



UNIVERZITET U NIŠU
ELEKTRONSKI FAKULTET



Dragan A. Stevanović

**ODREĐIVANJE PREOSTALOG ŽIVOTNOG
VEKA I STRATEGIJE ZAMENE
MALOULJNIH PREKIDAČA NA OSNOVU
DINAMIČKE ANALIZE RIZIKA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Niš, 2021.



UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF ELECTRONIC ENGINEERING



Dragan A. Stevanović

**DETERMINATION OF REMAINING
USEFUL LIFE AND REPLACEMENT
STRATEGIES OF MINIMUM OIL CIRCUIT
BREAKERS ACCORDING TO DYNAMIC
RISK ANALYSIS**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2021.

Podaci o doktorskoj disertaciji

Mentor:	redovni profesor, dr Dragan Tasić, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet u Nišu.
Naslov:	Određivanje preostalog životnog veka i strategije zamene malouljnih prekidača na osnovu dinamičke analize rizika
Rezime:	<p>Glavni cilj ove disertacije je procena preostalog životnog veka malouljnih prekidača na osnovu podataka prikupljenih tokom njegovog redovnog ispitivanja.</p> <p>Korišćenjem predloženog pristupa mogu se identifikovati prekidači sa najvećim rizikom, odnosno prekidači čiji otkaz može izazvati najveće ekonomske posledice, ali i posledice po stabilnost elektroenergetskog sistema. Određivanjem pouzdanosti i rizika malouljnih prekidača može se sagledati kakav uticaj imaju faktori koji karakterišu mesto ugradnje na proces starenja prekidača. Na taj način se uspostavlja korelacija između vrednosti padova napona i ostalih podataka kao što su: tip izvoda, naponski nivo, godina proizvodnje, broj isključenih struja kratkog spoja.</p> <p>Krajnji rezultat analize prekidača je mogućnost poznavanja njegovog procesa starenja, klasifikacija stanja svih prekidača na osnovu rizika otkaza, poznavanje uticaja zamene prekidača na raspoloživost transformatorske stanice, a sve na osnovu postojećih podataka, tj. bez dodatnih ulaganja u novu opremu ili radnu snagu.</p>
Naučna oblast:	Tehničko-tehnološke nauke
Naučna disciplina:	Elektrotehničko i računarsko inženjerstvo
Ključne reči:	otpornost kontakta, pouzdanost, prekidač, preostali životni vek, rizik.
UDK:	621.316.52-027.45:621.316.1(043.3)
CERIF klasifikacija:	T 190 Elektroiženjerjing
Tip licence Kreativne zajednice:	CC BY-NC-SA

Data on Doctoral Dissertation

Doctoral Supervisor:	Prof. Dragan Tasić PhD, E.E. University of Niš, Faculty of Electronic Engineering
Title:	Determination of Remaining Useful Life and Replacement Strategies of Minimum Oil Circuit Breakers According to Dynamic Risk Analysis
Abstract:	<p>The main goal of this dissertation is to estimate the remaining useful life of minimum oil circuit breakers (CB) based on data collected during their regular inspection.</p> <p>Using the proposed approach, CB's with the highest risk can be identified, whose failure can cause the greatest economic consequences, but also consequences for the stability of the power system. By determining the reliability and risk of minimum oil CB's, it is possible to see what influence has the place of installation on the aging process. In this way, a correlation is established between the values of voltage drops and other categories such as: feeder type, voltage level, year of production, number of disconnected short-circuit currents.</p> <p>The end result of the CB's analysis is the possibility of knowing its aging process, classification of the state of all CB's based on the risk of failure, knowledge of the impact of CB's replacement on the availability of the power station, without additional investment in new equipment or labor.</p>
Scientific Field:	Technical and technological sciences
Scientific Discipline:	Electrical and computer engineering
Key Words:	circuit breaker, contact resistance, reliability, remaining useful life, risk.
UDC:	621.316.52-027.45:621.316.1(043.3)
CERIF Classification:	T 160 Electrical engineering
Creative Commons License Type:	CC BY-NC-SA

SADRŽAJ

1	UVOD	12
2	PREGLED LITERATURE.....	16
3	PREKIDAČI	24
3.1	Razvoj tehnologije prekidača.....	24
3.1.1	Malouljni prekidači	25
3.1.2	SF6 prekidači.....	27
3.1.3	Vakuumski prekidači.....	28
3.1.4	Izbor prekidača	28
3.2	Trenutna praksa eksploatacije i zamene prekidača.....	29
3.3	Ispitivanje prekidača i praćenje njegovog stanja	35
3.3.1	Merenje otpornosti.....	37
3.3.2	Merenje statičke otpornosti kontakata.....	38
3.3.3	Merenje dinamičke otpornosti kontakata	38
3.3.4	Uređaji za ispitivanje prekidača	38
3.4	Održavanje malouljnih prekidača	39
3.4.1	Preporuke za održavanje prekidača	42
3.5	Opis procesa starenja kontakata.....	43
3.5.1	Opis pogoršanja stanja prekidača	44
4	RIZIK.....	49
4.1	Način proračuna rizika	54
4.2	Održavanje zasnovano na riziku	55
5	ANALIZA ŽIVOTNOG VEKA UREĐAJA.....	57
5.1	Pokazatelji pouzdanosti i životni vek uređaja.....	57
5.2	Raspodele životnog veka	61
5.2.1	Eksponencijalna raspodela	61
5.2.2	Normalna raspodela.....	62
5.2.3	Logaritamska-normalna raspodela	63
5.2.4	Vejbulova raspodela	64
5.3	Diskretne raspodele.....	66
5.3.1	Binomna raspodela	66
5.3.2	Uniformna raspodela	67
5.3.3	Bernulijeva raspodela	68
5.3.4	Geometrijska raspodela	69
5.3.5	Puasonova raspodela	70

6	UTICAJ PREKIDAČA NA RASPOLOŽIVOST TS	72
6.1	Metoda minimalnih puteva	73
6.2	Metoda minimalnih preseka.....	77
6.2.1	Proračun raspoloživosti	82
7	NOV PRISTUP ODREĐIVANJA RIZIKA PREKIDAČA	87
7.1	Određivanje funkcije raspodele analiziranih podataka	92
7.1.1	Određivanje raspodele u slučaju otkaza usled prekoračenog pada napona	92
7.1.2	Određivanje raspodele u slučaju otkaza usled prekoračenog broja prekinutih struja kratkog spoja.....	94
7.2	Proračun rizika	95
8	VERIFIKACIJA PREDLOŽENOG PRISTUPA	97
8.1	Analiza prikupljenih podataka	101
8.1.1	Određivanje raspodele otkaza usled prekoračenog pada napona	102
8.1.2	Određivanje raspodele otkaza usled prekoračenog broja prekinutih struja kratkog spoja	105
8.1.3	Rezultati proračuna rizika.....	109
9	UTICAJ STANJA PREKIDAČA NA RASPOLOŽIVOST TS	112
9.1	Određivanje raspoloživosti TS.....	112
9.1.1	Metoda minimalnih puteva.....	116
9.1.2	Metoda minimalnih preseka	116
9.2	Ekonomski aspekti zamene prekidača	118
9.2.1	Uticaj pouzdanosti prekidača na troškove održavanja	125
9.2.2	Diskontovanje - svođenje troškova akcija na sadašnji trenutak	127
10	SOFTVER ZA PRORAČUN RIZIKA PREKIDAČA	129
11	ZAKLJUČAK.....	130
12	LITERATURA	133
13	PRILOG 1	142
14	PRILOG 2	163
15	PRILOG 3	169
16	PRILOG 4	175
17	PRILOG 5	182
18	PRILOG 6	188
	BIOGRAFIJA.....	194

Lista slika

Slika 3.1 Princip rada prekidača [44]	24
Slika 3.2 Razvoj tehnologija prekidača tokom 20-og veka [47]	25
Slika 3.3 Presek prekidača [25]	26
Slika 3.4 Osnovni koncept uljnih prekidača [44]	26
Slika 3.5 Princip rada SF6 prekidača [44]	27
Slika 3.6 Komora vakuumskog prekidača [46]	28
Slika 3.7 Svetsko tržište SN prekidača po regionima (1998 god.)	29
Slika 3.8 Pokazivač stanja ulja 10 kV prekidača	33
Slika 3.9 Mehanizam 10 kV malouljnog prekidača: levo- prednja strana, desno - desna strana	34
Slika 3.10 Odnos životnog veka prekidača bez i sa održavanjem [57]	36
Slika 3.11 Karakteristike životnog veka za različite varijante održavanja [64]	41
Slika 3.12 Prikaz puta struje kroz površinu stvarnog kontakta [68]:	44
Slika 3.13 Promena otpornosti kontaktnog spoja sa vremenom za različite vrednosti opterećenja [68]	45
Slika 3.14 Povećanje otpornosti kontaktnog spoja usled habanja [69]	45
Slika 4.1 Proces primene standarda ISO 31000 [74]	52
Slika 4.2 Blok dijagram održavanja zasnovanog na riziku [95]	56
Slika 5.1 Karakteristika preostalog životnog veka [6]	59
Slika 5.2 Verovatnoća otkaza (karakteristika „kade“) [100]	60
Slika 5.3 Eksponencijalna raspodela za različite vrednosti parametra skaliranja	61
Slika 5.4 Normalna raspodela za tri različite vrednosti parametra skaliranja, pri $m=0$	62
Slika 5.5 Logaritamska-normalna raspodela za tri vrednosti parametra skaliranja	63
Slika 5.6 Vejbulova raspodela za različite vrednosti β parametra	65
Slika 5.7 Binomna raspodela za različite vrednosti parametara	67
Slika 5.8 Uniformna raspodela za različite vrednosti parametra b	68
Slika 5.9 Kumulativna funkcija Bernulijeve raspodele	69
Slika 5.10 Geometrijska raspodela za tri različite vrednosti verovatnoće p	69
Slika 5.11 Puasonova raspodela za različite vrednosti parametra λ	71
Slika 6.1 Jednopolna šema distributivne TS 110/x kV/kV	72
Slika 6.2 Funkcionalni graf postrojenja sa slike 6.1	72
Slika 6.3 Graf u obliku mosta	73
Slika 6.4 Ekvivalentni graf sa minimalnim putevima	76
Slika 6.5 Ekvivalentni graf sa minimalnim presecima	82
Slika 7.1 Prikaz analize uticaja stanja prekidača	87
Slika 7.2 Algoritam predloženog matematičkog modela	91
Slika 7.3 Ilustracija različitih vrednosti ρ parametra [116]	93
Slika 8.1 35 kV prekidač pripremljen za postupak merenja padova napona	99
Slika 8.2 Postupak merenja padova napona na 35 kV prekidaču – veza priključnih krajeva	99
Slika 8.3 Priključni krajevi 10 kV prekidača: a) izlazni kraj, b) ulazni kraj	100
Slika 8.4 Očitavanje vrednosti pada napona	100
Slika 8.5 Termovizijski snimak zagrevanja kontakta prekidača	101
Slika 8.6 Termovizijski snimak zagrevanja „ruža“ kontakta prekidača	101
Slika 8.7 Raspodela padova napona za svaki tip voda	102

Slika 8.8 Raspodela padova napona u odnosu na naponski nivo	102
Slika 8.9 Puasonova raspodela za različite vrednosti λ (5, 15, 25, 35)	106
Slika 8.10 Puasonova raspodela za slučaj iz priloga 3:	106
Slika 8.11 Prikaz regiona u kome je pretpostavka ispravna	109
Slika 9.1 Jednopolna šema razmatrane TS 35/10 kV/kV	114
Slika 9.2 Funkcionalni blokovi i nesigurni čvorovi TS sa slike 9.1	115
Slika 9.3 Funkcionalni graf za posmatrano postrojenje	116
Slika 9.4 Ekvivalentni graf sa minimalnim preseccima	117
Slika 9.5 Neraspoloživost postrojenja u zavisnosti od trenutka započinjanja akcije (kolone u tabeli 9.1)	119
Slika 9.6 Neraspoloživost postrojenja za svaki tip akcije (vrste u tabeli 9.1)	120
Slika 9.7 Intenzitet otkaza u odnosu na trenutak početka akcije	120
Slika 9.8 Intenzitet otkaza prekidača za svaki tip akcije	121
Slika 9.9 Grafik troškova svake akcije	124
Slika 9.10 Varijabilni troškovi prekidača	126
Slika p1.1 Nepouzdanost prekidača na nadzemnim vodovima	142
Slika p1.2 Pouzdanost prekidača na nadzemnim vodovima	142
Slika p1.3 Nepouzdanost prekidača na nadzemnim vodovima	143
Slika p1.4 Gustina raspodele verovatnoće otkaza prekidača na nadzemnim vodovima	143
Slika p1.5 Intenzitet otkaza prekidača na nadzemnim vodovima	144
Slika p1.6 Parametri Vejbulovi raspodele kod prekidača na nadzemnim vodovima ...	144
Slika p1.7 Nepouzdanost prekidača na kablovskim vodovima	145
Slika p1.8 Pouzdanost prekidača na kablovskim vodovima	145
Slika p1.9 Nepouzdanost prekidača na kablovskim vodovima	146
Slika p1.10 Gustina raspodele verovatnoće otkaza prekidača na kablovskim vodovima	146
Slika p1.11 Intenzitet otkaza prekidača na kablovskim vodovima	147
Slika p1.12 Parametri Vejbulovi raspodele kod prekidača na kablovskim vodovima .	147
Slika p1.13 Nepouzdanost prekidača na 10 kV vodovima	148
Slika p1.14 Pouzdanost prekidača na 10 kV vodovima	148
Slika p1.15 Nepouzdanost prekidača na 10 kV vodovima	149
Slika p1.16 Gustina raspodele verovatnoće otkaza prekidača na 10 kV vodovima	149
Slika p1.17 Intenzitet otkaza prekidača na 10 kV vodovima	150
Slika p1.18 Parametri Vejbulovi raspodele kod prekidača na 10 kV vodovima	150
Slika p1.19 Nepouzdanost prekidača na 35 kV vodovima	151
Slika p1.20 Pouzdanost prekidača na 35 kV vodovima	151
Slika p1.21 Nepouzdanost prekidača na 35 kV vodovima	152
Slika p1.22 Gustina raspodele verovatnoće otkaza prekidača na 35 kV vodovima	152
Slika p1.23 Intenzitet otkaza prekidača na 35 kV vodovima	153
Slika p1.24 Parametri Vejbulovi raspodele kod prekidača na 35 kV vodovima	153
Slika p1.25 Nepouzdanost prekidača na svim tipovima vodova	154
Slika p1.26 Pouzdanost prekidača na svim tipovima vodova	154
Slika p1.27 Nepouzdanost prekidača na svim tipovima vodova	155
Slika p1.28 Gustina raspodele verovatnoće otkaza prekidača na svim tipovima vodova	155

Slika p1.29 Intenzitet otkaza na svim tipovima vodova.....	156
Slika p1.30 Parametri Vejbulovi raspodele kod prekidača na svim tipovima vodova .	156
Slika p1.31 Nepouzdanost 10 kV i 35 kV prekidača.....	157
Slika p1.32 Pouzdanost 10 kV i 35 kV prekidača	157
Slika p1.33 Nepouzdanost 10 kV i 35 kV prekidača.....	158
Slika p1.34 Gustina raspodele verovatnoće otkaza za 10 kV i 35 kV prekidače	158
Slika p1.35 Intenzitet otkaza 10 kV i 35 kV prekidača	159
Slika p1.36 Parametri Vejbulovi raspodele kod 10 kV i 35 kV prekidača.....	159
Slika p1.37 Nepouzdanost prekidača na kablovskim i nadzemnim vodovima	160
Slika p1.38 Pouzdanost prekidača na kablovskim i nadzemnim vodovima.....	160
Slika p1.39 Nepouzdanost prekidača na kablovskim i nadzemnim vodovima	161
Slika p1.40 Gustina raspodele verovatnoće otkaza prekidača na kablovskim i nadzemnim vodovima.....	161
Slika p1.41 Intenzitet otkaza prekidača na kablovskim i nadzemnim vodovima.....	162
Slika p1.42 Parametri Vejbulovi raspodele kod prekidača na kablovskim i nadzemnim vodovima.....	162
Slika p2.1 10 kV izvodi (pad napona +25 %)	163
Slika p2.2 10 kV izvodi	164
Slika p2.3 35 kV izvodi (pad napona +25 %)	164
Slika p2.4 35 kV izvodi.....	165
Slika p2.5 Kablovski izvodi (pad napona +25 %).....	165
Slika p2.6 Kablovski izvodi	166
Slika p2.7 Nadzemni izvodi (pad napona +25 %).....	166
Slika p2.8 Nadzemni izvodi	167
Slika p2.9 Svi izvodi (pad napona +25 %).....	167
Slika p2.10 Svi izvodi.....	168
Slika p4.1 Ekvivalentni graf za presek T1-T2.....	178
Slika p4.2 Ekvivalentni graf za presek T1' i T2.....	180
Slika p4.3 Ekvivalentni graf za presek A“	181
Slika p6.1 Početni prozor nakon pokretanja softvera	189
Slika p6.2 Trenutne vrednosti rizika	189
Slika p6.3 Prikaz stanja izabranog prekidača	190
Slika p6.4 Stanje izabranog prekidača.....	190
Slika p6.5 Unos novih vrednosti padova napona i broja kratkih spojeva	191
Slika p6.6 Proračun sadašnje ili buduće vrednosti rizika.....	191
Slika p6.7 Sagledavanje troškova različitih vrsta investicija	192
Slika p6.8 Proračun verovatnoće otkaza prekidača	192
Slika p6.9 Rezultat proračuna verovatnoće	193

Lista tabela

Tabela 3.1 Broj dozvoljenih isključenja struja kratkog spoja	42
Tabela 3.2 Preporuka za održavanje[39]	43
Tabela 3.3 Brzine isključenja (otvaranja kontakata) za različite naponske nivoe.....	48
Tabela 6.1 Pregled nesigurnih čvorova i pripadajućih funkcionalnih blokova	81
Tabela 8.1 Dozvoljene vrednosti padova napona analiziranih prekidača	98
Tabela 8.2 Vrednosti koeficijenta korelacije za I i II period.....	103
Tabela 8.3 Vejbulovi parametri za I i II period.....	104
Tabela 8.4 Broj zabeleženih isključenja struja kratkog spoja na jednom 10 kV izvodu	107
Tabela 8.5 Intenzitet pojave kvarova u periodu od 7 godina	107
Tabela 8.6 Tabela očekivanih vrednosti kvarova	108
Tabela 8.7 Tablica graničnih vrednosti [123].....	109
Tabela 8.8 Prekidači sa najvećim rizikom.....	111
Tabela 9.1 Nerazpoloživost i intenzitet otkaza postrojenja u odnosu na trenutak preduzimanja odgovarajuće akcije.....	119
Tabela 9.2 Vrednosti korišćene u proračunu troškova	121
Tabela 9.3 Troškovi izvršenih akcija.....	122
Tabela 9.4 Pokazatelji pouzdanosti nakon preduzete akcije zamene prekidača	123
Tabela 9.5 Varijabilni troškovi po prekidaču, uzrokovani verovatnoćom otkaza prekidača u narednom periodu	126
Tabela 9.6 Svedeni troškovi [€] za sprovođenje akcija u narednih 5 godina	127
Tabela p3.1 Verovatnoća dostizanja 6 isključenih struja kratkog spoja	169
Tabela p3.2 Verovatnoća dostizanja 20 isključenih struja kratkog spoja	170
Tabela p3.3 Proračun usklađenosti analiziranih podataka (br. struja kratkog spoja) sa Puasonovom raspodelom	171
Tabela p4.1 Vrednosti nerazpoloživosti i intenziteta otkaza elemenata postrojenja	175
Tabela p4.2 Nerazpoloživost prekidača u TS za različite kriterijume.....	176
Tabela p4.3 Podaci prekidača u TS i verovatnoća otkaza usled prekoračenog broja isključenja struje kratkog spoja.....	177
Tabela p4.4 Verovatnoća otkaza i intenzitet otkaza prekidača u TS za slučaj dostizanja maksimalnog pada napona.....	178
Tabela p5.1 Rizik otkaza prekidača.....	182

SKRAĆENICE

- AHP - analytic hierarchy process - analitičkih hijerarhijskih procesa
- CBM – condition based maintenance – održavanje zasnovano na stanju
- CDF - cumulative distribution function - kumulativna funkcija raspodele
- CIGRE – international council on large electric systems - međunarodni savet za velike električne mreže
- DEES – distributivni elektroenergetski sistem
- EES – elektroenergetski sistem
- FMECA - failure modes, effects and criticality analysis – analiza vrste otkaza, efekata i kritičnosti
- FTA - fault tree analysis – analiza stabla kvara
- LSE - least squares estimation – metoda najmanjih kvadrata
- LS-SVM - least squares support vector machine - metoda najmanjih kvadrata podržavajućih vektora
- MLE - maximum likelihood estimation – procena maksimalne verovatnoće
- MTBF – mean time between failures - srednje vreme između otkaza
- MTTF – mean time to failure - srednje vreme trajanja ispravnog rada
- PDF – probability density function – funkcija gustine verovatnoće
- PSA - probabilistic safety analysis – analiza sigurnosti zasnovana na verovatnoći
- RCM – reliability centered maintenance – održavanje zasnovano na pouzdanosti
- RD - relative difference between median value and the true value – relativna razlika između srednje i stvarne vrednosti
- RRMSE - relative root mean square error – relativni korena srednje kvadratne greške
- RUL – remaining useful life – preostali životni vek
- SCADA - supervisory control and data acquisition – sistem za nadzor, praćenje i prikupljanje podataka
- SN – srednjenaponski
- SVM - Support vector machine - metoda podržavajućih vektora
- TBM – time based maintenance – održavanje zasnovano na vremenu
- TS – transformatorska stanica
- VN – visokonaponski
- WSM - weighted sum method - metoda težinskih koeficijenata

1 UVOD

Predmet ove doktorske disertacije je određivanje preostalog životnog veka malouljnih prekidača na osnovu dinamičke analize rizika. Procena rizika se sprovodi koristeći merene podatke iz eksploatacije prekidača koji se redovno prikupljaju tokom njihovog održavanja.

Praćenje stanja prekidača može biti kompleksan zadatak. Sa jedne strane, u analiziranom distributivnom elektroenergetskom sistemu (DEES) postoji veliki broj prekidača koji se približavaju kraju životnog veka, a sa druge strane, zbog izazova koji postoje u DEES dodatno ulaganje u posebnu opremu za praćenje stanja prekidača i povećanje radne snage koja bi se time bavila nije moguće očekivati.

Drugi izazov koji postoji u analiziranom DEES jeste vršenje zamene malouljnih prekidača. Trenutno, prilikom sprovođenja zamene ne postoje kriterijumi koji uzimaju u obzir trenutno stanje prekidača. Ova disertacija ima za cilj da ukloni pomenuti nedostatak tako što će biti izvršena procena stanja svih prekidača, a zatim i njihovo rangiranje na osnovu rizika od iznenadnog otkaza.

Zamena prekidača sa najvećim rizikom predstavlja dobar osnov za povećanje pouzdanosti elektroenergetskog sistema (EES), smanjenje količine neisporučene električne energije, a samim tim i eliminisanje dodatnog angažovanja radne snage ukoliko se zamena prekidača izvrši pre njegovog otkaza.

Polazna pretpostavka podrazumeva da je moguće odrediti stanje prekidača na osnovu izmerenih padova napona i broja isključenih struja kratkog spoja. Navedeni parametri se mogu iskoristiti za praćenje starenja prekidača, a samim tim i za određivanje njegovog preostalog životnog veka jer proizvođač daje granične vrednosti koje prekidač tokom eksploatacije ne sme prekoračiti. Kada se utvrde stanja prekidača na području jednog DEES moguće je izvršiti njihovo rangiranje, koje se može iskoristiti prilikom planiranja buduće zamene.

Provera ispravnosti pretpostavke o zameni prekidača na osnovu njihovog stanja, koje se određuje predloženim matematičkim modelom, dodatno se ispituje analizom uticaja zamene prekidača na raspoloživost transformatorske stanice (TS), kao i kroz isplativost takvog poduhvata.

Određivanje preostalog životnog veka prekidača je sprovedeno nakon utvrđivanja njegovog trenutnog stanja, a zatim odabirom odgovarajuće matematičke raspodele životnog

veka. Nakon što se odredi raspodela životnog veka postaju dostupne dodatne informacije o analiziranim uređajima i omogućava se nastavak analize kroz procenu rizika otkaza prekidača.

Kako svaki prekidač napaja različiti tip potrošača (domaćinstvo, industrija, gradsko ili seosko područje), rizik njegovog otkaza će zavisiti i od toga koji kupci ostaju bez napajanja. Važnost izvoda će biti opisana težinskim faktorom čija će vrednost biti proporcionalna tipu potrošača.

Rizik je dobijen kao proizvod verovatnoće otkaza prekidača (zbir verovatnoća otkaza usled prekoračenja dozvoljenih vrednosti padova napona i isključenih struja kratkog spoja), troškova koji nastaju kao posledica otkaza i težinskog faktora koji opisuje važnost izvoda. Troškovi otkaza prekidača obuhvataju finansijske gubitke nastale prestankom isporuke električne energije kao i troškove zamene prekidača.

Provera opravdanosti zamene jednog prekidača ustanovljena je analizom uticaja njegovog uklanjanja na raspoloživost TS. U disertaciji dati postupak se sprovodi korišćenjem metode minimalnih puteva i minimalnih preseka. U ovom koraku se proverava i isplativost sprovođenja investicija zamene prekidača.

Trenutni izazovi u pogledu eksploatacije malouljnih prekidača:

1. U posmatranom DEES-u u eksploataciji postoji veliki broj malouljnih prekidača koji su prekoračili ekonomski životni vek i kod kojih se može očekivati povećan intenzitet otkaza,
2. Remont prekidača zamenom neispravnih delova je dosta otežan jer se takvi prekidači više ne proizvode,
3. Ne postoje podaci o istoriji kvarova prekidača, kao ni precizna evidencija o njihovom održavanju. Takva situacija otežava proces preciznog određivanja pouzdanosti prekidača na osnovu eksploatacionih podataka,
4. Pri donošenju odluke o zameni malouljnih prekidača trenutno ne postoje kriterijumi na osnovu kojih se uklanjaju stari prekidači. Najčešće se odabere jedna TS (transformatorska stanica) u kojoj se izvrši zamena svih prekidača. Na taj način, može se dogoditi da pojedini prekidači koji su u dobrom stanju budu zamenjeni, a da u drugoj TS ostanu u pogonu prekidači koji su blizu otkaza,
5. Pomenutim izazovima je sve teže posvetiti potrebnu pažnju, kada je aktuelno smanjenje troškova poslovanja, kao i smanjenje radne snage.

U ovoj disertaciji je izvršena analiza malouljnih prekidača u kojoj je određen njihov preostali životni vek kroz nekoliko kategorija, u nameri da se otklone postojeći problemi u eksploataciji, a koji su vezani za određivanje njihovog stanja.

Struktura ove disertacije je sledeća:

U pregledu literature dat je prikaz metoda koje su do sada korišćene za određivanje preostalog životnog veka prekidača.

