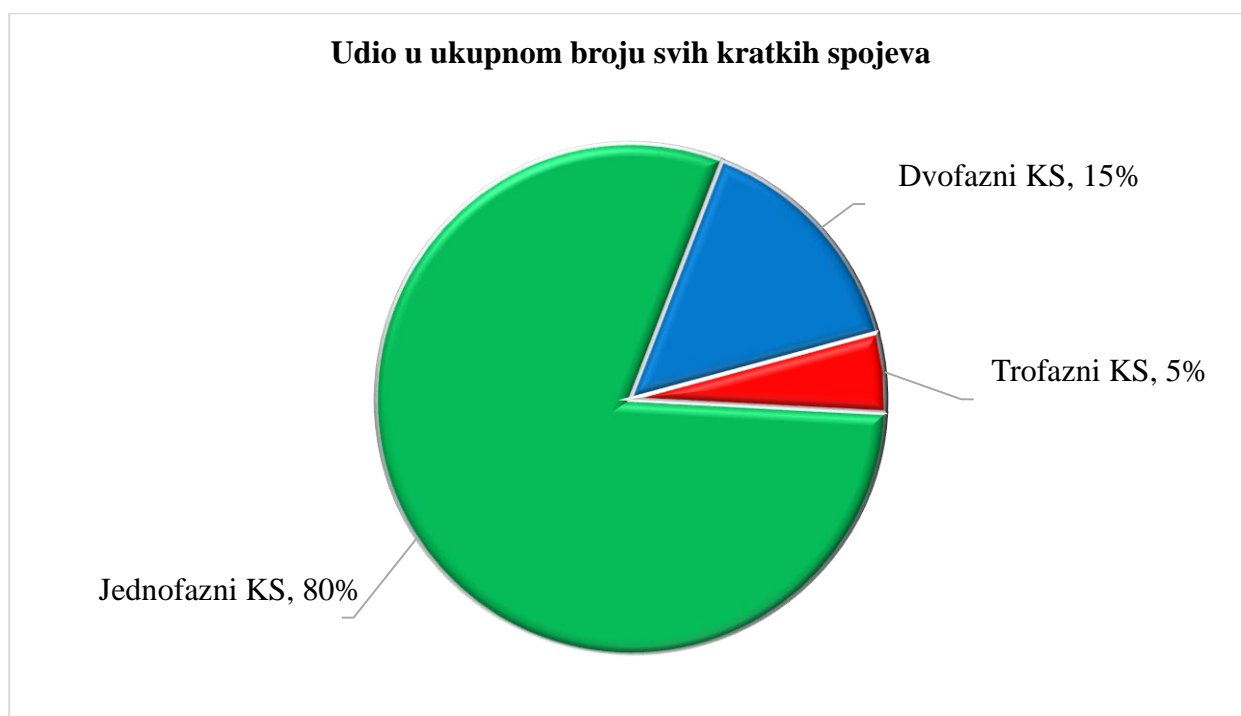


Slika 2.2. Trofazni kratki spoj (lijevo) i dvofazni kratki spoj (desno).



Slika 2.3. Dvofazni kratki spoj uz istovremeni dodir sa zemljom (lijevo),  
Jednofazni kratki spoj (desno).

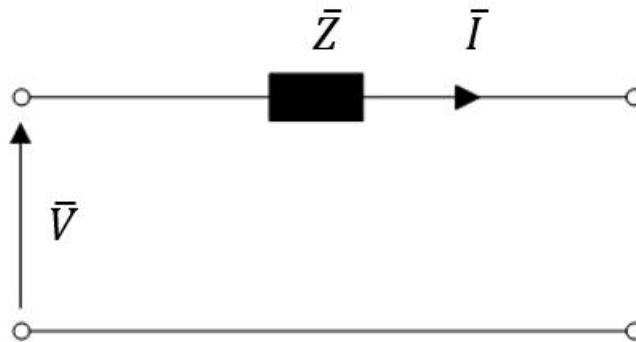
Slika 2.4. prikazuje usporedbu vjerojatnosti pojave kratkih spojeva u elektroenergetskom sustavu. Jednofazni kratki spoj ima najveći udio od 80 % svih kratkih spojeva, slijede ga dvofazni kratki spoj i dvofazni kratki spoj uz istovremeni dodir sa zemljom, koji zajedno čine 15% i samo 5% udjela svih kratkih spojeva zauzima trofazni kratki spoj. Iako se rijetko pojavljuju, trofazni kratki spojevi su najpogubniji za potrošače i za opremu [1].



Slika 2.4. Udio u ukupnom broju svih kratkih spojeva.

### 2.3. Metoda simetričnih komponenata

Za proračun simetričnih sustava, u normalnom pogonu, dovoljno je prilike sustava računati samo za jednu fazu prema ekvivalentnoj jednofaznoj shemi trofaznog simetričnog sustava prikazanog slikom 2.5.



Slika 2.5. Jednofazna shema trofaznog simetričnog sustava

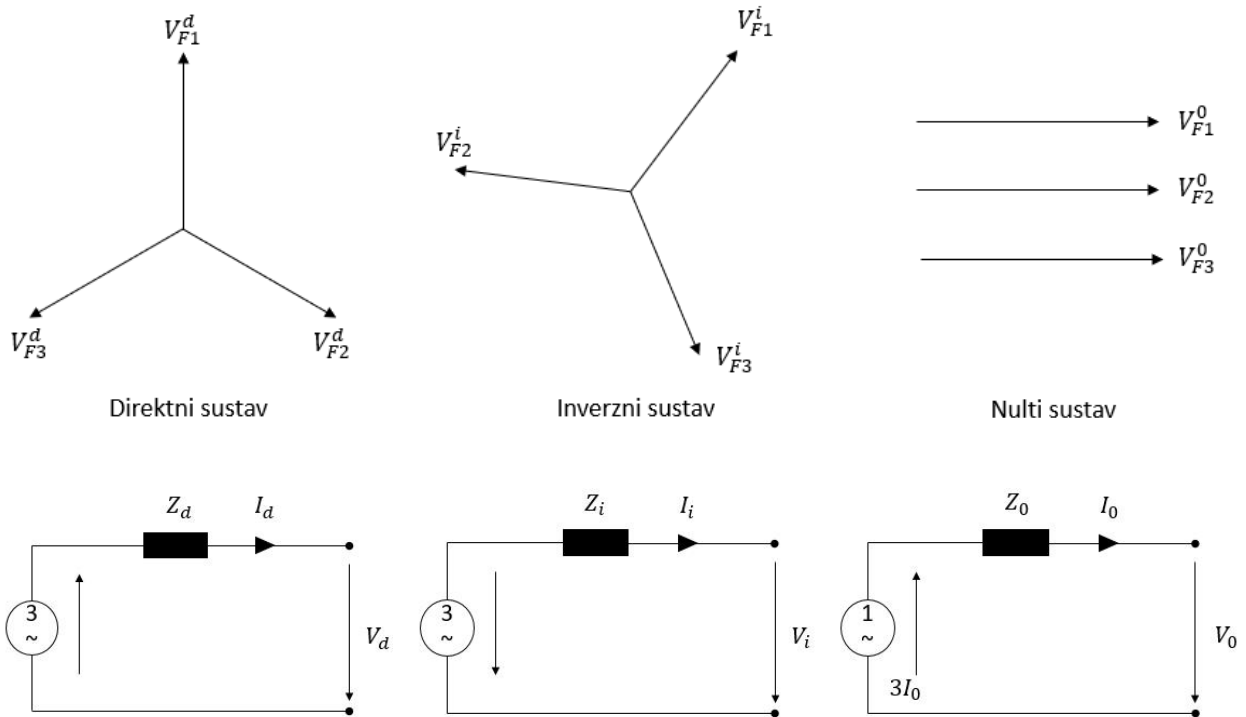
Sve vrijednosti izračunate za jednu fazu vrijede i za ostale dvije, zato što sve tri faze imaju jednake impedancije  $Z$ , kroz koje teku jednake struje  $I$ , jer na impedancije djeluje jednaki napon  $V$  [8].

U suprotnom, ukoliko je sustav nesimetričan, što dolazi kod pojave nesimetričnih kvarova, računanje sustava postaje znatno složenije. Uvođenjem metode simetričnih komponenata, pojednostavljen je složeni proračun nesimetričnih prilika [1].

Svaki nesimetrični trofazni fazorski sustav može se transformirati u simetrični trofazni fazorski sustav korištenjem tri jednofazna simetrična sustava navedena u nastavku i prikazana slikom 2.6. [7] :

- direktni sustav, oznaka  $d$  ili  $1$ ,
- inverzni sustav, oznaka  $i$  ili  $2$ ,
- nulti sustav, oznaka  $0$  [1].





Slika 2.6. Ekvivalentne sheme za direktni, inverzni i nulti sustav [9].

Tri nesimetrična napona  $V_{F1}$ ,  $V_{F2}$  i  $V_{F3}$  mogu se prikazati preko svojih simetričnih komponenti pomoću izraza (2-1) do (2-3) [7]:

$$\bar{V}_{F1} = \bar{V}_{F1}^d + \bar{V}_{F1}^i + \bar{V}_{F1}^0 \quad (2-1)$$

$$\bar{V}_{F2} = \bar{V}_{F2}^d + \bar{V}_{F2}^i + \bar{V}_{F2}^0 \quad (2-2)$$

$$\bar{V}_{F3} = \bar{V}_{F3}^d + \bar{V}_{F3}^i + \bar{V}_{F3}^0 \quad (2-3)$$

Za primjenu metode simetričnih komponenti na trofaznu sustav, potrebno je uvođenje simetričnog operator „a“, koji će zarotirati drugi fazor za  $120^\circ$  u smjeru suprotnom od kazaljke na satu, ali množenjem neće promijeniti vrijednost fazora. Takav operator je kompleksan broj jedinica veličina i definira se izrazom (2-4) [7]

$$a = 1 \angle 120^\circ = 1e^{j\left(\frac{2\pi}{3}\right)} = 1(\cos 120^\circ + j \sin 120^\circ) = -0,5 + j0.866 \quad (2-4)$$

Tablica 2.1. Tablica prikazuje potenciju i funkciju operatora „a“ [7]

Potencija ili funkcija operatora a	U polarnom obliku	U pravokutnom obliku
a	$1\angle 120^\circ$	$-0.5 + j0.866$
$a^2$	$1\angle 240^\circ = 1\angle -120^\circ$	$-0.5 - j0.866$
$a^3$	$1\angle 360^\circ = 1\angle 0^\circ$	$1.0 + j0.0$
$a^4$	$1\angle 120^\circ$	$-0.5 + j0.866$
$1 + a = -a^2$	$1\angle 60^\circ$	$0.5 + j0.866$
$1 - a$	$\sqrt{3}\angle -30^\circ$	$1.5 - j0.866$
$1 + a^2 = -a$	$1\angle -60^\circ$	$0.5 - j0.866$
$1 - a^2$	$3\angle 30^\circ$	$1.5 + j0.866$
$a - 1$	$3\angle 150^\circ$	$-1.5 + j0.866$
$a + a^2$	$1\angle 180^\circ$	$-1.0 + j0.0$
$a - a^2$	$3\angle 90^\circ$	$0.0 + j1.732$
$a^2 - a$	$3\angle -90^\circ$	$0.0 - j1.732$
$a^2 - 1$	$3\angle -150^\circ$	$-1.5 - j0.866$
$1 + a + a^2$	$0\angle 0^\circ$	$0.0 + j0.0$

Odnosi za prikaz nesimetričnih faznih napona  $V_{F1}$ ,  $V_{F2}$  i  $V_{F3}$  pomoću simetričnih veličina  $V^d$ ,  $V^i$  i  $V^0$  prikazan je izrazima (2-5) do (2-7) [1].

- direktni sustav:

$$\begin{aligned}\bar{V}_{F1}^d &= \bar{V}^d \\ \bar{V}_{F2}^d &= a^2 \cdot \bar{V}^d \\ \bar{V}_{F3}^d &= a \cdot \bar{V}^d\end{aligned}\tag{2-5}$$

- inverzni sustav:

$$\begin{aligned}\bar{V}_{F1}^i &= \bar{V}^d \\ \bar{V}_{F2}^i &= a \cdot \bar{V}^d \\ \bar{V}_{F3}^i &= a^2 \cdot \bar{V}^d\end{aligned}\tag{2-6}$$

- nulti sustav:

$$\bar{V}_{F1}^0 = \bar{V}_{F2}^0 = \bar{V}_{F3}^0 = \bar{V}^0\tag{2-7}$$

Izraz (2-8) prikazuje odnos između faznih napona i simetričnih komponenta faznih napona:

$$\begin{aligned}\bar{V}_{F1} &= \bar{V}^0 + \bar{V}^d + \bar{V}^i \\ \bar{V}_{F2} &= \bar{V}^0 + a^2 \cdot \bar{V}^d + a \cdot \bar{V}^i \\ \bar{V}_{F3} &= \bar{V}^0 + a \cdot \bar{V}^d + a^2 \cdot \bar{V}^i\end{aligned}\quad (2-8)$$

Matrični zapis izraza (2-8) prikazan je izrazom (2-9):

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{F1} \\ \bar{V}_{F2} \\ \bar{V}_{F3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{V}^0 \\ \bar{V}^d \\ \bar{V}^i \end{bmatrix}\quad (2-9)$$

gdje je  $A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$  matrica transformacije.

Izraz (2-10) predstavlja kraći zapis izraza (2-9)

$$V^{F1F2F3} = A \cdot V^{0di}\quad (2-10)$$

Izraz (2-11) dobije se inverznom matričnom transformacijom izraza (2-10)

$$V^{0di} = A^{-1} \cdot V^{F1F2F3}\quad (2-11)$$

gdje je  $A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$  inverzna matrica transformacije.

Istovjetni odnosi vrijede i za nesimetrične fazne struje [1]. Prema [7] vrijedi:

$$\begin{bmatrix} I_{F1} \\ I_{F2} \\ I_{F3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I^0 \\ I^d \\ I^i \end{bmatrix}\quad (2-12)$$

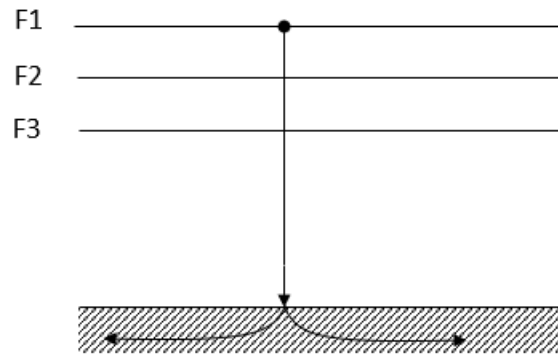
$$\begin{bmatrix} I^0 \\ I^d \\ I^i \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{F1} \\ I_{F2} \\ I_{F3} \end{bmatrix}\quad (2-13)$$

$$I^{F1F2F3} = A \cdot I^{0di}\quad (2-14)$$

$$I^{0di} = A^{-1} \cdot I^{F1F2F3}\quad (2-15)$$

### 2.3.1. Jednofazni kratki spoj u uzemljenoj mreži

Slika 2.7. pokazuje spoj faze F1 s zemljom kroz impedanciju  $Z_f$ . Način uzemljenja sustava utjecat će na protok struje zemljospoja. Pretpostavlja se čvrsto uzemljeni sustav s nulatom otpornošću. Postojat će impedancije toka struje kvara u obliku impedancije povratnog uzemljivača ili otpora uzemljivačke mreže.



Slika 2.7. Jednofazni kratki spoj u uzemljenoj mreži.

Na slici 2.7. se može vidjeti da je faza F1 kratko spojena, kako se struja opterećenja zanemaruje, struje u fazama F2 i F3 su nula, a napon na mjestu kvara jednak je  $V_{F1} = I_{F1} \cdot Z_f$ . Komponente sekvenci struja dane su pomoću izraza (2-16):

$$\begin{bmatrix} \bar{I}^0 \\ I^d \\ I^i \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{F1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} I_{F1} \\ I_{F1} \\ I_{F1} \end{bmatrix} \quad (2-16)$$

Prema izrazu (2-16) može se pisati izraz (2-17).

$$I^0 = I^d = I^i = \frac{1}{3} I_{F1} \quad (2-17)$$

Iz izraza (2-18)

$$3I^0 Z_f = V^0 + V^d + V^i = -I^0 Z_0 + (V_{F1} - I^d Z_d) - I^i Z_i \quad (2-18)$$

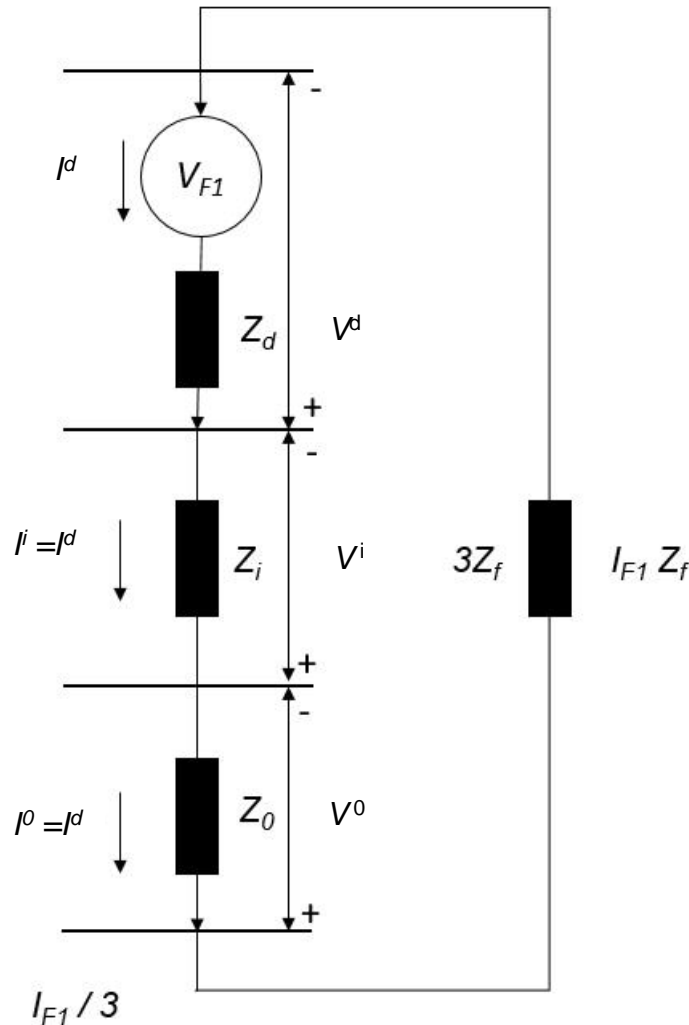
Slijedi izraz (2-19):

$$I^0 = \frac{V_{F1}}{Z_0 + Z_d + Z_i + 3Z_f} \quad (2-19)$$

Struja kvara  $I_{F1}$  dobije se izrazom (2-20):

$$I_{F1} = 3I^0 = \frac{3V_{F1}}{(Z_d + Z_i + Z_0) + 3Z_f} \quad (2-20)$$

Iz ovoga se može vidjeti da se ekvivalentna shema kratkog spoja može konstruirati korištenjem slijednih impedancija (engl. sequence impedances) kao na slici 2.8.



Slika 2.8. Ekvivalentna shema jednofaznog kratkog spoja s slijedim impedancijama.

Isti rezultat se može dobiti i sa slike 2.8.

$$(V_{F1} - I^d Z_d) + (-I^i Z_i) + (-I^0 Z_0) - 3Z_f I^0 = 0 \quad (2-21)$$

Napon faze F2 u odnosu na zemlju (engl. to ground) u uvjetima kvara dobije se izrazom (2-22):

$$V_{F2} = a^2 V^d + a V^i + V^0 = V_{F1} \frac{3a^2 Z_f + Z_i(a^2 - a) + Z_0(a^2 - 1)}{(Z_d + Z_i + Z_0) + 3Z_f} \quad (2-22)$$

Slično se može izračunati napon za fazu F3.

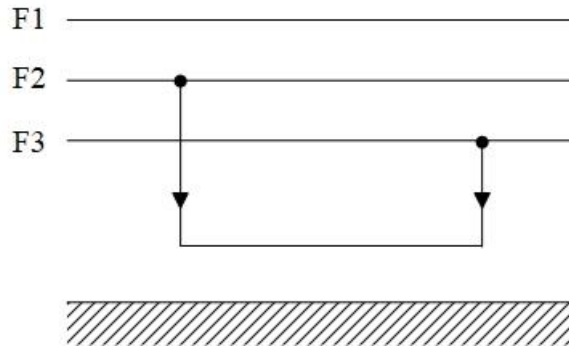
Izraz za struju uzemljenja za uporabu u izvedbama uzemljenja mreže i uzemljenju sustava dan je izrazom (2-23):

$$I_{F1} = \frac{3V_{F1}}{(R_0 + R_d + R_i + 3R_f + 3R_G) + j(X_0 + X_d + X_i)} \quad (2-23)$$

$R_f$  je otpor kvara,  $R_G$  je otpor mreže uzemljenja,  $R_0, R_d$  i  $R_i$  su sekvencijalni otpori (eng. sequence resistances),  $X_0, X_d$  i  $X_i$  su sekvencijalne reaktancije [10].

### 2.3.2. Dvofazni kratki spoj

Dvofazni kratki spoj faza F2 i F3 kroz impedanciju kvara  $Z_f$  prikazan je na slici 2.9. Struja kvara cirkulira između faza F2 i F3, teče natrag do izvora kroz fazu F2 i vraća se kroz fazu F3;  $I_{F1} = 0, I_{F2} = -I_{F3}$ .



Slika 2.9. Dvofazni kratki spoj.

Matrični zapis struja, može se prikazati izrazom:

$$\begin{bmatrix} I^0 \\ I^d \\ I^i \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -I_{F3} \\ I_{F3} \end{bmatrix} = \frac{I_{F3}}{3} \begin{bmatrix} 0 \\ -a + a^2 \\ -a^2 + a \end{bmatrix} \quad (2-24)$$

Kako je  $I_0 = 0$  i  $I_d = -I_i$ :

$$V_{F2} - V_{F3} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & -1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V^0 \\ V^d \\ V^i \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & a^2 - a & a - a^2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V^0 \\ V^d \\ V^i \end{vmatrix} \quad (2-25)$$

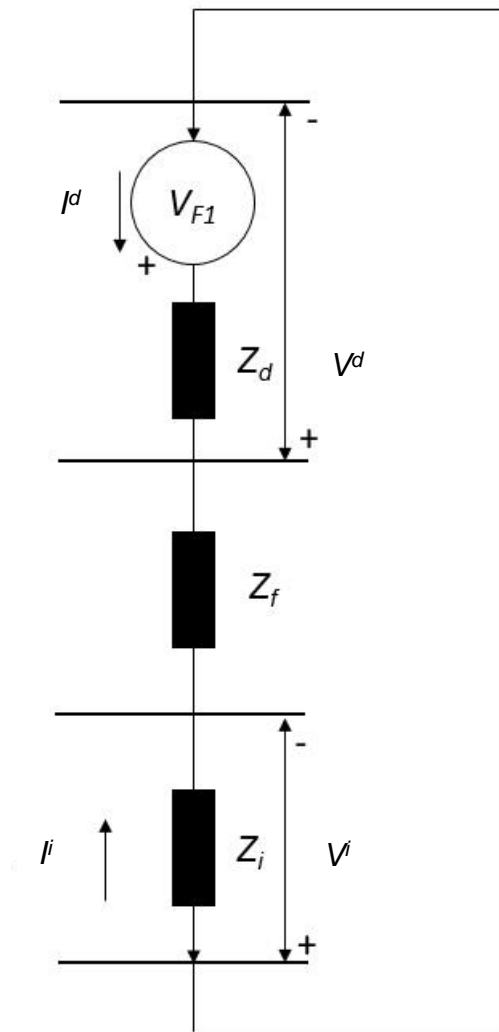
Prema tome:

$$V_{F2} - V_{F3} = (a^2 - a)(V^d - V^i) = (a^2 I^d + a I^i) Z_f = (a^2 - a) I^d Z_f \quad (2-26)$$

Iz čega slijedi izraz (2-27):

$$(V^d - V^i) = I^d Z_f \quad (2-27)$$

Ekvivalentni strujni krug prikazan je slikom



Slika 2.10. Ekvivalentni strujni krug dvofaznog kratkog spoja.

Također:

$$I_{F2} = (a^2 - a)I^d = -j\sqrt{3}I^d \quad (2-28)$$

Struja direktne komponente može se zamijeniti s:

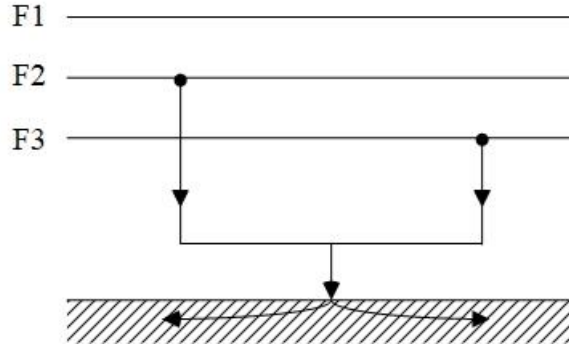
$$I^d = \frac{V_{F1}}{Z_d + Z_i + Z_f} \quad (2-29)$$

Struja kvara računa se izrazom (2-30):

$$I_{F2} = -I_{F3} = \frac{-j\sqrt{3}V_{F1}}{Z_d + Z_i + Z_f} \quad (2-30)$$

### 2.3.3. Dvofazni kratki spoj uz istovremeni dodir sa zemljom

Dvofazni kratki spoj uz istovremeni dodir sa zemljom prikazan je na slici 2.11. Faze F2 i F3 spojene su sa zemljom preko impedancije kvara  $Z_f$ . Struja neuzemljene faze  $I_{F1}$  jednaka je nuli. Iz toga slijedi da je  $I_d + I_i + I_0 = 0$ .



Slika 2.11. Dvofazni kratki spoj uz istovremeni dodir s zemljom.

Izraz za napone  $V_{F2}$  i  $V_{F3}$  dan je izrazom (2-31).

$$V_{F2} = V_{F3} = (I_{F2} + I_{F3})Z_f \quad (2-31)$$

Prema tome može se pisati izraz (2-32):

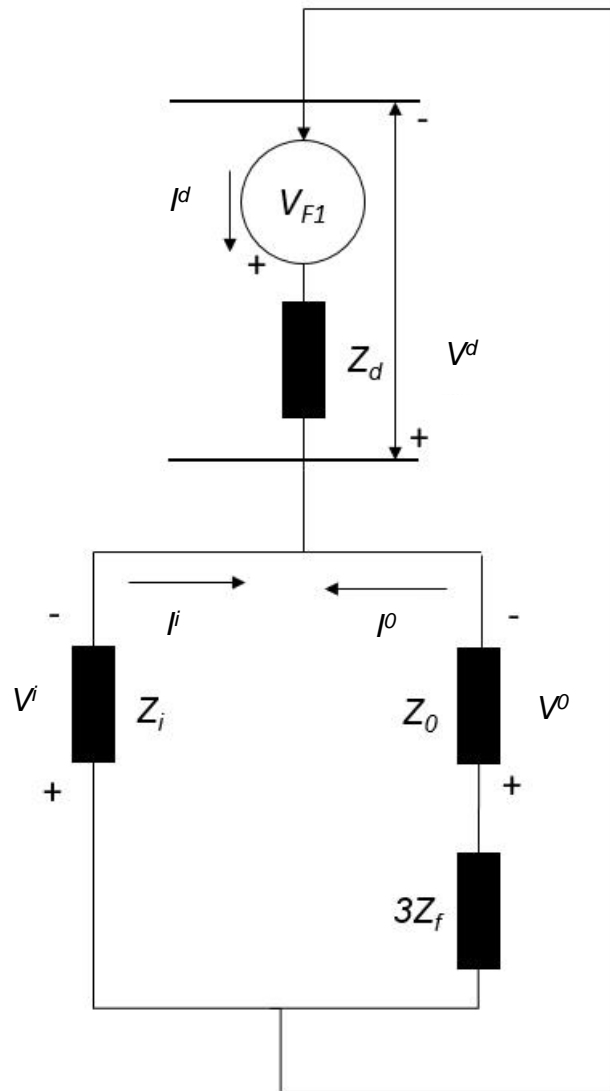
$$\begin{vmatrix} V^0 \\ V^d \\ V^i \end{vmatrix} = \frac{1}{3} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_{F1} \\ V_{F2} \\ V_{F3} \end{vmatrix} = \frac{I_{F3}}{3} \begin{vmatrix} V_{F1} + 2V_{F2} \\ V_{F1} + (a + a^2)V_{F2} \\ V_{F1} + (a + a^2)V_{F2} \end{vmatrix} \quad (2-32)$$

Što daje  $V^d = V^i$  iz čega slijedi izraz (2-33).

$$\begin{aligned} V^0 &= \frac{1}{3} (V_{F1} + 2V_{F2}) \\ &= \frac{1}{3} [(V^0 + V^d + V^i) + 2(I_{F2} + I_{F3})Z_f] \\ &= \frac{1}{3} [(V^0 + 2V^d) + 2(3I^0)Z_f] \\ &= V^d + 3Z_f I_0 \end{aligned} \quad (2-33)$$

To daje ekvivalentni strujni krug slike 2.12.





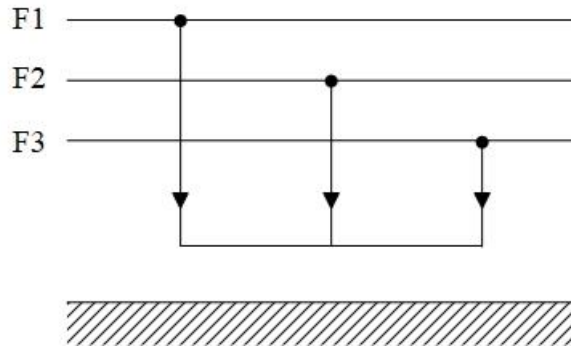
Slika 2.12. Ekvivalentni strujni krug dvofaznog dozemnog kratkog spoja

Struja kvara dobije se izrazom (2-34):

$$I^d = \frac{V_{F1}}{Z_1 + \frac{Z_i(Z_0 + 3Z_f)}{Z_i + Z_0 + 3Z_f}} \quad (2-34)$$

#### 2.3.4. Trofazni kratki spoj

Tri faze su kratko spojene putem jednakih impedancija kvara  $Z_f$ , slika 1.13. Vektorska suma struja kvara je nula, jer se razmatra simetrična pogreška i nema spoja sa zemljom izraz (2-35).



Slika 2.13. Trofazni kratki spoj

$$I^0 = 0 \quad I_{F1} + I_{F2} + I_{F3} = 0 \quad (2-35)$$

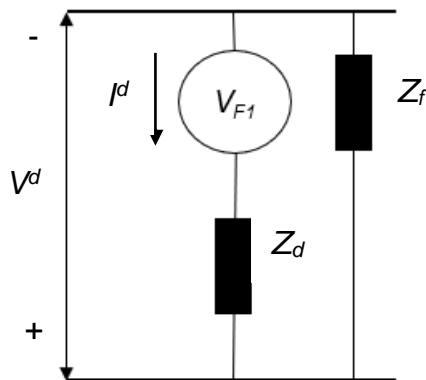
Kako je trofazni kratki spoj simetričan, matrica napona može se pisati izrazom (2-36).

$$\begin{bmatrix} V_{F1} \\ V_{F2} \\ V_{F3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_f & 0 & 0 \\ 0 & Z_f & 0 \\ 0 & 0 & Z_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{F1} \\ I_{F2} \\ I_{F3} \end{bmatrix} \quad (2-36)$$

Naponi sekvenci mogu se prikazati kao:

$$\begin{bmatrix} V^0 \\ V^d \\ V^i \end{bmatrix} = [A]^{-1} \begin{bmatrix} Z_f & 0 & 0 \\ 0 & Z_f & 0 \\ 0 & 0 & Z_f \end{bmatrix} [A] \begin{bmatrix} I^0 \\ I^d \\ I^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_f & 0 & 0 \\ 0 & Z_f & 0 \\ 0 & 0 & Z_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I^0 \\ I^d \\ I^i \end{bmatrix} \quad (2-37)$$

To daje ekvivalentni krug prikazan slikom 2.14 [10].



Slika 2.14. Ekvivalentni strujni krug trofaznog kratkog spoja.

Prema slici 2.14. sruje faza mogu se izraziti izrazima

$$I_{F1} = I^d = \frac{V_{F1}}{Z_d + Z_f} \quad (2-38)$$

$$I_{F2} = \alpha^2 I^d \quad (2-39)$$

$$I_{F3} = \alpha I^d \quad (2-40)$$

## 2.4. Amplituda simetričnog naponskog propada

Trofazni kratki spoj u mreži uzrokovat će simetrični naponski propad. Iz potpoglavlja 2.3.4. može se vidjeti, da su za proračun trofaznog kratkog spoja dovoljne vrijednosti direktnog slijeda. Pri analizi simetričnog naponskog propada razmatra se mreža s  $N+1$  čvorom i njena matrica impedancija  $Z$ . Napon na čvoru  $k$  tijekom trofaznog kratkog spoja na čvoru  $f$  prema teoremu o superpoziciji može se pisati izrazom (2-41):

$$v_{kf} = v_{pref(k)} + \Delta v_{kf} \quad (2-41)$$

gdje je  $v_{pref(k)}$  napon prije kvara na čvoru  $k$ , a  $\Delta v_{kf}$  je promjena napona na čvoru  $k$  uslijed kvara na čvoru  $f$ . Iz izraza (2-41) može se zaključiti da je napon tijekom trofaznog kratkog spoja jednak naponu prije kvara na promatranoj sabirnici uvećanom za promjenu napona uslijed kvara.

Matrični oblik izraza (2-41) može se napisati kao izraz (2-42), gdje je  $v_{kf}$  element  $(k,f)$  „matrice propada“  $V_{dfv}$ .

$$V_{dfv} = V_{pref} + \Delta V \quad (2-42)$$

Svi naponi tijekom kvara sadržani su u matrici propada, gdje red  $k$  matrice propada sadrži preostale napone na tom čvoru, kod kvarova na čvorovima  $1,2,\dots,k,\dots,N$ . Stupac  $f$  matrice propada predstavlja  $V_{dfv}$  preostale napone na čvorovima  $1,2,\dots,k,\dots,N$ , za kvar na čvoru  $f$ .  $V_{pref}$  je matrica napona prije kvara, koja se sastoji od  $N$  jednakih stupaca, jer je napon prije kvara na čvoru  $k$  jednak za sve kvarove.

Pomoću matrica impedancija mogu se izračunati promjene napona  $\Delta v_{kf}$ . U trenutku nastanak trofaznog kratkog spoja na čvoru  $f$ , u čvor  $f$  teče struja dana izrazom (2-43):

$$i_f = \frac{-v_{pref(f)}}{z_{ff}} \quad (2-43)$$

gdje je  $v_{pref(f)}$  napon prije kvara na pogođenoj sabirnici  $f$ ,  $z_{ff}$  je impedancija mreže gledana s pogođene sabirnice  $f$ .

Poznavanjem iznosa struje kratkog spoja čvora  $f$ , lako se može izračunati promjena napona na bilo kojoj sabirnici  $k$  pomoću izvandijagonalne impedancije između sabirnice  $k$  i čvora  $f$ ,  $z_{kf}$ . Impedancija  $z_{kf}$  predstavlja napon na sabirnici  $k$  u odnosu na referentni napon, kada u sabirnicu  $f$  teče jedinična struja kratkog spoja.

Promjena napona može se prikazati izrazom (2-44):

$$\Delta v_{kf} = -z_{kf} \cdot \frac{v_{pref}(f)}{z_{ff}} \quad (2-44)$$

Matrični oblik izraza (2-44) je:

$$\Delta V = -Z \cdot (diag Z)^{-1} \cdot V_{pref}^T \quad (2-45)$$

Uvrštenjem izraza (2-44) u izraz (2-41), dobije se naponski propad uslijed trofaznog kratkog spoja prikazan izrazom (2-46):

$$v_{kf} = v_{pref(k)} - \frac{v_{pref}(f)}{z_{ff}} \quad (2-46)$$

Ako se za napon prije kvara uzme vrijednost 1 p.u., zanemaruju se opterećenja i pojednostavljuje se izraz (2-46). Navedena pretpostavka dozvoljena je za stohastičko predviđanje amplituda napona tijekom kratkih spojeva.

Iz izraza (2-46) može se zaključiti da promjena napona na sabirnici  $k$  uslijed trofaznog kratkog spoja na čvoru  $f$  ovisi o kvocijentu izvan-dijagonalne i dijagonalne impedancije čvora kvara. Kako je matrica impedancija  $Z$  direktnog slijeda dijagonalno dominantna matrica, znači da je svaka sabirnica sustava izložena propadima uslijed kratkih spojeva koji nastaju bilo gdje u mreži.

