

SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

Završni rad

**RASPOLOŽIVOST DISTRIBUCIJSKIH MREŽA**

Rijeka, rujan 2016.

Marin Benčić

0069060395

SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Preddiplomski stručni studij elektrotehnike

Završni rad

**RASPOLOŽIVOST DISTRIBUCIJSKIH MREŽA**

Mentor: mr. sc. Marijana Živić Đurović, v. pred.

Rijeka, rujan 2016.

Marin Benčić

0069060395

# TEHNIČKI FAKULET

Povjerenstvo za završne ispite  
preddiplomskog stručnog studija elektrotehnike  
Br.: 602-04/16-14/19  
Rijeka, 14.03.2016.

## Z A D A T A K za završni rad

Pristupnik: Marin Benčić

Matični broj: : 0069060395  
Lokalni matični broj: 12800039

Naziv zadatka: **RASPOLOŽIVOST DISTRIBUCIJSKIH MREŽA**

Title (*English*): **DISTRIBUTION NETWORK AVAILABILITY**

Polje znanstvenog područja: 2.03. Elektrotehnika  
Grana znanstvenog područja: 2.03.01 elektroenergetika

Osnovno o distribucijskim mrežama. Osnove teorije pouzdanosti. Sustavi s popravljivim komponentama. Raspoloživost. Pokazatelji pouzdanosti. Računanje pouzdanosti distribucijskih mreža. Utjecaj pouzdanosti na proces planiranja distribucijskih mreža.

Mentor:



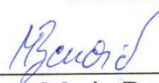
V. pred. mr. sc. Marijana Živić Đurović,  
dipl.ing.

Predsjednica Povjerenstva:



Izv. prof. dr. sc. Vera Gradišnik, dipl.ing.

Student:



Marin Benčić

Završni radovi moraju biti u skladu s „Uputama za pisanje završnog / diplomskog rada“.

## **IZJAVA**

Sukladno s člankom 9. Pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku stručnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, od lipnja 2011., izjavljujem da sam samostalno izradio završni rad prema zadatku br. 602-04/16-14/19 od 14.03.1016.

---

Marin Benčić

# SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. OSNOVNO O DISTRIBUCIJSKIM MREŽAMA.....	3
3. OSNOVNE TEORIJE POUZDANOSTI.....	6
3.1. Pouzdanost.....	6
3.2. Model nepopravljive komponente.....	8
3.3. Model popravljive komponente.....	11
3.4. Markovljev model popravljive komponente.....	13
3.5. Markovljev model dviju popravljivih komponenata.....	17
3.6. Serijski spoj komponenata.....	19
3.7. Paralelni spoj komponenata.....	20
4. POUZDANOST DISTRIBUCIJSKIH MREŽA.....	21
4.1. Pouzdanost distribucijskog sustava.....	21
4.2. Pokazatelji pouzdanosti distribucijskih mreža.....	23
5. RAČUNANJE POUZDANOSTI DISTRIBUCIJSKIH MREŽA.....	28
6. PRIMJERI RAČUNANJA POUZDANOSTI DISTRIBUCIJSKIH MREŽA.....	33
7. UTJECAJ POUZDANOSTI NA PROCES PLANIRANJA RAZVOJA DISTRIBUCIJSKIH MREŽA.....	41
8. ZAKLJUČAK.....	43
LITERATURA.....	44
POPIS SLIKA.....	45
POPIS TABLICA.....	46
SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI NA HRVATSKOM I ENGLISKOM JEZIKU.....	47

# 1. UVOD

Elektroenergetski sustav sastavljen je od četiri glavna dijela:

- Elektrane
- Prijenosne mreže
- Distribucijske mreže
- Potrošača električne energije

Elektrana je postrojenje u kojem nastaje električna energija i sastoji se od:

- Električnog generatora
- Blok transformatora

Električni generator je dio elektrane koji proizvodi električnu energiju. Blok transformator je uređaj koji električnu energiju dobivenu u generatoru pretvara na naponsku razinu voda na koji je elektrana spojena.

Prijenosnom mrežom električna energija se prenosi od elektrana prema distribucijskoj mreži i potrošačima. Prijenosna mreža služi za razmjenu snaga između elektroenergetskih sustava. Sastoji se od zračnih i kabelskih vodova te rasklopnih postrojenja. Zračni i kabelski vodovi služe za prijenos električne energije između rasklopnih postrojenja.

Distribucijska mreža služi za distribuciju električne energije do potrošača. Distribucijsku mrežu možemo podijeliti na srednjenaponsku i niskonaponsku distribucijsku mrežu. Sastoji se od zračnih i kabelskih vodova koji prenose električnu energiju na manje udaljenosti. Distribucijski i mrežni transformatori transformiraju električnu energiju iz jednog naponskog nivoa na drugi.

Potrošači preuzimaju električnu energiju iz distribucijske ili prijenosne mreže i koriste je za napajanje električnih aparata i uređaja.

Predmet istraživanja ovog rada su raspoloživost i pouzdanost distribucijskih mreža. U drugom poglavlju navedene su osnovne karakteristike distribucijskih mreža. Treće poglavlje opisuje osnovne teorije pouzdanosti te je detaljno opisan pojam pouzdanosti. Opisani su još model nepopravljive komponente, model popravljive komponente, raspoloživost, Markovljevi modeli popravljivih komponenti te serijski i paralelni spoj komponenata. U četvrtom poglavlju objašnjena je pouzdanost distribucijskih mreža te pokazatelji distribucijskih mreža. Peto poglavlje opisuje računanje pouzdanosti distribucijskih mreža. Računanje pouzdanosti detaljno

je prikazano u primjerima. Sedmo poglavlje objašnjava utjecaj pouzdanosti na proces planiranja razvoja distribucijskih mreža.

Zaključak će sažeti rad u nekoliko osnovnih zaključaka. Na kraju su navedeni sažetak, popis literature te popis slika i tablica.

## **2. OSNOVNO O DISTRIBUCIJSKIM MREŽAMA**

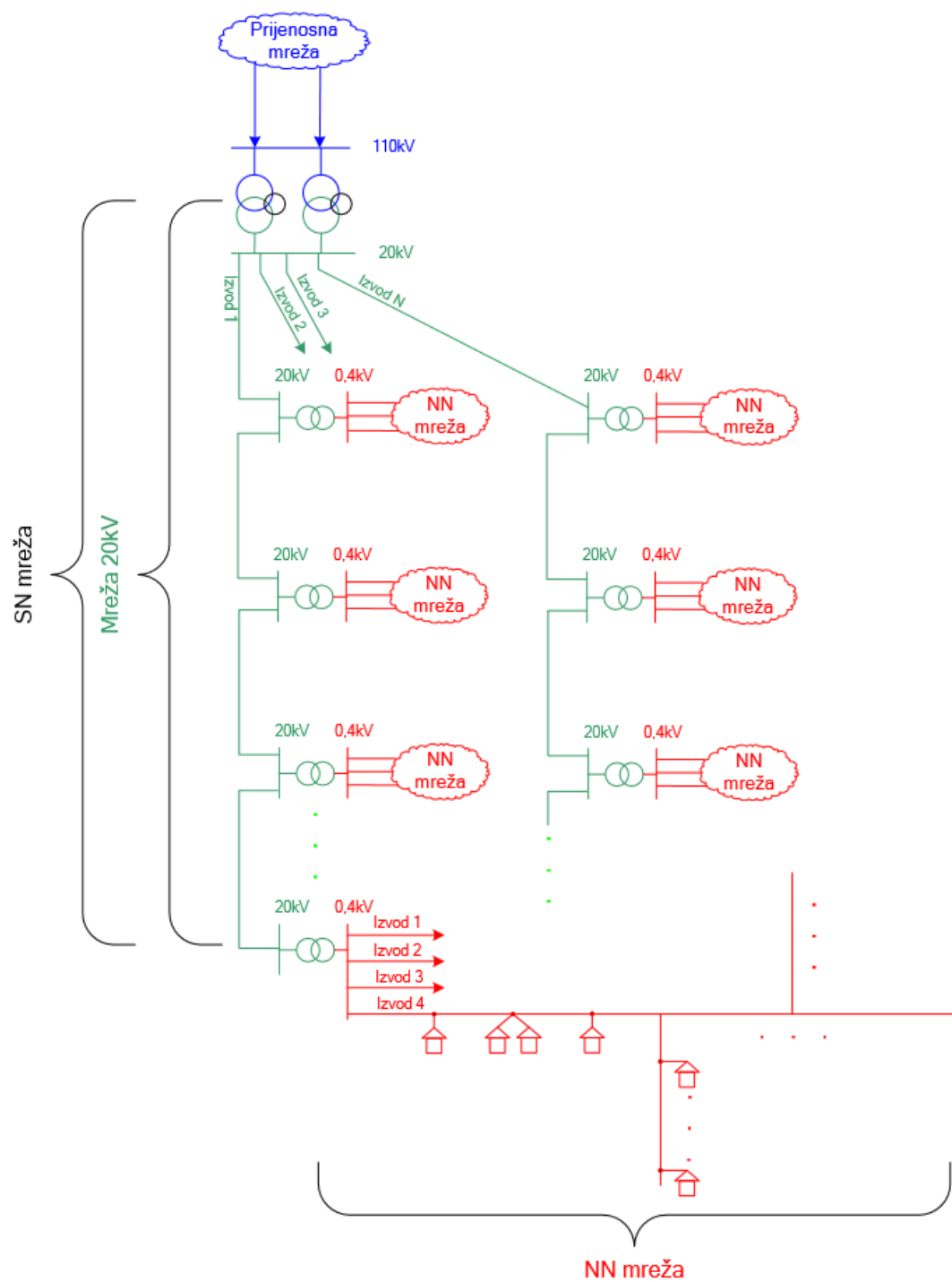
Distribucijska mreža preuzima električnu energiju iz prijenosne mreže u transformatorskim stanicama i funkcija joj je distribucija električne energije do potrošača. Jedan dio električne energije preuzima i iz manjih elektrana koje su spojene na distribucijsku mrežu.

Karakteristike distribucijske mreže su:

- Niži naponski nivoi nego kod prijenosne mreže jer prenose puno manju snagu.
- Snaga se prenosi na manjim udaljenostima.
- Većim dijelom su otvorene strukture i imaju zrakasti oblik čime je smanjena pogonska sigurnost.
- Srednjenaponske gradske distribucijske mreže većinom su upetljane. Znači da je u slučaju kvara jednog elementa moguće napajanje iz nekog drugog smjera. U pogonu je uključeno napajanje iz jednog smjera, a napajanje iz drugog smjera je rezervno i uključuje se po potrebi.
- Niskonaponske mreže ne mogu se dvostrano napajati.
- Glavni elementi su zračni i kabelski vodovi te transformatori.







Slika 2.2. Struktura distribucijske mreže s jednim naponskim nivoom [L3]

### 3. OSNOVNE TEORIJE POUZDANOSTI

#### 3.1. Pouzdanost

Pojam pouzdanosti i pojam kvalitete vrlo su vezani te je važno obilježje kvalitete. Pojam pouzdanosti predstavlja mogućnost neke komponente da ne mijenja svoju kvalitetu u različitim uvjetima. Pouzdanost određuju kvaliteta i radni uvjeti. Kod analize pouzdanosti glavna jedinica je komponenta. Postoje popravljiva i nepopravljiva komponenta.

Pojam pouzdanosti vezan je za one karakteristike koje komponenta ima prije početka upotrebe. Npr., ne može se govoriti o pouzdanosti transformatora ako se uzme u obzir moguće znatno povišenje napona. U slučaju da postoji prenaponska zaštita ona ulazi u složene karakteristike koje određuju kvalitetu i pouzdanost.

U današnjem tehnološkom razvoju nastaju sve složeniji sustavi te se zbog toga pouzdanost smanjuje. Usprkos tome potrebna je sve veća pouzdanost. Upravo je to problem koji teorija pouzdanosti treba riješiti. Dva su načina rješavanja problema, a to su povećanje kvalitete i pouzdanosti komponenti u sustavu te bolja izvedba pouzdanog sustava iz nepouzdanih komponenti i razvoj postupaka održavanja komponenata za vrijeme rada. Teoriju pouzdanosti možemo definirati kao znanstvenu disciplinu koja nastoji utvrditi opća pravila kojih se treba pridržavati prilikom konstruiranja, eksperimentiranja, proizvodnje i upotrebe komponenata da bi se ostvarilo najdjelotvornije korištenje komponenata.

Sljedeći pojmovi teorije pouzdanosti su kvar i rad bez kvara. Rad bez kvara podrazumijeva da komponenta obavlja svoje funkcije u određenim uvjetima i određenom vremenu. Kvar predstavlja gubitak ili promjenu svojstva komponente koji za posljedicu imaju zaustavljanje njene funkcije. Postoje određen i neodređen kvar. Statistički zaključci daju uvid u karakteristike kvarova. Kvarovi komponenata mogu se podijeliti na:

- Potpune kvarove
- Kvarove zbog postupne
- Kvarove zbog fizičke istrošenosti

Potpuni kvarovi su oni koji nastaju neočekivano i potpuno mijenjaju kvalitetu komponente. Ne mogu se točno predvidjeti. No, ako je poznata učestalost kvarova pojedinih komponenti statistički je moguće predvidjeti vjerojatnost potpunih kvarova za određeni vremenski period.

Kvarovi zbog postupne degradacije posljedica su ovisnosti komponente o vremenu. Takvi kvarovi rješavaju se zamjenom. Zbog njih se provodi planiranje i održavanje komponenti.