U poglavlju br. 3 „Prekidači“ opisan je razvoj tehnologije prekidača, trenutna praksa održavanja, ispitivanja, eksploatacije i njihove zamene. Posebno su objašnjene metode prikupljanja podataka čiji su rezultati korišćeni u disertaciji.

U poglavlju br. 4 „Rizik“ predstavljeni su opis i definicija rizika, standard koji definiše procenu rizika, način njegovog proračuna, kao i opis održavanja zasnovanog na proceni rizika.

U „Analizi životnog veka uređaja“ (poglavlje br. 5) definisan je preostali životni vek uređaja, pokazatelji pouzdanosti i nabrojane su raspodele životnog veka koje se upotrebljavaju u praksi prilikom analize životnog veka. Zatim, navedene su diskretne raspodele pomoću kojih se procenjuje verovatnoća otkaza usled prekoračenog broja prekida struje kratkog spoja.

Matematički model procene uticaja zamene prekidača na raspoloživost TS je dat u poglavlju br. 6 „Uticaj prekidača na raspoloživost TS“.

U poglavlju br. 7 „Nov pristup određivanja rizika prekidača“ predstavljen je pristup za proračun rizika prekidača koji se predlaže u ovoj disertaciji. Poglavlje sadrži opis načina obrade podataka, određivanje preostalog životnog veka analiziranih prekidača, verovatnoće otkaza i proračun rizika.

„Verifikacija predloženog pristupa“ (poglavlje br. 8) prikazuje rezultate koji su dobijeni sprovođenjem novog pristupa koji je predstavljena u prethodnom poglavlju. Predstavljeni su rezultati potvrđivanja odabranih raspodela, kao i tabelarni pregled 25 prekidača sa najvećim rizikom.

Poglavlje br. 9 „Uticaj stanja prekidača na raspoloživost TS“ se bavi analizom isplativošću zamene rizičnih prekidača u TS. Analiza se sprovodi proračunom uticaja zamene određene grupe prekidača na raspoloživost TS sa novčanim troškovima sprovedene akcije.

Troškovi se kasnije svode na sadašnju vrednost, nakon čega je olakšano donošenje odluke o preduzimanju određene akcije.

U poglavlju br. 10 „Softver za proračun rizika prekidača“ prikazan je softver u kome je moguće sprovesti proračun koji je predložen u ovoj disertaciji.

Zaključak (poglavljje br. 11) prikazuje rezultate sprovedenog istraživanja i naučni doprinos disertacije.

U „Literaturi“ (poglavljje br. 12) navedena je sva literatura koja je korišćena u izradi ove disertacije.

Prilog 1 sadrži grafike Vejbulove raspodele za različite kriterijume (naponski nivo, tip voda, svi izvodi, uporedni prikaz kablovskih i nadzemnih vodova i uporedni prikaz 10 kV i 35 kV vodova). Prikazani su grafici nepouzdanosti, pouzdanosti, gustine raspodele verovatnoće, intenziteta otkaza i grafik Vejbulovih parametara.

Prilog 2 sadrži Vejbulovu raspodelu sa izračunatim vrednostima parametara i koeficijenta korelacije za svaki kriterijum (tip voda, naponski nivo, svi izvodi) i za dve vrednosti dozvoljenog pada napona (dozvoljena vrednost i 25% veća dozvoljena vrednost).

Prilog 3 sadrži tabelu verovatnoće dostizanja 6 isključenja struje kratkog spoja, tabelu verovatnoće dostizanja 20 isključenja struje kratkog spoja i tabelu usklađenosti analiziranih podataka (broj struja kratkog spoja) sa Puasonovom raspodelom.

U prilogu 4 nalazi se detaljan proračun pokazatelja pouzdanosti TS.

U prilogu 5 prikazana je tabela rizika otkaza svih prekidača koji još uvek nisu otkazali.

Prilog 6 prikazuje predloženo softversko rešenje, koje koristeći matematički model koji je predložen u ovoj disertaciji vrši proračun verovatnoće otkaza prekidača, troškove i rizik.

Biografija sadrži podatke o autoru ove disertacije.

2 PREGLED LITERATURE

Elektroenergetski sistem je projektovan da funkcioniše 24 h dnevno, 365 dana u godini [1]. Međutim, odmah nakon instalacije, stanje svake električne opreme počinje da se pogoršava usled očekivanog habanja, ali i usled nepredviđenih opterećenja [2]. Starenje uređaja predstavlja fizički proces, koji karakterišu promene fizičkih ili hemijskih karakteristika materijala [3]. Iz tog razloga je potrebno sprovesti održavanje, koje osigurava integritet opreme i ispravan mehanički i električni rad, a takođe i duži životni vek uređaja.

Da bi se utvrdio ekonomski efekat održavanja, remonta ili zamene prekidača [4, 5], potrebno je prvo izvršiti procenu njegovog preostalog životnog veka [6, 7]. Preostali životni vek prekidača je vreme od sadašnjeg trenutka do vremenskog trenutka kada prekidač otkáže sa radom [4]. To je promenljiva veličina koja zavisi od velikog broja faktora, kao što su: starost uređaja, uslovi rada, nivo održavanja...[8]. Analiza pouzdanosti prekidača se može vršiti na osnovu dostupnih podataka iz njegovog održavanja i eksploatacije, koji se mogu dobiti: merenjem otpornosti kontakta; iz podataka sa ultrazvučnih detektora, merenjem tranzijentnog napona prema zemlji, infracrvenim termo snimanjem [9], obradom podataka rada kontrolnog kola prekidača [10] i iz prikupljenih podataka o ranijim kvarovima i istorije rada prekidača [11].

U zavisnosti od prikupljenih podataka, preostali životni vek se može odrediti pomoću: modela zasnovanih na iskustvu (eng. knowledge based), fazi metoda (eng. fuzzy methods) [12], modela očekivanog životnog veka (eng. life expectancy models), statističkih metoda [8, 13, 14, 15, 16, 17]; veštačkih neuronskih mreža (eng. artificial neural networks) i fizičkih modela [7].

Veliki broj malouljnih prekidača je ugrađen tokom 60-ih i 70-ih godina prošlog veka, tako da kod njih efekti starenja sve više postaju očigledni. Posledice starenja se ogledaju u povećanom broju kvarova i otkaza prekidača. Iako bi teorijski prekidač trebalo zameniti, u praksi se češće primenjuju strategije za produžavanje životnog veka prekidača zbog smanjenja troškova investicija. Tako se u [5] predlažu različita rešenja za prekidače, kao što su različite vrste remonta ili zamena. Poređenje je napravljeno između četiri scenarija da bi se dobio pouzdaniji sistem pri minimalnom ulaganju, za preostali životni vek postrojenja. Na osnovu ove studije razvijen je model finansiranja koji upoređuje buduće troškove za sledeće vrste akcija: korišćenje prekidača do kraja njegovog ekonomskog životnog veka; zamena jedne ili više komponenata prekidača modernim ekvivalentima; kompletan remont, gde se prekidač vraća na stanje najbliže novom; i zamena prekidača novim.

Za određivanje preostalog životnog veka prekidača postoji veliki broj metoda. Tako je u [18] predstavljen funkcionalni odnos između nivoa kvarova i mera koje su preduzete za održavanje da bi se dobila maksimalna pouzdanost sa što manjim troškovima.

U [13] je predložena statistička metoda za određivanje preostalog životnog veka opreme u elektroenergetskom sistemu. Kao ilustracija, ova metoda je primenjena na 120 kV i 161 kV prekidačima. Metoda određivanja intenziteta budućih otkaza koja je zasnovana na statistici poremećaja u radu opreme je opisana u [16], a u [17] je prikazana analiza delova 1546 SF6 i malouljnih prekidača jednog prenosnog EES koji su bili uzroci kvarova. Vejbuloва raspodela je upotrebljena za određivanje preostalog životnog veka pojedinih delova prekidača koji su identifikovani kao uzroci kvarova.

U radu [14] razvijen je statistički pristup za ocenu pouzdanosti SF6 prekidača. Cilj statističke analize je dovođenje u vezu podataka iz rada uređaja sa njegovim trenutnim i budućim stanjem. Primenom predložene metode može se izvršiti procena preostalog životnog veka i intenziteta otkaza prekidača na osnovu podataka o ranijim kvarovima. Vejbuloва raspodela je upotrebljena za određivanje pouzdanosti, preostalog životnog veka i intenziteta otkaza pojedinih delova prekidača.

U [8] dat je prikaz statističkih metoda za procenu preostalog životnog veka koje koriste podatke iz istorije rada opreme. Rad [19] predstavlja inovativnu upotrebu statističkih metoda za određivanje pouzdanosti električne opreme uzimajući u obzir mehaničke operacije. Za modeliranje životnog veka upotrebljena je Vejbuloва raspodela, a sama metoda se može primeniti na svim tipovima prekidača.

U [20] predstavljeno je određivanje pouzdanosti i preostalog životnog veka vakuumskih prekidača. Izvršeno je modeliranje habanja kontakata prekidača na osnovu kvarova, čime je određivana njegova pouzdanost i preostali životni vek.

Cilj rada [6] je identifikacija mehanizma kvarova i predviđanje pojave kvara sa ciljem otklanjanja nesigurnosti. Prikazana je klasifikacija tehnika koje se koriste za određivanje preostalog životnog veka za optimizaciju buduće upotrebe uređaja na osnovu stanja uređaja koji su trenutno u pogonu, uzimajući u obziru pouzdanost, predvidljivost i dostupnost.

CIGRE je od 1970 godine sproveo tri istraživanja pouzdanosti visokonaponskih (VN) prekidača na svetskom nivou. Rezultati su pokazali povećanje pouzdanosti prekidača u odnosu na prethodne preglede, međutim, radni mehanizam je i dalje odgovoran za većinu nastalih

kvarova. Samim tim, prekidači sa većim brojem operacija su imali i veći intenzitet otkaza. Pored toga, rezultati pokazuju da su najveći uzroci (u 50 % slučajeva) velikih kvarova prekidača starost, habanje i korozija [11].

Analiza stabla kvara [21] (FTA, eng. fault tree analysis) je tehnika deduktivne analize koja omogućava procenu pouzdanosti složenih sistema. FTA je korišćen u nuklearnim elektranama, aero industriji i železnici za određivanje bezbednosti i pouzdanosti složenih sistema. Metoda omogućava novi pristup za rešavanje problema određivanja pouzdanosti postrojenja. U radu je razvijena smernica za konstrukciju stabla kvarova za procenu stanja prekidača u različitim vrstama konfiguracije postrojenja. Pristup koji je razvijen u ovom radu se može iskoristiti za detaljnu procenu pouzdanosti postrojenja uzimajući u obzir održavanje, termički kapacitet komponente i detaljni uzrok kvara.

Metoda predložena u [3] omogućava modeliranje pouzdanosti prekidača uzimajući u obzir efekte starenja i održavanja.

U [22] predstavljen je pristup određivanja životnog ciklusa prekidača ili njegovog trenutnog stanja koristeći podatke kontrolnog kola (podaci zasnovani na stanju opreme). Predloženi pristup kao rezultat daje i informaciju o uzroku kvara prekidača, a ne samo informaciju o njegovom otkazu. Rad [10] takođe predlaže pristup za procenu kvaliteta prekidača koristeći podatke o radu kontrolnog kola. Ovi pokazatelji su definisani prema raspodeli verovatnoće parametara signala kontrolnog kola koji su funkcija vremena. Bajesov pristup je korišćen pri unosu novih podataka.

U radu [23] je razmatrana ideja da se analiza sigurnosti zasnovana na verovatnoći (PSA) može upotrebiti za određivanje značajnosti fenomena starenja. Ni jedno postrojenje nije imuno na posledice starenja, koje je stalno u toku i njegova procena zavisi od mnogih faktora (fizička svojstva materijala, radni uslovi, opterećenje...). Dobijeni rezultati omogućavaju identifikaciju i definisanje prioriteta kritičnih komponenata u procesu njihovog starenja. Naročito je značajno određivanje prioriteta na osnovu rizika opreme.

Određivanje efekata održavanja pomoću podataka dobijenih praćenjem stanja prekidača predstavljeno je u [24]. Predstavljen je jedan od mogućih načina za planiranje i donošenje odluka prilikom održavanja u prenosnom sistemu. Pristup je baziran na proceni intenziteta otkaza i proračunu smanjenja rizika, koji nalazi primenu prilikom dugoročnog planiranja opreme u prenosnom sistemu. Takođe, predstavljeni su probabilistički modeli za prekidače i transformatore.

Prekidači i transformatori su dve važne komponente EES. Otkaz bilo koje od njih će uzrokovati veliki trošak, a takođe i prestanak snabdevanja električnom energijom. Preventivno održavanje predloženo u [25] može smanjiti ovakve troškove produžavanjem životnog veka komponente i povećanjem njene pouzdanosti. Ipak, treba voditi računa da bi se izbegle dve krajnje situacije: prečesto održavanje koje može biti skupo i nedovoljno održavanje koje može izazvati povećanje broja kvarova. U pomenutom radu je predloženo rešenje u vidu probabilističkog modela održavanja koji je ranije korišćen za transformatore, a sada je prilagođen za prekidače.

Hu u [4] predlaže analitičku metodu za program održavanja koji je zasnovan na online proceni preostalog životnog veka koji je određen pomoću metode podržavajućih vektora (SVM). Odluka da li će uređaj biti uklonjen radi zamene pojedinih zastarelih delova zasnovana je na indeksu preostalog životnog veka odnosno RUL indeksu (eng. remaining useful life) i procenjenim pokazateljima pouzdanosti.

Jian [15] predlaže algoritam sa metodom najmanjih kvadrata podržavajućih vektora (LS-SVM) za predviđanje kvarova i planiranje održavanja. Planiranje održavanja je zasnovano na podacima o kvarovima kao što su: oštećenje izolacije, promene pritiska, mehanički kvarovi, pregrevanje i curenje ulja, koji su prikupljeni tokom inspekcija.

U [18] analizirane su dve strategije održavanja (a: održavanje praćeno preventivnim održavanjem i b: održavanje sa periodičnim preventivnim održavanjem), kako bi se utvrdilo koja od njih pruža maksimalnu pouzdanost uz minimalne troškove. Rezultati su pokazali da je za prekidače pogodnija prva strategija sa stanovišta troškova, dok je kod transformatora obrnut slučaj. U radu je prikazana situacija sa održavanjem prekidača, gde se njegovim remontom samo privremeno povećava njegova pouzdanost, jer elementi koji su ostali u prekidaču, a nisu zamenjeni, mogu biti uzrok novih kvarova, tako da posle određenog vremena njegov intenzitet otkaza počinje da se povećava.

Vremenski zasnovano održavanje (TBM) [26] više nije adekvatna strategija održavanja, zbog prekidača različitih godišta, radnih karakteristika itd. Zato se koristi održavanje zasnovano na stanju (CBM) za održavanje tamo gde je ono potrebno i u trenutku kada je potrebno. Starenje, habanje i korozija su najčešći uzrok (skoro u 50 % slučajeva) velikih kvarova prekidača, praćeno kvarovima usled lošeg projektovanja, proizvodnje i neadekvatnog održavanja (15 %). Predložena tehnika pruža kvantitativni pristup analizi statusa svakog prekidača i njihovih najkritičnijih radnih parametara u realnom vremenu.

Cilj rada [27] je uključiti u analizu uticaj značajnosti opreme u mreži i njeno stvarno stanje. U ovom radu je korišćena strategija održavanja zasnovana na pouzdanosti (RCM). Scenario sa CBM strategijom je pokazao potencijalnu uštedu od 40 % u odnosu na TBM. Ovaj rad takođe prikazuje princip razvoja RCM strategije, koja uzima u obzir stanje opreme i njen značaj u mreži, jer su kompanije suočene sa konkurentnim poslovanjem i primorane su na promenu strategija održavanja opreme. U radu se takođe predlaže korišćenje softvera koji bi upotrebom postojećih podataka vršio procenu stanja opreme i ukazivao na finansijske pogodnosti pojedinih akcija.

U radu [28] predložen je način za određivanje opravdanost zamene postojećih prekidača u TS 110/x kV/kV. U datom radu su kombinovane dve metode za višekriterijumsku analizu: analitičkih hijerarhijskih procesa (AHP) i metode težinskih koeficijenata (WSM). Ova metoda omogućava procenu uticaja svake pojedinačne komponente u procesu donošenja odluka o održavanju ili revitalizaciji. U radu je prikazan primer određivanja strategije za održavanja prekidača u jednoj distributivnoj TS.

U [29] analizirane su vrste kvarova i njihove posledice, zatim je analizirana struktura troškova i izvršena je optimizacija održavanja. Analiza je došla do rezultata u pogledu potrebnog vremenskog okvira između manjih i većih zahteva u pogledu održavanja VN prekidača. Tokom perioda habanja, intenzitet otkaza VN prekidača predstavlja Weibulovu raspodelu.

Metode održavanja predložene u [9] koje su zasnovane na stanju opreme su: ultrasonično snimanje, termo snimanje i snimanje tranzijentnog napona prema zemlji. CBM podaci su korišćeni za stvaranje baze podataka o uzrocima kvarova iz različitih delova prekidača. Ultrasonični i elektromagnetni detektori su najuspešniji detektori oštećenja izolacije usled parcijalnih pražnjenja kod srednjenaponskih prekidača. Oba detektora otkrivaju varničenja i parcijalna pražnjenja, koronu i površinska pražnjenja. Snimanje tranzijentnog napona prema zemlji je uspešno u pronalaženju struja curenja prema zemlji i pogodno je za uređaje koji su izolovani uljem. Termovizija je metoda koja otkriva promene temperature koje su veće od temperature ambijenta. Uzrok kvara opreme je identifikovan na osnovu najvećeg broja ponavljanja kvara u bazi podataka i korišćenjem predložene metode mogu se smanjiti i vreme i troškovi potrebni za održavanje.

U [16] su analizirani VN prekidači sa bazom podataka od 8 600 prekidača. Zabeležena je istorija rada prekidača tokom njegovog životnog veka, na osnovu čega su donete mere

održavanja. Baza podataka je sačinjena od trenutka puštanja prekidača u rad. Nekoliko varijanti starenja je izabrano na osnovu kojih se utvrđuje vrsta kvara uređaja. Takođe je moguće određivanje pogodnog trenutka za održavanje na osnovu stanja uređaja (CBM). Metoda je primenjena na visokonaponskim SF6 i malouljnim prekidačima. Jedan od zaključaka u navedenom radu je da se posledice starenja prekidača ne mogu uočiti pre 15-te godine starosti.

Rad [30] predstavlja procenu pouzdanosti sistema pomoću dvoparametarske Weibulove raspodele. Povećanje složenosti sistema često vodi povećanju mehanizama kvarova. Postoji dosta metoda za procenu Weibulovih parametara, one mogu biti grafičke i analitičke. Grafičke metode nisu previše tačne, ali su relativno brze za proračun. Analitičke metode su metoda procene maksimalne verovatnoće (MLE), metoda najmanjih kvadrata (LSE) i metoda momenata.

Za određivanje parametara β i η koristi se nekoliko metoda, čiji izbor zavisi od vrste dostupnih podataka. Određivanje parametara Weibulove raspodele se može izvršiti grafički i analitički pomoću metoda najmanjih kvadrata ili maksimalne verovatnoće [31, 32]. Metoda najmanjih kvadrata je zapravo matematički automatizovana grafička metoda. Koristi se kod manjeg broja uzoraka i bez velikog broja desno cenzurisanih podataka, dok se u slučaju većeg broja cenzurisanih podataka i većeg uzorka koristi metoda maksimalne verovatnoće.

Rad [33] predlaže nekoliko modifikovanih modela Weibulove raspodele za upotrebu u EES. Predloženi modeli omogućavaju preciznije predviđanje i procenu pouzdanosti sistema. Za određivanje parametara raspodele upotrebljeni su MLE i LSE metode. Predložene metode su korišćene u EES Zapadne Kanade za analizu pouzdanosti elektromehaničkih relea, a predložene metode se mogu iskoristiti i za analizu ostale elektroenergetske opreme.

Pristupi koji su korišćeni za analizu životnog veka transformatora mogu se primeniti i na prekidače, kao što je demonstrirano u [18, 24, 25]. U nastavku je navedeno nekoliko radova kod kojih su za analizu transformatora korišćene slične metode koje se koriste i kod prekidača.

Metode kojima se procenjuju parametri Weibulove raspodele (MLE i LSE) su analizirane i upoređene u [34] gde je kao primer uzeta analiza životnog veka transformatora. Rezultati su pokazali prednosti MLE metode (uvek su dobijani niži RD i RRMSE za oba parametra Weibulove raspodele).

U [35] Weibulova raspodela je iskorišćena za određivanje životnog veka transformatora na osnovu podataka praćenja stanja (condition monitoring data). Parametri Weibulove

raspodele dobijeni su MLE metodom. Smetnja tradicionalnom pristupu određivanja životnog veka je nedostatak stvarnih podataka o kvarovima. Rad predlaže pristup funkcionalnog modeliranja životnog veka transformatora na osnovu podataka praćenja.

Kvarovi transformatora čiji se intenzitet može predstaviti poznatom karakteristikom kada se parametriziraju koji su opisani Weibulovom raspodelom analizirani su u [36]. U ovom radu nasumični kvarovi i kvarovi vezani za starenje su matematički predstavljeni Weibulovom raspodelom. Model nasumičnih otkaza zahteva veći broj uzoraka sa manjim nivoom cenzure u odnosu na model otkaza usled starenja. Rezultati su pokazali da modeli životnog veka predviđaju životni vek transformatora od 82 godine, što omogućava bolje upravljanje sredstvima i korišćenje transformatora preko njihovog pretpostavljenog životnog veka od 40 god.

Weibulova raspodela za određivanje stanja transformatora je predstavljena u [37]. Predložena je metoda za donošenje odluka pri zameni transformatora zasnovana na proceni verovatnoće intenziteta otkaza.

U radu [38] je predložena metoda za sprovođenje analize rizika transformatora, kroz određivanje faktora verovatnoće kvara i faktora posledica. Glavni doprinos rada je upotreba naprednih tehnika procene stanja transformatora i njihovo uključivanje u već postojeće metode za procenu njegovog rizika.

Statistička analiza pojave kvarova na prekidaču [39] koji su uzrok starenja ili habanja prati Weibulovu raspodelu, dok su kvarovi usled iznenadnog otkaza modelirani nehomogenim Puasonovim procesom (parametar λ je funkcija vremena). Weibulovi parametri su određeni metodom procene maksimalne verovatnoće.

Rad [40] analizira intenzitet otkaza prekidača naponskog nivoa 115 kV. Intenzitet otkaza i srednje vreme između otkaza (*MTBF*) za sve komponente procenjeni su Weibulovom raspodelom. Metoda je podesna za upotrebu i kod druge opreme u visokonaponskim TS. Cilj rada je bio povećanje pouzdanosti VN transformatorskih stanica putem određivanja vremenskog intervala korektivnog održavanja opreme.

U [41] predstavljeno je modeliranje radnih podataka i podataka o kvarovima (starenja ulja, habanja kontakata i starenja priključnih krajeva maloljnih prekidača) pomoću Markovljevog dijagrama stanja. Modeliranje prekida vršeno je Weibulovom raspodelom i Weibul-Markovljevim procesom.

Rad [42] predstavlja probabilističku analizu za donošenje odluka o povlačenju stare opreme iz pogona u prenosnom sistemu. Osnovna ideja je određivanje nivoa kvarova i upoređivanje troškova očekivanih oštećenja i kapitalnih ušteda odlaganja vremena za povlačenje opreme. Verovatnoća otkaza opreme u EES je modelirana Vejbulovom raspodelom. Ovaj pristup koristi Vejbulovu raspodelu da modelira neraspoloživost (eng. unavailability) usled otkaza opreme koja se približava kraju životnog veka. Očekivani troškovi usled kvarova stare opreme su određeni pomoću Monte Karlo simulacije.

U [43] Vejbulova raspodela je korišćena za proračun intenziteta otkaza pojedinih komponenata prekidača. Rezultati su korišćeni za određivanje trenutka sprovođenja preventivnog održavanja svake komponente VN prekidača.

Nedostaci dosadašnjih istraživanja

U dosadašnjim istraživanjima, pristupi koji su korišćeni za razmatranje procene stanja i zamenu prekidača bili su zasnovani na upotrebi naprednih dijagnostičkih metoda. U drugim slučajevima, korišćene su uredno vođene dugogodišnje baze podataka o kvarovima prekidača. U analizama koje su sprovedene do sada, pad napona i broj prekinutih struja kratkog spoja nisu korišćeni za izradu modela starenja prekidača. Uticaj zamene prekidača na pouzdanost postrojenja do sada nije uziman u obzir. Lokacija i eksploatacioni uslovi prekidača u TS nisu korišćeni kao deo modela, kao ni dinamičke promene radne okoline prekidača.

Cilj ove disertacije je korišćenje postojećih podataka (pada napona i broja prekinutih struja kratkog spoja, koji se redovno prikupljaju) za izradu modela starenja prekidača, proračun rizika i analizu opravdanosti njegove zamene.

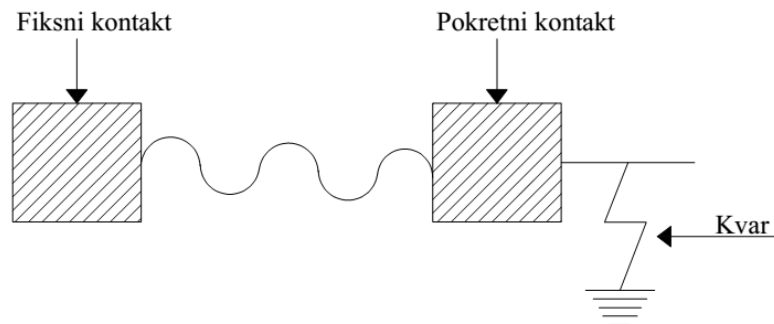
3 PREKIDAČI

Prekidač je uređaj koji obavlja funkciju uključanja i isključenja elemenata elektroenergetskog postrojenja. Prekidač je tako projektovan da može izvršiti uključanje, odnosno isključenje tokom bilo kog stanja sistema, kao što su: kvar, normalan pogon ili prazan hod.

Zbog značaja svoje funkcije prekidač predstavlja vitalan element jednog EES, jer utiče na njegovu pouzdanost, kao i na ispravan rad ostale opreme (koja postaje ugrožena ukoliko prekidač otkáže i ne izvrši isključenje izvoda koji je npr. u kratkom spoju). Upravo u tome leži značaj analize starenja prekidača i određivanja optimalnog vremena njegove zamene.