## 2.5. Amplituda nesimetričnog naponskog propada

Nesimetrični kratki spojevi uzrokuju nesimetrične naponske propade, koji se analiziraju pomoću simetričnih komponenata objašnjenih u potpoglavlju 2.3. ove doktorske disertacije. Teorem o superpoziciji također omogućuje uporabu izraza (2-41) i (2-42) za simetrične komponente. Prema tome izraz za određivanje napona tijekom kvara, može se pisati izrazima (2-47) do (2-49):

$$V_{dfv}^d = V_{pref}^d + \Delta V^d \quad (2-47)$$

$$V_{dfv}^i = 0 + \Delta V^i \quad (2-48)$$

$$V_{dfv}^0 = 0 + \Delta V^0 \quad (2-49)$$

Prije kvara, naponi na čvorovima sadrže samo direktnu komponentu prema tome, matrice napona prije kvara nultog i inverznog slijeda su nula.

Fazni naponi se mogu dobiti primjenom transformacije simetričnih komponenata. U izrazima (2-50) do (2-52) faza  $FI$  je referentna:

$$V_{dfv}^{F1} = V_{dfv}^d + V_{dfv}^i + V_{dfv}^0 \quad (2-50)$$

$$V_{dfv}^{F2} = a^2 \cdot V_{dfv}^d + a \cdot V_{dfv}^i + V_{dfv}^0 \quad (2-51)$$

$$V_{dfv}^{F3} = a \cdot V_{dfv}^d + a^2 \cdot V_{dfv}^i + V_{dfv}^0 \quad (2-52)$$

A uvrštavanjem izraza (2-47) do (2-49) u izraze (2-50) do (2-52) dobije se:

$$V_{dfv}^{F1} = V_{pref}^d + \Delta V^d + \Delta V^i + \Delta V^0 \quad (2-53)$$

$$V_{dfv}^{F2} = a^2 \cdot V_{pref}^d + a^2 \cdot \Delta V^d + a \cdot \Delta V^i + \Delta V^0 \quad (2-54)$$

$$V_{dfv}^{F3} = a \cdot V_{pref}^d + a \cdot \Delta V^d + a^2 \cdot \Delta V^i + \Delta V^0 \quad (2-55)$$

Izrazi (2-53) do (2-55) daju preostale napone tijekom svih vrsta nesimetričnih kratkih spojeva [1]. Za potrebe određivanja optimalnog broja i lokacije uređaja za mjerenje naponskih propada, u ovoj disertaciji razmatrat će se naponski propadi uslijed trofaznih i jednofaznih kratkih spojeva.

## 2.6. Promjene napona uslijed jednofaznog kratkog spoja

Jednofazni kratki spoj uzrokuje širenje nesimetričnih naponskih propada kroz elektroenergetski sustav. Struja kratkog spoja dobije se spajanjem direktne, inverzne i nulte sheme u serijski spoj, prema tome, kroz sve tri sheme teče ista struja. Struja koja teče kroz sve tri simetrične komponente dana je izrazom (2-56):

$$i_f^d = \frac{-v_{pref}^{F1}(f)}{z_{ff}^d + z_{ff}^i + z_{ff}^0}; \quad i_f^d = i_f^i = i_f^0 \quad (2-56)$$

Značenje izvandijagonalne impedancije u matrici impedancija  $Z$  primjenjuje se za određivanje promjena napona, na svaku komponentu mreže. Kako je jedinična struja injektirana u čvor  $f$ , napon (bilo koje) komponente na čvoru  $k$  dan je izvandijagonalnom impedancijom (bilo koje) komponente između  $k$  i  $f$ . Prema tome, promjene napona komponente na sabirnici  $k$  uslijed jednofaznog kratkog spoja na čvoru  $f$  dan je izrazima (2-57) do (2-59):

$$\Delta v_{kf}^d = -z_{kf}^d \cdot \frac{v_{pref}^{F1}(f)}{z_{ff}^d + z_{ff}^i + z_{ff}^0} \quad (2-57)$$

$$\Delta v_{kf}^i = -z_{kf}^i \cdot \frac{v_{pref}^{F1}(f)}{z_{ff}^d + z_{ff}^i + z_{ff}^0} \quad (2-58)$$

$$\Delta v_{kf}^0 = -z_{kf}^0 \cdot \frac{v_{pref}^{F1}(f)}{z_{ff}^d + z_{ff}^i + z_{ff}^0} \quad (2-59)$$

Napon prije kvara na točki opterećenja  $k$ ,  $v_{pref(k)}$ , sadrži isključivo komponentu direktnog slijeda, a jednak je naponu prije kvara u fazi  $F1$ . Naponi prije kvara simetričnih komponenata na čvoru  $k$  dani su izrazima:

$$v_{kf}^d = v_{pref(k)}^{F1} - z_{kf}^d \cdot \frac{v_{pref(f)}^{F1}}{z_{ff}^d + z_{ff}^i + z_{ff}^0} \quad (2-60)$$

$$v_{kf}^i = -z_{kf}^i \cdot \frac{v_{pref(f)}^{F1}}{z_{ff}^d + z_{ff}^i + z_{ff}^0} \quad (2-61)$$

$$v_{kf}^0 = -z_{kf}^0 \cdot \frac{v_{pref(f)}^{F1}}{z_{ff}^d + z_{ff}^i + z_{ff}^0} \quad (2-62)$$

Transformacijom iz simetričnih u fazne komponente dobiju se preostali fazni naponi dani izrazima (2-63) do (2-65):

$$v_{kf}^{F1} = v_{pref(k)}^{F1} - (z_{ff}^d + z_{ff}^i + z_{ff}^0) \cdot \frac{v_{pref(f)}^{F1}}{z_{ff}^d + z_{ff}^i + z_{ff}^0} \quad (2-63)$$

$$v_{kf}^{F2} = a^2 \cdot v_{pref(k)}^{F1} - (a^2 \cdot z_{ff}^d + a \cdot z_{ff}^i + z_{ff}^0) \cdot \frac{v_{pref(f)}^{F1}}{z_{ff}^d + z_{ff}^i + z_{ff}^0} \quad (2-64)$$

$$v_{kf}^{F3} = a \cdot v_{pref(k)}^{F1} - (a \cdot z_{ff}^d + a^2 \cdot z_{ff}^i + z_{ff}^0) \cdot \frac{v_{pref(f)}^{F1}}{z_{ff}^d + z_{ff}^i + z_{ff}^0} \quad (2-65)$$

Izrazi (2-63) do (2-65), prikazuju fazne napone na promatranoj sabirnici  $k$  uslijed jednofaznog kratkog spoja na čvoru  $f$ , a za proračun se koriste matrice impedancija sva tri slijeda. Pretpostavkom da je matrica impedancija inverznog slijeda jednaka matrici impedancija direktnog slijeda, ovaj proračun se znatno pojednostavljuje.

Kod elementata mreže koji ne sadrže rotirajuće dijelove, kao što su vodovi, transformatori i prigušnice, inverzna impedancija općenito je jednaka direktnoj, jer impedancija navedenih elemenata ostaje nepromijenjena ako se na njih primijeni trofazni napon suprotnoga redoslijeda. Kod rotirajućih elementa mreže, kao što su: sinkroni generatori, sinkroni i asinkroni motori, direktna i inverzna impedancija se razlikuju.

Prema gore navedenom, opravdano je zanemariti razliku i računati s impedancijama direktnog i nultog slijeda. U ovoj disertaciji prihvaćena je gore navedena pretpostavka. Izrazi (2-66) do (2-68) predstavljaju pojednostavljene izraze (2-63) do (2-65):

$$v_{kf}^{F1} = v_{pref(k)}^{F1} - \left( z_{kf}^d + \frac{1}{2} z_{kf}^0 \right) \cdot \frac{v_{pref(f)}^{F1}}{z_{ff}^d + \frac{z_{ff}^0}{2}} \quad (2-66)$$

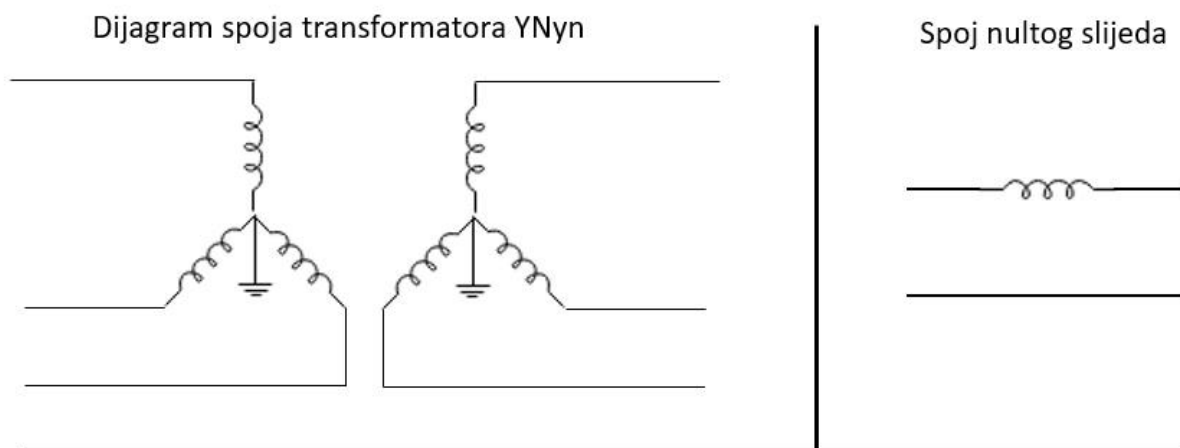
$$v_{kf}^{F2} = a^2 \cdot v_{pref(k)}^{F1} - \frac{1}{2} \left( -z_{kf}^d + z_{kf}^0 \right) \cdot \frac{v_{pref(f)}^{F1}}{z_{ff}^d + \frac{z_{ff}^0}{2}} \quad (2-67)$$

$$v_{kf}^{F3} = a \cdot v_{pref(k)}^{F1} - \frac{1}{2} \left( -z_{kf}^d + z_{kf}^0 \right) \cdot \frac{v_{pref(f)}^{F1}}{z_{ff}^d + \frac{z_{ff}^0}{2}} \quad (2-68)$$

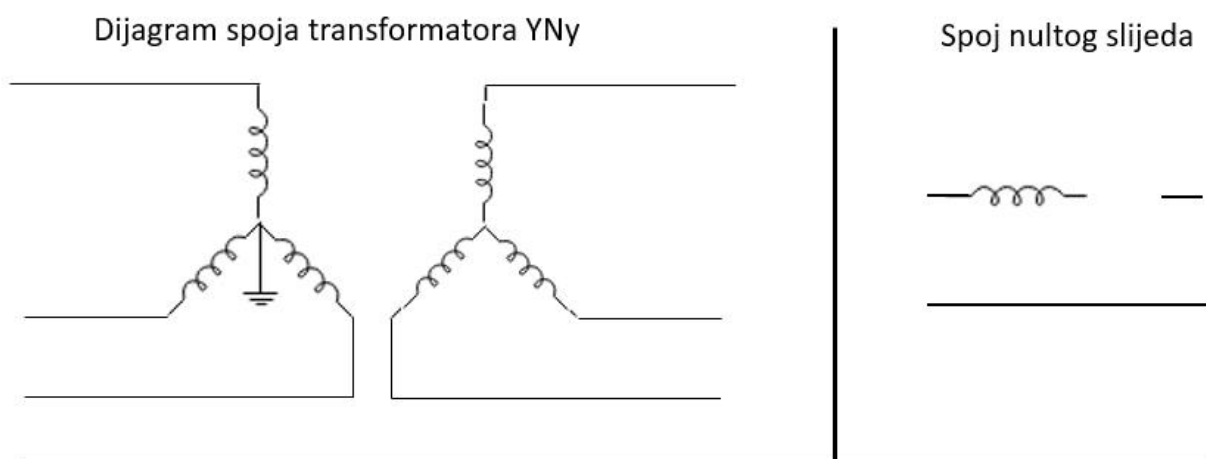
Razlika izraza (2-66) do (2-68) u odnosu na izraz (2-46) je slijedeća: direktnoj izvandijagonalnoj impedanciji  $z_{kf}^d$  dodana je polovina vrijednosti nulte izvandijagonalne impedancije,  $\frac{1}{2} z_{kf}^0$  te je direktnoj dijagonalnoj impedanciji  $z_{ff}^d$  dodana polovina vrijednosti nulte dijagonalne impedancije,  $\frac{1}{2} z_{ff}^0$ . U većini slučajeva, vrijednosti dijagonalne impedancije su veće od vrijednosti izvandijagonalne impedancije matrice impedancija. Kako se u jednadžbama izraza (2-66) do (2-68) i (2-46) dijagonalna impedancija nalazi u nazivniku razlomka, može se pretpostaviti da će razlomak u izrazima (2-66) do (2-68) imati manju vrijednost od razlomka u izrazu (2-46). U skladu s navedenim može se zaključiti da će kod trofaznog kratkog spoja nastati dublji naponski propadi nego kod jednofaznog kratkog spoja.

## 2.7. Gradnja matrice impedancija nultoga slijeda

Kod gradnje matrice nultog slijeda veliki utjecaj ima spoj transformatora, koji utječe na mogućnost ili nemogućnost zatvaranja struje nultog slijeda. Slika 2.15. prikazuje spoj transformatora YNyn konfiguracije transformatora i odgovarajuće spojeve nulte komponente, a slika 2.16. prikazuje navedene parametre, ali za YNy spoj dvonamotnog transformatora.



Slika 2. 15. Spoj transformatora YNyn i spoj nultog slijeda.



Slika 2.16. Spoj transformatora YNy i spoj nultog slijeda.

U slučaju spoja transformatora YNyn prikazanog slikom 2.15. oba zvjezdišta transformatora su uzemljena pa je time omogućeno zatvaranje struja nultoga slijeda u oba namota. Kod spoja transformatora YNy, slika 2.16. u shemi nultog slijeda nastaje prekid. Narine li se napon nultog slijeda na sekundar transformatora spojen u zvijezdu, struje nultoga slijeda ne mogu proteći jer se ne mogu zatvoriti. Stoga se u slučaju spoja YNyn, matrica impedancija nultog slijeda gradi kao i matrica direktnog slijeda, dok se kod spoja transformatora prikazana slikom 2.16. računa da je nulta reaktancija neizmjereno velika, odnosno u matrici impedancija nultog slijeda ovi transformatori znače prekid. Detaljan pregled ostalih spojeva dan je u [1].

U ovoj disertaciji koristi se spoj transformatora YNy – primar u spoju uzemljena zvijezda, sekundar u spoju zvijezda prikazan slikom 2.16.



## 2.8. Klasifikacija i propagacija naponskih propada

ABC klasifikacija je najstarija klasifikacija i najčešće koristi za klasifikaciju naponskih propada. ABC klasifikacija razlikuje sedam tipova trofaznih neuravnoteženih propada napona. Tablica 2.2. prikazuje vrstu naponskog propada, napone pri naponskom propadu i fazorski dijagram za svih sedam vrsta naponskih propada [11].

Tablica 2. 2. Naponski propadi po ABC klasifikaciji.

Vrsta	Naponi	Fazorski prikaz
A	$U_{F1} = V^*$ $U_{F2} = -\frac{1}{2}V^* - \frac{1}{2}jV^*\sqrt{3}$ $U_{F3} = -\frac{1}{2}V^* + \frac{1}{2}jV^*\sqrt{3}$	
B	$U_{F1} = V^*$ $U_{F2} = -\frac{1}{2}E_1 - \frac{1}{2}jE_1\sqrt{3}$ $U_{F3} = -\frac{1}{2}E_1 + \frac{1}{2}jE_1\sqrt{3}$	
C	$U_{F1} = E_1$ $U_{F2} = -\frac{1}{2}E_1 - \frac{1}{2}jV^*\sqrt{3}$ $U_{F3} = -\frac{1}{2}E_1 + \frac{1}{2}jV^*\sqrt{3}$	

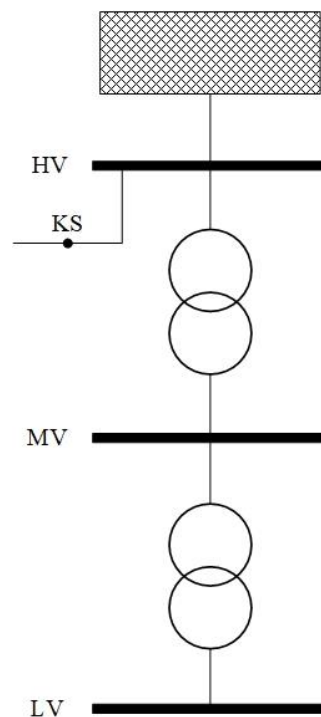
Vrsta	Naponi	Fazorski prikaz
D	$U_{F1} = V^*$ $U_{F2} = -\frac{1}{2}V^* - \frac{1}{2}jE_1\sqrt{3}$ $U_{F3} = -\frac{1}{2}V^* + \frac{1}{2}jE_1\sqrt{3}$	
E	$U_{F1} = E_1$ $U_{F2} = -\frac{1}{2}V^* - \frac{1}{2}jV^*\sqrt{3}$ $U_{F3} = -\frac{1}{2}V^* + \frac{1}{2}jV^*\sqrt{3}$	
F	$U_{F1} = V^*$ $U_{F2} = -\frac{1}{2}V^* - \left(\frac{1}{3}E_1 + \frac{1}{6}V^*\right)j\sqrt{3}$ $U_{F3} = -\frac{1}{2}V^* + \left(\frac{1}{3}E_1 + \frac{1}{6}V^*\right)j\sqrt{3}$	
G	$U_{F1} = \frac{2}{3}E_1 + \frac{1}{3}V^*$ $U_{F2} = -\frac{1}{3}E_1 - \frac{1}{6}V^* - \frac{1}{2}jV^*\sqrt{3}$ $U_{F3} = -\frac{1}{3}E_1 - \frac{1}{6}V^* - \frac{1}{2}jV^*\sqrt{3}$	

U tablici 2.2. napon prije kvara prikazan je crtkanom linijom a tijekom kvara punom linijom.  $V^*$  napon u neispravnoj fazi ili između faza koje su u kvaru,  $E_1$  kompleksni napon prije kvara u fazi F1. Tip naponskog propada na višoj naponskoj razini može biti drugog tipa u odnosu na propad na nižoj naponskoj razini. Jedan od razloga uvođenja klasifikacije je opisivanje širenja naponskih propada kroz transformatore. Tablica 2.3. i slika 2.17. prikazuju propagaciju naponskih propada na niže naponske razine [11].

Tablica 2. 3. Naponski propada na višoj i nižoj naponskoj razini ovisno o vrsti kvara.

Vrsta kratkog spoja	Lokacija mjerenja		
	HV	MV	LV
Trofazni	A	A	A
Dvofazni dozemni	E	F	G
Dvofazni	C	D	C
Jednofazni dozemni	B	C	D

Iz tablice 2.3. se može vidjeti da će trofazni kratki spoj proizvesti naponski propad tipa A, dvofazni uz istovremeni dodir sa zemljom tipove E, F i G, dvofazni tipove C i D i jednofazni kratki spoj uz istovremeni dodir sa zemljom tipove B, C i D.



Slika 2. 17. Propagacija naponskog propada preko transformatora.

Tablica 2.4. pokazuje prijelaz tipa propada na nižu naponsku razinu ovisno o spoju primarne i sekundarne strane transformatora. Eksponent (\*) u tablicama 2.4. i 2.5. označava da je amplituda propada jednaka  $\frac{1}{3} + \frac{2}{3}V$ , gdje je V napon u fazi kvara ili između dvije faze u kvaru.

Tablica 2. 4. Naponski propada u ovisnosti o vrsti spoja transformatora.

Spoj Tranformatora	Propad na primaru			
	Tip A	Tip B	Tip C	Tip D
YNyn	Tip A	Tip B	Tip C	Tip D
Yy, Dd, Dz	Tip A	Tip D*	Tip C	Tip D
Yd, Dy, Yz	Tip A	Tip C*	Tip D	Tip C

Tablica 2.5. prikazuje ovisnost tipa naponskog propada o vrsti kratkog spoja i spoju tereta.

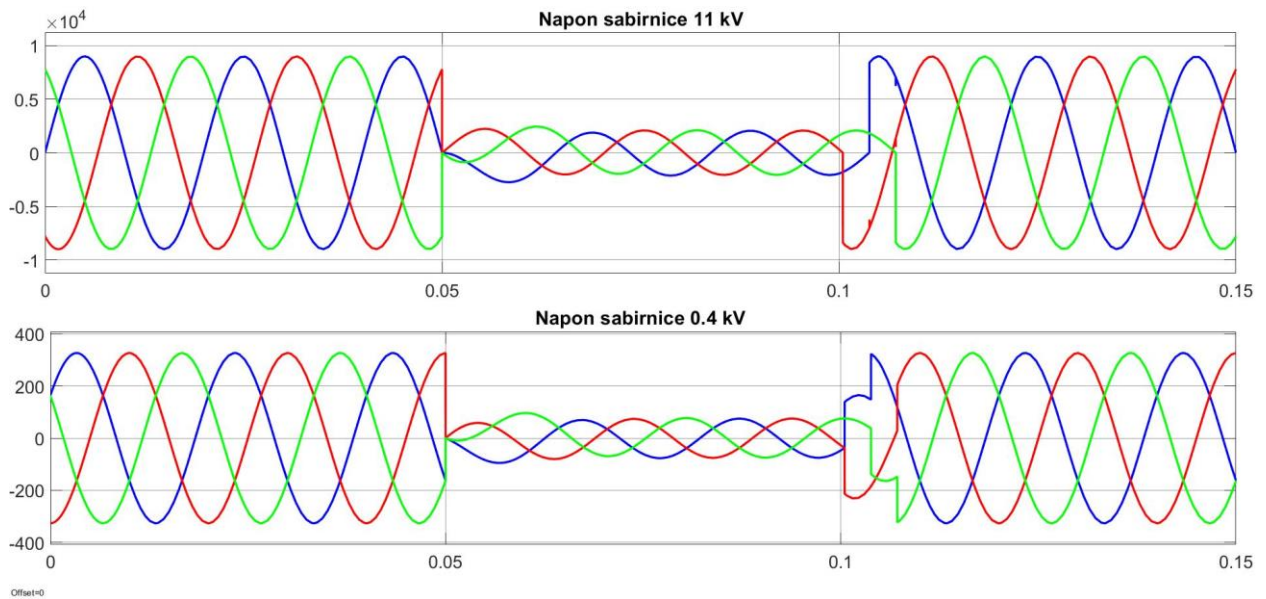
Tablica 2. 5. Ovisnost tipa naponskog propada o vrsti kratkog spoja i spoju tereta

Tip kvara	Teret spojen u zvijezdu	Teret spojen u trokut
Trofazni	Propad A	Propad A
Dvofazni	Propad C	Propad D
Jednofazni	Propad B	Propad C*

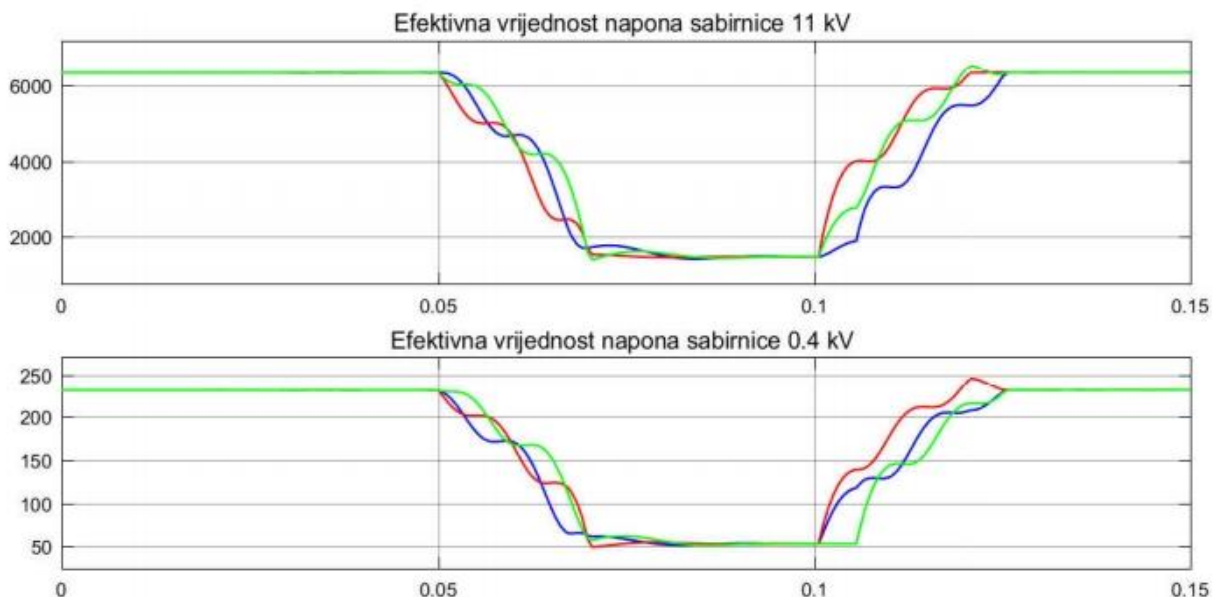
Model kvara na prijenosnom vodu napravljen u Simulink Matlabu, korišten za simulaciju naponskog propada. Model se sastoji od naponskog izvora 11 kV spojenog preko Dyn transformatora na 0,4 kV sustav do 10 kW otpornog i 100 var induktivnog opterećenja razvijen u [12].

Slika 2.18. prikazuje trofazni kratki spoj na vodu koji povezuje naponski izvor s primarnom stranom transformatora. Za spoj transformatora Dyn prema tablici 2.4. trofazni kratki spoj tip A naponskog propada bi trebao biti isti tip naponskog propada i na nižoj naponskoj razini, što odgovara prikazu na slici 2.18.

Slika 2.19. prikazuje efektivnu vrijednost napona, na kojoj se može vidjeti da je na primarnoj i sekundarnoj strani nastupio tip A naponskog propada.

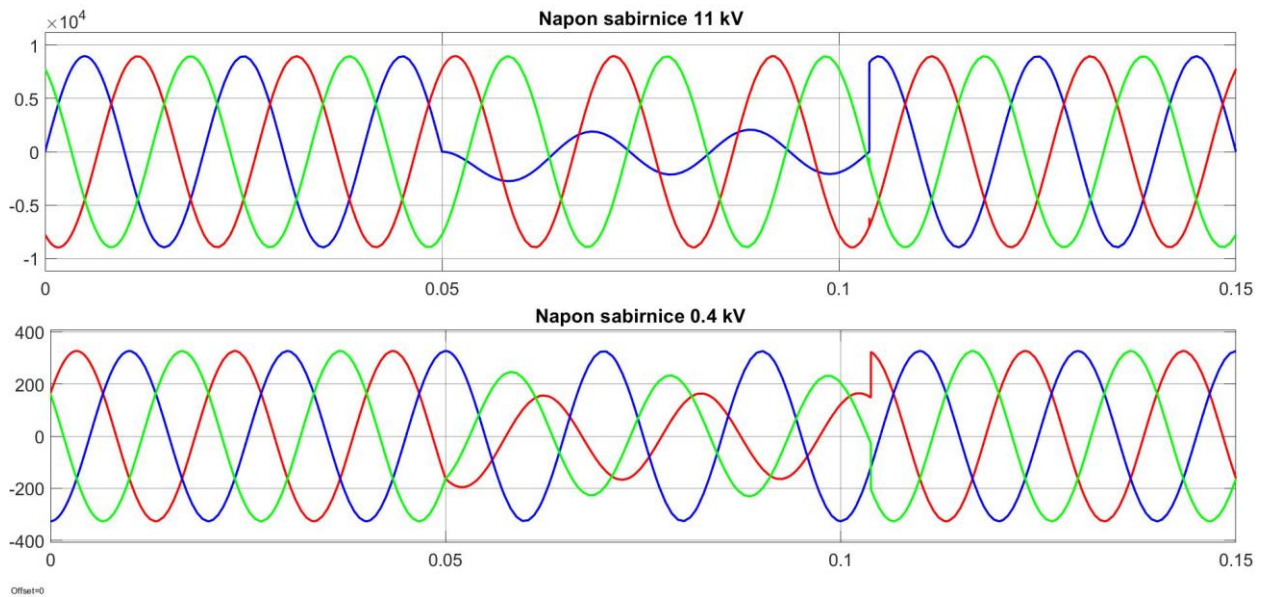


Slika 2. 18. Napon sabirnice 11 kV i sabirnice 0,4 kV kod trofaznog kratkog spoja.

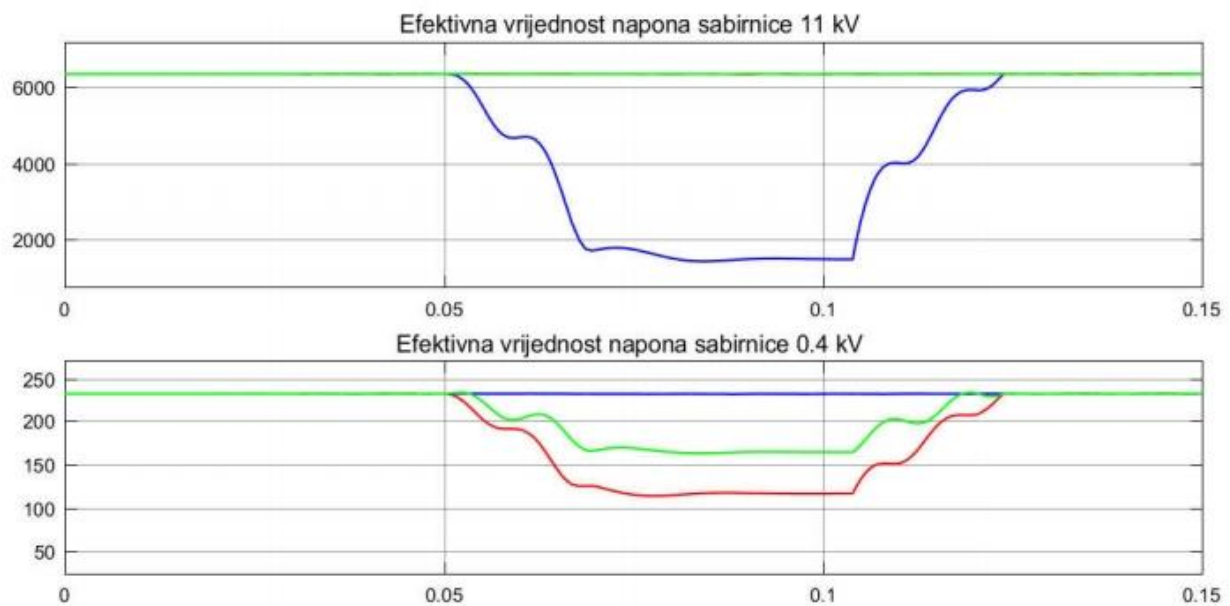


Slika 2. 19. Efektivne vrijednosti napona sabirnice 11 kV i 0,4 kV, kod trofaznog kratkog spoja.

Jednofazni kratki spoj na primarnoj strani transformatora u spoju Dyn, stvorit će naponski propada tipa B koji će se propagirat na nižoj razini kao tip C, prema tablici 2.2., odnosno kao dvofazni kratki spoj. Na slici 2.20. se vide naponi pri jednofaznom kratkom spoju uz istovremeni dodir sa zemljom, na primarnoj strani faza F1 je zahvaćena kratkim spojem plava boja, dok ostale dvije faze F2 i F3 zadržavaju sinusni oblik. Na sekundarnoj strani kvar se propagira kao dvofazni kratki spoj između faza F2 crvena boja i F3 zelena boja na slici 2.21.



Slika 2. 20. Napon sabirnice 11 kV i sabirnice 0,4 kV kod jednofaznog kratkog spoja.



Slika 2. 21. Efektivne vrijednosti napona sabirnice 11 kV i 0,4 kV, kod jednofaznog kratkog spoja.

U IEEE 39 sabirničkom testnom sustavu, koji se koristi u disertaciji, svi su transformatori spojeni u spoju YNy. Za određivanje propagacije naponskog propada na nižu naponsku razinu, najprije je potrebno odrediti tip naponskog propada s obzirom na vrstu kratkog spoja. U tablici 2.5. može se vidjeti da će trofazni kratki spoj uzrokovati naponski propad tipa A neovisno o spoju tereta. Međutim, jednofazni kratki spoj (u fazi F1) u slučaju opterećenja u spoju zvijezda izaziva propad u jednoj fazi (u fazi F1) – propad tipa B, dok u slučaju opterećenja u spoju trokut izaziva

propad napona u dvije faze (u fazama F2 i F3) – propad tipa C [1]. U analiziranom IEEE 39 sabirničkom testnom sustavu na sekundar transformatora su spojeni generatori u spoju zvijezda. Dakle jednofazni kratki spoj u analiziranoj mreži izaziva propad tipa B.





prikazuje opterećenja u sustavu, spoj na sabirnice, radnu i jalovu snagu. Podaci za transformatore preuzeti su iz literature, [13] [14].

Tablica 3.1. Spoj generatora na sabirnice,

<b>Generator</b>	<b>Sabirnica</b>	<b>Vrsta sabirnice</b>	<b>P [MW]</b>	<b>V [p.u.]</b>
G 01	39	PV čvor	1000,0	1,0300
G 02	31	Regulacijska elektrana	N.A.	0,9820
G 03	32	PV čvor	650,0	0,9831
G 04	33	PV čvor	632,0	0,9972
G 05	34	PV čvor	508,0	1,0123
G 06	35	PV čvor	650,0	1,0493
G 07	36	PV čvor	560,0	1,0635
G 08	37	PV čvor	540,0	1,0278
G 09	38	PV čvor	830,0	1,0265
G 10	30	PV čvor	250,0	1,0475

Tablica 3. 2. Raspored opterećenja u sustavu, radna i jalova snaga

<b>Opterećenje</b>	<b>Sabirnica</b>	<b>P [MW]</b>	<b>Q [Mvar]</b>
Opterećenje 03	3	322,0	2,4
Opterećenje 04	4	500,0	184,0
Opterećenje 07	7	233,8	84,0
Opterećenje 08	8	522,0	176,0
Opterećenje 12	12	7,5	88,0
Opterećenje 15	15	320,0	153,0
Opterećenje 16	16	329,0	32,3
Opterećenje 18	18	158,0	30,0
Opterećenje 20	20	628,0	103,0
Opterećenje 21	21	274,0	115,0
Opterećenje 23	23	247,5	84,6
Opterećenje 24	24	308,6	-92,2
Opterećenje 25	25	224,0	47,2
Opterećenje 26	26	139,0	17,0
Opterećenje 27	27	281,0	75,5
Opterećenje 28	28	206,0	27,6
Opterećenje 29	29	283,5	26,9
Opterećenje 31	31	9,2	4,6
Opterećenje 39	39	1104,0	250,0

Tablica 3. 3. Spoj transformatora na sabirnice.

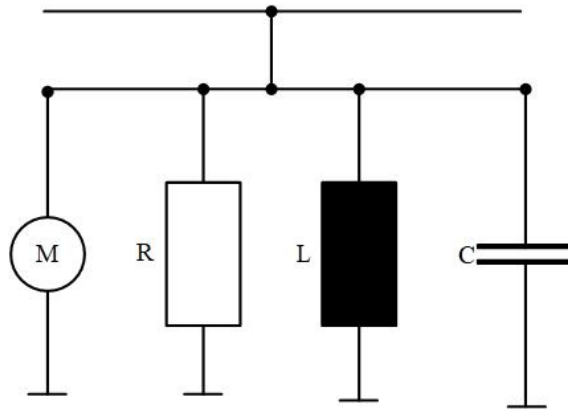
Od sabirnice	Do sabirnice	R [p.u.]	X [p.u.]	Veličina regulacione preklopke [p.u.]	Kut regulacione preklopke [°]
12	11	0,0016	0,0435	1,0060	0,00
12	13	0,0016	0,0435	1,0060	0,00
6	31	0,0000	0,0250	1,0700	0,00
10	32	0,0000	0,0200	1,0700	0,00
19	33	0,0007	0,0142	1,0700	0,00
20	34	0,0009	0,0180	1,0090	0,00
22	35	0,0000	0,0143	1,0250	0,00
23	36	0,0005	0,0272	1,0000	0,00
25	37	0,0006	0,0232	1,0250	0,00
2	30	0,0000	0,0181	1,0250	0,00
29	38	0,0008	0,0156	1,0250	0,00
19	20	0,0007	0,0138	1,0600	0,00

### 3.1. Opterećenje

U elektroenergetskom sustavu, električna opterećenja se sastoje od različitih vrsta opterećenja, prema tome vrlo je teško identificirati točan sastav statičkih i dinamičkih opterećenja u mreži. Pomoću općeg modela električnog opterećenja u DIgSILENT PowerFactory može se predstaviti:

- Kompletan izvod (engl. complete feeder),
- Kombinacija dinamičkih i statičkih električnih opterećenja.

Slika 3.2. prikazuje dijagram općeg modela električnog opterećenja u programu DIgSILENT PowerFactory



Slika 3. 2. Opći model opterećenja u programu DIgSILENT PowerFactory.

