

# Analiza pouzdanost distributivne mreže korištenjem EasyPower alata.

---

Ramljak, Tomislav

Master's thesis / Diplomski rad

2022

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:600745>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-24**

*Repository / Repozitorij:*

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



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

**Sveučilišni studij**

**ANALIZA POUZDANOSTI DISTRIBUTIVNE MREŽE  
KORIŠTENJEM EASYPOWER ALATA**

**Diplomski rad**

**Tomislav Ramljak**

**Osijek, 2022.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit

Osijek, 12.09.2022.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit**

<b>Ime i prezime Pristupnika:</b>	Tomislav Ramljak
<b>Studij, smjer:</b>	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
<b>Mat. br. Pristupnika, godina upisa:</b>	D-1347, 11.10.2020.
<b>OIB studenta:</b>	24407763961
<b>Mentor:</b>	Prof.dr.sc. Srete Nikolovski
<b>Sumentor:</b>	,
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	Izv. prof. dr. sc. Krešimir Fekete
<b>Član Povjerenstva 1:</b>	Prof.dr.sc. Srete Nikolovski
<b>Član Povjerenstva 2:</b>	Ružica Kljajić, mag. ing. el.
<b>Naslov diplomskog rada:</b>	Analiza pouzdanost distributivne mreže korištenjem EasyPower alata.
<b>Znanstvena grana diplomskog rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak diplomskog rada:</b>	Proučiti modul za izračun pouzdanosti distributivnih mreža korištenjem EasyPower programa. Sagledati sve elemente i potrebne ulazne podatke i izračun pouzdanosti. Definirati pokazatelje pouzadnosti za zadanu Test mrežu.
<b>Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):</b>	Vrlo dobar (4)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
<b>Datum prijedloga ocjene od strane mentora:</b>	12.09.2022.
Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:	<i>Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.</i>
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 28.09.2022.

Ime i prezime studenta:	Tomislav Ramljak
Studij:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
Mat. br. studenta, godina upisa:	D-1347, 11.10.2020.
Turnitin podudaranje [%]:	14

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Analiza pouzdanost distributivne mreže korištenjem EasyPower alata.**

izrađen pod vodstvom mentora Prof.dr.sc. Srete Nikolovski

i sumentora ,

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Predmet istraživanja.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Svrha i cilj istraživanja.....</b>	<b>1</b>
<b>1.3. Struktura rada.....</b>	<b>1</b>
<b>2. PREGLED PODRUČJA TEME.....</b>	<b>2</b>
<b>3. POUZDANOST .....</b>	<b>3</b>
<b>3.1. Osnove teorije pouzdanosti .....</b>	<b>3</b>
<b>3.2. Model pouzdanosti komponente .....</b>	<b>5</b>
3.2.1. Model neobnovljivih komponenti.....	5
3.2.2. Model obnovljivih komponenti .....	7
<b>3.3. Metode za proračun pouzdanosti .....</b>	<b>10</b>
3.3.1. Monte Carlo simulacijska metoda .....	10
3.3.2. Markovljev model.....	15
3.3.3. Model stabla kvara.....	19
<b>3.4. Pokazatelji pouzdanosti.....</b>	<b>20</b>
3.4.1. Statistički i raspodijeljeni pokazatelji pouzdanosti .....	21
3.4.2. Pokazatelji pouzdanosti orijentirani potrošačima .....	22
3.4.3. Pokazatelji pouzdanosti orijentirani opterećenju i energiji .....	23
3.4.4. Pokazatelji pouzdanosti s obzirom na podjelu prema hijerarhijskim razinama .....	24
<b>4. ANALIZA POUZDANOSTI KORIŠTENJEM EASYPOWER ALATA.....</b>	<b>28</b>
<b>4.1. Easy Power programski alat .....</b>	<b>28</b>
<b>4.2. Analiza pouzdanosti korištenjem modula u EasyPower-u.....</b>	<b>29</b>
<b>4.3. Rezultati simulacije.....</b>	<b>32</b>
<b>5. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>39</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>40</b>
<b>ŽIVOTOPIS.....</b>	<b>45</b>

# **1. UVOD**

## **1.1. Predmet istraživanja**

Proizvodnja električne energije, prijenos i distribucija do njenih potrošača jest glavni zadatak elektroenergetskog sustava, uz ostvarivanje zadovoljavajućeg stupnja kvalitete napona i frekvencije. Da bi se taj slijed ostvario, sam elektroenergetski sustav kao i svi njegovi dijelovi i komponente moraju raditi pouzdano. Kako su elektroenergetski sustavi izloženi kvarovima i poremećajima moraju se vršiti analize pouzdanosti, pa je ta analiza pouzdanosti upravo predmet istraživanja ovog rada.

## **1.2. Svrha i cilj istraživanja**

Naučiti osnovne pojmove koji su vezani za pouzdanost i osnove analize te pokazati kako uz pomoć EasyPower alata na primjeru realne distributivne mreže lako možemo proračunati pouzdanost jedne mreže je svrha i cilj ovog rada.

## **1.3. Struktura rada**

Ovaj rad sačinjavaju četiri glavna poglavlja. Nakon uvodnog poglavlja, slijedi drugo poglavlje u kojem je opisan pregled područja teme. U trećem poglavlju predstavljene su glavni pojmovi vezani za pouzdanost EES-a. U četvrtom zadnjem poglavlju koje čini glavninu ovog rada osvrnuto se na dosta dobre mogućnosti primjene modula za vršenje analize pouzdanosti realnog EES-a. Nakon četvrtog poglavlja slijedi zaključak rada.

## 2. PREGLED PODRUČJA TEME

Prema [2], opisana je osnovna teorija o pouzdanosti sa njenom podjelom te su dani uvodi za metode proračuna. U [6] i [2] pojašnjeni su modeli komponente. Prema [7] i [9] dodatno je opisana Monte-Carlo simulacijska metoda, a u [1] je pojašnjen Markovljev model za proračun pouzdanosti na kojem se zasniva rad programa EasyPower te je također opisana i metoda stabla kvara. Zatim je navedena podjela pokazatelja pouzdanosti prema [1],[4] i [7].

Ovaj rad je napisan jednostavnim jezikom koji se nastavlja na matematički prikaz metoda. Energetičari, istraživači i studenti će imati korist od jednostavnih primjera olakšavajući razumijevanje teorije iza pouzdanosti elektroenergetskog sustava.

### 3. POUZDANOST

Komponenta je dio opreme, koji nije dalje podijeljen za namjenu analize. Sustav je grupa komponenti koje su povezane da bi obavljale određenu funkciju ili više njih. [1] Postoji mnogo definicija pouzdanosti, a u ovom radu je navedena sljedeća:

Pouzdanost sustava ili njegove komponente predstavlja matematičku vjerojatnost da će komponenta ili sustav tijekom predviđenog vremenskog perioda raditi zadovoljavajuće uz utvrđene radne uvjete. [2]

Zbog svoje velike složenosti stavlja se zahtjev na elektroenergetski sustav da se naprave pojednostavljenja zbog nemogućnosti analiziranja njegove pouzdanosti kao cjeline u vidu razdvajanja na proizvodne, prijenosne i distribucijske podsustave. [2] Preko 90% prekida koji se javljaju prema potrošačima su uzrokovani kvarovima na distribucijskom dijelu mreže, [3] zbog toga je pri analizi pouzdanosti sustava pažnju potrebno usmjeriti na dio distribucijske mreže.

#### 3.1. Osnove teorije pouzdanosti

Teorija pouzdanosti je složena znanstvena disciplina utemeljena na matematičkoj statistici i teoriji vjerojatnosti, a primjenjuje se u koracima planiranja, projektiranja, uporabe i proizvodnje tehničkih sustava. Ono čime se teorija pouzdanosti bavi su razvoj modela i matematičkih metoda za procjenu raspoloživosti i pouzdanosti komponenti i sustava u cjelini, metodama za uvećanje pouzdanosti i utvrđivanje zakonitosti nastanka događaja koji su štetni te metode za predviđanje ponašanja komponente u budućnosti. [2] Kako je ova disciplina povezana sa svim ostalim granama znanosti, u ovom radu bavit će se njenom primjenom u elektroenergetici.

Premda je matematička vjerojatnost mjera za pouzdanost, da se primijetiti da definirana pouzdanost sadržava četiri pojma [2]:

- matematička vjerojatnost
- vrijeme promatranja
- definirani radni uvjeti
- kriterij zadovoljavajućeg rada



Uvođenjem pojma pouzdanosti elektroenergetskog sustava onda je to vjerojatnost da je sustav spreman za isporuku električne energije krajnjim potrošačima u određenom razdoblju vremena uz poželjne radne uvjete (frekvenciju i napon). [2]

Pojam pouzdanosti ima širok opseg značenja i dijeli se na sljedeće skupine prikazane na slici ispod (Slika 3.1) :



Slika 3.1 Skupna podjela pouzdanosti [2]

Statička pouzdanost (dostatnost) definira se kao sposobnost elektroenergetskog sustava da opskrbljuje potrošače električnom energijom i snagom s nazivnim vrijednostima naponskih ograničenja i opterećenja komponenti pri uzimanju u obzir neplanirane i planirane zastoje komponenti u sustavu. Naziv statička pouzdanost se koristi iz razloga ne uključivanja dinamičkih i prijelaznih poremećaja sustava. [2]

Dinamička pouzdanost predstavlja sposobnost elektroenergetskog sustava da se suprotstavi nenadanim poremećajima kao što su iznenadni ispadi elemenata nastali kvarovima u elektroenergetskom sustavu. [2] Najčešće su to poremećaji koji se odnose na ispade velikih proizvođača iz sustava te ispadi bitnijih vodova iz pogona uzrokovanih kratkim spojevima i slično, što u krajnjem slučaju dovodi do nestabilnosti frekvencije i napona u čitavom sustavu. [4] Isto je bitno napomenuti da je za definiranje oba ova pojma pouzdanosti uključuje vrijeme kao bitan faktor. [5]

Cjelovitost elektroenergetskog sustava se definira kao svojstvo tog sustava da uspijeva održati rad u interkonekciji sa ostalim elektroenergetskim sustavima. [2]

## 3.2. Model pouzdanosti komponente

Dvije su razine razmatranja pouzdanosti elektrotehničke opreme – komponenti i sustava. Komponente mogu biti vodovi, otpori ili grupe jedinica koja nije rastavljiva na sastavne dijelove. Sustav kao pojam podrazumijeva grupu komponenti povezanih tako da je omogućen rad istog. Temeljem statističkih podataka kvarovi mogu biti podijeljeni na sljedeće kategorije [6]:

- kvarovi komponentata u potpunosti
- kvarovi koji nastaju zbog postupnom degradacijom komponenti
- kvarovi koji nastaju fizičkom istrošenosti komponenti

Potpune kvarove se ne može predvidjeti i oni su definiraju izmjenom parametara koji uvjetuju kvalitetu komponenti. Kvarovi koji nastaju postupnom degradacijom javljaju se jer su kvalitete komponenti ovisne o vremenu i ti se kvarovi mogu otkloniti njihovim zamjenama. Kvarovi koji nastaju fizičkom istrošenosti komponenti mogu se predvidjeti temeljem karakteristika potrošenosti i preventivnom zamjenom izbjeći. [6]

### 3.2.1. Model neobnovljivih komponenti

Riječ „neobnovljivo“ većinom asocira na to da popravka i dalja upotreba nečeg nakon određenog kvara nisu mogući. Kako bi djelovanje komponenti kao takvih bilo shvaćeno, potrebno je definiranje njihovih funkcija. Prema [6], to su:

- 1) Funkcija nepouzdanosti (razdiobe kvarova) – vjerojatnost pojave kvarova prije isteka vremena  $t$ :

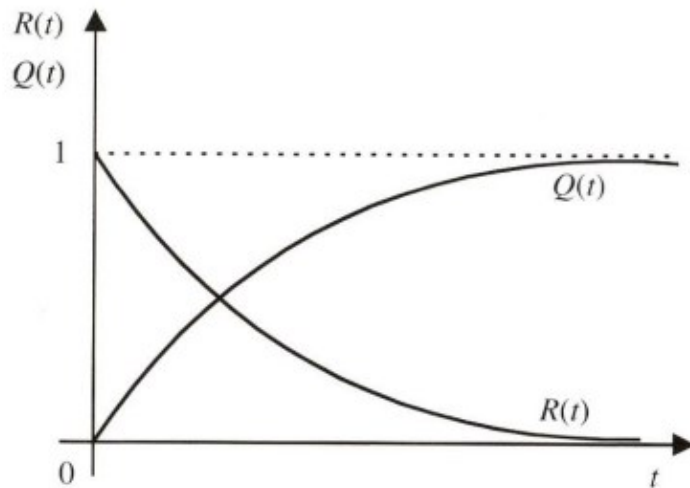
$$Q(t) = P\{\tau \leq t\} \quad (3.1.)$$

$\tau$  predstavlja vrijeme rada bez kvara komponenti.

Vjerojatnost pojave kvara komponenti prije isteka vremena  $t$  predstavlja Funkcija  $Q(t)$ .

- 2) Funkcija pouzdanosti – predstavlja funkciju koja određuje vjerojatnost rada bez kvarova na komponenti za vrijeme  $t$ . Slikom 3.2 su prikazane navedene funkcije:

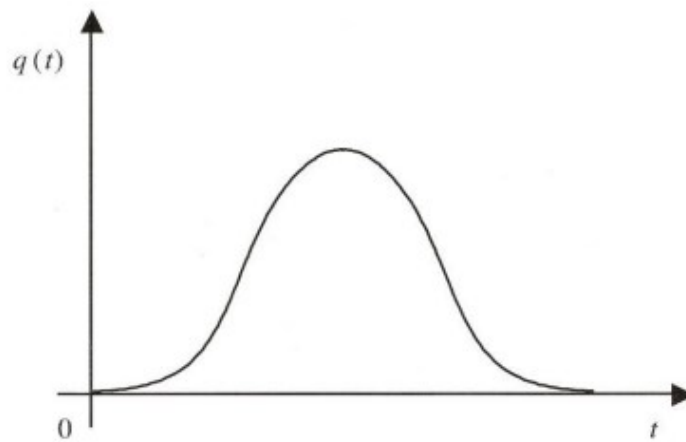
$$R(t) = 1 - Q(t) = 1 - P\{\tau \leq t\} = P\{\tau \geq t\} \quad (3.2.)$$



Slika 3.2 Odnos funkcije razdiobe kvara  $Q(t)$  i funkcije pouzdanosti  $R(t)$  [6]

- 3) Funkcija razdiobe vjerojatnosti kvara – ukupna brzina kojom pouzdanost komponenti opada ili ukupna brzina kojom se kvarovi zbivaju [2], prikazano slikom 3.3:

$$q(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (3.3.)$$



Slika 3.3 Funkcija razdiobe vjerojatnosti kvara komponente [6]

- 4) Intenzitet kvara – predstavlja vjerojatnost da će unutar intervala vremena  $(t, t + \Delta t)$  komponenta biti u kvaru, ako je u trenutku  $t=0$  (postavljanja u pogon) bila ispravna i ako je do  $t = t$  (čitav interval) ostala ispravna:

$$\lambda(t) = -\frac{q(t)}{R(t)} \quad (3.4.)$$

- 5) Srednje vrijeme do kvara komponente – se dobije kao matematička očekivanja slučajne varijable  $\tau$ :

$$T_0 = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (3.5.)$$

### 3.2.2. Model obnovljivih komponenti

Tip komponente sustava koja funkcionira ispravno do nekog trenutka  $t$  kada nastaje kvar te se tada toga izuzima iz pogona i popravlja ili zamjenjuje novom je obnovljiva komponenta. Nakon popravka komponenta se smatra novom, to jest njeno stanje identično stanju prije kvara. Prema tome je komponentu tijekom njenog životnog vijeka moguće pronaći u samo dva stanja, stanje rada i stanje popravke. [2]