3.1 RAZVOJ TEHNOLOGIJE PREKIDAČA

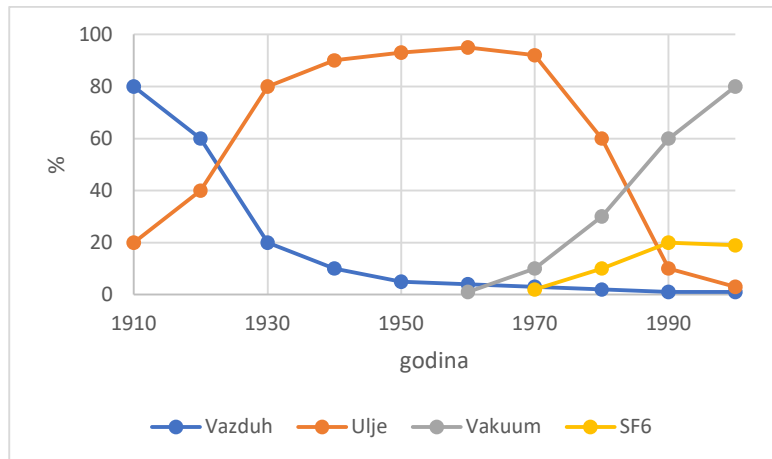
Osnovni princip rada prekidača je prikazan na slici 3.1. Prekidač poseduje dva kontakta. U uključenom stanju ova dva kontakta su zatvorena, tj. nalaze se u neposrednom dodiru. Kada dobije komandu za isključenje, pokretni kontakt se povlači i vrši se promena stanja prekidača. U toku procesa odvajanja, dolazi do prekida protoka električne energije. Kao rezultat, između kontakata pojavljuje se električni luk. Zatvorena komora u kojoj se nalaze kontakti ima ulogu da skladišti izolaciono sredstvo pomoću koga se luk gasi [44].



Slika 3.1 Princip rada prekidača [44]

Prekidači su u svojoj istoriji prošli kroz nekoliko faza razvoja. Uglavnom se najveći pomak dešavao u razvoju sredstava za gašenje električnog luka (slika 3.2). Jedni od prvih prekidača su bili uljni prekidači, koji su se koristili od 1900 godine, nakon čega je njihova tehnologija sve više usavršavana, dok nisu konstruisani malouljni prekidači, čija se primena zadržala do današnjeg dana.

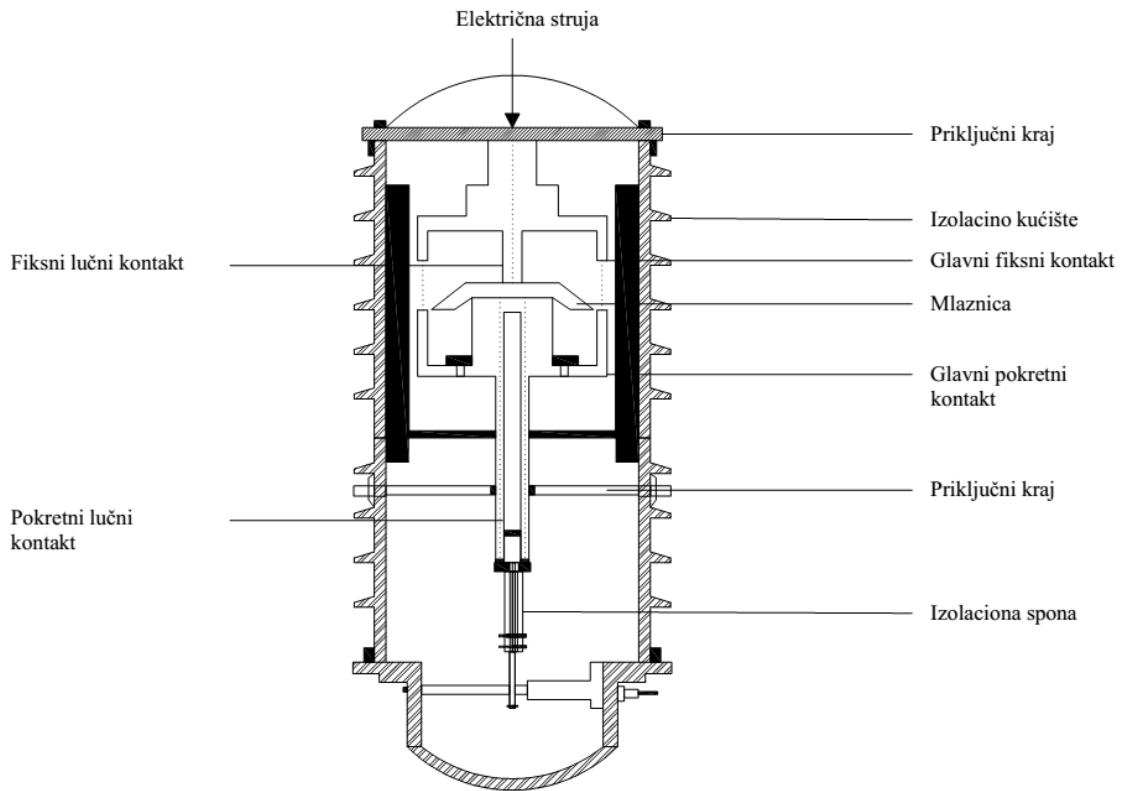
U moderne tehnologije danas se ubrajaju vakuumski i SF6 prekidači. Iako su pogodne karakteristike prekidanja struje u vakuumu primećene dosta rano, izrada prekidača je kasnila 30 godina zbog nepostojanja odgovarajuće tehnologije u tom trenutku koja bi omogućila izradu izolacione komore koja bi bila hermetički zatvorena do kraja životnog veka prekidača. Taj problem je bio prisutan sve do 1960-ih godina [45]. Tokom 50-ih i 60-ih godina je trajao proces njihovog usavršavanja i tek nakon 70-ih godina vakuumski prekidači počinju sve više da zamenjuju malouljne prekidače [46].



Slika 3.2 Razvoj tehnologija prekidača tokom 20-og veka [47]

3.1.1 MALOULJNI PREKIDAČI

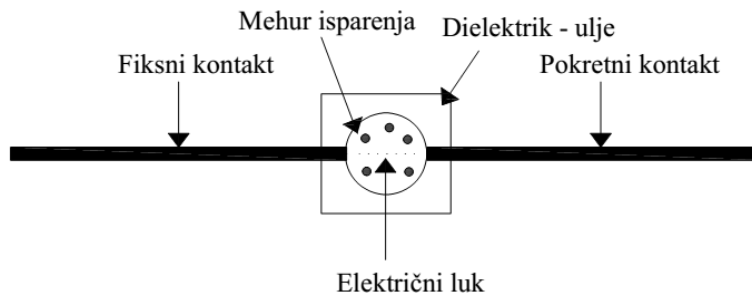
Za razliku od uljnih prekidača, gde se ulje koristi kao sredstvo za gašenje luka i kao izolaciono sredstvo, kod malouljnih prekidača ulje se koristi isključivo kao sredstvo za gašenje luka, dok se izolacija prema masi postiže izolatorima (komora za gašenje luka i kontakti prekidača su smešteni u izolacionoj cevi) [48]. Presek jednog malouljnog prekidača prikazan je na slici 3.3.



Slika 3.3 Presek prekidača [25]

Malouljni prekidači koriste malu količinu ulja, i to samo za proces gašenja luka. Tokom samog procesa gašenja dolazi do opadanja kvaliteta ulja, pa je značajno vršiti kontrolu njegovog kvaliteta. Pored toga, nedostaci upotrebe ulja kao sredstva za gašenje luka su zapaljivost i visoki troškovi održavanja [49].

Na slici 3.4 prikazan je osnovni koncept uljnih prekidača. U trenutku razdvajanja kontakata prekidača koji prenose električnu struju formira se električni luk. Tom prilikom dolazi do oslobađanja velike toplote, a samim tim javljaju se i isparenja. Luk će biti prekinut kada kontakti dostignu krajnji položaj, tj. maksimalnu udaljenost.

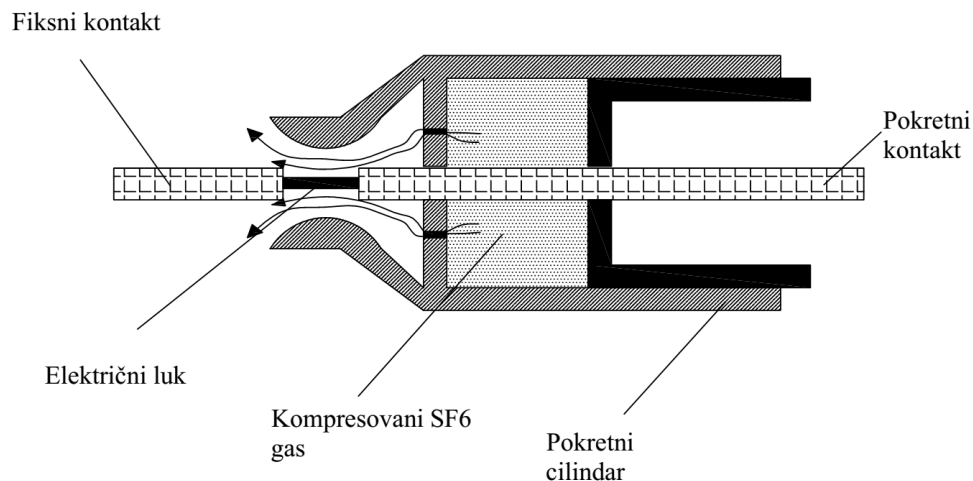


Slika 3.4 Osnovni koncept uljnih prekidača [44]

3.1.2 SF6 PREKIDAČI

SF6 je veštački gas koji poseduje odlične izolacione karakteristike kao i odličnu termičku i hemijsku stabilnost. Zbog tih karakteristika, gas je našao primenu kod SN (srednjenaponski) i VN prekidača [45]. Na slici 3.5 je prikazan njegov princip rada.

SF6 gas je izrazito elektronegativan, što uzrokuje da se početni slobodni elektroni, koji u gasu SF6 mogu dovesti do proboja, vrlo kratko održavaju pošto dolazi do njihovog „upijanja“, čime se stvaraju teško pokretljivi negativni joni koji se u prostoru između kontakata praktično ponašaju kao dielektrik. Probajna čvrstoća SF6 gasa u homogenom električnom polju je pri atmosferskom pritisku oko tri puta veća od probajne čvrstoće vazduha, a na pritisku od 3 bara veća je od probajne čvrstoće transformatorskog ulja. Zbog navedenih osobina, u SF6 gasu se mogu prekidati 100 puta veće struje nego u vazduhu [48, 50, 51].



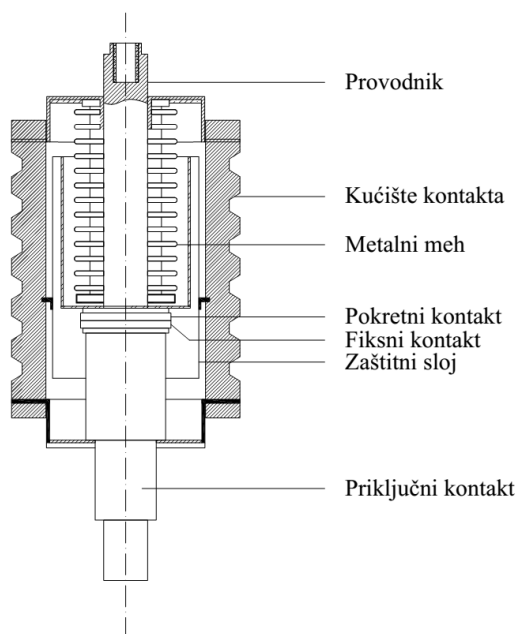
Slika 3.5 Princip rada SF6 prekidača [44]

Tokom otvaranja kontakata prekidača i pojave električnog luka, proticanjem SF6 gasa izvlači se toplota iz luka i vrši gašenje pri prvom prolasku struje kroz nulu [48].

Zbog svih navedenih osobina ovi prekidači nalaze sve veću primenu u EES [52], pokazujući visok nivo pouzdanosti uzimajući u obzir veliki broj operacija i broj kvarova.

3.1.3 VAKUUMSKI PREKIDAČI

Vakuumski prekidači su mehanički najjednostavniji, oni se praktično sastoje samo od kontakata koji se nalaze u vakuumu. Nakon razdvajanja kontakata (slika 3.6) luk se održava uz pomoć jonizovanih metalnih čestica koje emituju elektrode. Neposredno pre prolaska struja kroz nulu dolazi do prekida procesa jonizacije, a samim tim i do prekida struje. Tokom navedenog procesa dolazi do gašenja luka, a odmah zatim i do kondenzacije provodnih metalnih isparenja na kontakte prekidača [48, 53].



Slika 3.6 Komora vakuumnog prekidača [46]

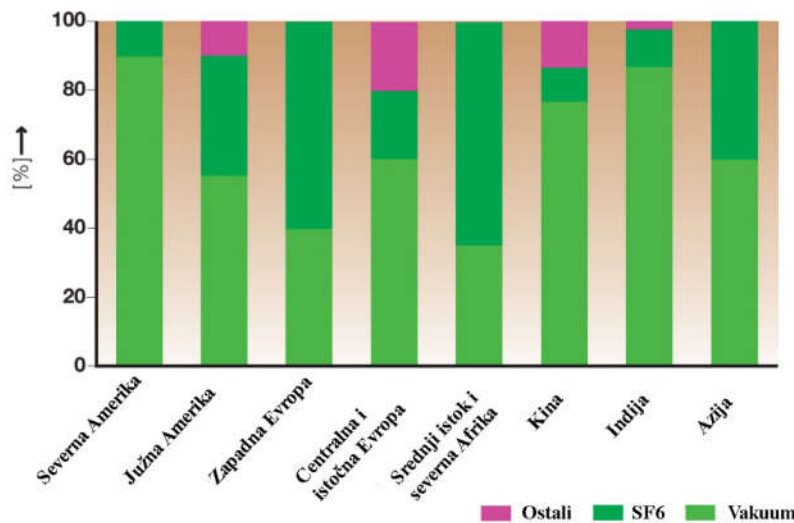
3.1.4 IZBOR PREKIDAČA

Moderni vakuumski prekidači se odlikuju većim brojem radnih ciklusa, a pored toga ne postoji potreba za redovnim održavanjem. Kod malouljnih prekidača prisutna je potreba za čestim održavanjem, kao što je zamena ili dolivanje ulja, podmazivanje mehanizma kao i čest vizuelni pregled. Po preporuci proizvođača, kod prekidača koji su analizirani u disertaciji, kontrolu nivoa ulja potrebno je vršiti svakog meseca. Stanje kontakata i kvalitet ulja vrši se jednom godišnje. Posle 1000 prekidanja potrebna je zamena ulja, posle 6 prekida naznačene struje kratkog spoja potrebno je zameniti ulje i komoru za gašenje luka. Dodatna kontrola prekidača se vrši nakon 10-12 godina ili 5000 pogonskih operacija.

Vakuumski i SF₆ prekidači se smatraju prekidačima koji gotovo da ne zahtevaju održavanje, čime ispunjavaju zahteve prekidača klase E2 (prema IEC 62271-100 standardu

[54], prekidači koji ne zahtevaju održavanje delova zaduženih za uključenje/isključenje tokom predviđenog životnog veka, i minimalno održavanje ostalih delova prekidača) [45].

Prilikom donošenja odluke o izboru između vakuumskog i SF6 prekidača ne postoje jasni kriterijumi. Ni jedna tehnologija nema prevagu nad drugom, već se međusobno dopunjuju sa stanovišta primene na terenu. Ekonomski faktori, želje kupaca, nacionalne tradicije i posebni zahtevi su neki od faktora koji odlučuju koja tehnologija će biti odabrana. U evropskim zemljama i zemljama srednjeg istoka favorizuje se upotreba SF6 prekidača, dok Kina, Japan i SAD većinom koriste vakuumske prekidače [45], (slika 3.7).



Slika 3.7 Svetsko tržište SN prekidača po regionima (1998 god.)

Prosečan životni vek prekidača zavisi od mnogih faktora kao što su eksploatacija, radni uslovi i nivo održavanja. Zato se u različitim radovima pojavljuju različite vrednosti njegovog očekivanog životnog veka. Na primer, u [16] prosečan životni vek malouljnih prekidača procenjuje na 31,2 godine, dok se u priručniku [55] navodi očekivani životni vek rasklopne opreme generalno u rasponu od 25 do 35 godina.

3.2 TRENUTNA PRAKSA EKSPLOATACIJE I ZAMENE PREKIDAČA

Prekidači predstavljaju vitalan element EES, zbog čega postoji potreba za stalnim praćenjem njihovog stanja, kao i za analizu povećanja pouzdanosti i određivanja preostalog životnog veka. To se postiže stalnom ili povremenom kontrolom rada, redovnim održavanjem i analizom podataka iz njegove eksploatacije.

Drugi značaj analize rada prekidača leži u mogućnosti smanjenja troškova. Važno je poznavati podatak približavanja prekidača kraju životnog veka jer to bitno utiče na ekonomiju poslovanja. Samim tim moguće je blagovremeno planiranje zamene prekidača, što je bolji scenario u odnosu na njegov neplanirani otkaz koji sa sobom donosi mnoge negativne posledice, poput dužeg vremena neisporučivanja električne energije, dodatnog (ili neplaniranog) angažovanja radnika, nabavke rezervne opreme itd.

Redovnim praćenjem rada prekidača, kao i pokazatelja njegovog stanja, omogućava se poznavanje njegove pouzdanosti, odnosno njegovog preostalog životnog veka. Postoji više on-line metoda praćenja stanja prekidača [56], gde se mogu pratiti različiti parametri njegovog rada kao što su: pogonski napon i struja, komandni napon prekidača, radni mehanizam, put glavnog kontakta, habanje glavnog kontakta, pritisak ulja, temperatura. Na osnovu takvih ili sličnih podataka može se planirati održavanje ili zamena, obim takvih investicija, kao i njihov vremenski okvir.

Donošenje odluke o zameni prekidača nije jednostavan zadatak. Sa jedne strane, zamena se može smatrati neopravdanom i skupom ukoliko se uzme u obzir njegov dug životni vek (oko 40 god.). Sa druge strane, da bi se osigurao pouzdan rad prekidača do kraja njegovog životnog veka potrebno je sprovoditi redovno održavanje [35]. I pored toga zamena prekidača u jednoj TS je veliki kapitalni poduhvat. Vreme zamene jednog prekidača može trajati više časova, što u nekim situacijama može predstavljati problem, ukoliko se kupcima ne može obezbediti snabdevanje električnom energijom na drugi način. Zamena prekidača u nekim situacijama može iziskivati i zamenu ili rekonstrukciju druge opreme u ćeliji, kao što su sabirnice, postolje prekidača, zatim dovođenje napajanja do prekidača (ukoliko napon napajanja motornog pogona nije isti kao kod prekidača koji se zamenjuje), što povećava troškove investicije i vreme izvođenja radova.

Uklanjanje prekidača kao i ostale zastarele opreme predstavlja neminovan događaj, samo je pitanje trenutka kada će ta akcija biti sprovedena [57], jer se predugim održavanjem mogu pojaviti sledeći problemi:

- troškovi održavanja se povećavaju kako oprema stari,
- dugo održavanje opreme ne može garantovati njen originalan rad,
- verovatnoća otkaza će nastaviti da se povećava, iako održavanje usporava starenje opreme. Ovim će se povećati i rizik u sistemu,

- ekonomski gledano, troškovi opreme koji se sastoje od investicije, održavanja, rada i rizika mogu biti veći ukoliko se uređaj ne zameni u adekvatnom trenutku.

Prednosti modernih prekidača nisu samo u sredstvu gašenja luka, njegovim pogodnostima i bezbednosti manipulacije, već se ogledaju i u upotrebi manjeg broja pokretnih delova. Kod starijih prekidača rezervni delovi se praktično više ne proizvode već se uglavnom uzimaju sa drugih rezervnih prekidača. To utiče i na dužinu procesa popravke što iziskuje povećano angažovanje radne snage ili duže trajanje neisporučivanja električne energije. Pored toga, kod prekidača starijih tehnologija koji su dugo u pogonu dozvoljeni parametri opterećenja mogu biti prekoračeni, zbog promene karakteristika ili povećanja potrošnje.

Zamenom starih prekidača smanjuje se potreba za čestim održavanjem i angažovanjem radne snage, a pored toga pouzdanost sistema se povećava, jer čak i remont starog prekidača povećava njegovu pouzdanost samo u kratkom periodu, pošto preostali delovi mogu biti dotrajali i postati uzrok novog kvara, koji ranije nije bilo moguće predvideti [18].

Upotrebom savremenih tehnologija omogućavaju se brojne prednosti u procesu analize stanja prekidača. Postojanje SCADA (eng. supervisory control and data acquisition) komunikacije omogućava udaljeno nadgledanje rada prekidača, zatim merenje, memorisanje i čuvanje parametara (broj manipulacija, vršna opterećenja...) čime se poboljšava proces procene njihove pouzdanosti.

Iz navedenih razloga se uočava potreba za sprovođenjem analize zamene prekidača stare tehnologije, zbog čega je potrebno utvrditi kriterijume i tempo njihove zamene. Analizom stanja prekidača i određivanjem rizika dobija se uvid u brojno stanje prekidača sa najvećim rizikom, i dobija se pregled prekidača čiji otkazi mogu proizvesti najveće ekonomske posledice.

Praćenje stanja prekidača koji su trenutno u eksploataciji postaje sve veći izazov. Sa jedne strane, većina prekidača koji su trenutno u pogonu približava se kraju životnog veka (ili su te granice već prekoračene), sa druge strane usled deregulacije tržišta električne energije i smanjenja radne snage ovom problemu nije moguće pokloniti potrebnu pažnju.

Zbog nepostojanja jasnog pristupa oko održavanja prekidača i vođenja evidencije o njihovim kvarovima i radovima koji se sprovode tokom održavanja ili remonta, nije moguće izvršiti detaljniju analizu preostalog životnog veka prekidača. Kada su u pitanju SN prekidači, u razmatranom EES postoje dva pristupa održavanja [58, 59]. U [58] predviđa se samo vizuelni

pregled prekidača, i beleženje informacija koje ne pružaju direktne pokazatelje stanja prekidača. Sa druge strane u [59] vrši se samo merenje padova napona na polovima prekidača.

U [60] (TP-15, 7.2.4), navedene su aktivnosti koje treba preduzeti na prekidaču (npr. pregled nivoa ulja, pregled zaštite od korozije, provera rada pogonskog mehanizma, itd.) u procesu revizije TS 110/x i 35/10 kV/kV, kao i vremenski period u kome se one sprovode.

U elektroprivrednim preduzećima još uvek je najzastupljenija strategija održavanja zasnovana na vremenskim okvirima, pri čemu se revizije i ispitivanja opreme sprovode u tačno definisanim vremenskim intervalima, bez obzira na stanje opreme. Zbog nemogućnosti vršenja dodatnih ulaganja, praćenje stanja prekidača se ne sprovodi, tako da se njihovo održavanje vrši bar jednom u toku godine, kada se ispituje njihova funkcionalnost, nivo ulja, vreme reagovanja i vizuelni pregled. U najvećem broju slučajeva prekidači se koriste do kraja njihovog životnog veka, tj. neće biti zamenjeni do njihovog potpunog otkaza. Ukoliko se vrši zamena malouljnih prekidača vakuumskim, delovi uklonjenih prekidača se koriste kao rezerva u slučaju potrebe za intervencijom nad prekidačima u drugim TS, jer se u eksploataciji i dalje nalazi veliki broj takvih tipova prekidača.

Električna oprema u distributivnim mrežama, uključujući prekidače, poseduje određene specifičnosti (mesto ugradnje, uslovi eksploatacije...) čiji uticaj na starenje prekidača do sada nije detaljno razmatran. U ovoj disertaciji, model starenja je formiran na osnovu uticaja lokacije prekidača na njegov proces starenja (kategorije kao što su naponski nivo i tip izvoda). U obzir je uzeta i važnost izvoda, jer se posledice otkaza prekidača mogu dosta razlikovati za različite delove distributivne mreže. U pristupu koji se predlaže u disertaciji, izvršena je detaljna procena rizika otkaza svakog prekidača kao i njihovog preostalog životnog veka.

Još jedna od pogodnosti predloženog pristupa je i mogućnost donošenja ispravne odluke oko uklanjanja malouljnih prekidača. Iako životni vek prekidača može biti prekoračen, većina njih i dalje ispravno izvršava svoju funkciju, pa je važno postaviti pitanje gde je najhitnije izvršiti zamenu prekidača, a gde isti još uvek mogu ostati u pogonu.

Iako zamena malouljnih prekidača predstavlja neminovnost, način na koji se ona trenutno sprovodi nije zasnovan na kriterijumu njihovog stanja. Najveći izazov postoji kod operatera EES koji poseduju veći broj TS, pa se sam proces zamene prekidača ne može izvršiti u kratkom vremenskom periodu (od recimo 5-10 godina). Iz navedenog se uočava potreba za strategijom zamene prekidača koja bi na osnovu stanja prekidača mogla hijerarhijski da prikaže prekidače kod kojih je visok rizik držanja u pogonu.

Iako bi postojanje dodatnih podataka o radu prekidača (istorija kvarova, evidencija održavanja, ispitivanje kvaliteta ulja, merenje dinamičke otpornosti...) doprinelo boljoj i preciznijoj proceni pouzdanosti prekidača, u razmatranom EES jedini merni parametar koji je predmet obavezne inspekcije prekidača je pad napona.

U ovoj disertaciji je na osnovu prikupljenih podataka sa 427 prekidača formiran model starenja. Od ukupne populacije analiziranih prekidača, 190 prekidača (45 %) je i dalje u ispravnom stanju. Ukoliko se posmatra kriterijum +25 % dozvoljenog pada napona, broj ispravnih prekidača je 255 (61 %).

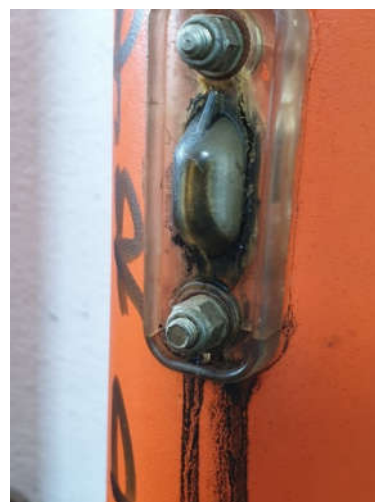
Testiranje vremena reagovanja je vršeno tokom ispitivanja relejne zaštite, pri čemu je praćeno da li će vreme isključenja prekidača bilo jednako podešenom vremenu. Međutim, zbog nepostojanja odgovarajuće ispitne opreme, precizno ispitivanje vremena isključenja kroz precizno merenje reagovanja samih kontakata prekidača nije sprovedeno.

Testiranje ulja nije vršeno. Ulje u prekidačima je menjano u različitim intervalima - u nekim DEES jednom godišnje, a u drugim tek kada je ulje postajalo tamno (slika 3.8).

Manje popravke su sprovedene od strane radnika pojedinih DEES, koje su uključivale zamenu namotaja za uključenje/isključenje ili motora za namotavanje opruge (slika 3.9). Veće popravke, kao što su zamena komore za gašenje luka nisu sprovedene zbog neisplativosti takvog postupka, nedostatka rezervnih delova, stručne radne snage (ponekad i raspoloživog prostora), a i nemogućnosti garantovanja ispravnog rada prekidača nakon takve intervencije. U takvim situacijama pribegavalo se zameni celog prekidača.