Kvarovi zbog fizičke istrošenosti su predvidivi na temelju karakteristika komponente te se otklanjaju zamjenama.

Ova podjela prikazuje koliko je složeno teorijsko i praktično predviđanje pouzdanosti komponente ili sustava. Skoro pa i nije moguće obuhvatiti sve elemente o kojima ovisi pouzdanost. Zbog toga se u analizama pouzdanosti neke stvari zanemaruju. S gledišta održavanja postoje:

- Kvarovi komponenata koji uzrokuju trenutni ispad sustava iz pogona (iznenadni kvarovi)
- Kvarovi komponenata koji uzrokuju ispad sustava zbog prekoračenja dopuštenih tolerancija rada (postupni kvarovi)

Vrijeme trajanja komponente je sposobnost produljene upotrebe uz potrebna održavanja koja uključuju i različite popravke. Kada je komponenta previše potrošena ili više nije isplativa njeno vrijeme trajanja je gotovo. Iako vrijeme trajanja i rad bez kvara nisu ovisni jedno o drugom u nekim slučajevima se podudaraju.

Pouzdanost je većinom povezana sa slučajnim kvarovima pa ima statističke karakteristike. Podaci o kvarovima potrebni su da bi se donijeli zaključci o pouzdanosti. Ti podaci se dobivaju ispitivanjem i prikupljanjem podataka o vremenu trajanja komponente i o nastalim kvarovima na komponenti. Neki od uzroka nastanka kvara su složenost komponente, čovjek, stalni noviteti, neadekvatno znanje, neiskustvo, loši tehnički uvjeti, nepredviđeni radni uvjeti itd.

Navedene činjenice daju različite definicije pouzdanosti:

- Pouzdanost je mogućnost odolijevanju kvaru
- Pouzdanost određuju ukupni kvarovi koji nastaju na komponentama u nekom periodu
- Pouzdanost određuju prosječni radni sati koji su potrebni za jedan sat zadovoljavajućeg rada
- Pouzdanost je vjerojatnost neprekidnog rada u određenom periodu
- Pouzdanost određuje broj komponenata koje uspješno rade unutar određenog perioda
- Pouzdanost je omjer stvarnog i idealnog rada neke komponente
- Pouzdanost je vjerojatnost da će komponenta neprekidno raditi u određenom periodu

Iz toga se može zaključiti da je osnovni zadatak teorije pouzdanosti predviđanje vremena trajanja funkcioniranja neke komponente pri određenim uvjetima. Stoga je pouzdanost matematička vjerojatnost da će neka komponenta ili sustav uspješno raditi kroz predviđeno vrijeme i uz određene uvjete.

Kriterij zadovoljavajućeg rada pitanje je tehničke ocjene i procjene te uključuje detaljna ispitivanja kvarova za svaku komponentu i svaki sustav. U tom slučaju pouzdanost je neizostavni dio u procesu planiranja i konstruiranja. Predviđeno vrijeme trajanja rada može biti kontinuirano ili isprekidano te se može mjeriti u jedinicama vremena ili ciklusima rada. Postoje konstantni ili promjenjivi uvjeti rada. Kod komponenata na otvorenom prostoru radni uvjeti su promjenjiviji te se u razdoblju lošeg vremena mogućnost nastanka kvarova bitno povećava.

### 3.2. Model nepopravljive komponente

Uzme li se u obzir da su uzroci kvara komponente slučajni događaji i trenutak njihova nastanka je nepoznat, može se odrediti pouzdanost komponente, tj. vjerojatnost da će komponenta raditi bez kvara do nekog određenog trenutka  $t$ , na temelju rezultata dobivenih ispitivanjem svih komponenata iste vrste. Za vrijeme ispitivanja radni uvjeti moraju biti konstantni, a broj ispitivanih komponenti mora biti što veći da bi se dobili što točniji rezultati.

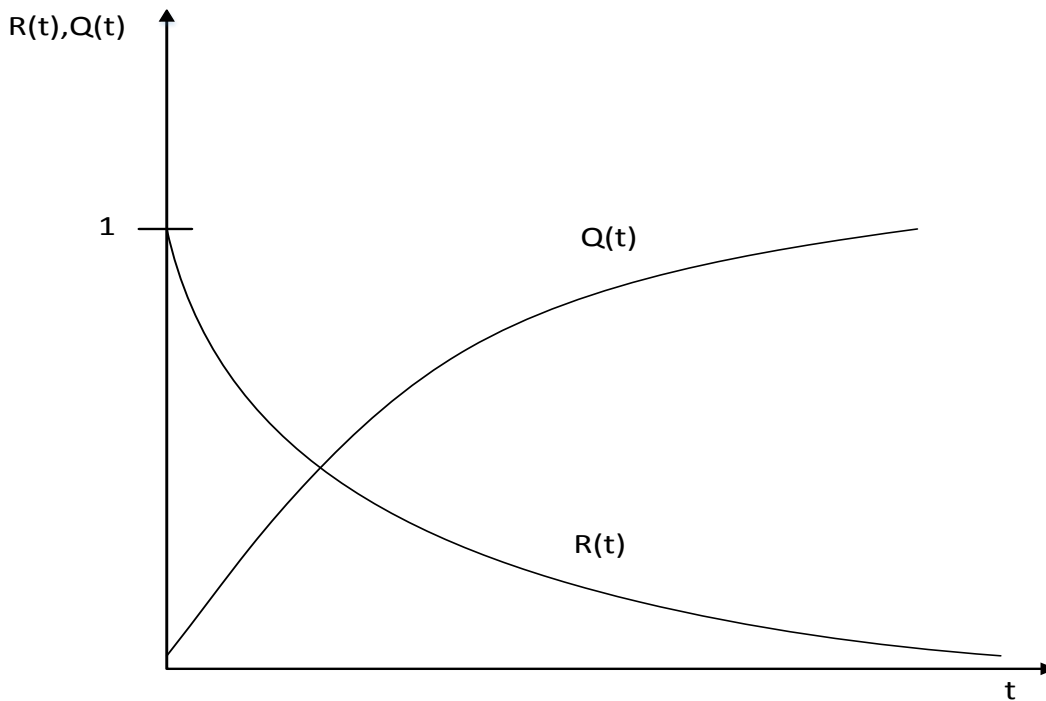
Ako je  $\tau$  slučajna varijabla kojom se označava vrijeme ispravnog rada komponente, tj. vrijeme do kvara, njena je pripadna funkcija vjerojatnosti kvara  $Q(t)$  prikazana izrazom (3.1)

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

te prikazuje vjerojatnost da će komponenta biti u kvaru prije isteka vremena  $t$ . Funkcija pouzdanosti komponente  $R(t)$  koja opisuje vjerojatnost ispravnog rada komponente u vremenu  $t$  određena je izrazom

$$R(t) = 1 - Q(t) = P(\tau > t) \quad (3.2.)$$

Funkcije su kvalitativno prikazane na slici 3.1.



Slika 3.1. Funkcije pouzdanosti i vjerojatnosti kvara

Kod nepopravljive komponente vrijedi da je  $R(0)=1$  i  $R(\infty)=0$ . Funkcija razdiobe vjerojatnosti kvara  $Q(t)$  je kontinuirana i nije padajuća pa postoji i njena derivacija  $q(t)$  koja se zove funkcija gustoće razdiobe vjerojatnosti kvara. Ona predstavlja ukupnu brzinu zbivanja kvarova ili brzinu kojom opada pouzdanost komponente. Ako se zna funkcija gustoće razdiobe vjerojatnosti kvara  $q(t)$  onda se može odrediti i funkcija razdiobe vjerojatnosti kvara  $Q(t)$ :

$$Q(t) = \int_0^t q(t)dt \quad (3.3.)$$

Može se odrediti i funkcija pouzdanosti  $R(t)$ :

$$R(t) = 1 - Q(t) = 1 - \int_0^t q(t)dt \quad (3.4.)$$

Funkcija učestalosti kvara  $\lambda(t)$ , koja predstavlja vjerojatnost kvara komponente u intervalu  $(t, t+\Delta t)$  uz uvjet da je radila ispravno do trenutka  $t$ , može se definirati izrazom:

$$\lambda(t) = \frac{q(t)}{R(t)} \quad (3.5.)$$

Pouzdanost komponente može se prikazati kao:

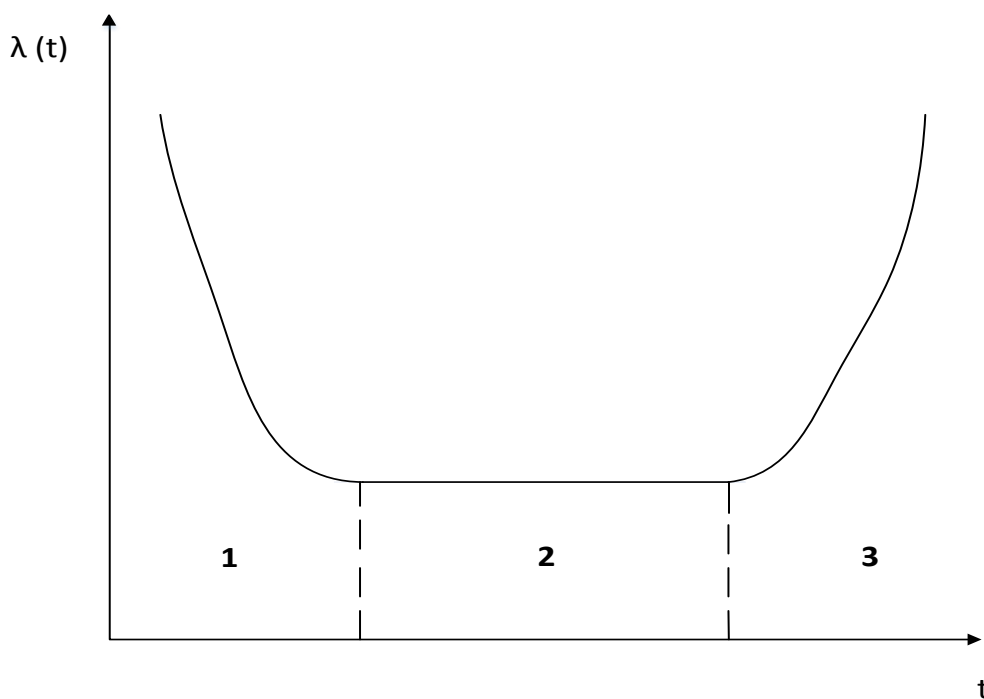
$$R(t) = \frac{q(t)}{\lambda(t)} = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (3.6.)$$

Srednje vrijeme do kvara komponente  $T_0$  može se izračunati matematičko očekivanje slučajne veličine vremena ispravnog rada  $\tau$ :

$$T_0 = E[\tau] = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (3.7.)$$

Ako se uzme u obzir da je oblik funkcije učestalosti kvara komponente u elektroenergetskom sustavu kao na slici 3.2., kod proračuna pouzdanosti može se pretpostaviti da je funkcija učestalosti kvara konstantna, tj.:

$$\lambda(t) = \lambda = konst. \quad (3.8.)$$



Slika 3.2. Funkcija učestalosti kvara komponente elektroenergetskog sustava

Uz prethodnu pretpostavku, zakon pouzdanosti je eksponencijalan pa funkcija pouzdanosti, funkcija razdiobe vjerojatnosti kvara, funkcija gustoće razdiobe vjerojatnosti kvara i srednje vrijeme do kvara imaju sljedeće vrijednosti:

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} = e^{-\lambda t} \quad (3.9.)$$

$$Q(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (3.10.)$$

$$q(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t} \quad (3.11.)$$

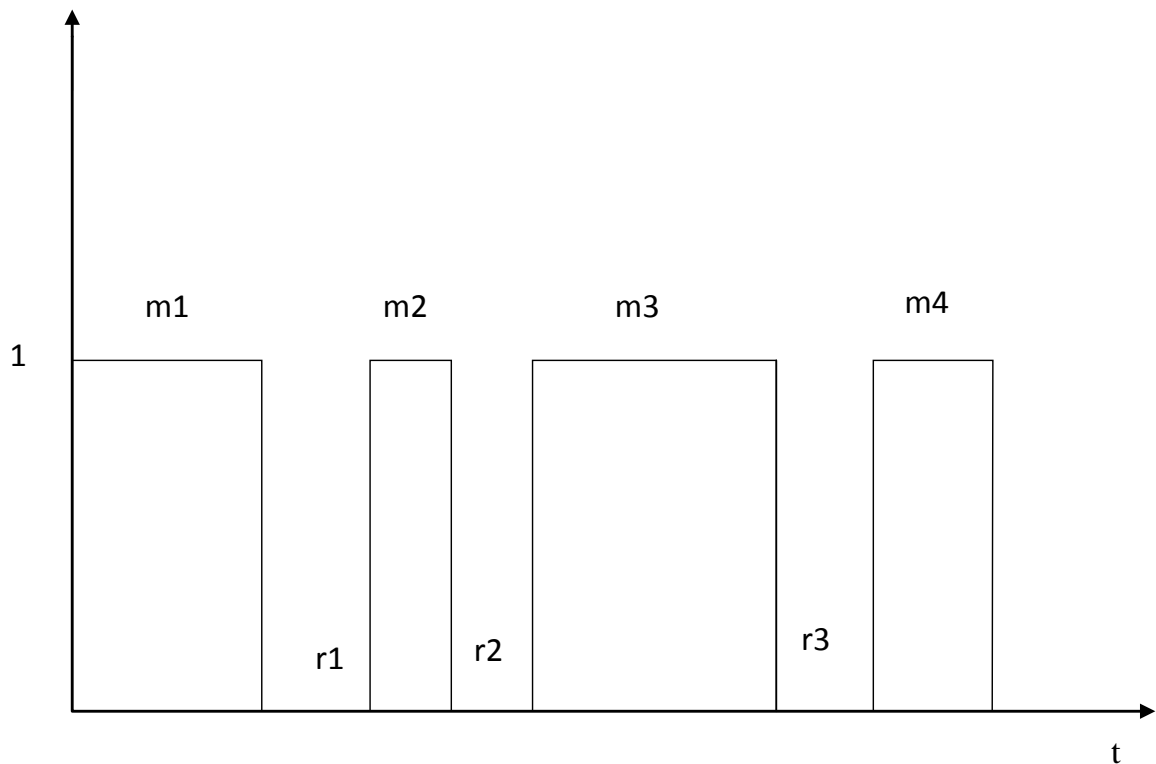
$$T_0 = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (3.12.)$$

### 3.3. Model popravljive komponente

Pod popravljivim komponentama podrazumijevaju se sve one komponente koje se u slučaju kvara mogu popraviti i dovesti u normalno pogonsko stanje. Takve komponente su elementi elektroenergetskog sustava odnosno generatori, transformatori, sabirnice, vodovi, prekidači itd. Popravljivost sustava treba razmatrati uvijek kada su prosječni troškovi popravka komponente, dijela uređaja ili uređaja samo dio početnih troškova opreme. Ako se kvarovi u takvim sustavima mogu brzo popraviti njihov se utjecaj bitno smanjuje.