Pretpostavka je da se ciklus trajanja popravka i ispravnog rada smatraju slučajnim varijablama s poznatim funkcijama razdiobe vjerojatnosti. To su najčešće eksponencijalne funkcije razdiobe. Elementi sustava koji čine grupu obnovljivih komponenti su transformatori, kabeli, vodovi, sabirnice, prekidači, i dr. Funkcija raspoloživosti  $A(t)$ , pojam uveden za analizu njihovog stanja, označava da će komponenta ili sustav raditi u promatranom trenutku kao matematičku vjerojatnost. [2]

Na slici 3.4 prikazan je period rada obnovljivih komponenti kojeg čine periodi ispravnog rada s vremenima  $m_i$  i periodi popravka s vremenima  $r_i$ . [2]

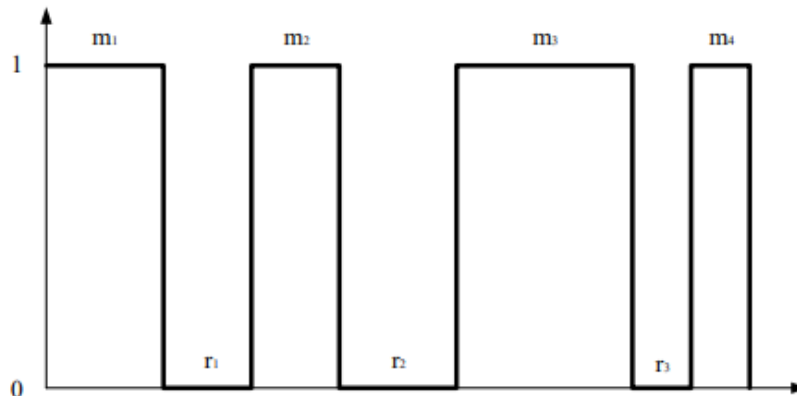
Relacijom (3.6.) definirano je prosječno vrijeme trajanja rada [2]:

$$m = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} m_i}{n} \quad (3.6.)$$

gdje je:

- $n$  – broj perioda rada odnosno kvara,

- $m_i$  – vrijeme do kvara i-tog perioda.



Slika 3.4 Periodi rada obnovljivih komponenti [2]

Prema [2], stacionarne raspoloživosti komponenti se mogu izraziti kao na sljedećoj relaciji (3.7.):

$$A = \frac{m}{m + r} \quad (3.7.)$$

Pri čemu je srednje vrijeme trajanja popravka  $r$  iskazano prema sljedećoj relaciji (2.8.):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} r_i}{n} \quad (3.8.)$$

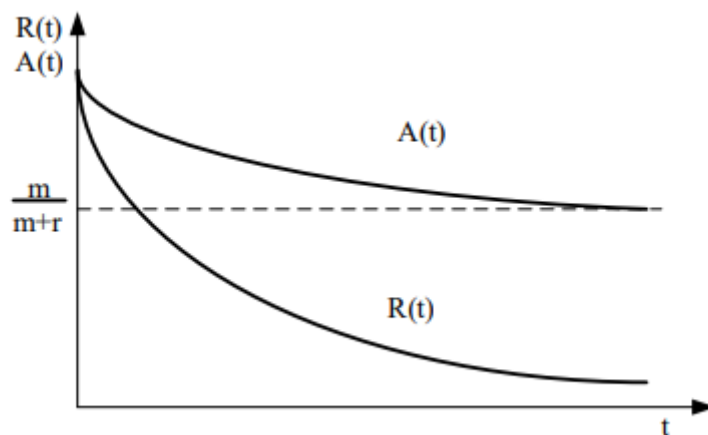
gdje je:

- $r_i$  – vrijeme trajanja popravka i-tog perioda.

Analogno raspoloživosti, moguće je određivanje i stacionarne neraspoloživosti komponenti prema idućoj relaciji (3.9.) [2]:

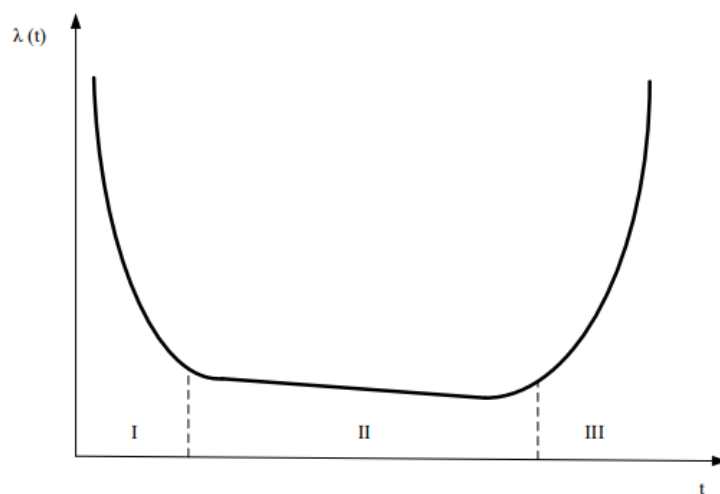
$$N = 1 - A = \frac{r}{m + r} \quad (3.9.)$$

Bitna razlika između funkcija raspoloživosti komponenti i funkcija pouzdanosti komponenti je da raspoloživost komponenti imaju svoje konačne vrijednosti kada vremena promatranja komponenti rastu neograničeno, a funkcije pouzdanosti asimptotski teže k vrijednosti nula, kao što je prikazano slikom 3.5. [2]



Slika 3.5 Odnos funkcije raspoloživosti komponente i funkcije pouzdanosti [2]

Najčešće korišteni i najvažniji je eksponencijalni zakon pouzdanosti kod koga je konstantna funkcija intenziteta kvara. [2]



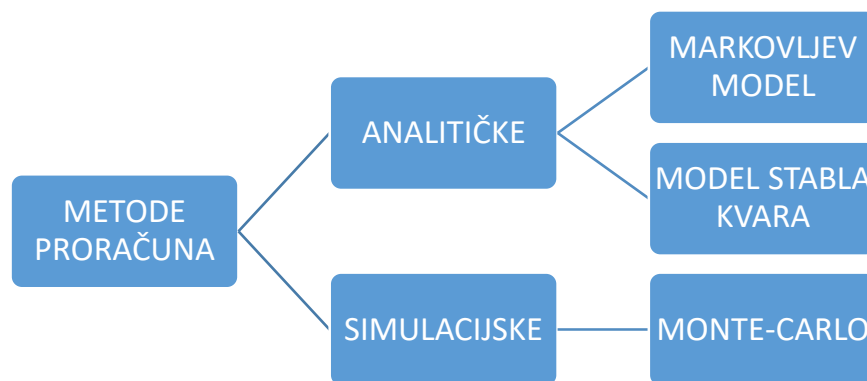
Slika 3.6 Prikaz funkcije intenziteta kvara komponenti [2]

Na slici 3.6 se da uočiti da postoje tri grupe vremenskih razdoblja komponenti. Prvom razdoblju se pripisuju visoki intenziteti kvarova koji nastaju zbog pogrešaka u montaži, transportu ili pogrešaka prilikom izrade komponenti. Drugo vremensko razdoblje obilježava normalni radni vijek komponenti, pri čemu postoji približno konstantan intenzitet kvarova. Treće vremensko razdoblje je faza koja predstavlja kraj eksploatacije komponente jer dolazi do starenja i potrošnje materijala. Detaljniji prikaz modela obnovljivih komponenti se može prikazati preko

Markovljevog modela prostora stanja gdje se u model komponenti uvedene i nove veličine, funkcija popravka  $\mu(t)$  i funkcija intenziteta kvarova  $\lambda(t)$  [2]

### 3.3. Metode za proračun pouzdanosti

Metode proračuna za pouzdanost sustava tj. analiza je temeljena na poznavanju podataka o pouzdanosti i raspoloživosti komponenti koje taj sustav čine te na osnovu kojih je moguće izračunavanje pokazatelja pouzdanosti dijela ili cijelog sustava. Slikom 3.7 je prikazana podjela metoda proračuna pouzdanosti na analitičke metode (Model stabla kvara i Markovljev model) i simulacijsku (Monte-Carlo). [2]



Slika 3.7 Metode za proračun pouzdanosti i njihova podjela [2]

Neke od analitičkih metoda koriste logičke dijagrame, analizu stabla događaja (kvara) ili analizu prostora stanja. Zajedničko za njih je da svaka analitička metoda koristi prostore stanja komponenti (sustava). Komponentu je moguće naći u tri stanja: stanje kvara, stanje popravka, planiranog remonta ili isključeno stanje radi manipulacije u postrojenjima te pod utjecajem opterećenja te promjenjive okoline u elektroenergetskom sustavu.

#### 3.3.1. Monte Carlo simulacijska metoda

Pri analizi elektroenergetskog sustava u primjeni teorije pouzdanosti postoje dva temeljna pristupa. Prvi je analitički pristup, pomoću koga se vrši selektivna analiza događaja koji su štetni (kvarovi) te se formira matematički model i za svako stanje se izračunavaju analitički pokazatelji pouzdanosti elektroenergetskog sustava ili njegovih dijelova. [2]

Simulacijski pristup je drugi pristup (metoda Monte Carlo simulacije). Prema toj metodi izbor stanja sustava je slučajna, a iz poznatih funkcija razdiobe kvarova komponentata simulacijama na

računalu se određuju pokazatelji pouzdanosti elektroenergetskog sustava. [2] Budući da Easy Power programski alat radi analitički Monte Carlo simulacijska metoda će samo biti opisana.

Ponašanje komponente elektroenergetskog sustava kod Monte Carlo metode statističkog modeliranja simulirana je generiranjem slučajnih brojeva. Nizom simulacija iz poznate funkcije razdiobe vjerojatnosti kvara komponenti stvaraju se umjetne povijesti ponašanja komponenti, generiranjem slučajnih brojeva korištenjem računala. Takvim načinom su određena stanja sustava i stanja komponenti. Metodama matematičke statistike iz skupova vrijednosti izračunavaju se pokazatelji pouzdanosti i raspoloživosti. [2]

Nakon određenog broja simulacija i nekog vremena temeljem određenih kriterija proces je zaustavljen i vrši se izračunavanje pokazatelja pouzdanosti koji su potrebni. Svaka simulacija se odvija na temelju slučajno odabranih brojeva, pa se rezultati koji su dobiveni procesom simulacije razlikuju od onih koji se dobiju analitičkom metodom i za svaku simulaciju rezultati se razlikuju među sobom ali njihova točnost ne odudara od analitičkog rješenja. Upotreba Monte Carlo simulacijske metode zahtjeva poznavanje funkcije vjerojatnosti ispravnog rada i razdiobe vjerojatnosti kvarova. Ako su funkcije eksponencijalnog oblika, model će odgovarati Markovljevom modelu prostora stanja za kojeg se primjenjuju analitičke metode, a ako nisu, izračun je jedino moguć simulacijskim pristupom jer neće izgubiti na točnosti, već će dati ispravne rezultate. [2]

Matematičko očekivanje za promatrane pokazatelje pouzdanosti je osnovni parametar u računanju pouzdanosti. Ako je  $X$  slučajna varijabla koja zaprima vrijednost 0 i 1 ( $x_i = 1$  u slučaju zastoja sustava te  $x_i = 0$  u slučaju ispravnog sustava) te ako je  $N$  stacionarna neraspoloživost, procjena neraspoloživosti sa  $n$  stanja (uzoraka) dana je sljedećim izrazom [7]:

$$\bar{N} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.10.)$$

Koeficijentom varijacije  $a$  može se opisati točnost Monte Carlo metode:

$$a = \sqrt{\frac{1 - \bar{N}}{n \cdot \bar{N}}} \quad (3.11.)$$

Broj simulacija potrebnih u uzorku  $n$ :



$$n = \frac{1 - \bar{N}}{a^2 \cdot \bar{N}} \quad (3.12.)$$

S ciljem o postizanju željene točnosti, o neraspoloživosti sustava će ovisiti potreban broj simulacija, ali nije ovisan o njegovoj veličini. Ova je metoda stoga prigodna za izračun pouzdanosti sustava koji su veliki, što naspram analitičkih metoda predstavlja prednost prilikom izračuna pouzdanosti. Zbog neraspoloživosti elektroenergetskih sustava koja je obično puno manja od 1, daje se sljedeći izraz [7]:

$$n \approx \frac{1}{a^2 \cdot \bar{N}} \quad (3.13.)$$

To bi značilo da se broj potrebnih simulacija odnosi približno obrnuto proporcionalno neraspoloživosti sustava, to jest za slučaj visoke pouzdanosti kako bi se zadovoljila željena točnost, potreban je i veliki broj simulacija. [7]

Kao što je rečeno početkom potpoglavlja, Monte Carlo simulacijska metoda je temeljena generiranjem slučajnih brojeva. Najčešće su generirani matematičkim putem, pri čemu su mogućnosti njihovih reprodukcija osigurani. Osnovni zahtjevi pri generiranju slučajnih brojeva su [7]:

- Uniformna razdioba u intervalu [0,1] – Uniformnost,
- Minimalna korelacija je potrebna među slučajnim brojevima – Neovisnost,
- Trebalo bi biti dovoljno dugo razdoblje ponavljanja

Kako je uvjet koji je neophodan pri korištenju Markovljevog modela eksponencijalni oblik za funkciju gustoće razdiobe vjerojatnosti perioda trajanja popravka i perioda trajanja ispravnog rada, te je za Monte Carlo simulaciju potrebno poznavanje funkcije razdiobe vjerojatnosti ispravnog rada i kvara. [2]

Neka se na diskretnom prostoru slučajna varijabla  $X$  definira sa:

$$X = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_i & \dots \\ p_1 & p_2 & \dots & p_i & \dots \end{pmatrix} \quad (3.14.)$$

to jest poprima vrijednosti  $x_i$  sa vjerojatnosti  $p_i$ , definira se funkcija gustoće vjerojatnosti [8]:

$$f(x) = P\{X = x\} = \begin{cases} 0, & x \neq x_i \\ p_i, & x = x_i \end{cases} \quad (3.15.)$$

Kumulativno se funkcije razdiobe slučajne varijable definiraju na način [9]:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(y)dy \quad (3.16.)$$

Intenzitet kvara  $\lambda$  je funkcija koja se usko veže sa funkcijama gustoće vjerojatnosti i kumulativnim funkcijama [9]:

$$\lambda(x) = \frac{f(x)}{1 - F(x)} \quad (3.17.)$$

Očekivanim (srednjim) vrijednostima, varijancom i standardnom devijacijom često mogu biti karakterizirane funkcije razdiobe vjerojatnosti. Geometrijska sredina funkcije je očekivana vrijednost i definirana je kao [9]:

$$\bar{x} = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot f(x)dx \quad (3.18.)$$

Varijanca predstavlja mjeru koliko će funkcije odstupati od srednjih vrijednosti, dok se iz varijance izračunava standardna devijacija kao kvadratni korijen [9]:

$$\text{Varijanca} = \int_{-\infty}^{\infty} [f(x) - \bar{x}]^2 dx \quad (3.19.)$$

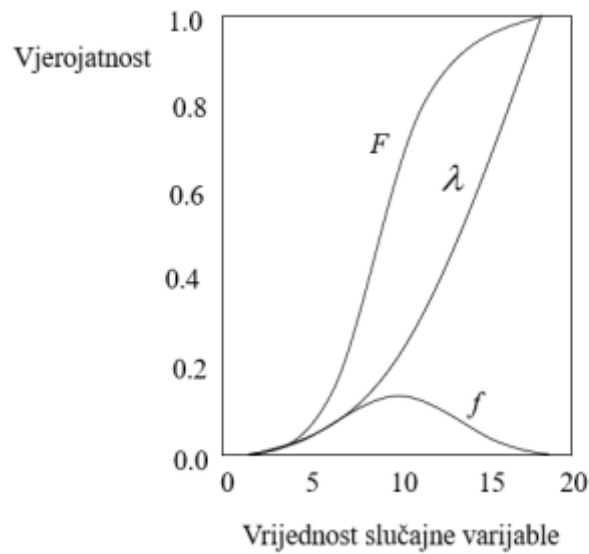
Kako se može primijetiti nije upotrijebljena oznaka za varijancu, jer je ista promjenjiva kako zavisi o vrsti razdiobe.