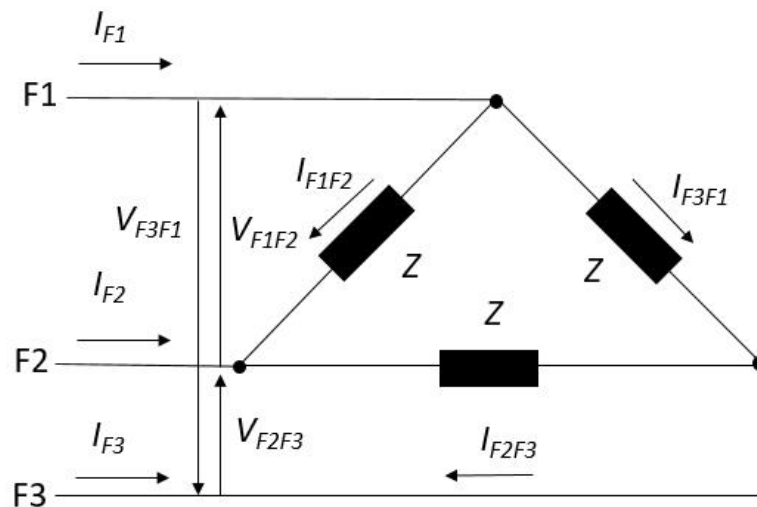
Za modeliranje opterećenja u programu DIgSILENT PowerFactory potrebno je definirati vrstu opterećenja. U programu se mogu definirati trofazna, dvofazna i jednofazna opterećenja. U nastavku biti će prikazano samo trofazno opterećenje u spoju trokut, jer se koristi u ovoj disertaciji.

### 3.1.1. Trofazno opterećenje spojeno u trokut

Stvarno opterećenje za fazu unosi se na stranicu Load Flow dijaloga elementa opterećenja. Korisnik ima sljedeće mogućnosti:

- Simetrično opterećenje, samo određivanje zbroja svih faza. U ovom slučaju, pretpostavlja se da se opterećenje dijeli jednako među fazama;
- Nesimetrično opterećenje, navodeći opterećenje po fazama.

U IEEE 39- sabirničkom sustavu, korištena su uravnotežena opterećenja spojena u trokut. Spoj trofaznog opterećenja u trokut čine tri impedancije jednakog iznosa prikazane slikom 3.3.



Slika 3. 3. Simetrično opterećenje spojeno u trokut.

Struje u impedancijama nazivaju se ili faznim strujama ili strujama opterećenja, one su jednake veličine i faze su međusobno pomaknute za  $120^\circ$ , isto vrijedi i za linijske struje.

Za fazne struje prema slici vrijede jednadžbe:

$$I_{F1F2} = \frac{V_{F1F2}}{Z} \quad (3-1)$$

$$I_{F2F3} = \frac{V_{F2F3}}{Z} \quad (3-2)$$

$$I_{F3F1} = \frac{V_{F3F1}}{Z} \quad (3-3)$$

Primjenom I. Kirchhoffov-og zakona za struje, linijska struja  $I_A$  može se izračunati prema jednadžbi:

$$I_{F1} = I_{F1F2} + I_{F1F3} \quad (3-4)$$

Slično vrijedi i za linijske struje  $I_{F2}$  i  $I_{F3}$  [16].

Za opterećenje spojeno u trokut vrijede:

- Linijski naponi u simetričnom trofaznom sustavu spojenom u trokut jednaki su faznim naponima:  $E_L = E_P$
- Linijske struje su za  $\sqrt{3}$  veće od faznih struja  $I_L = \sqrt{3} \cdot I_p$  [17].

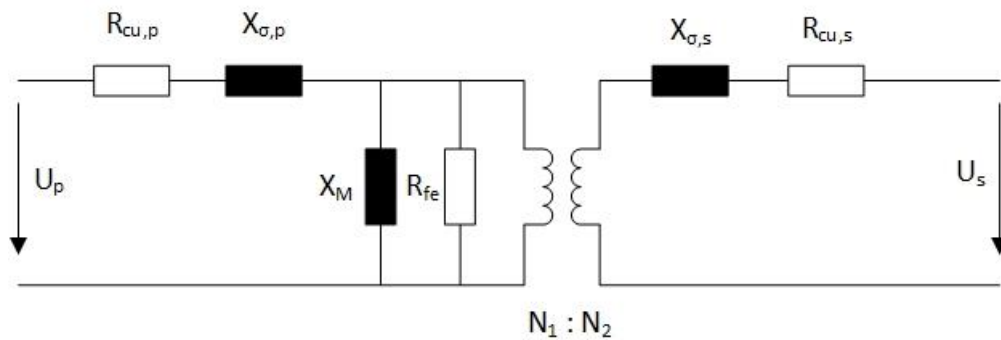
Kako se u disertaciji koristi IEC 60909 metoda, potrebno je naglasiti da ova metoda u proračunu kratkog spoja općenito zanemaruje električna opterećenja i uzima samo u obzir doprinose motora [18].

### 3.1.2. Transformatori

Svi transformatori u IEEE 39- sabirničkom testnom sustavu su YNy tipa, odnosno u spoju namota na primaru u zvijezdu s uzemljenim zvjezdištem i sekundarnim namotom spojenim u zvijezdu.

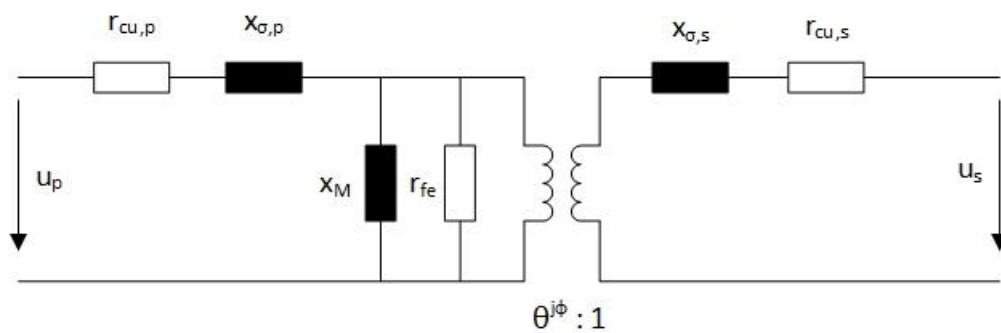
U programu DIgSILENT PowerFactory postoje detaljni modeli različitih vrsta trofaznih dvonamotnih transformatora u elektroenergetskom sustavu. U nastavku je opisan opći model transformatora u programu DIgSILENT PowerFactory. Detaljan model direktonog slijeda s apsolutnim impedancijama (u Ohmima) prikazan je na slici 3.4. Shema sadrži rasipne reaktancije,

radne otpore primarne i sekundarne strane, reaktancije magnetizacije i admitancije gubitaka u željezu, približno idealnom transformatoru.



Slika 3. 4. Model pozitivnog slijeda dvonamotnog transformatora (u ohmima).

Model s relativnim impedancijama u jediničnim vrijednostima (u p.u.) prikazan je na slici 3.5. Idealni transformator modela po jediničnoj vrijednosti ima složeni omjer namota s veličinom 1: 1 i modelira fazni pomak koji predstavlja vektorske skupine dvaju namota.



Slika 3. 5. Model pozitivnog slijeda dvonamotnog transformatora (u jediničnoj vrijednosti p.u.).

Odnos između parametara u modelu može se prikazati kao:

$$Z_{r,HV} = \frac{U_{r,HV}^2}{S_r} \quad (3-5)$$

Nazivna impedancija na primarnoj strani  $Z_{r,HV}$  [ $\Omega$ ], nazivni napon na primarnoj strani  $U_{r,HV}$  [ $kV$ ] i nazivna snaga  $S_r$  [ $MVA$ ].

$$Z_{r,LV} = \frac{U_{r,LV}^2}{S_r} \quad (3-6)$$

Nominalna impedancija na sekundarnoj strani  $Z_{r,LV}$  [ $\Omega$ ], nazivni napon na sekundarnoj strani  $U_{r,LV}$  [ $kV$ ].

$$z_{sc} = \frac{U_{sc}}{100} \quad (3-7)$$

$z_{sc}$  [p. u.] impedancija kratkog spoja, relativni napon kratkog spoja  $U_{sc}$  [%],

$$r_{sc} = \frac{P_{Cu}/1000}{S_r} \quad (3-8)$$

$r_{sc}$  [p. u.] otpor kratkog spoja,  $P_{Cu}$  [kW] gubici u bakru.

$$x_{sc} = \sqrt{z_{sc}^2 - r_{sc}^2} \quad (3-9)$$

$x_{sc}$  [p. u.] reaktancija kratkog spoja.

$$r_{Cu,HV} = Y_{R,HV,1} \cdot r_{sc} \quad (3-10)$$

$r_{Cu,HV}$  [p. u.] otpor na primarnoj strani,  $Y_{R,HV,1}$  [p. u.] udio otpora kratkog spoja transformatora na primarnoj strani sustav s pozitivnim slijedom.

$$r_{Cu,LV} = (1 - Y_{R,LV,1}) \cdot r_{sc} \quad (3-11)$$

$r_{Cu,LV}$  [p. u.] otpor na sekundarnoj strani,  $Y_{R,LV,1}$  [p. u.] udio otpora kratkog spoja transformatora na sekundarnoj strani sustav s pozitivnim slijedom.

$$x_{\sigma,HV} = Y_{X,HV,1} \cdot x_{sc} \quad (3-12)$$

$x_{\sigma,HV}$  [p. u.] rasipne reaktancije na primarnoj strani,  $Y_{X,HV,1}$  [p. u.] Udio reaktancije kratkog spoja transformatora na primarnoj strani u sustav s pozitivnim slijedom (engl. positive-sequence system).

$$x_{\sigma,LV} = (1 - Y_{X,LV,1}) \cdot x_{sc} \quad (3-13)$$

$x_{\sigma,LV}$  [p. u.] rasipne reaktancije na sekundarnoj strani,  $Y_{X,LV,1}$  [p. u.] Udio reaktancije kratkog spoja transformatora na sekundarnoj strani u sustav s pozitivnim slijedom (positive-sequence system).

$$Z_M = \frac{1}{i_0/100} \quad (3-14)$$

$Z_M$  [ $\Omega$ ] magnetizirajuća reaktancija,  $i_0$  [%] struja praznog hoda.

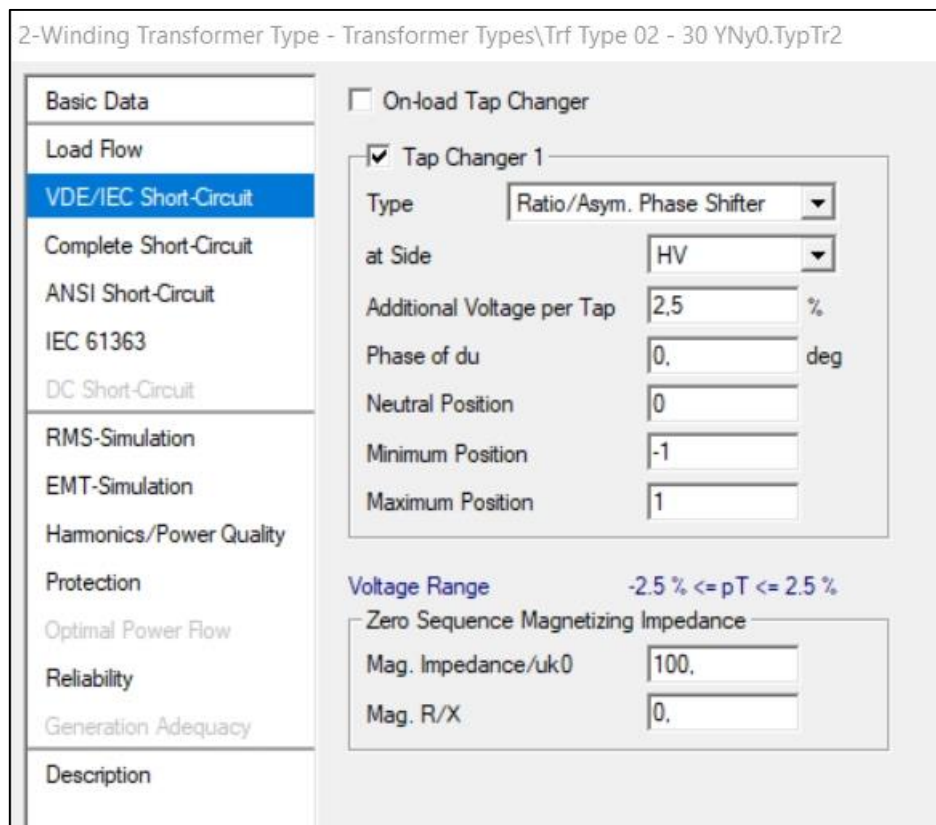
$$r_{Fe} = \frac{S_r}{P_{Fe}/1000} \quad (3-15)$$

$r_{Fe}$  [p. u.] Otpor šanta,  $P_{Fe}$  [kW] gubici praznog hoda [kW],

$$x_M = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{z_M^2} - \frac{1}{r_{Fe}^2}}} \quad (3-16)$$

$x_m$  [p. u.] magnetizirajuća impedancija [19].

Pri proračunu kratkog spoja prema IEC60909 metodi zanemaruju se poprečne impedancije u direktnom i inverznom sustavu (reaktancije magnetizacije i gubici u željezu). Međutim, u obzir se moraju uzeti impedancije nultog sustava [19]. Ovi parametri su prikazani na slici 3.6. Do izbora parametara u programu DIgSILENT PowerFactory se dolazi odabirom vrste transformatora i odlaskom na izbor parametara za VDE/IEC metode kratkog spoja.



Slika 3. 6. Odabir parametara transformatora.

Najčešće korišteni generatori u elektroenergetskom sustavu su sinkroni generatori. Svih 10 generatora testnog sustava modelirani su kao sinkroni generatori. Generator "G 01" predstavlja povezivanje s ostatkom prijenosnog sustava (SAD i Kanade) te je izravno spojen na naponsku razinu 345 kV. Svi ostali generatori povezani su preko YNy transformatora. Generator "G02" je regulacijski element (engl. slack element) modela mreže s zadanom vrijednosti 0,982 p.u., 0,0

stupnjeva [13]. Svi ostali generatori su PV čvorište. Tablica 3.4. prikazuje spoj generatora na sabirnice, vrstu rada generatora, nazivnu snagu i napon jedinične vrijednosti [13] [14].

Tablica 3. 4. Spoj generatora na sabirnice, vrsta rada generatora, nazivne snage i naponi jedinične vrijednosti

<b>Generator</b>	<b>Sabirnica</b>	<b>Vrsta sabirnice</b>	<b>P [MW]</b>	<b>V [p.u.]</b>
G 01	39	PV čvor	1000,0	1,0300
G 02	31	Regulaciona elektrana	N.A.	0,9820
G 03	32	PV čvor	650,0	0,9831
G 04	33	PV čvor	632,0	0,9972
G 05	34	PV čvor	508,0	1,0123
G 06	35	PV čvor	650,0	1,0493
G 07	36	PV čvor	560,0	1,0635
G 08	37	PV čvor	540,0	1,0278
G 09	38	PV čvor	830,0	1,0265
G 10	30	PV čvor	250,0	1,0475

Model programa DIgSILENT PowerFactory omogućuje odabir između:

- Upravljanje naponom – koriste se veliki sinkroni generatori (PV način rada),
- Upravljanje faktorom snage – mali sinkroni generatori, za održavanje konstantnog faktora snage (spojeni na distribucijsku mrežu).

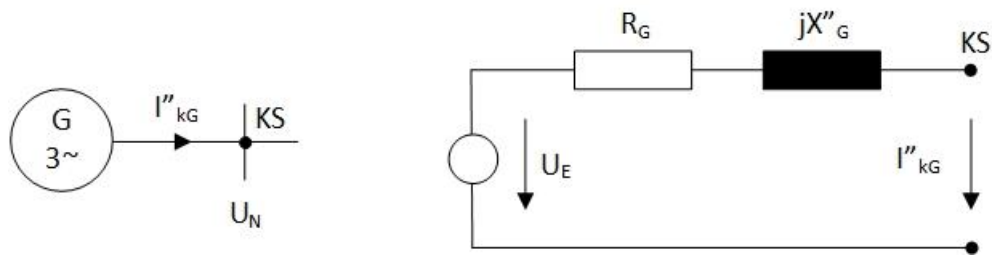
Kada se omogući opcija upravljanja naponom elementa generatora, generator će upravljati naponom izravno na svojim terminalima.

Za analizu kratkog spoja, sinkroni strojevi su predstavljeni njihovim:

- Subrtanzientnim ekvivalentom
- Tranzijentnim ekvivalentom
- Sinkronom ekvivalentom (engl. Synchronous equivalent)

ovisno o promatranoj vremenskoj fazi nakon kratkog spoja [20]. Na slici 3.7. prikazana je ekvivalentni strujni dijagram sinkronog stroja.





Slika 3.7. Sinkroni stroj i ekvivalentni strujni dijagram.

Za niskonaponske generatore vrijede sljedeći izrazi za impedancije:

$$Z_k = R_G + jX''_d, \quad R_G \approx 0,15 \cdot X''_d \quad (3-17)$$

$R_G$  otpor generatora,  $X''_d$  subtranzijentna reaktancija.

Za visoko naponske generatore:

$$U_{rG} > 1 \text{ kV} \text{ i } S_{rG} \geq 100 \text{ MVA} \rightarrow R_G \approx 0,05 \cdot X''_d \quad (3-18)$$

$$U_{rG} > 1 \text{ kV} \text{ i } S_{rG} < 100 \text{ MVA} \rightarrow R_G \approx 0,07 \cdot X''_d \quad (3-19)$$

$U_{rG}$  nazivni napon generatora i  $S_{rG}$  nazivan prividna snaga generatora.

Subtransientna reaktancija je:

$$X''_d = \frac{x''_d \cdot U_{rG}^2}{S_{rG}} \quad (3-20)$$

$x''_d$  subtranzijentna reaktancija generatora. Faktori 0,05, 0,07 i 0,15 uzimaju u obzir raspad struje kratkog spoja tijekom prve polovice perioda. Ako je proizvođač naveo drugačije, može se pretpostaviti sljedeće.

Za jednofaznu struju kratkog spoja:

$$I''_{k1} \approx 5 \cdot I_{rG} \quad (3-21)$$

Gdje je  $I_{rG}$  nazivna struja generatora.

Za trofazne struje kratkog spoja:

$$I''_{k3} \approx 3 \cdot I_{rG} \quad (3-22)$$

U nastavku opisan je kratki spoj blizu generatora. Struje su uglavnom uzrokovane reaktancijom sinkronih generatora (SG). Impedancija SG uspoređuje se s relativno velikom linijskom impedancijom tako da na jačinu struje snažno utječe generator. Struja koja sadrži AC i DC komponentu dana je izrazom:

$$i_k(t) = \sqrt{2} \cdot I_{AC}(t) + i_{DC}(t) \quad (3-23)$$

Vremenska funkcija AC komponente izraz (3-24) karakterizirana je subtranzijentnom  $I''_{kd}$  izraz (3-25), tranzijentnom  $I'_{kd}$  izraz (3-26) i strujom u ustaljenom stanju  $I_{kd}$  izraz (3-27) tijekom vremenskih razdoblja  $T''_d$  i  $T'_d$ .

$$I_{AC}(t) = (I''_{kd} - I'_{kd}) \cdot e^{-(t/T''_d)} + (I'_{kd} - I_{kd}) \cdot e^{-(t/T'_d)} + I_{kd} \quad (3-24)$$

$$I''_{kd} = \frac{E''_q}{Z''_d} = \frac{E''_q}{\sqrt{R_a^2 + X_d''^2}} \quad (3-25)$$

$$I'_{kd} = \frac{E'_q}{Z'_d} = \frac{E'_q}{\sqrt{R_a^2 + X_d'^2}} \quad (3-26)$$

$$I_{kd} = \frac{E_q}{Z_d} = \frac{E_q}{\sqrt{R_a^2 + X_d^2}} \quad (3-27)$$

$E''_{kd}$  subtranzijentni napon,  $E'_{kd}$  tranzijentni napon i napon u ustaljenom stanju  $E_{kd}$  sinkronog generatora.

Aktivni subtranzijentni napon može se procijeniti pomoću izraza (3-28):

$$E''_q = \sqrt{\left(\frac{U_{rG}}{\sqrt{3}} \cdot \cos \rho + R_a \cdot I_{rG}\right)^2 + \left(\frac{U_{rG}}{\sqrt{3}} \cdot \sin \rho + X_d'' \cdot I_{rG}\right)^2} \quad (3-28)$$

a tranzijentni napon izrazom (3-29):

$$E'_q = \sqrt{\left(\frac{U_{rG}}{\sqrt{3}} \cdot \cos \rho + R_a \cdot I_{rG}\right)^2 + \left(\frac{U_{rG}}{\sqrt{3}} \cdot \sin \rho + X_d' \cdot I_{rG}\right)^2} \quad (3-29)$$

Istosmjerna (DC) komponenta se može izračunati izrazom (3-30):

$$i_{DC}(t) = \sqrt{2} \cdot (I'_{kd} - I_{rG} \cdot \sin \rho) \cdot e^{-\frac{t}{T_{DC}}} \quad (3-30)$$

Maksimalna vrijednost izračunava se u polu-ciklusu stanja kratkog spoja. Gdje točno vrijeme ovisi o uvjetima pred opterećenja, impedanciji generatora i vremenskim konstantama.

$$i_p(t) = \sqrt{2} \cdot I_{AC}(t) + i_{DC}(t) \quad (3-31)$$

Za pojednostavljivanje proračuna mogu se učiniti sljedeće pretpostavke:

1. Otpor statora se zanemaruje. Pogreška je zanemariva.
2. Uvjeti preopterećenja (engl. preload conditions ) se zanemaruju. To daje nižu vrijednost od 10%.
3. Subtranzijentne i tranzijentne propadi (engl. decays ) se ignoriraju.
4. Vremenske konstante mogu se izračunati iz vremenskih konstanti praznog hoda i impedancije stroja.

Uzimanjem pretpostavki u obzir, izrazi za proračun postaju:

$$I_{AC}(t) = (I''_{kd} - I'_{kd}) \cdot e^{-(t/T''_d)} + I'_{kd} \quad (3-32)$$

$$I_{AC}(t) = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot X''_{kd}} \quad (3-33)$$

$$i_{DC} = \sqrt{2} \cdot I_{AC} \quad (3-34)$$

$$i_p = \sqrt{2} \cdot I_{AC} + i_{DC} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{AC} \quad (3-35)$$

T je vremenska konstanta [9].

## 4. OPTIMIZACIJA ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA

Tijekom godina područje elektrotehnike bavilo se analizom i sintezom sustava s ograničenim ili malim brojem elemenata [21]. Optimizacija je igrala ključnu ulogu u razvoju elektroenergetskih sustava [22]. Ona se bavi određivanjem najboljeg rješenja za predstavljeni problem [23]. Formuliranje bilo kojeg problema optimizacije može se smatrati nizom koraka navedenih u nastavku: odabir varijabli dizajna (kontrolne varijable i varijable stanja), formuliranje ograničenja, formuliranje funkcija cilja, postavljanje ograničenja varijabli, odabir algoritma za rješavanje problema i rješavanje problema za dobivanje optimalnog rješenja [24].

Kako elektroenergetski sustavi postaju sve veći zbog zahtjeva ravnoteže ponude i potražnje električne energije, optimizacija postaje ključna za optimalan rad elektroenergetskih sustava u smislu uštede troškova goriva i očuvanja okoliša.

Problemi optimizacije elektroenergetskih sustava su općenito nelinearni s nelinearnim funkcijama cilja i nelinearnim ograničenjima, a za njihovo rješavanje koriste se različite metode, uključujući konvencionalne metode i tehnike umjetne inteligencije. Metode optimizacije elektroenergetskih sustava su u stalnom razvoju, kako bi se mogle nositi s izazovima kako velikih sustava, tako i više povezanih sustava te kompleksnošću optimizacije uzrokovane velikim brojem ograničenja [22]. Razvojem tehnologije, novi znanstvenici i inženjeri susreću se s problemom povećanje kompleksnosti elektroenergetskih sustava. Ovi problemi postaju dio koji formira potrebu optimizacije i određivanje funkcije cilja, koja će procijeniti kvalitetu svakog kandidatskog rješenja sastavljenog od parametara problema optimizacije.

Nakon određivanja funkcije cilja, koriste se optimizacijske metode za određivanje minimuma ili maksimuma funkcije cilja [25]. Međutim, vrlo rijetko možemo postići optimalne uvjete. Drugim riječima, koji god problem rješavamo, rijetko će optimizacijski proces proizvesti rješenje koje je stvarno optimalno. Rješenje može biti optimalno za određenu aplikaciju, ali svakako ne u svim slučajevima. U skladu s navedenim, razvijene su različite metode optimizacije za rješavanje različitih problema optimizacije. Ove metode se ugrubo mogu podijeliti na egzaktne i stohastičke algoritme. Egzaktni algoritmi, kao što su metoda grananja i ograđivanja (engl. branch and bound method) ili dinamičko programiranje, mogu se uspješno primijeniti za male probleme.

Kod velikih i složenih problema upotrebljavaju se stohastički algoritmi, iako oni ne garantiraju optimalno rješenje, ali mogu u razumnom vremenu pronaći rješenja vrlo blizu optimalnog rješenja. U familiju stohastičkih algoritama spadaju i meta-heurističke metode, ove

metode postale su aktivno područje istraživanja. Osnovni način klasifikacija meta-heurističkih metoda je podjela na prirodom-inspirirane metode (evolucijski algoritmi, optimizacija kolonijom mrava, optimizacija roja čestica) i neinspirirane prirodom (tabu pretraživanje, iterativno lokalno pretraživanje itd.) [23].

Prema [26], u smislu izvora inspiracije, meta-heuristike se općenito mogu svrstati u tri kategorije:

1. Evolucijski algoritmi: oponašaju koncepte evolucije u prirodi poput genetskog algoritma (GA) [27], diferencijalne evolucije (engl. Differential Evolution) [28], evolucijske strategije (engl. Evolutionary Strategy) [29], evolucijskog programiranja (EP) [30] i algoritma baziranog na optimizaciji biogeografije (engl. Biogeography-Based Optimization algorithm) [31].
2. Rojni algoritmi: oponašaju procese decentraliziranih, samoorganiziranih sustava, koji mogu biti prirodni ili umjetne prirode, kao što su: Optimizacija kolonije mrava (engl. Ant Colony Optimization) [32], optimizacija roja čestica (engl. Particle Swarm Optimization) [33], algoritam umjetne kolonije pčela (engl. Artificial Bee Colony algorithm) [34], algoritam pretraživanja kukavica (engl. Cuckoo Search algorithm) [35], algoritam krijesnica (engl. Firefly algorithm) [36], Algoritam šišmiša (engl. Bat Algorithm) [37], eholokacija dupina (engl. Dolphin Echolocation) [38] i ciklički algoritam partenogeneze (engl. Cyclical Parthenogenesis Algorithm) [39].
3. Fizički algoritmi: ove metode inspirirane su fizičkim zakonima: simulirano kaljenje (engl. Simulated Annealing) [40], naplaćujući sustav pretraživanja (engl. Charged System Search) [41], optimizacija zrakom (engl. Ray Optimization) [42], Optimizacija isparavanjem vode (engl. Water Evaporation Optimization) [43] i Optimizacija toplinske razmjene (engl. Thermal Exchange Optimization) [44].

Fister et al. [45] daju detaljan pregled 77 postojećih algoritama za optimizaciju inspiriranih prirodom, također, autori dijele metode optimizacije u četiri glavne kategorije: temeljeni na inteligenciji roja (engl. Swarm intelligence based), bio-inspirirani (engl. bio-inspired), ali ne temeljeni na inteligenciji roja, temeljeni na fizici/kemiji (engl. physics/chemistry-based) i drugi.

U energetici se metode optimizacije mogu koristiti za:

- Procesiranje signala, mnogi problemi u obradi signala mogu se izvesti ili pretvoriti u optimizacijske probleme. Razvojem metoda optimizacije i računalnih resursa, ovi se problemi mogu učinkovito riješiti nedavno razvijenim optimizacijskim modelima i softverskim alatima.

- Dizajn kruga (engl. Circuit Design) tehnike automatske konstrukcije analognih sklopova postaju bitne za postizanje optimalnih performansi uz minimalno vrijeme, metode optimizacije se koriste za prevladavanje spomenutih složenosti.
- Raspodjelu resursa u komunikacijskim mrežama (napredne elektroenergetske mreže engl. Smart grids).
- Vođenje snage (engl. Power Dispatching), generatori u elektroenergetskom sustavu susreću se s raznim ograničenjima kao što su gorivo, nazivna snaga, nesigurnost izlazne snage opterećenje u sustavu.
- Proces optimizacije vođenja snage je određivanje rada generatora za održavanje ravnoteže ponude i potražnje električne energije uz minimiziranje cijene proizvodnje električne energije.
- Sekundarne regulacije snage razmjene i frekvencije (eng. Load Frequency Control).
- Optimalno operativno planiranje u mikro mrežama (engl. Optimal Operational Planning in Microgrid).
- Kontrola napona i frekvencije u mikro mrežama (engl. Microgrid Voltage–Frequency Control) primjer probleme optimizacije istovremene kontrole frekvencije i napona može se prikazati jednačbom (4-1):

$$\min \sum_i^n \alpha_i |\Delta f_i(X)| + \beta_i |\Delta v_i(X)| \quad (4-1)$$

Ograničenja:

$$|\Delta f_i| < E_f, \quad (4-2)$$

$$|\Delta v_i| \leq E_v, \quad (4-3)$$

$$R_i^{min} \leq R_i \leq R_i^{max} \quad (4-4)$$

$$X_i^{min} \leq X_i \leq X_i^{max} \quad (4-5)$$

gdje je  $R$  otpor voda  $X$  rektancija voda,  $f(x)$  funkcija cilja,  $\Delta f_i$  je razlika frekvencije  $i - tog$  izlaza DG,  $\Delta v_i$  razlika napona  $i - tog$  izlaza DG,  $\alpha_i$  koeficijent naprezanja frekvencije u čvoru  $i$ ,  $\beta_i$ , koeficijent naprezanja napona u čvoru  $i$ ,  $n$  ukupan broj DG u mikro mreži,  $E_f$  maksimalno dozvoljeno odstupanje frekvencije,  $E_v$  maksimalno dozvoljeno odstupanje napona.

- Prigušenje oscilacija u elektroenergetskom sustavu širokog područja (engl. Wide-Area Power System Oscillation Damping) [21].

- Planiranje proširenja prijenosnog sustava [46],
- Optimizaciju uzoraka opterećenja nuklearnih reaktora metodama računalne inteligencije [47].
- Optimalno otpremanje jalove snage u prijenosnim mrežama (engl. Optimal reactive power dispatch in transmission networks),
- Optimalnu Volt / Var kontrolu u distribucijskim mrežama (engl. Optimal Volt/Var control in distribution networks),
- Određivanje optimalnog mjesta i optimalne snage distribuiranih izvora u distribucijskim mrežama (engl. Optimal placement and sizing of distributed generation in distribution networks) [48].

#### 4.1. Meta-heurističke metode

Problem optimizacije može se prikazati matematičkim jednadžbama, koje sadrže u sebi funkciju cilja i ograničenja.

Funkcija cilja:

$$f(X), X = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) \quad (4-6)$$

S ograničenjima:

$$g_j(X) < b_j, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (4-7)$$

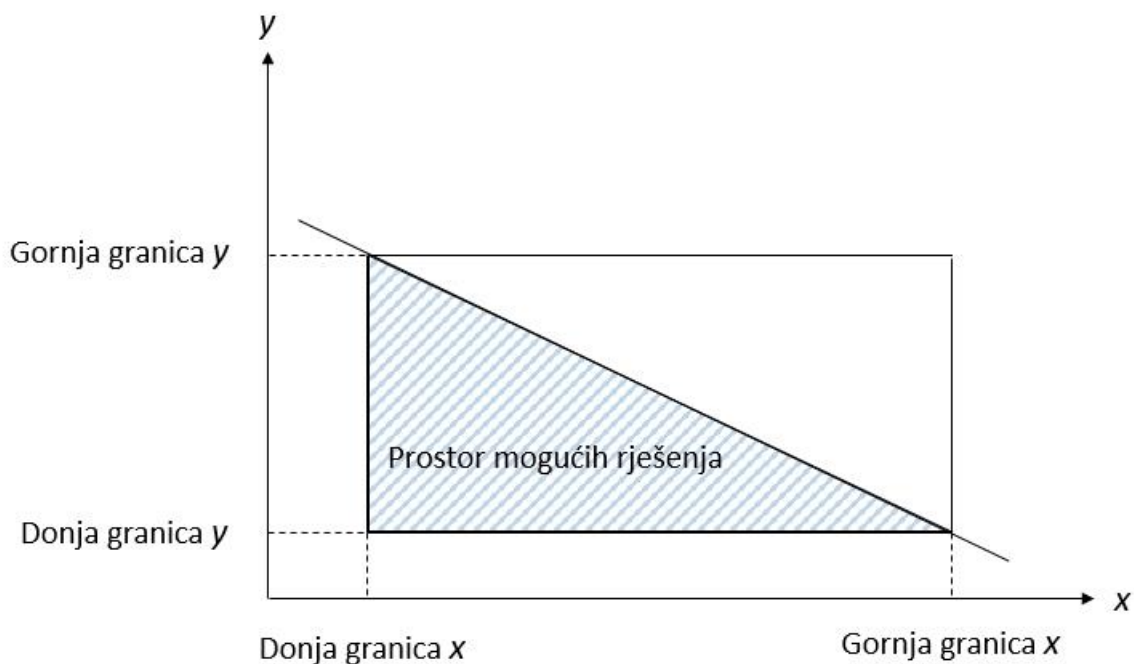
$$x_i^{(L)} \leq x_i \leq x_i^{(U)}, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (4-8)$$

gdje je  $f(X)$  funkcija cilja,  $X$  skup varijabli odlučivanja,  $x$  moguće rješenje optimizacijskog problema,  $N$  ukupni broj varijabli odlučivanja, koji određuje dimenzije optimizacijskog problema,  $g_j(X)$   $j$ -to ograničenje,  $b_j$  konstanta  $j$ -tog ograničenja,  $m$  ukupan broj ograničenja,  $x_i^{(L)}$  donja granica  $i$ -te varijable odlučivanja,  $x_i^{(U)}$  gornja granica varijable odlučivanja.

Funkcija cilja određuje cilj koji se želi postići optimizacijom. Cilj može biti minimizacija ili maksimizacija funkcije odabirom varijabli odlučivanja uz ispunjavanje određenih ograničenja.

Varijable odlučivanja određuju vrijednost funkcije cilja, one daju najbolje rješenje funkcije ili optimalno zadovoljavajuće rješenje. U nekim optimizacijskim problemima, varijable odlučivanja se kreću unutar gornje i donje granice, formirajući kontinuirani prostor odlučivanja. Svaka funkcija cilja se određuje preko varijabli odlučivanja.

Kod jednodimenzionalnih problema optimizacije postoji samo jedna varijabla odlučivanja, a kod N-dimenzionalnih problema optimizacija, postoje dvije ili više varijabli odlučivanja. Skup varijabli odlučivanja koji zadovoljavaju ograničenja optimizacijskog problema naziva se mogućim prostorom za odlučivanje. Slika 4.1 prikazuje ograničeni dvodimenzionalni prostor za odlučivanje s prostorom mogućim rješenja (engl. feasible). Ograničenja  $x$  i  $y$  imaju gornje i donje granice, koje dijele prostor pretraživanja na prihvatljiva rješenja i ona koja nisu prihvatljiva, korištenje ograničenja smanjuje prostor pretraživanja.



Slika 4. 1. Prostor pretraživanja dvodimenzionalnog optimizacijskog problema s ograničenjima.

## 4.2. Lokalni i globalni optimum

Vrijednost funkcije cilja definirana je svakom točkom prostora odlučivanja. Lokalni optimum se odnosi na rješenje koje ima najbolju funkciju cilja u svom susjedstvu. Jednodimenzijnski problem maksimizacije funkcije prikazan je izrazom (4-9).

$$f(X^*) \geq f(X), \quad X^* - \varepsilon \leq X \leq X^* + \varepsilon \quad (4-9)$$

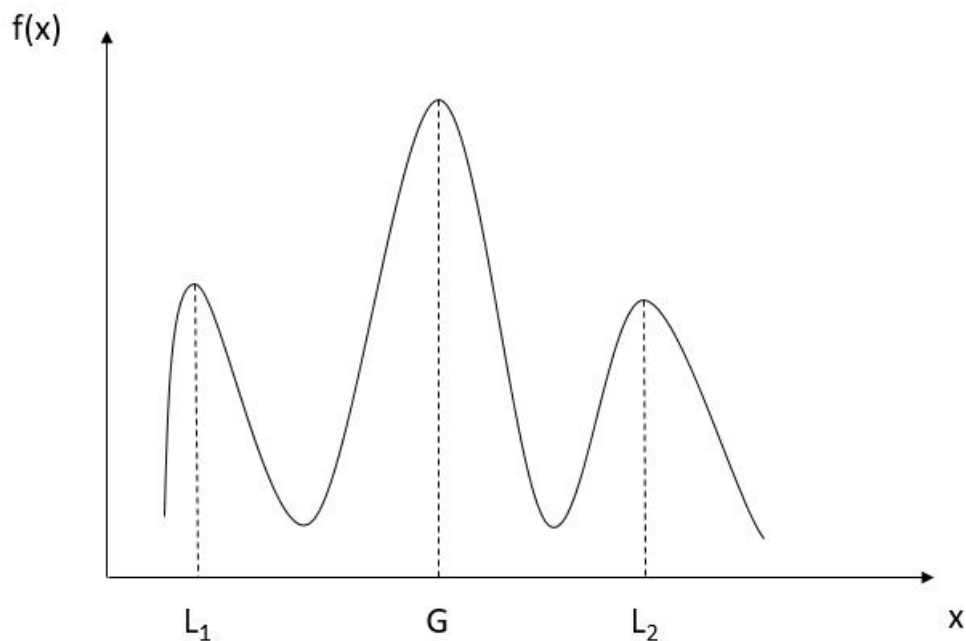
Za problem minimizacije, lokalni optimum prikazuje izraz (4-10):

$$f(X^*) \leq f(X), \quad X^* - \varepsilon \leq X \leq X^* + \varepsilon \quad (4-10)$$



$X^*$  je lokalni optimum,  $\varepsilon$  ograničena dužina susjedstva oko lokalnog optimuma. Lokalni optimum ne mora nužno biti i globalni optimum cijelog prostora pretraživanja, zato što je ograničen na svoje susjedstvo prostora odlučivanja.