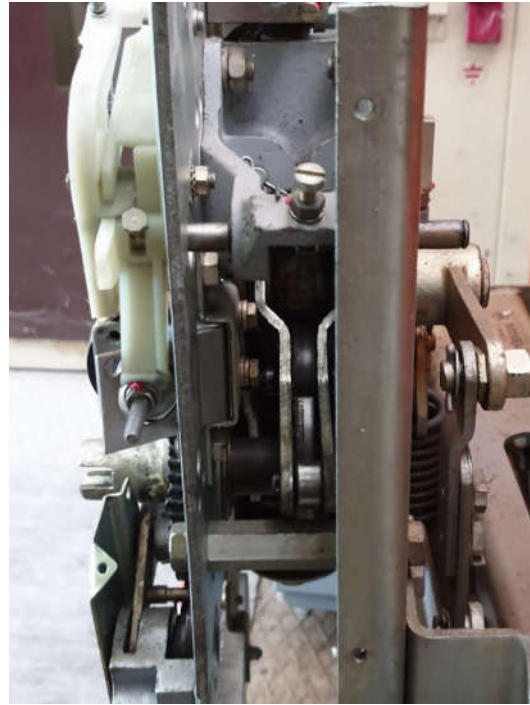
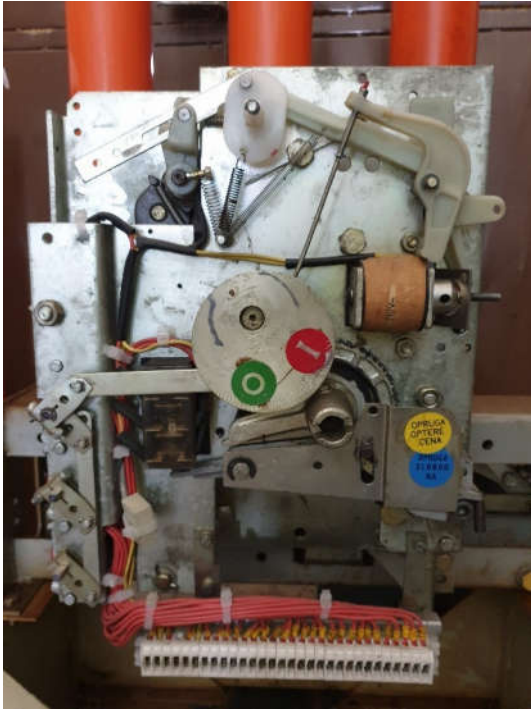


a) zadovoljavajuća čistoća



b) potrebna zamena ulja

Slika 3.8 Pokazivač stanja ulja 10 kV prekidača



Slika 3.9 Mehanizam 10 kV maloulnog prekidača: levo- prednja strana, desno - desna strana

Usled nedostatka ispitne opreme (a takođe i obavezujuće procedure za ispitivanje i održavanje) neophodno je formirati novu strategiju koja koristi pad napona kao ulazni parametar uz ostale poznate podatke iz eksploatacije prekidača.

Iz navedenog, prilikom održavanja, javljaju se sledeći problemi:

- veliki broj maloulnih prekidača je i dalje u pogonu i kod većine je prekoračen životni vek,
- na osnovu karakteristike životnog veka, može se očekivati povećanje broja otkaza usled starosti delova,
- potrebno je donošenje odluke o zameni ili povećanom obimu aktivnosti na održavanju prekidača,
- u slučaju zamene prekidača, potrebna je procedura rangiranja prekidača, čime se definiše tempo njihove zamene prema jasnim kriterijumima,
- povećano održavanje kroz redovan obilazak i ispitivanje prekidača bio bi zahtevan zadatak, sa aspekta trenutno dostupne radne snage,
- ugradnja dodatne opreme za praćenje stanja prekidača, iziskivala bi neopravdano velika ulaganja, naročito ne bi bilo opravdano praćenje opreme koja je već premašila svoj

ekonomski životni vek. Praćenje stanja prekidača je dosta zahtevan postupak, koji iziskuje velika ulaganja ali i obuku radnika koji će vršiti prikupljanje, analizu podataka i preduzimanje adekvatnih akcija. Potrebno je dodatno znanje iz oblasti procene rizika i proračuna parametara pouzdanosti. Praćenje stanja prekidača nije jednostavno, pre svega njegovo opterećenje je promenljivo u toku dana, ali i u toku godine. Uticaj sredine i stalno prisustvo zagađivača u vazduhu mogu dodatno pogoršati njegov rad. Zatim, broj isključenja struja kratkih spojeva od trenutka instalisanja prekidača nije moguće prikupiti jer u većini objekata ne postoje ugrađeni brojači prorade kratkospojne zaštite, već su takvi podaci počeli da se prate poslednjih godina, zahvaljujući modernizaciji dispečerskog centra.

3.3 ISPITIVANJE PREKIDAČA I PRAĆENJE NJEGOVOG STANJA

Da bi se procenilo stanje jednog prekidača potrebno je poznavati podatke iz njegove eksploatacije, kao što su:

- starost,
- tip prekidača,
- broj isključenih struja kratkog spoja,
- broj izvršenih operacija,
- iskustvo sa ovakvim tipom prekidača,
- rezultati ispitivanja,
- iskustvo osoblja, itd.

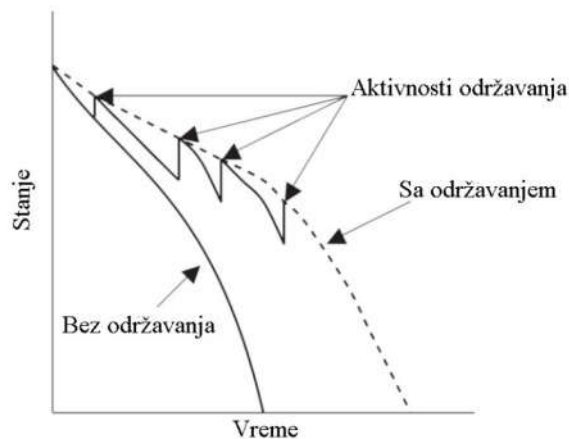
U jednom prekidaču mogu se izdvojiti tri važne celine u procesu njegovog funkcionisanja [35, 39]:

- komora za gašenje luka, gde se vrši uspostavljanje, provođenje i prekidanje električne struje. To je zatvoreni sud koji sadrži kontakt za uključenje/isključenje i sredstvo za gašenje luka (vakuum, SF₆ gas, ulje...) koje obavlja funkciju izolacije i vrši gašenje luka,
- radni mehanizam, gde se akumulira energija potrebna za izvršavanje operacija uključanja ili isključenja,
- kontrolno kolo, pomoću koga se izdaju komande i prate operacije i status prekidača.

Na osnovu nabrojanih celina jednog prekidača, mogu se izdvojiti sledeći procesi pogoršanja stanja malouljnih prekidača [25]:

- **pogoršanje radnog mehanizma** – podrazumeva pogoršanje stanja komore za gašenje luka i različitih pokretnih delova. Vlaga i korozija metalnih delova su neki od uzroka ovog pogoršanja stanja. Kao posledica prekidač može otkazati izvršenje komande,
- **pogoršanje stanja kontakata** – oksidacijom kontakata stvara se tanak sloj oksida na njihovim površinama. Pri visokim temperaturama oksidirani metal omekšava i može doći do plastične deformacije. Erozijski kontakt se javlja zbog isparavanja tokom postupka gašenja električnog luka. Nabrojana pogoršanja mogu dovesti do „zavarivanja“ dve kontaktne površine,
- **pogoršanje kvaliteta ulja** – nusprodukti gašenja luka zajedno sa vlagom i kiseonikom u ulju umanjuju njegovu dielektričnu čvrstoću. Gomilanje ovih čestica u toku dužeg vremenskog perioda uzrokuje varničenja koja mogu preći u unutrašnji kvar. Praćenje stanja ulja u prekidaču je od velikog značaja. Najčešći zagađivači ulja su vlaga, oksidacija i ugljenik [39].

Da bi se izbegao neplanirani otkaz prekidača i sve posledice koje proističu iz toga, sprovode se različite strategije održavanja u cilju produženja njegovog životnog veka (slika 3.10). U zavisnosti od pristupa i načina sagledavanja problema stanja prekidača, strategije održavanja mogu se podeliti u dve grupe: korektivno i preventivno održavanje.



Slika 3.10 Odnos životnog veka prekidača bez i sa održavanjem [57]

Kod strategije korektivnog održavanja (eng. corrective maintenance strategy), akcije su usmerene na otklanjanje kvara nakon njegovog nastanka. Ovaj proces je opravdan u

slučajevima kada su troškovi investicije niski, a otkaz opreme ima neznatne posledice. Zbog svega toga ova strategija predstavlja najjeftiniju varijantu [27].

Kod preventivnog održavanja akcije se sprovode pre otkaza komponente. Glavni zadatak preventivnog održavanja je usporavanje procesa pogoršanja stanja uređaja i povećanje njegovog životnog veka. Preventivno održavanje se može sprovesti kroz dve strategije: redovno i prediktivno (eng. predictive maintenance).

Redovno održavanje se izvodi u unapred definisanim vremenskim intervalima. Ova vrsta održavanja je najviše rasprostranjena i zasnovana je na preporukama proizvođača i iskustvima sa terena. Negativna strana je visoka cena (ukoliko se nepotrebno vrši održavanje) ili povećanje rizika u sistemu (ukoliko se održavanje ne izvršava, a potrebno je) [57]. Zato ova strategija možda neće uvek biti isplativa, jer će pojedina oprema otkazati i pre predviđenog roka [27].

3.3.1 MERENJE OTPORNOSTI

Osnovna funkcija električnog kontakta je prenos električnog opterećenja. Električno opterećenje može biti promenljivo, od rada sistema bez opterećenja do punog opterećenja, a ponekad može doći i do preopterećenja, što utiče i na promenu radne temperature. Pored toga, sve električne veze su podložne starenju i ubrzanom pogoršanju stanja koje može delimično ili potpuno da izmeni njihovu osnovnu radnu funkciju.

Otpornost kontakata predstavlja pokazatelj generalnog stanja prekidača. Ona je jedna od najvažnijih karakteristika električne veze, i bitan faktor ranog otkrivanja anomalija, a takođe i najpouzdanija indikacija rada i pogoršanja stanja električnog kontakta. Mogući uzrok povećanja otpornosti kontakata su ostaci stranog materijala, labavi kontakti i labave veze na priključnim krajevima [25]. Sama otpornost ne zavisi od uslova okoline sve dok strani materijali ne prodru do površine kontakata. Iz tog razloga, svako povećanje otpornosti predstavlja indikaciju postojanja stranog materijala na površini kontakta. To može dovesti do lokalnog povećanja temperature, a samim tim i do pogoršanja stanja prekidača [61].

Ispitivanje otpornosti kontakata prekidača se vrši merenjem padova napona, što je kroz primenu Omovog zakona ekvivalentno merenju otpornosti. Zbog jednostavnosti merenja u praksi se kao kriterijum češće koristi pad napona, čije dozvoljene vrednosti proizvođači takođe navode u specifikacijama prekidača. Pad napona se dobija primenom najzastupljenije metode merenja, a to je merenje statičke otpornosti kontakta.

3.3.2 MERENJE STATIČKE OTPORNOSTI KONTAKATA

Postupak merenja otpornosti se sprovodi tako što se jednosmerna struja pušta kroz zatvoreni pol prekidača, dok se istovremeno vrši očitavanje pada napona. Vrednosti struje pri kojoj će se vršiti merenje padova napona definisane su standardom IEC 62271-1 [62], ali i uputstvima proizvođača opreme i drugim preporukama. U standardu [62] (poglavlje 6.4.1) navedeno da struja tokom ispitivanja treba da ima bilo koju vrednost u opsegu između 50 A i naznačene struje prekidača.

Izmerene vrednosti se predstavljaju u mikroomima ili milivoltima i porede se sa vrednostima koje je definisao proizvođač opreme, kako bi se utvrdilo stanje prekidača. Što se tiče dozvoljenih vrednosti padova napona, na njih veći uticaj ima visina naznačene struje prekidača od vrednosti njegovog naznačenog napona [63].

3.3.3 MERENJE DINAMIČKE OTPORNOSTI KONTAKATA

Dinamička otpornost kontakta se koristi za dobijanje informacija o stanju kontakata za gašenje luka. Kako je pregled unutrašnjosti komore vremenski zahtevan proces, a kod SF6 prekidača postupak je dosta komplikovan, razvijena je metoda merenja dinamičke otpornosti kontakata.

Merenje se sprovodi tako što se struja propušta kroz zatvoren kontakt, nakon čega se zadaje komanda za otvaranje kontakata prekidača. Tokom čitavog postupka se vrši merenje napona. Time se dobija vrednost otpornosti tokom celog postupka otvaranja kontakata.

Navedeno testiranje zahteva posebnu opremu i komplikovaniju proceduru u poređenju sa statičkim merenjem otpornosti, međutim rezultati pružaju bolji uvid u stanje kontakata od statičke otpornosti.

Pored prethodno nabrojanih metoda postoje i dodatna dijagnostička sredstva [9] koja se koriste za otkrivanje uzroka kvara prekidača pomoću monitoringa zasnovanog na stanju.

3.3.4 UREĐAJI ZA ISPITIVANJE PREKIDAČA

Uređaji koji se koriste za ispitivanje stanja prekidača mogu izvršiti sledeće funkcije:

- test merenja vremena reagovanja,
- test statičke otpornosti kontakata,
- test dinamičke otpornosti kontakata,

- analizu struje motora i namotaja,
- test kretanja kontakata,
- test rada prekidača u uslovima sniženog napona.

Test merenja vremena reagovanja vrši se nad glavnim kontaktima prekidača merenjem vremena od trenutka davanja komande do trenutka kada položaj prekidača promeni stanje. Tokom ovog testa mogu se detektovati pogrešna mehanička podešenja kao i postojanje habanja.

Test statičke otpornosti kontakata proverava otpornost glavnog kontakta prekidača mereći njegovu otpornost kako bi se osigurao kvalitetan protok električne energije.

Test dinamičke otpornosti meri vrednost otpornosti kontakata u trenutku vršenja manipulacije i pruža informaciju o postojanju habanja kod glavnih kontakata, ali i kod kontakta za gašenje luka.

Analiza struje namotaja snima krivu struje u trenutku davanja komande za manipulaciju položajem prekidača. Odstupanja ukazuju na moguće električne ili mehaničke nedostatke u komandnom kolu prekidača. *Analiza struje motora* snima udarnu i ustaljenu vrednost struje kao i vreme motanja opruge.

Test kretanja kontakta proverava kompletan mehanizam prekidača kao i mehaničke veze. Rezultat može ukazati na pojavu habanja.

Test podnaponskih uslova proverava rad prekidača u situacijama kada dolazi do smanjenja napona napajanja kontrolnog kola. Test utvrđuje minimalne vrednosti napona pri kojima prekidač može izvršiti uključanje/isključenje.

3.4 ODRŽAVANJE MALOULJNIH PREKIDAČA

Električni kontakti su dizajnirani konzervativno i od njih se očekuje da rade tokom dugog vremenskog perioda. Svojstva materijala od kojih je kontakt izrađen mogu se vremenom pogoršati zbog starenja ili pod uticajem pogoršavanja mehanizma koji može umanjiti njihov životni vek. Stvaranje mogućnosti za korišćenje starih kontakata preko njihovog očekivanog životnog veka može doneti brojne ekonomske pogodnosti.

Rano otkrivanje početnih kvarova će značajno umanjiti neplanirana beznaponska stanja i poboljšati pouzdanost isporuke električne energije. Zbog stanja kvara koja često vode ka

velikim havarijama, rano otkrivanje može ograničiti ove događaje i osigurati bezbednost radnika i ostale opreme.

Starenje se definiše kao kontinualno pogoršanje stanja karakteristika materijala, usled normalnih radnih uslova kao što su ispravan rad ali i usled prolaznih pojava. Pogoršanje se procenjuje na osnovu stalnog ili periodičnog merenja i analize fizičkih parametara koji se odnose na rad opreme.

U slučaju električnih veza i opreme generalno, smanjenje kvarova povećava stabilnost EES. Ovaj zadatak se može izvršiti kroz prediktivno održavanje pomoću naprednih tehnika nadzora i dijagnostike, naročito kroz precizniji i tačniji online nadzor. Krajnji rezultat upotrebe ovih mera je povećana pouzdanost EES i sprečavanje neplaniranih beznaponskih pauza. Time se sa druge strane omogućavaju ekonomske pogodnosti u vidu smanjenja troškova, jer se povećanjem životnog veka opreme preko predviđenog odlažu kapitalna ulaganja u zamenu opreme.

Ukoliko se ne sprovodi održavanje prekidača, očekivano vreme nastanka kvara će biti znatno kraće. U stanju dugog mirovanja, bilo da je to zatvoren ili otvoren položaj prekidača, potreba za njegovim održavanjem može izgledati nepotrebno. Međutim, prekidač koji stoji u stanju mirovanja tokom 6 meseci ili duže, treba nekoliko puta u kontinuitetu uključiti i isključiti da bi se ispitala ispravnost rada i otklonili nagomilani slojevi stranog materijala na pokretnim delovima i kontaktima [61].

Slika 3.11 prikazuje životni vek prekidača tokom različitih aktivnosti održavanja, odnosno zamene. Prikazane su različite metode održavanja koje stoje na raspolaganju operatoru. Pojedine metode mogu biti implementirane bez izrade matematičkog modela, kao što je održavanje zasnovano na stanju, koji je zasnovan na analizi uzroka kvarova i prethodnih performansi, i pokazuje na kojim mestima bi trebalo vršiti ulaganje sredstava [64].

Otkaz da izvrši uključenje i otkaz da izvrši isključenje su najveći kvarovi prekidača, a kao njihov uzrok može se navesti prekomerno habanje kontakata [25].

Kod modernih prekidača pouzdanost se može predstaviti i na sledeći način [11]:

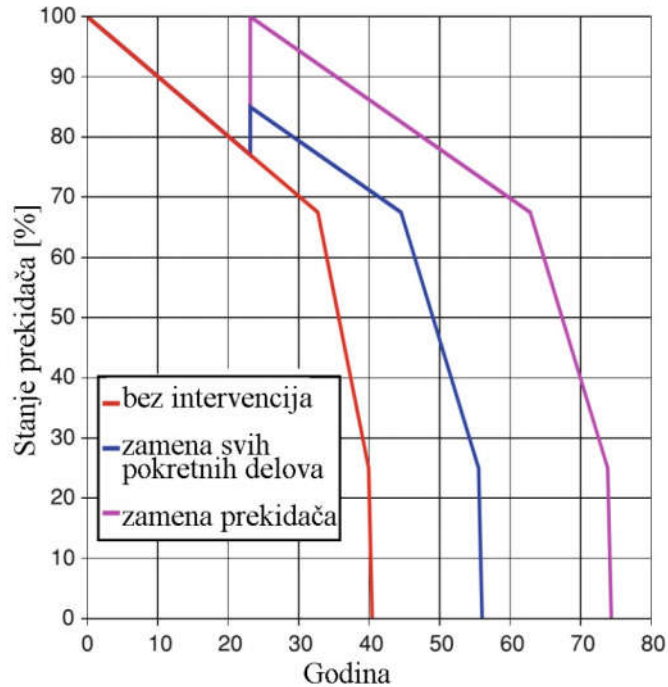
otkaz da izvrši isključenje se dešava 1 u 50 000 slučajeva,

otkaz da izvrši prekidanje struje dešava se 1 u 500 000 slučajeva,

otkaz da izvrši operaciju uključanja se događa 1 u 25 000 slučajeva.

Starost, habanje i korozija su označeni kao glavni faktori velikih kvarova (otkaz prekidača da izvrši neku od svojih osnovnih funkcija) u blizu 50 % slučajeva.

Održavanje zasnovano na praćenju stanja opreme može tačno odrediti najpogodniji vremenski okvir za sprovođenje inspekcije, održavanja i zamene prekidača. Glavni uzroci starenja prekidača su pogoršanje stanja unutrašnjeg mehanizma zbog velikog broja operacija otvaranja i zatvaranja kontakata, i broja operacija tokom prekida struja preopterećenja i struja kratkog spoja [65].



Slika 3.11 Karakteristike životnog veka za različite varijante održavanja [64]

Habanje prekidača se može podeliti u dve kategorije [65]:

1. habanje kontakata (električno habanje): nastaje kao posledica prekida struja velike jačine. Na primer, kontakti se mogu oštetiti preko 30 % u slučaju prekida maksimalnog intenziteta struje kratkog spoja,
2. mehaničko habanje: nastaje kao posledica broja operacija i ne uzima u obzir habanje kontakta.

Podaci pokazuju da prekidi struja velike jačine značajno utiču na smanjenje životnog veka prekidača. Sa druge strane, starenje prekidača se ne povećava prekidanjem struja koje su ispod praga struje koja izaziva starenje (definisane za određeni prekidač) [65].

U odnosu na korektivno održavanje, pri preventivnom održavanju uštede su 12-18 % godišnje. Sa druge strane, nedostaci preventivnog održavanja su ulaganje većeg napora i u nekim slučajevima sprovođenje održavanja koje nije potrebno [65].

3.4.1 PREPORUKE ZA ODRŽAVANJE PREKIDAČA

Svaki proizvođač definiše način održavanje prekidača tokom njegove eksploatacije. Tako se u [66] preporučuje kompletan pregled prekidača na dve godine, a po potrebi i češće, ukoliko se primete nepravilnosti u njegovom radu.

Srednjenaponske prekidače (naznačenog napona od 0.6 kV do 15 kV) treba ispitivati i održavati svake godine ili na svakih 2000 izvršenih operacija. Navedeni način održavanja se preporučuje da bi se održale zahtevane performanse prekidača [61].

U [67] je naglašeno da se prekidači moraju kompletno remontovati posle 10-12 godina eksploatacije, nakon 5000 operacija ili nakon 6 isključenja struje kratkog spoja, šta god od toga da se dogodi prvo. U tabeli 3.1 su date kritične vrednosti i akcije koje se preporučuju od strane proizvođača.

Tabela 3.1 Broj dozvoljenih isključenja struja kratkog spoja

	Naznačena struja I_n	Naznačena prekidna moć I_p	$0.8 \cdot I_p$	$0.5 \cdot I_p$	$0.3 \cdot I_p$
Broj isključenja	1000	6	8	10	20
Postupci	*	•	•	•	•

* Samo zamena izolacionog ulja.

• Zamena: ulja, komora za gašenje luka, fiksnih i pokretnih kontakata.

Kontrola: odstoynih izolacionih cevi, izolacionih poluga.

Posle 40 prekida kapacitivne struje potrebna je zamena izolacionog ulja, kontrola kontakata i komora za gašenje luka [67]. Vrednosti kapacitivnih struja su sledeće:

pri 12 kV : 145 – 480 A,

pri 35 kV : 50 – 180 A.

U tabeli 3.2 prikazan je preporučeni plan održavanja prekidača, predložen od strane komiteta za održavanje električne opreme [39], sa vremenskim intervalima održavanja. Dielektrični testovi se sprovode za ispitivanje izolacionih svojstava ulja, koje treba testirati periodično ili nakon prekida većih struja kvara.

Tabela 3.2 Preporuka za održavanje[39]

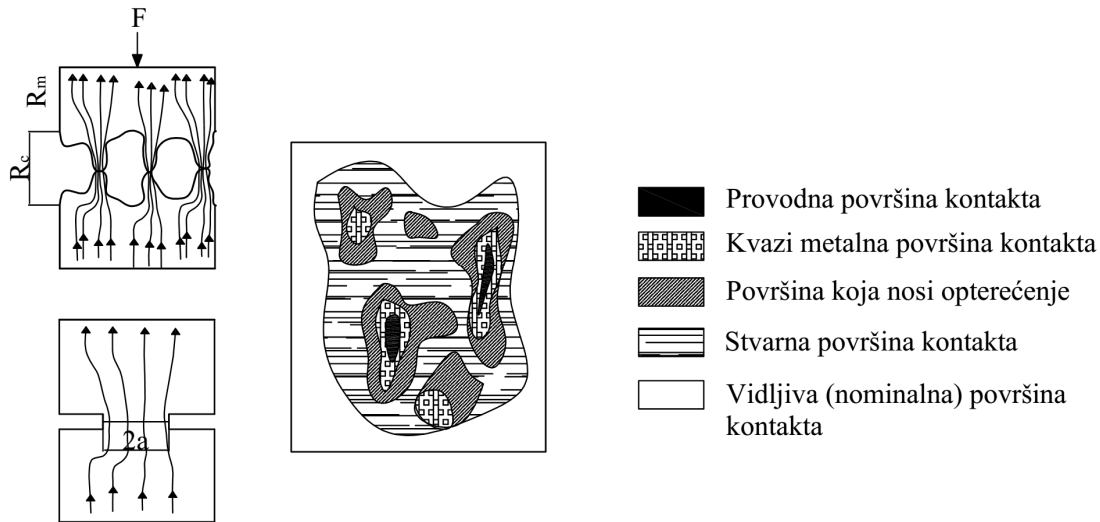
Oprema	Aktivnost	Interval
Uljni prekidač	Opšti pregled i testovi	3 godine
Izolatori	Vizualni pregled / čišćenje	3 godine
Ulje	Dielektrično ispitivanje	1 godine
Kontakti	Merenje otpornosti	3 godine
	Vizuelni pregled	3 godine

3.5 OPIS PROCESA STARENJA KONTAKATA

Tokom vremena, kako delovi uređaja sve više stare, povećavaju se šanse češćih pojava kvarova, a takođe i dužeg vremena popravke. Direktna posledica starenja opreme je povećanje rizika u sistemu zbog veće verovatnoće pojave kvara i mogućnosti oštećenja sistema. Aktivnosti održavanja mogu produžiti životni vek opreme, ali mogu biti skupe za opremu koja je pri kraju životnog veka. Iz tog razloga je potrebno pažljivo razmotriti zamenu opreme u odnosu na njeno održavanje [57].

Električni kontakt se definiše kao interfejs između površina koje provode električnu struju određenog uređaja, čime se osigurava neprekidnost napajanja. Primarna svrha električne veze je da omogući neprekidan tok električne struje između površina kontakata. Zato je jasno, da se takva funkcija može ostvariti samo ukoliko postoji dobar kontakt dve metalne površine [68].

Stvarna površina između kontakata nije idealno ravna već se sastoji od velikog broja neravnina. Samim tim, kada se uspostavi kontakt dve metalne površine, površinske neravnine pojedinih kontakata će prodrati kroz prirodan sloj oksida i drugih površinskih slojeva, formirajući na taj način metalni spoj, a samim tim i provodan put. Povećanjem sile, povećava se i broj formiranih provodnih površina. Ove površine su jedini provodan put električne struje između kontakata. Direktna posledica toga je porozan kontakt, koji ukoliko dođe u dodir sa kiseonikom ili drugim korozivnim gasom može izazvati reakcije čija će posledica biti smanjenje provodnog dela. Posledica toga može biti nestanak provodne površine električnog kontakta, iako će mehanički kontakt između oksidirane površine i dalje biti prisutan (slika 3.12). Priroda procesa koji se događaju u samom kontaktu vremenom izaziva degradaciju površine kontakta što utiče na njegovu otpornost, opterećenje, temperaturu i druge parametre [68].



Slika 3.12 Prikaz puta struje kroz površinu stvarnog kontakta [68]:

F – primenjena sila, R_m – otpornost provodnika, R_c – sužena otpornost i a – poluprečnik
provodne oblasti.