Na slici 3.3. prikazana su razdoblja rada i popravka popravljive komponente za vrijeme njezinog životnog vijeka.





*Slika 3.3. Radni vijek popravljive komponente*

Ciklus  $i$  sastoji se od perioda rada  $m_i$  i perioda popravka  $r_i$ . Ako se pretpostavi da se radni vijek komponente sastoji od  $n$  ciklusa može se izračunati srednje vrijeme trajanja rada:

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{n} \quad (3.13.)$$

Može se izračunati i srednje vrijeme trajanja popravka  $r$ :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{n} \quad (3.14.)$$

Srednje vrijeme između kvarova dobije se zbrojem prethodne dvije veličine:

$$T = m + r \quad (3.15.)$$

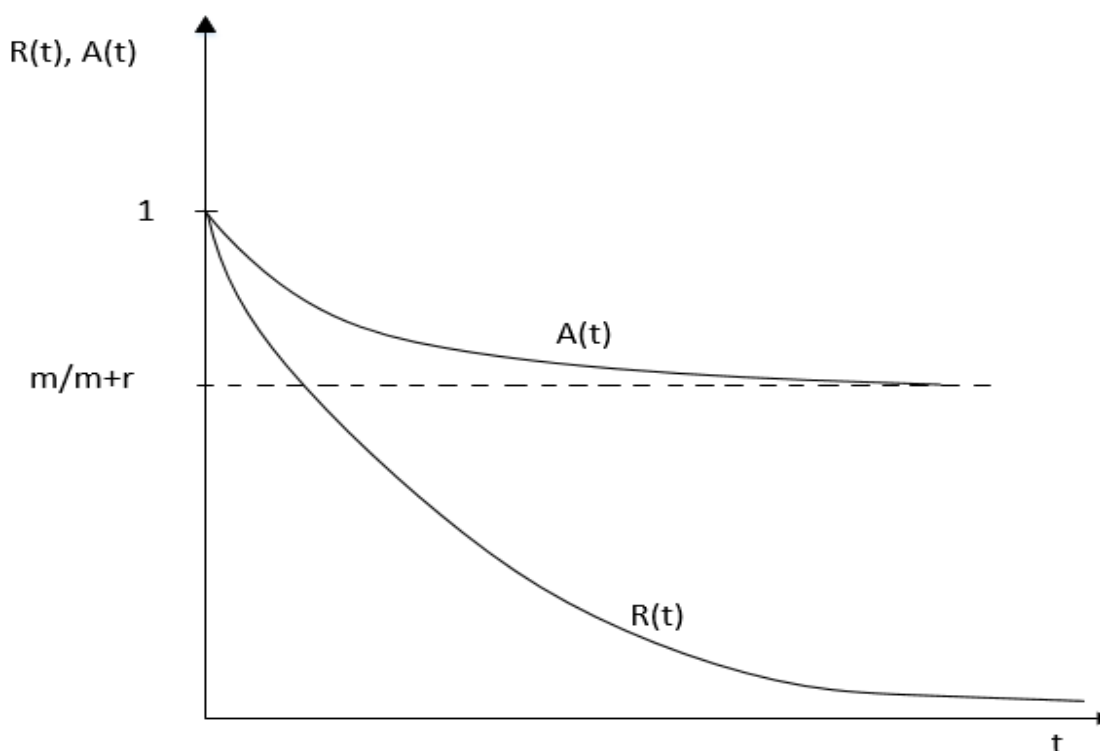
Frekvencija kvarova  $f$  odnosno broj kvarova u vremenskom razdoblju jednaka je:

$$f = \frac{1}{T} \quad (3.16.)$$

Popravljive komponente karakterizira funkcija raspoloživosti  $A(t)$ , a ona predstavlja vjerojatnost da će neka komponenta raditi u određenom trenutku  $t$ . Ako se promatra kroz cijeli radni vijek, vremenski nepromjenjiva raspoloživost komponente izražava se kao:

$$A(t) = A(\infty) = \frac{m}{m+r} \quad (3.17.)$$

Na slici 3.4. prikazane su funkcije pouzdanosti i raspoloživosti.

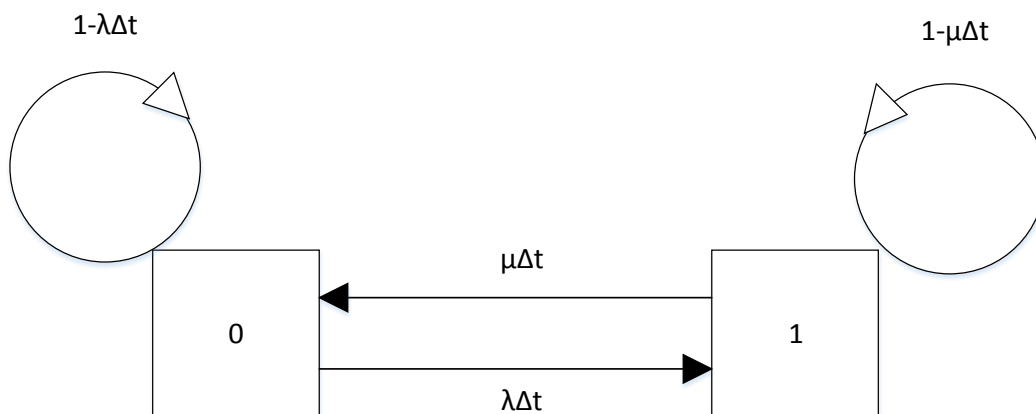


Slika 3.4. Funkcije pouzdanosti i raspoloživosti komponente

### 3.4. Markovljev model popravljive komponente

Markovljevim modelima dobro se može opisati ponašanje komponenata elektroenergetskog sustava koje tijekom vremena mogu biti u stanju rada, kvara, popravka itd. Uz funkciju učestalosti kvara  $\lambda(t)$  popravljivu komponentu opisuju i funkcija učestalosti popravka  $\mu(t)$ , a ona predstavlja vjerojatnost popravka komponente u jedinici vremena.

Da bi se Markovljev model mogao koristiti funkcije učestalosti kvara i popravka moraju biti konstantne. Markovljev model prostora stanja popravljive komponente ima dva stanja i prikazan je na slici 3.5.

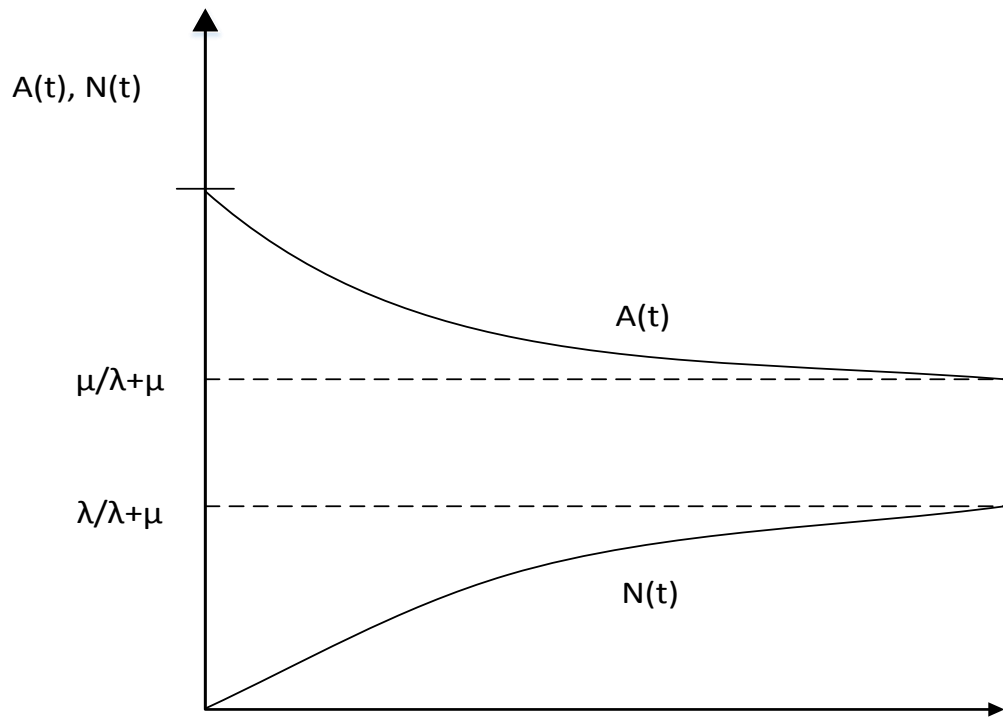


*Slika 3.5. Markovljev model popravljive komponente*

Stanje „0“ je stanje rada komponente, a stanje „1“ je kvar komponente. Vjerojatnost da je komponenta u stanju „0“, tj. da radi u trenutku  $t$  predstavlja funkciju raspoloživosti  $A(t)$ . Vjerojatnost da je komponenta u stanju „1“, tj. da je pokvarena u trenutku  $t$  predstavlja funkciju nerasploživosti  $N(t)$ .

$$A(t) = P_0(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (3.18.)$$

$$N(t) = P_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (3.19.)$$



Slika 3.6. Funkcije raspoloživosti i neraspoloživosti komponente

Stacionarne vrijednosti funkcije raspoloživosti i funkcije neraspoloživosti komponente za  $t \rightarrow \infty$  su:

$$A = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (3.20.)$$

$$N = \lim_{t \rightarrow \infty} N(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (3.21.)$$

Frekvencija kvara i frekvencija popravka komponente su:

$$f_{01} = \lambda \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (3.22.)$$

$$f_{10} = \mu \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (3.23.)$$

Srednje vrijeme ispravnog stanja komponente je:

$$m = \frac{1}{\lambda} \quad (3.24.)$$

Srednje vrijeme popravka komponente je:

$$r = \frac{1}{\mu} \quad (3.25.)$$

Raspoloživost i neraspoločivost u stacionarnom stanju su:

$$A = \frac{m}{m + r} \quad (3.26.)$$

$$N = \frac{r}{m + r} \quad (3.27.)$$

U elektroenergetskom sustavu za komponente vrijedi da je  $m \gg r$  te je  $\mu \gg \lambda$  pa su približni izrazi za raspoloživost i neraspoločivost:

$$A = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = 1 - \frac{\lambda}{\mu} = 1 - \lambda r \quad (3.28.)$$

$$N = 1 - A \approx 1 - (1 - \lambda r) = \lambda r \quad (3.29.)$$

Srednje vrijeme između kvarova je:

$$f = f_{01} = \frac{1}{r + m} = \frac{1}{T} \quad (3.30.)$$

Frekvencija kvara  $f$ , učestalost kvara  $\lambda$  i učestalost popravka  $\mu$  računaju se kao:

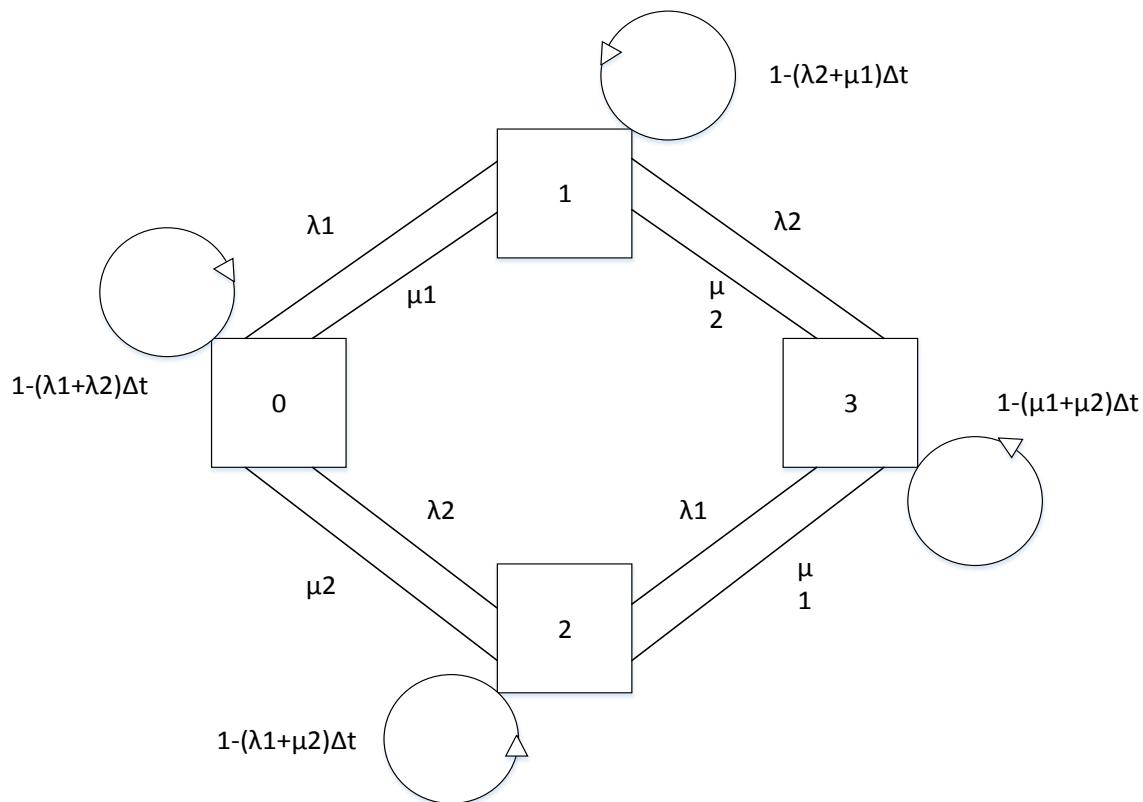
$$f = \frac{\text{broj kvarova u promatranom periodu}}{\text{promatrani period}} \quad (3.31.)$$

$$\lambda = \frac{\text{broj kvarova u promatranom periodu}}{\text{ukupno vrijeme rada u promatranom periodu}} \quad (3.32.)$$

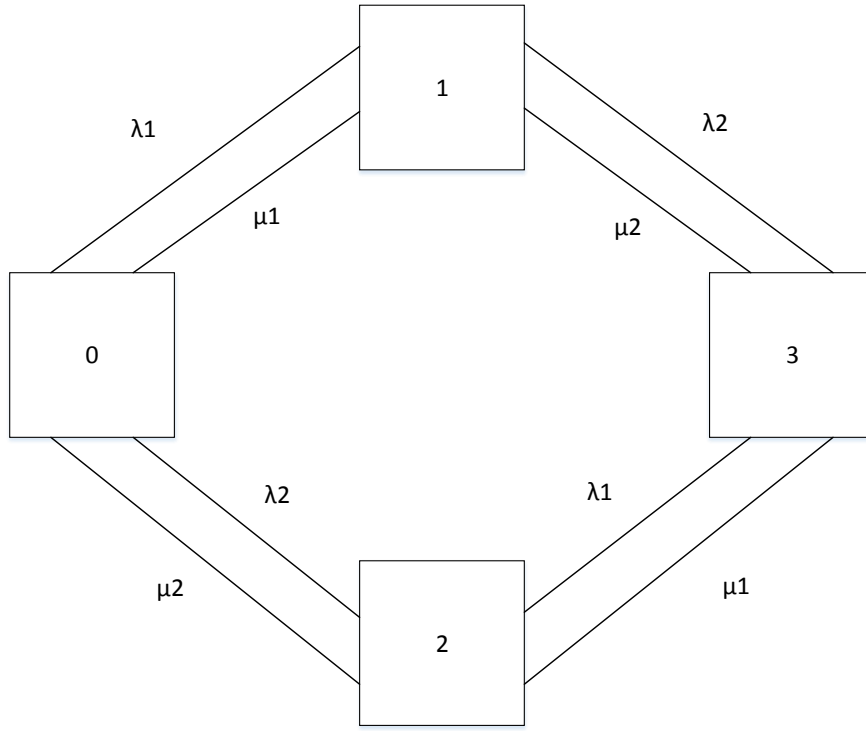
$$\mu = \frac{\text{broj popravaka u promatranom periodu}}{\text{ukupno vrijeme popravka u promatranom periodu}} \quad (3.33.)$$

### 3.5. Markovljev model dviju popravljivih komponenata

Model prostora stanja i pojednostavljeni Markovljev model za stacionarno stanje prikazani su na slikama 3.7. i 3.8.



Slika 3.7. Markovljev model dviju popravljivih komponenata



Slika 3.8. Pojednostavljeni Markovljev model dviju popravljivih komponenata

$\lambda_1$  predstavlja učestalost kvara komponente 1, a  $\lambda_2$  učestalost kvara komponente 2. Učestalosti popravaka označene su s  $\mu_1$  i  $\mu_2$ . Stanje „0“ predstavlja rad obje komponente, stanje „1“ kvar komponente 1 i rad komponente 2, stanje „2“ kvar komponente 2 i rad komponente 1 te stanje „3“ kvar obje komponente.

Sljedećim izrazima prikazane su vrijednosti pojedinih stanja:

$$P_0 = \frac{\mu_1 \mu_2}{(\lambda_1 + \mu_1) + (\lambda_2 + \mu_2)} = A_1 A_2 \quad (3.34.)$$

$$P_1 = \frac{\lambda_1 \mu_2}{(\lambda_1 + \mu_1) + (\lambda_2 + \mu_2)} = N_1 A_2 \quad (3.35.)$$

$$P_2 = \frac{\mu_1 \lambda_2}{(\lambda_1 + \mu_1) + (\lambda_2 + \mu_2)} = A_1 N_2 \quad (3.36.)$$

$$P_3 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 + \mu_1) + (\lambda_2 + \mu_2)} = N_1 N_2 \quad (3.37.)$$

Raspoloživost i neraspoloživost komponente 1 su označene s  $A_1$  i  $N_1$ , a komponente 2 su označene s  $A_2$  i  $N_2$ .

### 3.6. Serijski spoj komponenata

Kod serijskog spoja komponenata sustav radi samo ako su obje komponente ispravne. Ispravno stanje sustava je stanje „0“ te su raspoloživost i neraspoloživost serijskog spoja dviju komponenti jednaki:

$$A_s = A_1 A_2 \quad (3.38.)$$

$$N_s = 1 - A_s = 1 - A_1 A_2 = 1 - (1 - N_1)(1 - N_2) = N_1 + N_2 - N_1 N_2 \quad (3.39.)$$

Za sustav od  $n$  ovisnih i popravljivih komponenata serijski spojenih mogu se dobiti izrazi za neraspoloživost, frekvenciju kvara i srednje vrijeme trajanja kvara:

$$N_s = 1 - \prod_{i=1}^n A_i \quad (3.40.)$$

$$f_s = \prod_{i=1}^n A_i \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (3.41.)$$

$$r_s = \frac{N_s}{f_s} = \frac{1 - \prod_{i=1}^n A_i}{\prod_{i=1}^n A_i \sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (3.42.)$$

Kod komponenti koje imaju veliku raspoloživost kao što su komponente elektroenergetskog sustava vrijedi da je  $\mu \gg \lambda$  i  $\lambda_i/\mu_i \ll 1$  te se prethodni izrazi mogu pojednostaviti:

$$f_s = \prod_{i=1}^n A_i \sum_{i=1}^n \lambda_i \approx \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (3.43.)$$

$$r_s = \frac{1 - \prod_{i=1}^n A_i}{\prod_{i=1}^n A_i \sum_{i=1}^n \lambda_i} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i r_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (3.44.)$$

Ekvivalentna učestalost kvara  $\lambda_s$  je:

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (3.45.)$$

Izrazi za frekvenciju kvarova i srednje vrijeme trajanja kvara mogu se opisati na sljedeći način:

$$f_s \approx \lambda_s \quad (3.46.)$$

$$r_s \approx \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i r_i}{\lambda_s}$$



### 3.7. Paralelni spoj komponenata

Kod paralelnog spoja komponenti sustav radi ako je jedna komponenta ispravna, a ne radi ako nijedna nije ispravna. Stanja „0“, „1“ i „2“ predstavljaju ispravan rad sustava, a stanje „3“ predstavlja kvar sustava. Neraspoloživost je jednaka:

$$N_p = N_1 N_2 \quad (3.48.)$$

Frekvencija kvarova je:

$$f_p = f_1 N_1 + f_2 N_2 \quad (3.49.)$$

Srednje vrijeme trajanja kvara je:

$$r_p = \frac{N_p}{f_p} = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \quad (3.50.)$$

Neraspoloživost, frekvencija kvara i srednje vrijeme trajanja kvara sustava od  $n$  paralelno spojenih, neovisnih i popravljivih komponenti su:

$$N_p = \prod_{i=1}^n N_i \quad (3.51.)$$

$$f_p = \prod_{i=1}^n N_i \sum_{i=1}^n \mu_i \quad (3.52.)$$

$$r_p = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \mu_i} \quad (3.53.)$$

Za komponente elektroenergetskog sustava izraz za frekvenciju može se pojednostaviti:

$$f_p = \prod_{i=1}^n N_i \sum_{i=1}^n \mu_i \approx \prod_{i=1}^n \lambda_i r_i \sum_{i=1}^n \frac{1}{r_i} \quad (3.54.)$$

## **4. pouzdanost distribucijskih mreža**

### **4.1. Pouzdanost distribucijskog sustava**

Pouzdanost distribucijskog je sposobnost distribucijskog sustava da osigura potrebnu opskrbu električnom energijom. Pouzdanost distribucijskog sustava podijeljena je na:

- sigurnost distribucijskog sustava
- adekvatnost distribucijskog sustava

Sigurnost predstavlja sposobnost odgovora sustava na promjene kojima se izlaže. Npr. neplanirani ispadi elemenata. Upotrebljava se kod analize prijelaznih promjena. Adekvatnost se odnosi na statičko stanje sustava te njegovu izgrađenost da u određenim uvjetima osigura potrošačima opskrbu električnom energijom uzimajući u obzir sve planirane i neplanirane ispade. Koristi se za analizu stacionarnih stanja.

Mjerila koja služe za ocjenjivanje pouzdanosti su pokazatelji pouzdanosti. Pokazatelji pouzdanosti distribucijskog sustava važni za potrošače su:

- broj prekida napajanja električnom energijom
- trajanje prekida napajanja električnom energijom

Prekid napajanja znači da potrošači nisu opskrbljeni električnom energijom. Prema vrsti uzroka mogu se podijeliti na:

- planirani prekidi napajanja – planirana iskapčanja elemenata mreže zbog radova
- neplanirani prekidi napajanja – kvar elemenata mreže

U analizi pouzdanosti najviše se razmatraju neplanirani prekidi napajanja. S obzirom na trajanje postoje:

- kratki prekidi napajanja – najviše tri minute
- dugi prekidi napajanja – dulje od tri minute

Kvar predstavlja neraspoloživost dijela sustava u obavljanju vlastite funkcije. Kvar može biti uzrok prekida napajanja. S obzirom na posljedice postoje:

- djelomični kvarovi
- potpuni kvarovi

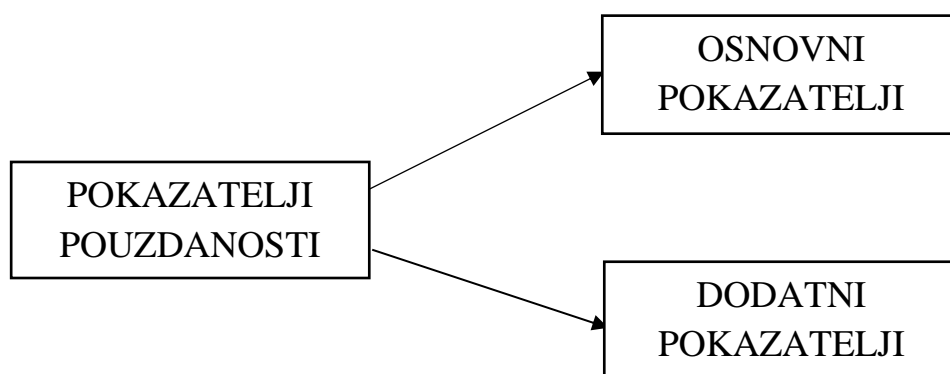
Prema trajanju mogu biti:

- prolazni kvarovi – automatski povratak funkcionalnosti elementa
- trajni kvarovi – potreban je popravak ili promjena elementa radi povratka njegove funkcije

Pokazatelji pouzdanosti distribucijskog sustava dijele se na dvije skupine:

- osnovni pokazatelji pouzdanosti
- dodatni pokazatelji pouzdanosti

Osnovni pokazatelji dijele se na statističke i raspodijeljene pokazatelj, dok se dodatni pokazatelji dijele na pokazatelje orijentirane potrošaču i pokazatelje orijentirane opterećenju i energiji. Podjela osnovnih pokazatelja prikazana je na slici 4.1.



*Slika 4.1. Podjela pokazatelja pouzdanosti distribucijskog sustava*

## 4.2. Pokazatelji pouzdanosti distribucijskih mreža

Distribucijske mreže u većini slučajeva rade u radijalnom pogonu, iako mogu biti mogu biti izvedene kao radijalne ili zamkaste. Radijalne distribucijske mreže sastoje se od niza serijskih elemenata tako da uredno napajanje nekog potrošača priključenog na mrežu zahtijeva ispravan rad svih elemenata mreže. Osnovni elementi analiza pouzdanosti distribucijskih srednjenaponskih mreža su vodovi, energetske transformatori, prekidači i sabirnički sustav, a međusobno mogu biti povezani rastavljačima.