Globalni optimum je najbolje rješenje prostora pretraživanja, ne mora nužno postojati jedan globalni optimum, može ih postojati veliki broj, ali svaki daje istu vrijednost funkcije cilja. Slika 4.2. prikazuje globalni i lokalni optimum jednodimenzionalnog problema optimizacije za određivanje maksimuma funkcije cilja.  $L_1$  i  $L_2$  predstavljaju lokalni optimum, a  $G$  predstavlja globalni optimum.



Slika 4. 2. Globalni i lokalni maksimum funkcije.

Vrijednost  $X^*$  je globalni optimum jednodimenzionalnog problema optimizacije s varijablom odlučivanja  $X$  i funkcijom cilja  $f(X)$ , kod određivanja njene maksimalne vrijednosti, ako za bilo koju varijablu odlučivanja  $X$  vrijede:

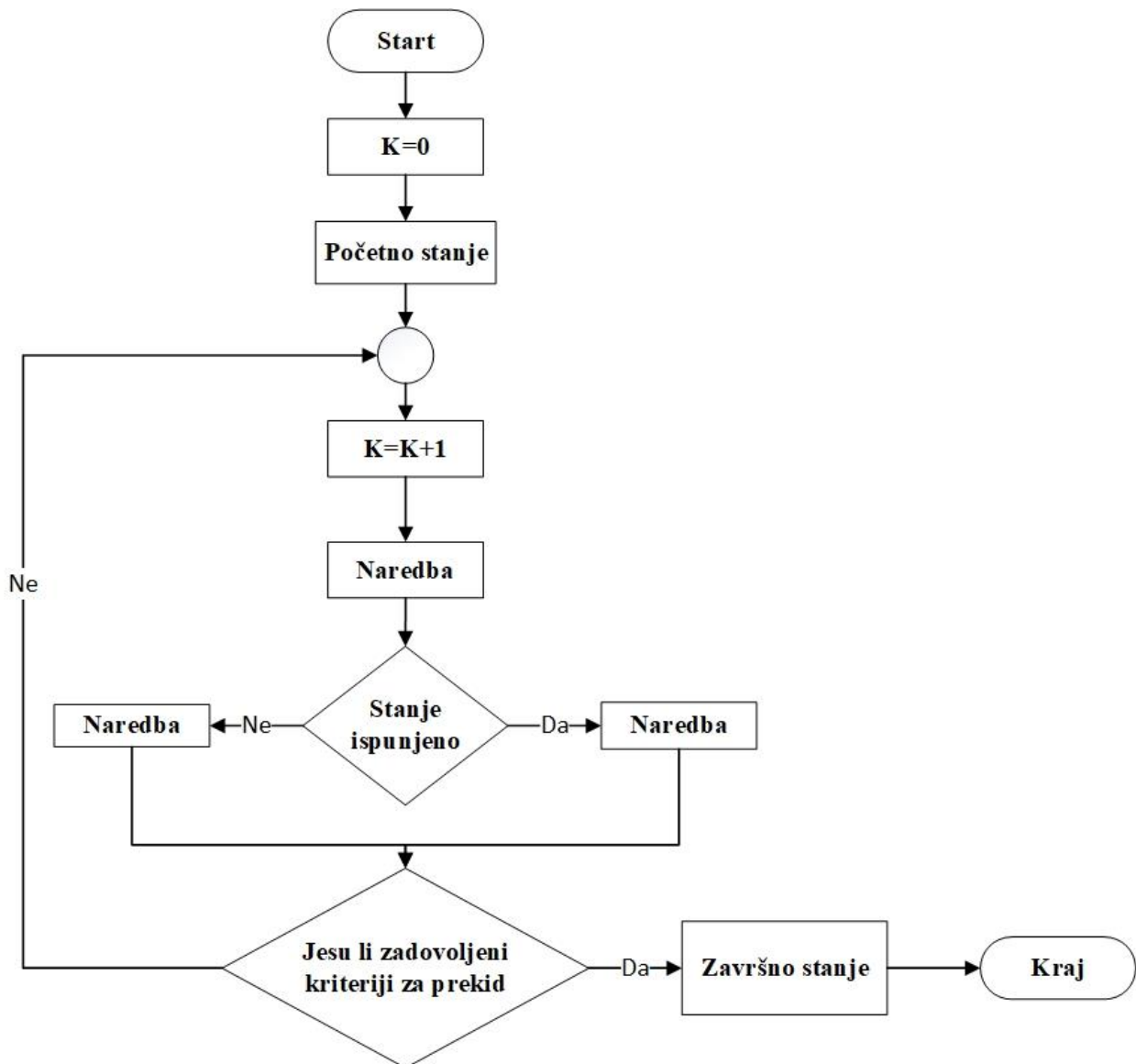
$$f(X^*) \geq f(X) \quad (4-11)$$

Kod problema određivanja minimalne vrijednosti funkcije cilja:

$$f(X^*) \leq f(X) \quad (4-12)$$

Meta-heuristički algoritmi se mogu primijeniti za rješavanje širokog spektra optimizacijskih problema. Pojam "Algoritam" se odnosi na niz operacija koje se izvode za rješavanje problema. Algoritmi se sastoje od iterativnih operacija ili koraka, koji se završavaju

kada se dostigne navedeni kriterij konvergencije. Slika 4.3. prikazuje standardnu shemu običnog algoritma.



Slika 4. 3. Standardna shema običnog algoritma,  $K$  predstavlja broj iteracija.

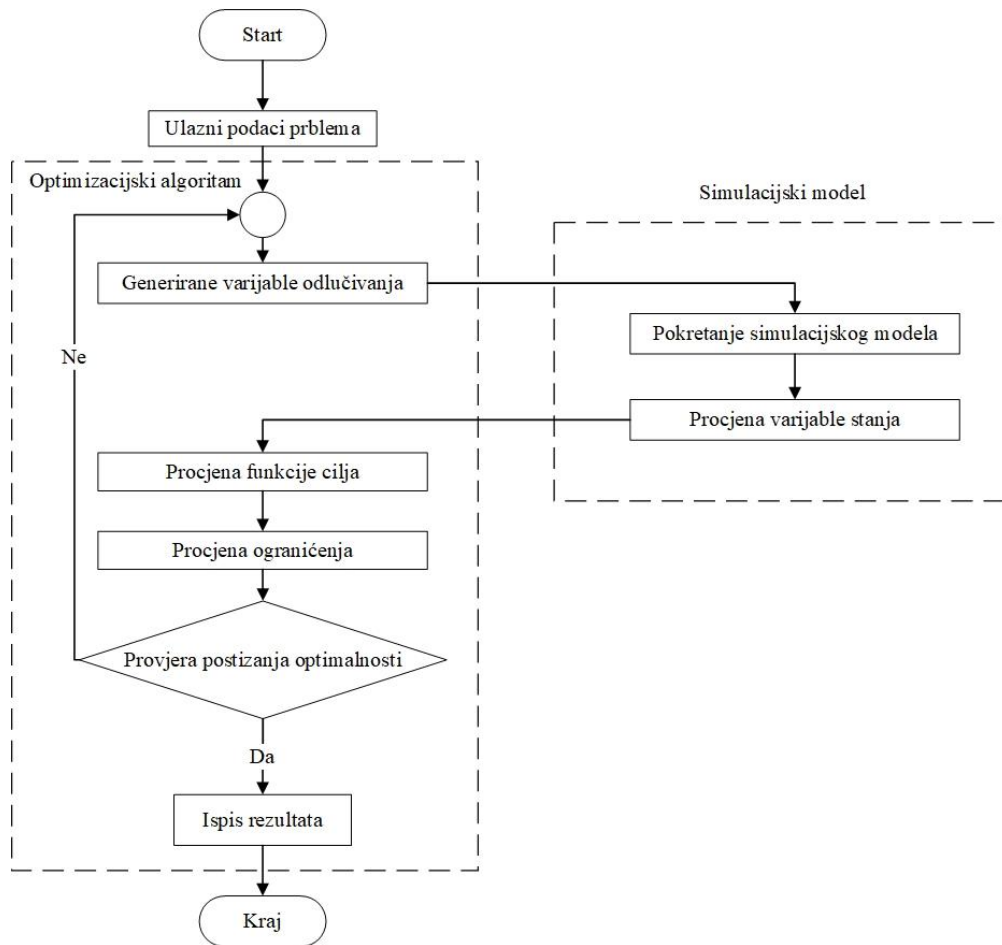
Meta-heuristički algoritmi polaze od početnog stanja i početnih podataka. Svrha ovih algoritama je pronalaženje odgovarajućih vrijednosti za varijable odlučivanja optimizacijskog problema kako bi se funkcija cilja optimizirala. Svaki meta-heuristički algoritam polazi od početnog stanja varijabli. Početno stanje može biti unaprijed definirano, nasumično generirano ili deterministički izračunato iz formula. Algoritmi obavljaju operacije iterativno u potrazi za rješenjem. Meta-heuristički algoritmi započinju svoje iteracije s jednim ili više početnih rješenja optimizacijskog problema. Zatim se izvode sekvencijalne operacije za generiranje novih rješenja.

Iteracija završava kada se generira novo moguće rješenje. Novo generirano rješenje se smatra početnim rješenjima za sljedeću iteraciju algoritma.

Nakon zadovoljavanja odabranih kriterija završetka, algoritam zaustavlja i izvješćuje o najboljem ili konačnom rješenju (rješenjima) problema optimizacije. Kriteriji završavanja definirani su u nekoliko različitih oblika: (1) broj ponavljanja - odnosi na unaprijed definirani broj iteracija koje algoritam smije izvršiti, (2) prag poboljšanja vrijednosti rješenja između uzastopnih iteracija - postavlja prag za poboljšanje rješenja između uzastopnih koraka i (3) vrijeme izvođenja optimizacijskog algoritma - zaustavlja algoritam nakon definiranog vremena izvođenja i daje najbolje rješenje koje je dostupno u to vrijeme [49].

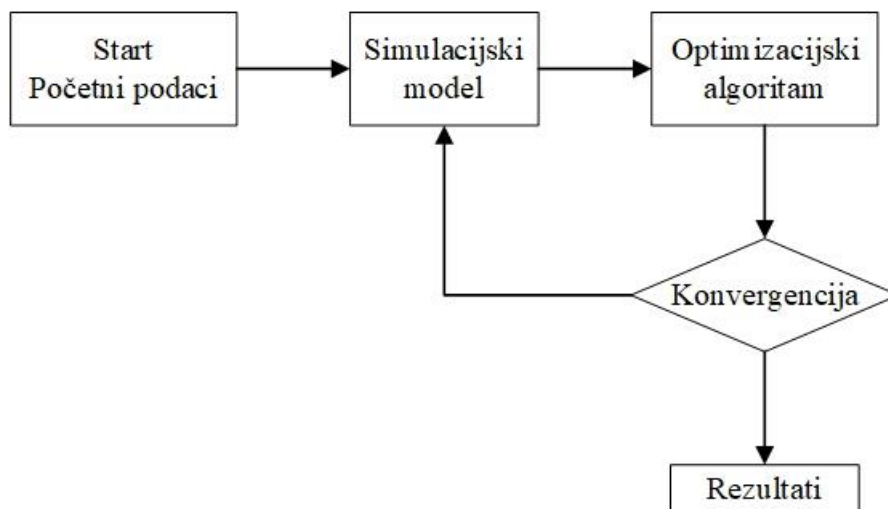
Na slici 4.4. može se vidjeti odnos između simulacijskog modela i optimizacijskog algoritma. Varijable odlučivanja su ulazni parametri simulacijskog modela, u sljedećem koraku se vrednuju varijable stanja, koje su izlazi simulacijskog modela, nakon čega se procjenjuje funkcija cilja.

U sljedećem koraku procjenjuju se ograničenja problema, a na kraju se izračunava i vrijednost trenutne varijable odlučivanja. U ovom trenutku, ukoliko kriteriji prekida nisu zadovoljeni, optimizacijski algoritam generira novo moguće rješenje varijabli odlučivanja za nastavak iteracija. Važno je napomenuti da ako optimizacija generira skup rješenja umjesto pojedinačnog rješenja u svakoj iteraciji, prethodni koraci se izvode za sva rješenja paralelno jedan s drugim.



Slika 4. 4. Veza između simulacijskog modela i optimizacijskog algoritma

Slika 4.5. prikazuje glavne komponente optimizacije meta-heurističkim algoritmima [49, p. 20...].



Slika 4. 5. Glavne komponente optimizacije meta-heurističkim algoritmima

U ovoj disertaciji je prihvaćena podjela optimizacijskih metoda prema [26] kao je opisano u poglavlju 4. Prema toj podjeli algoritam šišmiša spada u rojne algoritme. Meta-heuristički

algoritam šišmiša predložen je od strane Yang [50] 2010. godine, na temelju eholokacijskog ponašanja šišmiša. Yang je postavio pretpostavke:

1. Svi šišmiši koriste eholokaciju kako bi osjetili udaljenost, a također znaju razliku između hrane/plijena i pozadinskih barijera;
2. Šišmiši lete nasumično sa brzinom  $v_i$  na položaju  $x_i$  s fiksnom frekvencijom  $f_{min}$ , promjenjivom valnom duljinom  $\lambda$  i glasnoćom  $A_0$  za traženje plijena.
3. Oni mogu automatski prilagoditi valnu duljinu (ili frekvenciju) svojih emitiranih impulsa i prilagoditi brzinu pulsne emisije  $r \in [0,1]$ , ovisno o blizini njihove mete;
4. Iako glasnoća može varirati na mnogo načina, Yang pretpostavlja da glasnoća varira od velike (pozitivne)  $A_0$  do minimalne konstantne vrijednosti  $A_{min}$ .
5. Općenito, frekvenciji  $f$  u rasponu  $[f_{min}, f_{max}]$  odgovara raspon valnih duljina  $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$ . Na primjer, frekvenzijski raspon od [20 kHz, 500 kHz] odgovara rasponu valnih duljina od 0,7 mm do 17 mm.
6. Za zadani problem može se koristiti bilo koju valnu duljinu za jednostavniju implementaciju.
7. Nadalje, ne moraju se nužno koristiti same valne duljine, već se mogu mijenjati frekvencije pri fiksiranju valne duljine  $\lambda$ . To je zbog toga što su  $\lambda$  i  $f$  povezani zbog činjenice da je  $\lambda \cdot f$  konstantno.
8. Radi jednostavnosti možemo pretpostaviti da je  $f \in [0, f_{max}]$ , poznato je da više frekvencije imaju kratke valne duljine i putuju na kraću udaljenost. Za šišmiše, tipični rasponi su nekoliko metara.
9. Brzina impulsa može jednostavno biti u rasponu od [0,1] gdje 0 znači nema impulsa uopće, a 1 znači maksimalnu brzinu impulsne emisije.

Pravila za ažuriranje položaja  $x_i$  i brzine  $v_i$  u d-dimenzionalnom prostoru pretraživanja dan je jednadžbama (4-13) do (4-15):

$$f_i = f_{min} + (f_{max} - f_{min})\beta \quad (4-13)$$

$$v_i^t = v_i^{t-1} + (x_i^t - x_*)f_i \quad (4-14)$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t \quad (4-15)$$

gdje je  $x_i^t$  novo rješenje i  $v_i^t$  nova brzina u vremenskom periodu  $t$ ,  $\beta \in [0, 1]$  je nasumični vektor izvučen iz uniformna distribucije,  $x_*$  je trenutno globalno najbolje rješenje određeno nakon usporedbe svih  $n$  šišmiša. Kako je produkt  $\lambda_i \cdot f_i$  povećanje brzine, može se koristiti  $f_i$  ili  $\lambda_i$  za prilagođavanje promjene brzine pri fiksiranju jednog od navedenih faktora. Pseudo kôd predloženog algoritma šišmiša, dan je u tablici 4.1.:

Tablica 4. 1. Pseudo kôd algoritma šišmiša

---

Funkcija cilja  $f(x)$ ,  $x = (x_1, \dots, x_d)^T$

Inicijalizacija populacije šišmiša  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) i  $v_i$

Definiranje učestalosti pulsa  $f_i$  pri  $x_i$

Inicijalizacija brzine pulsa  $r_i$  i glasnoće  $A_i$

while ( $t <$  maksimalan broja iteracija)

Generiranje novih rješenja podešavanjem frekvencije,

ažuriranje brzina i lokacija / rješenja, korištenjem [jednadžbe (1) do (3)]

if (slučajni broj  $> r_i$ )

Odabir rješenje između najboljih rješenja

Generiranje lokalnog rješenja oko odabranog najboljeg rješenja

end if

Generiranje novog rješenja nasumičnim letenjem

if (slučajni broj  $< A_i$  &  $f(x_i) < f(x_*)$ )

Prihvati novo rješenje

Povećaj  $r_i$  i smanji  $A_i$

end if

Označi najbolje i nađi trenutno najbolje rješenje  $x^*$

end while

Nakon procesa rezultati i vizualizacija

---

Za dio lokalnog pretraživanja, nakon što je rješenje odabrano među trenutnim najboljim rješenjima, novo rješenje za svakog šišmiša generira se lokalno pomoću slučajnog hoda izrazom (4-16).

$$x_{new} = x_{old} + \varepsilon A^t \quad (4-16)$$

gdje je  $\varepsilon \in [-1,1]$  slučajni broj,  $A^t = \langle A_i^t \rangle$  je prosječna glasnoća svih šišmiša u vremenskom koraku  $t$ . Nadalje, glasnoća  $A_i$  i brzina  $r_i$  pulsne emisije moraju se u skladu s tim ažurirati tijekom nastavljanja iteracija.

Budući da se glasnoća obično smanjuje nakon što je šišmiš pronašao svoj plijen, dok se brzina pulsne emisije povećava, glasnoća se može odabrati kao bilo koja vrijednost prikladnosti. Na primjer, možemo koristiti  $A_0 = 100$  i  $A_{min} = 1$ .

Radi jednostavnosti može se koristiti  $A_0 = 1$  i  $A_{min} = 0$ , uz pretpostavku da  $A_{min} = 0$  znači da je šišmiš upravo pronašao plijen i privremeno zaustavio emitiranje bilo kojeg zvuka, dano izrazom (4-17).

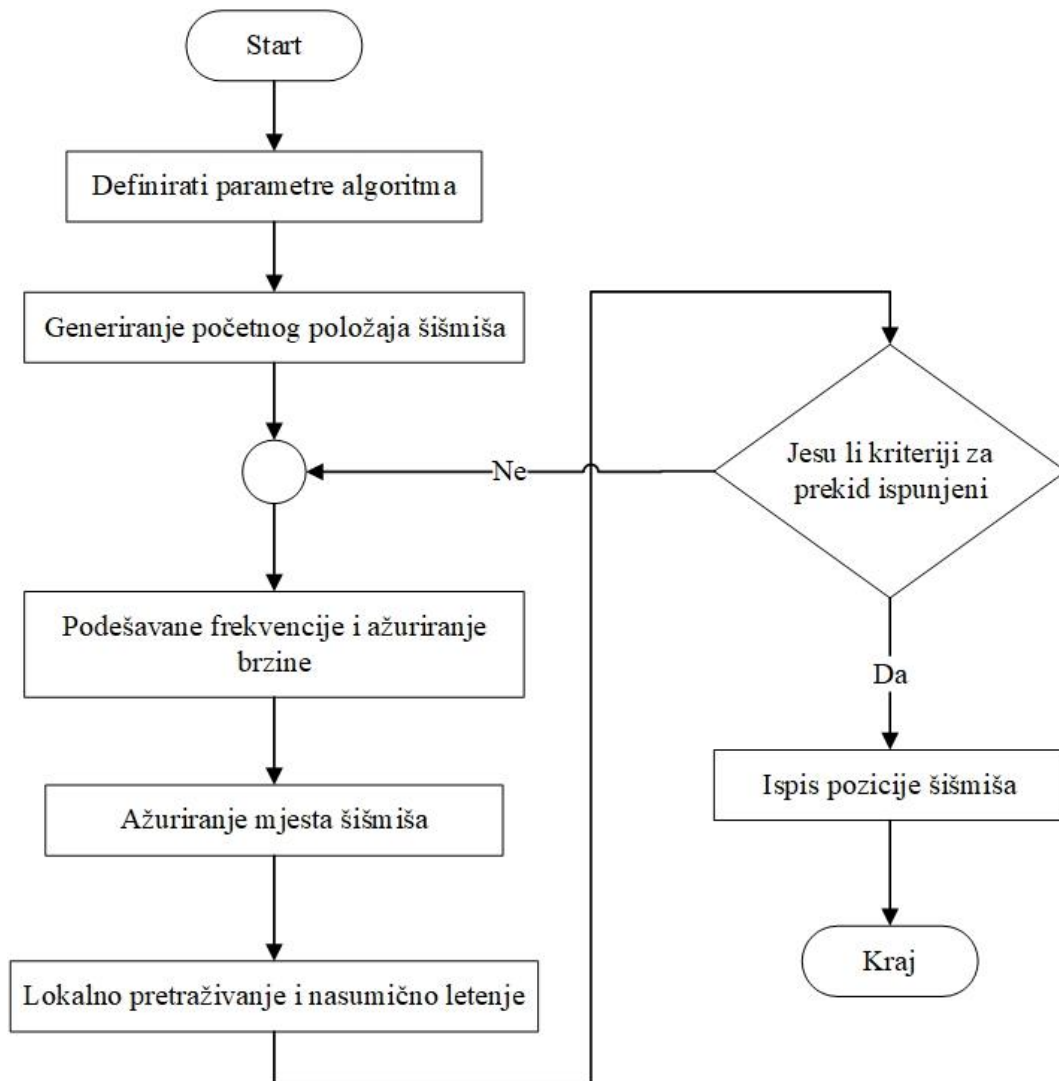
$$A_i^{t+1} = \alpha A_i^t, \quad r_i^{t+1} = r_i^0 [1 - \exp(-\gamma t)] \quad (4-17)$$

gdje su  $\alpha$  i  $\gamma$  konstante, za sve  $0 < \alpha < 1$  i  $\gamma > 0$  imamo

$$A_i^t \rightarrow 0, \quad r_i^t \rightarrow r_i^0, \quad \text{kada } t \rightarrow \infty \quad (4-18)$$

Za pojednostavljenje može se upotrijebiti  $\alpha = \gamma$ , a Yang za simulaciju koristi  $\alpha = \gamma = 0,9$ . Yang je usporedio efikasnost algoritma šišmiša s genetskim algoritmom i optimizacijom rojem čestica za rješavanje poznatih problema. Rezultati usporedbe su pokazali da je algoritam šišmiša bolja optimizacijska metoda od optimizacije roja čestica i genetskog algoritma [50].

Slika 4.6. prikazuje dijagram toka algoritma šišmiša. Na početku se definiraju parametri algoritma, zatim se generiraju početni položaji šišmiša. Podešavanjem frekvencije i ažuriranjem brzine, ažuriraju se nova mjesta (rješenja) šišmiša. Nova rješenja odabiru se lokalnim pretraživanjem i nasumičnim letenjem. Provjerom kriterija za prekid utvrđuje se da li algoritam završava izvođenje i ispisuje rješenje ili se vraća na korak podešavanja frekvencije i ažuriranja brzine.



Slika 4. 6. Dijagram toka algoritma šišmiša.

Tablica 4.2. prikazuje usporedbu algoritma šišmiša s općim algoritmom gdje je funkcija cilja predstavlja udaljenost do hrane, koje se nastoji smanjiti.

Tablica 4. 2. Karakteristike algoritma šišmiša u usporedbi s općim algoritmom [49]

Opći algoritam	Algoritam šišmiša
Varijabla odluka	Položaj šišmiša u bilo kojoj dimenziji
Rješenje	Položaj šišmiša
Staro rješenje	Stari položaj šišmiša
Novo rješenje	Novi položaj šišmiša
Najbolje rješenje	Najbolji položaj šišmiša
Funkcija cilja	Udaljenost od hrane
Početno rješenje	Slučajni položaj šišmiš
Izbor	Kriteriji glasnoće
Proces stvaranja novih rješenja	Letenje šišmiša



### 4.3. Varijante algoritma šišmiša

Kako se algoritam šišmiša pokazao kao dobra meta-heuristička metoda, za rješavanje optimizacijskih problema u stvarnom svijetu, različiti autori su predložili metode za njegovo unapređenje [51].

#### 4.3.1. Kaotični algoritam šišmiša

Izvođenje meta-heurističkih algoritama se unaprjeđuje korištenjem kaotičnih mapa za podešavanje parametara, umjesto slučajnih brojeva, koji kontroliraju izvođenje algoritma, kako bi se poboljšala raznolikost i izbjegla prijevremena konvergencija [52]. Rezultati pokazuju da korištenje kaotičnih mapa poboljšava izvedbu algoritma šišmiša [52] [53] [54]. U kaotičnom algoritmu šišmiša izraz (4-19) se koristi za ažuriranje glasnoće

$$A^i = (t + 1) = a[A^i(t)]^2 \sin[\pi A^i(t)] \quad (4-19)$$

#### 4.3.2. Algoritam šišmiša s mutacijom

Unaprjeđenje algoritma šišmiša s mutacijom koja se koristi kod evolucijskih algoritama (EA) [51]. Mutacija je operator koji mijenja genetski materijal jedne jedinke i služi za pretraživanje prostora rješenja [55]. Problem optimizacije bespilotnih borbenih letjelica optimizacijom rute letenja s obzirom na različite vrste ograničenja u složenim okruženjima borbenih polja, riješen je korištenjem algoritma šišmiša s mutacijom u [56].

#### 4.3.3. Algoritam šišmiša s mutacijom i križanjem

Križanjem roditelja, nastaju nova rješenja djeca. Križanje prenosi svojstva roditelja na djecu, a mutacija slučajno mijenja svojstva jedinke [55]. Primjer korištenja algoritma šišmiša s mutacijom i križanjem za rješavanje problema optimizacije kontrole opterećenja predložen je u [57].

### 4.4. Pregled literature

Autori znanstvenih radova uspješno su koristili algoritam šišmiša za rješavanje različitih problema optimizacije u elektroenergetskom sustavu.

Sravanthi i Karthikaikannan [58] koristili su usmjereni algoritam šišmiša za optimalno vođenje jalove snage s ciljem smanjenja gubitaka radne snage u prijenosnom sustavu, s promjenom

parametara naponskih granica generatora terminala, postavljanje položaja preklopke transformatora (engl. tap settings) i izlaznu jalovu snagu VAR kompenzatora. Podaci su testirani na IEEE 14 i IEEE 57 sabirničkom testnom sustavu. Rezultati simulacija prikazani su u tablici 4.3.

Tablica 4.3. Usporedba za gubite radne snage na IEEE 14 sabirničkom sustavu [58]

Optimizacijske metode	Gubici radne snage (MW)
Evolucijsko programiranje [59]	13,3462
Optimizacija rojem čestica [60]	13,327
Metoda unutarnje točke [60]	13,246
Diferencijalni evolucijski račun [60]	13,239
Usmjereni algoritam šišmiša	12,1772

Iz tablice 4.3. može se vidjeti da optimizacija usmjerenim algoritmom šišmiša daje bolja rješenja, odnosno, ostvaruju se manji gubici djelatne snage u prijenosnom sustavu. Najveća razlika iznosi kod korištenja evolucijskog programiranja gdje gubici djelatne snage iznose 13,3462 MW, što su za 1,1690 MW veći gubici nego kod korištenja usmjerenog algoritma šišmiša gdje gubici iznose 12,1772 MW. Usporedba dobivenih rješenja za IEEE-57 sabirnički sustav prikazana je u tablici 4.4.

Tablica 4. 4. Usporedba za gubite radne snage na IEEE 57 sabirničkom sustavu [58]

Optimizacijske metode	Gubici radne snage (MW)
Adaptivni genetski algoritam [61]	24,564
Optimizacija temeljena na biogeografiji [61]	24,544
Seeker optimization algorithm [61]	24,265
Gravitacijski algoritam pretraživanja [61]	23,461
Usmjereni algoritam šišmiša	22,9636

Iz tablice 4.4. može se vidjeti da je najveća razlika u gubicima djelatne snage kod korištenja adaptivnog genetskog algoritma u odnosu na usmjereni algoritam šišmiša i iznosi 1,6 MW.

Adarsh et al. [52] koristili su kaotični algoritma šišmiša za rješavanje problema ekonomskog vođenja, vrlo važan problem optimizacije s ciljem optimalne alokacije proizvodnih jedinica za smanjenja troškova. Rezultati simulacije su pokazali da kaotični algoritam šišmiša, koji koristi funkciju kazne, daje bolje rezultate ili se povoljno uspoređuje s ostalim metodama optimizacije. Također, autori su zaključili da je kaotični algoritam šišmiša sposoban rješavati probleme velikih dimenzija s nekoliko ograničenja te se može uspješno primijeniti i na ostale probleme optimizacije elektroenergetskog sustava.

Shukla i Singh [62] također rješavaju problem ekonomskog disprečiranja, ali za razliku od [52], predlažu korištenje pseudo kôda kaotičnog algoritma šišmiša za rješavanje problema uz zadovoljavanje ograničenja optimizacije. Rezultati simulacije su pokazali da pseudo kôd kaotičnog algoritma šišmiša daje bolje rezultate u usporedbi s kaotičnim algoritmom šišmiša, koji koristi funkciju kazne (engl. penalty function).

Rao i Kumar [63] predlažu korištenje algoritma šišmiša za određivanje optimalnih tokova snaga u prisutnosti jedinstvenog regulatora tokova snage (engl. unified power flow controller). Metodu provjeravaju na sustavu od 5 sabirnica i modificiranom IEEE 30 sabirničkom testnom sustavu sa i bez jedinstvenog regulatora snage. Rezultati simulacije su pokazali manje gubitke snage, kada se jedinstveni regulator snage instalira u elektroenergetski sustav. Predloženu metodu uspoređuju s genetskim algoritmom. Autori zaključuju da je algoritam šišmiša jednostavan za korištenje, robustna i moćna optimizacijska metoda u usporedbi s genetskim algoritmom.

Dao et al. [64] predložili su korištenje evoluiranog (engl. evolved) algoritam šišmiša za rješavanje problem optimalnog vođenja opterećenja toplinskih postrojenja. Predložena metoda optimizacije testirana je na sustavima sa šest i petnaest toplinskih postrojenja. Usporedba s genetskim algoritmom i optimizacijom rojem čestica je pokazala da evoluirani algoritam šišmiša daje kvalitetnije rješenje, ima veću učinkovitost i točnost te manje prosječno vrijeme centralnog procesora (engl. central processing unit ).

Liang et al. [65] za rješavanje problema ekonomskog vođenja predložili su algoritmu šišmiša u kombinaciji s kaotičnom mapom, kako bi se spriječila prijevremena konvergencija i modelom slučajne crne rupe koji pomaže u izbjegavanju prijevremene konvergencije, povećanju globalne sposobnosti pretraživanja, povećava područje eksploatacije i ubrzava brzinu konvergencije. Za razliku od srodnih radova, ovaj rad uključuje troškove konvencionalnih toplinskih generatora i slučajne snage vjetroelektrane u funkciju troška. Korištenje algoritma šišmiša za minimiziranje ukupnih troškova termoelektrane predstavljeno je u [66].

Khooban i Niknam [57] predložili su hibridnu metodu koja se sastoji od Samo-prilagodljivog modificiranog algoritma šišmiša (engl. Self-Adaptive Modified Bat Algorithm) i neizrazite logike (engl. Fuzzy Logic) za rješavanje problema optimizacije upravljanja opterećenjem (engl. load frequency control). Učinkovitost predložene metode uspoređena je s rezultatima konvencionalnog proporcionalno-integralno-derivativnog regulatora (engl. Proportional integral derivative (PID) controller) i neizrazitog proporcionalnog integralnog

derivativnog regulatora (engl. fuzzy proportional integral derivative). Rezultati simulacije su pokazali superiornost predložene hibridne metode.

Ali [67] je predložio korištenje algoritma šišmiša za optimalno oblikovanje stabilizatora snage (engl. power system stabilizers) u okolini s više strojeva s ciljem minimiziranja oscilacija sustava zbog promjena opterećenja i smetnji. Predložena metoda uspoređena je s metodom genetskog algoritma. Rezultati su pokazali robusnost i superiornost predloženog regulatora.

Sambariya i Prasad [68] koriste algoritam šišmiša za rješavanje problema optimalnog oblikovanja stabilizatora snage s ciljem smanjenja oscilacija nelinearnog modela elektroenergetskog sustava, koji se sastoji od jednog stroja spojenog na beskonačnu sabirnicu preko prijenosne linije.

Optimalan razmještaj fazorskih mjernih uređaja (engl. phasor measurement unit) uspješno je riješen primjenom binarnog algoritma šišmiša hibridiziranog s Taguchi metodom u [69].

Ravindra i Rao [70] predlažu unaprijeđeni binarni algoritam šišmiša (engl. Upgraded Binary Bat Algorithm) za optimalnu lokaciju fazorskih mjernih uređaja. Predloženi algoritam uspješno je testiran na četiri IEEE testna sustava i uspoređen s postojećim algoritmima. Unaprijeđeni binarni algoritam šišmiša osim točnosti pokazao je brzu konvergenciju optimalnom rješenju.

Prema [71] fazorski mjerni uređaji razlikuju se od tradicionalnih mjernih uređaja, po tome što mogu mjeriti fazore napona sabirnice na kojoj je instaliran i fazore struja svih vodova koji se spajaju na tu sabirnicu. Drugim riječima fazorski mjerni uređaji nadziru sabirnicu na kojoj su instalirani i njeno električno susjedstvo.

Matrica povezanosti fazorskih mjernih uređaja dana je izrazom (4-20):

$$t_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{ako je } i = j \\ 1, & \text{ako je } i \text{ povezan vodom s } j \\ 0, & \text{u suprotnom} \end{cases} \quad (4-20)$$

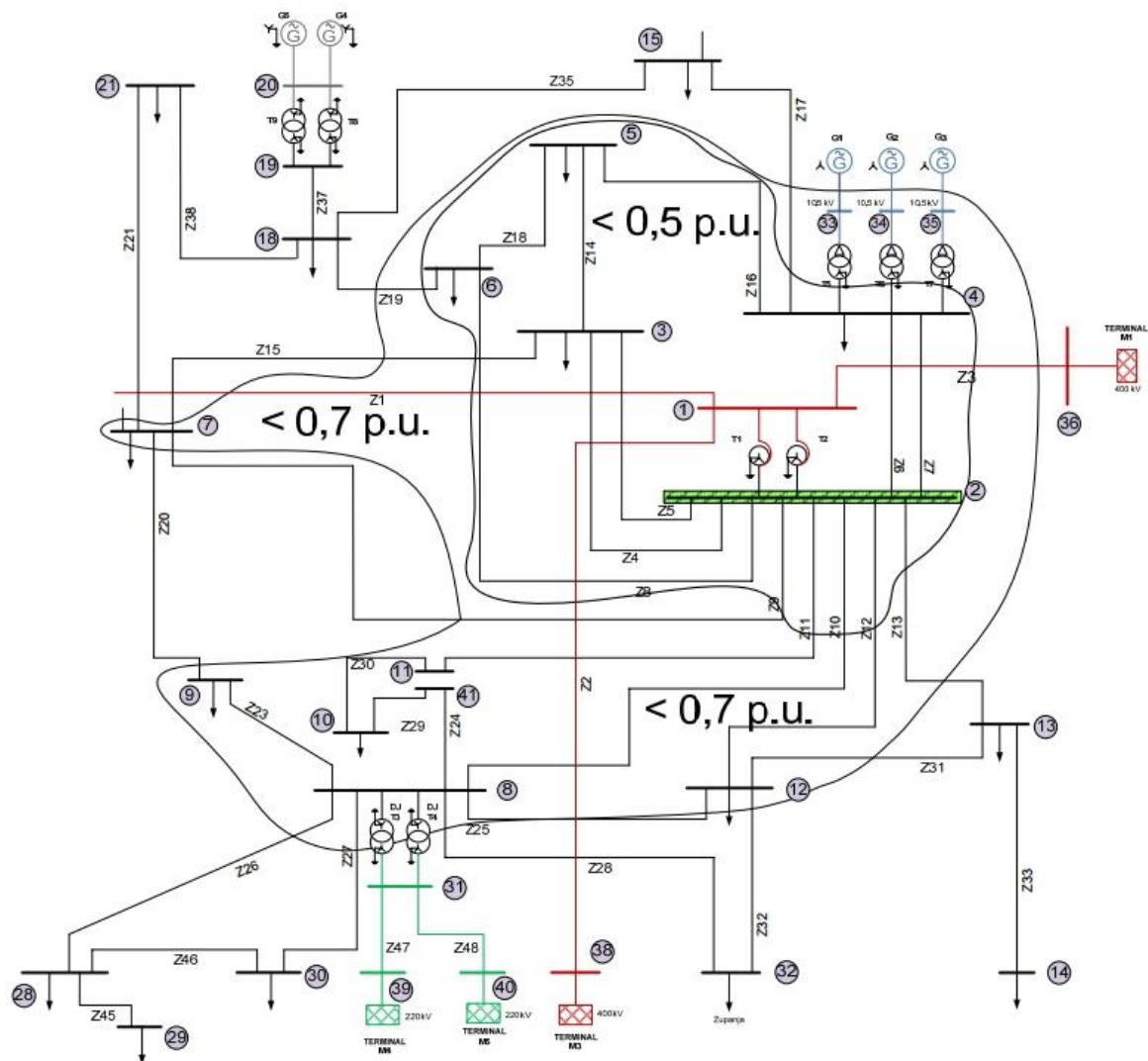
Yang i Le [72] Uspješno rješavaju problem kvalitete električne energije - optimalni dizajn pasivnog filtra snage (engl. design of a passive power filter), s ciljem suzbijanja kritičnih harmonika i poboljšanja faktora snage, korištenjem algoritma šišmiša.