3.5.1 OPIS POGORŠANJA STANJA PREKIDAČA

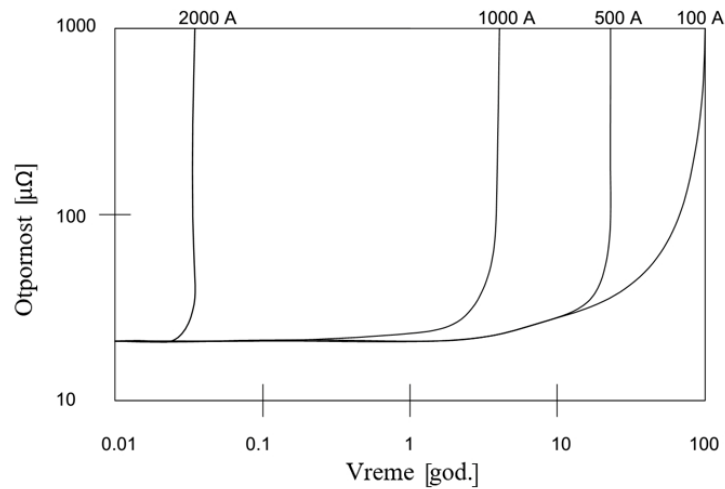
Glavni uzrok pogoršanja stanja prekidača jesu njegova starost, zatim, broj izvršenih operacija pri normalnom opterećenju i pri kvaru, radni uslovi kao što su temperatura i zagađenje okoline. Da bi se modelirao proces starenja, potrebno je prethodno izvršiti analizu erozije kontakata i performanse gašenja luka.

Skoro svaka radna okolina sadrži gasove koji reaguju sa materijalom kontakata, kao što su O_2 , SO_2 , H_2O , H_2S , itd. koji su pogodni za stvaranje sloja oksida, iako je kontakt zatvoren. Vremenom gas će uspeli da se probije do površine kontakta i reakcija će pogoršavati karakteristike kontakta i povećati njegovu otpornost [69].

Tanak sloj oksida koji prekriva oblast jednog mikrokontakta neće imati velikog uticaja na provodnost kontakta kao celine. Međutim, u slučaju kada sloj oksida pokrije veliki broj mikrokontakata, smanjiće se oblast koja provodi električnu struju povećavajući otpornost kontakta. Povećana otpornost će povećati i temperaturu što može dovesti i do potpunog uništenja kontakta [69].

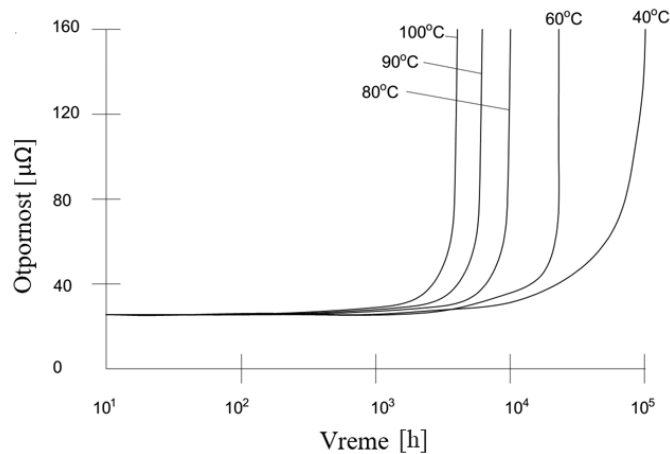
Slika 3.13, koja je primenljiva za kontakte od bakra koji su izolovani uljem [70], prikazuje porast otpornosti kontaktnog spoja sa vremenom. Kao što se može uočiti, promena

otpornosti nije značajna sve do jednog trenutka u vremenu nakon kog pogoršanje stanja kontakata počinje naglo da raste [71].



Slika 3.13 Promena otpornosti kontaktnog spoja sa vremenom za različite vrednosti opterećenja [68]

Sledeći tip pogoršanja stanja kontakata prekidača je habanje, koje predstavlja vrstu ubrzane oksidacije, kada površine kontakata dožive ciklično pomeranje [69]. Na primer, kontakt se neće zatvoriti na istom mestu kao prethodni put. Otpornost će se naglo povećati odmah nakon pojave promena (slika 3.14).



Slika 3.14 Povećanje otpornosti kontaktnog spoja usled habanja [69]

Stvarni kontakt između dve površine se uspostavlja između velikog broja mikro kontakata neravnomerno raspoređenih unutar njegove vidljive površine. Stvarni kontakt je praktično zbir površina svih mikro kontakata koji čine efektivnu površinu kontakta. Otpornost

električnog kontakta je obrnuto proporcionalna njegovoj površini. Kada struja I protiče kroz površinu A koja ima otpornost R [Ω], energija E [J] apsorbirana površinom A je [69]:

$$E = R \cdot I^2 \cdot t, \quad (3.1)$$

gde je t [s] vremensko trajanje proticanja struje I [A]. Temperatura T [$^{\circ}\text{C}$] površine je direktno povezana sa energijom sledećom jednačinom [69]:

$$E = \varphi \cdot T, \quad (3.2)$$

pri čemu je φ funkcija brzine rasipanja toplote [$\text{J}/^{\circ}\text{C}$].

Za konstantnu struju, ako se R poveća, povećaće se i E , što će dovesti do povećanja i temperature kontakta. Ako temperatura nastavi da raste materijal kontakta može dostići tačku topljenja, što će dovesti do njegovog uništenja. Glavne pojave koje utiču na otpornost kontakta su oksidacija, habanje kontakta i zagrevanje. Prilikom povećanja temperature kontakta T , materijal kontakta može da omekša do tačke pri kojoj će se smanjiti njegova snaga, što će dovesti do brzog povećanja njegove otpornosti [69].

Kako površina metala nije idealno čista, na protok električne struje može uticati tanak sloj oksida, sulfida, i drugih vrsta slojeva koji se najčešće nalaze na metalnim površinama. Kao posledica, ukupna otpornost kontakta (R_c) predstavlja zbir otpornosti čisto metalnog kontakta (R_s) i otpornosti sloja (R_f) [68]:

$$R_c = R_s + R_f, \quad (3.3)$$

$$R_f = \frac{\sigma}{\pi \cdot a^2}, \quad (3.4)$$

gde je:

$\pi \approx 3,14$,

a – poluprečnik metalne kontaktne površine [m^2],

σ - otpornost po jedinici površine sloja [Ωm^2].

Postoji više parametara koji se mogu iskoristiti za procenu radne efikasnosti električnih kontakata. Ti parametri mogu biti: električni (tranzijentni pad napona, otpornost erozije kontakata), tribološki (otpornost habanja i koeficijent trenja) i hemijski (otpornost korozije) [68].

Zbog neravnina površinskih slojeva kontakata, kada struja protiče kroz provodne delove, temperatura na mestu spoja T_c [K] može postati viša od temperature kontakata kao celina T_b .

Otpornost sužene površine R_c (otpornost na koju utiču neravnine) u odnosu na otpornost koja bi postojala u slučaju idealnih kontakata $R_c(0)$, može se napisati kao [68]:

$$R_c = R_c(0) \left[1 + \frac{2}{3} \alpha (T_c - T_b) \right], \quad (3.5)$$

gde je α temperaturni koeficijent otpornosti sužene površine [1/K].

Izraz $(T_c - T_b)$ je povezan sa padom napona kontakta U [V] na sledeći način:

$$T_c^2 - T_b^2 = \frac{U^2}{4 \cdot L}, \quad (3.6)$$

gde je L Wiedemann-Franz-Lorenz broj, čija je vrednost $2.45 \cdot 10^{-8}$ (V/K)².

Slična zavisnost je predstavljena i u [72], gde je zavisnost pada napona između kontakata od njihove temperature data sledećom formulom:

$$\theta = \frac{V_c^2}{8 \cdot \lambda \cdot \rho}, \quad (3.7)$$

gde je:

θ – temperatura [°C],

λ – koeficijent provođenja toplote [W/m°C],

ρ – električna otpornost kontaktnog materijala [Ω m],

V_c – pad napona između kontakta [V].

Jasno je da čak i najmanje povećanje pada napona između kontakata (formula (3.6)) može značajno povećati temperaturnu razliku, koja će biti dovoljna da proizvede metalurške promene, kao što su omekšavanje ili čak topljenje provodne površine. Ova pojava može imati uticaja u nekim slučajevima kontakata sa malim prečnikom i malom provodnom površinom, ali je manje verovatno da će imati praktičan značaj u slučaju kontakata kod kojih su sile pritiska velike, a samim tim i veliki poluprečnik dodira kontakata.

Kada je uspostavljen dobar kontakt, temperatura spoja je nešto viša od temperature celog kontakta, ali pri loše uspostavljenom kontaktu, temperaturna razlika povećava temperaturu celog kontakta i ubrzava pogoršanje površine, uzrokujući veću otpornost. Pogoršanje se kumulativno povećava što u krajnjoj meri dovodi do potpunog otkaza kontakta. U pojedinim slučajevima, kao što je kratak spoj, topljenje zone kontakta se može desiti čak i dobro dizajniranom spoju stvarajući mostove topljenog metala.

Jedan od najvažnijih zahteva za rad dobrog kontakta je da stvarna provodna površina bude dovoljno velika tako da i pored trenutnih ili trajnih pogoršanja, rezervne površine kontakata budu dovoljne da spreče velika pregrevanja.

Pogoršanje stanja kontakta se dešava usporeno na nivou koji definiše priroda različitih procesa koji se dešavaju u zoni kontakata i u okolini. Ova početna faza traje dugo bez izazivanja ikakvih vidljivih promena jer je to unutrašnje svojstvo grupe provodnih površina gde njihova sužena otpornost nije osetljiva na male promene. Pogoršanje neće biti primećeno sve dok ne dođe do poslednje faze životnog veka prekidača [68].

Česte operacije uključanja/isključanja mogu izmeniti prekidna svojstva, uslove u prostoru između kontakata i dielektričnu čvrstoću unutrašnje izolacije. Pored toga, može se očekivati pojava habanja kontakata i zidova komore [73].

Pogoršanje performansi gašenja električnog luka koje se ogleda u dužem vremenu trajanja luka, dešava se čestim prekidima struje nominalnog opterećenja i struje kratkog spoja. Glavni uzrok ove pojave je poremećaj izolacionih karakteristika ulja koje sakuplja čestice nakon raspada i čestice koje se odvajaju sa kontakata [73].

Vreme trajanja luka zavisi od mnogih faktora, uključujući naponski nivo opreme, tip komore za gašenje luka, itd. Da bi se smanjilo vreme trajanja luka tokom operacije isključenja i samim tim erozija kontakata i razgradnja ulja, brzina pokretnih kontakata bi trebalo da bude u okviru vrednosti datih u tabeli 3.3 [73].

Tabela 3.3 Brzine isključenja (otvaranja kontakata) za različite naponske nivoe

Naponski nivo prekidača	Brzina isključenja prekidača [m/s]
11 kV	2-3
33 kV	4-5
132 kV	7-10

Habanje i zatvoren kontakt podvrgnut oksidaciji imaju isti uticaj na proces pogoršanja otpornosti kontakata. U slučaju oksidacije promenljiva veličina je vreme, a u slučaju habanja to je broj ciklusa habanja. Nakon porasta sloja oksida ili pojave ostataka habanja u zoni kontakta neminovno dolazi do opadanja kvaliteta kontakta. U slučaju zatvorenog kontakta, rast oksida na površini je dominantan mehanizam [68].

4 RIZIK

Definicije pojmova [74, 75]:

Rizik se najčešće opisuje pomoću izvora rizika, potencijalnih ishoda sa njihovim posledicama i verovatnoće pojave.

Događaj ili ishod je pojava ili promena određenog skupa okolnosti. Događaj može imati više ishoda kao i više uzroka i posledica.

Posledica je rezultat događaja koji ima uticaj na posmatrani objekat.

Verovatnoća je šansa da se određeni događaj pojavi.

Određivanje rizika je sastavni deo procesa upravljanja rizikom i predstavlja važan korak pre pristupanja obradi rizika. Procena rizika u EES se uspešno koristi u više oblasti, uključujući upravljanje imovinom i planiranje održavanja kao najkritičnije procese u smislu nivoa investicija, tako što se odgovara na sledeća pitanja [73]:

- Šta može da se dogodi i zašto?
- Koje su posledice?
- Koja je verovatnoća njihovog ponovnog dešavanja u budućnosti?
- Da li postoji faktor koji će ublažiti posledice rizika ili umanjiti njegovu verovatnoću?

U EES, rizik se obično povezuje sa proračunom pouzdanosti, pod pretpostavkom da rizik i pouzdanost imaju identične posledice [76]. Zbog svog značaja koncept rizika se postepeno uvodio i u drugim oblastima kao što su: upravljanje imovinom i planiranje održavanja [77, 78, 79, 80], naponske sigurnosti [81], itd.

Razumevanje rizika i upravljanje rizikom su ključni u pristupu upravljanja sredstvima u jednoj kompaniji. Do sada se najviše pažnje u postupku upravljanja rizikom posvećivalo aspektu pouzdanosti, međutim danas su sve aktuelniji ostali rizici, kao što su: bezbednost, zaštita životne sredine i reputacija kompanije. Različite kategorije posledica u upravljanju sredstvima DEES mogu biti [82]:

- ekonomski rizik – povezan potencijalnim gubitkom novca, usled većih troškova od planiranih, ili usled smanjenog prihoda,
- bezbednosni rizik – vezan za bezbednost osoblja koje upravlja sistemom, ali i trećih lica koja dobijaju pristup elektroenergetskim objektima,

- rizik životne sredine – odnosi se na potencijalna zagađenja sredine (ulje, SF6 gas...), ali takođe pokriva i električna i magnetna polja koja se javljaju u radu pojedinih komponenata sistema,
- rizik kvaliteta snabdevanja – danas se sve veća pažnja posvećuje kvalitetu snabdevanja električnom energijom, u nekim slučajevima kompanije plaćaju penale usled nepoštovanja ugovora o isporuci električne energije,
- rizik reputacije – u potpunosti zavisi od ostalih navedenih rizika,
- rizik usled osetljivosti (ranjivosti) sistema – ranjivost EES može uticati na čitavo društvo kada se uzme u obzir njegov značaj. Ranjivost sistema predstavlja njegovu karakteristiku da usled pojave neželjenog događaja ograniči posledice, oporavi se i stabilizuje,
- rizik regulative – kako elektroenergetske kompanije imaju monopol one su samim tim podvrgnute rigoroznoj regulativi od strane državnih službi. Promena regulatorne politike usled, npr. promene političke klime, može imati velike posledice po kompaniju.

Iz prethodno navedenih razloga jasno je da je menadžment jednog DEES [82] prinuđen na balansiranje između troškova, performansi sistema i rizika, uzimajući u obzir druge aspekte kao što su ekonomija poslovanja, kvalitet snabdevanja, bezbednost i uticaj na životnu sredinu. U procesu donošenja odluka navedeni aspekti često mogu biti međusobno suprotstavljeni.

Kako pojedini faktori koji se koriste pri proceni rizika mogu tokom vremena značajno menjati svoje vrednosti (što direktno utiče na rizik) potrebno je sprovoditi dinamičku analizu rizika, koja predstavlja kontinualni proces identifikacije, procene rizika i preduzimanja akcija za njegovo smanjenje u situacijama gde se dešava veliki broj promena događaja [83, 84].

Rastući razvoj EES i usavršavanje dizajna opreme i informacionih tehnologija takođe uzrokuje i teškoće u analizi pouzdanosti sistema. Najveći izazov u toku analize složenog sistema su nekompletni podaci iz njegove eksploatacije. To sprečava raščlanjivanje pouzdanosti sistema kao celine na pouzdanost podsistema i pouzdanost komponenata [85]. Kako se EES sve više razvija i postaje složeniji, tako se povećava i rizik u sistemu. Rizik u EES se proučava poslednjih 50 godina. Zbog složenosti problema može se izvršiti sledeća podela rizika [86]:

- prema hijerarhiji: rizik na nivou komponente i rizik na nivou sistema,
- prema kategoriji: rizik u proizvodnji, prenosu ili distribuciji,
- prema modelu: deterministički i stohastički model,

- prema statusu EES: statički, dinamički i tranzijentni,
- prema vremenu: kratkoročna i dugoročna procena rizika.

Zbog svoje važnosti i potrebe da oblast obrade rizika bude sistematično uređena 2009. godine je objavljen standard ISO 31000 [74]. Navedeni standard pripada familiji standarda koji se odnose na upravljanje rizikom i predstavlja principe i smernice po kojima se vrši upravljanje rizikom.

Trenutno se porodica ISO 31000 standarda sastoji od:

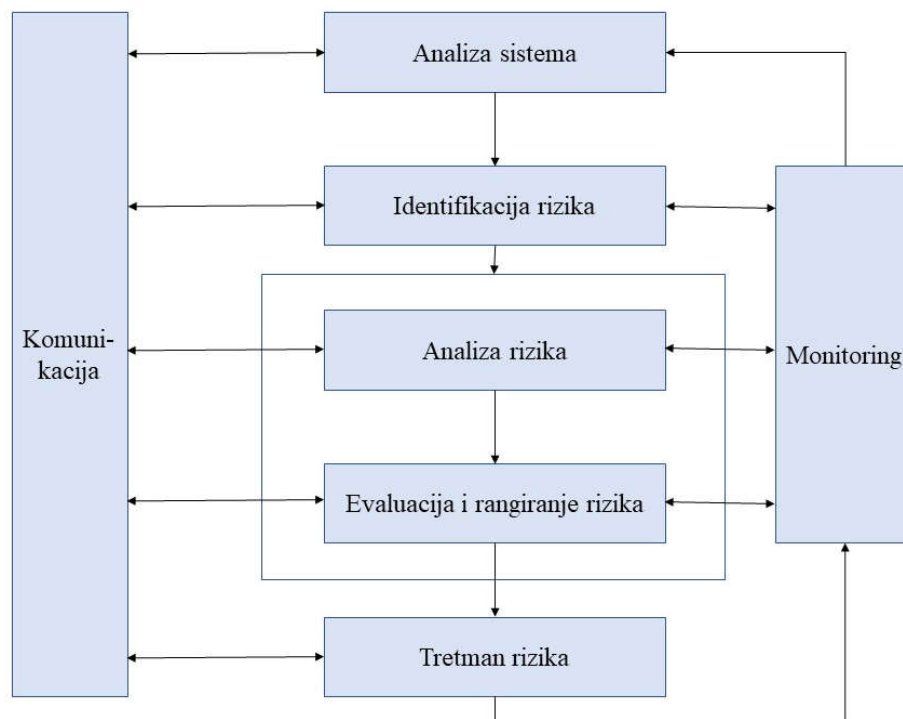
- ISO 31000:2018 - Principi i smernice za primenu [74],
- ISO/IEC 31010:2009 – Tehnike procene rizika [87],
- ISO uputstvo 73:2009 – Rečnik procesa procene rizika [88].

Navedeni standardi se međusobno dopunjuju i kreirani su tako da pruže jasan i univerzalan skup smernica za upravljanje rizikom. Standard ISO 31000 teži da pojednostavi upravljanje rizikom uvođenjem grupe jasnih, razumljivih i primenljivih smernica koje se mogu direktno iskoristiti bez obzira na proces čiji se rizik procenjuje.

Aktivnosti koje ISO 31000 podrazumeva prilikom upravljanja rizikom su [74]:

1. izbegavanje rizika donošenjem odluke o početku ili prestanku aktivnosti koja ima najveći uticaj na rizik,
2. prihvatanje ili povećanje rizika da bi se ostvario određeni cilj,
3. otklanjanje uzroka rizika,
4. promena verovatnoće nastanka rizika,
5. promena posledica rizika,
6. podela rizika sa ostalim učesnicima.

Dva važna bloka upravljanja rizikom prema ISO 31000 su: procena rizika i tretman rizika (slika 4.1).



Slika 4.1 Proces primene standarda ISO 31000 [74]

Definicija kriterijuma rizika

Kriterijumi po kojima se procenjuje rizik određuju se na početku procesa procene rizika, ali kako su oni dinamički i podložni promeni, potrebna je njihova stalna provera ili dopuna. Kriterijumi procene rizika se određuju na osnovu sledećih pokazatelja [74]:

- priroda i tip neizvesnosti koji mogu uticati na ishod,
- kako će se posledice (pozitivne ili negativne) i verovatnoća definisati i odrediti,
- faktori koji zavise od vremena,
- doslednost u načinu izvođenja merenja,
- kako se određuje nivo rizika,
- kako će se uzimati u obzir kombinacija više rizika,
- kapacitet organizacije koja sprovodi procenu rizika.

Procena rizika

Procena rizika je sveukupni proces identifikacije rizika, analize i evaluacije rizika [74]. Za procenu rizika ne postoji jedan standardan pristup. Na primer, u [89] je navedeno 62 moguća pristupa proceni rizika. Koji pristup će biti korišćen zavisi od mnogih faktora koji uključuju složenost problema, količinu i tip dostupnih podataka, vremenske rokove itd. Neki od pristupa

koji se koriste za procenu rizika su: stablo kvara (eng. fault tree) [90], stablo događaja (eng. event tree), stablo analize odluka (eng. decision tree analysis), analiza vrste kvara, efekata i posledica (FMECA), Markovljevi procesi i Bajesove mreže (eng. Bayesian network) [91].

Procena rizika se sastoji od [74]:

- **Identifikacije rizika**

Svrha identifikacije rizika je pronalaženje, prepoznavanje i opisivanje rizika koji mogu pomoći organizaciji koja se sprovodi da se postigne određeni cilj;

- **Analize rizika**

Analizom rizika potrebno je razumeti njegovu prirodu i njegove karakteristike. Analiza uključuje detaljno opisivanje nesigurnosti koje se mogu pojaviti u sistemu, izvore rizika, posledice, verovatnoće, različite ishode, kontrolu i njenu efektivnost u primeni;

- **Evaluacije rizika**

Cilj evaluacije rizika je da ona pruži podršku odlukama koje se donose. Evaluacija uključuje poređenje rezultata analize rizika sa ustanovljenim kriterijumima kako bi se odlučilo gde su potrebne dodatne akcije. Neke od mogućih akcija su:

- ne preduzimati nikakve radnje,
- uzeti u obzir moguće tretmane rizika,
- sprovesti dodatnu analizu da bi se bolje shvatio rizik,
- održavati postojeće kontrole,
- preispitati ciljeve;

Tretmana rizika

Tretman ili odgovor na rizik, predstavlja akciju koja se preduzima kao odgovor na identifikaciju, analizu i evaluaciju rizika. Svrha tretmana rizika je izbor i implementacija metode za njegovo smanjenje. Tretman rizika obuhvata sledeći iterativni proces:

- Formulaciju i izbor načina tretmana rizika,
- Planiranje i implementaciju tretmana,
- Procenu efektivnosti odabranog tretmana,
- Donošenje odluke o tome da li je preostao rizik prihvatljiv,
- Ako nije prihvatljiv, primeniti dodatni tretman rizika.

Odabir najbolje varijante tretmana rizika zahteva balansiranje između moguće dobiti u odnosu na troškove. Sa druge strane, tretman rizika, čak iako je pažljivo osmišljen i sproveden, možda neće pružiti zadovoljavajuće rezultate ili se čak mogu dobiti neželjene posledice. Monitoring i analiza su zato važni kao deo procesa implementacije tretmana rizika, kako bi pružili sigurnost da će odabrani pristup biti i efektivan u primeni.

4.1 NAČIN PRORAČUNA RIZIKA

U IEEE rečniku rizik je definisan kao proizvod verovatnoće pojave nekog događaja i njegovih posledica [92]. U pogledu rada EES prihvata se definicija da je rizik proizvod „verovatnoće događaja i očekivanih gubitaka“ [93]:

$$R_i = p_i \cdot C_i, \quad (4.1)$$

gde je:

R_i – rizik,

p_i – verovatnoća pojave događaja i u datom vremenskom intervalu [1/god],

C_i – posledica događaja [€].

Pored toga, proračun rizika može da obuhvati i druge faktore, kao što su težinski faktori (w_i) koji opisuju važnost objekta čiji se rizik proračunava [90]:

$$R_i = p_i \cdot C_i \cdot w_i. \quad (4.2)$$

Posledice otkaza mogu biti predstavljene brojem kupaca koji su ostali bez električne energije, količinom neisporučene energije ili novčanim gubicima.

Rizik se može umanjiti:

- smanjenjem posledica - troškovi se ograničavaju pravovremenim reagovanjem na kvar. Ova strategija dozvoljava da se kvar pojavi, a zatim se vrši upravljanje problemom kako bi se potrošilo najmanje novca, vremena i truda. Kompanije koje koriste strategiju smanjenja posledica smanjuju gubitke učenjem na iskustvu kako rešiti problem, primenom prediktivnog održavanja, pokušavajući da otkriju kvarove tokom njihovog začeća,
- smanjenjem intenziteta dešavanja kvara – gde se smanjenje rizika vrši smanjenjem verovatnoće pojave kvara. Ovakva strategija je fokusirana na pronalaženje uzroka kvara i preduzimanje akcija na njegovom otklanjanju.

Međutim, u ovoj strategiji je potrebno povećati novčana sredstva, vreme i trud za smanjenje rizika.

4.2 ODRŽAVANJE ZASNOVANO NA RIZIKU

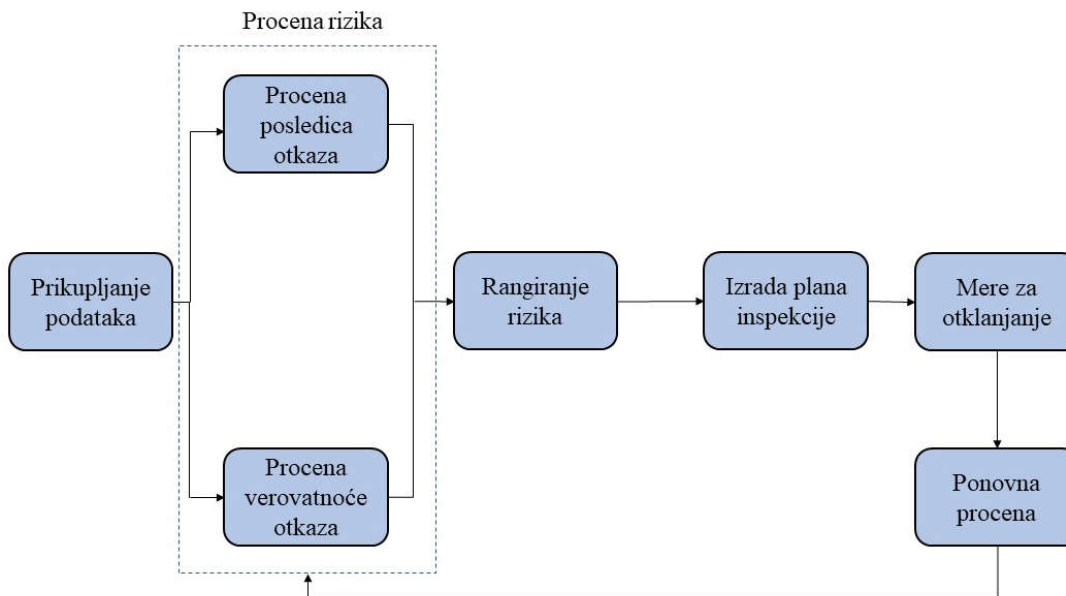
Održavanje zasnovano na riziku (RBM) utvrđuje najekonomičniji pristup za raspoređivanje sredstava kako bi se sistem popravio ili umanjio rizik u sistemu. Na osnovu navedenog, održavanje zasnovano na riziku teži da raspodeli sredstva najviše na delove sistema koji nose najveći rizik ukoliko otkazu sa radom [94].