Pokazatelji pouzdanosti distribucijskih mreža su:

### 1. Osnovni pokazatelji pouzdanosti distribucijskih mreža

#### a) Srednja frekvencija kvara

$$f_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (4.1.)$$

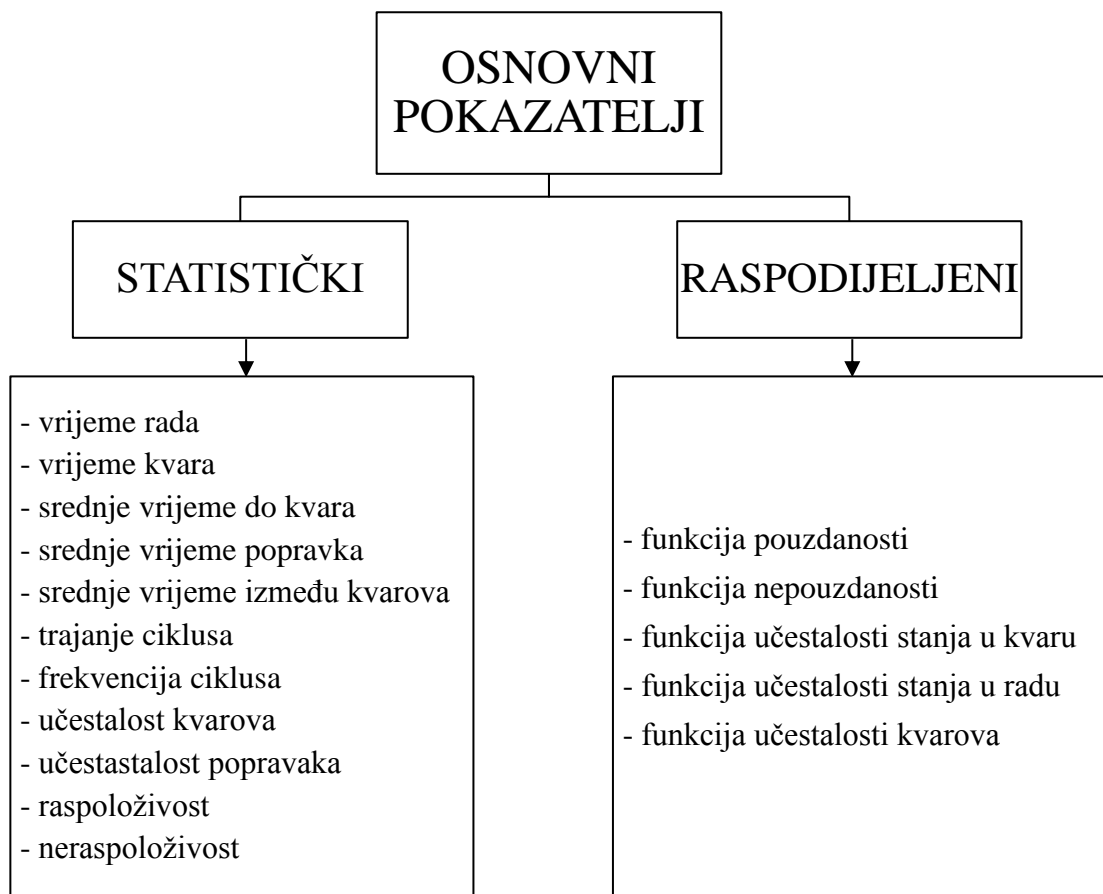
#### b) Srednje vrijeme trajanja kvara

$$r_s = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i r_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (4.2.)$$

#### c) Neraspoloživost ili srednje godišnje vrijeme trajanja kvara

$$N_s = r_s f_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i r_i \quad (4.3.)$$

Osnovni pokazatelji pouzdanosti distribucijske mreže prikazuju pouzdanost pojedinih čvorova tj. potrošačkih točaka mreže te se često zovu i pokazatelji pouzdanosti potrošačkih točaka. Premda su osnovni pokazatelji temeljni parametri pouzdanosti distribucijskih mreža oni ipak ne daju uvijek cjelovitu sliku o radu sustava. Zato se često procjenjuju i dodatni pokazatelji pouzdanosti.



Slika 4.2. Podjela osnovnih pokazatelja pouzdanosti distribucijskog sustava

2. Dodatni pokazatelji pouzdanosti distribucijskih mreža dijele se na pokazatelje orijentirane potrošaču i na pokazatelje orijentirane opterećenju i energiji.

Pokazatelji pouzdanosti distribucijskih mreža orijentirani potrošaču su:

a) SAIFI, indeks prosječne učestalosti prekida sustava (*System Average Interruption Frequency Indeks*)

$$SAIFI = \frac{\text{ukupan broj prekida napajanja potrošača}}{\text{ukupan broj potrošača}} = \frac{\sum f_i n_i}{\sum n_i} \left[ \frac{\text{prekida}}{\text{pot., god.}} \right] \quad (4.4.)$$

U formuli  $f_i$  je frekvencija prekida napajanja čvora  $i$ , a  $n_i$  broj potrošaču u tom čvoru. SAIFI predstavlja srednji broj prekida napajanja nekog potrošača.

- b) CAIFI, indeks prosječne učestalosti prekida potrošača (*Customer Average Interruption Frequency Indeks*)

$$CAIFI = \frac{\text{ukupan broj prekida potrošača}}{\text{ukupan broj pogođenih potrošača}} \left[ \frac{\text{prekida}}{\text{pogođenih potrošača}} \right] \quad (4.5.)$$

Kod računanja ovog indeksa pogođeni potrošači u obzir se uzimaju samo jednom bez obzira na koliko su prekida imali.

- c) SAIDI, indeks prosječnog trajanja prekida sustava (*System Average Interruption Duration Indeks*)

$$SAIDI = \frac{\text{ukupno trajanje prekida napajanja potrošača}}{\text{ukupan broj potrošača}} = \frac{\sum N_i n_i}{\sum n_i} \left[ \frac{\text{sati}}{\text{pot., god.}} \right] \quad (4.6.)$$

U formuli  $N_i$  je godišnje vrijeme trajanja prekida napajanja čvora  $i$ . SAIDI predstavlja prosječno zbirno vrijeme trajanja prekida napajanja nekog potrošača za vrijeme jedne godine.

- d) CAIDI, indeks prosječnog trajanja prekida potrošača (*Customer Average Interruption Duration Index*)

$$CAIDI = \frac{\text{ukupno trajanje prekida napajanja potrošača}}{\text{ukupan broj prekida potrošača}} = \frac{\sum N_i n_i}{\sum f_i n_i} \quad (4.7.)$$

- e) ASAI, indeks prosječne raspoloživosti napajanja (*Average Service Availability Index*)

$$ASAI = \frac{\text{raspoloživi sati napajanja potrošača}}{\text{zahtijevani sati napajanja potrošača}} = \frac{8760 \cdot \sum n_i - \sum N_i n_i}{8760 \cdot \sum n_i} \quad (4.8.)$$

- f) ASUI, indeks prosječne neraspoloživosti napajanja (*Average Service Unavailability Index*)

$$ASUI = 1 - ASAI \quad (4.9.)$$

Pokazatelji pouzdanosti distribucijskih mreža orijentiranih opterećenju i energiji su:

- a) ENS, indeks neisporučene energije (*Energy Not Supplied Index*)

$$ENS = \sum L_i N_i \text{ [MWh]} \quad (4.10.)$$

$L_i$  predstavlja iznos prosječnog opterećenja priključenog u čvoru  $i$ , a jednak je  $L_i = L_{vi} F_{oi}$ .  $L_{vi}$  i  $F_{oi}$  su vršno opterećenje i faktor opterećenja u čvoru  $i$ .

- b) AENS, indeks prosječno neisporučene energije (*Average Energy Not Supplied Index*)

$$AENS = \frac{\text{ukupna neisporučena energija}}{\text{ukupan broj potrošača}} = \frac{\sum L_i N_i}{\sum n_i} \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{potrošač, godina}} \right] \quad (4.11.)$$

Dodatni pokazatelji pouzdanosti distribucijske mreže se odnose na mrežu u cjelini, ne uzimajući u obzir njezinu veličinu. U slučajevima gdje su mreže većih dimenzija definiraju se i pokazatelji koji se odnose na pojedini izvod ili grupu izvoda. Ti pokazatelji su:

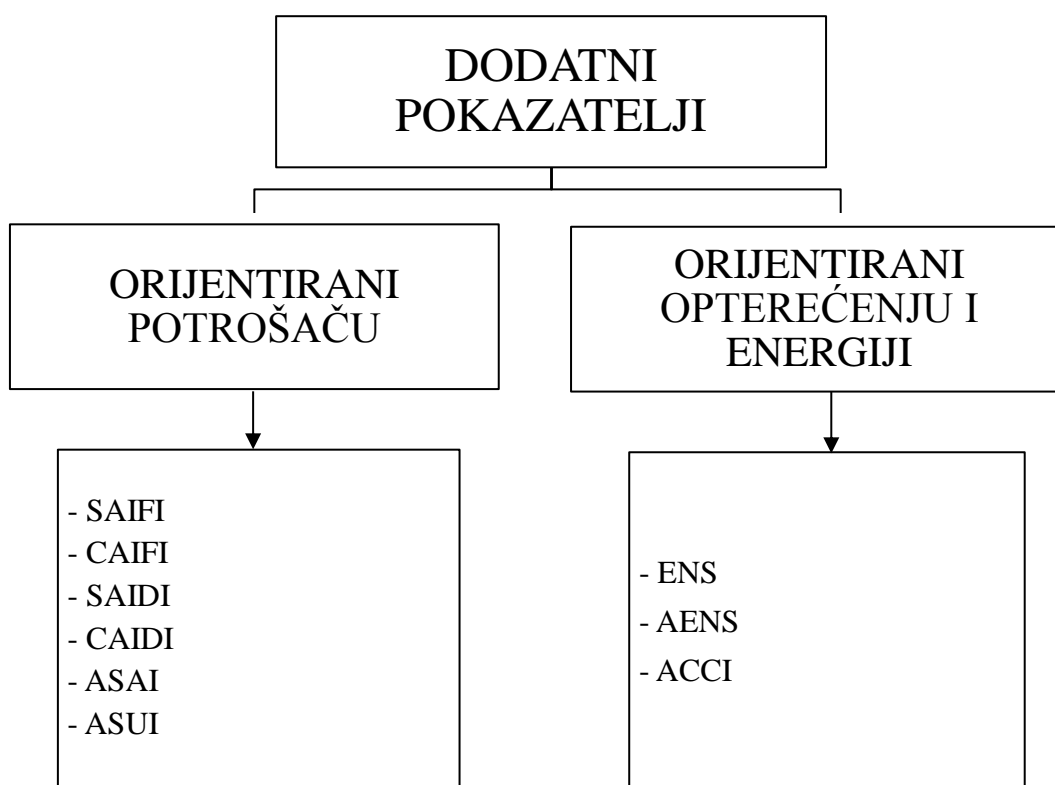
- FAIFI, indeks prosječne učestalosti prekida izvoda (*Feeder Average Interruption Frequency Index*)
- FAIDI, indeks prosječnog trajanja prekida izvoda (*Feeder Average Interruption Duration Index*)
- MFAIFI, indeks prosječne učestalosti prekida grupe izvoda (*Multi-Feeder Average Interruption Frequency Index*)
- MFAIDI, indeks prosječnog trajanja prekida grupe izvoda (*Multi-Feeder Average Interruption Duration Index*)

Ovi pokazatelji pouzdanosti se odnose na duge prekide. Veliki porast osjetljivih elektroničkih trošila sve više naglašava utjecaj kratkih prekida. Tako su nastali novi pokazatelji pouzdanosti distribucijskih mreža koji se odnose na kratke prekide, a to su:

- MAIFI, indeks prosječne učestalosti kratkih prekida (*Momentary Average Interruption Frequency Index*). Kratki prekidi uzrokovani su prolaznim ili trajnim kvarovima. Kratki prekidi zbog prolaznih kvarova uvjetovani su radom uređaja za automatsko ponovno uklapanje. Preko 70% kvarova u zračnoj mreži su prolazni kvarovi. Kratki prekidi zbog

trajnih kvarova odnose se na potrošače kod kojih se automatskim prekapčanjem može uspostaviti ponovno napajanje iz istog ili rezervnog izvora.

- STAIID, indeks prosječnog trajanja prekida za olujnog vremena (*Storm Average Interruption Duration Index*). Odnosi se na trajanje prekida napajanja potrošača za vrijeme loših vremenskih uvjeta.