Algoritam šišmiša također je korišten za određivanje optimalne snage spremnika za pohranu električne energije kod korištenja obnovljivih izvora energije [73] i za određivanje optimalne lokacije solarnih fotonaponski sustava u distribucijskoj mreži, koji je testiran na IEEE

33 sabirničkom testnom sustavu [74]. Algoritam šišmiša je korišten za praćenje točke maksimalne snage (engl. maximum power point tracking) fotonaponskog sustava pod uvjetima djelomičnog zasjenjivanja u [75].

## 5. IZLOŽENO PODRUČJE

Izloženo područje obuhvaća sabirnice i vodove na kojima pojava kratkog spoja izaziva niže napone od podešenog naponskog praga na promatranoj sabirnici. Izloženo područje je lakše objasniti grafički, što se može vidjeti na slici 5.1. Manje područje obuhvaćeno krivuljom, predstavlja područje u kojem će nastupom kratkog spoja vrijednost naponskog propada na sabirnici 2 biti niža od postavljenog naponskog praga 0,5 p.u. Veće područje predstavlja gore navedeno, samo za naponski prag 0,7 p.u.



Slika 5. 1. izloženo područje sabirnice 2 za napone 0,5 i 0,7 p.u.

U praksi su se izložena područja uspoređivala isključivo kvalitativno, međutim, navedeni način usporedbe nije precizan zato što sve sabirnice sustava nemaju jednaku osjetljivost i vodovi sustava su različitih duljina. Da bi se riješilo navedene probleme uspoređivanja izloženih područja Klaić [1] predlaže korištenje težinskog koeficijenta izloženog područja.

$$\text{Težinski koeficijent izloženog područja} = \frac{\text{izložena duljina vodova područja}}{\text{ukupna duljina vodova sustava}}$$

Izrazom (5-1) daje se izložena duljina područja:

$$L_{k,Uexp} = \sum_{i=1}^m L_{crit,ki} \quad (5-1)$$

odnosno,  $L_{k,Uexp}$ , izložena duljina područja, je zbroj izloženih duljina vodova u području, te izrazom (5-2) daje se ukupna duljina vodova:

$$L_{tot} = \sum_{j=1}^n L_j \quad (5-2)$$

$L_{tot}$  je ukupna duljina vodova u sustavu. Tada se težinski koeficijent izloženog područja može prikazati izrazom (5-3):

$$EXP_{k,Uexp} = \frac{L_{k,Uexp}}{L_{tot}} \quad (5-3)$$

gdje je  $k$  sabirnica izračuna izloženog područja,  $n$  ukupan broj vodova,  $m$  broj vodova u izloženom području te  $U_{exp}$  je granični napon izloženog područja.

## 6. PODRUČJE DOSEGA NADZIRANJA

Sustavi za nadziranje kvalitete električne energije su prvi korak u rješavanju problema kvalitete električne energije i prikupljanju informacija o naponskim propadima. Idealno rješenje bi bilo pokriti cijeli sustav, tako da se na svaku sabirnicu instalira uređaj za mjerenje kvalitete električne energije, međutim ovaj način nije ekonomski opravdan. U skladu s navedenim, pojavila se potreba za metodom koja će odrediti optimalan broj mjernih uređaja i optimalnu lokaciju njihove instalacije u elektroenergetskom sustavu [76].

Olguin i Bollen [77] predstavili su koncept određivanja optimalne lokacije i broja uređaja za mjerenje kvalitete električne energije temeljen na području dosega nadziranja (eng. Monitor Reach Area – MRA), a koje daje područje mreže koje se može promatrati s određenog položaja monitora. Prema toj definiciji, ako se kvar nalazi unutar MRA, tada će događaj pokrenuti mjerač naponskih propada, u suprotnom, neće.

Područje dosega monitora instaliranog na sabirnici  $k$  je točno izloženo područje te sabirnice za isti prag napona. Dio mreže koji se može promatrati pomoću monitora instaliranog na čvoru  $k$  može se smatrati područjem koje sadrži čvor  $k$  i njegovo električno susjedstvo. Veličina ovog područja uglavnom ovisi o postavljanju praga napona monitora  $p$  i zove se  $p$  - područje dosega monitora za čvor  $k$ .

Alternativni način opisivanja područja dosega monitora svih potencijalnih pozicija monitora je korištenje binarne matrice čija je veličina jednaka  $N$  sa  $F_p$ , gdje je  $v_{ij}$  unos napona matrice naponski propada [78].

$$MRA_p = mra_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{za } v_{ij} \leq p \\ 0, & \text{za } v_{ij} > p \end{cases} \quad (6-1)$$

Tablica 6.1. prikazuje predložene sabirnice na koje bi se trebali instalirati uređaji za mjerenje naponskih propada, kako bi se pokrio cijeli sustav, gdje „S“ predstavlja sabirnicu, a „MU“ uređaj za mjerene naponskih propada.

Tablica 6.2. prikazuje primjer sustava s dvanaest sabirnica i petnaest mjesta kvara. Redovi u tablici predstavljaju preostali napon na sabirnicama uslijed nastalog kvara. Prvi stupac tablice predstavlja broj nastalog kvara [79].



Tablica 6. 1. Predložene sabirnice na koje se trebaju instalirati uređaji za mjerenje naponskih propada

S	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
MU	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0

Tablica 6. 2. Napon na sabirnicama u ovisnosti o mjestu kvara.

Sabirnice												
KS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0,20	0,52	1,00	0,88	0,89	0,89	0,96	0,87	0,96	0,96	0,97	0,91
2	0,39	0,27	1,00	0,81	0,86	0,83	0,95	0,80	0,95	0,95	0,96	0,86
3	1,00	1,00	0,14	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
4	0,75	0,72	0,99	0,49	0,87	0,50	0,94	0,50	0,93	0,93	0,94	0,57
5	0,94	0,95	1,00	0,97	0,31	0,97	0,98	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98
6	0,70	0,67	0,99	0,28	0,83	0,10	0,91	0,32	0,91	0,91	0,92	0,49
7	0,97	0,97	1,00	0,98	0,96	0,97	0,51	0,98	0,67	0,74	0,79	0,98
8	0,74	0,71	0,99	0,50	0,87	0,53	0,94	0,47	0,94	0,93	0,94	0,59
9	0,99	0,99	1,00	0,99	0,99	0,99	0,87	0,99	0,16	0,79	0,85	0,99
10	0,97	0,97	1,00	0,98	0,96	0,97	0,75	0,98	0,54	0,49	0,64	0,98
11	0,97	0,97	1,00	0,98	0,97	0,97	0,75	0,98	0,52	0,53	0,08	0,98
12	0,92	0,90	1,00	0,79	0,96	0,82	0,98	0,80	0,98	0,98	0,98	0,17
13	0,98	0,98	1,00	0,98	0,97	0,98	0,82	0,98	0,64	0,67	0,43	0,99
14	0,98	0,98	1,00	0,99	0,98	0,98	0,85	0,99	0,67	0,73	0,53	0,99
15	0,95	0,95	1,00	0,97	0,89	0,96	0,98	0,97	0,98	0,98	0,98	0,97

Tablica 6.3. prikazuje binarni zapis tablice za naponski prag 0,9 p.u. Sve vrijednosti preostalog napona u tablici naponskih propada 6.2. manje od 0,9 p.u. imaju vrijednost 1 u binarnoj matrici, a ostale vrijednosti imaju vrijednost 0.

Tablica 6. 3. Binarni zapis matrice doseg područje mjernog uređaja.

Sabirnice												
KS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0
2	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1
3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1
5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
6	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1
7	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0
8	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1
9	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0
10	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0
11	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0
12	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1
13	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0
14	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0
15	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0

Nakon formiranja matrice naponskih propada može se definirati problem optimizacije. Promatrani redni binarni vektor  $X$ , dužine  $N$  (broj sabirnica sustava) pokazuje potrebu za instalacijom mjernog uređaja na sabirnicu sustava. Elementi  $X$  su  $x_i$  kao što je naznačeno u izrazu (6-2). Vektor  $X$  naziva se "vektor položaja monitora". Određena vrijednost vektora položaja monitora pokazuje gdje se instaliraju monitori.

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{ako je monitor potreban na sabirnici } i \\ 0, & \text{suprotno} \end{cases} \quad (6-2)$$

Treba primijetiti da umnožak određene vrijednosti vektora pozicija monitora  $X$  s određenim stupcem  $j$  MRAP matrice ukazuje na broj područja doseg monitora koji sadrže kvar  $j$ . Umnožak mora biti veći ili jednak 1 za svaki položaj kvara.

Drugim riječima, želimo da svaki kvar bude u barem jednom području doseg monitora, tako da se barem jedan monitor aktivira na svaki kvar. Neka je  $b$  jedinični vektor. Problem optimizacije može se prikazati izrazom (6-3).

$$\min \left( \sum_1^N x_i \right) \quad (6-3)$$

A ograničenja s izrazom (6-4)

$$\sum_{i=1}^N x_i \cdot mra_{ij} \geq b_j; j = 1, 2 \dots F_p \quad (6-4)$$

$N$  je broj potencijalnih položaja monitora (sabirnice sustava),  $mra_{ij}$  je  $(i, j)$  ulaz od MRAP,  $b_j$  je  $j$ -ti ulaz desnog vektora  $b$ ,  $x_i$  = binarni broj (0 ili 1). Nastali problem optimizacije je problem cjelobrojnog programiranja [77] [78].

Predloženi model autori su testirali na pojednostavljenom modelu Kolumbijskog nacionalnog međusobno povezanog prijenosnog sustava 230 kV i 500 kV. Sustav se sastoji od 87 sabirnica, 164 voda. Korišteni su samo trofazni kratki spojevi za formiranje matrice naponskih propada. Simulacije za četiri različite vrijednosti naponskog praga (0,9 – 0,85 – 0,8 – 0,75 p.u.), pokazale su da kod postavljanja niže vrijednosti naponskog praga, broj potrebnih mjernih uređaja za mjerenje kvalitete električne energije raste. Također, autori naglašavaju da postoji više optimalnih rješenja u području pretraživanja koja daju istu vrijednost funkcije cilja [77].

Olguin et al. [80] koristili su pojednostavljeni prijenosni sustav predložen u [77]. Za formiranje područja dosega nadziranja korišteni su simetrični kratki spojevi na 781 lokaciji, koje uključuju sabirnice i vodove. Formirani problem optimizacije je cjelobrojni binarni optimizacijski problem, za koji autori koriste metodu grananja i ograničavanja (engl. Branch and Bound). Za pokrivanje cijelog sustava pri naponskom pragu 0,9 p.u., potrebno je osam uređaja za mjerenje naponskih propada, kako bi se pokrio cijeli sustav. Dodatno, korišten je genetski algoritam za pretraživanje prostora rješenja s ciljem pronalaženja ostalih optimalnih rješenja. Kao rezultat pronađeno je 35 različitih optimalnih rješenja, koja su zadovoljavala postavljena ograničenja i omogućavala pokrivanje cijeloga sustava za vrijednost naponskog praga 0,9 p.u. s osam uređaja za mjerenje kvalitete električne energije.

Mazlumi et al. [81] koristili su 41 sabirnički prijenosni sustav regionalne elektroprivredne tvrtke u Teheranu nazivnog napona 230 kV. Koristili su rezultate simulacije 3908 jednofaznih kratki spojeva u uzemljenoj mreži za formiranje područja dosega nadziranja. Pri naponu praga 0,9 p.u. koristili su genetski algoritam za određivanje optimalnog broja i lokacije uređaja za mjerenje kvalitete električne energije. Rezultati su pokazali da je 6 optimalan broj mjernih uređaja za mjerenje naponskih propada, kako bi se pokrio cijeli sustav. Također, pretraživanjem prostora

rješenja pomoću genetskog algoritma, pronađeno je dvanaest optimalnih rješenja, koja daju istu vrijednost funkcije cilja uz određena ograničenja.

Haghbin i Farjah [82] predložili su korištenje neizrazite matrice područja dosega nadziranja i korištenje genetskog algoritma za određivanje optimalnog broja i lokacije uređaja za mjerenje naponskih propada, koji uspješno testiraju na IEEE 1118 sabirničkom testnom sustavu. Također, autori zaključuju da predloženi koncept neizrazite granice, omogućuje bolju raspodjelu mjernih uređaja.

Utjecaj uvođenja distribuiranih izvora na optimalnu lokaciju mjernih uređaja korištenjem genetskog algoritma na IEEE 24 i IEEE 57 testnim sustavima za različite pragove napona od 0,5 do 0,9 p.u. je proveden u [83]. Iz dobivenih rezultata, autori zaključuju da broj potrebnih mjernih uređaja raste s većim uvođenjem distribuiranih izvora u elektroenergetski sustav.

Ibrahim et al. [84] koristili su matricu područja dosega nadziranja za određivanje optimalne lokacije i broja mjernih uređaja u IEEE 34 testnom sustavu. Za rješavanje problema optimizacije korišten je genetski algoritam. Radi točnijeg određivanja najbolje lokacije, autori uvode indeks težina naponskog propada (engl. Sag Severity Indeks). Taj se indeks definira kao omjer zbrajanja faza na kojima se pojavljuje naponski propad nižim od 0,9 p.u. i ukupnog broja faza u cijelom sustavu, prikazan jednadžbom:

$$SSI_{0,9}^F = \frac{\sum N_{SPB}}{\sum N_{TPB}} \quad (6-5)$$

gdje je  $F$  vrsta kvara,  $N_{SPB}$  broj faza zahvaćenih naponskim propadom za sve sabirnice sustava,  $N_{TPB}$  ukupni broj faza svih sabirnica sustava.

García-Martínez [85] koriste matricu područja dosega nadziranja za određivanje optimalne lokacije i broja mjernih uređaja u IEEE 57 sabirničkom testnom sustavu, korištenjem algoritma za tabu pretraživanje (engl. Tabu Search algorithm). Koristili su simetrične i nesimetrične kratke spojeve s rasponom graničnog napona od 0,5 do 0,9 p.u.

Ostale metode optimizacije korištene za optimalan razmještaj mjernih uređaja u elektroenergetskom sustavu su: Metoda binarne optimizacije rojem čestica za određivanje optimalne lokacije i broja mjernih uređaja u prijenosnim i distribucijskim mrežama, uspješno je testirana na IEEE 30 i IEEE 69 sabirničkim testnim sustavima u [86]. Korištenje kvantum inspiriranog binarnog algoritma za gravitacijsko pretraživanje (engl. quantum-inspired binary gravitational search algorithm) za optimalnu lokaciju i broj mjernih uređaja testiran na distribucijskom sustavu od 69 sabirnica i prijenosnom sustavu od 118 sabirnica predloženo je u

[87]. Binarni algoritam krijesnica testiran na IEEE 118 sabirničkom testnom sustavu [88]. U [89] autori su koristili prilagodljivi kvantum-inspirirani binarni algoritam za gravitacijsko pretraživanje (engl. adaptive quantum-inspired binary gravitational search algorithm) te ga testirali na IEEE 69 i IEEE 118 sabirničkom testnom sustavu. Uspoređivanjem predloženog algoritma iz [89] s genetskim algoritmom iz [90], binarnom optimizacijom rojem čestica iz [86], kvantum inspiriranim binarnim algoritma za optimizaciju rojem čestica iz [91] binarnim algoritmom za gravitacijsko pretraživanje iz [87]. Autori zaključuju da predloženi algoritam daje bolja rješenja pri rješavanju problema optimalne lokacije i broja mjernih uređaja prema brzini računanja i točnosti u usporedbi s ostalim navedenim algoritmima.

Korištenje metode grananja i ograničavanja za rješavanje problema optimalnog smještaja i broja mjernih uređaja u IEEE 30 sabirničkom testnom sustavu, uzimajući u obzir indeks težine naponskih propada, predložen je u [92].

Binarni algoritam optimizacije rojem čestica korišten je za određivanje optimalne lokacije i broja mjernih uređaja na Brazilskom distribucijskom sustavu od 90 sabirnica i IEEE 34 sabirničkom sustavu. Autori su proveli analizu utjecaja smanjenja opterećenja, vrstu kvara i otpornost kvara (engl. fault resistance) na broj mjernih uređaja. Minimalni broj mjernih uređaja se nije mijenjao, ali mijenjao se njihov raspored na sabirnicama. Veći broj optimalnih rješenja kod kratkih spojeva je 136, dok je kod jednofaznih spojeva 80. Povećanje broja mjernih uređaja je uočeno kod smanjenja naponskog praga i kod ekspanzije IEEE 34 sabirničkog sustava [2].

Da bi sustav nadziranja bio učinkovit, on mora odgovoriti na tri pitanja [77] [78]

1. Koliko monitora treba instalirati?
2. Gdje treba instalirati monitore?
3. Koji napon praga treba postaviti?

Odgovor na prva dva pitanja dat će rješavanje problema optimizacije danog izrazom (6-3). Kao odgovor na treće pitanje u ovoj disertaciji koristi se definicija naponskog propada prema standardu EN 50160, gdje je naponski propad definiran kao kratkotrajno smanjenja nazivnog napona na vrijednost između 90 % i 1 %. Odabrani napon praga na kojem mjerač počinje mjeriti u ovoj doktorskoj disertaciji je 0,9 jedinične vrijednosti.

## 7. ODREĐIVANJE OPTIMALNE LOKACIJE MJERNIH UREĐAJA

Alternativni način opisivanja područja doseg monitora svih potencijalnih pozicija monitora je korištenje binarne matrice čija je veličina jednaka  $N$  sa  $F_p$ , gdje je  $v_{ij}$  unos napona matrice naponski propada kako je opisano u poglavlju 6. Algoritma šišmiša predložen od strane Yung [50] je superiornija metoda optimizacije kada se uspoređuje s algoritmima kao što su genetski algoritam i optimizacija rojem čestica. Međutim, originalni algoritam šišmiša ne može rješavati binarne probleme. Da bi se moglo algoritam šišmiša koristiti za rješavanje optimizacije binarnog problema optimalne lokacije i broja uređaja za mjerenje kvalitete električne energije, potrebno je koristiti binarnu verziju algoritma šišmiša koja je predložena od strane Mirjalili et al. u [93].

U binarnom algoritmu šišmiša, umjetni šišmiši istražuju i love plijen u binarnom prostoru, pretraživanja, mijenjajući poziciju od „0“ do „1“, što zahtjeva promjenu ažuriranja pozicije i brzine standardnog algoritma šišmiša. Zahtijevana promjena se može primijeniti uvođenjem prijenosne funkcije, koja će „prisiliti“ čestice da se kreću u binarnom prostoru. Zahtjevi koji se stavljaju pred prijenosnu funkciju utječu na njen odabir. Prema [93] najbolja prijenosna funkcija za rješavanje navedenog problema je V – prijenosna funkcija.

Postojeće prijenosne funkcije koje spadaju u familiju V prijenosnih funkcija dane su izrazima [94]:

$$T(x) = \left| \operatorname{erf} \left( \frac{\sqrt{\pi}}{2} x \right) \right| = \left| \frac{\sqrt{2}}{\pi} \int_0^{(\sqrt{\pi}/2)x} e^{-t^2} dt \right| \quad (7-1)$$

$$T(x) = |\tanh(x)| \quad (7-2)$$

$$T(x) = \left| \frac{x}{\sqrt{1+x^2}} \right| \quad (7-3)$$

$$T(x) = \left| \frac{2}{\pi} \arctan \left( \frac{\pi}{2} x \right) \right| \quad (7-4)$$

Autori u [93] za prijenosnu funkciju koja će se koristiti u binarnom algoritmu šišmiša, odabrali su funkciju V familije danu izrazom (7-4). Sada se korištena prijenosna funkcija V oblika može dati izrazom [93]

$$T(x) = \left| \frac{2}{\pi} \arctan \left( \frac{\pi}{2} v_i^k(t) \right) \right| \quad (7-5)$$

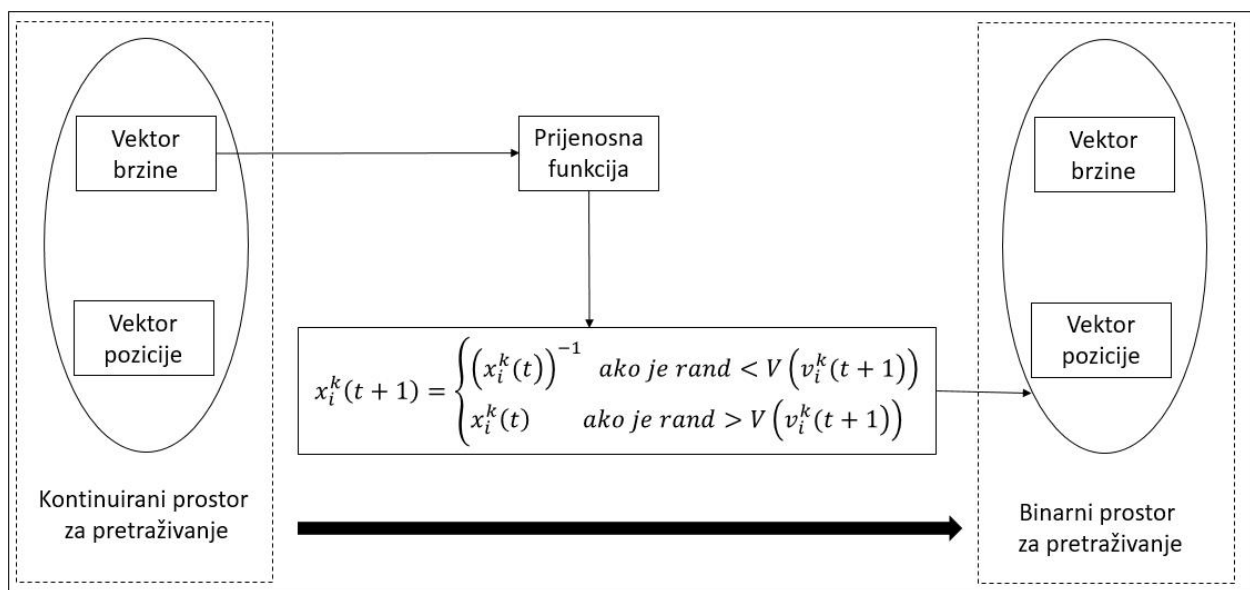
gdje je  $v_i^k(t)$  brzina  $i$ -te čestice pri iteraciji  $t$ .

Nova pravila za ažuriranje pozicije dana su izrazom [93].

$$x_i^k(t+1) = \begin{cases} (x_i^k(t))^{-1} & \text{ako je } rand < V(v_i^k(t+1)) \\ x_i^k(t) & \text{ako je } rand > V(v_i^k(t+1)) \end{cases} \quad (7-6)$$

gdje je  $x_i^k(t)$  pozicija  $i$ -te čestice pri iteraciji  $t$ .

Slika 7.1. prikazuje prisiljavanje čestica da se kreću u binarnom prostoru korištenjem prijenosne funkcije dnom izrazom (7-5) za vektor brzine i korištenjem izraza (7-6) umjesto izraza (4-13), (4-14) i (4-15) za ažuriranje pozicije i brzine.



Slika 7. 1. Prisiljavanje kretanja čestica u binarnom prostoru

Tablica 7. 1. Pseudo kod binarnog algoritma šišmiša [93]

Funkcija cilja  $f(x)$ ,  $x = (x_1, \dots, x_d)^T$

Inicijalizacija populacije šišmiša  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) =  $rand$  (0 ili 1) i  $v_i = 0$

Definiranje učestalosti pulsa  $f_i$  pri  $x_i$

Inicijalizacija brzine pulsa  $r_i$  i glasnoće  $A_i$

while ( $t <$  maksimalan broj iteracija)

Generiranje novih rješenja podešavanjem frekvencije i ažuriranjem brzine

Izračun prijenosne funkcije korištenjem izraza (7-5)

Ažuriranje pozicije korištenjem izraza (7-6)

if (slučajni broj  $> r_i$ )

Odabir rješenje između najboljih rješenja

Generiranje lokalnog rješenja oko odabranog najboljeg rješenja

end if

Generiranje novog rješenja nasumičnim letenjem

if (slučajni broj  $< A_i$  &  $f(x_i) < f(x_*)$ )

Prihvati novo rješenje

Povećaj  $r_i$  i smanji  $A_i$

end if

Označi najbolje i nađi trenutno najbolje rješenje  $x^*$

end while

---

## 7.1. Područja dosega monitora

Područje dosega monitora kreirano je simulacijom trofaznih i jednofaznih kratkih spojeva na IEEE 39 sabirničkom testnom sustavu opisanom u poglavlju 3 ove disertacije po normi IEC 60909. Za matricu područja dosega monitora, koja je korištena u ovoj disertaciji kao područje pretraživanja binarnom algoritmu šišmiša, korišteni su samo kratki spojevi na sabirnicama, a utjecaj kvarova na vodovima, dodan je preko težinskog koeficijenta izloženog područja opisan u poglavlju 5 ove doktorske disertacije.

Razvijen je python kôd koji je korišten za simulaciju kratkih spojeva na svakih 1 % vodova IEEE 39 sabirničkog sustava. Navedeni rezultati su korišteni za kreiranje matrice područja dosega nadziranja, koje će se riješiti primjenom GNU kompleta za linearno programiranje (engl. GNU Linear Programming Kit - GLPK). GLPK je skup rutina zapisanih u programskom jeziku ANSI C i organiziran u obliku biblioteke koja se može pozvati. Namijenjen je rješavanju linearnog programiranja (engl. Linear programming), mješovitog cjelobrojnog programiranja (engl. mixed integer programming) i drugih srodnih problema [95].





Tablica 7. 2. Dio sabirnica sustava IEEE 39 sabirničkog testnog sustava i preostali naponi prema IEC 60909 normi ovisno o mjestu kratkog spoja.

Sabirnice										
KS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,00	0,83	0,93	1,00	1,02	1,03	1,02	1,02	1,02	1,03
2	0,66	0,00	0,41	0,72	0,83	0,85	0,86	0,86	0,98	0,86
3	0,87	0,52	0,00	0,51	0,69	0,72	0,73	0,74	0,94	0,73
4	0,97	0,80	0,54	0,00	0,36	0,42	0,44	0,45	0,82	0,47
5	0,99	0,88	0,69	0,33	0,00	0,11	0,13	0,14	0,69	0,38
6	1,00	0,88	0,70	0,35	0,07	0,00	0,09	0,13	0,68	0,32
7	1,02	0,94	0,80	0,54	0,32	0,32	0,00	0,14	0,69	0,54
8	1,01	0,93	0,80	0,53	0,30	0,33	0,11	0,00	0,63	0,54
9	1,02	1,03	0,98	0,88	0,80	0,81	0,73	0,69	0,00	0,89
10	1,01	0,91	0,75	0,46	0,40	0,37	0,42	0,45	0,82	0,00
11	1,01	0,91	0,75	0,46	0,34	0,30	0,36	0,39	0,80	0,16
12	1,06	1,02	0,95	0,83	0,80	0,79	0,81	0,82	0,98	0,70
13	1,01	0,90	0,74	0,46	0,46	0,45	0,49	0,51	0,85	0,18
14	0,99	0,86	0,66	0,34	0,48	0,50	0,53	0,54	0,86	0,38
15	1,01	0,88	0,73	0,66	0,75	0,76	0,78	0,79	0,96	0,71

Tablica 7. 3. Binarna matrica tablice 7.2.

Sabirnice										
KS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
4	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
8	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
9	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
10	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
11	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
12	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1
13	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
14	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1

Formiranjem matrice područja dosega nadziranja mjernih uređaja, potrebno je odrediti težinske koeficijente izloženog područja. Za određivanje navedenih koeficijenata, korišteni su rezultati simulacije kratkih spojeva na svakih 1% dužine voda.

Tablica dana u prilogu A prikazuje proračun koeficijenta izloženog područja za sabirnicu 1 kod trofaznih kratkih spojeva. U tablici  $k$  predstavlja sabirnicu od koje se gleda dužina voda,  $j$  sabirnicu do koje se gleda.

Stvarni naziv voda preuzet je iz IEEE 39 sabirničkog testnog sustava, kao i dužine vodova, gdje je ukupna dužina vodova sustava jednaka 2383,56 km. Sljedeći stupac u tablici predstavlja postotak, odnosno na koliko posto voda, ukoliko dođe do kvara, će napon na promatranj sabirnici biti niži od postavljenog graničnog napona. Zadnji stupac predstavlja dužinu vodova izloženog područja, za sabirnicu 1 ona iznosi 430,14 km.

Težinski koeficijent se dobije prema izrazu (5-3) opisanom u poglavlju 5 ove disertacije i za sabirnicu jedan iznosi 0,18. Vrijednost 100 % znači da će kod pojave trofaznog kratkog spoja duž navedenog voda, napon na sabirnici 1 uvijek biti niži od postavljene granične vrijednosti napona. Isti proračun proveden je za sve sabirnice testnog sustava. Tablica 7.4. prikazuje težinske koeficijente izloženog područja za sve sabirnice IEEE 39 sabirničkog sustava kod trofaznog kratkog spoja.

Tablica 7. 4. Težinske koeficijente izloženog područja za sve sabirnice IEEE 39 sabirničkog sustava kod trofaznog kratkog spoja.

<b>Sabirnice</b>									
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
Težinski koeficijent izloženog područja									
0,18	0,53	0,67	0,56	0,48	0,47	0,46	0,46	0,27	0,44
<b>Sabirnice</b>									
<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>
Težinski koeficijent izloženog područja									
0,46	0,46	0,48	0,58	0,58	0,61	0,70	0,67	0,31	0,20
<b>Sabirnice</b>									
<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>28</b>	<b>29</b>	<b>30</b>
Težinski koeficijent izloženog područja									
0,49	0,35	0,35	0,57	0,49	0,66	0,76	0,45	0,41	0,15
<b>Sabirnice</b>									
<b>31</b>	<b>32</b>	<b>33</b>	<b>34</b>	<b>35</b>	<b>36</b>	<b>37</b>	<b>38</b>	<b>39</b>	
Težinski koeficijent izloženog područja									
0,23	0,24	0,13	0,08	0,21	0,16	0,17	0,25	0,03	

Što je manji broj težinskog koeficijenta izloženog područja, to znači da je sabirnica robusnija, odnosno da će kvar na malom postotku dužine vodova izazvati preostali napon na sabirnici niži od određenog graničnog napona 0,9 p.u. Robusnost sabirnice uvelike ovisi o

konfiguraciji mreže. Ako se iz tablice izdvoji sabirnica 39 s najmanjim težinskim koeficijentom izloženog područja 0,03, objašnjenje se može naći u poglavlju 3 ove doktorske disertacije, gdje je navedeno da generator spojen na sabirnicu 39 predstavlja spoj s drugim prijenosnim sustavima (terminal). Za sabirnicu 27 s najvećim težinskim koeficijentom izloženog područja 0,76, također se može naći odgovor u poglavlju 3, razmatranjem konfiguracije IEEE 39 sabirničkog sustava. Naime, spomenuta sabirnica se nalazi skoro u sredini sustava, na sebi ima priključeno opterećenje  $P = 281 \text{ MW}$  i  $Q = 75,5 \text{ Mvar}$ . Sabirnice koje joj spadaju u električno susjedstvo na sebi ne sadrže generatore, nego su tek preko vodova spojene na sabirnice svog električnog susjedstva, koje na sebi imaju generatore.

Nakon određivanja matrice područja dosega monitora svih potencijalnih pozicija monitora i koeficijenta izloženog područja, potrebno je odrediti funkciju cilja. Kako se treba odrediti optimalan broj mjernih uređaja, biti će potrebno minimizirati funkciju cilja. U ovoj disertaciji unaprijedit će se funkcija cilja iz [70] jer se funkcija cilja u navedenom radu ne može koristiti za optimalnu lokaciju uređaja za mjerenje naponskih propada korištenjem područja dosega mjernih uređaja.

U navodnom članku koriste se fazorski mjerni uređaji (engl. Phasor Measuring Units), uređaji koji mjere fazore napona i struje sabirnice te sinkroniziraju mjerenja s vremenskim signalom primljenim iz Globalnog sustava pozicije (engl. Global position system) kod kojih se matrica povezanosti gradi na principu da mjerni uređaj na promatranoj sabirnici samo obuhvaća njeno električno susjedstvo [70].

Funkcija cilja

$$\text{Min} \sum_{j=1}^N C_j x_j \quad (7-10)$$

Ograničenja

$$AX \geq B \quad (7-11)$$

$C_j$  definira se kao koeficijent PMU-a instaliran na sabirnici "j" u mreži,  $B = [1 \ 1 \ 1 \ \dots \ 1]_{n \times 1}^T$ ,

$X = [x_1, x_2, x_3 \dots x_n]^T$  je binarno promjenjiva matrica u kojoj  $x_j$  je binarna varijabla odlučivanja dana izrazom:

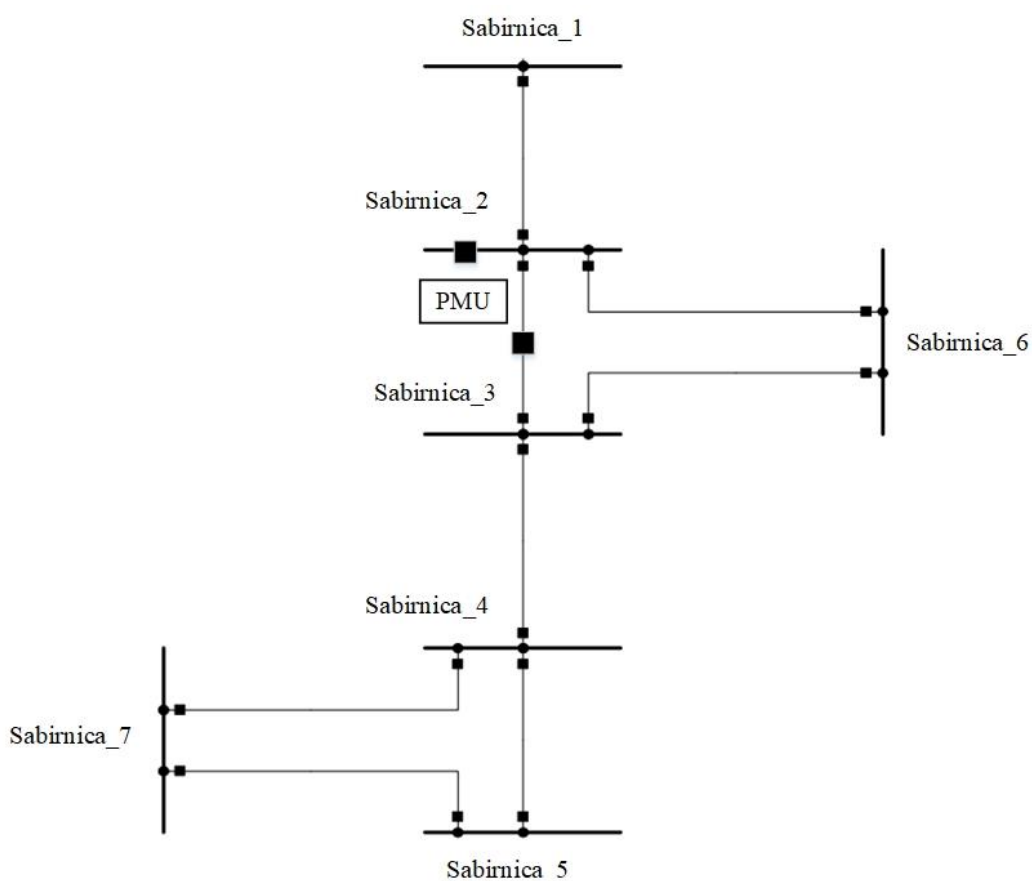
$$x_j = \begin{cases} 1, & \text{PMU instaliran na sabirnici } j \\ 0, & \text{nije instaliran} \end{cases} \quad (7-12)$$

A je matrica učestalosti sabirnice, koja opisuje povezanost sabirnica u mreži [70].

$$A_{j,k} = \begin{cases} 1, & \text{ako je } j = k \text{ ili su spojene} \\ 0, & \text{suprotno} \end{cases} \quad (7-13)$$

Matrica povezanosti može se najjednostavnije objasniti na primjeru sustava od 7 sabirnica prikazanim slikom 7.2 [71]. Gdje su fazorski mjerni uređaji spojeni na sabirnicu 2 i na vod 2-3. Matrica povezanosti za navedeni sustav može se prikazati izrazom (7-14).

$$T_{PMU} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7-14)$$



Slika 7. 2. Sustav sedam sabirnica i dva fazorska mjerna uređaja.