Nakon osnove teorije o funkcijama razdiobe vjerojatnosti, neke od najvažnijih razdioba slučajnih varijabli mogu biti definirane. Normalna razdioba slučajnih varijabli je jedna od najpoznatijih, koja je opisana standardnom devijacijom  $\sigma$  i očekivanom vrijednošću  $\mu$  [9]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right]; -\infty \leq x \leq \infty \quad (3.20.)$$

Iz podataka koji su mjereni o vrijednostima slučajnih varijabli moguće je određivanje parametara normalne razdiobe, stoga je prikladna za primjenu, ali se rijetko koristi u području pouzdanosti. Kod normalne razdiobe slučajnih varijabli je moguće da sadrže i vrijednosti koje su negativne, dok je kod slučajnih varijabli koje opisuju pouzdanost komponenti sustava ograničenost na pozitivnim vrijednostima. [9]

Slikom 3.8 prikazana je funkcija gustoće vjerojatnosti, intenziteta zastoja, i razdiobe slučajne varijable pri standardnoj devijaciji  $\sigma = 3$  i srednjoj vrijednosti  $\mu = 10$ .



Slika 3.8 Prikaz normalne razdiobe [9]

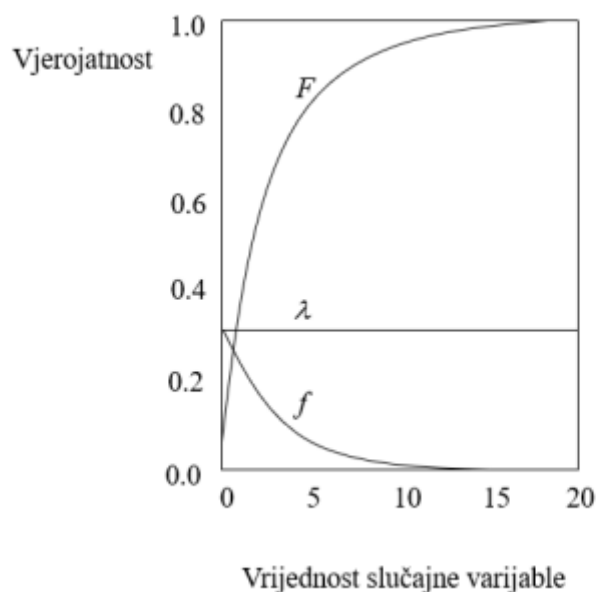
Eksponecijalna razdioba se najviše koristi u analizama pouzdanosti, s razlogom konstantne vrijednosti funkcije intenziteta zastoja  $\lambda$ , koja predstavlja jedini parametar o kojem će ova razdioba ovisiti. Njezinu funkciju gustoće je moguće izraziti kao [9]:

$$f(x) = \lambda \cdot \exp[-\lambda \cdot x]; x \geq 0 \quad (3.21.)$$

Njezina kumulativna funkcija i intenzitet zastoja se može odrediti na osnovu prethodnog izraza [9]:

$$F(x) = 1 - \exp[-\lambda \cdot x]; \lambda(x) = \lambda \quad (3.22.)$$

Slikom 3.9. je prikazan ekspancijalni oblik razdiobe sa parametrom  $\lambda = 0.3$ .  $\lambda$  se izračunava kao recipročna srednja (očekivana) vrijednost, dok se varijanca dobije kvadratom recipročne vrijednosti intenziteta zastoja. [9]



Slika 3.9 Prikaz eksponencijalne razdiobe [9]

Osim spomenutih razdioba, koriste se još neke poput Gamma, Rayleighove ili Weibullove, ali zbog opširnosti rada neće biti razmatrane.

### 3.3.2. Markovljev model

Markovljevim procesom može se vrlo dobro opisati ponašanje komponenata i sustava. To je kontinuirani stohastički proces koji je opisati moguće sa dvije slučajne veličine [2]:

- vrijeme promatranja komponente odnosno sustava
- stanje komponente odnosno sustava

Ove veličine su kontinuirane ili diskretne te su zato postojana četiri mogućnosti promatranja. Diskretno vrijeme promatranja i diskretna stanja sustava nazivaju se Markovljev lanac, a kontinuirano vrijeme promatranja i diskretna stanja sustava nazivaju se Markovljev proces. [2]

Općenito vjerojatnost da će se sustav naći u nekom od stanja u danom trenutku ovisi o prethodnoj povijesti boravka sustava u prošlim stanjima. Kod Markovljeva modela vjerojatnosti vjerojatnost boravka sustava  $X$  u stanju „ $j$ “ u trenutku  $t+\Delta t$  ovisi samo o stanju „ $i$ “ koje je sustav imao u trenutku „ $t$ “, a ne i o prošlim stanjima. Vjerojatnost prijelaza sustava ili komponente iz stanja „ $i$ “ u stanje „ $j$ “ označeno je sa  $p_{ij}(\Delta t)$  i za interval  $\Delta t$  iznosi [2]:

$$p_{ij}(\Delta t) = P[X(\Delta t + t) = \frac{j}{X(t)} = i] = \lambda_{ij}(t)\Delta t \quad (3.23.)$$

Markovljev proces se može koristiti za analizu raspoloživosti, pouzdanosti i održivosti sustava. Sustav je građen od broja  $n$  komponenti i svaka od njih u bilo kojem trenutku može uspješno raditi ili ne. Uspješno funkcioniranje cijelog sustava ovisi o radu ili kvaru njegovih komponenti. Stoga, sustav se može naći u jednom od dva stanja [1]:

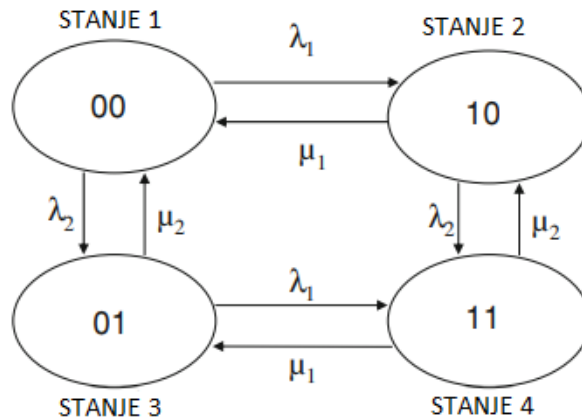
- Operativno stanje, gdje je sustav u funkciji iako neke njegove komponente nisu. Potpuno operativan sustav je onaj u kojem ni jedna komponenta nije u prekidu.
- Stanje kvara, u kojem sustav nije u funkciji zbog kvara jedne ili više njegovih komponenti.

Ovakav način modeliranja pruža jasan prikaz svih stanja sustava kao i prijelaz između tih stanja. Neuspjeh pojedinih komponenti u sustavu također je lako modeliran ovom metodom. Jedan nedostatak, međutim, da je za velike sustave s mnogo komponenti teško nacrtati dijagram. To je zato što za sustav sa brojem  $n$  komponenti, gdje svaka komponenta ima dva stanja, broj stanja u kojem se sustav može naći je  $2^n$ . [1]

Na modelu kvara dvije komponente bit će pokazana korak po korak metoda rješavanja. Prvi korak će biti konstrukcija dijagrama. Slikom 3.10 prikazan je dijagram sustava sa dvije obnovljive komponente, gdje se sustav može naći u jednom od četiri stanja [1]:

- Stanje 1 (00): obje komponente u radu
- Stanje 2 (10): komponenta 1 u prekidu i komponenta 2 u radu
- Stanje 3 (01): komponenta 1 u radu i komponenta 2 u prekidu
- Stanje 4 (11): obje komponente u kvaru

Prikazana je i stopa kvara ( $\lambda$ ) i stopa popravka ( $\mu$ ) u dijagramu za svaku komponentu.



Slika 3.10 Markovljev model dvije obnovljive komponente [1]

Drugi korak će biti pisanje prijelazne matrice pomoću kreiranog dijagrama. Za sustav sa brojem  $n$  komponenti, matrica će biti reda  $n \times n$ . Matrica je kreirana na osnovu promatranja promjena između stanja i unošenja intenziteta kvara ili intenziteta popravka. Na primjer, za prijelaz iz stanja „ $i$ “ u stanje „ $j$ “ (gdje je  $i \neq j$ ), stopa prijelaza se unosi u  $i$ -ti redak i  $j$ -ti stupac. Dijagonalni elementi matrice bi trebali biti jednaki vrijednosti 1 minus zbroj ostalih elemenata u redu matrice. Svaki ostali element trebao bi biti vrijednosti nula [1]. Prijelazna matrica je prikazana ispod relacijom 3.24:

$$T = \begin{bmatrix} 1 - \lambda_1 - \lambda_2 & \lambda_1 & \lambda_2 & 0 \\ \mu_1 & 1 - \mu_1 - \lambda_2 & 0 & \lambda_2 \\ \mu_2 & 0 & 1 - \lambda_1 - \mu_2 & \lambda_1 \\ 0 & \mu_2 & \mu_1 & 1 - \mu_1 - \mu_2 \end{bmatrix} \quad (3.24.)$$

U trećem koraku primjenjujemo Markovljev pristup. Ograničavajuća vjerojatnost stanja ne mijenja se u procesu daljnje tranzicije [1]. Stoga se to može matematički izraziti [1]:

$$PT = P \quad (3.25.)$$

gdje je  $P$  granični vektor vjerojatnosti stanja, a  $T$  prijelazna matrica. Ovo se može zapisati kao [1]:

$$P(T - I) = 0 \quad (3.26.)$$

gdje je „ $I$ “ matrica identiteta. Uvrštavanjem prijelazne matrice  $T$  u gornju jednadžbu dobije se sljedeći izraz (3.27) [1]:

$$\begin{aligned}
[P_1 \ P_2 \ P_3 \ P_4] &= \begin{bmatrix} -(\lambda_1 + \lambda_2) & \lambda_1 & \lambda_2 & 0 \\ \mu_1 & -(\mu_1 + \lambda_2) & 0 & \lambda_2 \\ \mu_2 & 0 & -(\lambda_1 + \mu_2) & \lambda_1 \\ 0 & \mu_2 & \mu_1 & -(\mu_1 + \mu_2) \end{bmatrix} \\
&= [0 \ 0 \ 0 \ 0]
\end{aligned} \tag{3.27.}$$

Transponiranjem jednadžbe, opći oblik jednadžbe je dobiven [1]:

$$\begin{bmatrix} -(\lambda_1 + \lambda_2) & \mu_1 & \mu_2 & 0 \\ \lambda_1 & -(\mu_1 + \lambda_2) & 0 & \lambda_2 \\ \lambda_2 & 0 & -(\lambda_1 + \mu_2) & \lambda_1 \\ 0 & \lambda_2 & \lambda_1 & -(\mu_1 + \mu_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.28.}$$

Zbroj svih pojedinačnih vjerojatnosti jednak je vrijednosti 1 [1].

$$[P_1 + P_2 + P_3 + P_4] = 1 \tag{3.29.}$$

Uvrštenjem uvjeta  $\sum_{i=1}^4 P_i$  u prvi redak matrice dobijemo rješenja za stacionarne vjerojatnosti boravka u stanjima 1, 2, 3 i 4. [2]

Budući da matrica sada sadrži četiri neovisne jednadžbe može se riješiti pomoću linearne algebre.

Općenito, to daje sljedeće izraze [1]:

$$P_1 = \frac{\mu_1 \mu_2}{(\mu_1 + \lambda_1)(\mu_2 + \lambda_2)} \tag{3.30.}$$

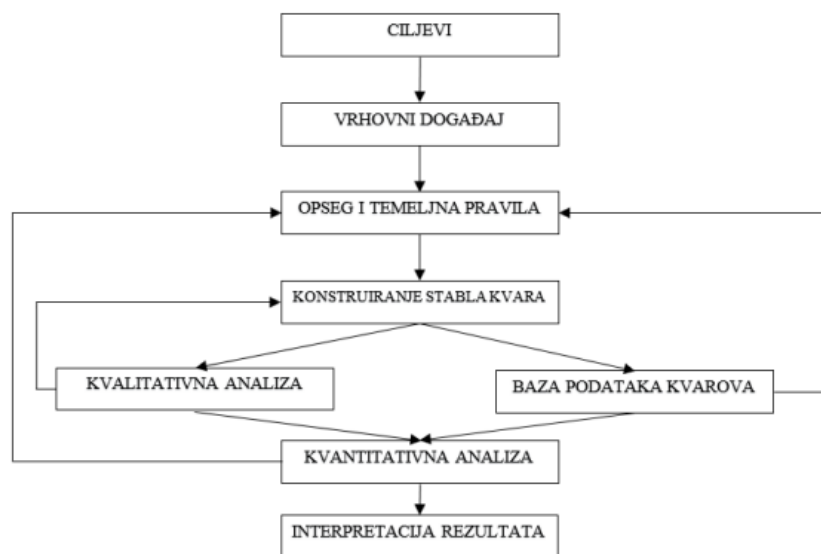
$$P_2 = \frac{\lambda_1 \mu_2}{(\mu_1 + \lambda_1)(\mu_2 + \lambda_2)} \tag{3.31.}$$

$$P_3 = \frac{\mu_1 \lambda_2}{(\mu_1 + \lambda_1)(\mu_2 + \lambda_2)} \tag{3.32.}$$

$$P_4 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\mu_1 + \lambda_1)(\mu_2 + \lambda_2)} \tag{3.33.}$$

### 3.3.3. Model stabla kvara

Model stabla kvara je analitička metoda za utvrđivanje neželjenih stanja sustava te za analizu sustava u smislu njegovog okruženja i funkcioniranja, s određenim ciljem utvrđivanja načina na koje se događaji koji su nepoželjni mogu pojaviti. Metoda analize stabla kvara je pojam koji obuhvaća kvalitativnu i kvantitativnu analizu te grafički model (model stabla kvara). Grafički model je sačinjen raznim kombinacijama kvarova koji dovode do nastajanja događaja koji su nepoželjni. Zbog toga logičke međuodnose osnovnih događaja predstavlja stablo kvara, koji će voditi prema događaju koji je nepoželjan (vrhovni događaj). [1]



Slika 3.11 Dijagram analize stabla kvara [1]

Dijagram analize stabla kvara sa svojim međuodnosima je prikazan na slici 3.11.