Procena se sprovodi na sledeći način [94]:

1. prikupljanje podataka o sistemu i uređajima,
2. procena rizika otkaza,
 - Kolika je verovatnoća otkaza?
 - Koliko često se dešava?
 - Šta je uzrok?
3. procena posledica otkaza,
4. rangiranje mogućih rizika i posledica,
 - Koji deo sistema je najviše pogođen otkazom?
 - Koji deo sistema ima najmanji uticaj na otkaz?
5. izrada planova,
 - definicija vremenskih okvira za sprovođenje inspekcija,
 - izrada planova za ublažavanje rizika,
6. redovno ponavljanje celog postupka.

Održavanje zasnovano na riziku daje prioritet sredstvima održavanja kao delovima sistema koji stvaraju najveći rizik ukoliko otkazu. Ovo održavanje predstavlja pristup za utvrđivanje najekonomičnije varijante upotrebe sredstava namenjenih održavanju [94].

Način održavanja i vremenski period kada će se sprovoditi zavise u potpunosti od procenjenog rizika. Kao rezultat primene održavanja zasnovanog na riziku dobija se sistem kod koga je rizik od otkaza minimiziran na najekonomičniji način. Na slici 4.2 je prikazan algoritam po kome se sprovodi održavanje zasnovano na riziku.



Slika 4.2 Blok dijagram održavanja zasnovanog na riziku [95]

Prikupljanje podataka

Podatke je potrebno prikupiti za svaki identifikovan izvor rizika. Podaci obuhvataju moguće posledice i metode za predviđanje pojave rizika i njegovo otklanjanje.

Evaluacija rizika

U ovom koraku se analizira verovatnoća pojave rizika kao i posledice koje iz njega proističu.

Rangiranje rizika

Nakon završene evaluacije rizika, uz pomoć verovatnoće i posledica utvrđuje se ukupan rizik, a nakon toga se vrši njegovo rangiranje u odnosu na unapred utvrđeni nivo rizika i procenjuje da li je stvarni rizik prihvatljiv ili nije.

5 ANALIZA ŽIVOTNOG VEKA UREĐAJA

5.1 POKAZATELJI POUZDANOSTI I ŽIVOTNI VEK UREĐAJA

Pouzdanost $R(t)$ (tj. neotkazivost [96]) je dinamički pokazatelj sistema i predstavlja verovatnoću da će sistem u trenutku posmatranja biti ispravan. Pouzdanost se može predstaviti sledećom formulom [97]:

$$R(t) = P\{T > t\}, \quad (5.1)$$

gde je:

T – vreme trajanja ispravnog rada sistema,

t – vreme koje je proteklo od početka rada sistema do trenutka posmatranja.

Nepouzdanost sistema $F(t)$ (tj. otkazivost, $Q(t)$ po [96]) je verovatnoća da će sistem u trenutku posmatranja biti u kvaru [97], uzimajući u obzir pretpostavku da se kvar može dogoditi bilo kada do tog trenutka. Nepouzdanost se može predstaviti sledećom formulom:

$$F(t) = P\{T \leq t\}. \quad (5.2)$$

Između pouzdanosti i nepouzdanosti važi relacija:

$$R(t) + F(t) = 1. \quad (5.3)$$

Gustina raspodele verovatnoće slučajne promenljive T , predstavlja verovatnoću otkaza u jedinici vremena [97] i jednaka je:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}. \quad (5.4)$$

Značajna veličina za analizu pouzdanosti je i intenzitet otkaza $\lambda(t)$ koji je definisan sledećom jednačinom:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}. \quad (5.5)$$

Za praktične procene često se upotrebljava srednje vreme trajanja ispravnog rada (MTTF, eng. mean time to failure), koje se određuje na sledeći način:

$$m = \int_0^{\infty} R(t) dt. \quad (5.6)$$

U slučaju kada je potrebno odrediti verovatnoću otkaza u nekom budućem trenutku $t=x$, potrebno je sprovesti sledeći proračun, određivanjem funkcije opstanka uređaja $\bar{F}(t)$ [98]:

$$\bar{F}(t) = 1 - F(t) = P[T > t]. \quad (5.7)$$

Neka je analizirani uređaj sa životnim vekom T i verovatnoćom raspodele otkaza $F(t)$ čija je eksploatacija započela u trenutku $t = 0$ i koji je ispravan do trenutka $t = x$. Ako je njegova promenljiva preostalog životnog veka T_x , onda se verovatnoća otkaza $F_x(t)$ određuje kao uslovna verovatnoća na sledeći način [98]:

$$F_x(t) = P[T_x \leq t] = \frac{P[x < T \leq x + t]}{P[T > x]} = \frac{F(x + t) - F(x)}{\bar{F}(x)}. \quad (5.8)$$

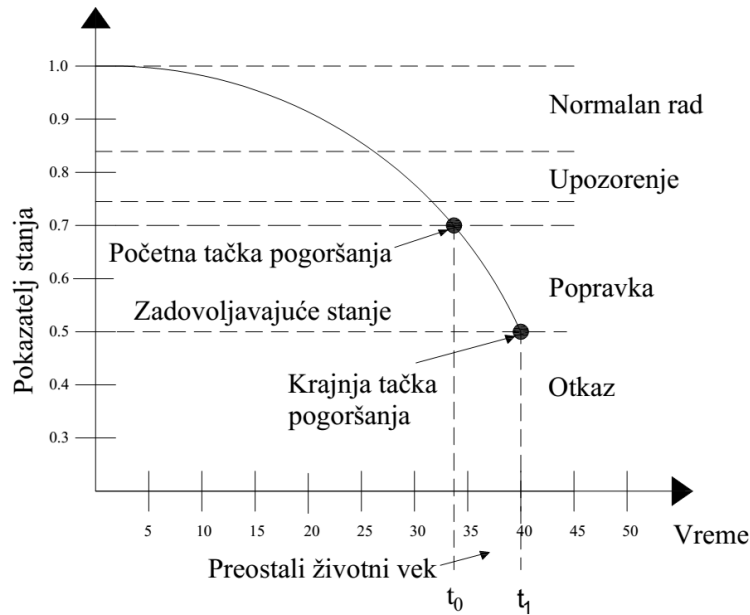
Odgovarajuća uslovna verovatnoća opstanka (eng. conditional survival probability) uređaja je:

$$\bar{F}_x(t) = P[T_x > t] = \frac{\bar{F}(x + t)}{\bar{F}(x)}. \quad (5.9)$$

Verovatnoća ispravnosti uređaja i srednje preostalo vreme njegove eksploatacije u trenutku t mogu se odrediti iz parametarske ili neparametarske raspodele, što ceo proračun čini fleksibilnim za upotrebu sa realno dostupnim podacima.

Tokom svog rada uređaj prolazi kroz nekoliko faza (ispravan rad, manji kvarovi...) sve do trenutka kada se dogodi njegov otkaz. Iz tog razloga se definiše preostali životni vek uređaja kao vreme za koje on još uvek može izvršavati svoju funkciju sve dok se ne dogodi otkaz. Druga definicija je, da je to vreme od sadašnjeg trenutka do trenutka kada nastupa kraj korisnog životnog veka komponente [6].

Uređaj tokom eksploatacije prolazi kroz više stanja (slika 5.1). Iz stanja normalnog rada prelazi se u stanje u kome se javljaju znaci pogoršanje kvaliteta rada, gde je potrebno izvršiti preventivno održavanje i kontrolu. Ukoliko se to ne izvrši dolazi se u tačku početka pogoršanja stanja i na kraju u krajnju tačku kada već nastupa otkaz. U tom intervalu je još uvek moguće izvršiti popravku uređaja. Rastojanje između ovih tačaka na x osi predstavlja preostali životni vek uređaja – RUL.



Slika 5.1 Karakteristika preostalog životnog veka [6]

U opštem slučaju, proizvođač daje procenjeni životni vek opreme, koji je baziran na teorijskim proračunima i određenim pretpostavkama. Takva procena često nije adekvatna jer ne uzima u obzir stvarne radne uslove i uslove radne sredine, kao i njihov uticaj na opremu [57].

Proračun očekivanog preostalog životnog veka generalno obuhvata obradu sledećih aktivnosti:

- Definiciju delova koji mogu ograničiti nesmetanu eksploataciju komponente,
- Mehanizme oštećenja koji će uzrokovati kvar komponente,
- Tehnike inspekcije koje će ustanoviti i locirati oštećenje i njegove razmere,
- Matematički model opreme, koji će pomoću istorije eksploatacije i trenutnog stanja izračunati preostali životni vek.

U EES postoje tri koncepta životnog veka opreme [57]:

- Fizički životni vek: Uređaj započinje svoj rad od novog stanja do trenutka kada više ne može normalno obavljati svoju funkciju i mora biti otklonjen. Fizički životni vek može biti produžen preventivnim održavanjem.
- Tehnički životni vek: Deo uređaja može biti zamenjen iz tehničkih razloga ali se sam uređaj može i dalje fizički upotrebljavati. Na primer, razvojem novih tehnologija, ne proizvode se rezervni delovi za zastarelu opremu i njihova nabavka može biti skupa.

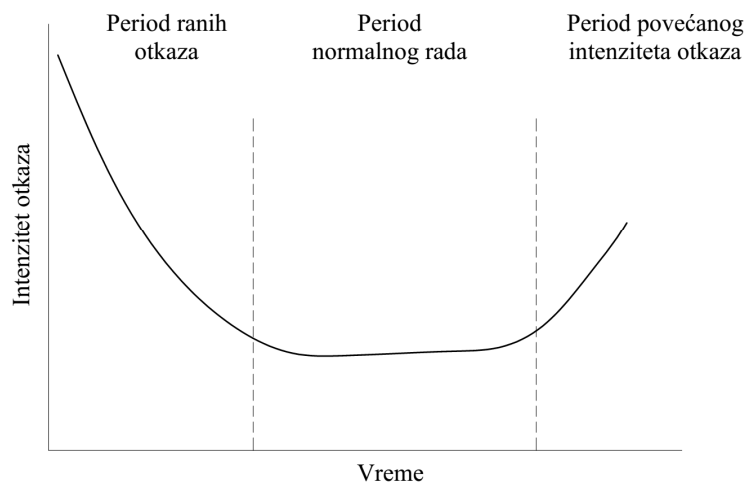
- Ekonomski životni vek: Oprema više nije ekonomski vredna, iako fizički može biti upotrebljiva.

Starost, životni vek i optimalni radni ciklus su uslovljeni brojnim faktorima, kao što su proces proizvodnje, radni uslovi, procedura održavanja i bezbednosni uslovi. Uobičajena karakteristika očekivanog životnog veka se može prikazati poznatom karakteristikom „kade“ (slika 5.2). Sa karakteristike se vidi da na početku eksploatacije postoji povećan rizik pojave kvara zbog grešaka u proizvodnji ili grešaka u montaži (period ranih otkaza). Nakon toga, verovatnoća pojave kvara je relativno mala i nivo kvarova je konstantan. Ovaj period predstavlja normalnu eksploataciju, kada se kvarovi pojavljuju nasumično. U toku treće faze životnog veka verovatnoća pojave kvarova se povećava usled habanja opreme tj. zbog starosti delova [29], što predstavlja period povećanog intenziteta otkaza.

Posledice starenja uređaja su [99]:

- Povećana verovatnoća nastanka kvara,
- Povećanje troškova održavanja,
- Teško pronalaženje rezervnih delova,
- Oprema može postati tehnološki zastarela.

Kada su u pitanju kontakti, otkaz se generalno definiše kao trenutak tokom kog spoj više nije u mogućnosti da izvršava funkciju za koju je predviđen. Drugim rečima, to je stanje pri kom temperatura spoja, pri nominalnom opterećenju, raste značajno iznad dozvoljene vrednosti [68].



Slika 5.2 Verovatnoća otkaza (karakteristika „kade“) [100]

5.2 RASPODELE ŽIVOTNOG VEKA

Funkcija opstanka (ili funkcija pouzdanosti) je funkcija koja pokazuje verovatnoću da će posmatrani uređaj biti ispravan nakon određenog vremenskog intervala [101].

Tokom analize pouzdanosti upotrebljavaju se matematičke raspodele, kao što su: Weibulova, eksponencijalna, normalna, logaritamska-normalna itd. Ove raspodele su definisane svojim parametrima, pa se iz tog razloga još nazivaju i parametarskim raspedelama.

5.2.1 EKSPONENCIJALNA RASPODELA

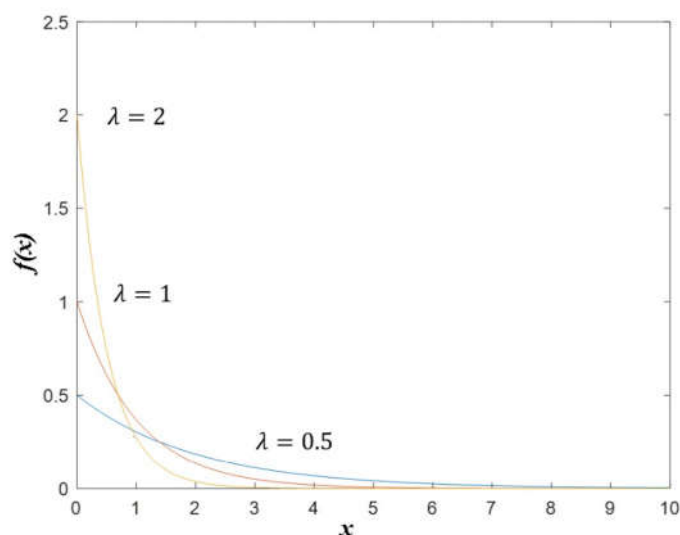
Eksponencijalna raspodela se najčešće upotrebljava u analizi pouzdanosti koja podrazumeva određivanje vremena životnog veka uređaja. Kumulativna funkcija raspodele (CDF, eng. cumulative distribution function) je definisana sledećom relacijom [97]:

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x}, x \geq 0, \quad (5.10)$$

gde je λ – parametar skaliranja.

Gustina raspodele verovatnoće je [102] (slika 5.3):

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}, x \geq 0. \quad (5.11)$$



Slika 5.3 Eksponencijalna raspodela za različite vrednosti parametra skaliranja

Pomoću eksponencijalne raspodele može se opisati vreme ispravnog stanja uređaja ili njegovih komponenata, naročito elemenata koji su izloženi retkim i iznenadnim kvarovima izazvanim spoljašnjim uticajima [97].

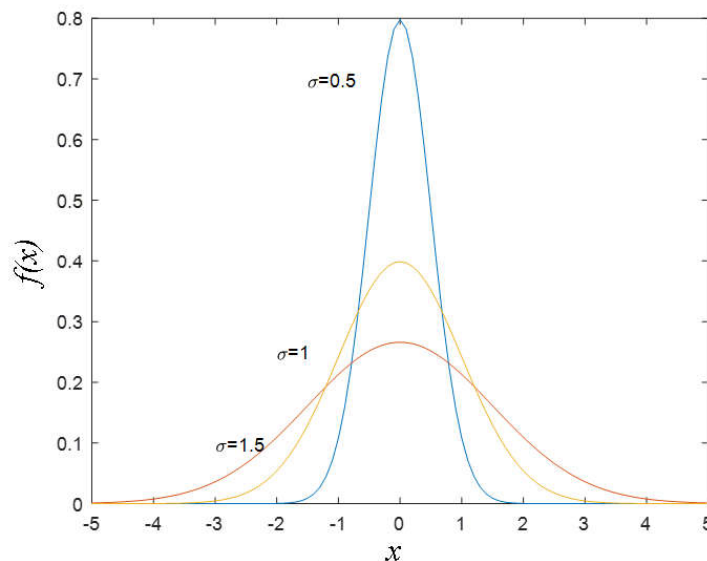
5.2.2 NORMALNA RASPODELA

Normalna (Gausova) raspodela predstavlja raspodelu verovatnoće koja je simetrična po sredini, pokazujući time da su podaci u blizini centra češće dešavaju u odnosu na krajnje tačke. Graf normalne raspodele ima oblik „zvona“ [103].

Normalna raspodela se često upotrebljava i određena je sa dva parametra: parametrom lokacije m i parametrom skaliranja σ [104].

Gustina raspodele verovatnoće je (slika 5.4):

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2} . \quad (5.12)$$



Slika 5.4 Normalna raspodela za tri različite vrednosti parametra skaliranja, pri $m=0$

Parametar lokacije (m) pokazuje jačinu grupisanosti podataka u centru grafa, tj. pokazuje mesto vrha krive normalne raspodele. Parametar skaliranja (σ) pokazuje udaljenost podataka od centra, na grafu to predstavlja širinu krive.

Normalna raspodela se ne može iskoristiti u slučajevima kada je potrebno modelirati vreme boravka uređaja u karakterističnim stanjima. Sa druge strane, raspodela se može iskoristiti za opisivanje slučajne veličine na koje utiče veliki broj različitih činilaca pri čemu

uticaj nijednog nije preovlađujući. Zato se normalna raspodela često koristi za procene mogućih grešaka u predviđanjima vrednosti pojedinih veličina sistema (npr. vršna godišnja opterećenja) [97].

5.2.3 LOGARITAMSKA-NORMALNA RASPODELA

Logaritamska-normalna raspodela se najčešće koristi kod opisivanja kvarova usled zamora materijala i određivanje intenziteta otkaza. U analizi pouzdanosti ova raspodela se koristi prilikom modeliranja vremena do popravke obnovljivog sistema [105]. Iskustvo je pokazalo da se ovom raspodelom može modelirati vreme popravke pojedinih uređaja [97].

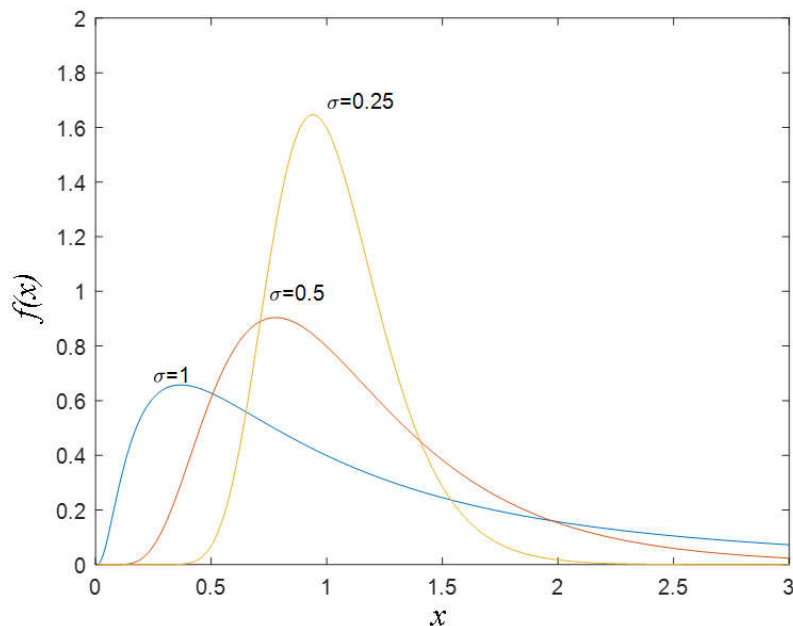
Gustina raspodele verovatnoća ove raspodele je [104] (slika 5.5):

$$f(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x)-m}{\sigma}\right)^2}, 0 < x < \infty, \quad (5.13)$$

gde je:

m – parametar oblika,

σ – parametar skaliranja.



Slika 5.5 Logaritamska-normalna raspodela za tri vrednosti parametra skaliranja

5.2.4 VEJBULOVA RASPODELA

Vejbulova (eng. Weibull) raspodela je formulisana 1951 godine [29] i do danas ona je jedna od najčešće korišćenih raspodela za precizno analiziranje otkaza opreme, prognoze otkaza, starenja i pouzdanosti [40].

Vejbulova funkcija gustine verovatnoće (PDF, eng. probability density function) se može predstaviti sledećom jednačinom [106, 104]:

$$f(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}, \quad (5.14)$$

gde je β parametar oblika, a η parametar razmere.

Vejbulova funkcija raspodele predstavlja verovatnoću otkaza u određenom vremenskom trenutku t , kao u (5.15), dok je funkcija pouzdanosti $R(t)$ predstavljena formulom (5.16):

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}, \quad (5.15)$$

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}. \quad (5.16)$$

Intenzitet otkaza $\lambda(t)$ se definiše kao:

$$\lambda(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}. \quad (5.17)$$

Srednje vreme između otkaza (*MTBF*) se računa pomoću jednačine (5.18):

$$MTBF = \eta \cdot \Gamma\left[1 + \frac{1}{\beta}\right], \quad (5.18)$$

gde je $\Gamma\left[1 + \frac{1}{\beta}\right]$ gama funkcija određena za vrednost $1 + \frac{1}{\beta}$.

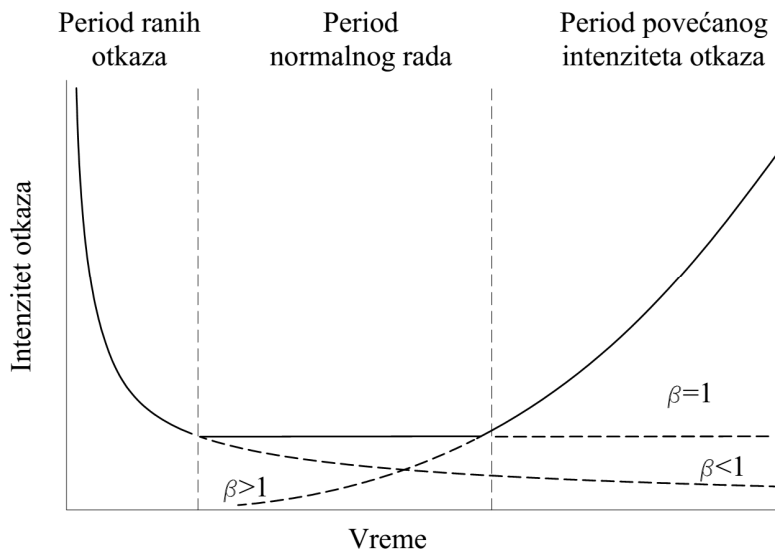
Parametar razmere η pokazuje trenutak u vremenu u kome je 63.2 % analiziranih uređaja otkazalo [107].

Vejbulova raspodela može biti definisana i sa 3 parametra (5.19), gde se treći parametar (γ) naziva parametrom lokacije (ili pozicioni parametar) i određuje položaj krive gustine raspodele na apscisi [31, 97]. Pozitivna vrednost parametra γ definiše period bez kvarova od početnog trenutka do trenutka γ . Parametar može imati i negativnu vrednost, što označava da su se kvarovi desili pre početka testiranja, recimo u toku proizvodnje, transporta ili ugradnje:

$$f(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} . \quad (5.19)$$

Vejbulova funkcija je najčešće korišćena zbog svoje mogućnosti da opiše nekoliko različitih tipova kvarova. Klasična “kriva kade” praktično se sastoji od 3 Vejbulove raspodele, od kojih je svaka povezana sa drugom vrstom kvara (slike 5.2 i 5.6) [7].

U zavisnosti od vrednosti parametra β Vejbulova raspodela obuhvata eksponencijalnu raspodelu (za $\beta = 1$) i Rejljevju raspodelu (eng. Rayleigh) (za $\beta = 2$) [108].



Slika 5.6 Vejbulova raspodela za različite vrednosti β parametra

β je parametar oblika raspodele. Različite vrednosti parametra β daju različite oblike raspodele i imaju sledeća značenja [29]:

$\beta < 1$: Vejbulova raspodela ima oblik hiperbole i označava period „ranog otkaza“, tj. pokazuje da se intenzitet otkaza smanjuje sa vremenom.

Tokom “ranog otkaza”, otkaz se dešava iz sledećih razloga:

- (1) komponenta ne ispunjava potrebne karakteristike,
- (2) loš dizajn ili greške u projektovanju uređaja,
- (3) izostanak kvaliteta u proizvodnji,
- (4) greške tokom instalisanja i puštanja uređaja u rad,
- (6) loš kvalitet napajanja,
- (7) ne poštovanje procedure rada [14].

$\beta=1$: Intenzitet otkaza je konstantan i raspodela je slična eksponencijalnoj raspodeli koja označava period korisnog radnog veka opreme. Nasumični događaj može prouzrokovati kvar. Tokom ovog perioda smatra se da je sistem uhodan i da izvršava zadatu funkciju.

$\beta>1$: Period povećanog broja otkaza usled habanja i starosti opreme, pokazuje da se stopa otkaza povećava sa vremenom. Stari delovi postaju sve češći uzrok nastanka kvarova. Tokom ovog perioda treba doneti odluku da li je potrebno zameniti uređaj novim ili ga remontovati.

5.3 DISKRETNE RASPODELE

Diskretna raspodela je statistička raspodela koja pokazuje verovatnoću ishoda događaja koji se predstavlja kao ceo broj (1, 2, 3...). Najčešće korišćene diskretne raspodele su: Puasonova, binomna, uniformna, Bernulijeva...

5.3.1 BINOMNA RASPODELA

Binomna raspodela predstavlja diskretnu raspodelu verovatnoće određenog broja događaja iz sekvence od n nezavisnih eksperimenata, odnosno to je broj pojave događaja u konačnom broju pokušaja. Svaki događaj predstavlja odgovor na pitanje da li se dogodio uspeh (sa verovatnoćom p) ili neuspeh (sa verovatnoćom $1-p$) [109].

U slučaju jednog pokušaja ($n=1$) binomna raspodela se svodi na Bernulijevu raspodelu. Funkcija verovatnoće binomne raspodele je (slika 5.7):

$$f(x) = \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k}, \quad (5.20)$$

za broj pokušaja $k=1,2,3 \dots n$,

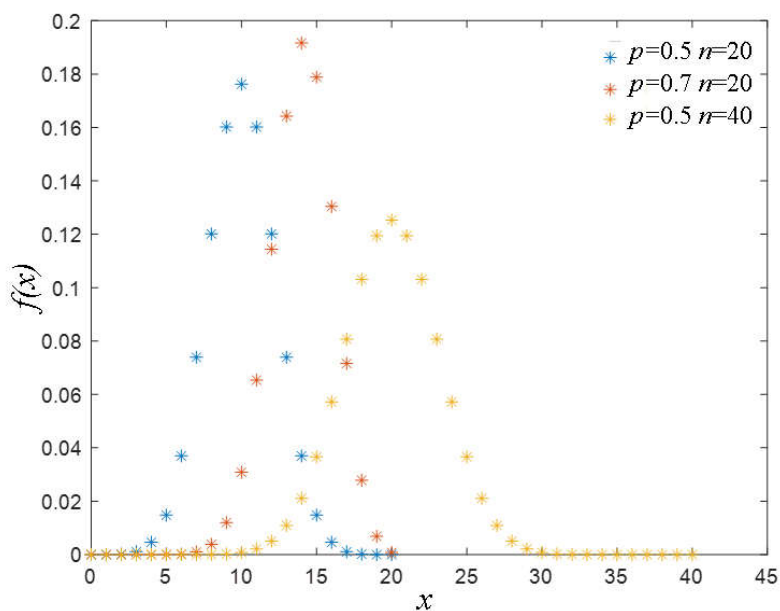
gde se $\binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}$ naziva binomni koeficijent.