Razlika između MRA matrice i matrice povezanosti može se uočiti usporedbom ako se promotri Testni sustav slika (3-1) u poglavlju 3 ove disertacije. Na primjer, uzme li se sabirnica 3 u matrici povezanosti, samo bi sabirnice 2, 3, 4 i 18 imale vrijednost 1, jer su povezane vodovima.

Kod MRA matrice za napon praga 0,9 p.u., sabirnice koje će na sabirnici 3 izazvati napon niži od napona praga (0,9 p.u.) kod trofaznog kratkog spoja, prikazane su u tablici 7.5.

Tablica 7. 5. Područje dosega nadziranja mjernog uređaja na sabirnici 3 za granični napon 0,9 p.u.

Sabirnice	Bus 2	Bus 3	Bus 4	Bus 5	Bus 6
U na Bus 3	0,41	0,00	0,54	0,69	0,70
Sabirnice	Bus 7	Bus 8	Bus 10	Bus 11	Bus 13
U na Bus 3	0,80	0,80	0,75	0,75	0,74
Sabirnice	Bus 14	Bus 15	Bus 16	Bus 17	Bus 18
U na Bus 3	0,66	0,73	0,59	0,51	0,42
Sabirnice	Bus 19	Bus 21	Bus 22	Bus 23	Bus 24
U na Bus 3	0,88	0,83	0,88	0,90	0,75
Sabirnice	Bus 25	Bus 26	Bus 27	Bus 30	Bus 37
U na Bus 3	0,66	0,80	0,76	0,78	0,89

Ukupan broj sabirnica koje će imati vrijednost 1 u MRA matrici je 25 sabirnica, što je znatno više od broja sabirnica u matrici povezanosti. Također u [70] autori koriste koeficijent koji uvode kao dodatak težine grane od 0.1 p.u, gdje broj susjednih sabirnica, koje se preko voda spajaju na promatranom sabirnicom, množe s 0,1. U ovoj disertaciji je korišten težinski faktor izloženog područja predložen u [1]. Također postoji razlika između funkcije cilja u [70] i funkcije cilja u ovoj disertaciji.

Funkcija cilja korištena u ovoj disertaciji dana je izrazom:

$$\text{Min} \left( \sum_{j=1}^N x_j + \sum_{j=1}^N x_j \cdot k_j \right) \quad (7-15)$$

gdje je  $x_j$ - Sabirnica sustava (ima vrijednost 0 ili 1),  $k_j$ - koeficijent izloženog područja ( $1 * k_j$ ).

S ograničenjima danim izrazom

$$\sum_{i=1}^N mra_{ij} \cdot x_i \geq b_j \quad (7-16)$$

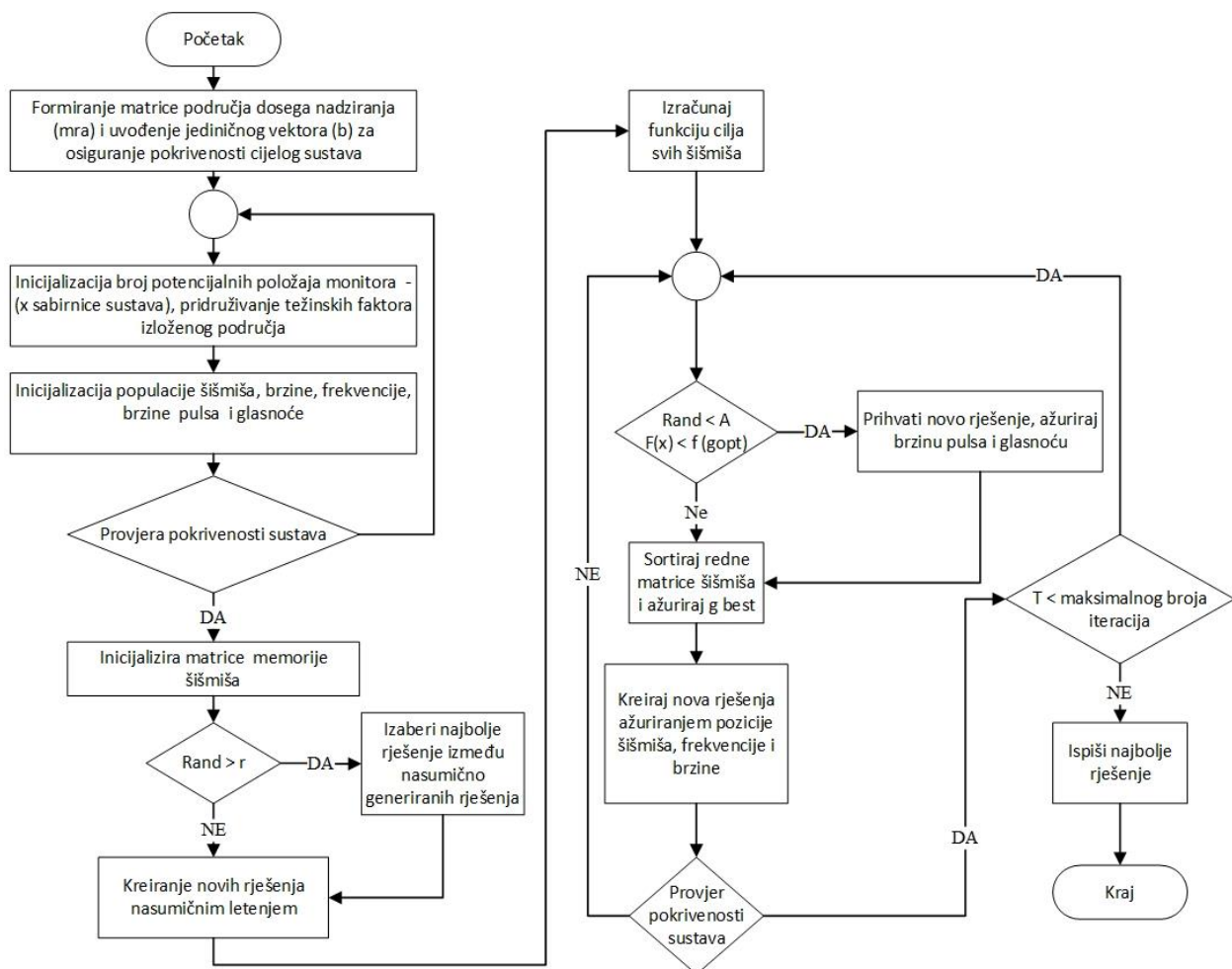
$N$  je broj potencijalnih položaja monitora (sabirnice sustava),  $mra_{ij}$  matrica kvarova,  $b_j$  je  $j$ -ti ulaz desnog vektora  $b$  (jedinični vektor), koji osigurava da je svaki kvar zahvaćen barem jednim mjernim uređajem, drugim riječima, osigurava pokrivenost cijelog sustava.

Vektor rješenja je vektor  $x_1 + x_2 + \dots + x_n$  gdje  $n$  predstavlja broj sabirnica sustava, koji može biti samo binarni broj (1 ili 0).

Redni vektori veličine populacije koji zadovoljavaju ograničenja su raspoređena u matricu koja inicijalizira memoriju šišmiša, a prikazana je izrazom (7-17) [70].

$$BM = \begin{pmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_{n-1}^1 & x_n^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_{n-1}^2 & x_n^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_1^{p-1} & x_2^{p-1} & \dots & x_{n-1}^{p-1} & x_n^{p-1} \\ x_1^p & x_2^p & \dots & x_{n-1}^p & x_n^p \end{pmatrix} \quad (7-17)$$

U ovoj disertaciji se koristi prijenosna funkcija i pravila za kretanje virtualnih šišmiša objašnjeni u poglavlju 7. Algoritam šišmiša razvijen je u Matlabu. Nakon formiranja matrice područja doseg nadziranja nadziranja monitora iz podataka o preostalim naponima na sabirnicama uslijed kratkih spojeva simuliranih u DigSilent PowerFactory, formira se binarna matrica MRA prema izrazu (6-1). Također se uvodi jedinični vektor  $b$  koji osigurava da će svaki kvar biti detektiran barem jednim uređajem za mjerenje naponskih propada odnosno, osigurava pokrivenosti cijelog sustava.



Slika 7. 3. Dijagram toka unaprijeđenog binarnog algoritma šišmiša.

U sljedećem koraku nasumično se postavljaju uređaji za mjerenje naponskih propada na sabirnice sustava i pridružuju im se težinski koeficijenti izloženog područja dobiveni izrazom (5-3). Slijedi inicijalizacija populacije šišmiša, gdje im se prilagođava frekvencija emitiranja pulsa i glasnoća. Nakon navedenih koraka izvođenja algoritma, provjerava se pokrivenost sustava, odnosno da li su ispunjena ograničenja koja osiguravaju pokrivenost svakog kvara u sustavu, koji su simulirani u programu DigSilent. Ukoliko nije ostvarena pokrivenost cijelog sustava, algoritam se vraća na korak nasumičnog postavljanja uređaja za mjerenje naponskih propada na sabirnice sustava. Ukoliko je ostvarena pokrivenost sustava, algoritam nastavlja s potragom optimalnog rješenja, odnosno minimizacije funkcije cilja i inicijalizira se matrica memorije šišmiša, kako bi se prijašnja najbolja rješenja mogla uspoređivati s novim rješenjima generiranim nasumičnim letenjem i pretraživanjem binarnog prostora rješenja ostvareno pomoću izraza (7-5) i (7-6).

Nakon inicijalizacije matrice memorije šišmiša, kreirana rješenja s nasumičnim letenjem uspoređuju se s postojećim rješenjima u memoriji šišmiša. Ukoliko je brzina pulsa na novoj poziciji šišmiša veća, odabiru se najbolja rješenja između nasumično generiranih i nastavljaju se kreirati nova rješenja nasumičnim letenjem. U sljedećem koraku računa se funkcija cilja svih šišmiša. Funkcije cilja se uspoređuju prema glasnoći šišmiša i samim vrijednostima funkcije cilja. Kako je već spomenuto u potpoglavlju 4.2., kada šišmiš otkrije plijen, on smanjuje glasnoću i povećava frekvenciju pulsa.

Ukoliko su nova rješenja bolja, ona se prihvaćaju i ažurira se najbolje rješenje. U suprotnome, zadržava se prijašnje najbolje rješenje i sortira se redna matrica šišmiša. Kreiraju se nova rješenja podešavanjem pozicije, frekvencija pulsa i brzine šišmiša. U sljedećem koraku provjerava se pokrivenost sustava, ukoliko su uvjeti ispunjeni provjerava se da li je dostignut određeni maksimalni broj iteracija. Ako nije dostignut maksimalni broj iteracija, novo kreirana rješenja se uspoređuju s rješenjima u matrici memorije šišmiša gdje se provjeravaju s obzirom na glasnoću i vrijednost funkcije cilja. Ukoliko je dostignut maksimalan broj iteracija, ispisuje se najbolje rješenje.

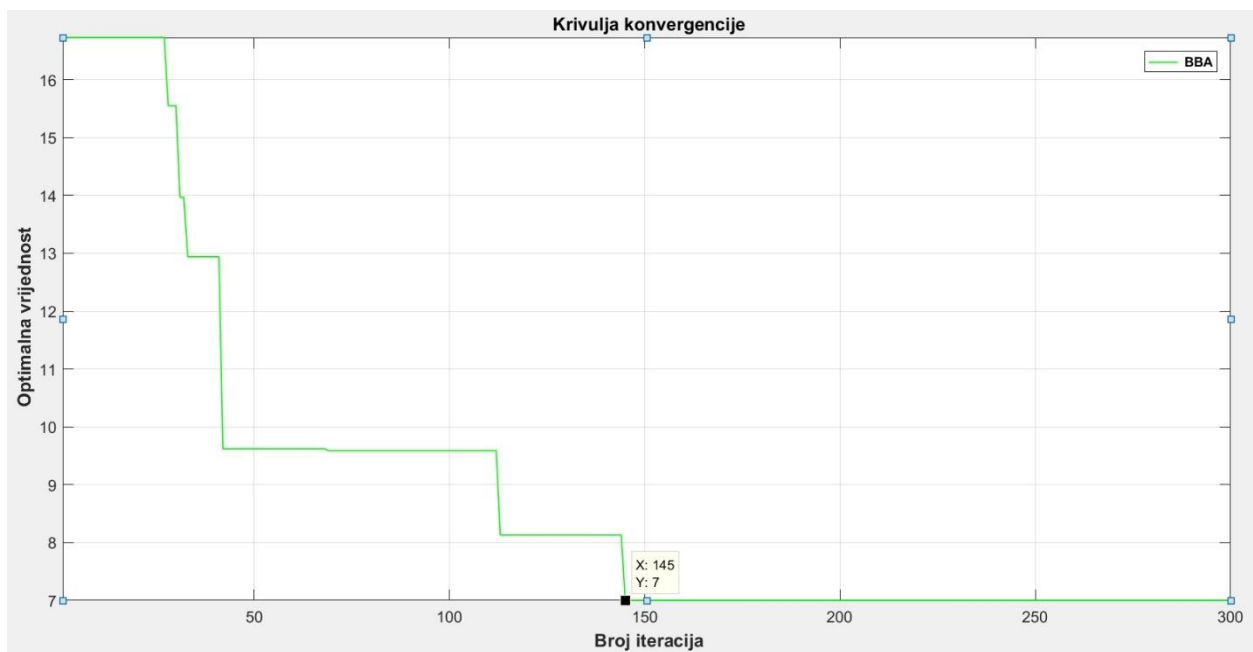
Slika 7.4. prikazuje krivulju konvergencije. Na Y osi je optimalna vrijednost u određenom koraku iteracije, koji se nalazi na X osi. Maksimalni broj iteracija je 300, nakon kojeg se simulacija završava i dobiva se ispis rješenja.

U prvih 27 iteracija vrijednost funkcije cilja iznosi 16,37, nakon čega se smanjuje na 15,55 u 28 do 30 koraka iteracije. Nakon 30-og koraka iteracije vrijednost se smanjuje na 13,97 i



algoritam zadržava tu vrijednost kao optimalno rješenje unutra dvije iteracije. U 33 iteraciji minimalan vrijednost funkcije cilja postaje 12,94.

Nakon 42 koraka iteracije vrijednost funkcije cilja se značajno smanjuje i poprima vrijednost 9,62. Do 112. koraka iteracije ta se vrijednost neznatno mijenja na 9,59, a zatim pada na 8,13 sve do 144 koraka iteracije. Konačno u 145 koraku iteracije, minimalna vrijednost funkcije cilja postaje 7, što i je njena optimalna vrijednost. Navedena vrijednost zadržana je sve do zadnjeg (300.) koraka iteracije.



Slika 7. 4. Krivulja konvergencije za trofazni kratki spoj

Tablica 7.6. prikazuje usporedbu rješenja za optimalan razmještaj i broj uređaja za mjerenje kvalitete električne energije kod trofaznog kratkog spoja, dobivenih s unaprijeđenim binarnim algoritmom šišmiša i GLPK opisanim u poglavlju 7.1. Za rješavanje problema intimizacije funkcije cilja u GLPK korišteno je 3405 trofaznih kratkih spojeva na sabirnicama i vodovima za kreiranje ograničenja kod određivanja optimalne vrijednosti funkcije cilja.

Tablica 7. 6. Usporedba rješenja za optimalan razmještaj i broj uređaja za mjerenje naponskih propada kod trofaznih kratkih spojeva.

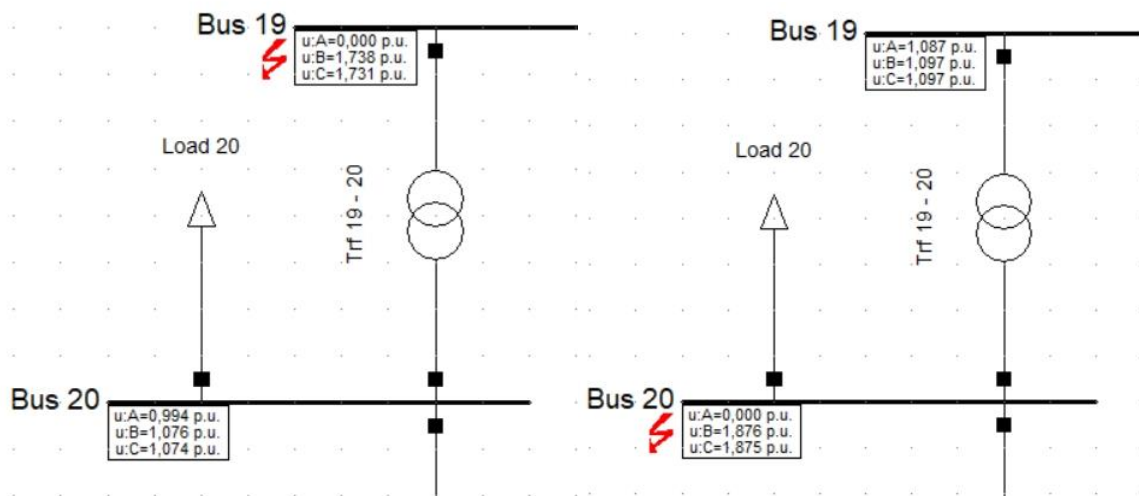
Binarni algoritam šišmiša		GLPK
Sabirnica	Težinski koeficijent	Sabirnica
2	0,53	2
6	0,47	8
27	0,76	20
34	0,08	27
36	0,16	36
Ukupni težinski koeficijent	2	-

Iz tablice 7.6. može se vidjeti da je optimalan broj uređaja za mjerenje kvalitete električne energije pet. Ukupni težinski koeficijent izloženog područja iznosi dva i svaka sabirnica može imati samo binarne vrijednosti (1 ili 0), ukoliko je instaliran mjerni uređaj na sabirnici, ona ima vrijednost jedan. Kako je ukupno pet sabirnica i ukupni težinski faktor vrijednosti dva, tako funkcija cilja ima vrijednost sedam.

Kako je već opisano, prema [80], problem optimizacije određivanja optimalne lokacije i broja mjernih uređaja za mjerenje naponskih propada može imati više rješenja. Minimalni broj mjernih uređaja može biti raspoređen unutar sustava na različitim kombinacijama sabirnica zadovoljavajući ograničenja. Drugim riječima, u prostoru rješenja postoje više optimalnih rješenja, koja daju iste vrijednosti funkcije cilja. GLPK ima mogućnost odabira sabirnica na kojima moraju biti instalirani mjerni uređaji. Uvrštavanjem mjernih uređaja na sabirnice dobivene razvijenim algoritmom šišmiša, rezultati simulacije u GLPK potvrđuju da je algoritam šišmiša pronašao jedno od optimalnih rješenja u prostoru pretraživanja te s minimalnim brojem mjernih uređaja može se postići pokrivenost cijelog sustava. Optimalan razmještaj mjernih uređaja kod jednofaznih kratkih spojeva

Kod jednofaznih kratkih spojeva, utjecaj ima spoj transformatora, kako je opisano u poglavlju 2.7. Naime, pojavom jednofaznog kratkog spoja na visokonaponskoj razini kod spoja transformatora YNy, naponski propad se neće pojaviti na niskonaponskoj razini. Također kod navedenog spoja transformatora, pojava kratkog spoja na niskonaponskoj razini neće prouzročiti pojavu naponskog propada na visokonaponskoj razini. Slika 7.5. prikazuje simulacije jednofaznog

kratkog spoja na sabirnici 19 spojenom na primarnu stranu transformatora Trf 19 – 20 i jednofazni kratki spoj na sabirnici 20, spojenoj na sekundarnu stranu navedenog transformatora.



Slika 7. 5. Jednofazni kratki spoj na sabirnici 19 (lijevo) i sabirnici 20 (desno)

Iz slike 7.5. može se vidjeti da kod sabirnica spojenih transformatorom u spoju YNy, naponski propad neće nastati na drugoj strani transformatora, bez obzira dogodio se jednofazni kratki spoj na primarnoj ili sekundarnoj strani.

Ova pojava će utjecati na optimalan broj uređaja za mjerenje kvalitete električne energije, kako bi se zadovoljilo prva dva pitanja, koja su opisana u poglavlju 6 ove doktorske disertacije, na koje je potrebno dati odgovor da bi cijeli sustav bio pokriven. Da bi se zadovoljila pokrivenost sustava, na sve sabirnice koje su spojene na sekundarnu stranu transformatora morat će se instalirati mjerni uređaj, kako bi se mogla detektirati pojava naponskog propada na sabirnici.

Tablica 7.7. prikazuje težinske koeficijente izloženog područja kod jednofaznog kratkog spoja. Iz tablice se može zaključiti da kod pojave jednofaznog kratkog spoja, za jediničnu graničnu vrijednosti napona 0,9, sabirnice imaju jednaku osjetljivost, odnosno, izložena područja su jednaka i iznose 0,83 ili 83 %. Dok sabirnice 12, 20 i 30 do 38 imaju težinski koeficijent izloženog područja jednak 0 i označenu su zelenom bojom u tablici 7.7.

Razlog tome se može vidjeti na slici 7.5. Gdje pojava kratkog spoja na primarnoj strani transformatora neće izazvati naponski propad na sekundarnoj strani transformatora i obrnuto.

Navedene sabirnice su naponskih razina 230 kV (sabirnica 20), 128 kV (sabirnica 12), 16,5 kV (sabirnice 30 - 38). Da bi se postigla obuhvaćenost cijelog sustava s mjernim uređajima, odnosno, da bi se mogla detektirati pojava kvara na bilo kojem dijelu testnog sustava, biti će potrebno instalirati uređaje za mjerenje kvalitete električne energije na navedene sabirnice sustava.

Tablica 7. 7. Težinski koeficijenti izloženog područja IEEE 39 sabirničkog sustava kod jednofaznog kratkog spoja za naponski prag 0,9 p.u.

Sabirnice									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Težinski koeficijent izloženog područja									
0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83
Sabirnice									
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Težinski koeficijent izloženog područja									
0,83	0	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0
Sabirnice									
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Težinski koeficijent izloženog područja									
0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0
Sabirnice									
31	32	33	34	35	36	37	38	39	
Težinski koeficijent izloženog područja									
0	0	0	0	0	0	0	0	0,83	

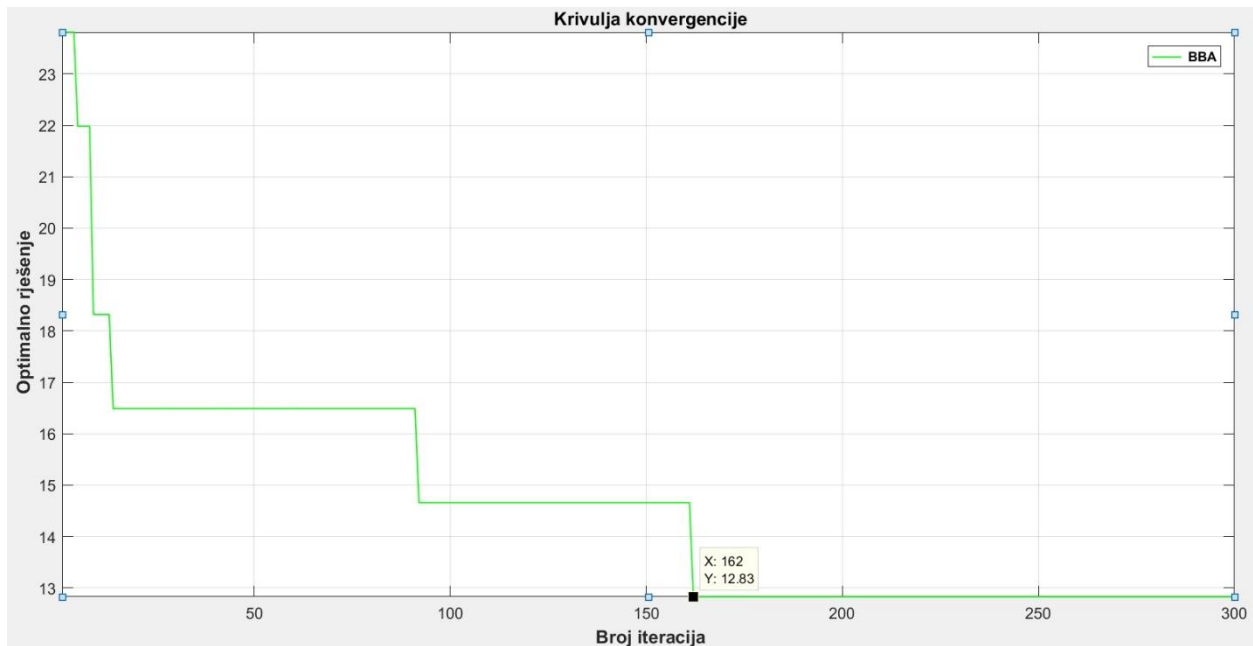
Slika 7.6. prikazuje pretraživanje prostora rješenja korištenjem razvijenog algoritma šišmiša. U prve 4 iteracije, optimalna vrijednost funkcije iznosi 23,81. od 5 do 8 iteracije, vrijednost se smanjuje na 21,98. do 13 koraka iteracije ta vrijednost se smanjuje na 18,32, zatim do 16,49 i tu vrijednost zadržava sve do 91 iteracije.

Nakon toga se algoritam šišmiša približava optimalnom rješenju određivanjem minimalne vrijednosti funkcije cilja 14,66 koju zadržava kao optimalnu vrijednost kroz 69 iteracija, ali u 163 iteracija pronalazi bolje rješenje 12,83 i odbacuje prijašnje staro rješenje. Optimalno rješenje funkcije je 12,83, a uređaji za mjerenje kvalitete električne energije su raspoređeni na sabirnice 12, 20, 25, 30-38.

Kod optimalnog razmještaja dobivenog binarnim algoritmom šišmiša, samo sabirnica 25 ima težinski koeficijent 0,83, a ostale sabirnice imaju težinski koeficijent izloženog područja 0, što je već objašnjeno.

Kako sabirnice mogu imati samo binarne vrijednosti (0 ili 1), ako je uređaj za mjerenje kvalitete električne energije instaliran na sabirnicu, to znači da ona ima vrijednost 1. Kako je potrebno 12 mjernih uređaja na dvanaest sabirnica i jedna od njih ima vrijednost težinskog

koeficijenta 0,83 dok ostale imaju 0, minimalna vrijednost funkcije cilja je zbroj sabirnica na kojima se nalaze instalirani uređaji za mjerenje kvalitete električne energije i njihovi koeficijenti, optimalna vrijednost funkcije je 12,83.



Slika 7. 6. Krivulja konvergencije kod jednofaznih kratkih spojeva.

Tablica 7.8. prikazuje usporedbu rješenja dobivenih razvijenim algoritmom šišmiša i GLPK. Uvrštavanjem da sabirnice moraju biti raspoređene kako je dobiveno razvijenim algoritmom šišmiša, GLPK potvrđuje da je dobiveni razmještaj uređaja za mjerenje kvalitete električne energije optimalan, zadovoljavajući razmještaj i minimalni broj potrebnih uređaja. Korišteno je 3369 jednofaznih kratkih spojeva na sabirnicama i vodovima. Isto kao i kod trofaznih kratkih spojeva može se uočiti razlika u sabirnicama na koje treba instalirati mjerne uređaje kod pojave jednofaznih kratkih spojeva. Kako je već navedeno prema [80] u prostoru pretraživanja postoje više optimalnih rješenja koja zadovoljavaju dana ograničenja i postižu minimum funkcije cilja. Stavljanjem mjernih uređaja na sabirnice dobivene u optimalnom rješenju od strane algoritma šišmiša i uvrštavanjem u GLPK, potvrđeno je da je razvijeni algoritam šišmiša pronašao jedno od optimalnih rješenja rasporeda mjernih uređaja uz ostvarivanje pokrivenosti cijelog sustava.

Tablica 7. 8. Usporedba rješenja za optimalan razmještaj i broj uređaja za mjerenje naponskih propada kod jednofaznih kratkih spojeva.

Binarni algoritam šišmiša		GLPK
Sabirnica	Težinski koeficijent	Sabirnica
12	0	12
20	0	20
25	0,83	30
30	0	31
31	0	32
32	0	33
33	0	34
34	0	35
35	0	36
36	0	37
37	0	38
38	0	39
Ukupni težinski koeficijent	0,83	

### 7.3. Optimalan razmještaj i broj mjernih uređaja za otkrivanje naponskih propada kod trofaznih i jednofaznih kratkih spojeva

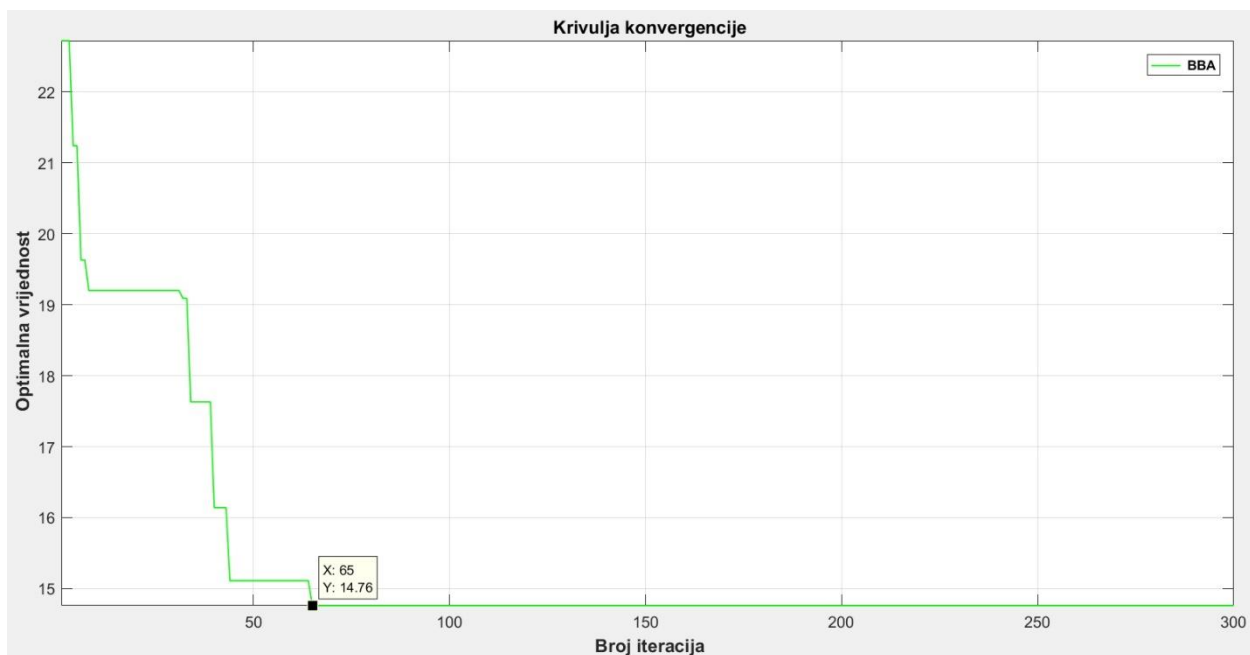
Za kreiranje prostora pretraživanja korišteni su trofazni i jednofazni kratki spojevi. Cilj je određivanje optimalnog razmještaja mjernih uređaja za mjerenje kvalitete električne energije za pokrivanje cijelog sustava kod pojave jednofaznih i trofaznih kratkih spojeve. Tablica 7.9. prikazuje težinske koeficijente izloženog područja. Uzete su najniže vrijednosti trofaznih i jednofaznih težinskih koeficijenata izloženog područja.

Tablica 7. 9. Težinski koeficijenti izloženog područja kod jednofaznih i trofaznih kratkih spojeva.

<b>Sabirnice</b>									
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
Težinski koeficijent izloženog područja									
0,18	0,53	0,67	0,56	0,48	0,47	0,46	0,46	0,27	0,44
<b>Sabirnice</b>									
<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>
Težinski koeficijent izloženog područja									
0,46	0	0,48	0,58	0,58	0,61	0,7	0,67	0,31	0
<b>Sabirnice</b>									
<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>28</b>	<b>29</b>	<b>30</b>
Težinski koeficijent izloženog područja									
0,49	0,35	0,35	0,57	0,49	0,66	0,76	0,45	0,41	0
<b>Sabirnice</b>									
<b>31</b>	<b>32</b>	<b>33</b>	<b>34</b>	<b>35</b>	<b>36</b>	<b>37</b>	<b>38</b>	<b>39</b>	
Težinski koeficijent izloženog područja									
0	0	0	0	0	0	0	0	0,03	

Slika 7.7. prikazuje krivulju konvergencije kod korištenje jednofaznih i trofaznih kratkih spojeva. U prve tri iteracije vrijednost funkcije je 22,72, od četvrte do pete iteracije vrijednost se smanjuje na 21,24. Vrijednost se nastavlja dalje smanjivati sve do 65 iteracije, kada 14,76 ostaje kao optimalno rješenje kroz sve iteracije do kraja.

Ukupno 14 sabirnica u zbroju s težinskim koeficijentima izloženosti formira vrijednost funkcije cilja 14,76. Uvrštavanjem u GLPK potvrđuje se točnost dobivenih rješenja. Međutim, korištenjem 6774 kratkih spojeva (jednofaznih i trofaznih) na različitim mjestima vodova i na sabirnicama, u GLPK dobije se da je 13 optimalan broj mjernih uređaja potrebnih za pokrivanje cijelog sustava.



Slika 7. 7. Krivulja konvergencije za jednofazne i trofazne kratke spojeve.

Tablica 7. 10. Usporedba rezultata optimalnog broja i lokacije mjernih uređaja.

Binarni algoritam šišmiša		GLPK
Sabirnica	Težinski koeficijent	Sabirnica
1	0,18	2
9	0,27	6
12	0	12
19	0,31	20
20	0	30
30	0	31
31	0	32
32	0	33
33	0	34
34	0	35
35	0	36
36	0	37
37	0	38
38	0	-
Ukupni težinski koeficijent	0,76	-



Kod rješavanja problema optimizacije, ne postoji metoda koja će uvijek pronaći optimalno rješenje za svaki problem. Većina optimizacijskih problema u stvarnom svijetu su kompleksni, što utječe na neprimjenjivost egzaktnih metoda za njihovo rješavanje, kako je već spomenuto u poglavlju 4 ove doktorske disertacije. Kod velikih i složenih problema, koriste se heurističke metode, koje ne pronalaze uvijek točno optimalno rješenje, ali daju gotovo optimalnog rješenja na računski učinkovit način [23] [96].

## 8. ODREĐIVANJE MJESTA KVARA

Klasifikacija je jedan od glavnih problema u strojnom učenju. Model predviđanja nazvan stablo odlučivanja predstavlja široko primijenjenu metodu za rješavanje navedenog problema. Metoda stabla odlučivanja može biti predstavljena pomoću grafa, gdje se klasična konstrukcija stabla odlučivanja provodi pomoću statističkih metoda. Osnovna podjela strojnog učenja je nenadzirano i nadzirano učenje, gdje je klasifikacija jedna od grana nadziranog učenja.

### 8.1. Nadzirana klasifikacija

U nadziranoj klasifikaciji dobiva se skup uzoraka. Ovaj skup se sastoji od  $n$  promatranja, koja se također nazivaju i objekti ili uzorci.