Od sljedećih koraka se sastoji proces analize stabla kvara [1]:

- Utvrđivanje ciljeva
- Definicija vrhovnog događaja
- Definiranje temeljnih pravila i opsega
- Konstrukcija stabla kvara
- Kvalitativna analiza stabla kvara
- Priprema baze podataka za kvar te povezivanje podataka o kvaru sa osnovnim događajima
- Kvantitativna analiza stabla kvara



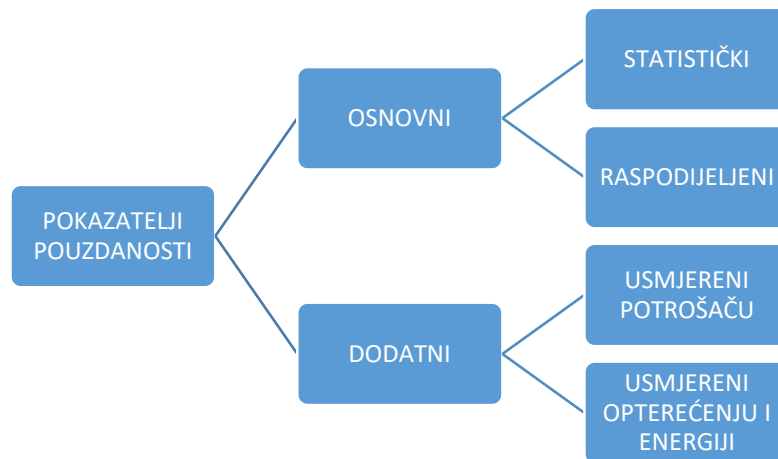
- Interpretacija rezultata analize

U odnosu na ostale metode prednost ovog modela je deduktivnost. Kreiranje modela se vrši postupno jer je u jednom trenutku inženjer okupiran samo jednim dijelom sustava. To je najpogodnije za veće i složenije sustave. Još neke od prednosti su broj izlaznih podataka i raznovrsnost. Kvalitativnom analizom se dobiju bitni podaci o raspoloživosti i pouzdanosti sustava te komponente. Kvantitativna analiza omogućuje usporedbu raspoloživosti analiziranog sustava sa drugim sustavima. [13]

Neki od nedostataka modela stabla kvara su zahtjevnost, statičnost te nesigurnost ulaznih podataka. Statičnost bi podrazumijevala da nije moguće modeliranje događaja unutar stabla kvara za koje je njihov redosljed važan. Zahtjevnost se odnosi na složenost rada i njegovu kompleksnost, tj. zahtijeva čitav tim stručnjaka na nekom projektu. Netočnost dobivenih rezultata analize može uzrokovati nesigurnost ulaznih podataka. [13]

### 3.4. Pokazatelji pouzdanosti

Različitim pokazateljima pouzdanosti se iskazuje razina raspoloživosti i pouzdanosti elektroenergetskog sustava, čiji izračun omogućuje odrediti način za poboljšanje istih [10]. Pokazatelji pouzdanosti su veličine koje su kvantitativne i koje pokazuju osobine elektroenergetskog sustava s gledišta pouzdanosti.



Slika 3.12 Pokazatelji pouzdanosti i njihova podjela [11]

Mogu se podijeliti u skupinu statičkih pokazatelja koji su definirani za obnovljive sustave i komponente te oni pokazuju kako se komponenta ponaša u dužem vremenskom razdoblju i u

skupinu dinamičkih koji se određuju za obnovljive i neobnovljive komponente, kada je potrebno predviđanje ponašanja komponenti u ograničenom vremenskom intervalu za bližu budućnost. [2]

Statički i dinamički (raspodijeljeni) pokazatelji čine osnovnu podjelu, dok su dodatni obuhvatili pokazatelje usmjerene opterećenju i energiji i pokazatelje usmjerene potrošačima, prikazano na slici 3.12.

### 3.4.1. Statistički i raspodijeljeni pokazatelji pouzdanosti

Neki od statističkih pokazatelja pouzdanosti su definirani u ovom odjeljku, koji su određeni za obnovljive komponente i sustave te prikazuju ponašanja komponenti za dulji perioda vremena:

- Srednji intenzitet kvara opskrbe potrošača [4]:

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i \left[ \frac{1}{\text{god.}} \right] \quad (3.34.)$$

gdje  $\lambda_i$  predstavlja intenzitet kvarova komponenti  $i$ ,

- Srednje vrijeme trajanja kvara [4]:

$$r_s = \frac{\sum_{i=1}^n (\lambda_i \cdot r_i)}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \left[ \frac{h}{\text{prekid}} \right] \quad (3.35.)$$

gdje  $r_i$  predstavlja trajanje kvara komponente  $i$ ,

- Srednje vrijeme trajanja rada [1]:

$$MTTF = \bar{r} = \frac{1}{\lambda} \quad (3.36.)$$

- Srednje vrijeme trajanja popravka [1]:

$$MTTR = \bar{p} = \frac{1}{\mu} \quad (3.37.)$$

gdje  $\mu$  predstavlja intenzitet popravka,

- Srednje vrijeme između kvarova [1]:

$$MTBF = MTTF + MTTR \quad (3.38.)$$

Raspodijeljeni (dinamički) pokazatelji pouzdanosti predstavljaju drugu podjelu osnovnih pokazatelja, koji su definirani za neobnovljive i obnovljive komponente. Objasnjeni u potpoglavlju 3.2.1. ti pokazatelji su funkcije nepouzdanosti, pouzdanosti i intenziteta kvarova.

### 3.4.2. Pokazatelji pouzdanosti orijentirani potrošačima

Od velikog značaja za same potrošače su pokazatelji pouzdanosti potrošača i potrošačkih čvorišta. Osim što pružaju podatke kao što su raspoloživosti napajanja i trajanja prekida, daju i informacije za troškove. Kod izračuna pokazatelja definirana su tri osnovna, temeljem kojih se izračunavaju opći pokazatelji pouzdanosti. Osnovni pokazatelji su trajanje kvarova, godišnje trajanje i intenzitet [7], a opći su predstavljeni u nastavku:

- SAIFI – indeks za prosječni godišnji prekid sustava [7]:

$$SAIFI = \frac{\sum_{j \in R} (\lambda_j \cdot N_j)}{\sum_{j \in R} N_j} \left[ \frac{1}{\text{potr., god.}} \right] \quad (3.39.)$$

gdje:

- $\lambda_j$  – predstavlja intenzitet kvarova za potrošački čvor  $j$ ,
- $N_j$  – predstavlja broj potrošača za potrošački čvor  $j$ ,
- $R$  – predstavlja skup za sva potrošačka čvorišta sustava.

- CAIFI – indeks za prosječni godišnji prekid po potrošaču [7]:

$$CAIFI = \frac{\sum_{j \in R} (\lambda_j \cdot N_j)}{\sum_{j \in R} M_j} \left[ \frac{1}{\text{potr., god.}} \right] \quad (3.40.)$$

gdje  $M_j$  predstavlja broj zahvaćenih potrošača za potrošačko čvorište  $j$ .

- SAIDI – indeks za prosječno trajanje prekida sustava [7]:

$$SAIDI = \frac{\sum_{j \in R} (U_j \cdot N_j)}{\sum_{j \in R} N_j} \left[ \frac{h}{\text{potr., god.}} \right] \quad (3.41.)$$

gdje  $U_j$  predstavlja godišnje vrijeme nerasploživosti za potrošačko čvorište  $j$ .

- CAIDI – indeks za prosječno trajanje prekida po potrošačima [7]:

$$CAIDI = \frac{\sum_{j \in R} (U_j \cdot N_j)}{\sum_{j \in R} (\lambda_j \cdot N_j)} = \frac{SAIDI}{SAIFI} \left[ \frac{h}{god.} \right] \quad (3.42.)$$

- ASAI – indeks za raspoloživost napajanja [7]:

$$ASAI = \frac{\sum_{j \in R} (8760 \cdot N_j) - \sum_{j \in R} (U_j \cdot N_j)}{\sum_{j \in R} (8760 \cdot N_j)} \quad (3.43.)$$

- ASUI – indeks za srednju neraspoloživost napajanja [7]:

$$ASUI = \frac{\sum_{j \in R} (U_j \cdot N_j)}{\sum_{j \in R} (8760 \cdot N_j)} \quad (3.44.)$$

- MAIFI – indeks za prosječnu učestalost kratkog prekida [12]:

$$MAIFI = \frac{\sum (\lambda_{t_j} \cdot N_{t_j})}{\sum N_j} \left[ \frac{1}{potr., god.} \right] \quad (3.45.)$$

gdje:

- $\lambda_{t_j}$  – predstavlja intenzitet trenutnih prekida za potrošačko čvorište  $j$ ,
- $N_{t_j}$  – predstavlja broj potrošača koji su pogođeni trenutnim prekidima na potrošačkom čvorištu  $j$ .

### 3.4.3. Pokazatelji pouzdanosti orijentirani opterećenju i energiji

Osim pokazatelja pouzdanosti usmjerenih potrošačima, treba istaknuti one usmjerene opterećenju i one koji služe za pružanje podataka o neisporučenoj električnoj energiji ili su temeljeni na njima. Neki od njih su prikazani ispod:

- ASIFI – izračun ovog indeksa temelji se na opterećenju, a ne na klijentima. ASIFI se može koristiti za mjerenje distribucije performansi u područjima koja opskrbljuju relativno malo kupaca s relativno velikom koncentracijom tereta, pretežno industrijskih/komercijalnih kupaca. [12]

$$ASIFI = \frac{\sum L_j}{L_t} \left[ \frac{1}{god.} \right] \quad (3.46.)$$

Gdje:

- $L_j$  – predstavlja neisporučenu snagu potrošača ili potrošačkog čvorišta  $j$ ,
- $L_t$  – predstavlja ukupnu snagu potrošača.

- ASIDI – jednak je pokazatelju SAIDI, ali je proračun temeljen na opterećenju, a ne na klijentima. [12]

$$ASIDI = \frac{\sum(r_j \cdot L_j)}{L_t} \left[ \frac{h}{god.} \right] \quad (3.47.)$$

Gdje  $r_j$  predstavlja period popravka za sve prekide za potrošačko čvorište  $j$ .

- ENS – predstavlja indeks za neisporučenu električnu energiju. [12]

$$ENS = \sum_{j \in R} (P_{aj} \cdot U_j) \left[ \frac{kWh}{god.} \right] \quad (3.48.)$$

Gdje  $P_{aj}$  predstavlja iznos za prosječno opterećenje za potrošačko čvorište  $j$ .

- AENS – predstavlja indeks za prosječnu godišnju neisporučenu energiju po potrošačima. [12]

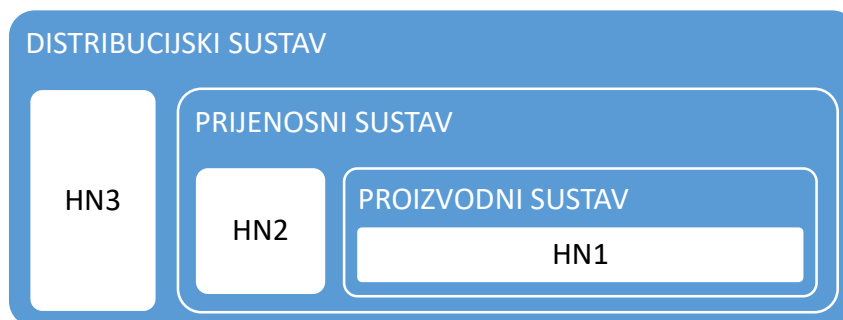
$$AENS = \frac{ENS}{\sum_{j \in R} N_j} \left[ \frac{kWh}{potr., god.} \right] \quad (3.49.)$$

- ACCI – predstavlja indeks za prosječnu neisporučenu električnu energiju svih pogođenih potrošača. [12]

$$ACCI = \frac{ENS}{\sum_{j \in R} M_j} \left[ \frac{kWh}{potr., god.} \right] \quad (3.50.)$$

#### 3.4.4. Pokazatelji pouzdanosti s obzirom na podjelu prema hijerarhijskim razinama

Zbog teškog računanja pokazatelja pouzdanosti i raspoloživosti elektroenergetskog sustava u cjelini, on se dijeli prema hijerarhijskim razinama [2]. Prva razina predstavlja proizvodni sustav, druga proizvodno-prijenosni sustav, a u treću razinu je uključen i distribucijski sustav. Podjela je prikazana slikom 3.13:



Slika 3.13 Podjela elektroenergetskog sustava na hijerarhijske razine [2]

Prije nego što se definiraju pokazatelji pouzdanosti, na pojedinim hijerarhijskim razinama je potrebno odrediti modele. Na prvoj hijerarhijskoj razini u proizvodnom sustavu, prijenosni sustav sa svojom sposobnošću da do potrošača prenosi električnu energiju je zanemarena. Kako bi zahtjevi za sustave bili ispunjeni i potrebe za preventivno održavanje proizvodnih jedinica bile zadovoljene, procjena proizvodnog kapaciteta je bitan faktor. [4]

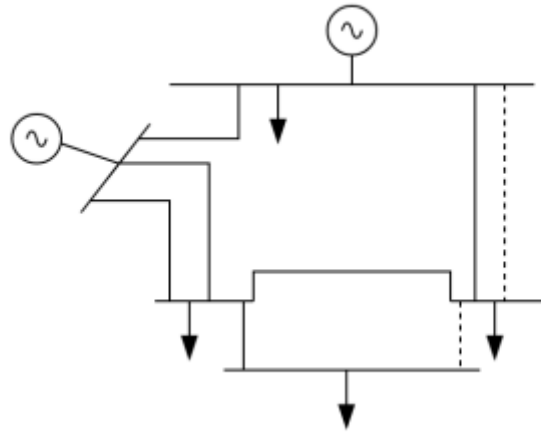


Slika 3.14 Prikaz modela sustava za prve hijerarhijske razine [4]

Pokazatelji za proračun pouzdanosti proizvodnog sustava [2]:

- LOLP – vjerojatnost za nemogućnost raspoložive snage proizvodnog kapaciteta da snabdije potrošače u elektroenergetskom sustavu dovoljnim količinama električne energije i snage, odnosno vjerojatnost manjka snage u elektroenergetskom sustavu.
- LOLE - očekivani broj dana tijekom godine za nedostizanje vršnih opterećenja proizvodnog kapaciteta u elektroenergetskom sustavu.
- EENS - iznos za vjerojatno neisporučenu električnu energiju u elektroenergetskom sustavu zbog trajanja manjka snage u elektroenergetskom sustavu.
- SOD - pokazatelj normalizirane neisporučene energija zbog nedostatka proizvodnih resursa.