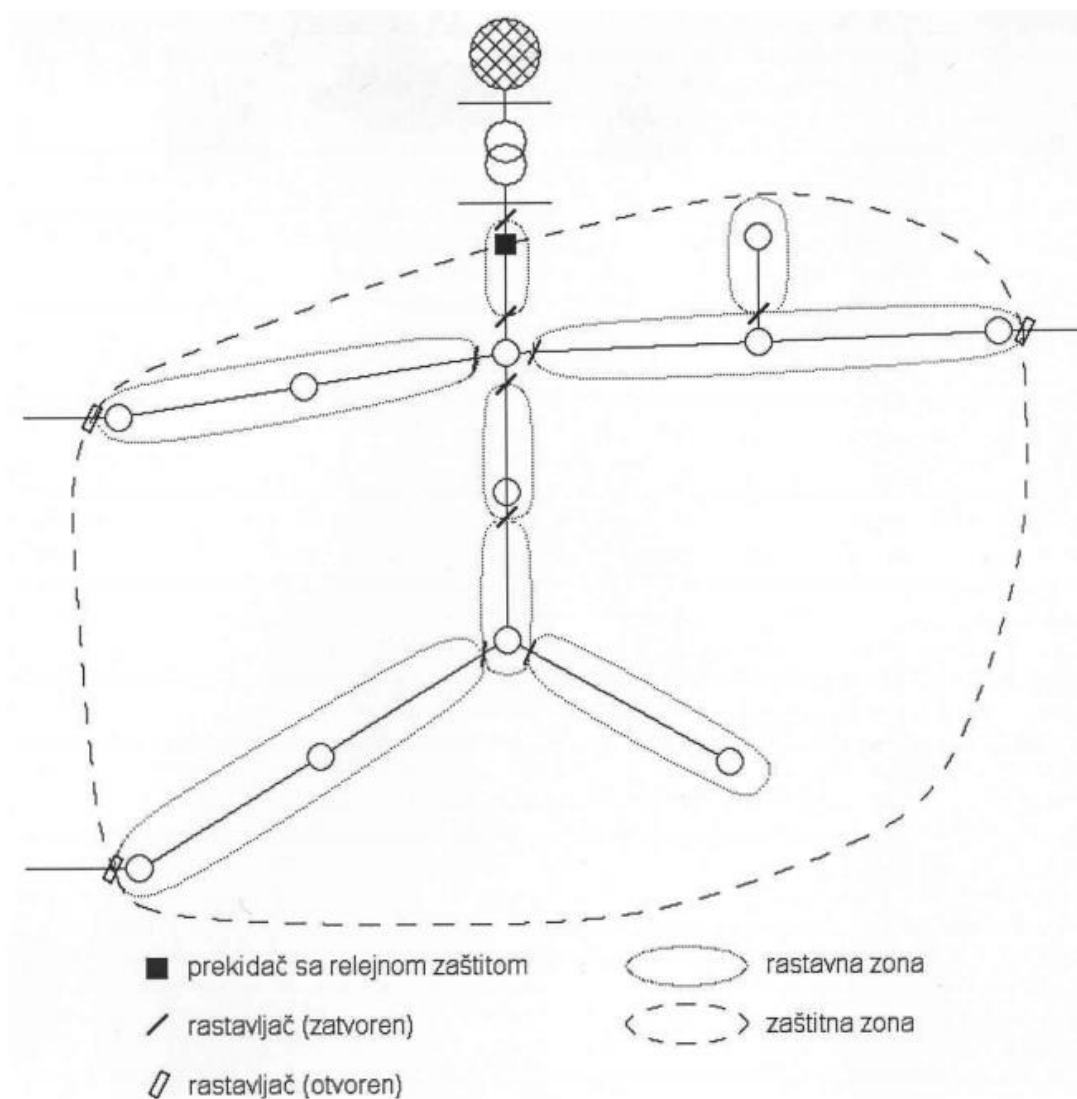
Slika 4.3. Podjela dodatnih pokazatelja pouzdanosti distribucijskog sustava



## 5. RAČUNANJE POUZDANOSTI DISTRIBUCIJSKIH MREŽA

Pouzdanost napajanje važna je karakteristika u kvaliteti opskrbe električnom energijom. Određivanje područja mreže sa slabom pouzdanošću moguće je jednostavnom statističkom obradom podataka o pogonskim događajima. No takvim pristupom nije moguće odrediti pouzdanost napajanja potrošača u budućnosti jer ne uzima u obzir razvoj mreža. Kod planiranja razvoja distribucijskih mreža koriste se programski alati koji omogućuju unaprijeden proračun pokazatelja pouzdanosti napajanja potrošača. Pomoću takvih alata istražuju se različite varijante razvoja mreže i utvrđuju optimalne razine pouzdanosti uz najniže troškove. Pri planiranju ugradnje uređaja i sustava automatizacije, daljinskog vođenja i dodatne zaštite koriste se prikladne metode i alati da bi se odredio optimalni raspored tih uređaja i sustava u mreži. Metode proračuna pouzdanosti distribucijskih mreža koje se koriste u postupcima planiranja mreža moraju omogućiti određivanje sadašnje i buduće razine pouzdanosti distribucijske mreže, pritom uzimajući u obzir promjene topoloških i električnih parametara elemenata mreže, promjene nastale ugradnjom zaštitnih i sklopnih uređaja i promjene parametara pouzdanosti elemenata mreže. Modeli koji se koriste kod metoda proračuna pouzdanosti temelje se na primjeni teorije vjerojatnosti i modela prostora stanja.

U modelima za proračun pouzdanosti promatrana distribucijska mreža se dijeli na zaštitne zone i rastavne zone, prema veličini dijela mreže koji ostaje bez napajanja u slučaju kvara nekog elementa mreže.



*Slika 5.1. Definicija zaštitnih i rastavnih zona u distribucijskoj mreži [L2]*

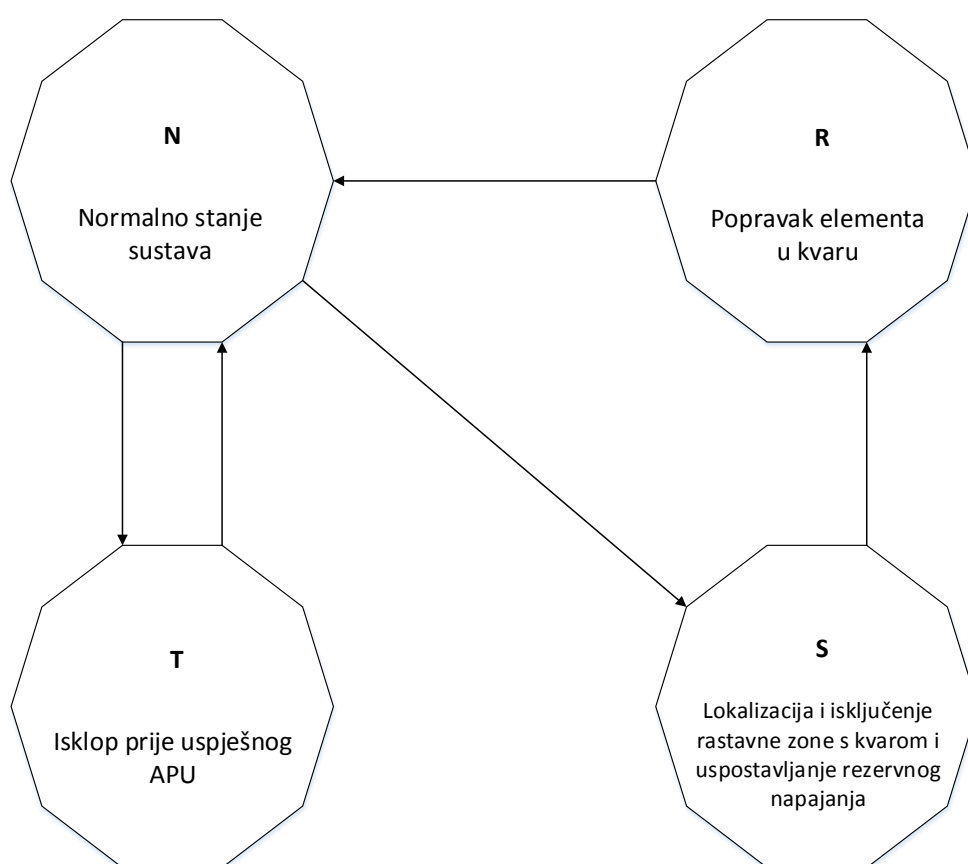
Zaštitna zona je dio koji se isključuje pri kvaru na nekom elementu u mreži. Isključuje se na prekidaču koji ima relejnu zaštitu u smjeru od elementa prema izvoru. Rastavna zona je određena rastavljačima u bilo kojem smjeru.

U slučaju kvarova elemenata mreže pogonska stanja u distribucijskoj mreži najpreciznije se modeliraju modelom četiri stanja sustava:

- Stanje N – normalno pogonsko stanje sustava – stanje bez kvara te su svi potrošači normalno napajani.
- Stanje T – stanje sustava s prolaznim kvarom – stanje u kojem se prekidač koji ima zaštitu isključi, a ponovni uklop prekidača je uspješan.

- Stanje S – stanje preklapanja kod trajnog kvara – stanje u kojem nakon neuspješnog ponovnog uklopa prekidač sa zaštitom trajno isključi zaštitnu zonu mreže, a zatim se pronalazi i isključi rastavna zona s kvarom i uspostavi stanje rezervnog napajanja.
- Stanje R – stanje popravka kod trajnog kvara – stanje kod kojeg je isključena samo rastavna zona s elementom u kvaru i potrošači u toj zoni su bez napajanja.

Iz stanja T sustava se automatski vraća u stanje N, iz stanja S nakon potrebnih preklapanja sustav prelazi u stanje R, a nakon popravka elementa u kvaru i uspostave normalnog uklopnog stanja sustava prelazi u stanje N.



*Slika 5.2. Model četiri stanja sustava*

Grane distribucijske mreže su elementi modela za proračun pouzdanosti. Uz osnovne podatke grana mreže potrebno je odrediti i ulazne podatke o kvarovima grana te sklopnim aparatima na granama. Ti podaci su sljedeći:

- Podaci o trajnim kvarovima grana:

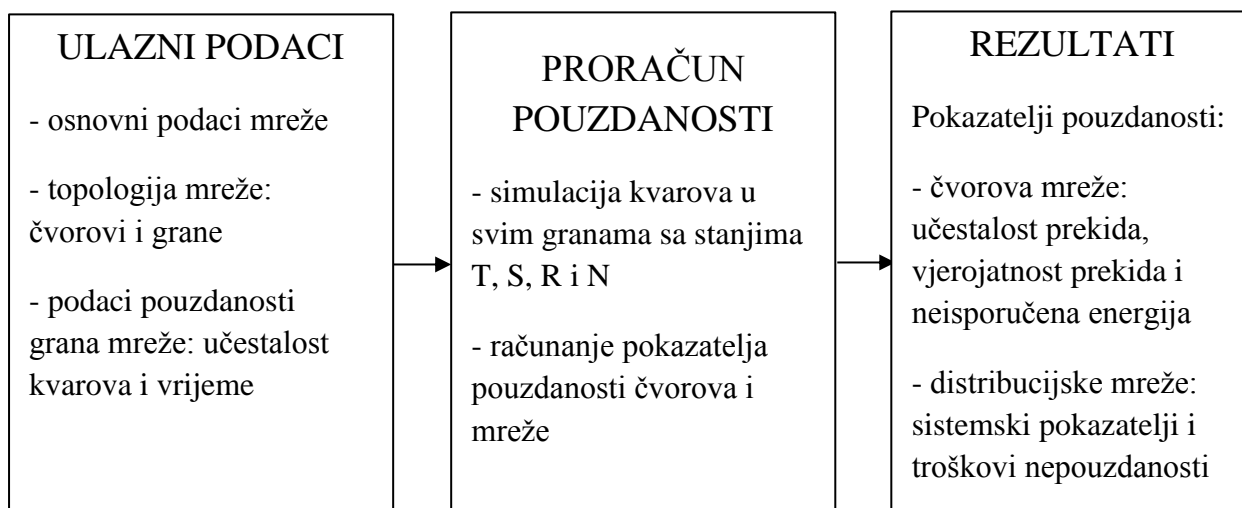
- $\lambda_{Pj}$  – učestalost trajnih kvarova grane  $j$   $\left[ \frac{\text{kvarova}}{\text{god.}} \right]$
- $T_{Sj}$  – vrijeme preklapanja kod trajnog kvara grane  $j$  [h]
- $T_{Rj}$  – vrijeme popravka kod trajnog kvara grane  $j$  [h]

b) Podaci o prolaznim kvarovima grana:

- $\lambda_{Tj}$  – učestalost prolaznih kvarova grane  $j$   $\left[ \frac{\text{kvarova}}{\text{god.}} \right]$
- $T_{Tj}$  – vrijeme ponovnog uklopa kod prolaznog kvara grane  $j$  [s]

c) Podaci sklopnim aparatima i zaštitnim uređajima u granama – u svakoj grani  $j$  u prvom i zadnjem čvoru mogu bit prekidač i rastavljač, samo rastavljač ili ništa.

d) Osnovni podaci distribucijske mreže – topološka struktura mreže, opterećenja po čvorovima, dopuštena strujna opterećenja i impedancije elemenata.