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n\} \quad (8-1)$$

Svako od opažanja  $x_i$  opisano je s atributima  $m$ , koji se nazivaju i značajkama  $a_1, a_2, \dots, a_m$ ,  $a_j \in A_j, j = 1, \dots, m$ , gdje  $A_j$  označava domenu  $j$ -tog atributa. Na ovaj način  $a_1, a_2, \dots, a_m$  formiraju prostor značajki  $A_1 \times A_2 \times \dots \times A_m$ . Vrijednosti tih atributa mogu biti kvantitativne (npr. cijena) ili kategorične (na primjer, vrijeme: "kišno" ili "sunčano"). Svako promatranje pripada jednoj od  $C$  različitih i poznatih klasa odlučivanja, koja se mogu prikazati izrazom.

$$x_i = (V_i, c_i), v_i^j \in A_j, c_i \in \{1, \dots, C\} \quad (8-2)$$

Gdje je  $V_i = [v_i^1, \dots, v_i^m]$  vektor u  $m$ -dimenzionalnom prostoru značajki,  $v_i^j$  je vrijednost atributa  $A_j$  za promatranje (objekt)  $x_i$  i  $c_i$  je oznaka klase (koja se naziva i klasa odlučivanja) promatranja objekta  $x_i$ . Prema tome,  $X$  se može dati izrazom.

$$X : \{(V_i, c_i)\}_{i=1}^n \quad (8-3)$$

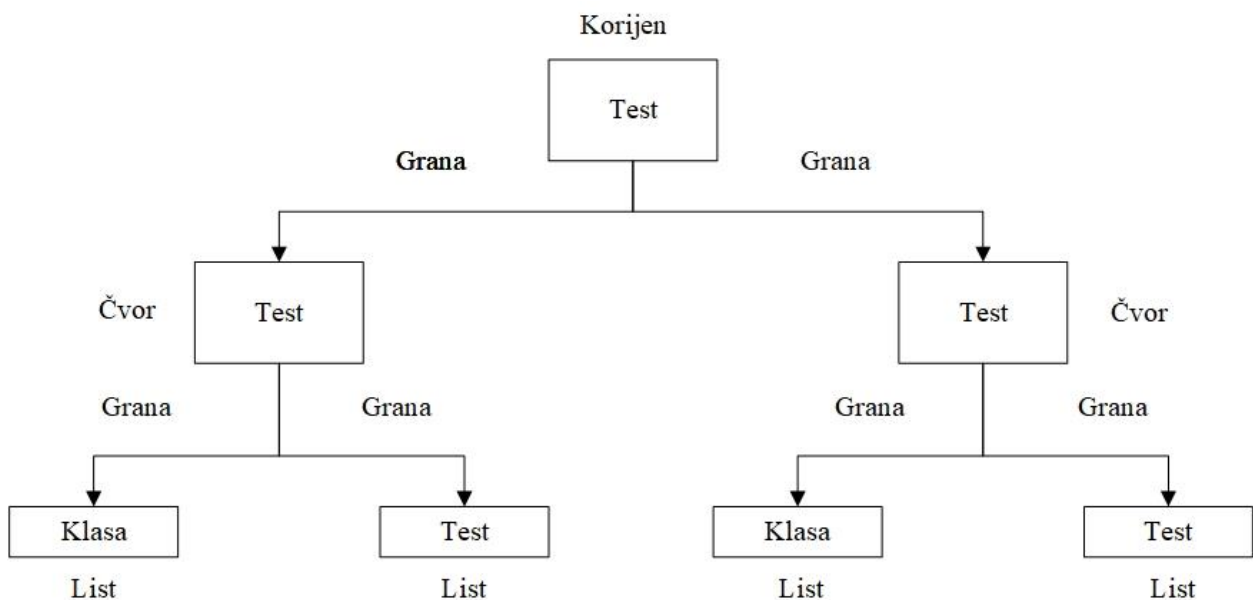
U skladu s navedenim, problem klasifikacije može se definirati kao određivanje kako dodijeliti objekt klasi, znajući da postoje različite klase odluka  $C$  i da svaki objekt pripada jednoj od njih [97].

### 8.2. Stabla odlučivanja

Zbog jednostavnog i efektivnog procesa klasifikacije postala su popularna metoda koja se koristi za klasifikaciju. Omogućuju pojednostavljenje procesa izgradnje skupa klasifikatora: na primjer, odlučujuće šume, koje su definirane kao skupovi specifičnih stabala odlučivanja, što omogućuje poboljšanje kvalitete klasifikacije. Proces stvaranja stabala odlučivanja složen je

problem višekriterijskih odluka koje se odnose na pravila koja se koriste u optimalnom razdvajanju podataka. Stabla odlučivanja mogu lako predstavljati složene pojmove čije se definicije mogu opisati na temelju prostora značajki. Vrlo su kompetitivna s ostalim algoritmima klasifikacije u odnosu na korištenje memorije.

Stablo odlučivanja je klasifikator koji donosi pravila odlučivanja, obično se koriste u operativnim istraživanjima, posebno u analizi odluka, kako bi se odredila optimalna strategija za postizanje cilja. Stablo odlučivanja je aciklički, usmjereni graf u kojem se svi vrhovi nazivaju čvorovi, rubovi se nazivaju grane, vrhovi bez potomaka - lišće, a korijen je jedini vrh bez roditelja slika 8.1. Svi čvorovi sadrže testove atributa  $A$ , koji se generiraju prema odabranim kriterijima podjele. Oni predstavljaju način određivanja podjele podataka koja dijeli podatke prema vrijednostima atributa za te podatke. Konačno, svi rezultati ispitivanja su predstavljeni granama. [97, p. 4]



Slika 8. 1. Stablo odlučivanje.

Najpopularnija izgradnja stabla odlučivanja je metoda odozgor prema dolje [98]. Algoritamski okvir odozgor prema dolje za indukciju stabla odlučivanja dan je u nastavku [98] [99], gdje je  $X$  set za učenje,  $S$  Skup ulaznih značajki i  $y$  ciljna značajka.

Tablica 8. 1. Pseudo koda algoritma odozgor prema dolje

---

**procedura** induciranje (X, A, y)

T = rast stabla (X, A, y)

**povratak** obrezivanje stabla (X, T)

**kraj procesa**

**proces** rat stabla (X, A, y)

kreiranje stabla T

**if** jedan od kriterija zaustavljanja je ispunjen **then**

Označiti korijenski čvor u T kao list s najčešćom vrijednošću y u X

**else**

Pronalaženje uvjet atributnog testa f (A) tako da dijeljenje X prema rezultatima f (A) daje najbolju vrijednost dijeljenja mjerene veličine

**if** najbolja mjerna vrijednost dijeljenja > praga **then**

Označi korijenski čvor u T sa f(A)

**for** za svaki ishod  $v_i$  od f (A) **do**

$X_{f(A=v_i)} = \{x \in X | f(A) = v_i\}$

*Podstablo<sub>i</sub>* = rast stabla ( $X_{f(A=v_i)}$ , A, y)

Povezivanje korijenskog čvora T s *Podstablom* i označavanje ruba kao  $v_i$

**end for**

**else**

Označiti korijenski čvor T kao list i označiti ga kao najčešću vrijednost y u X

**end if**

**end ifreturn** T

**kraj procesa**

**proces** obrezivanje stabla (X, T)

**ponavljaj**

Odaberi čvor t u T tako da obrezivanje maksimalno poboljšava neki kriterij procjene

**if**  $T \neq \emptyset$  **then**

T = obrezivanje (T, t)

**end if**

**Sve dok je**  $T = \emptyset$  **vрати** T

**kraj procesa**

---

U ovoj disertaciji korišteno je stablo odlučivanja za klasifikaciju voda na kojem je nastupio kratki spoj u IEEE 39 sabirničkom testnom sustavu. Korišteni su samo trofazni kratki spojevi, a za određivanje mjesta kvara, korišteni su preostali naponi na sabirnicama uslijed nastanka naponskog propada pojavom trofaznog kratkog spoja u mreži.

Algoritam stabla odlučivanja je kreiran u Matlabu. Korišteno je 3366 trofaznih kratkih spojeva na različitim mjestima u IEEE 39 sabirničkom testnom sustavu. Podaci su rastavljeni tako da se 2346 (70%) podataka koristi za treniranje, a 1020 podataka (30%) za testiranje utreniranog stabla odlučivanja. Prvo je provedeno treniranje na način da su uređaji za mjerenje kvalitete električne energije instalirani na svakoj sabirnici.

Kreiranjem konfuzijske matrice dane u prilogu B, jasno se može vidjeti da se između 1020 podataka o preostalom naponu na sabirnicama nalazi po 30 podataka za svaki vod, koji su nasumično odabrani algoritmom u Matlabu. Navedeni podaci nisu sudjelovali u setu za trening, tako da se stablo odlučivanja prvi puta susreće s njima. Iz konfuzijske matrice može se vidjeti da je između 1020 vrijednosti samo njih 10 ( $10/1020 = 0,9\%$ ) krivo klasificirano.

Tablica 8.2. prikazuje predviđene vrijednosti i stvarne vrijednosti. Kvar kod voda 7 jedanput je krivo klasificiran kao da se dogodio na vodu 9, dok je ostalih 29 puta točno klasificiran. Kvar na vodu 11, tri puta je krivo klasificiran kao kvar na vodu 9. Zatim na vodu 19 jedanput krivo klasificiran na vodu 29 četiri puta i konačno kvar na vodu 33 jedan put krivo klasificiran.

Tablica 8. 2. Predviđene i stvarne vrijednosti vodova na kojima je nastupio trofazni kratki spoj.

Predviđena vrijednost	9	9	9	9	18	24	24	24	24	32
Stvarna vrijednost	7	11	11	11	19	29	29	29	29	33

U drugom slučaju, uređaji za mjerenje kvalitete električne energije nisu bili razmješteni na svakoj sabirnici, nego korišten je optimalan razmještaj postignut korištenjem razvijenog binarnog algoritma šišmiša u ovoj disertaciji. Optimalan razmještaj prikazan je u tablici 7.13. u potpoglavlju 7.4. ove doktorske disertacije.

Od 1020 korištenih vrijednosti, koje kao i u prvom slučaju nisu nalazili u setu za treniranje i stablo odlučivanja se prvi put susrelo s njima, 58 ih je krivo klasificirano. Drugim riječima, 58 (5,6 %) puta je predviđen kvar na krivom vodu.

U trećem slučaju, korišten je optimalan raspored uređaja za mjerenje kvalitete električne energije dobiven s GLPK. Također, kao u prethodna dva slučaja, 1020 podataka nije sudjelovalo u setu za treniranje. Rezultati pokazuju 60 krivo klasificiranih vodova u kvaru ( $60/1020 = 5,88\%$ ). Na prvi pogled izgleda da je broj krivo klasificiranih vodova narastao za dva zbog manjeg broja mjernih uređaja, međutim usporedbom konfuzijskih matrica uočava se da su krive klasifikacije vodova u kvaru kod klasifikacijom raspreda mjernih uređaja korištenjem razvijenog algoritma šišmiša (AŠ) i GLPK drugačiji, odnosno razlikuju se u određenim slučajeva prikazanim u tablici 8.3.

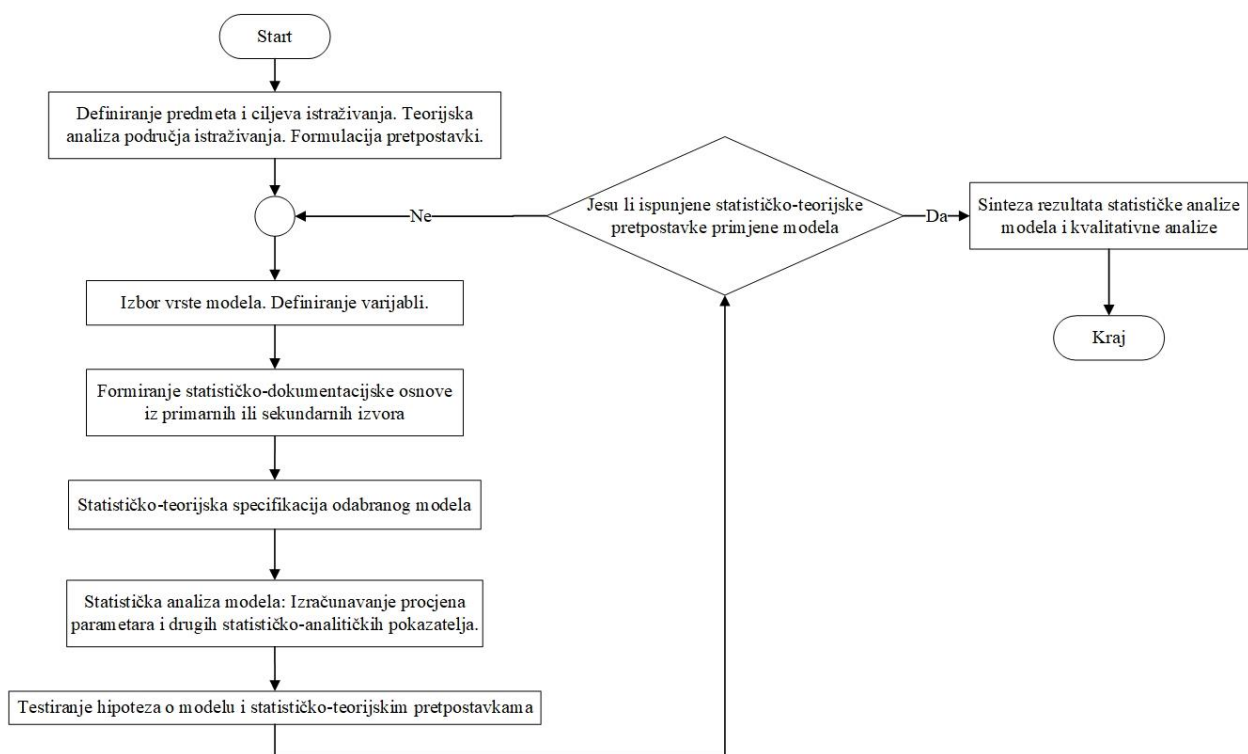
Tablica 8. 3. Usporedba rezultata klasifikacije vodova na kojima je nastupio kratki spoj.

AŠ		GLPK			
Predviđeno		Stvarno	Predviđeno (Vod)		Stvarno (Vod)
Vod 10	30	30	Vod 10	29	30
			Vod 11	1	
Vod 11	29	30	Vod 11	27	30
Vod 9	1		Vod 10	3	
Vod 16	29	30	Vod 16	30	30
Vod 17	1				
Vod 19	28	30	Vod 19	28	30
Vod 20	1		Vod 20	1	
Vod 8	1		Vod 18	1	
Vod 25	29	30	Vod 25	30	30
Vod 21	1				
Vod 34	24	30	Vod 34	23	30
Vod 22	6		Vod 33	7	

Iz tablice 8.3. se može vidjeti da je razlika kod grešaka nastalih pri klasifikaciji mjesta kvara razvijenim algoritmom šišmiša i GLPK, nastala kod vodova 10, 11, 16, 19, 25 i 34. Ostale pogreške su iste kod obje metode. Iz ovog primjera se može zaključiti da raspored uređaja za mjerenje kvalitete električne energije ne utječe samo na broj krivih klasifikacija kod klasifikacije metodom stabla odlučivanja, nego također utječe na točnost klasifikacije. Kod različitih rasporeda mjernih uređaja, nastat će drugačije pogreške pri klasifikaciji.

### 8.3. Linearna regresija

Kod regresijske analize provodi se ispitivanje ovisnosti jedne varijable o drugoj ili više drugih varijabli primjenom različitih metoda ispitivanja ovisnosti. Zavisne varijable su one čije se varijacije objašnjavaju pomoću drugih varijabli koje se nazivaju nezavisne varijable. Regresijski model je algebarski model kojim se analitički izražava statistički odnos među pojavama i predstavlja temelj svake analize. Model je jednačica, u nekim slučajevima skup jednačica, s konačnim brojem parametara i varijabli, gdje sami oblici modela ovise o tome koji se problem rješava. Slika 8.2. prikazuje dijagram toka uobičajenih koraka u postavljanju i analizi regresijskog modela.



Slika 8. 2. Dijagram toka regresijske analize.

Opći model regresijskog problema dan je izrazima

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_K) + e \quad (8-4)$$

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_K) \cdot \varepsilon \quad (8-5)$$

gdje je  $Y$  zavisna varijabla,  $X_1, X_2, \dots, X_K$  nezavisne varijable, a  $e$  (ili  $\varepsilon$ ) stohastička varijabla koja predočuje nesistematske utjecaje na zavisnu varijablu [100]. Podaci za regresijsku analizu mogu biti iz primarnih i sekundarnih izvora, a nastaju opažanjem ili mjerenjem u statističkim pokusima. Tipovi podataka koji se koriste su vremenske serije, brojčane vrijednosti pojava u jednovremenskom intervalu, postotne jedinice te kombinacijom navedenih vrsta

podataka. Također mogu se koristiti i binarne varijable. U sklopu metode statističke analize modeli se dijela na (1) linearne (ako je linearan u parametrima), nelinearne koji se mogu transformirati u linearne (ovisno o položaju slučajne varijable  $e$ ) i (2) nelinearne modele.

Model linearne regresije koristi se za opisivanje pojava koje su u linearnom statističkom odnosu. Primjenjuju se kada jediničnom povećanju vrijednosti nezavisne varijable odgovara približno ista linearna promjena vrijednosti zavisne varijable. Model linearne regresije analizira se metodama deskriptivne statistike i metodama inferencijalne statistike. U nastavku biti će opisan postupak analize metodom deskriptivne statistike.

Deskriptivnostatističkom analizom modela linearne regresije utvrđuje se analitički izraza koji u određenom smislu najbolje predočuje empirijske podatke. Ako je funkcionalni dio modela oblika  $f(X) = \alpha + \beta X$ , izraz (8-4) postaje izraz (8-6).

$$Y = \alpha + \beta X + e \quad (8-6)$$

Kako se regresijska analiza provodi na temelju  $n$  parova vrijednosti varijabli  $X$  i  $Y$ , model predočen sustavom  $n$  jednadžbi daje se izrazom:

$$y_i = \alpha + \beta x_i + e_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8-7)$$

Kako su odnosi među pojavama statistički, između vrijednosti linearne funkcije i vrijednosti zavisne varijable postoje odstupanja. Prema tome treba odrediti kriterij kojim će se izabrati jednadžba pravca  $y$  koji će "najbolje" opisati odnos pojava na temelju njihovih opaženih vrijednosti.

Jednadžba pravca određena je ako su poznati parametri  $\alpha$  i  $\beta$  (spomenuti su parametri nepoznati). Neka su  $a$  i  $b$  procjene parametara, a procjene nepoznatih vrijednosti varijable  $e$  jednake  $u_i$ . Model je linearne regresije s procijenjenim parametrima daje se izrazom:

$$y_i = a + bx_i + u_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8-8)$$

$u_i$  su procjene nepoznatih vrijednosti varijable  $e$  odnosno rezidualna odstupanja.

Metoda najmanjih kvadrata se najčešće primjenjuje za određivanje parametara  $a$  i  $b$ , s ciljem određivanja parametara za koje rezidualni zbroj kvadrata postiže minimum. Postupkom minimalizacije dolazi se do sustava normalnih jednadžbi čije je rješenje dano izrazom.

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2}, \quad a = \bar{y} - b \bar{x} \quad (8-9)$$



Linearna regresijska jednadžba s procijenjenim parametrima daje se izrazom

$$\hat{y} = a + bx \quad (8-10)$$

Vrijednosti regresije  $\hat{y}$  za dane stvarne vrijednosti nezavisne varijable  $X$  nazivaju se regresijskim vrijednostima.

$$\hat{y}_i = a + bx_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8-11)$$

Gdje je  $a$  konstanti član a  $b$  je regresijski koeficijent. Regresijska jednadžba je analitički izraz koji korištenjem prosjeka opisuje odnos među pojavama. Osnova je za mjerenje reprezentativnosti disperzija oko regresije, koja se očituje na rezidualnim odstupanjima. Što su manja odstupanja empirijskih vrijednosti zavisne varijable od regresijskih vrijednosti, to je bolja reprezentativnost regresije. Aritmetička sredina rezidualnih odstupanja jednaka je nuli pa se pri mjerenju stupnja disperzije oko regresije polazi od kvadrata rezidualnih odstupanja, koja se definiraju varijacijom regresije danom izrazom (8-12).

$$\sigma_{\hat{y}}^2 = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n y_i^2 - a \sum_{i=1}^n y_i - b \sum_{i=1}^n x_i y_i \right) \quad (8-12)$$

Standardna devijacija daje odgovor na pitanje koliko je prosječno odstupanje empirijskih vrijednosti zavisne varijable od regresijskih vrijednosti u mjernim jedinicama zavisne varijable izraz (8-13).

$$\sigma_{\hat{y}} = \sqrt{\frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n y_i^2 - a \sum_{i=1}^n y_i - b \sum_{i=1}^n x_i y_i \right)} \quad (8-13)$$

a koeficijent varijacije koliko je to u relativnom iznosu (u postocima %) izraz (8-14).

$$V_{\hat{y}} = \frac{\sigma_{\hat{y}}}{\bar{y}} 100 \quad (8-14)$$

Specifičan pokazatelj reprezentativnosti regresije jest koeficijent determinacije dan izrazom (8-15)

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = \frac{a \sum_{i=1}^n y_i + b \sum_{i=1}^n x_i y_i - n\bar{y}^2}{\sum_{i=1}^n y_i^2 - n\bar{y}^2} \quad (8-15)$$

Koeficijent determinacije je proporcija modelom protumačenoga dijela zbroja kvadrata u ukupnom zbroju kvadrata. Gdje je protumačeni dio jednak zbroju kvadrata odstupanja regresijskih vrijednosti od aritmetičke sredine zavisne varijable. Ukupan zbroj kvadrata odnosi se na zbroj kvadrata odstupanja vrijednosti zavisne varijable od njezine aritmetičke sredine. Navedeni

koeficijent kreće se u granicama između nule i jedan. Model je reprezentativniji što je koeficijent determinacije bliži jedinici [100].

Model linearne regresije kreiran u Matlabu, korišten je za određivanje dijela voda na kojemu je nastupio kvar. Vodovi neovisno o svojoj dužini su rastavljeni na sto jednakih dijelova (100% dužine voda).

## 8.4. Višestruka linearna regresija

Temeljni je regresijski model, koji služi za analitičko predočenje statističke kovarijacije jedne numeričke (zavisne) varijable pomoću više drugih numeričkih (nezavisnih) varijabli. Općeniti model višestruke linearne regresije dan je izrazom (8-16).

$$Y = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_j X_j + \dots + \beta_K X_K + e \quad (8-16)$$

Gdje je  $Y$  zavisna varijabla,  $X_1, X_2, \dots, X_K$  vrijednosti nezavisne varijable,  $\alpha$  i  $\beta_j, j = 1, 2, \dots, K$  vrijednosti nepoznatih parametara, slučajna varijabla  $e$  (pogreška relacije) [100].

U kôdu višestruke linearne regresije, kreirane u Matlabu, odabire se vod koji se želi testirati. U prvom slučaju ulazni podaci za testiranje su 39 naponskih propada (mjerni uređaji instalirani na sve sabirnice), ali izlazni podaci su postotak voda na kojem je nastupio kvar.

Korišteno je 30 mjesta kvara prikazanih u tablici i ispod njih predviđena mjesta kvara određena linearnom regresijom, zaokružena na dvije decimale iza zareza. Za testiranje je korišten vod 8 (line 4-14 u DIgSilent PowerFactory), izraz „AP“ predstavlja apsolutnu pogrešku.

Tablica 8. 4. Stvarno mjesto kvara i predviđeno mjesto kvara linearnom regresijom.

Mjesto kvara na vodu 8 u %										
Br. MU	2	4	10	11	14	15	17	18	28	31
39	1,9	3,24	9,86	11,36	13,55	14,81	17,17	18,96	28,5	31,12
AP	0,1	0,76	0,14	0,36	0,45	0,19	0,17	0,96	0,5	0,12
Mjesto kvara na vodu 8 u %										
Br MU	34	35	37	43	47	48	55	60	61	66
39	34,58	35,1	37,07	43,72	47,16	48,64	55,96	59,54	60,94	65,21
AP	0,58	0,1	0,07	0,72	0,16	0,64	0,96	0,46	0,06	0,79
Mjesto kvara na vodu 8 u %										
Br MU	67	68	75	83	85	86	87	91	94	98
39	67,05	68	74,39	82,94	85,34	86,06	87,2	91,08	94,23	98,08
AP	0,05	0	0,61	0,06	0,34	0,06	0,2	0,08	0,23	0,08

Iz 8.4. tablice se može vidjeti da je najveće odstupanje kod mjesta kvara na 18 % dužine voda 8 i približno iznosi 1 % dužine voda. Kako dužina voda iznosi 51,18 km, 1 % dužine voda

jednak je 0,5118 km što je jednako 511,8 m. Korištenjem linearne regresije u slučaju kada su na sve sabirnice instalirani mjerni uređaji za određivanje naponskih propada, može se vrlo precizno odrediti mjesto kvara na vodu, nakon utvrđivanja voda u kvaru korištenjem metode stabla odlučivanja opisane u potpoglavlju 8.2. ove disertacije. U tablici 8.4. kratica Br. MU predstavlja broj instaliranih mjernih uređaja.

Kod razmještaja uređaja za detekciju naponskih propada na sabirnicama određenim binarnim algoritmom šišmiša s težinskim koeficijentom izloženog područja predloženim u [1], rezultati testa na istih 30 lokacija za vod 8 prikazani su u tablici 8.5. Iz tablice 8.5. može se vidjeti da i kod razmještaja uređaja korištenjem unaprijedenog binarnog algoritma šišmiša za mjerenje naponskih propada najviše odstupanje iznosi 1 % dužine voda.

Tablica 8. 5. Predviđene vrijednosti kvara na dužini voda s 39 i 14 mjernih uređaja

Mjesto kvara na vodu 8 u %										
Br MU	2	4	10	11	14	15	17	18	28	31
39	1,9	3,24	9,86	11,36	13,55	14,81	17,17	18,96	28,5	31,12
AP	0,1	0,76	0,14	0,36	0,45	0,19	0,17	0,96	0,5	0,12
14	1,07	3,11	9,66	10,61	14,51	15,19	17,49	18,47	28,43	31,74
AP	0,93	0,89	0,34	0,39	0,51	0,19	0,49	0,47	0,43	0,74
Mjesto kvara na vodu 8 u %										
Br MU	34	35	37	43	47	48	55	60	61	66
39	34,58	35,1	37,07	43,72	47,16	48,64	55,96	59,54	60,94	65,21
AP	0,58	0,1	0,07	0,72	0,16	0,64	0,96	0,46	0,06	0,79
14	34,33	35,23	37,00	43,12	47,39	47,63	54,74	59,91	60,72	65,81
AP	0,33	0,23	0,00	0,12	0,39	0,37	0,26	0,09	0,28	0,19
Mjesto kvara na vodu 8 u %										
Br MU	67	68	75	83	85	86	87	91	94	98
39	67,05	68	74,39	82,94	85,34	86,06	87,2	91,08	94,23	98,08
AP	0,05	0	0,61	0,06	0,34	0,06	0,2	0,08	0,23	0,08
14	66,64	67,77	74,30	82,35	84,92	85,71	86,81	91,00	94,55	98,84
AP	0,36	0,23	0,70	0,65	0,08	0,29	0,19	0,00	0,55	0,84

Iz tablice 8.5. se kod korištenja 14 mjernih uređaja za mjerenje naponskih propada, odnosno 14 vrijednosti preostalih napona na sabirnici kao ulaza, maksimalno odstupanje je također manje od 1% dužine voda. Također, može se vidjeti razlika u predviđenim vrijednostima kvara na dužini voda 8, gdje kod korištenja 14 uređaja za mjerenje naponskih propada na mjestu kvara 18 % dužine voda, apsolutna pogreška iznosi 0,47 % dok kod 39 mjernih uređaja za mjerenje naponskih propada, apsolutna pogreška iznosi 0,96 %. Međutim, kod kvara na 2 % dužine voda 8, korištenjem 39 ulaza apsolutna pogreška iznosi 0,1 %, a kod korištenja 14 ulaza, apsolutna

pogreška je jednaka 0,93 %. To se događa jer kod korištenja 39 uređaja za mjerenje naponskih propada postoji 39 vrijednosti preostalih napona na sabirnicama u sustavu, koji se koriste kao ulaz, a kod 14 mjernih uređaja za mjerenje naponskih propada postoje 14 ulaza. Linearna regresija se najprije trenira na nekom skupu podataka s učenjem uz nadzor i zatim testira na novom skupu podataka koji nije sudjelovao u procesu učenja (30 mjesta kvara na vodu 8 u prethodnim tablicama). Ulazni podaci utječu na točnost određivanja kvara na dužini voda. Ukoliko su ulazni podaci kod korištenja 14 uređaja za određenu dužinu voda više razlikuju od ulaznih podataka metode s 39 uređaja, metoda s 14 uređaja će dati točnija rješenja i obrnuto.

Tablica 8.6. prikazuje usporedbu s 39, 14 i 13 uređaja za određivanje naponskih propada.

Tablica 8. 6. Usporedbu s 39, 14 i 13 uređaja za određivanje naponskih propada.

Br MU	2	4	10	11	14	15	17	18	28	31
<b>39</b>	<b>1,9</b>	<b>3,24</b>	<b>9,86</b>	<b>11,36</b>	<b>13,55</b>	<b>14,81</b>	<b>17,17</b>	<b>18,96</b>	<b>28,5</b>	<b>31,12</b>
AP	0,1	0,76	0,14	0,36	0,45	0,19	0,17	0,96	0,5	0,12
<b>14</b>	<b>1,07</b>	<b>3,11</b>	<b>9,66</b>	<b>10,61</b>	<b>14,51</b>	<b>15,19</b>	<b>17,49</b>	<b>18,47</b>	<b>28,43</b>	<b>31,74</b>
AP	0,93	0,89	0,34	0,39	0,51	0,19	0,49	0,47	0,43	0,74
<b>13</b>	<b>1,11</b>	<b>2,92</b>	<b>9,68</b>	<b>10,55</b>	<b>14,53</b>	<b>15,22</b>	<b>17,38</b>	<b>18,65</b>	<b>28,63</b>	<b>31,70</b>
AP	0,89	1,08	0,32	0,45	0,53	0,22	0,38	0,65	0,63	0,70
Mjesto kvara na vodu 8 u %										
Br MU	34	35	37	43	47	48	55	60	61	66
<b>39</b>	<b>34,58</b>	<b>35,1</b>	<b>37,07</b>	<b>43,72</b>	<b>47,16</b>	<b>48,64</b>	<b>55,96</b>	<b>59,54</b>	<b>60,94</b>	<b>65,21</b>
AP	0,58	0,1	0,07	0,72	0,16	0,64	0,96	0,46	0,06	0,79
<b>14</b>	<b>34,33</b>	<b>35,23</b>	<b>37,00</b>	<b>43,12</b>	<b>47,39</b>	<b>47,63</b>	<b>54,74</b>	<b>59,91</b>	<b>60,72</b>	<b>65,81</b>
AP	0,33	0,23	0,00	0,12	0,39	0,37	0,26	0,09	0,28	0,19
<b>13</b>	<b>34,29</b>	<b>35,26</b>	<b>36,98</b>	<b>42,92</b>	<b>47,29</b>	<b>47,65</b>	<b>54,82</b>	<b>59,69</b>	<b>60,64</b>	<b>65,68</b>
AP	0,29	0,26	0,02	0,08	0,29	0,35	0,18	0,31	0,36	0,32
Mjesto kvara na vodu 8 u %										
Br MU	67	68	75	83	85	86	87	91	94	98
<b>39</b>	<b>67,05</b>	<b>68</b>	<b>74,39</b>	<b>82,94</b>	<b>85,34</b>	<b>86,06</b>	<b>87,2</b>	<b>91,08</b>	<b>94,23</b>	<b>98,08</b>
AP	0,05	0	0,61	0,06	0,34	0,06	0,2	0,08	0,23	0,08
<b>14</b>	<b>66,64</b>	<b>67,77</b>	<b>74,30</b>	<b>82,35</b>	<b>84,92</b>	<b>85,71</b>	<b>86,81</b>	<b>91,00</b>	<b>94,55</b>	<b>98,84</b>
AP	0,36	0,23	0,70	0,65	0,08	0,29	0,19	0,00	0,55	0,84
<b>13</b>	<b>66,77</b>	<b>67,71</b>	<b>74,20</b>	<b>82,40</b>	<b>84,84</b>	<b>85,71</b>	<b>86,75</b>	<b>91,26</b>	<b>94,40</b>	<b>98,72</b>
AP	0,23	0,29	0,80	0,60	0,16	0,29	0,25	0,26	0,40	0,72

Iz tablice 8.6. se može vidjeti da kod korištenja podataka od 13 uređaja za mjerenje naponskih propada prema optimalnoj lokaciji određenoj s GLPK objašnjenim u potpoglavlju 7.1, ove doktorske disertacije najveća pogreška iznosi 1,08 % kod predviđanja kvara na 4% dužine voda 8. Međutim, kod predviđanja kvara na 18 % dužine voda 8, apsolutna pogreška iznosi 0,65 % što je manje nego 0,96 % kod 39 ulaza, ali više 0,47 % kod korištenja 14 ulaza. Kod kvara na 34

% dužine voda apsolutna pogreška kod 39 ulaza iznosi 0,52 %, kod 14 ulaza 0,33 % i kod 13 ulaza 0,29 %

Tablica 8.7. prikazuje rezultate predviđanja kvara na posto voda za najduži vod Line 26-29 dužine 247,96 km. „AP“ u tablici predstavlja apsolutnu pogrešku između stvarne vrijednosti i predviđene vrijednosti.

Tablica 8. 7. Predviđene vrijednosti za vod 33 (Line 26-29)

Br MU	2	4	5	13	17	19	22	23	28	31
<b>39</b>	<b>2,19</b>	<b>2,47</b>	<b>4,69</b>	<b>12,19</b>	<b>17,48</b>	<b>18,19</b>	<b>22,26</b>	<b>22,52</b>	<b>28,58</b>	<b>32,07</b>
AP	0,19	1,53	0,31	0,81	0,48	0,81	0,26	0,48	0,58	1,07
<b>14</b>	<b>1,01</b>	<b>2,47</b>	<b>3,40</b>	<b>13,41</b>	<b>20,39</b>	<b>19,27</b>	<b>20,34</b>	<b>23,18</b>	<b>29,66</b>	<b>32,88</b>
AP	0,99	1,53	1,60	0,41	3,39	0,27	1,66	0,18	1,66	1,88
<b>13</b>	<b>2,57</b>	<b>4,08</b>	<b>3,88</b>	<b>12,68</b>	<b>17,86</b>	<b>18,62</b>	<b>21,19</b>	<b>22,51</b>	<b>28,24</b>	<b>31,96</b>
AP	0,57	0,08	1,12	0,32	0,86	0,38	0,81	0,49	0,24	0,96
Mjesto kvara na vodu 33 u %										
Br MU	36	39	41	42	45	47	48	49	54	58
<b>39</b>	<b>37,43</b>	<b>39,43</b>	<b>41,23</b>	<b>41,72</b>	<b>45,74</b>	<b>47,25</b>	<b>48,88</b>	<b>48,62</b>	<b>53,81</b>	<b>57,59</b>
AP	1,43	0,43	0,23	0,28	0,74	0,25	0,88	0,38	0,19	0,41
<b>14</b>	<b>36,09</b>	<b>40,55</b>	<b>41,08</b>	<b>41,58</b>	<b>42,37</b>	<b>45,20</b>	<b>48,34</b>	<b>49,77</b>	<b>52,79</b>	<b>58,94</b>
AP	0,09	1,55	0,08	0,42	2,63	1,80	0,34	0,77	1,21	0,94
<b>13</b>	<b>36,96</b>	<b>40,55</b>	<b>40,62</b>	<b>41,66</b>	<b>44,40</b>	<b>46,89</b>	<b>47,74</b>	<b>49,67</b>	<b>53,46</b>	<b>58,35</b>
AP	0,96	1,55	0,38	0,34	0,60	0,11	0,26	0,67	0,54	0,35
Mjesto kvara na vodu 33 u %										
Br MU	61	62	64	66	69	70	79	83	84	96
<b>39</b>	<b>60,23</b>	<b>61,07</b>	<b>63,58</b>	<b>63,88</b>	<b>68,52</b>	<b>70,20</b>	<b>78,56</b>	<b>82,66</b>	<b>84,19</b>	<b>95,80</b>
AP	0,77	0,93	0,42	2,12	0,48	0,20	0,44	0,34	0,19	0,20
<b>14</b>	<b>60,49</b>	<b>60,39</b>	<b>61,62</b>	<b>65,36</b>	<b>67,76</b>	<b>68,32</b>	<b>77,38</b>	<b>82,84</b>	<b>82,85</b>	<b>97,59</b>
AP	0,51	1,61	2,38	0,64	1,24	1,68	1,62	0,16	1,15	1,59
<b>13</b>	<b>61,07</b>	<b>62,52</b>	<b>63,70</b>	<b>66,53</b>	<b>69,27</b>	<b>69,02</b>	<b>76,83</b>	<b>83,49</b>	<b>83,03</b>	<b>97,24</b>
AP	0,07	0,52	0,30	0,53	0,27	0,98	2,17	0,49	0,97	1,24

Iz tablice 8.8. može se vidjeti da se najveća apsolutna pogreška pojavljuje kod predviđanja kvara na 17 % dužine voda 33 (line 26-29) i iznosi 3,39%, korištenjem optimalnog razmještaja uređaja za detekciju naponskih propada određenu binarnim algoritmom šišmiša.