Na drugoj hijerarhijskoj razini u obzir se uzima i utjecaj proizvodnog i prijenosnog sustava. Kroz dvije skupine pokazatelja pouzdanosti procjenjuje se utjecaj elemenata mreže: potrošačkih čvorova i sustava u cijelosti. Pokazatelji sustava motre cijeli sustav, dok pokazatelji usmjereni na potrošačka čvorišta motre utjecaje elemenata na pojedinačnim sabirnicama te za treću hijerarhijsku razinu pružaju ulazne podatke. [4]



Slika 3.15 Model proizvodno-prijenosnog sustava [4]

Za treću hijerarhijsku razinu najveći problem je njena kompleksnost, kako sadrži sve tri hijerarhijske razine pa se zbog toga vrši analiziranje distribucijskog sustava kao zasebne cjeline. Stoga, na temelju podataka koje pruža proizvodno-prijenosni sustav na ovoj razini se računaju pokazatelji potrošačkih čvorišta. [4] Kao što je navedeno na slici 3.12., oni su podijeljeni između osnovnih i dodatnih. Izrazima (3-34), (3-35), (3-36) su dani osnovni pokazatelji pouzdanosti, dok su dodatni [2]:

- Srednja vrijednost za neisporučenu snagu čvora  $j$  :

$$\Delta L = \sum_{i=1}^n (L_{ij} \cdot f_i) \left[ \frac{MW}{god.} \right] \quad (3.51.)$$

Gdje je:

- $L_{ij}$  – srednja vrijednost za snagu čvora  $j$  tijekom kvara  $i$ ,
- $f_i$  – učestalost kvarova  $i$ .

- Iznos očekivane neisporučene električne energija za čvor  $j$  :

$$\Delta W = \sum_{i=1}^n (L_{ij} \cdot f_i \cdot r_{ij}) \left[ \frac{MWh}{god.} \right] \quad (3.52.)$$

gdje je:

$-r_{ij}$  – srednje vrijeme za prekid opskrbe električnom energijom za čvor  $j$  pri kvaru  $i$ .

- Iznos srednje neisporučene snage po prekidu:

$$\Delta \bar{L} = \frac{\sum_i (L_{ij} \cdot f_i)}{\sum_i f_i} \left[ \frac{h}{prekid} \right] \quad (3.53.)$$

- Iznos srednje neisporučene energije po prekidu:

$$\Delta \bar{W} = \frac{\sum_i (L_{ij} \cdot f_i \cdot r_{ij})}{\sum_i f_i} \left[ \frac{MWh}{prekid} \right] \quad (3.54.)$$

- Srednje vrijeme trajanja jednog prekida:

$$\bar{r} = \frac{\sum_i (f_i \cdot r_{ij})}{\sum_i f_i} \left[ \frac{h}{prekid} \right] \quad (3.55.)$$

Spomenuti pokazatelji mogu se poboljšati na mnogo načina, a jedan od najučinkovitijih i najnaprednijih načina je dodavanje zaštitnih uređaja, čime dolazi do smanjenja prekida. Za smanjenje vremena promjene uklopnog stanja primjenu nalaze napredni sustavi automatike, što ujedno čini prednost za automatske prekidače u odnosu na ručne. Jedna od glavnih karakteristika za modeliranje pouzdanosti distribucijskog sustava jest mogućnost jednostavnog proračuna pouzdanosti za različite konfiguracije sustava.

Kako pokazatelji pouzdanosti prikazuju kvantitativnu odrednicu za kvalitetu rada nekog sustava oni su od velike važnosti, to jest služe za određivanje razina poremećaja, koji su posljedice određenih problema do kojih dolazi tijekom rada sustava. [10]



## 4. ANALIZA POUZDANOSTI KORIŠTENJEM EASYPOWER ALATA

### 4.1. Easy Power programski alat

Program Easy Power je računalni inženjerski alat koji se temelji na inovativnim i alternativnim algoritmima, kojim je pojednostavljena problematika modeliranja i analize elektroenergetskih sustava.

Veliki broj alata nudi program Easy Power koji služe za projektiranje, simulaciju i kontrolu rada elektroenergetskog sustava, kao i za proračun tokova snaga, naponskih stanja na pojedinim sabirnicama, gubitaka, struje kratkog spoja i ostalih parametara ustaljenog stanja. Također program se koristi za proučavanje optimizacije sustava i podešavanje zaštite, za ispitivanje ispada pojedinih elemenata iz mreže i na moguće kvarove u mreži, za odabir transformatora, kabela te nadzemnih vodova. Ono u čemu Easy Power ima prednost u odnosu na slične programe su mogućnost modeliranja, točnost analize i brzina obrade podataka. [14]

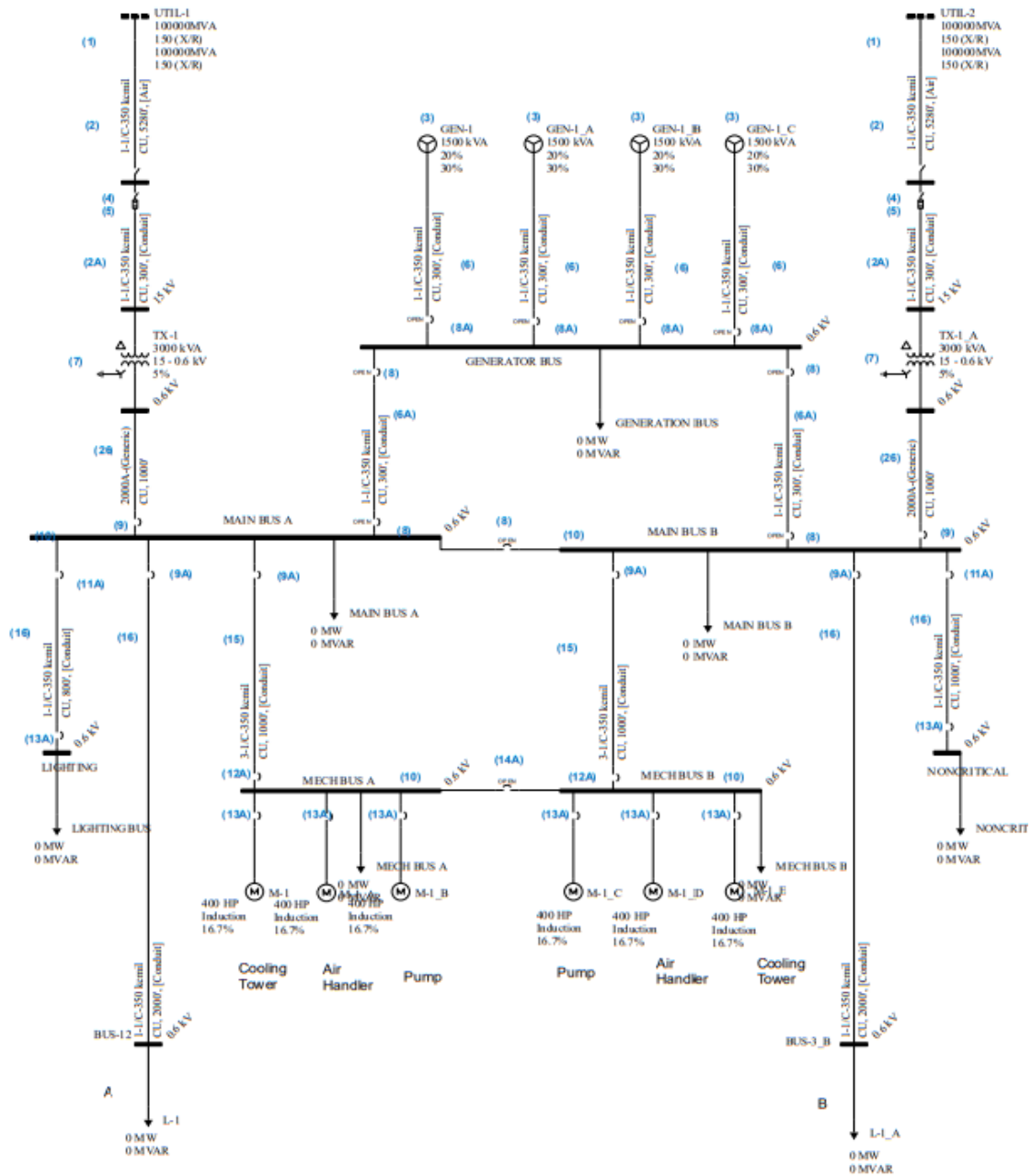
Korisničko sučelje programa je interaktivno i jednostavno te je konstruirano za precizno i učinkovito projektiranje elektroenergetskih sustava, analiziranje i nadzor.

Easy Power sadrži nekoliko različitih vrsta modula:

- Modul koji služi za uređenje podatkovne baze (eng. *Database Edit*) na način da se unose podatci o opremi i identifikacijska imena, impedancije, admitancije, itd., te je moguće mijenjanje položaja vodova i opreme na shemi.
- Modul koji služi za analiziranje kratkog spoja (eng. *Short Circuit*)
- Modul za koordinaciju zaštitnih uređaja (eng. *Coordination*)
- Modul koji služi za analiziranje naponskih prilika u mreži i tokova snaga (eng. *Power Flow*)
- Modul za analiziranje harmonika (eng. *Harmonics*)
- Modul za dinamičku stabilnost (eng. *Dynamic Stability*) koji elektroenergetskom sustavu u vremenskoj domeni omogućava simuliranje različitih događaja kao što su: kvarovi u sustavu, pokretanje motora, uključivanje tereta, generatora i drugih dijelova mreža. [15]
- Modul za vršenje analize pouzdanosti elektroenergetskog sustava (eng. *Reliability*)

Upravo zadnji navedeni modul za vršenje analize pouzdanosti je onaj koji će biti korišten i obrađen za potrebe izrade ovog rada.

## 4.2. Analiza pouzdanosti korištenjem modula u EasyPower-u



Slika 4.1 Shema mreže u programu Easy Power

Easy Power-ov modul za analizu pouzdanosti temelji se na IEEE 493 standardu, koji je poznat kao „Zlatna knjiga“. Korisnicima pruža alate za kvantificiranje pouzdanosti, dostupnosti i utjecaja na troškove zastoja u njihovim mrežama elektroenergetskog sustava. Nudi analizu cijelog sustava jednim klikom, a ne samo jednu granu opterećenja. Također je potrebno vrlo malo dodatnog rada za izvođenje analize pouzdanosti elektroenergetskog sustava nakon što je nacrtana njegova mreža. [16]

Za potrebe izrade rada slikom 4.1 prikazan model mreže preuzet je iz programskog paketa Easy Power. U mreži postoje dva *Utility* sustava (napojne mreže), gdje su oba napona 15kV. Također postoji i jedan redundantni (rezervni) izvor napajanja od 4 dizelska generatora za slučaj zastoja obje napojne mreže. Ovaj sustav sačinjava petnaest sabirnica koje predstavljaju čvorišta sustava, a služe za prijenos, povezivanje i raspodjelu električne energije u sustavu. Međusobno su povezane vodovima i transformatorima te su na njih spojeni izvori električne energije, motori, generatori, sklopke i prekidači.

Padajući izbornik modula za analizu pouzdanosti koji sadrži četiri različite funkcije za obavljanje kompletne analize pouzdanosti sustava. Prva funkcija pod nazivom „*Import Reliability Data*“ služi za dodjelu vrijednosti o pouzdanostima instalirane opreme elektroenergetskog sustava. Easy Power instalacija automatski uključuje kopiju podataka biblioteke IEEE 493-2007 Annex Q za korištenje s modulom pouzdanosti. Biblioteka Annex Q sadrži empirijske podatke o pouzdanosti komponenti i korisna je za popunjavanje baze podataka informacijama o pouzdanosti.

Odabirom prve funkcije iz padajućeg izbornika za vršenje analize pouzdanosti mogu se uvesti podaci iz biblioteke koja je popunjena informacijama iz IEEE 493-2007 Annex Q, koja sadrži desetljećima vrijedne empirijske podatke o pouzdanosti prema vrsti opreme. Također se može vršiti prilagodba podataka u pojedinačnim dijaloškim okvirima s podacima ili pomoću prikaza proračunske tablice koji omogućuju jednostavno uređivanje više dijelova opreme odjednom. Ako imate informacije o kvaru koje su prikladnije za vašu specifičnu opremu, moguće je doraditi brojeve iz Annexa Q da bi se dobilo točnije predviđanje pouzdanosti sustava. Također moguće je stvoriti vlastitu prilagođenu biblioteku za uvoz vaših specifičnih podataka koja će se moći izabrati uz Annex Q biblioteku nakon odabira prve funkcije u padajućem izborniku za vršenje analize pouzdanosti.

Odabirom druge funkcije iz padajućeg izbornika za vršenje analize pouzdanosti (*Define System Cost Impacts*) otvara se dijalog okvir za definiranje troškova zbog zastoja. Troškovi u dolarima po događaju svakog prekida prikazani su na temelju trajanja prekida. Prikazani su prosjeci za poslovne vrste komercijalnih, industrijskih i organizacija/institucija također prema IEEE 493 standardu. Moguće je odabrati stupac koji se želi koristiti za izvođenje troškova prekida i moguće je urediti brojeve ako je potrebno. U krajnjem desnom stupcu moguće je navesti vlastitu prilagođenu vrstu poslovanja i iznos troškova za svako trajanje.

Duration of Interruption	Commercial (business) (\$)	Industrial (\$)	Organization/institution (\$)	
2 seconds			28565	
1 minute	379	14155		
20 minutes	744	20551	15373	
1 hour	1002	33436	21878	
4 hours	2299	61710	53455	
8 hours	4188	92210		

Slika 4.2 Dijalog okvir za definiranje troškova zastoja

Odabirom treće funkcije iz padajućeg izbornika za vršenje analize pouzdanosti (*Reliability Database View*) otvara se dijalog okvir za prikaz baze podataka o pouzdanostima svih pojedinačnih komponenti elektroenergetskog sustava. Prikaz baze podataka o pouzdanostima je poseban pregled u kojem su filtrirani podaci za prikaz informacija o pouzdanosti za elektroenergetski sustav na osnovu kojeg se vrši analiza (Prilog P.4.1).

U ovom prikazu je moguće:

- Uvesti podatke o pouzdanostima iz biblioteke Annex Q ili vlastite prilagođene biblioteke
- Pregledati i urediti podatke o pouzdanostima
- Izvoz podataka o pouzdanostima u Excel datoteku
- Vraćanje podataka u izvorno stanje nakon uređivanja ili uvoza drugih podataka

Odabirom četvrte funkcije iz padajućeg izbornika za vršenje analize pouzdanosti (*Reliability Evaluation*) otvara se dijaloški okvir za pokretanje analize odnosno proračuna. Za odabir su ponuđene tri razine redukcije, gdje u ovisnosti o postojanju dodatnih izvora napajanja u

elektroenergetskom sustavu izabire se ona najprikladnije razine. Ako u sustavu postoji strujni krug samo od izvora do tereta, dovoljna je redundancija prvog reda. Za dva ili više strujnih krugova od izvora do tereta odabire se redundancija drugog ili trećeg reda. Redundancija trećeg reda zahtijeva više vremena za analizu, ali daje točniju analizu. Također moguće je odrediti hoće li se u obzir uzeti otvorene sklopke i uređaji što isto utječe na procjenu pouzdanosti.

### **4.3. Rezultati simulacije**

Nakon izvršenog proračuna generiraju se izvješća u obliku tablice i Pareto dijagrama o pouzdanosti analiziranog elektroenergetskog sustava.

Izvješće pruža pojedinosti o doprinosu kvara, godišnjoj stopi kvara, godišnjoj nedostupnosti, satima popravka, dostupnosti ( $A_i$ ), pouzdanosti i utjecaju na troškove zastoja za svaku stavku opreme, zajedno s ukupnim iznosom za svaku od ovih kategorija. Ukupna vrijednost se odražava na pouzdanost sustava na godišnjoj razini.