*Slika 5.3. Struktura modela za proračun pouzdanosti*

Na temelju osnovnih ulaznih podataka mreže izračunavaju se sva stanja na modelu mreže simulacijom kvarova na svim granama koji su uzroci prekida napajanja čvorova. Tako se iz učestalosti kvarova grana mogu izračunati pokazatelji pouzdanosti čvorova u mreži. Oni označavaju pokazatelje pouzdanosti napajanja. Iz početnog stanja N simuliraju se kvarovi svih

grana u mreži. Simuliraju se stanja prolaznih kvarova T i stanja trajnih kvarova prije isključivanja rastavne zone sa kvarom S i stanja rezervnog napajanja R. Kod simulacije stanja izračunavaju se pokazatelji pouzdanosti mreže koja se analizira. Pokazatelji su sljedeći:

a) Pokazatelji pouzdanosti čvorova mreže  $i$ :

- Učestalost prekida čvora  $i$  -  $F_i \left[ \frac{\text{prekida}}{\text{god.}} \right]$
- Vjerojatnost prekida u čvoru  $i$  -  $H_i \left[ \frac{\text{h}}{\text{god.}} \right]$
- Očekivana neisporučena električna energija u čvoru  $i$  -  $E_i \left[ \frac{\text{MWh}}{\text{god.}} \right]$

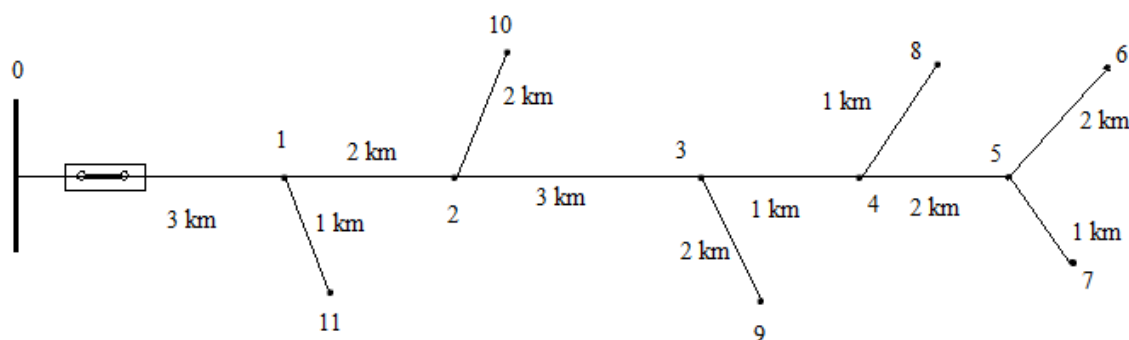
b) Pokazatelji pouzdanosti distribucijske mreže:

- Očekivana neisporučena električna energija mreže -  $E \left[ \frac{\text{MWh}}{\text{god.}} \right]$
- Troškovi nepouzdanosti mreže -  $T_v \left[ \frac{\text{kn}}{\text{god.}} \right]$

Primjenom modela za proračun pouzdanosti se na temelju proračuna pouzdanosti distribucijske mreže utvrđuju dijelovi mreže s nedovoljno pouzdanim napajanjem, pronalaze se uzroci takvog stanja te se u postupku planiranja dugoročnog razvoja mreže planiraju tehnička rješenja za poboljšanje pouzdanosti napajanja potrošača. Promjene koje se planiraju u distribucijskoj mreži uključuju se u ulazne podatke modela te se izračuna njihov učinak na pokazatelje pouzdanosti distribucijske mreže (npr. Ugradnja novih pouzdanih elemenata mreže, izgradnja novih elektroenergetskih objekata, uvođenje automatizacije i daljinskog vođenja).

## 6. PRIMJERI RAČUNANJA POUZDANOSTI DISTRIBUCIJSKIH MREŽA

U sljedećim primjerima analizirati će se računanje pouzdanosti distribucijskih mreža. U prvom primjeru pretpostavljena učestalost kvara napojnih vodova 0-1, 1-2, 2-3, 3-4 i 4-5 distribucijske mreže, prikazane na slici 6.4., je  $f_f = 0,1 \text{ 1/(km} \cdot \text{god)}$ , a ogranaka 1-11, 2-10, 3-9, 4-8, 5-7 i 5-6  $f_o = 0,15 \text{ 1/(km} \cdot \text{god)}$ . Čvorovi 6, 7, 8, 9, 10 i 11 su potrošački. Broj potrošača priključenih u čvorove i snaga potrošačima prikazani su u tablici 6.1. U primjeru su prikazani izračuni pokazatelja pouzdanosti SAIFI, SAIDI, CAIDI i ENS za zadanu mrežu, ako je srednje vrijeme trajanja kvara na napojnim vodovima  $r_f = 6 \text{ h}$ , a na ograncima  $r_o = 4 \text{ h}$ .



Slika 6.1. Shema distribucijske mreže

Tablica 6.1. Broj potrošača priključenih u čvorove i snage na potrošačima

Čvor	6	7	8	9	10	11
Broj potrošača	100	150	200	400	550	600
$L_i$ [Kw]	800	950	1000	1200	1400	1500

Zbog bolje preglednosti u sljedećoj tablici prikazani su učestalost otkaza  $f_i$ , srednje vrijeme trajanja kvara  $r_i$  i vrijeme prekida napajanja potrošača  $N_i$  kod kvara  $i$  u toku godine za svaki element mreže. Vrijeme  $N_i$  određuje se pomoću relacije  $N_i = f_i r_i$ , pri čemu se učestalost otkaza  $f_i$ , dobije kao proizvod učestalosti po jedinici dužine i dužine određenog dijela mreže.

Tablica 6.2. Učestalost otkaza  $f_i$ , vrijeme trajanja kvara  $r_i$ , i vrijeme prekida napajanja potrošača  $N_i$  za elemente mreže

element mreže	$f_i$ (1/god)	$r_i$ (h)	$N_i$ (h/god)
0-1	0,3	6	1,8
1-2	0,2	6	1,2
2-3	0,3	6	1,8
3-4	0,1	6	0,6
4-5	0,2	6	1,2
5-6	0,3	4	1,2
5-7	0,15	4	0,6
4-8	0,15	4	0,6
3-9	0,3	4	1,2
2-10	0,3	4	1,2
1-11	0,15	4	0,6

Treba primijetiti da u zadanoj mreži pri kvaru na bilo kojem elementu mreže dolazi do isključenja prekidača i prekida napajanja svih potrošača.

Prekid napajanja jednog potrošača tijekom godine je:

$$SAIFI = \frac{\sum f_i n_i}{\sum n_i} = \sum f_i$$

$$SAIFI = 0,3 + 0,2 + 0,3 + 0,1 + 0,2 + 0,3 + 0,15 + 0,15 + 0,3 + 0,3 + 0,15 = 2,45$$

Prosječno vrijeme trajanja prekida napajanja jednog potrošača tijekom godine je:

$$SAIDI = \frac{\sum N_i n_i}{\sum n_i} = \sum N_i$$

$$SAIDI = 1,8 + 1,2 + 1,8 + 0,6 + 1,2 + 1,2 + 0,6 + 0,6 + 1,2 + 1,2 + 0,6 = 12 \text{ h}$$

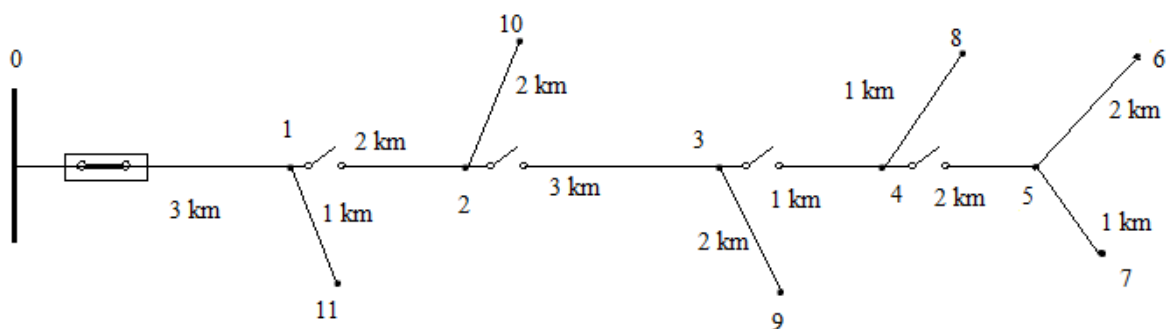
Prosječno vrijeme trajanja jednog prekida je:

$$CAIDI = \frac{\sum N_i n_i}{\sum f_i n_i} = \frac{SAIDI}{SAIFI} = 4,898 \text{ h}$$

Neisporučena energija:

$$ENS = \sum L_i N_i = (800 + 950 + 1000 + 1200 + 1400 + 1500) \cdot 12 = 82200 \text{ kWh/god}$$

Za mrežu iz primjera prikazan je izračun pokazatelja pouzdanosti SAIFI, SAIDI, CAIDI i ENS, ako se na napojnim vodovima ugrade rastavljači, što je prikazano na slici 6.5. Vrijeme lokalizacije kvara i uključenja ispravnih dijelova je 1h.



Slika 6.2. Shema distribucijske mreže s rastavljačima

Do prekida napajanja potrošača u čvorovima 6 i 7 dolazi pri kvaru na bilo kojem elementu mreže i napajanje se uspostavlja tek poslije otklanjanja kvara. Zbog toga će pokazatelji  $f_i$ ,  $r_i$  i  $N_i$  biti jednaki onima iz prvog primjera. Vrijednosti ovih pokazatelja su prikazani u tablici 6.2.

Kod prekida napajanja potrošača u čvoru 8 treba razlikovati kvarova ispred i iza čvora 4. Naime, kod kvarova na vodovima 4-5, 5-6 i 5-7 može se, poslije lokalizacije kvara i isključenja



rastavljača na početku voda 4-5, uspostaviti napajanje potrošača. U tom slučaju vrijeme trajanja kvara, za potrošače u čvoru 8, jednako je vremenu potrebnom za lokalizaciju kvara i odgovarajuće radnje zbog uključenja ispravnih dijelova koje iznosi 1h. pokazatelji  $f_i$ ,  $r_i$  i  $N_i$  za prekid napajanja potrošača u čvoru 8 prikazani su u tablici 6.3.

*Tablica 6.3. Pokazatelji  $f_i$ ,  $r_i$  i  $N_i$  pri prekidu napajanja potrošača u čvorovima 6 i 7*

element mreže	$f_i$ (1/god)	$r_i$ (h)	$N_i$ (h/god)
0-1	0,3	6	1,8
1-2	0,2	6	1,2
2-3	0,3	6	1,8
3-4	0,1	6	0,6
4-5	0,2	6	1,2
5-6	0,3	4	1,2
5-7	0,15	4	0,6
4-8	0,15	4	0,6
3-9	0,3	4	1,2
2-10	0,3	4	1,2
1-11	0,15	4	0,6

$$f_{6,7} = 2,45$$

$$N_{6,7} = 12$$

Tablica 6.4. Pokazatelji  $f_i$ ,  $r_i$  i  $N_i$  pri prekidu napajanja potrošača u čvoru 8

element mreže	$f_i$ (1/god)	$r_i$ (h)	$N_i$ (h/god)
0-1	0,3	6	1,8
1-2	0,2	6	1,2
2-3	0,3	6	1,8
3-4	0,1	6	0,6
4-5	0,2	1	0,2
5-6	0,3	1	0,3
5-7	0,15	1	0,15
4-8	0,15	4	0,6
3-9	0,3	4	1,2
2-10	0,3	4	1,2
1-11	0,15	4	0,6
$f_8 = 2,45$		$N_8 = 9,65$	

Tablica 6.5. Pokazatelji  $f_i$ ,  $r_i$  i  $N_i$  pri prekidu napajanja potrošača u čvoru 9

element mreže	$f_i$ (1/god)	$r_i$ (h)	$N_i$ (h/god)
0-1	0,3	6	1,8
1-2	0,2	6	1,2
2-3	0,3	6	1,8
3-4	0,1	1	0,1
4-5	0,2	1	0,2
5-6	0,3	1	0,3
5-7	0,15	1	0,15
4-8	0,15	1	0,15
3-9	0,3	4	1,2
2-10	0,3	4	1,2
1-11	0,15	4	0,6
$f_9 = 2,45$		$N_9 = 8,7$	

Tablica 6.6. Pokazatelji  $f_i$ ,  $r_i$  i  $N_i$  pri prekidu napajanja potrošača u čvoru 10

element mreže	$f_i$ (1/god)	$r_i$ (h)	$N_i$ (h/god)
0-1	0,3	6	1,8
1-2	0,2	6	1,2
2-3	0,3	1	0,3
3-4	0,1	1	0,1
4-5	0,2	1	0,2
5-6	0,3	1	0,3
5-7	0,15	1	0,15
4-8	0,15	1	0,15
3-9	0,3	1	0,3
2-10	0,3	4	1,2
1-11	0,15	4	0,6
$f_{10} = 2,45$		$N_{10} = 6,3$	

Tablica 6.7. Pokazatelji  $f_i$ ,  $r_i$  i  $N_i$  pri prekidu napajanja potrošača u čvoru 11

element mreže	$f_i$ (1/god)	$r_i$ (h)	$N_i$ (h/god)
0-1	0,3	6	1,8
1-2	0,2	1	0,2
2-3	0,3	1	0,3
3-4	0,1	1	0,1
4-5	0,2	1	0,2
5-6	0,3	1	0,3
5-7	0,15	1	0,15
4-8	0,15	1	0,15
3-9	0,3	1	0,3
2-10	0,3	1	0,3
1-11	0,15	4	0,6
$f_{11} = 2,45$		$N_{11} = 4,4$	