Kako je dužina voda 247,96 km, 3,39 % dužine voda iznosi 8,4 km. Najveća apsolutna pogreška kod korištenja mjernih uređaja na svim sabirnicama za vod 33 iznosi 2,12% kod predviđanja mjesta kvara na 66 % dužine voda 33, gdje za predviđanje iste te vrijednosti kod optimalnog razmještaja binarnim algoritmom šišmiša (14 ulaza s mjernih uređaja) apsolutna pogreška iznosi 0,64 %, odnosno manja je od 1%. Korištenjem optimalnog rasporeda uređaja za

mjerenje naponskih propada prema GLPK, najveća apsolutna pogreška ostvaruje se kod predviđanja kvara na 79 % dužine voda 33 i iznosi 2,17%, dok za predviđanje istog mjesta kvara, korištenjem 14 mjernih uređaja apsolutna pogreška iznosi 1,62 %. Nakon klasifikacije voda u kvaru, korištenje metode stabla odlučivanja, linearnom regresijom se može dosta točno odrediti mjesto kvara na vodu. Ako se uzme u obzir da je dužina voda 247,96 km, ako se taj vod ograniči na 8 km dužine voda, to pojednostavljuje otkrivanju stvarnog mjesta kvara.

## 9. ZAKLJUČAK

Naponski propadi predstavljaju globalni problem, što uzrokuje potrebu za njihovim mjerenjem i nadziranjem. Prvi korak pri njihovom nadziranju je korištenje mjernih uređaja za mjerenje naponskih propada. Zahtjevi za minimizacijom broja korištenih mjernih uređaja, definirali su problem optimizacije, koji se može riješiti primjenom postojećih meta-heurističkih metoda.

Problemi optimizacije koji se javljaju u elektroenergetskom sustavu uspješno su rješavani u znanstveno istraživačkim radovima korištenjem rojnih algoritama, koji oponašaju procese decentraliziranih, samoorganiziranih sustava te mogu biti prirodni ili umjetne prirode. Algoritam šišmiša koji spada u rojne algoritme, pokazao se kao dobra metoda optimizacije, koja može postići bolja rješenja, kada se uspoređuje s ostalim metodama optimizacije.

Ishod znanstveno-istraživačkog rada ove doktorske disertacije je unaprijeđeni binarni algoritam šišmiša, koji koristi područje dosega nadziranja kreirano od simulacija kratkih spojeva na sabirnicama IEEE 39-sabirničkog testnog sustava u PowerFactory i težinskog koeficijenta izloženog područja sabirnica sustava za određivanje optimalne lokacije te optimalnog broja uređaja za mjerenje naponskih propada. Testiranjem navedene razvijene metode na IEEE 39-sabirničkom testnom sustavu i provjerom dobivenih rezultata s GLPK u kojem se koriste kvarovi na sabirnicama i vodovima, a optimalno rješenje se određuje primjenom egzaktnih metoda optimizacije, rezultati pokazuju da razvijeni algoritam može odrediti optimalan broj i lokaciju uređaja za mjerenje naponskih propada.

Nakon određivanja optimalnog razmještaja uređaja za mjerenje naponskih propada, klasifikacija voda zahvaćenog kvarom provedena je korištenjem algoritma stabla odlučivanja, gdje je precizno određen vod u kvaru. Od 1020 uzoraka za testiranje 58 (5,6 %) puta je krivo klasificiran vod u kvaru, što daje dosta preciznu metodu klasifikacije voda zahvaćenih kvarom.

Nakon utvrđivanja voda u kvaru, višestrukom linearnom regresijom predviđano je mjesto kvara na dužini voda. Rezultati su pokazali da je moguće postići zadovoljavajuću točnost predviđanja mjesta kvara korištenjem linearne regresije.

## Literatura

- [1] Z. Klaić, STOHAŠTIČKA PROCJENA NAPONSKIH PROPADA USLIJED KRATKIH SPOJEVA U ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU, Osijek: Doktorska disertacija, 2011.
- [2] C. M. Santos Junqueira, N. S. Dantas Brito, B. A. Souza, R. Almeida Coelho i É. M. Lima, »An Algorithm for Optimal Placement of Voltage Sag Monitors,« *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, svez. 30, p. 266–276, 2019.
- [3] H. H. Kajihara, »Quality power for electronics,« *Electro- Technology*, svez. 82, br. 5, 1968.
- [4] H. J. M. Bollen, Understanding power quality problems, Voltage Sags and Interruptions, New York: John Wiley & Sons, 2000.
- [5] S. Chattopadhyay, M. Mitra i S. Sengupta, Electric Power Quality, London: Springer, 2011.
- [6] B. Singh, A. Chandra i K. Al-Haddad, Power quality problems and mitigation techniques, John Wiley and Sons, 2015.
- [7] T. Gonen, Modern Power System Analysis, 2nd Edition, Broken Sound Parkway NW: CRC Press Taylor & Francis Group, 2013.
- [8] H. Požar, VISOKONAPONSKA RASKLOPNA POSTROJENJA, Zagreb: Tehnička knjiga, Zagreb, 1967.
- [9] I. Kasikci, Short Circuits in Power Systems A Practical Guide to IEC 60909-0, Boschstr: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2018.
- [10] J. C. Das, Power system analysis: Short-Circuit Load Flow and Harmonics, Second Edition, London : Taylor & Francis Group, LLC, 2012.
- [11] M. Bollen i L. Zhang, »Different methods for classification of three-phase unbalanced voltage dips due to faults,« *Electric Power Systems Research*, svez. 66, pp. 59-69, 2003.



- [12] R. H. Tan i V. K. Ramachandaramurthy, »A Comprehensive Modeling and Simulation of Power Quality Disturbances Using MATLAB/SIMULINK,« u *Power Quality Issues in Distributed Generation*, InTech, 2015, pp. 83-107.
- [13] 39 Bus New England System, DIgSILENT PowerFactory.
- [14] N. M. Tabatabaei, N. Bizon, J. A. Aghbolaghi i F. Blaabjerg, *Reactive Power Control in AC Power Systems Fundamentals and Current Issues*, Switzerland: Springer International Publishing, 2017.
- [15] User Manual, DIgSILENT PowerFactory, Version 15.
- [16] M. Nahvi i J. A. Edminister, *Electric Circuits, Seventh Edition*, London: McGraw-Hill Education, 2018.
- [17] A. Waygood, *An Introduction to Electrical Science, Second Edition*, London: Taylor and Francis, 2019.
- [18] DIgSILENT PowerFactory, Technical Reference Documentation, General Load.
- [19] DIgSILENT PowerFactory, Technical Reference Documentation, Two-Winding Transformer (3-Phase).
- [20] DIgSILENT PowerFactory, Technical Reference Documentation, Synchronous Machine.
- [21] M. Fathi i H. Bevrani, *Optimization in Electrical Engineering*, Springer, 2019.
- [22] W. Ongsakul i N. D. Vo, *Artificial Intelligence in Power System Optimization*, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011.
- [23] R. Chiong, *Nature-Inspired Algorithms for Optimisation*, Berlin: Springer, 2009.
- [24] S. A.-H. Soliman i A.-A. H. Mantawy, *Modern Optimization Techniques with Applications in Electric Power Systems*, Springer, 2012.
- [25] E. Cuevas, B. E. Espejo i C. A. Enríquez, *Metaheuristics Algorithms in Power Systems Studies in Computational Intelligence*, Switzerland: Springer, 2019.

- [26] A. Kaveh i I. M. Ghazaan, *Meta-heuristic Algorithms for Optimal Design of Real-Size Structures*, Springer International Publishing, 2018.
- [27] D. Goldberg i J. Holland , »Genetic algorithms and machine learning,« *Mach Learn*, svez. 3, p. 95–99, 1988.
- [28] R. Storn i K. Price, »Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces,« *J Global Optim*, svez. 11, p. 341–359, 1997.
- [29] I. Rechenberg, »Evolution strategy: optimization of technical systems by means of biological evolution,« *Fromman-Holzboog*, svez. 104, p. 15–16, 1973.
- [30] L. Fogel, A. Owens i M. Walsh, *Artificial intelligence through simulated evolution*, Wiley, 1966.
- [31] D. Simon, »Biogeography-based optimization,« *Evol Comput IEEE Trans*, svez. 12, p. 702–713, 2008.
- [32] A. Colorni, M. Dorigo i V. Maniezzo, »Distributed optimization by ant colonies,« u *Proceedings of the first European conference on artificial life*.
- [33] R. Eberhart i J. Kennedy, »A new optimizer using particle swarm theory,« u *Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science*, 1995.
- [34] D. Karaboga i B. Basturk, »A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm,« *J Global Optim*, svez. 39, p. 459–471, 2007.
- [35] X. Yang i S. Deb, »Cuckoo search via Lévy flights,« *Nature & biologically inspired computing*, p. 210–214, 2009.
- [36] X. Yang, *Engineering optimization: an introduction with metaheuristic applications*, Wiley, 2010.
- [37] X. Yang , »A new metaheuristic bat-inspired algorithm,« *Nature inspired cooperative strategies for optimization*, svez. 284, p. 65–74, 2010.

- [38] A. Kaveh i N. Farhoudi, »A new optimization method: dolphin echolocation,« *Adv Eng Software*, svez. 59, p. 53–70, 2013.
- [39] A. Kaveh i A. Zolghadr, »Cyclical parthenogenesis algorithm for guided modal strain energy based structural damage detection,« *Appl Soft Comput*, svez. 57, p. 250–264, 2017.
- [40] S. Kirkpatrick, C. Gelatt i M. Vecchi, »Optimization by simulated annealing,« *Science*, svez. 220, p. 671–680, 1983.
- [41] A. Kaveh i S. Talatahari, »A novel heuristic optimization method: charged system search,« *Acta Mech*, svez. 213, br. 3, p. 267–289, 2010.
- [42] A. Kaveh i M. Khayatazad, »A new meta-heuristic method: ray optimization,« *Comput Struct*, svez. 112, p. 283–294, 2012.
- [43] A. Kaveh i T. Bakhshpoori, »Water evaporation optimization: a novel physically inspired optimization algorithm,« *Comput Struct*, svez. 167, p. 69–85, 2016.
- [44] A. Kaveh i A. Dadras, »A novel meta-heuristic optimization algorithm: thermal exchange optimization,« *Adv Eng Softw*, svez. 110, p. 69–84, 2017.
- [45] I. Fister, X.-S. Yang, J. Brest i D. Fister, »A Brief Review of Nature-Inspired Algorithms for Optimization,« *ELEKTROTEHNIŠKI VESTNIK*, svez. 80, br. 3, p. 1–7, 2013.
- [46] K. B. Panigrahi, A. Abraham i S. Das, *Computational Intelligence in Power Engineering*, Berlin: Springer, 2010.
- [47] M. G. Platt, X.-S. Yang i J. A. Silva Neto, *Computational Intelligence, Optimization and Inverse Problems with Applications in Engineering*, Springer, 2019.
- [48] J. Radosavljević, *Metaheuristic Optimization in Power Engineering*, The Institution of Engineering and Technology, 2018.
- [49] O. Bozorg-Haddad, M. Solgi i H. A. Loáiciga, *Meta-Heuristic and Evolutionary Algorithms for Engineering Optimization*, John Wiley & Sons, 2017.
- [50] X. Yang, »A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm,« u *Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2010)*, svez. 284, Springer, 2010, pp. 64-74.

- [51] T. Jayabarathi, T. Raghunathan i A. H. Gandomi, »The Bat Algorithm, Variants and Some Practical Engineering Applications: A Review,« u *Nature-Inspired Algorithms and Applied Optimization*, Springer, 2018, pp. 313-330.
- [52] B. R. Adarsh , T. Raghunathan, T. Jayabarathi i X. S. Yang, »Economic dispatch using chaotic bat algorithm,« *Energy*, svez. 96, p. 666e675, 2016.
- [53] A. H. Gandomi i X.-S. Yang, »Chaotic bat algorithm,« *Journal of Computational Science*, svez. 5, br. 2, pp. 224-232, 2014.
- [54] A. R. Jordehi, »Chaotic bat swarm optimisation (CBSO),« *Applied Soft Computing*, svez. 26, pp. 523-530, 2015.
- [55] M. Golub, Poboljšavanje djelotvornosti paralelnih genetskih algoritama, Disertacija: FER, 2001.
- [56] G. Wang, L. Guo, H. Duan, L. Liu i H. Wang, »A Bat Algorithm with Mutation for UCAV Path Planning,« *The Scientific World Journal*, pp. 1-15, 2012.
- [57] M. H. Khooban i T. Niknam, »A new intelligent online fuzzy tuning approach for multi-area load frequency control: Self Adaptive Modified Bat Algorithm,« *Electrical Power and Energy Systems*, svez. 71, p. 254–261, 2015.
- [58] C. Sravanthi i D. Karthikaikannan, »Optimal Reactive Power Dispatch Using Directional Bat Algorithm,« u *International Conference on Intelligent Computing and Applications*, Springer, 2019, pp. 311-320.
- [59] P. Subbaraj i P. N. Rajnarayanan, »Optimal reactive power dispatch using self-adaptive real coded genetic algorithm,« *Electrical Power Systems research*, svez. 79, p. 374–381, 2009.
- [60] M. Varadarajan i K. S. Swarup, »Differential evolutionary algorithm for optimal reactive power dispatch,« *Electrical Power and Energy Systems*, svez. 30, p. 435–441, 2008.
- [61] R. P. Singh, V. Mukherjee i S. P. Ghoshal, »Optimal reactive power dispatch by particle swarm optimization with an aging leader and challengers,« *Applied soft computing*, svez. 29, p. 298–309, 2015.

- [62] A. Shukla i S. N. Singh, »Pseudo-inspired CBA for ED of units with valve-point loading effects and multi-fuel options,« *IET Generation, Transmission & Distribution*, svez. 11, br. 4, p. 1039–1045, 2017.
- [63] B. . V. Rao i G. N. Kumar, »Optimal power flow by BAT search algorithm for generation reallocation with unified power flow controller,« *Electrical Power and Energy Systems*, svez. 68, p. 81–88, 2015.
- [64] T.-K. Dao, T.-S. Pan, T.-T. Nguyen i S.-C. Chu, »Evolved Bat Algorithm for Solving the Economic Load Dispatch Problem,« u *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, 2015, pp. 109-119.
- [65] H. Liang, Y. Liu, Y. Shen, F. Li i Y. Man, »A Hybrid Bat Algorithm for Economic Dispatch With Random Wind Power,« *IEEE Transactions on Power Systems*, svez. 33, br. 5, pp. 5052 - 5061, 2018.
- [66] L. A. Wulandhari, S. Komsiyah i W. Wicaksono, »Bat Algorithm Implementation on Economic Dispatch Optimization Problem,« *Procedia Computer Science*, svez. 135, pp. 275-282, 2018.
- [67] E. S. Ali, »Optimization of Power System Stabilizers using BAT search algorithm,« *Electrical Power and Energy Systems*, svez. 61, p. 683–690, 2014.
- [68] D. K. Sambariya i R. Prasad, »Robust tuning of power system stabilizer for small signal stability enhancement using metaheuristic bat algorithm,« *Electrical Power and Energy Systems*, svez. 61, p. 229–238, 2014.
- [69] K. Basetti i A. K. Chandel, »Optimal PMU placement for power system observability using Taguchi binary bat algorithm,« *Measurement*, svez. 95, p. 8–20, 2017.
- [70] M. Ravindra i R. S. Rao, »An upgraded binary bat algorithm approach for optimal allocation of PMUs in power system with complete observability,« *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, svez. 4, br. 10, pp. 33-39, 2017.
- [71] B. Gou, »Generalized Integer Linear Programming Formulation for Optimal PMU Placement,« *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, svez. 23, br. 3, pp. 1099-1104, 2008.

- [72] N. C. Yang i M. D. Le, »Optimal design of passive power filters based on multi-objective bat algorithm and pareto front,« *Appl. Soft Comput*, svez. 35, p. 257–266, 2015.
- [73] B. Bahmani-Firouzi i R. Azizipanah-Abarghooee, »Optimal sizing of battery energy storage for micro-grid operation management using a new improved bat algorithm,« *Electrical Power and Energy Systems*, svez. 56, p. 42–54, 2014.
- [74] S. K. Sudabattula i M. Kowsalya, »Optimal allocation of solar based distributed generators in distribution system using Bat algorithm,« *Perspectives in Science*, svez. 8, p. 270—272, 2016.
- [75] K. Kaced, C. Larbes, N. Ramzan, M. Bounabi i Z. Dahmane, »Bat algorithm based maximum power point tracking for photovoltaic system under partial shading conditions,« *Solar Energy*, svez. 158, p. 490–503, 2017.
- [76] A. KAZEMI, A. MOHAMED, H. SHAREEF i H. ZAYANDEHROODI, »A Review of Power Quality Monitor Placement Methods in Transmission and Distribution Systems,« *Przeglad Elektrotechniczny*, svez. 89, br. 3, pp. 185-188, 2013.
- [77] G. Olguin i M. Bollen, »Optimal dips monitoring program for characterization of transmission system,« u *2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting (IEEE Cat. No.03CH37491)*, Toronto, 2003.
- [78] G. OLGUIN, Voltage Dip (Sag) Estimation in Power Systems based on Stochastic Assessment and Optimal Monitoring, Göteborg: Disertacija, 2005.
- [79] C. F. M. Almeida i N. Kagan, »Using Genetic Algorithms and Fuzzy Programming to Monitor Voltage Sags and Swells and Swells,« *IEEE Intelligent Systems*, svez. 26, br. 2, pp. 46 - 53, 2011.
- [80] G. Olguin, F. Vuinovich i H. J. Bollen, »An Optimal Monitoring Program for Obtaining Voltage Sag System Indexes,« *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, svez. 21, br. 1, pp. 378-384, 2006.
- [81] K. Mazlumi, A. A. Abyaneh, Y. Gerivani i I. R. Pordanjani, »A New Optimal Meter Placement Method for Obtaining a Transmission System Indices,« u *2007 IEEE Lausanne Power Tech*, Lausanne, 2007.

- [82] M. Haghbin i E. Farjah, »Optimal placement of monitors in transmission systems using fuzzy boundaries for voltage sag assessment,« u *2009 IEEE Bucharest PowerTech*, Bucharest, 2009.
- [83] E. Espinosa-Juarez, J. Lucio i A. Hernández, »Analysis of Distributed Generation Impact on the Optimal Location of Voltage Sag Monitors by Applying Genetic Algorithms,« u *2009 Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA)*, Cuernavaca, 2009.
- [84] A. A. Ibrahim, A. Mohamed, H. Shareef i S. P. Ghoshal, »Optimal Placement of Voltage Sag Monitors Based on Monitor Reach Area and Sag Severity Index,« u *2010 IEEE Student Conference on Research and Development (SCOReD)*, Putrajaya, 2010.
- [85] S. García-Martínez, E. Espinosa-Juárez i A. Hernández, »Analysis of System Operation State Influence on the Optimal Location of Voltage Sag Monitors by Applying Tabu Search,« u *North American Power Symposium 2010*, Arlington, 2010.
- [86] A. A. Ibrahim, A. Mohamed, H. Shareef i S. P. Ghoshal, »Optimal Power Quality Monitor Placement in Power Systems Based on Particle Swarm Optimization and Artificial Immune System,« u *Conference on Data Mining and Optimization*, Selangor, 2011.
- [87] A. A. Ibrahim, A. Mohamed i H. Shareef, »A Novel Quantum-inspired Binary Gravitational Search Algorithm in Obtaining Optimal Power Quality Monitor Placement,« *Journal of Applied Sciences*, svez. 12, br. 9, pp. 822-830, 2012.
- [88] W. L. Ai, H. Shareef, A. Mohamed i A. A. Ibrahim, »Application of Binary Firefly Algorithm for Optimal Power Quality Monitor Positioning,« u *7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2013)*, Langkawi, 2013.
- [89] A. A. Ibrahim, A. Mohamed i H. Shareef, »Optimal power quality monitor placement in power systems using an adaptive quantum-inspired binary gravitational search algorithm,« *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, svez. 57, pp. 404-413, 2014.
- [90] A. A. Ibrahim, A. Mohamed, H. Shareef i S. Ghoshal, »Optimal placement of power quality monitors in distribution systems using the topological monitor reach area,« u *Proceedings of the international electric machines and drives conference*, Niagara Falls, 2011.

- [91] A. A. Ibrahim, A. Mohamed, H. Shareef i S. Ghoshal , »An effective power quality monitor placement method utilizing quantum inspired particle swarm optimization,« u *Proceedings of the international conference on electrical engineering and informatics*, Bandung, 2011.
- [92] R. Ismail, D. M. Said, N. Ahmad, M. P. Abdullah, M. Y. Hassan i A. O. Idris, »Optimization Method for Voltage Sag Monitor Placement in Power System,« *International Journal of Electrical Engineering and Applied Sciences*, svez. 1, br. 1, pp. 71-79, 2018.
- [93] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili i X.-S. Yang, »Binary bat algorithm,« *Neural Comput & Applic*, svez. 25, br. 3, p. 663–681, 2013.
- [94] S. Mirjalili i A. Lewis, »S-shaped versus V-shaped transfer functions for binary Particle Swarm Optimization,« *Swarm and Evolutionary Computation*, svez. 9, p. 1–14, 2013.
- [95] GNU Linear Programming Kit, Reference Manual, 2013.
- [96] R. N. Sengupta, A. Gupta i J. Dutta, *Decision science theory and practice*, CRC Press, 2017.
- [97] J. Kozak, *Decision Tree and Ensemble Learning Based on Ant Colony Optimization*, Springer, 2019.
- [98] L. Rokach i O. Maimon, »Top-Down Induction of Decision Trees Classifiers A Survey,« *IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN AND CYBERNETICS*, svez. 1, br. 11, pp. 1-12, 2002.
- [99] R. C. Barros, A. C. Carvalho i A. A. Freitas, *Automatic Design of Decision-Tree Induction Algorithms*, Springer, 2015.
- [100] I. Šošić, *Primijenjena statistika*, Zagreb: Školska knjiga, 2006.



## Popis slika

Slika 2. 1. Naponski propad. ....	6
Slika 2. 2. Trofazni kratki spoj (lijevo), desno dvofazni kratki spoj (desno).....	7
Slika 2. 3. Dvofazni kratki spoj uz istovremeni dodir sa zemljom (lijevo),.....	8
Slika 2. 4. Udio u ukupnom broju svih kratkih spojeva. ....	8
Slika 2. 5. Jednofazna shema trofaznog simetričnog sustava .....	9
Slika 2. 6. Ekvivalentne sheme za direktni, inverzni i nulti sustav [9, p. 142]. ....	10
Slika 2. 7. Jednofazni kratki spoj u uzemljenoj mreži. ....	13
Slika 2. 8. Ekvivalentna shema jednofaznog kratkog spoja s slijedim impedancijama. ....	14
Slika 2. 9. Dvofazni kratki spoj.....	15
Slika 2. 10. Ekvivalentni strujni krug dvofaznog kratkog spoja. ....	16
Slika 2. 11. Dvofazni kratki spoj uz istovremeni dodir s zemljom. ....	17
Slika 2. 12. Ekvivalentni strujni krug dvofaznog dozemnog kratkog spoja .....	18
Slika 2. 13. Trofazni kratki spoj.....	19
Slika 2. 14. Ekvivalentni strujni krug trofaznog kratkog spoja.....	19
Slika 2. 15. Spoj transformatora YNyn i spoj nultog slijeda.....	25
Slika 2. 16. Spoj transformatora YNy i spoj nultog slijeda.....	25
Slika 2. 17. Propagacija naponskog propada preko transformatora. ....	28
Slika 2. 18. Naponski signali sabirnice 11 kV i sabirnice 0,4 kV kod trofaznog kratkog spoja. ...	30
Slika 2. 19. Efektivne vrijednosti napona sabirnice 11 kV i 0,4 kV, kod trofaznog kratkog spoja. .....	30
Slika 2. 20. Naponski signali sabirnice 11 kV i sabirnice 0,4 kV kod jednofaznog kratkog spoja. .....	31
Slika 2. 21. Efektivne vrijednosti napona sabirnice 11 kV i 0,4 kV, kod jednofaznog kratkog spoja. .....	31
Slika 3. 1. IEEE 39 sabirnički testni sustav.....	33
Slika 3. 2. Opći model opterećena u PowerFactory. ....	36
Slika 3. 3. Uravnoteženo opterećenje spojeno u trokut.....	36
Slika 3. 4. Model pozitivnog slijeda dvonamotnog transformatora (u ohmima). ....	38
Slika 3. 5. Model pozitivnog slijeda dvonamotnog transformatora (u jediničnoj vrijednosti p.u.). .....	38
Slika 3. 6. Odabir parametara transformatora. ....	40

Slika 3. 7. Sinkroni stroj i ekvivalentni strujni dijagram. ....	42
Slika 4. 1. Prostro pretraživanja dvodimenzionalnog optimizacijskog problema s ograničenjima. ....	49
Slika 4. 2. Globalni i lokalni maksimum funkcije.....	50
Slika 4. 3. Standardna shema običnog algoritma, K predstavlja broj iteracija. ....	51
Slika 4. 4. Veza između simulacijskog modela i optimizacijskog algoritma.....	53
Slika 4. 5. Glavne komponente optimizacije meta-heurističkim algoritmima.....	53
Slika 4. 6. Dijagram toka algoritma šišmiša.....	57
Slika 5. 1. izloženo područje sabirnice 2 za napone 0,5 i 0,7 p.u. ....	63
Slika 7. 1. Prisiljavanje kretanja čestica u binarnom prostoru .....	72
Slika 7. 2. Sustav sedam sabirnica i dva fazorska mjerna uređaja. ....	78
Slika 7. 3. Dijagram toka unaprijeđenog binarnog algoritma šišmiša .....	80
Slika 7. 4. Krivulja konvergencije za trofazni kratki spoj.....	82
Slika 7. 5. Jednofazni kratki spoj na sabirnici 19 (lijevo) i sabirnici 20 (desno) .....	84
Slika 7. 6. Krivulja konvergencije kod jednofaznih kratkih spojeva. ....	86
Slika 7. 7. Krivulja konvergencije za jednofazne i trofazne kratke spojeve. ....	89
Slika 8. 1. Stablo odlučivanje.....	92
Slika 8. 2. Dijagram toka regresijske analize. ....	96

## Popis tablica

Tablica 2. 1. Tablica prikazuje potenciju i funkciju operatora „a“ .....	11
Tablica 2. 2. Naponski propadi po ABC klasifikaciji. ....	26
Tablica 2. 3. Naponski propada na višoj i nižoj naponskoj razini ovisno o vrsti kvara. ....	28
Tablica 2. 4. Naponski propada u ovisnosti o vrsti spoja transformatora. ....	29
Tablica 2. 5. Ovisnost Tipa naponskog propada o vrsti kratkog spoja i spoju tereta.....	29
Tablica 3. 1. Spoj generatora na sabirnice, .....	34
Tablica 3. 2. Raspored opterećenja u sustavu, radna i jalova snaga .....	34
Tablica 3. 3. Spoj transformatora na sabirnice.....	35
Tablica 3. 4. Spoj generatora na sabirnice, vrsta rada generatora, nazivnu snagu i napon jedinične vrijednosti.....	41
Tablica 4. 1. Pseudo kôd algoritma šišmiša .....	55
Tablica 4. 2. Karakteristike algoritma šišmiša u usporedbi s općim algoritmom .....	57
Tablica 4.3. Usporedba za gubite radne snage na IEEE 14 sabirničkom sustavu .....	59
Tablica 4. 4. Usporedba za gubite radne snage na IEEE 57 sabirničkom sustavu .....	59
Tablica 6. 1. Predložene sabirnice na koje se trebaju instalirati uređaji za mjerenje naponskih propada .....	66
Tablica 6. 2. Napon na sabirnicama u ovisnosti o mjestu kvara. ....	66
Tablica 6. 3. Binarni zapis matrice dosega područje mjernog uređaja. ....	67
Tablica 7. 1. Pseudo kod binarnog algoritma šišmiša .....	72
Tablica 7. 2. Dio sabirnica sustava IEEE 39 sabirničkog testnog sustava i preostali naponi prema IEC 60909 normi ovisno o mjestu kratkog spoja. ....	75
Tablica 7. 3. Binarna matrica tablice 7.2.....	75
Tablica 7. 4. Težinske koeficijente izloženog područja za sve sabirnice IEEE 39 sabirničkog sustava kod trofaznog kratkog spoja. ....	76
Tablica 7. 5. Područje dosega nadziranja mjernog uređaja na sabirnici 3 za granični napon 0,9 p.u. ....	79
Tablica 7. 6. Usporedba rješenja za optimalan razmještaj i broj uređaja za mjerenje naponskih propada kod trofaznih kratkih spojeva. ....	83

Tablica 7. 7. Težinski koeficijenti izloženog područja IEEE 39 sabirničkog sustava kod jednofaznog kratkog spoja za naponski prag 0,9 p.u. ....	85
Tablica 7. 8. Usporedba rješenja za optimalan razmještaj i broj uređaja za mjerenje naponskih propada kod jednofaznih kratkih spojeva.....	87
Tablica 7. 9. Težinski koeficijenti izloženog područja kod jednofaznih i trofaznih kratkih spojeva. ....	88
Tablica 7. 10. Usporedba rezultata optimalnog broja i lokacije mjernih uređaja. ....	89
Tablica 8. 1. Pseudo koda algoritma odozgor prema dolje .....	93
Tablica 8. 2. Predviđene i stvarne vrijednosti vodova na kojima je nastupio trofazni kratki spoj. ....	94
Tablica 8. 3. Usporedba rezultata klasifikacije vodova na kojima je nastupio kratki spoj. ....	95
Tablica 8. 4. Stvarno mjesto kvara i predviđeno mjesto kvara linearnom regresijom. ....	99
Tablica 8. 5. Predviđene vrijednosti kvara na dužini voda s 39 i 14 mjernih uređaja .....	100
Tablica 8. 6. Usporedbu s 39, 14 i 13 uređaja za određivanje naponskih propada. ....	101
Tablica 8. 7. Predviđene vrijednosti za vod 33 (Line 26-29).....	102

## Sažetak

U doktorskom radu predstavljen je binarni algoritam šišmiša, unaprijeđen s težinskim koeficijentom izloženog područja sabirnica sustava, za određivanje optimalne lokacije i broja mjernih uređaja za mjerenje naponskih propada. Navedeni algoritam je razvijen u Matlabu. Predloženi algoritam koristi matricu područja doseg nadziranja, koja se kreira simulacijama kratkih spojeva u testnom sustavu i na temelju određenog napona praga, pretvara se u binarni oblik. Jednofazni i trofazni kratki spojevi simulirani su u DigSilent softveru na IEEE 39-sabirničkom sustavu, korištenjem međunarodne norme IEC 60909.

Klasifikacija voda u kvaru provedena je algoritmom stabla odlučivanja, a mjesto kvara na vodu predviđeno je višestrukom linearnom regresijom. Predloženi unaprijeđeni binarni algoritam šišmiša uspješno je primijenjen za određivanje optimalnog broja i lokacije uređaja za mjerenje naponskih propada na IEEE 39-sabirničkom sustavu za trofazne i jednofazne kratke spojeve.

Ključne riječi: binarni algoritam šišmiša, optimalna lokacija, uređaji za mjerenje naponskih propada, algoritam stabla odlučivanja, linearna regresija.

## **Abstract**

The doctoral thesis presents upgraded binary bat algorithm with a coefficient of the exposed area of the system bus, for determining the optimal location and the optimal number of voltage dip measuring devices. This algorithm is developed in Matlab. The proposed algorithm uses a monitor reach area matrix that is created by the short-circuit simulations in the test system and transformed into a binary matrix based on a given voltage threshold. Single-phase and three-phase short circuits are simulated in DigSilent software on the IEEE 39 bus test system, using International Standard IEC 60909.

The classification of the faulted line was carried out by the decision tree algorithm, and the location of the failure on the transmission line was predicted by multiple linear regression. Proposed upgraded binary bat algorithm has been successfully applied for determining optimal allocation and number of voltage dip monitors on IEEE 39 bus test system for three-phase and single-phase short circuits.

**Keywords:** binary bat algorithm, optimal location, voltage dip measuring devices, decision tree algorithm, linear regression.

## Životopis

Mario Šipoš rođen je u Virovitici 11. veljače 1986. godine. Osnovnu školu završio je u Virovitici, a Tehničku školu 2004. godine u Virovitici. Nakon godinu dana upisuje sveučilišni diplomski studij elektrotehnike Elektrotehničkog fakulteta u Osijeku.

Diplomski studij završava 2010. godine. Kao vojni stipendista po završetku diplomskog studija prolazi temeljnu vojnu obuku u Požegi. Temeljnu časničku izobrazbu završava 2012. godine, nakon koje upisuje poslijediplomski doktorski studij znanstvenog polja elektrotehnike, smjera elektroenergetika.

Od kraja srpnja 2012. godine do rujna 2016. godine obnaša dužnost zapovjednika zapovjednog voda Topničko-raketne bojne u Samohodno haubičkoj bitnici u Bjelovaru. U navedenom periodu, pismeno je pohvaljen od strane zapovjednika brigade za svoj rad i doprinos Oružanim snagama Republike Hrvatske (OSRH).

Od rujna 2016. godine dobiva postavljenje na mjesto časnika za znanost i razvoj u Centru za obrambene i strateške studije HVU-a "Dr. Franjo Tuđman". Sudjeluje u radu NATO-STO, kao pomoćnik nacionalnog koordinatora te je bio član međunarodnih ekspertnih timova: SAS-119 „Energy and Defence: Reducing Dependencies & Vulnerabilities – Enhancing Efficiency“ i SET-ET-097 "Integration of Energy Sources into a NATO Tactical Power Grid".

Bio je predstavnik RH na NATO STO ekspertnoj radionici, „Technology Trends Workshop #1“ RTG - Neuilly-sur-Seine, Francuska, održanoj 27. i 28. veljače 2018. godine. Pismeno je pohvaljen od strane zapovjednika Hrvatskog vojnog učilišta "Dr. Franjo Tuđman" za svoj rad i doprinos OSRH.

Do sada je objavio četiri znanstvena rada u časopisima koji su blisko vezana uz temu doktorske disertacije:

1. Znanstveni radovi u časopisima citiranim u bazi SCI-Exp. (A):

Šipoš, Mario; Klaić, Zvonimir; Fekete, Krešimir; Stojkov, Marinko. Review of Non-Traditional Optimization Methods for Allocation of Distributed Generation and Energy Storage in Distribution System. // Tehnički vjesnik. 25 (2018) , 1; 294-301 (pregledni rad, znanstveni).

2. Znanstveni radovi u časopisima indeksiranim u referalnim bazama (B):

Primorac, Mario; Šipoš, Mario; Klaić, Zvonimir. Improving energy efficiency in buildings using microgrids. // Electronic journal of the Faculty of Civil Engineering Osijek - e-GFOS. 6 (2015) , 11; 19-28 (članak, znanstveni).

3. Znanstveni radovi u drugim časopisima

Šipoš, Mario; Primorac, Mario; Klaić, Zvonimir. Demand Side Management inside a Smart House. // International journal of electrical and computer engineering systems. 6 (2015) , 2; 45-50 (pregledni rad, znanstveni).

4. Znanstveni radovi u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom

Stojkov, Marinko; Alinjak, Tomislav; Trupinić, Kruno; Klaić, Zvonimir; Topić, Danijel; Barić, Tomislav; Šipoš, Mario; Salkić, Hidajet. The Impact of Load's Phase Shift Changes on the Electric Arc Behavior in Switching Process // MEDPOWER 2018, 11th Mediterranean Conference on Power Generation. Dubrovnik, 2018. 1-6 (predavanje, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni).



## Prilozi

### Prilog a

Tablica 7. 6. Proračun koeficijenta izloženog područja.

k	j	Vod	km	%	km
1	2	Line 1-2	163,06	100,00	163,06
1	39	Line 1-39	99,18	100,00	99,18
2	3	Line 2-3	59,90	100,00	59,90
2	25	Line 2-25	34,12	100,00	34,12
3	4	Line 3-4	84,50	16,00	13,52
3	18	Line 3-18	52,76	28,00	14,77
4	5	Line 4-5	50,78	0,00	0,00
4	14	Line 4-14	51,18	0,00	0,00
5	6	Line 5-6	10,31	0,00	0,00
5	8	Line 5-8	44,43	0,00	0,00
6	7	Line 6-7	36,50	0,00	0,00
6	11	Line 6-11	32,53	0,00	0,00
7	8	Line 7-8	18,25	0,00	0,00
8	9	Line 8-9	144,02	0,00	0,00
9	39	Line 9-39	99,18	24,00	23,80
10	11	Line 10-11	17,06	0,00	0,00
10	13	Line 10-13	17,06	0,00	0,00
13	14	Line 13-14	40,07	0,00	0,00
14	15	Line 14-15	86,09	0,00	0,00
k	j	Vod	km	%	km
15	16	Line 15-16	37,29	0,00	0,00
16	17	Line 16-17	35,31	0,00	0,00
16	19	Line 16-19	77,36	0,00	0,00
16	21	Line 16-21	53,56	0,00	0,00
16	24	Line 16-26	23,04	0,00	0,00
17	18	Line 17-18	32,53	0,00	0,00
17	27	Line 17-27	68,63	0,00	0,00
21	22	Line 21-22	55,54	0,00	0,00
22	23	Line 22-23	38,08	0,00	0,00
23	24	Line 23-24	138,86	0,00	0,00
25	26	Line 25-26	128,15	17,00	21,79
26	27	Line 26-27	58,32	0,00	0,00
26	28	Line 26-28	188,05	0,00	0,00
26	29	Line 26-29	247,96	0,00	0,00
28	29	Line 28-29	59,90	0,00	0,00
		UDV	2383,56	DZV	430,14