Kumulativna funkcija raspodele je:

$$F(x) = \sum_{i=0}^{|k|} \binom{n}{i} p^i (1-p)^{n-i} . \quad (5.21)$$

Binomna raspodela mora ispuniti sledeće kriterijume [110]:

- broj pokušaja ili posmatranja je konačan (moguća su samo dva ishoda),
- svaki pokušaj je nezavisan i ne utiče na pojavu drugog događaja,
- verovatnoća ishoda je ista tokom svakog sledećeg eksperimenta.



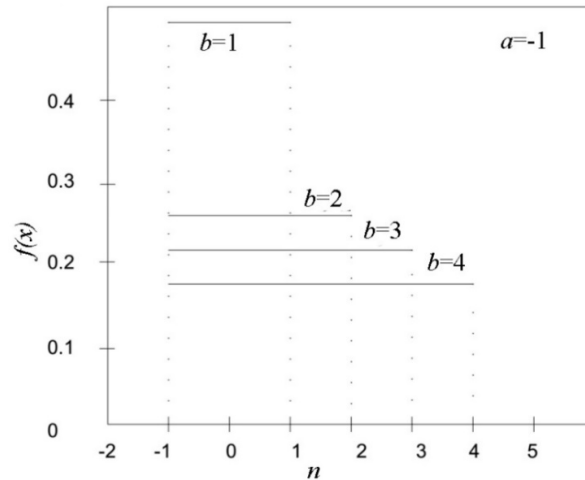
Slika 5.7 Binomna raspodela za različite vrednosti parametara

5.3.2 UNIFORMNA RASPODELA

Uniformna raspodela [104, 111] se upotrebljava u slučajevima kada svaki mogući ishod događaja ima podjednaku verovatnoću. Gustina raspodele verovatnoće uniformne raspodele je (slika 5.8):

$$f(x) = \frac{1}{b - a} , \quad (5.22)$$

gde su a i b parametri lokacije.



Slika 5.8 Uniformna raspodela za različite vrednosti parametra b

5.3.3 BERNULIJEVA RASPODELA

Bernulijeva raspodela je diskretna raspodela verovatnoće koja ima vrednost 1 sa verovatnoćom p ili vrednost 0 sa verovatnoćom $1-p$ ([112]). Praktično, Bernulijeva raspodela ima samo dva ishoda (uspeh ili neuspeh; 1 ili 0). Pomenuta raspodela se izvodi kroz jedan pokušaj nakon čega se analizira verovatnoća [113].

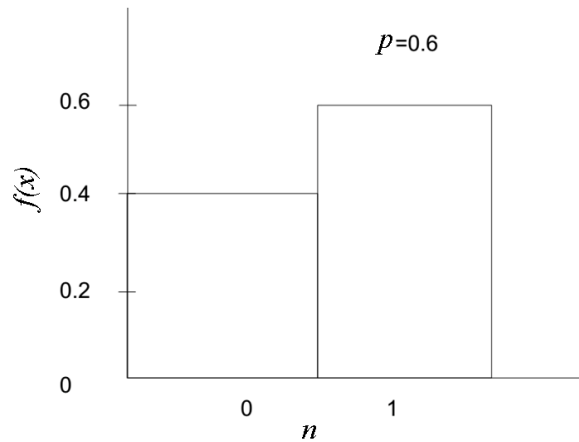
Gustina raspodele verovatnoće je (slika 5.9):

$$f(x) = \begin{cases} p, & \text{za } n = 1 \\ 1 - p & \text{za } n = 0 \end{cases}, \quad (5.23)$$

odnosno

$$f(x) = p^n(1 - p)^{1-n}, \quad (5.24)$$

gde je n – ishod događaja i p – verovatnoća.

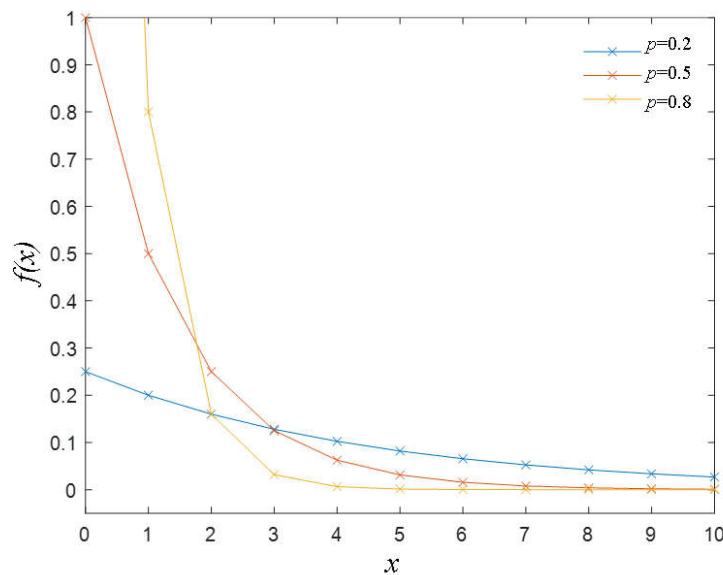


Slika 5.9 Kumulativna funkcija Bernulijeve raspodele

5.3.4 GEOMETRIJSKA RASPODELA

Geometrijska raspodela predstavlja broj neuspeha pre nego što se dogodi uspešan ishod u seriji Bernulijevih testova. Za događaje $x=1,2,3\dots$ i verovatnoću uspeha p geometrijska raspodela ima gustinu raspodele verovatnoće [112] (slika 5.10):

$$f(x) = p(1 - p)^{x-1} . \quad (5.25)$$



Slika 5.10 Geometrijska raspodela za tri različite vrednosti verovatnoće p

Osobine geometrijske raspodele su:

- postoje dva ishoda svakog pokušaja (uspeh ili neuspeh),

- pojave događaja su nezavisne,
- verovatnoća uspeha je ista za svaki događaj.

5.3.5 PUASONOVA RASPODELA

Puasonova raspodela [109] predstavlja diskretnu raspodelu koja koristi cele brojeve kao nasumične promenljive. Ova raspodela je već korišćena u literaturi za predviđanje kvarova komponenata energetskog sistema i planiranje preventivnog održavanja [114].

Puasonova raspodela se koristi ako su ispunjeni sledeći uslovi [115]:

1. događaj se može predstaviti celim brojem,
2. pojavljivanje događaja je međusobno nezavisno, tako da jedan događaj ne povećava niti umanjuje verovatnoću pojave drugog događaja,
3. poznata je prosečna vrednost pojave događaja u određenom vremenskom intervalu,
4. moguće je izbrojati broj pojave događaja.

Puasonova raspodela [116] se koristi za modeliranje broja događaja koji se dešavaju u okviru zadatog vremenskog intervala. Jednačina za određivanje verovatnoće za poznati broj kvarova x je [114]:

$$p_2(x) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!}, \quad (5.26)$$

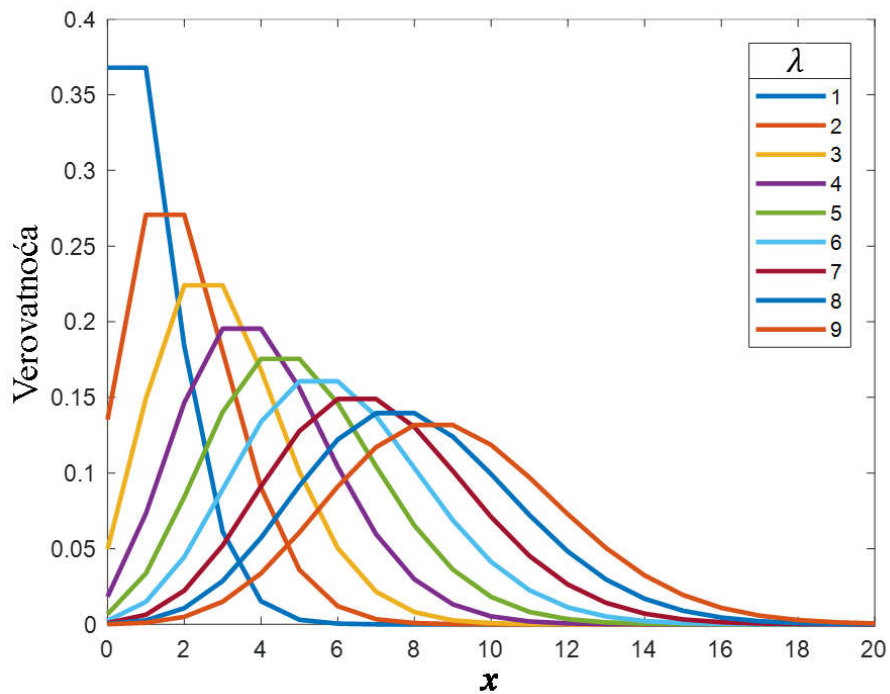
gde je λ parametar raspodele.

Kako bi se odredila verovatnoća k broja kvarova ili manje, koji se događaju u vremenskom intervalu t_i , mora se izračunati verovatnoća svakog pojedinačnog kvara, na sledeći način [114]:

$$P(x \leq k) = \sum_0^k P(x). \quad (5.27)$$

Ukoliko je potrebno izračunati verovatnoću pojave g broja događaja koji je veći od prosečnog broja događaja λ , sprovodi se sledeći proračun:

$$P(x \geq g) = 1 - P(x \leq g - 1) = 1 - \sum_{x=0}^{g-1} P(x) = 1 - \sum_{x=0}^{g-1} \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!}. \quad (5.28)$$

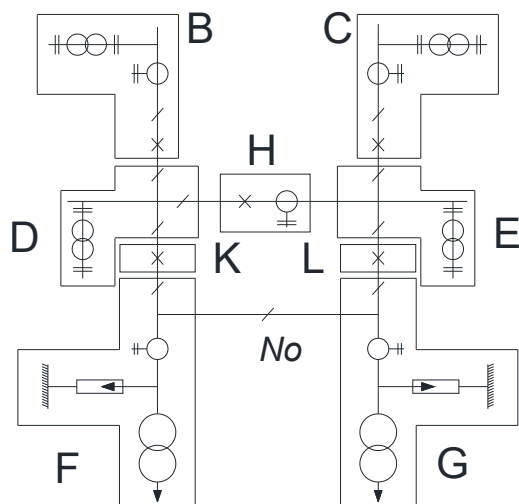


Slika 5.11 Puasonova raspodela za različite vrednosti parametra λ

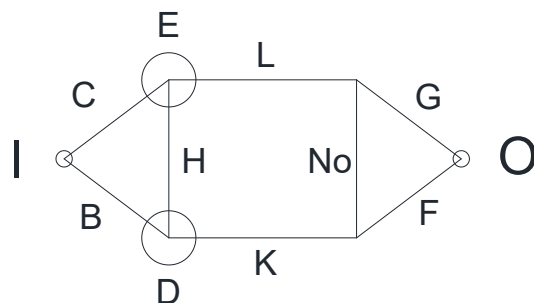
Na slici 5.11 grafički je predstavljena Puasonova raspodela. Puasonova raspodela se može iskoristiti za planiranje preventivnog održavanja, za svrhu planiranja i kupovine rezervnih delova i za procenu spremnosti sistema tokom kvarova.

6 UTICAJ PREKIDAČA NA RASPOLOŽIVOST TS

Za proračun raspoloživosti TS koriste se metode minimalnih puteva i minimalnih preseka koje su predložene u [48]. Primenom ovih metoda jednopolna šema TS se razdvaja na funkcionalne blokove (slika 6.1) od kojih se zatim formira funkcionalni graf TS (slika 6.2), gde su sa I i O označeni ulazni i izlazni čvor grafa, respektivno.



Slika 6.1 Jednopolna šema distributivne TS 110/x kV/kV



Slika 6.2 Funkcionalni graf postrojenja sa slike 6.1

Pri analizi raspoloživosti postrojenja koriste se sledeće definicije:

Funkcionalni blok - grupa komponenta postrojenja koje su na takav način povezane da obnavljanje ili planski remont bilo koje od njih prekida rad svih ostalih komponenta bloka,

Kritični događaj - događaj koji dovodi do prekida rada postrojenja,

Aktivan kvar - kvar koji aktivira susedne prekidače,

Nesigurni čvor - čvor grafa čiji će kvar dovesti do prekida svih grana koje su sa njim povezane,

Obnavljanje - popravka funkcionalnog bloka ili zamena komponente koja je u kvaru,

Osnovni događaj - obnavljanje, aktivni kvar ili planski remont funkcionalnog bloka,

Isključenje - obnavljanje i/ili planski remont funkcionalnog bloka.

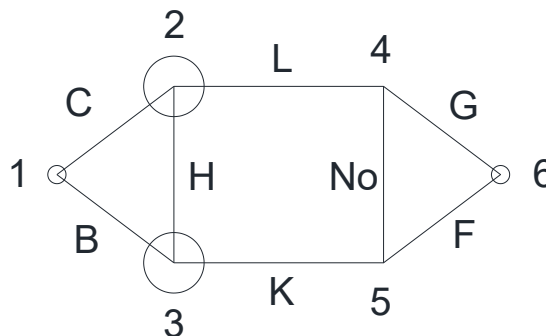
U svrhu sprovođenja proračuna uvode se sledeće pretpostavke:

- istovremeno dešavanje više od dva osnovna događaja se može zanemariti,
- dva ili više funkcionalnih blokova se ne mogu istovremeno planski remontovati,
- istovremena pojava dva ili više aktivnih kvarova se može zanemariti,
- tokom obnavljanja jednog funkcionalnog bloka ne može se započeti planski remont na drugom bloku.

6.1 METODA MINIMALNIH PUTEVA

Put predstavlja niz redno vezanih grana grafa koji spajaju ulazni (izvorni) i izlazni čvor. Minimalni put je onaj koji ne prelazi isti čvor više od jedanput i njegov red je jednak broju grana koje on sadrži. Maksimalni red minimalnog puta jednak je broju čvorova mreže umanjenom za jedan.

Pre određivanja minimalnih puteva potrebno je formirati matricu povezanosti. Matrica povezanosti je dimenzije $m \times m$, gde je m broj čvorova grafa. Ukoliko između dva čvora „ i “ i „ j “ ne postoji grana, onda će element matrice biti jednak 0.



Slika 6.3 Graf u obliku mosta

U konkretnom slučaju (na osnovu slike 6.2), ako čvorove poredamo po redosledu 1, 2, 3, 4, 5 i 6 (slika 6.3, broj čvorova grafa je $m=6$), dobija se matrica povezanosti (6.1):

$$[C] = \begin{bmatrix} 0 & C & B & 0 & 0 & 0 \\ C & 0 & H & L & 0 & 0 \\ B & H & 0 & 0 & K & 0 \\ 0 & L & 0 & 0 & No & G \\ 0 & 0 & K & No & 0 & F \\ 0 & 0 & 0 & G & F & 0 \end{bmatrix}. \quad (6.1)$$

Određivanje minimalnih puteva

- **Minimalni putevi I reda**

Za graf 6.2 ne postoje minimalni putevi prvog reda, odnosno jedna grana koja spaja ulazni i izlazni čvor.

- **Minimalni putevi II reda**

Minimalni putevi drugog reda dobijaju se kada se izvrši množenjem prve vrste matrice C , sa desne strane, samom matricom C . Važno je naglasiti da se u dobijenim rezultatima izostavljaju isti proizvodi (od kojih se zadržava samo jedan), kao i proizvodi u kojima se određena grana pojavljuje više od jedanput. Postupak dobijanja minimalnih puteva II reda je sledeći:

$$II = [0 \ C \ B \ 0 \ 0 \ 0] \cdot \begin{bmatrix} 0 & C & B & 0 & 0 & 0 \\ C & 0 & H & L & 0 & 0 \\ B & H & 0 & 0 & K & 0 \\ 0 & L & 0 & 0 & No & G \\ 0 & 0 & K & No & 0 & F \\ 0 & 0 & 0 & G & F & 0 \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

$$= [B^2 + C^2 \quad BH \quad CH \quad CL \quad BK \quad 0].$$

Za graf 6.2 ne postoje minimalni putevi drugog reda.

- **Minimalni putevi III reda**

Minimalni putevi III reda se dobijaju množenjem rezultata iz prethodnog koraka sa matricom C .

$$III = [B^2 + C^2 \quad BH \quad CH \quad CL \quad BK \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} 0 & C & B & 0 & 0 & 0 \\ C & 0 & H & L & 0 & 0 \\ B & H & 0 & 0 & K & 0 \\ 0 & L & 0 & 0 & No & G \\ 0 & 0 & K & No & 0 & F \\ 0 & 0 & 0 & G & F & 0 \end{bmatrix} =$$

$$[2BCH \quad H^2C + CL^2 + C(B^2 + C^2) \quad H^2B + BK^2 + B(B^2 + C^2) \quad BHL + BKN \quad CHK + CLN \quad BFK + CGL].$$

Minimalni putevi trećeg reda su: BFK i CGL .

- **Minimalni putevi IV reda**

Na isti način koji je opisan u prethodnim koracima određuju se minimalni preseći IV reda:

$$IV = [III] \cdot \begin{bmatrix} 0 & C & B & 0 & 0 & 0 \\ C & 0 & H & L & 0 & 0 \\ B & H & 0 & 0 & K & 0 \\ 0 & L & 0 & 0 & No & G \\ 0 & 0 & K & No & 0 & F \\ 0 & 0 & 0 & G & F & 0 \end{bmatrix}. \quad (6.3)$$

Elementi matrice IV su:

$$IV(1,1) = [B(H^2B + BK^2 + B(B^2 + C^2)) + C(H^2C + CL^2 + C(B^2 + C^2))],$$

$$IV(1,2) = [2BC^2H + H(H^2B + BK^2 + B(B^2 + C^2)) + L(BHL + BKN)],$$

$$IV(1,3) = [2CHB^2 + H(H^2C + CL^2 + C(B^2 + C^2)) + K(CHK + CLNo)],$$

$$IV(1,4) = [G(BFK + CGL) + No(CHK + CLNo) + L(H^2C + CL^2 + C(B^2 + C^2))],$$

$$IV(1,5) = [F(BFK + CGL) + No(BHL + BKN) + K(H^2B + BK^2 + B(B^2 + C^2))],$$

$$IV(1,6) = [F(CHK + CLNo) + G(BHL + BKN)].$$

Minimalni putevi četvrtog reda su: $FCHK$, $FCLNo$, $GBHL$ i $GBKNo$.

- **Minimalni putevi V reda**

$$V = [IV] \cdot \begin{bmatrix} 0 & C & B & 0 & 0 & 0 \\ C & 0 & H & L & 0 & 0 \\ B & H & 0 & 0 & K & 0 \\ 0 & L & 0 & 0 & No & G \\ 0 & 0 & K & No & 0 & F \\ 0 & 0 & 0 & G & F & 0 \end{bmatrix}. \quad (6.4)$$

Daljim proračunom dobijaju se i minimalni putevi petog reda i oni su sledeći: $CHKGN$ i $BHLFNo$.

Generalno, postupak određivanja minimalnih puteva se sprovodi dok se ne formiraju minimalni putevi reda $m-1$ (u ovom slučaju je $m-1=6-1=5$), međutim u praksi se postupak često završava i ranije.

- **Dobijeni minimalni putevi**

Nakon svih proračuna za posmatrani funkcionalni graf, dobijaju se sledeći minimalni putevi:

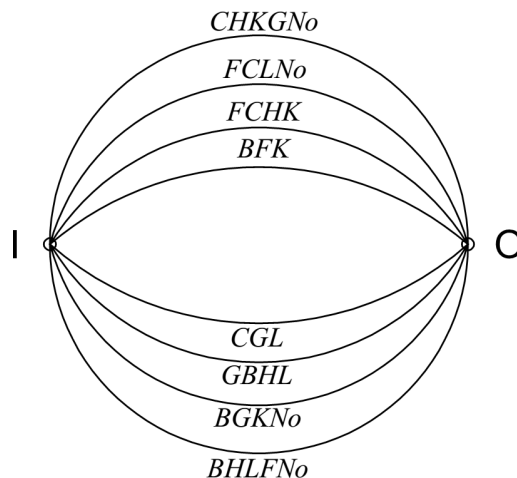
Minimalni putevi I reda: - ,

Minimalni putevi II reda: - ,

Minimalni putevi III reda: *BFK*, *CGL*,

Minimalni putevi IV reda: *FCHK*, *FCLNo*, *GBHL*, *GBKNo*,

Minimalni putevi V reda: *CHKGNo*, *BHLFNo*.



Slika 6.4 Ekvivalentni graf sa minimalnim putevima

Veza između ulaznog i izlaznog čvora biće prekinuta samo kada u prekidu bude svi minimalni putevi (slika 6.4). Pored toga, kako se po definiciji jedan minimalni put ne sadrži u ostalim putevima, prekid bilo kog minimalnog puta neće dovesti do prekida nekog drugog minimalnog puta.

6.2 METODA MINIMALNIH PRESEKA

Presek grafa je skup grana grafa čijim izostavljanjem dolazi do prekida između ulaznog i izlaznog čvora. Minimalan presek u sebi ne sadrži druge preseke i njegov red q_p jednak je broju grana koje sadrži presek. Najveći mogući red jednak je razlici broja grana i broja čvorova uvećanoj za 2.

Kako bi se formirali minimalni preseki upotrebiće se minimalni putevi čije određivanje je prikazano u prethodnom poglavlju. Na početku se formira matrica minimalnih puteva P , čije su dimenzije $m \times n$, gde je m – broj minimalnih puteva, a n - broj grana grafa, sa elementima C_{ij} , koji su jednaki 1 ako grana „ j “ pripada minimalnom putu „ i “, a nula ako ne pripada.

Minimalni preseki I reda se uočavaju već nakon formiranja matrice P . Ukoliko je jedna kolona matrice ispunjena jedinicama to znači da je dobijen minimalni presek.

Minimalni preseki II reda se dobijaju sabiranjem kolona matrice P . Sabiranje se vrši tako što se svaka grana ponaosob sabira sa granama koje joj slede, na primer, prva grana sa drugom, zatim trećom..., druga grana sa trećom, četvrtom, itd. Ukoliko se kao zbir dve kolone dobije kolona čiji su svi elementi jedinice, onda to znači da posmatrane grane čine presek grafa, jer se njihovim jednovremenim prekidom prekidaju i svi minimalni putevi.

Sabiranje se vrši prema sledećim pravilima Bulove algebre:

$$1+1=1,$$

$$1+0=1,$$

$$0+1=1,$$

$$0+0=0.$$

Preseki III reda se dobijaju sabiranjem elemenata parova kolona sa po jednom kolonom koja im sledi. Na primer, sabiraju se elementi prve, druge i treće kolone, zatim, prve, druge i četvrte kolone, itd. Ceo postupak se maksimalno ponavlja do preseka q_p , međutim, najčešće se proračun završava i ranije.

Kada se završi proračun minimalnih preseka vrši se formiranje grafa sa minimalnim presecima. Sa grafa se jednostavno uočava da će do prekida između ulaznog i izlaznog čvora doći tek kada dođe do prekida bar jednog minimalnog preseka (odnosno, svih grana koje čine minimalni presek).

Određivanje minimalnih preseka

Ukoliko su minimalni putevi dati sledećim redom:

CLG; BKF; BHLG; BKGNo; CHKf; CLFNo; CHKGNo; BHLFNo,

a grane su definisane sledećim redosledom:

C, B, H, L, K, No, G, F,

za graf sa slike 6.2 matrica minimalnih puteva je:

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6.5)$$

- **Minimalni preseci I reda**

Minimalni preseci prvog reda ne postoje, jer u formiranoj matrici ne postoji ni jedna kolona čiji su svi elementi jedinice (prekid bilo koje pojedine grane ne dovodi do prekida između izvornog i izlaznog čvora).

- **Minimalni preseci II reda**

U postupku dobijanja minimalnih preseka II reda, svaka kolona se dodaje kolonama koje joj slede i proverava se da li će svi elementi dobijanih kolona biti jedinice, što će značiti da je to minimalni put II reda.

Prva kolona se dodaje ostalim kolonama:

$$P(I) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6.6)$$

Prva i druga kolona grade minimalni presek II reda.

Druga kolona se dodaje narednim kolonama:

$$P(II) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6.7)$$

Treća kolona se dodaje narednim kolonama:

$$P(III) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6.8)$$

Četvrta kolona se dodaje narednim kolonama:

$$P(IV) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6.9)$$

Četvrta i peta kolona grade minimalni presek II reda.

Peta kolona se dodaje narednim kolonama:

$$P(V) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6.10)$$

Šesta kolona se dodaje sedmoj i osmoj koloni:

$$P(VI) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 1 & 1 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6.11)$$

Sedma kolona se dodaje osmoj koloni:

$$P(VII) = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (6.12)$$

Sedma i osma kolona grade minimalni presek II reda.

Dobijeni preseci II reda su: BC , LK , GF (grane br. 1-2, 4-5, 7-8).

Uzimajući u obzir i nesigurne čvorove (tabela 6.1), dobijaju se i sledeći minimalni preseci II reda: CD , BE , DL , EK , DE .

- **Minimalni preseci III reda**

Minimalni preseci III reda se dobijaju sabiranjem elemenata parova kolona sa svakom narednom kolonom koja im sledi.

Preskaču se kolone I i II, IV i V, VII i VIII jer su sadržane u preseku II reda.

Primer proračuna minimalnog preseka III reda: sabiraju se elementi kolona I i III, sa elementima kolone IV. Ukoliko se dobije vektor matrica čiji su svi elementi jedinice, znači da pomenute grane čine minimalni presek.

Dobijeni minimalni preseci III reda su: $LFNo$, $KGNo$, $DGNo$, $EFNo$ (grane br. 1-3-5, 2-3-4, 4-6-8, 5-6-7).

Nesigurni čvorovi moraju biti obuhvaćeni u minimalnim presecima, jer je posledica ispada nesigurnog čvora ispad funkcionalnog bloka iz pogona.

Tabela 6.1 Pregled nesigurnih čvorova i pripadajućih funkcionalnih blokova

Nesiguran čvor	Pripadajući funkcionalni blok
D	B, H, K
E	C, H, L

- **Minimalni preseci IV reda**

Sličan postupak kao do sada se vrši i za minimalne preseke IV reda, s tim što se uzimaju po tri kolone (u razmatranju se ne uzimaju minimalni preseci dobijeni u dosadašnjem proračunu).

Proračunom nisu dobijeni minimalni preseci IV reda.

- **Dobijeni minimalni preseci**

Minimalni preseci I reda: -.

Minimalni preseci II reda: $BC, CD, BE, KL, DL, EK, FG, DE$.

Minimalni preseci III reda: $LFNo, KGNo, DGNo, EFNo$.

Minimalni preseci IV reda: -.