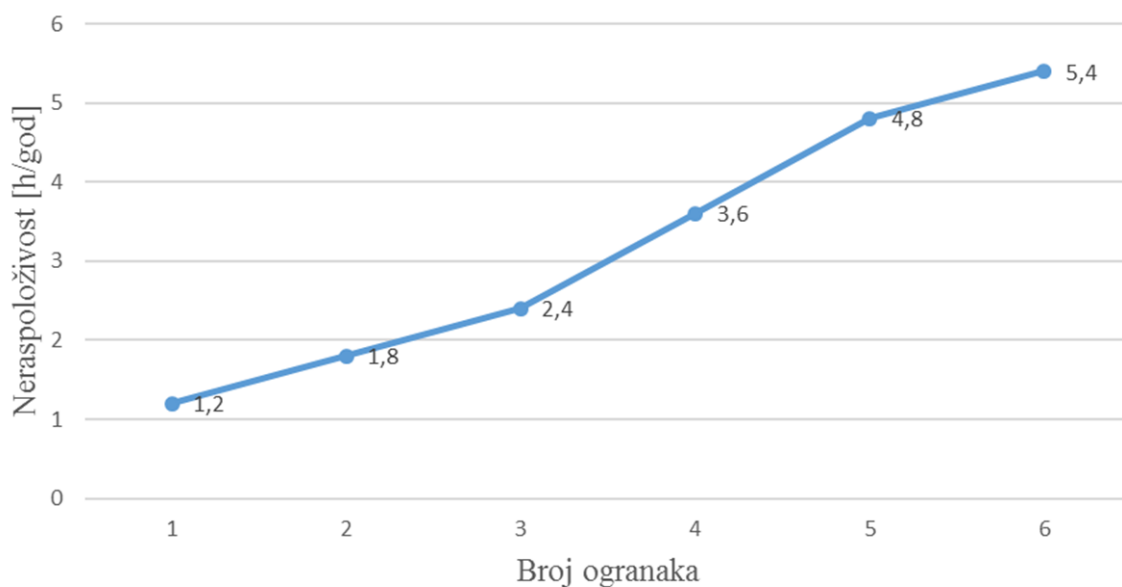
Pokazatelji pouzdanosti SAIFI, SAIDI, CAIDI i ENS su:

$$\text{SAIFI} = \frac{\sum f_i n_i}{\sum n_i} = \frac{2,45 \cdot (100 + 150 + 200 + 400 + 550 + 600)}{100 + 150 + 200 + 400 + 550 + 600} = 2,45$$

$$\begin{aligned} \text{SAIDI} &= \frac{\sum N_i n_i}{\sum n_i} = \frac{12 \cdot 100 + 12 \cdot 150 + 9,65 \cdot 200 + 8,7 \cdot 400 + 6,3 \cdot 550 + 4,4 \cdot 600}{1750} \\ &= 7,2575 \text{ h} \end{aligned}$$

$$\text{CAIDI} = \frac{\sum N_i n_i}{\sum f_i n_i} = \frac{\text{SAIDI}}{\text{SAIFI}} = \frac{7,2575}{2,45} = 2,96 \text{ h}$$

$$\begin{aligned} \text{ENS} &= \sum L_i N_i = 800 \cdot 12 + 950 \cdot 12 + 1000 \cdot 9,65 + 1200 \cdot 8,7 + 1400 \cdot 6,3 + 1500 \cdot 4,4 \\ &= 56510 \text{ kWh/god} \end{aligned}$$



Slika 6.3. Promjena neraspoloživosti na pojedinim ogranacima

Graf prikazuje promjenu neraspoloživosti na pojedinim ograncima. Na prvom ogranku neraspoloživost je 1,2. Na drugom ogranku neraspoloživost se povećava za 0,6 te iznosi 1,8. Na trećem također raste za 0,6 pa iznosi 2,4. Na četvrtom ogranku se povećava za 1,2 te iznosi 3,6. Tako se povećava i na petom ogranku gdje iznosi 4,8. Na šestom ogranku se povećava za 0,6 i iznosi 5,4.

## 7. UTJECAJ POUZDANOSTI NA PROCES PLANIRANJA RAZVOJA DISTRIBUCIJSKIH MREŽA

Planiranje razvoja distribucijske mreže znači definiranje dinamike i strukture izgradnje njenih osnovnih dijelova u svrhu kvalitetnog zadovoljenja predviđenog porasta postojeće mreže te vremenski i prostorno očekivane nove potrošnje električne energije. Najbolje planiranje je određivanje takve distribucijske mreže koja zadovoljava sve zadane tehničke uvjete te ima najmanje troškove. Glavni tehnički uvjeti koje distribucijska mreža mora ispunjavati su da svi potrošači moraju biti napajani, te da su padovi napona u čvorovima i opterećenja elemenata mreže u dozvoljenim granicama. Troškovi mreže sastoje se od troškova investicijske izgradnje, održavanja te gubitaka radne snage i energije. Kriterij pouzdanosti se u proces planiranja razvoja distribucijskih mreža može uključiti posredno i neposredno. Posredno, preko unaprijed zadane strukture mreže, a neposredno, valoriziranjem troškova prekida napajanja i dodatnih ulaganja da bi se oni smanjili.

Kod posrednog odnosno pasivnog uključivanja kriterija pouzdanosti u proces planiranja razvoja distribucijskih mreža podrazumijeva se da se mreže planira za unaprijed definiranu razinu pouzdanosti koja predstavlja tehnički uvjet ili ograničenje u planiranju. Kod neposrednog odnosno aktivnog uključivanja kriterija pouzdanosti u proces planiranja razvoja distribucijskih mreža podrazumijeva se uključivanje i razvrstavanje kriterija pouzdanosti kao kontrolne varijable u optimizacijskom postupku. To znači da se troškovi pouzdanosti promatraju kao dio ukupnih troškova mreže. Funkcija cilja matematičkog modela za optimalno planiranje distribucijskih mreža koji obuhvaća i kriterij pouzdanosti kao varijablu u optimizacijskom postupku prikazano je sljedećim izrazom:

$$\min \left[ \sum_{i \in M} \sum_{j \in M} (a''_{ij} Y_{ij} + b''_{ij} P_{ij}) + \sum_{j \in M} (c''_{sj} Y_{sj} + d''_{sj} P_{sj}) + \sum_{k=1}^{ne} \sum_{i=1}^{M'} P_i c_{ik}(r_k) \lambda_k \right] \quad (7.1.)$$

Gdje su:

$ne$  - broj elemenata mreže čiji se kvarova razmatraju

$c_{ik}(r_k)$  - jedinični troškovi prekida napajanja čvora  $i$  zbog kvara elementa  $k$  koji traje  $r_k$  sati [Kn/W]

$r_k$  - vrijeme trajanja kvara elementa  $k$  [h]

$\lambda_k$  - učestalost kvara elementa  $k$  mreže [kvar/god.]

$P_i$  - vršno radno opterećenje čvora  $i$  [W]

Problem koji je prikazan funkcijom cilja i odgovarajućim ograničenjima predstavlja složen problem, koji se može riješiti točnim algoritmima.

Modeli za planiranje srednjenaponskih distribucijskih mreža koji kao varijablu uključuju pouzdanost odnose se na prostorno radijalne tj. pokrajinske mreže i rješavaju se aproksimativnim algoritmima. Prostorno zamkaste distribucijske mreže su obično gradske mreže te je njihova izvedba uvjetovana specifičnim zahtjevima okoliša urbane sredine i većim gustoćama opterećenja. Veći i brojniji tereti imaju za posljedicu veće troškove neisporučene električne energije u slučaju prekida opskrbe pa se zbog toga ove mreže izvode uz mogućnost rezervnog napajanja tj. kao prostorno zamkaste. Mogućnosti za uključivanje pouzdanosti kao varijable za postupak planiranja prostorno zamkastih distribucijskih mreža dosta su ograničene jer su varijacije u troškovima i vrijednosti pouzdanosti vrlo male. Kod planiranja prigradskih mreža pouzdanost se uključuje u postupak planiranja zahvaljujući razvoju optimizacijskih metoda i računalne podrške. Razmatranjem pouzdanosti kao varijable u procesu planiranja prostorno radijalnih distribucijskih mreža određuje se konfiguracija koja ima najmanje troškove investicija, održavanja, gubitaka i neisporučene električne energije.

## 8. ZAKLJUČAK

Iz svega navedenog u radu može se zaključiti da su pouzdanost i raspoloživost vrlo važni pojmovi u elektroenergetskom sustavu. Pouzdanost podrazumijeva sposobnost komponente da održi svoju kvalitetu nepromijenjenom tj. da zadovoljavajuće radi u određenom vremenu i uz određene pogonske uvjete. Uz pouzdanost usko su vezani pojmovi kvar i rad bez kvara. U elektroenergetskom sustavu postoje popravljive i nepopravljive komponente. Raspoloživost predstavlja vjerojatnost da će neka komponenta raditi u određenom trenutku.

Pouzdanost distribucijskog sustava definira se kao sposobnost distribucijskog sustava da osigura potrebnu opskrbu električnom energijom.

Postoje osnovni i dodatni pokazatelji pouzdanosti. Osnovni pokazatelji prikazuju pouzdanost pojedinih čvorova u distribucijskoj mreži, dok se dodatni pokazatelji pouzdanosti distribucijske mreže odnose na mrežu u cjelini.

Jedna od najvažnijih stavki kvalitete opskrbe električnom energijom je pouzdano napajanje električnom energijom. Računanje pouzdanosti distribucijskih mreža detaljnije je prikazano u primjerima.



## LITERATURA

- [1] Mikuličić V.; Urbiha-Feuerbach M.: „Analiza pouzdanosti i raspoloživosti elektroenergetskog sustava“, Elektrotehnički fakultet Zagreb, Zagreb, 1976.
- [2] Komen V.: „Model potpore odlučivanju pri planiranju razdjelnih mreža“, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2007.
- [3] Goić R.; Jakus D.; Penović I.: „Distribucija električne energije“, s Interneta, <http://marjan.fesb.hr/~rgoic/dm/skriptaDM.pdf>, 7. 6. 2016.
- [4] Endrenyi J.: „Reliability modeling in electric power systems“, Wiley, New York, 1978.
- [5] Moen J.: „Reliability of supply in competitive electricity markets“, SNF SESSA Conference in Bergen, March 3-4 2005 – Summary of CEER Task Force: Security of supply
- [6] Škrlec D., Krajcar S., Katić A.: Utjecaj distribuiranih izvora na planiranje razdjelne mreže, CIGRE, Zadar, 2004.
- [7] Rajić Ž.: „Razmatranje pouzdanosti pri planiranju razdjelnih elektroenergetskih mreža“, Energetski institut Hrvoje Požar, Zagreb, 1999. godine
- [8] Billinton R., Allan R.: „Reliability Evaluation of Power Systems“, Plenum Press, New York, 1996.
- [9] Tang Y.: „Power Distribution System Planning with Reliability Modeling and Optimization“, IEEE Transaction on Power Systems, No. 1, February 1996

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. Struktura distribucijske mreže s dva naponska nivoa.....	4
Slika 2.2. Struktura distribucijske mreže s jednim naponskim nivoom.....	5
Slika 3.1. Funkcije pouzdanosti i vjerojatnosti kvara.....	9
Slika 3.2. Funkcija učestalosti kvara komponente elektroenergetskog sustava.....	10
Slika 3.3. Radni vijek popravljive komponente.....	12
Slika 3.4. Funkcije pouzdanosti i raspoloživosti komponente.....	13
Slika 3.5. Markovljev model popravljive komponente.....	14
Slika 3.6. Funkcije raspoloživosti i neraspoloživosti komponente.....	15
Slika 3.7. Markovljev model dviju popravljivih komponenata.....	17
Slika 3.8. Pojednostavljeni Markovljev model dviju popravljivih komponenata.....	18
Slika 4.1. Podjela pokazatelja pouzdanosti distribucijskog sustava.....	22
Slika 4.2. Podjela osnovnih pokazatelja pouzdanosti distribucijskog sustava.....	24
Slika 4.3. Podjela dodatnih pokazatelja pouzdanosti distribucijskog sustava.....	27
Slika 5.1. Definicija zaštitnih i rastavnih zona u distribucijskoj mreži.....	29
Slika 5.2. Model četiri stanja sustava.....	30
Slika 5.3. Struktura modela za proračun pouzdanosti.....	31
Slika 6.1. Shema distribucijske mreže.....	33
Slika 6.2. Shema distribucijske mreže s rastavljačima.....	35
Slika 6.3. Promjena neraspoloživosti na pojedinim ograncima.....	39

## POPIS TABLICA

Tablica 6.1. Broj potrošača priključenih u čvorove i snage na potrošačima.....	33
Tablica 6.2. Učestalost otkaza $f_i$ , vrijeme trajanja kvara $r_i$ , i vrijeme prekida napajanja potrošača $N_i$ za elemente mreže.....	34
Tablica 6.3. Pokazatelji $f_i$ , $r_i$ i $N_i$ pri prekidu napajanja potrošača u čvorovima 6 i 7.....	36
Tablica 6.4. Pokazatelji $f_i$ , $r_i$ i $N_i$ pri prekidu napajanja potrošača u čvoru 8.....	37
Tablica 6.5. Pokazatelji $f_i$ , $r_i$ i $N_i$ pri prekidu napajanja potrošača u čvoru 9.....	37
Tablica 6.6. Pokazatelji $f_i$ , $r_i$ i $N_i$ pri prekidu napajanja potrošača u čvoru 10.....	38
Tablica 6.7. Pokazatelji $f_i$ , $r_i$ i $N_i$ pri prekidu napajanja potrošača u čvoru 11.....	38

## **SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI NA HRVATSKOM I ENGLISKOM JEZIKU**

U radu se detaljno opisuju pouzdanost i raspoloživost distribucijske mreže. Opisane su osnovne teorije pouzdanosti te pojmovi pouzdanost, raspoloživost i neraspoloživost. Prikazana je pouzdanost distribucijske mreže na konkretnom primjeru. Izračunati su osnovni pokazatelji pouzdanosti. U radu je opisan i utjecaj pouzdanosti na proces planiranja razvoja distribucijskih mreža.

Ključne riječi: Pouzdanost, raspoloživost, neraspoloživost, distribucijska mreža, pokazatelji pouzdanosti.

The paper detailing the reliability and availability of the distribution network. It describes the basic concepts of reliability theory and reliability, availability and unavailability. It shows the reliability of the distribution network on a concrete example. Calculate the basic indicators of reliability. This paper describes the impact on the reliability of the process of planning the development of distribution networks.

Key words: Reliability, availability, unavailability, distribution network, reliability indices.