Za slučaj mreže prikazane slikom 4.1 izvršen je proračun za sve tri razine redundancije. Prema tablicama (Tablica 1 i Tablica 2) dobivene su iste ukupne vrijednosti za sve tri razine redundancije. Godišnja stopa kvara iznosi 0,131758, godišnja nedostupnost u satima iznosi 0,81734389, prosječno vrijeme popravka u satima 6,203372, dostupnost 0,9999067 i pouzdanost 0,8765531. Iz rezultata se da zaključiti da je ovaj sustav dobro konstruiran jer je njegova dostupnost približno jednaka vrijednosti jedan.

Prilikom proračuna za redundanciju prvog i drugog reda su dobivene identične vrijednosti te su stoga u nastavku dane tablice i pareto grafovi za analizu redundancijom prvog i trećeg reda. Ono što je vidljivo tabličnim i grafičkim prikazom je da nakon analize redundancijom prvog reda u obzir nisu uzete obje napojne mreže, dok za analizu redundancijom trećeg reda jesu.

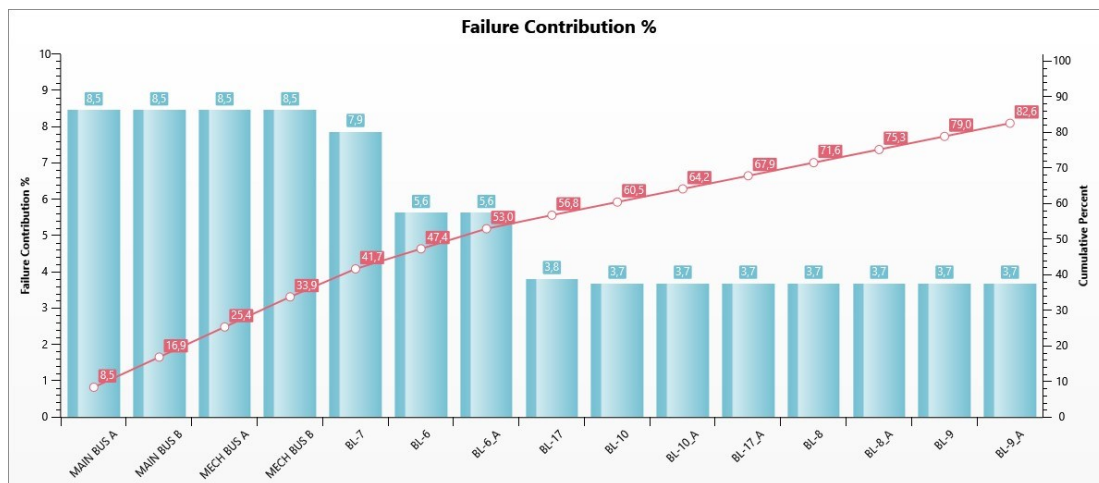
Component Type	Name	Failure Contribution (%)	Failure Rate (/y)	Unavailability (h/y)	Average Repair (h)	Ai	Reliability
Bus	MAIN BUS A	8,46389	0,00949	0,0691821	7,29	0,9999921	0,99055489
Bus	MAIN BUS B	8,46389	0,00949	0,0691821	7,29	0,9999921	0,99055489
Bus	MECH BUS A	8,46389	0,00949	0,0691821	7,29	0,9999921	0,99055489
Bus	MECH BUS B	8,46389	0,00949	0,0691821	7,29	0,9999921	0,99055489
Breaker	BL-7	7,86813	0,00343	0,128625	37,5	0,99998532	0,99657588
Breaker	BL-6	5,63753	0,0096	0,09216	9,6	0,99998948	0,99044593
Breaker	BL-6 A	5,63753	0,0096	0,09216	9,6	0,99998948	0,99044593
Breaker	BL-17	3,81707	0,0052	0,0312	6	0,99999644	0,9948135
Breaker	BL-10	3,68984	0,0052	0,03016	5,8	0,99999656	0,9948135
Breaker	BL-10 A	3,68984	0,0052	0,03016	5,8	0,99999656	0,9948135
Breaker	BL-17 A	3,68984	0,0052	0,03016	5,8	0,99999656	0,9948135
Breaker	BL-8	3,68984	0,0052	0,03016	5,8	0,99999656	0,9948135
Breaker	BL-8 A	3,68984	0,0052	0,03016	5,8	0,99999656	0,9948135
Breaker	BL-9	3,68984	0,0052	0,03016	5,8	0,99999656	0,9948135
Breaker	BL-9 A	3,68984	0,0052	0,03016	5,8	0,99999656	0,9948135
Branch	C-1 A	3,62255	0,00282	0,02961	10,5	0,99999662	0,99718397
Branch	C-1 B	3,62255	0,00282	0,02961	10,5	0,99999662	0,99718397
Branch	C-1 C	1,81128	0,00141	0,014805	10,5	0,99999831	0,99859099
Branch	C-1	1,44902	0,001128	0,011844	10,5	0,99999865	0,99887264
Breaker	BL-14	0,676552	0,00553	0,01106	2	0,99999874	0,99448526
Breaker	BL-14 A	0,676552	0,00553	0,01106	2	0,99999874	0,99448526
Breaker	BL-15	0,676552	0,00553	0,01106	2	0,99999874	0,99448526
Breaker	BL-15 A	0,676552	0,00553	0,01106	2	0,99999874	0,99448526
Breaker	BL-16	0,676552	0,00553	0,01106	2	0,99999874	0,99448526
Breaker	BL-16 A	0,676552	0,00553	0,01106	2	0,99999874	0,99448526
Breaker	BL-16 B	0,676552	0,00553	0,01106	2	0,99999874	0,99448526
Breaker	BL-16 C	0,676552	0,00553	0,01106	2	0,99999874	0,99448526
Breaker	BL-7 A	0,676552	0,00553	0,01106	2	0,99999874	0,99448526
Breaker	BL-3	0,154151	0,00021	0,00126	6	0,99999986	0,99979002
Breaker	BL-3 A	0,154151	0,00021	0,00126	6	0,99999986	0,99979002
Breaker	BL-2	0,113166	0,00185	0,000925	0,5	0,99999989	0,99815171
Breaker	BL-2 A	0,113166	0,00185	0,000925	0,5	0,99999989	0,99815171
Breaker	BL-1	0,0565832	0,00185	0,000925	0,5	0,99999989	0,99815171
Breaker	BL-1 A	0,0565832	0,00185	0,000925	0,5	0,99999989	0,99815171
Breaker	BL-5	0,0565832	0,00185	0,000925	0,5	0,99999989	0,99815171
Breaker	BL-5 A	0,0565832	0,00185	0,000925	0,5	0,99999989	0,99815171
Load	GENERATION BUS		0,01659	0,033179948	1,9999968	0,99999621	0,98354686
Load	L-1		0,021645	0,11233171	5,18973	0,99998718	0,97858757
Load	L-1 A		0,021645	0,11233171	5,18973	0,99998718	0,97858757
Load	LIGHTING BUS		0,024333	0,12593304	5,1754011	0,99998562	0,97596066
Load	M-1		0,026405	0,23989202	9,0850984	0,99997262	0,97394056
Load	M-1 A		0,026405	0,23989202	9,0850984	0,99997262	0,97394056
Load	M-1 B		0,026405	0,23989202	9,0850984	0,99997262	0,97394056
Load	M-1 C		0,026405	0,23989202	9,0850984	0,99997262	0,97394056
Load	M-1 D		0,026405	0,23989202	9,0850984	0,99997262	0,97394056
Load	M-1 E		0,026405	0,23989202	9,0850984	0,99997262	0,97394056
Load	MAIN BUS A		0,0179	0,082259491	4,5955023	0,99999061	0,98225925
Load	MAIN BUS B		0,0179	0,082259491	4,5955023	0,99999061	0,98225925
Load	MECH BUS A		0,023805	0,22481238	9,4439145	0,99997434	0,9764761
Load	MECH BUS B		0,023805	0,22481238	9,4439145	0,99997434	0,9764761
Load	NONCRITICAL BUS		0,024615	0,12785401	5,1941502	0,99998541	0,97568548
	Any Load	100	0,131758	0,81734389	6,203372	0,9999067	0,8765531
	All Loads		0			1	1

Tablica 4.1. Izvješće analize pouzdanosti redukcijom prvog reda

Component Type	Name	Failure Contribution (%)	Failure Rate (/y)	Unavailability (h/y)	Average Repair (h)	Ai	Reliability
Bus	MAIN BUS B	8,46393	0,00949	0,0691821	7,29	0,9999921	0,99055489
Bus	MAIN BUS A	8,46393	0,00949	0,0691821	7,29	0,9999921	0,99055489
Bus	MECH BUS A	8,46385	0,00949	0,0691821	7,29	0,9999921	0,99055489
Bus	MECH BUS B	8,46385	0,00949	0,0691821	7,29	0,9999921	0,99055489
Breaker	BL-7	7,86839	0,00343	0,128625	37,5	0,99998532	0,99657588
Breaker	BL-6	5,63769	0,0096	0,09216	9,6	0,99998948	0,99044593
Breaker	BL-6 A	5,63769	0,0096	0,09216	9,6	0,99998948	0,99044593
Breaker	BL-17	3,81703	0,0052	0,0312	6	0,99999644	0,9948135
Breaker	BL-10	3,68979	0,0052	0,03016	5,8	0,99999656	0,9948135
Breaker	BL-10 A	3,68979	0,0052	0,03016	5,8	0,99999656	0,9948135
Breaker	BL-17 A	3,68979	0,0052	0,03016	5,8	0,99999656	0,9948135
Breaker	BL-8	3,68979	0,0052	0,03016	5,8	0,99999656	0,9948135
Breaker	BL-8 A	3,68979	0,0052	0,03016	5,8	0,99999656	0,9948135
Breaker	BL-9	3,68979	0,0052	0,03016	5,8	0,99999656	0,9948135
Breaker	BL-9 A	3,68979	0,0052	0,03016	5,8	0,99999656	0,9948135
Branch	C-1 A	3,6225	0,00282	0,02961	10,5	0,99999662	0,99718397
Branch	C-1 B	3,6225	0,00282	0,02961	10,5	0,99999662	0,99718397
Branch	C-1 C	1,81125	0,00141	0,014805	10,5	0,99999831	0,99859099
Branch	C-1	1,449	0,001128	0,011844	10,5	0,99999865	0,99887264
Breaker	BL-14 A	0,676543	0,00553	0,01106	2	0,99999874	0,99448526
Breaker	BL-15 A	0,676543	0,00553	0,01106	2	0,99999874	0,99448526
Breaker	BL-14	0,676543	0,00553	0,01106	2	0,99999874	0,99448526
Breaker	BL-15	0,676543	0,00553	0,01106	2	0,99999874	0,99448526
Breaker	BL-16	0,676543	0,00553	0,01106	2	0,99999874	0,99448526
Breaker	BL-16 A	0,676543	0,00553	0,01106	2	0,99999874	0,99448526
Breaker	BL-16 B	0,676543	0,00553	0,01106	2	0,99999874	0,99448526
Breaker	BL-16 C	0,676543	0,00553	0,01106	2	0,99999874	0,99448526
Breaker	BL-7 A	0,676543	0,00553	0,01106	2	0,99999874	0,99448526
Breaker	BL-3	0,154149	0,00021	0,00126	6	0,99999986	0,99979002
Breaker	BL-3 A	0,154149	0,00021	0,00126	6	0,99999986	0,99979002
Breaker	BL-2	0,113165	0,00185	0,000925	0,5	0,99999989	0,99815171
Breaker	BL-2 A	0,113165	0,00185	0,000925	0,5	0,99999989	0,99815171
Breaker	BL-5	0,0565826	0,00185	0,000925	0,5	0,99999989	0,99815171
Breaker	BL-5 A	0,0565826	0,00185	0,000925	0,5	0,99999989	0,99815171
Breaker	BL-1	0,0565825	0,00185	0,000925	0,5	0,99999989	0,99815171
Breaker	BL-1 A	0,0565825	0,00185	0,000925	0,5	0,99999989	0,99815171
Branch	C-2	5,61605E-08	0,00036	0,0009	2,49999999	0,99999999	0,99964006
Branch	C-2 A	5,61605E-08	0,00036	0,0009	2,49999999	0,99999999	0,99964006
Source	UTIL-1	7,98093E-09	1,956	2,58192	1,32	0,99970535	0,14142298
Source	UTIL-2	6,6718E-09	1,956	2,58192	1,32	0,99970535	0,14142298
Branch	BWY-1	4,89672E-09	0,125	1,6125	12,9	0,99981596	0,8824969
Branch	BWY-1 A	4,09329E-09	0,125	1,6125	12,9	0,99981596	0,8824969
Breaker	FS-2	1,08279E-09	0,10154	0,40616	4	0,99995364	0,90344504
Branch	C-4 B	1,02726E-09	0,2490576	0,45328483	1,82	0,99994826	0,77953507
Breaker	FS-2 A	9,04808E-10	0,10154	0,40616	4	0,99995364	0,90344504
Branch	C-4 A	1,42243E-10	0,047167982	0,085845728	1,82	0,9999902	0,95392714
Branch	C-5	1,74804E-11	0,000603	0,00676566	11,22	0,99999923	0,99939718
Branch	C-3	9,01554E-13	0,002679999	0,004877598	1,82	0,99999944	0,99732359
Branch	C-5 A	1,7153E-12	0,0001809	0,002029698	11,22	0,99999977	0,99981912
Branch	TX-1	1,15799E-12	0,00111	0,00555	5	0,99999937	0,99889062
Branch	C-3 A	7,05374E-14	0,000804033	0,00146334	1,82	0,99999983	0,99919629
Branch	TX-1 A	9,65782E-13	0,00111	0,00555	5	0,99999937	0,99889062
Breaker	S-1	1,1918E-13	0,00174	0,00174	1	0,99999998	0,99826151
Breaker	S-2	9,93899E-14	0,00174	0,00174	1	0,99999998	0,99826151
Load	GENERATION BUS		0,01659	0,033179948	1,9999968	0,99999621	0,98354686
Load	L-1		0,021645	0,11233171	5,18973	0,99998718	0,97858757
Load	L-1 A		0,021645	0,11233171	5,18973	0,99998718	0,97858757
Load	LIGHTING BUS		0,024333	0,12593304	5,1754011	0,99998562	0,97596066
Load	M-1		0,026406515	0,23989875	9,0848317	0,99997262	0,97393909
Load	M-1 A		0,026406515	0,23989875	9,0848317	0,99997262	0,97393909
Load	M-1 B		0,026406515	0,23989875	9,0848317	0,99997262	0,97393909
Load	M-1 C		0,026406515	0,23989875	9,0848317	0,99997262	0,97393909
Load	M-1 D		0,026406515	0,23989875	9,0848317	0,99997262	0,97393909
Load	M-1 E		0,026406515	0,23989875	9,0848317	0,99997262	0,97393909
Load	MAIN BUS A		0,0179	0,082259491	4,5955022	0,99999061	0,98225925
Load	MAIN BUS B		0,0179	0,082259491	4,5955022	0,99999061	0,98225925
Load	MECH BUS A		0,023806515	0,22481911	9,4435958	0,99997434	0,97647462
Load	MECH BUS B		0,023806515	0,22481911	9,4435958	0,99997434	0,97647462
Load	NONCRITICAL BUS		0,024615	0,12785401	5,1941502	0,99998541	0,97568548
Any Load		100	0,13176024	0,8173543	6,2033457	0,9999067	0,87655113
All Loads			0			1	1

Tablica 4.2. Izvješće analize pouzdanosti redukcijom trećeg reda

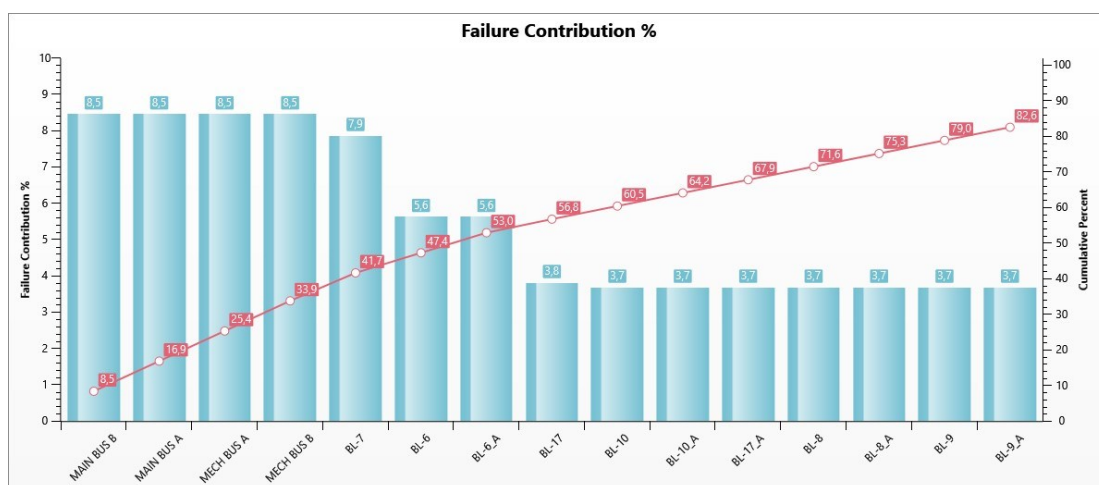
Pareto dijagrami pružaju grafički prikaz doprinosa kvarova, stope kvarova, nedostupnosti i prosječnog vremena popravka. Prikazuju najvažnije čimbenike s lijeva na desno. Crvena linija prikazuje kumulativni postotak ukupnog iznosa.



Slika 4.3 Pareto dijagram postotnog doprinosa kvara za redudanciju prvog reda

Interpretacija dijagrama postotnog doprinosa kvarova prikazanom na slici 4.3:

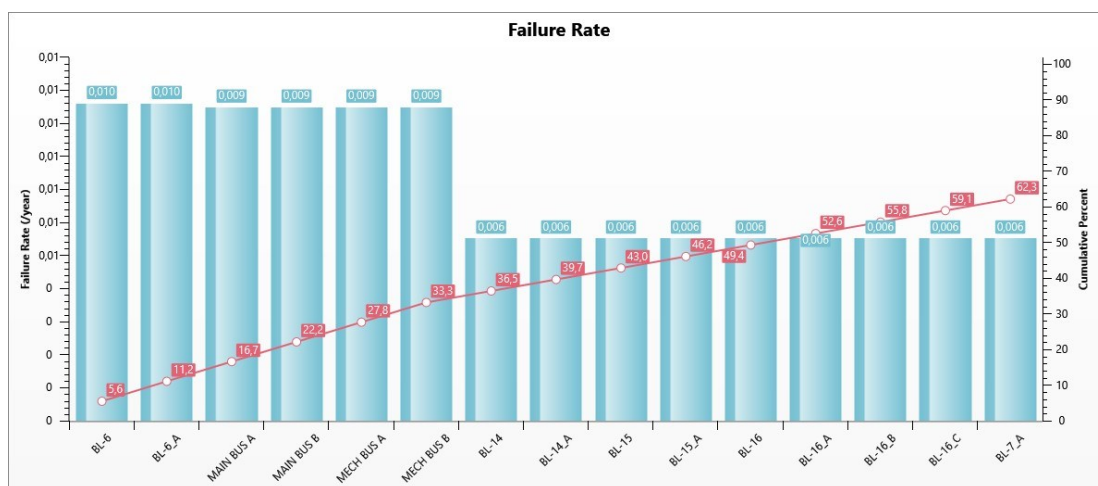
- Glavne sabirnice A i B te mehaničke sabirnice A i B imaju najveći doprinos kvaru, prekidači BL-7 i BL-6 imaju sljedeći najveći, i tako dalje.
- Glavna sabirnica A doprinosi 8,5% ukupnog doprinosa kvaru, ostale sabirnice dodaju se postotku glavne sabirnice A za ukupno 33,9% ukupnog doprinosa kvaru, zatim postotak prekidača BL-7 za ukupni doprinos od 41,7%, i tako dalje.



Slika 4.4 Pareto dijagram postotnog doprinosa kvara za redudanciju trećeg reda



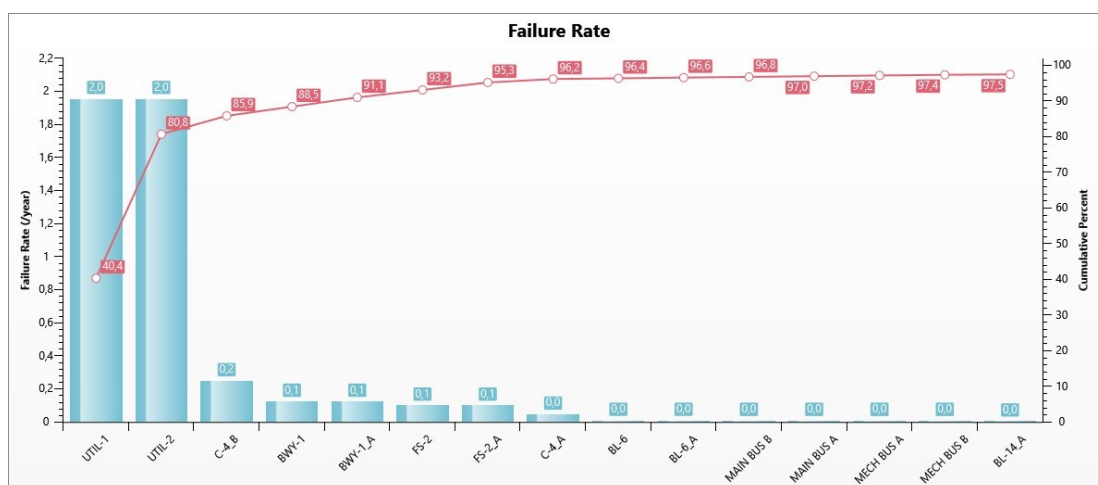
Za pareto dijagram postotnog doprinosa kvara za redudanciju trećeg reda dobili smo iste vrijednosti kao i za redudanciju prvog reda.



Slika 4.5 Pareto dijagram godišnje stope kvara za redudanciju prvog reda

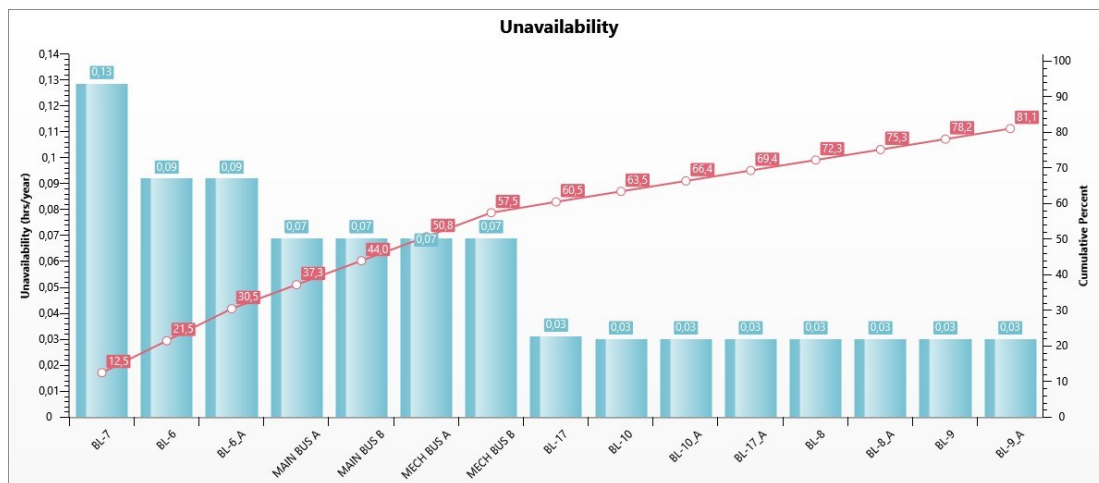
Interpretacija dijagrama godišnje stope kvara prikazanom na slici 4.5:

- Prekidači BL-6, BL-6\_A, glavne sabirnice A i B te mehaničke sabirnice A i B imaju najveći doprinos kvaru, prekidači BL-14 i BL-14\_A imaju sljedeći najveći, i tako dalje.
- Prekidač BL-6 doprinosi 5,6% ukupnog doprinosa kvaru, prekidač BL-6\_A i ostale sabirnice dodaju se postotku prekidača BL-6 za ukupno 33,3% ukupnog doprinosa kvaru, zatim postotak prekidača BL-14 za ukupni doprinos od 36,5%, i tako dalje.



Slika 4.6 Pareto dijagram godišnje stope kvara za redudanciju trećeg reda

Na pareto dijagramu godišnje stope kvara za redudanciju trećeg reda (Slika 4.6) da se uočiti da su sada u obzir uzete obje napojne mreže te one imaju najvišu godišnju stopu kvara čak do dva puta godišnje.



Slika 4.7 Pareto dijagram godišnje nedostupnosti u satima za redudanciju prvog reda

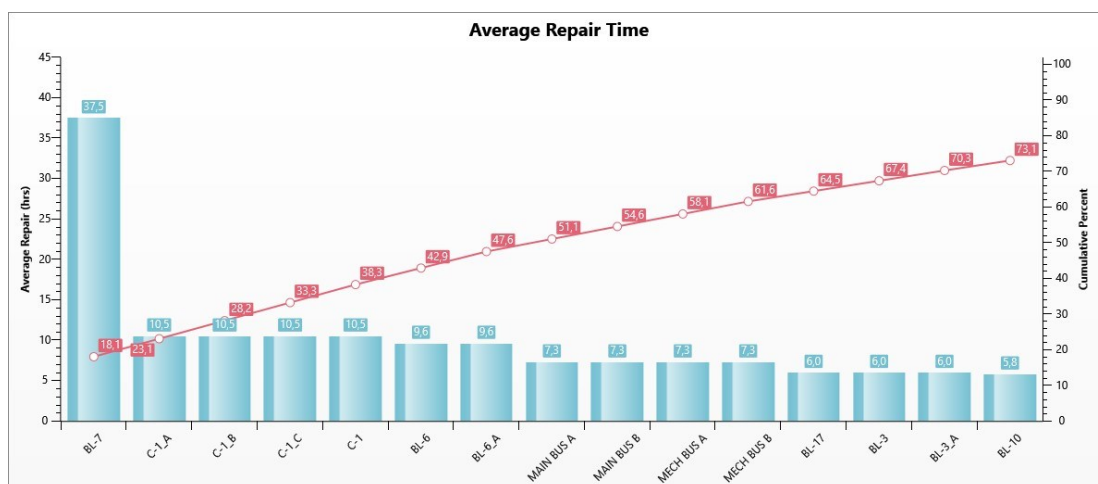
Interpretacija dijagrama godišnje nedostupnosti u satima prikazanom na slici 4.7:

- Prekidač BL-7 ima najveću godišnju nedostupnost, a zatim prekidači BL-6, BL-6\_A i tako dalje.
- Prekidač BL-7 doprinosi 12,5% ukupne godišnje nedostupnosti, prekidači BL-6 i BL-6\_A dodaju se postotku prekidača BL-7 za ukupno 30,5% ukupne godišnje nedostupnosti, zatim postotak glavnih i mehaničkih sabirnica za godišnju nedostupnost od 57,5%, i tako dalje.

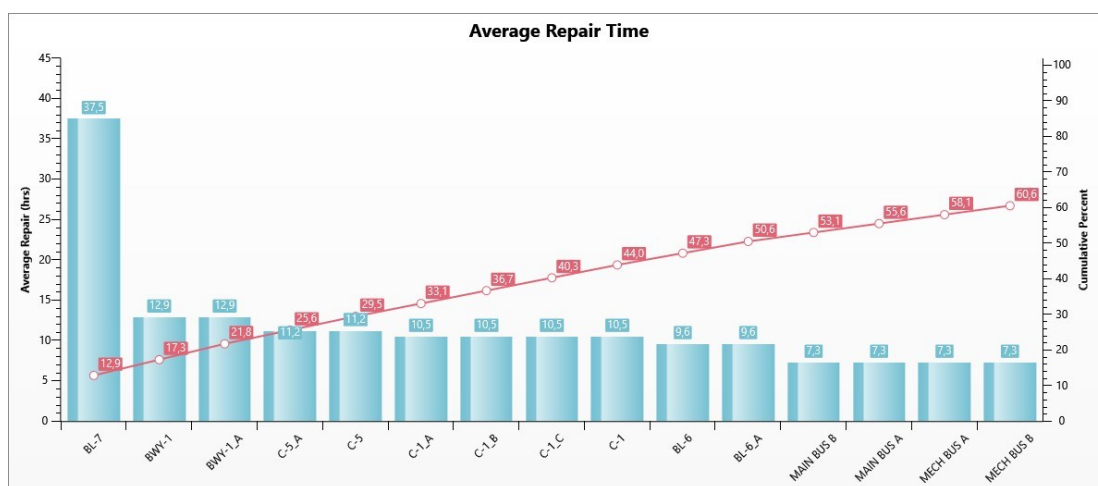


Slika 4.8 Pareto dijagram godišnje nedostupnosti u satima za redudanciju trećeg reda

Također sada za redudanciju trećeg reda (Slika 4.8) obje napojne mreže imaju najveću godišnju nedostupnost čak 47,8% ukupnog vremena.



Slika 4.9 Pareto dijagram prosječnog vremena popravka u satima za redudanciju prvog reda



Slika 4.10 Pareto dijagram prosječnog vremena popravka u satima za redudanciju trećeg reda

Zbog najvećeg prosječnog vremena popravka prekidača BL-7 za sve razine redudancije ima najveći doprinos za ukupno prosječno vrijeme popravka (Slika 4.9 i Slika 4.10).

Dijagrami omogućuju da se pozornost usmjeri na najkritičnija područja pouzdanosti u analiziranom elektroenergetskom sustavu, pri čemu se ta kritičnost smanjuje kako se pomiče slijeva nadesno.

## 5. ZAKLJUČAK

Temeljna zadaća inženjera stručnjaka i planera u elektroprivredi je siguran i pouzdan rad EES-a uz prihvatljive što manje troškove i da se održava sigurnost, cjelovitost i raspoloživost EES-a na zadovoljavajućoj razini, te da se EES odupre raznim kvarovima i poremećajima koji su u svim njegovim dijelovima široko rasprostranjeni.

Kako elektroenergetski sustavi budu starili, učestalost i trajanje prekida značajno će se povećati. Sada je više nego ikada presudno za održavanje i projektiranje elektroenergetskih sustava imati solidno razumijevanje analize i dizajna pouzdanih i troškovno učinkovitih istih. Upravo zato je kreiran modul za vršenje analize pouzdanosti u sklopu programa EasyPower na zahtjev mnogih korisnika. Običnim korisnicima i inženjerima elektrotehnike pruža alate za procjenu pouzdanosti, dostupnosti i utjecaja na troškove zastoja u njihovim mrežama elektroenergetskog sustava uz vrlo malo dodatnog rada.

## LITERATURA

- [1] M. Čepin, *Assessment of Power System Reliability: Methods and Applications*, London: Springer-Verlag, 2011.
- [2] S. Nikolovski, *Osnove analize pouzdanosti elektroenergetskog sustava*, Osijek: Elektrotehnički fakultet Sveučilišta J. J. Strossmayera u Osijeku, 1995.
- [3] D. O. K. Ali A. Chowdhury, *Power Distribution System Reliability: Practical Methods*, New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.
- [4] R. Billinton i R. N. Allan, *Reliability Assessment of Large Electric Power Systems*, 101 Philip Drive, Assinippi Park, Massachusetts 02061: Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [5] R. N. Allan i R. Billington, *An Efficient Algorithm for Deducing the Minimal Cuts and Reliability Indices of a General Network Configuration*, IEEE, 1976.
- [6] V. Mikuličić i Z. Šimić, *Modeli pouzdanosti, raspoloživosti i rizika u elektroenergetskom sustavu*, 1. dio: Analitičke metode proračuna pouzdanosti i raspoloživosti, Zagreb: Kigen, 2008.
- [7] R. Billinton i W. Li, *Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods*, New York: Plenum Press, 1994.
- [8] N. Sarapa, *Teorija vjerojatnosti*, Zagreb: Školska knjiga, 1992.
- [9] R. E. Brown, *Electric Power Distribution Reliability*, North Carolina: ABB Electric Systems Technology Institute Raleigh, 2002.
- [10] S. Nikolovski, D. Šljivac i V. Mikuličić, »Procjena pouzdanosti prijenosne mreže Slavonije i Baranje nakon obnove i izgradnje vodova 110kV,« u *ČETVRTO SAVJETOVANJE HR CIGRE*, Cavtat, 1999.
- [11] D. Bokal, J. Hostnik i F. Gubina, »Zanesljivost delovanja DEES, I. del – Teoretične,« u *3. konferenca slovenskih elektroenergetikov CIGRE*, Nova Gorica, 1997.
- [12] D. PowerFactory, *DIgSILENT PowerFactory User Manual*, Gomaringen, 2017.
- [13] D. Žigman, K. Meštrović i G. Malčić, *Određivanje raspoloživosti rasklopnog postrojenja metodom stabla kvara*, Cavtat: 7. savjetovanje HRO CIGRE, 2005..
- [14] EasyPower, »Basic User Manual,« [Mrežno]. Available: [http://enresi.com/assets/uploads/43c1f-basic\\_user\\_manual.pdf](http://enresi.com/assets/uploads/43c1f-basic_user_manual.pdf). [Pokušaj pristupa 24 Kolovoz 2022.].
- [15] S. Nikolovski, T. Barić i P. Marić, *Programski paketi za analizu i simulaciju rada; Upute za rad - drugo dopunjeno izdanje*, Osijek: Elektrotehnički fakultet Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, 2010..
- [16] EasyPower, »EasyPower - Reliability (Opis modula za vršenje analize pouzdanosti),« [Mrežno]. Available: [www.easypower.com](http://www.easypower.com). [Pokušaj pristupa 25 Kolovoz 2022.].

## SAŽETAK

Ovaj diplomski rad opisuje važnost analize pouzdanosti elektroenergetskih sustava gdje su objašnjeni osnovni pojmovi vezano za istu. Prikazan je princip rada modula za vršenje analize pouzdanosti u sklopu programa EasyPower. Dat je primjer vršenja analize pouzdanosti na realnom elektroenergetskom sustavu gdje se mogu uvidjeti mnogobrojne prednosti ovog programskog alata.

**Ključne riječi:** pouzdanost, EasyPower, pokazatelji pouzdanosti, metode proračuna

## **ABSTRACT**

This paper describes the importance of reliability analysis of power systems where basic concepts related to the same are explained. The principle of operation for reliability analysis module in EasyPower program is presented. An example is given for performing a reliability analysis on a real power system where many advantages of this software tool can be seen.

**Key words:** reliability, EasyPower, reliability indicators, calculation methods

## POPIS SLIKA

Slika 3.1 Skupna podjela pouzdanosti [2].....	4
Slika 3.2 Odnos funkcije razdiobe kvara $Q(t)$ i funkcije pouzdanosti $R(t)$ [6].....	6
Slika 3.3 Funkcija razdiobe vjerojatnosti kvara komponente [6].....	6
Slika 3.4 Periodi rada obnovljivih komponenti [2].....	8
Slika 3.5 Odnos funkcije raspoloživosti komponente i funkcije pouzdanosti [2].....	9
Slika 3.6 Prikaz funkcije intenziteta kvara komponenti [2].....	9
Slika 3.7 Metode za proračun pouzdanosti i njihova podjela [2].....	10
Slika 3.8 Prikaz normalne razdiobe [9].....	14
Slika 3.9 Prikaz eksponencijalne razdiobe [9].....	15
Slika 3.10 Markovljev model dvije obnovljive komponente [1].....	17
Slika 3.11 Dijagram analize stabla kvara [1].....	19
Slika 3.12 Pokazatelji pouzdanosti i njihova podjela [11].....	20
Slika 3.13 Podjela elektroenergetskog sustava na hijerarhijske razine [2].....	25
Slika 3.14 Prikaz modela sustava za prve hijerarhijske razine [4].....	25
Slika 3.15 Model proizvodno-prijenosnog sustava [4].....	26
Slika 4.1 Shema mreže u programu Easy Power.....	29
Slika 4.2 Dijalog okvir za definiranje troškova zastoja.....	31
Slika 4.3 Pareto dijagram postotnog doprinosa kvara za redudanciju prvog reda.....	35
Slika 4.4 Pareto dijagram postotnog doprinosa kvara za redudanciju trećeg reda.....	35
Slika 4.5 Pareto dijagram godišnje stope kvara za redudanciju prvog reda.....	36
Slika 4.6 Pareto dijagram godišnje stope kvara za redudanciju trećeg reda.....	36
Slika 4.7 Pareto dijagram godišnje nedostupnosti u satima za redudanciju prvog reda.....	37
Slika 4.8 Pareto dijagram godišnje nedostupnosti u satima za redudanciju prvog reda.....	37
Slika 4.9 Pareto dijagram prosječnog vremena popravka u satima za redudanciju prvog reda.....	38
Slika 4.10 Pareto dijagram prosječnog vremena popravka u satima za redudanciju trećeg reda.....	38



## **POPIS TABLICA**

Tablica 4.1. Izvješće analize pouzdanosti redudancijom prvog reda .....33

Tablica 4.2. Izvješće analize pouzdanosti redudancijom trećeg reda .....34

## ŽIVOTOPIS

Tomislav Ramljak, rođen je 13. kolovoza 1998. godine u Žepču, Bosna i Hercegovina. Nakon završene Osnovne škole „Žepče“ u Žepču, upisuje Tehničku srednju školu u Katoličkom školskom centru „Don Bosco“, smjer Tehničar za mehatroniku. Po završetku srednje škole upisuje sveučilišni preddiplomski studij elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku gdje ga uspješno završava. Trenutno je student druge godine diplomskog studija elektrotehnike, smjer elektroenergetika.

---

Potpis autora

# PRILOZI

Type	Name	Failure Rate	Failure Rate Unit	Repair Time	Replace Time	Downtime Cost	Repair Cost	Replace Cost	Action on	Source
		(/y)		(h)	(h)	(/h)			Failure	
Bus	BUS-1						0	0	Repair	Entered manually
Bus	BUS-3 B						0	0	Repair	Entered manually
Bus	BUS-6						0	0	Repair	Entered manually
Bus	BUS-6 A						0	0	Repair	Entered manually
Bus	BUS-7						0	0	Repair	Entered manually
Bus	BUS-7 A						0	0	Repair	Entered manually
Bus	BUS-8 A						0	0	Repair	Entered manually
Bus	BUS-8 B						0	0	Repair	Entered manually
Bus	BUS-10						0	0	Repair	Entered manually
Bus	BUS-11						0	0	Repair	Entered manually
Bus	BUS-12						0	0	Repair	Entered manually
Bus	BUS-13						0	0	Repair	Entered manually
Bus	BUS-14						0	0	Repair	Entered manually
Bus	BUS-1 A						0	0	Repair	Entered manually
Bus	GENERATOR BUS				0	0	0	0	Repair	Entered manually
Bus	LIGHTING						0	0	Repair	Entered manually
Bus	MAIN BUS A	0,00949		7,29	0		0	0	Repair	Entered manually
Bus	MAIN BUS B	0,00949		7,29	0		0	0	Repair	Entered manually
Bus	MECH BUS A	0,00949		7,29	0		0	0	Repair	Entered manually
Bus	MECH BUS B	0,00949		7,29	0		0	0	Repair	Entered manually
Bus	NONCRITICAL						0	0	Repair	Entered manually
Utility	UTIL-1	1,956		1,32	0		0	0	Repair	Entered manually
Utility	UTIL-2	1,956		1,32	0		0	0	Repair	Entered manually
Generator	GEN-1	0,1235		18,28	0		0	0	Repair	Entered manually
Generator	GEN-1 A	0,1235		18,28	0		0	0	Repair	Entered manually
Generator	GEN-1 B	0,1235		18,28	0		0	0	Repair	Entered manually
Generator	GEN-1 C	0,1235		18,28	0		0	0	Repair	Entered manually
Motor	M-1	0,01107		1					Repair	IEEE 493-2007 Annex Q
Motor	M-1 A	0,01107		1					Repair	IEEE 493-2007 Annex Q
Motor	M-1 B	0,01107		1					Repair	IEEE 493-2007 Annex Q
Motor	M-1 C	0,01107		1					Repair	IEEE 493-2007 Annex Q
Motor	M-1 D	0,01107		1					Repair	IEEE 493-2007 Annex Q
Motor	M-1 E	0,01107		1					Repair	IEEE 493-2007 Annex Q
Two Winding Transformer	TX-1	0,00111		5	0		0	0	Repair	Entered manually
Two Winding Transformer	TX-1_A	0,00111		5	0		0	0	Repair	Entered manually
Load	GENERATION BUS	0		0	0		0	0	Repair	Entered manually
Load	L-1						0	0		Entered manually
Load	L-1 A						0	0		Entered manually
Load	LIGHTING BUS	0		0	0		0	0	Repair	Entered manually
Load	MAIN BUS A	0		0	0		0	0	Repair	Entered manually
Load	MAIN BUS B	0		0	0		0	0	Repair	Entered manually
Load	MECH BUS A	0		0	0		0	0	Repair	Entered manually
Load	MECH BUS B	0		0	0		0	0	Repair	Entered manually
Load	NONCRITICAL BUS	0		0	0		0	0	Repair	Entered manually
LV Breaker	BL-1	0,00185		0,5	0		0	0	Repair	Entered manually
LV Breaker	BL-2	0,00185		0,5	0		0	0	Repair	Entered manually
LV Breaker	BL-2 A	0,00185		0,5	0		0	0	Repair	Entered manually
LV Breaker	BL-3	0,00021		6	0		0	0	Repair	Entered manually
LV Breaker	BL-3 A	0,00021		6	0		0	0	Repair	Entered manually
LV Breaker	BL-5	0,00185		0,5	0		0	0	Repair	Entered manually
LV Breaker	BL-5 A	0,00185		0,5	0		0	0	Repair	Entered manually
LV Breaker	BL-6	0,0096		9,6	0		0	0	Repair	Entered manually
LV Breaker	BL-6 A	0,0096		9,6	0		0	0	Repair	Entered manually
LV Breaker	BL-7	0,00343		37,5	0		0	0	Repair	Entered manually
LV Breaker	BL-7 A	0,00553		2	0		0	0	Repair	Entered manually
LV Breaker	BL-8	0,0052		5,8	0		0	0	Repair	Entered manually
LV Breaker	BL-8 A	0,0052		5,8	0		0	0	Repair	Entered manually
LV Breaker	BL-9	0,0052		5,8	0		0	0	Repair	Entered manually
LV Breaker	BL-9 A	0,0052		5,8	0		0	0	Repair	Entered manually
LV Breaker	BL-10	0,0052		5,8	0		0	0	Repair	Entered manually
LV Breaker	BL-10 A	0,0052		5,8	0		0	0	Repair	Entered manually
LV Breaker	BL-14	0,00553		2	0		0	0	Repair	Entered manually
LV Breaker	BL-14 A	0,00553		2	0		0	0	Repair	Entered manually
LV Breaker	BL-15	0,00553		2	0		0	0	Repair	Entered manually
LV Breaker	BL-15 A	0,00553		2	0		0	0	Repair	Entered manually
LV Breaker	BL-16	0,00553		2	0		0	0	Repair	Entered manually
LV Breaker	BL-16 A	0,00553		2	0		0	0	Repair	Entered manually
LV Breaker	BL-16 B	0,00553		2	0		0	0	Repair	Entered manually
LV Breaker	BL-16 C	0,00553		2	0		0	0	Repair	Entered manually
LV Breaker	BL-17	0,0052		6	0		0	0	Repair	Entered manually
LV Breaker	BL-17 A	0,0052		5,8	0		0	0	Repair	Entered manually
LV Breaker	BL-1 A	0,00185		0,5	0		0	0	Repair	Entered manually

Switch	S-1	0,00174		1	0		0	0	Repair	Entered manually
Switch	S-2	0,00174		1	0		0	0	Repair	Entered manually
Fuse	FS-2	0,10154		4	0		0	0	Repair	Entered manually
Fuse	FS-2 A	0,10154		4	0		0	0	Repair	Entered manually
Cable	C-1	0,00141	/1000'	10,5	0		0	0	Repair	Entered manually
Cable	C-1 A	0,00141	/1000'	10,5	0		0	0	Repair	Entered manually
Cable	C-1 B	0,00141	/1000'	10,5	0		0	0	Repair	Entered manually
Cable	C-1 C	0,00141	/1000'	10,5	0		0	0	Repair	Entered manually
Cable	C-2	0,00012	/1000'	2,5	0		0	0	Repair	Entered manually
Cable	C-2 A	0,00012	/1000'	2,5	0		0	0	Repair	Entered manually
Cable	C-3	0,00893333	/1000'	1,82	0		0	0	Repair	Entered manually
Cable	C-3 A	0,00268011	/1000'	1,82	0		0	0	Repair	Entered manually
Cable	C-4 A	0,00893333	/1000'	1,82	0		0	0	Repair	Entered manually
Cable	C-4 B	0,04717	/1000'	1,82	0		0	0	Repair	Entered manually
Cable	C-5	0,00201	/1000'	11,22	0		0	0	Repair	Entered manually
Cable	C-5 A	0,000603	/1000'	11,22	0		0	0	Repair	Entered manually
Cable	C-6	0,000603	/1000'	11,22	0		0	0	Repair	Entered manually
Cable	C-6 A	0,000603	/1000'	11,22	0		0	0	Repair	Entered manually
Cable	C-6 B	0,000603	/1000'	11,22	0		0	0	Repair	Entered manually
Cable	C-6 C	0,000603	/1000'	11,22	0		0	0	Repair	Entered manually
Busway	BWY-1	0,0125	/100'	12,9	0		0	0	Repair	Entered manually
Busway	BWY-1 A	0,0125	/100'	12,9	0		0	0	Repair	Entered manually

#### P.4.1 Sadržaj baze podataka o pouzdanostima