Na osnovu definicija koje su navedene na kraju poglavlja 6 mogu se napisati sledeće relacije:

$D \cdot E$ – događaj D i događaj E (istovremeno dešavanje dva događaja),

$D + E$ – događaj D ili događaj E ,

\bar{D} – isključenje funkcionalnog bloka D ,

\underline{D} – obnavljanje funkcionalnog bloka D ,

D'' – planski remont funkcionalnog bloka D ,

D' - aktivni kvar funkcionalnog bloka D ,

$P(A)$ – verovatnoća događaja A ,

$U(D)$ – neraspoloživost funkcionalnog bloka D ,

$\lambda(D)$ – intenzitet kvarova funkcionalnog bloka D ,

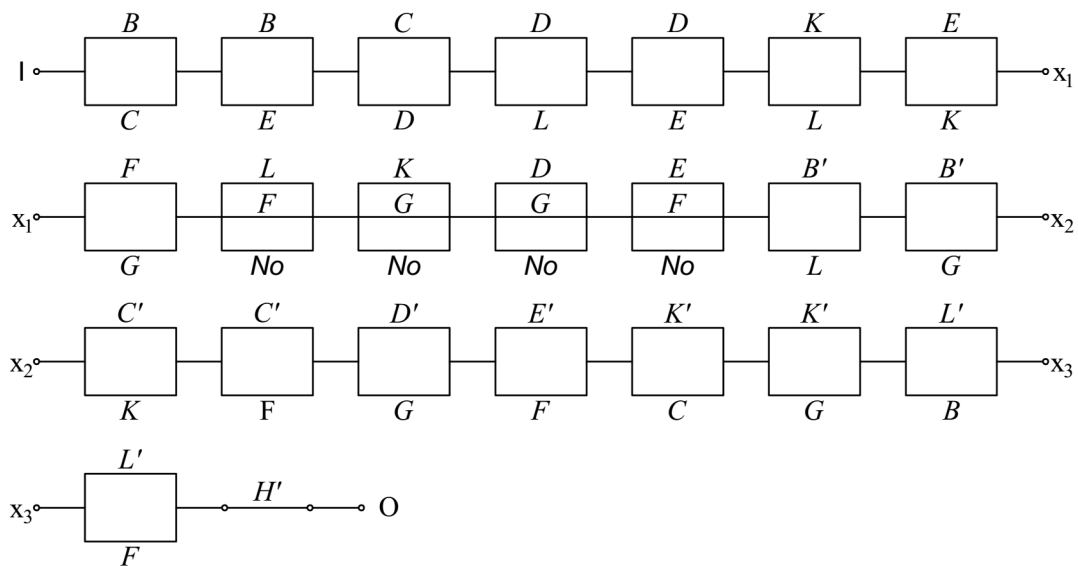
r_i – trajanje obnavljanja elementa “i”,

r_i'' - trajanje planskog remonta elementa “i”,

s_i - trajanje manipulacije za ponovno uključivanje ispravnih komponenata.

U izrazima koji slede umesto učestanosti događaja (f) korišćen je intenzitet otkaza (λ), za šta je objašnjenje dato u prilogu 4.

Na osnovu navedenih relacija i dobijenih minimalnih preseka, na slici 6.5, je prikazan ekvivalentan graf sa minimalnim presecima za postrojenje sa slike 6.1.



Slika 6.5 Ekvivalentni graf sa minimalnim presecima

6.2.1 PRORAČUN RASPOLOŽIVOSTI

Aktivni kvarovi funkcionalnog bloka u najvećem broju slučajeva predstavljaju aktivne kvarove prekidača koji čine blok. Intenzitet aktivnih kvarova λ'_j funkcionalnog bloka je:

$$\lambda'_j = \lambda'_{pj} + p_a \cdot \sum_{i_j} \lambda'_{i_j}, \quad (6.13)$$

gde je:

λ'_{pj} - intenzitet aktivnih kvarova prekidača na kraju funkcionalnog bloka,

λ'_{i_j} - intenzitet aktivnih kvarova komponente i_j koju štiti prekidač i

p_a – verovatnoća otkaza delovanja prekidača.

Aktivni kvarovi se obuhvataju na sledeći način:

- na osnovu šeme postrojenja formiraju se funkcionalni blokovi koji će biti isključeni ukoliko se dogodi aktivni kvar određenog prekidača,
- po prethodno opisanom postupku vrši se određivanje minimalnih puteva,
- aktivni kvar prekidača se uključuje u svaki minimalni put (ukoliko je ispunjen uslov iz prvog koraka) kao dodatni element. Aktivni kvar prekidača neće biti uključen u minimalnom putu samo ako je dati prekidač već obuhvaćen njime,
- za sve prekidače se sprovedu koraci od 1 do 3,
- određuju se minimalni preseci na prethodno naveden način.

Tokom proračuna raspoloživosti postrojenja, prvo je potrebno izračunati pokazatelje pouzdanosti za svaki minimalni presek jednog ekvivalentnog grafa, a zatim, njihovim sabiranjem dobijaju se pokazatelji pouzdanosti razmatranog postrojenja. U narednom delu prikazan je proračun pokazatelja pouzdanosti karakterističnih preseka.

- **Određivanje pokazatelja pouzdanosti za presek BC**

Najpre se izvrši proračun za svaki od minimalnih preseka koji sačinjavaju ekvivalentni graf. Pokazatelji pouzdanosti preseka BC se računa na sledeći način:

$$B = \underline{B} + B'' , \quad (6.14)$$

$$C = \underline{C} + C'' . \quad (6.15)$$

Na osnovu toga i pretpostavke da se funkcionalni blokovi ne mogu jednovremeno planski remontovati sledi:

$$B \cdot C = (\underline{B} + B'') \cdot (\underline{C} + C'') = \underline{B} \cdot \underline{C} + \underline{B} \cdot C'' + B'' \cdot \underline{C} , \quad (6.16)$$

Primenom relacija navedenih u [97] i [117] dobija se:

$$P(\underline{B} \cdot \underline{C}) = P(\underline{B}) \cdot P(\underline{C}) = U_B \cdot U_C , \quad (6.17)$$

$$\lambda(\underline{B} \cdot \underline{C}) = \lambda(\underline{B}) \cdot P(\underline{C}) + \lambda(\underline{C}) \cdot P(\underline{B}) = \lambda_B \cdot U_C + \lambda_C \cdot U_B , \quad (6.18)$$

$$\lambda(\underline{B} \cdot C'') = \lambda(\underline{B}) \cdot P(C'') = \lambda_B \cdot U_C'' , \quad (6.19)$$

$$\lambda(\underline{B}'' \cdot \underline{C}) = \lambda_C \cdot U_B'' , \quad (6.20)$$

$$P(\underline{B} \cdot \underline{C}'') = \lambda(\underline{B} \cdot \underline{C}'') \cdot r_{\underline{B} \cdot \underline{C}''} = \lambda_B \cdot U_C'' \cdot \frac{r_B \cdot r_C''}{r_B + r_C''} = U_B \cdot U_C'' \cdot \frac{r_C''}{r_B + r_C''} , \quad (6.21)$$

$$P(\underline{B}'' \cdot \underline{C}) = U_C \cdot U_B'' \cdot \frac{r_B''}{r_C + r_B''} . \quad (6.22)$$

Na osnovu prethodnih jednačina, pokazatelji pouzdanosti za ekvivalentnu granu BC su:

$$U_e = U_B \cdot U_C + U_B \cdot U_C'' \cdot \frac{r_C''}{r_B + r_C''} + U_C \cdot U_B'' \cdot \frac{r_B''}{r_C + r_B''} , \quad (6.23)$$

$$\lambda_e = \lambda_B \cdot U_C + \lambda_C \cdot U_B + \lambda_B \cdot U_C'' + \lambda_C \cdot U_B'' . \quad (6.24)$$

- **Određivanje pokazatelja pouzdanosti za presek $KGNo$**

Pokazatelji pouzdanosti preseka koji sadrži dve grane (K i G) i jednu normalno otvorenu granu (No) određuju se na sledeći način:

$$\lambda(K \cdot G \cdot No) = \lambda(K \cdot G) , \quad (6.25)$$

$$P(K \cdot G \cdot No) = \lambda(K \cdot G \cdot No) \cdot s = \lambda(K \cdot G) \cdot s . \quad (6.26)$$

Time se za ekvivalentnu granu datog preseka dobijaju sledeći pokazatelji pouzdanosti:

$$U_e = \lambda_e \cdot s , \quad (6.27)$$

$$\lambda_e = \lambda_K \cdot U_G + \lambda_G \cdot U_K + \lambda_K \cdot U_G'' + \lambda_G \cdot U_K'' . \quad (6.28)$$

Intenzitet otkaza preseka sa normalno otvorenom granom se poklapa sa intenzitetom otkaza preseka bez te grane. Neraspoloživost preseka dobija se kao proizvoda intenziteta otkaza i vremena potrebnog za uključenje No grane.

- **Određivanje pokazatelja pouzdanosti za aktivni kvar H'**

Pokazatelji pouzdanosti preseka koji sadrži blok sa aktivnim kvarom određuju se na sledeći način:

$$\lambda(H') = \lambda'_H = \lambda_e , \quad (6.29)$$

$$P(H') = \lambda'_H \cdot s_H = U_e , \quad (6.30)$$

gde je sa s_H označeno vreme potrebno za ponovno uključivanje u pogon ispravnih elemenata koje je isključila zaštita.

- **Određivanje pokazatelja pouzdanosti za aktivni kvar $B'L$**

Pokazatelji pouzdanosti preseka koji sadrži i blok sa aktivnim kvarom određuju se kao u relacijama koje slede:

$$B' \cdot L = B' \cdot (\underline{L} + L'') = B' \cdot \underline{L} + B' \cdot L'', \quad (6.31)$$

$$P(B' \cdot \underline{L}) = U'_B \cdot U_L, \quad (6.32)$$

$$\lambda(B' \cdot \underline{L}) = \lambda'_B \cdot U_L + U'_B \cdot \lambda_L, \quad (6.33)$$

$$\lambda(B' \cdot L'') = \lambda'_B \cdot U_L'', \quad (6.34)$$

$$P(B' \cdot L'') = \lambda(B' \cdot L'') \cdot \frac{s_B \cdot r_L''}{s_B + r_L''} = U'_B \cdot U_L'' \cdot \frac{r_L''}{s_B + r_L''}, \quad (6.35)$$

$$U_e = U'_B \cdot U_L + U'_B \cdot U_L'' \cdot \frac{r_L''}{s_B + r_L''}, \quad (6.36)$$

$$\lambda_e = \lambda'_B \cdot U_L + U'_B \cdot \lambda_L + \lambda'_B \cdot U_L''. \quad (6.37)$$

- **Određivanje pokazatelja pouzdanosti za planski remont funkcionalnog bloka**

Ukoliko se u preseku nalazi funkcionalni blok nad kojim se sprovedi planski remont, njegovi pokazatelji pouzdanosti se dobijaju primenom sledećih relacija:

$$\lambda_j'' = \max_{i_j}(\lambda_{i_j}), \quad (6.38)$$

$$U_j'' = \frac{\tau_j''}{T}, \quad (6.39)$$

$$r_j'' = \frac{U_j''}{\lambda_j''}. \quad (6.40)$$

U jednačini (6.39) τ_j'' je ukupno trajanje prekida funkcionalnog bloka „j“ tokom trajanja planskih remonta, tokom perioda posmatranja T . Uzima se da je intenzitet isključenja bloka jednak intenzitetu komponente koja se najčešće remontuje.

Ekvivalentni graf se sastoji iz redne veze ekvivalentnih grana, što znači da se pokazatelji pouzdanosti grafa dobijaju kao zbir pokazatelja pouzdanosti (neraspoloživost i intenzitet otkaza) elemenata grafa:

$$U \approx \sum_{i=1}^n U_{ei}, \quad (6.41)$$

$$\lambda \approx \sum_{i=1}^n \lambda_{ei}. \quad (6.42)$$

7 NOV PRISTUP ODREĐIVANJA RIZIKA PREKIDAČA

Model starenja koji se predlaže u ovoj disertaciji zasnovan je na tri različita faktora:

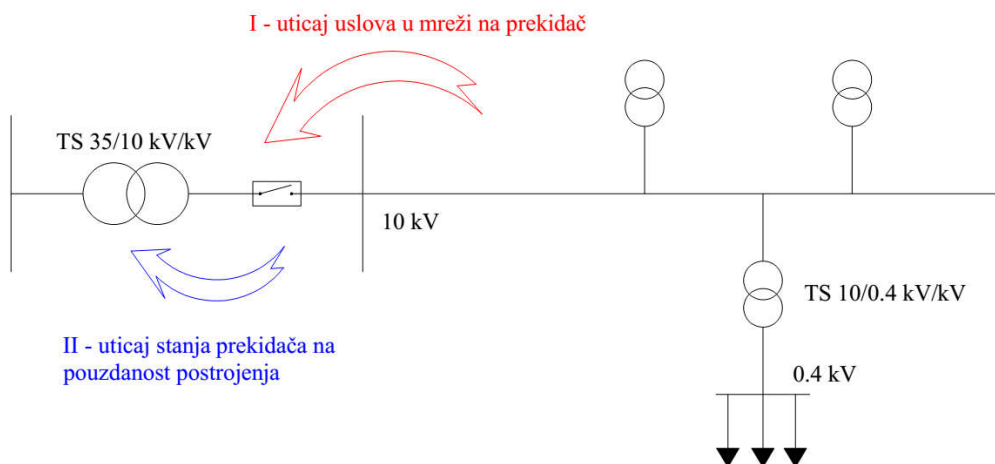
- a) starost prekidača,
- b) broj očekivanih operacija i
- c) radni uslovi prekidača.

Starenje kontakata usled proticanja struje i prekidanja struje kvara se može opisati odgovarajućom funkcijom raspodele. Ova funkcija se može dobiti upotrebom izmerenih parametara, uz pretpostavku da se tokom godine parametri radnih uslova ne menjaju značajno.

Sa druge strane, kvarovi praćeni strujom koja je jednaka naznačenoj nisu česti i zavise od konfiguracije mreže. Zbog toga se oni modeliraju diskretnom raspodelom verovatnoće, uz pretpostavku da je intenzitet kvarova na izvodu konstantan tokom godine.

Na starenje prekidača utiče i tip izvoda. Kablovski izvodi trpe veće prenapone tokom manipulacija u odnosu na nadzemne, pa samim tim, različite kategorije prekidača se moraju uzeti u obzir tokom analize starenja.

U ovoj disertaciji, analiziran je uticaj mesta ugradnje prekidača na njegovo stanje. Podaci koji karakterišu mesto ugradnje su: tip voda (kablovski ili nadzemni), naponski nivo voda (10 kV ili 35 kV) i broj isključenja struje kratkog spoja. Zatim je u drugom koraku, po dobijenom stanju prekidača, analiziran njegov uticaj na raspoloživost cele TS u kojoj je on u pogonu (slika 7.1) [118]. To je izvršeno kroz proračun raspoloživosti TS u slučaju zamene određene grupe prekidača.



Slika 7.1 Prikaz analize uticaja stanja prekidača

Postupak upotrebe matematičkog modela koji je predložen u ovoj disertaciji je prikazan algoritmom na slici 7.2, i sastoji se od sledećih koraka:

Identifikacija izvora rizika

U procesu procene rizika prvo se vrši identifikacija svih elemenata sistema koji mogu biti izvor rizika. U ovoj disertaciji kao izvor rizika se posmatra otkaz prekidača koji može biti opisan pomoću sledećih merenih podataka:

- vrednost pada napona (ΔU) i
- broj isključenih struja kratkog spoja (br. I_{ks}).

Sledeći kriterijumi koji utiču na rizik prekidača zavise od mesta ugradnje i oni su:

- tip voda,
- naponski nivo i
- tip potrošnje.

Prikupljanje podataka

Za jedan prekidač neophodno je obezbediti podatke koji su identifikovani kao izvori rizika. Podaci koje je neophodno obezbediti za sprovođenje procene rizika su:

- godina proizvodnje prekidača (sa natpisne pločice prekidača),
- tip voda, naponski nivo, karakter konzuma (zavisi od mesta ugradnje),
- merene vrednosti (izmerene vrednosti padova napona i broj prekinutih struja kratkog spoja do sadašnjeg trenutka).

Analizirani podaci su dalje podeljeni u sledeće kategorije:

- prekidači montirani na 35 kV izvodima,
- prekidači montirani na 10 kV izvodima,
- prekidači montirani na nadzemnim izvodima,
- prekidači montirani na kablovskim izvodima,
- svi prekidači.

Iz uputstva proizvođača dozvoljava se prekoračenje naznačenih vrednosti za 25 %. Iz tog razloga, prekidači su analizirani i kroz sledeća dva kriterijuma:

- maksimalna vrednost pada napona je kao u tabeli proizvođača,
- maksimalna vrednost pada napona je za 25 % veća od vrednosti iz tabele.

Na ovaj način sagledan je uticaj oba kriterijuma na životni vek prekidača.

Procena stanja prekidača

Nakon prikupljanja podataka iz prethodnih koraka proverava se da li je prekidač prekoračio svoje naznačene vrednosti (definisane od strane proizvođača). U ovom koraku potrebno je dati odgovor na sledeća pitanja:

- Da li je pad napona veći do dozvoljenog?
Prekidači sa padom napona većim od dozvoljenog se označavaju kao „otkazali“, dok se ostali prekidači sa vrednostima padova napona koji se nalaze u dozvoljenim granicama označavaju kao „ispravni“.
- Da li je broj prekinutih struja kratkog spoja prekoračio dozvoljenu vrednost?
- Nakon toga se dobija odgovor na pitanje: Da li se prekidač može smatrati ispravnim ili ne?
- Ukoliko je prekoračena neka dozvoljena vrednost beleži se godina tog događaja.

Sa podacima iz ovog koraka može se pristupiti određivanju raspodele životnog veka.

Analiza podataka

Sa prikupljenim podacima sa svih prekidača u DEES formira se tabela koju čine podaci ispravnih prekidača i prekidača koji su u određenoj godini otkazali. Ovi podaci se dalje koriste za određivanje raspodele životnog veka prekidača.

Predloženi matematički model se sastoji iz dve grupe podataka koji daju uvid u stanje prekidača (pad napona i broj prekinutih struja kratkog spoja). Samim tim, određiće se dve nezavisne raspodele životnog veka.

Otkazi komponenata [119] u EES nisu česti, naročito u kratkom vremenskom intervalu u kome se neka analiza sprovodi. Usled toga statistička analiza može biti otežana, ukoliko postoji mali broj otkazalih komponenata. Ponekad baza podataka ne sadrži informacije o otkazu svih uređaja. Jedan od uzroka je i završetak perioda analize bez otkaza uređaja. Iz tog razloga je važno u analizu uključiti i takve podatke, jer se informacija o uređajima koji su i dalje ispravni ne može ignorisati zbog uticaja na krajnje rezultate [107]. Takav postupak se zove cenzurisanje podataka i koristi se i u drugim oblastima, kao što je na primer medicina. Cenzurisani podaci se mogu podeliti u tri kategorije:

- levo cenzurirani podaci: događaj se desio levo od posmatranog trenutka, tj. kvar se desio pre početka analize,
- desno cenzurirani podaci: nije poznat trenutak otkaza, osim da se desio nakon završetka analize,
- cenzurisanje intervala: kvar se desio u intervalu između dve inspekcije, tačan trenutak nije poznat.

Određivanjem raspodele životnog veka dobija se i verovatnoća otkaza prekidača. Između ostalog, verovatnoća otkaza će biti korišćena za proračun rizika otkaza prekidača.

Rizik

Kako je rizik proizvod verovatnoće događaja i njegovih posledica, potrebno je izračunati novčane troškove neplaniranog otkaza prekidača.

Troškovi otkaza su novčana vrednost neisporučene električne energije i zamene prekidača sa pratećim troškovima.

Rizik se dobija kao proizvod zbira verovatnoća otkaza prekidača (usled prekoračenja dozvoljenog pada napona i dozvoljenog br. prekinutih struja kratkog spoja), novčanih troškova i faktora koji opisuje važnost izvoda.

Međutim, i pored izračunatih rizika otkaza prekidača, donošenje odluke o njihovoj zameni nije jednostavan zadatak. Kako bi se osigurala ispravnost odluke o zameni prekidača izvršiće se proračun uticaja njegove zamene na raspoloživost TS.

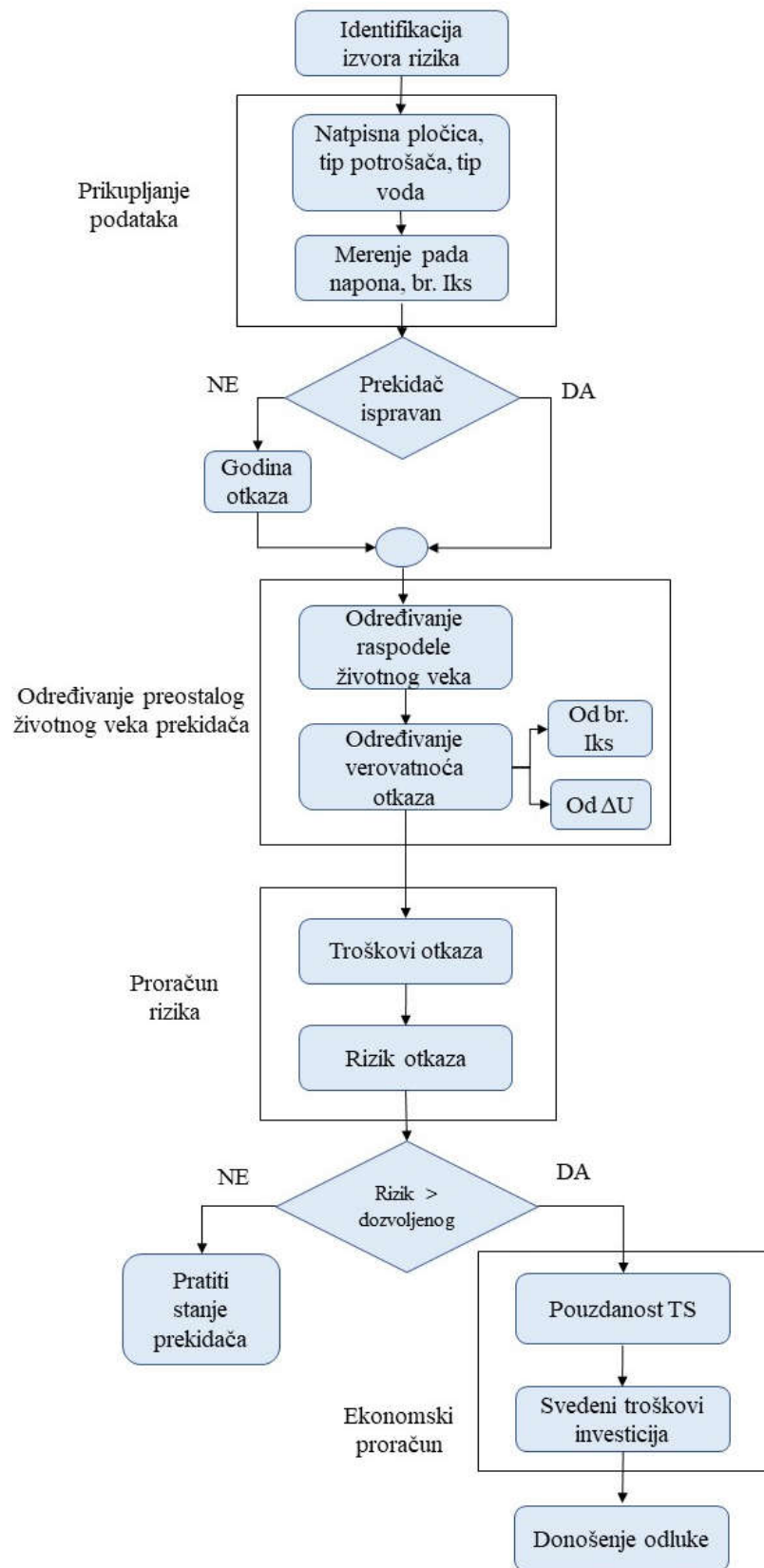
Ekonomski proračun

Na osnovu izračunate verovatnoće otkaza prekidača sprovodi se ekonomska analiza tokom koje se izračunava uticaj zamene pojedine grupe prekidača na povećanje raspoloživosti TS.

Za svaki od predloženih scenarija zamene prekidača vrši se proračun svedenih troškova investicija za period od narednih 5 godina.

Donošenje odluke

Poslednji korak u postupku procene rizika je donošenje odluke na osnovu obrađenih podataka. Zameni prekidača je potrebno pristupiti oprezno i sa ekonomskog aspekta doneti odluku koja ima najbolji odnos uložениh sredstava i povećane raspoloživosti TS.



Slika 7.2 Algoritam predloženog matematičkog modela

7.1 ODREĐIVANJE FUNKCIJE RASPODELE ANALIZIRANIH PODATAKA

Tokom odabira matematičke raspodele koja će se koristiti za analizu podataka potrebno je definisati koji podaci se očekuju kao rezultat primene raspodele i da li ti podaci daju najbolji uvid u stanje analiziranih uređaja.

7.1.1 ODREĐIVANJE RASPODELE U SLUČAJU OTKAZA USLED PREKORAČENOG PADA NAPONA

Metoda najmanjih kvadrata [120] se dosta koristi za uklapanje matematičke krive za datu grupu podataka. U ovoj metodi se utvrđuje matematički odnos između faktora koji je funkcija vremena i date promenljive veličine. Ako su podaci sledeći: $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$, vrednost trenda y_c mora zadovoljiti sledeće uslove:

1. Suma devijacija y u odnosu na odgovarajuću vrednost trenda mora biti jednaka nuli,

$$\sum_{i=1}^n (y_i - y_c) = 0 ; \quad (7.1)$$

2. Suma kvadrata devijacije u odnosu na vrednost trenda je najmanja,

$$\sum (y - y_c)^2 \text{ je najmanje .} \quad (7.2)$$

Jednačina linije trenda je sledeća:

$$y_c = a + bx, \quad (7.3)$$

gde su a i b konstante, koje ispunjavaju sledeće uslove:

$$\sum_{i=1}^n y_i = na + b \sum_{i=1}^n x_i, \quad (7.4)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i y_i = b \sum_{i=1}^n x_i + a \sum_{i=1}^n x_i^2. \quad (7.5)$$

Kao rešenje jednačina (7.4) i (7.5) dobija se:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (7.6)$$

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (7.7)$$

U jednačini (7.3) a predstavlja trend promenljivih kada je $x=0$, dok b predstavlja nagib linije trenda. Ako je b pozitivno, linija trenda se kreće na gore, i obratno.

Da li analizirani podaci odgovaraju određenoj raspodeli može se utvrditi pomoću koeficijenta korelacije. Koeficijent korelacije predstavlja [116] meru koliko dobro model linearne regresije (linija verovatnoće) odgovara unetim podacima. On se određuje na sledeći način [116]:

$$\rho = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (7.8)$$

pri čemu je:

σ_{xy} – kovarijansa promenljivih x i y ,

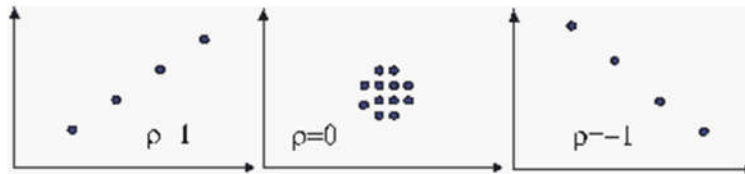
σ_x – standardna devijacija promenljive x ,

σ_y – standardna devijacija promenljive y .

Procena ρ vrši se na osnovu uzorka koeficijenta korelacije $\hat{\rho}$ na sledeći način:

$$\hat{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n}\right) \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n}\right)}}. \quad (7.9)$$

Opseg $\hat{\rho}$ je: $-1 \leq \hat{\rho} \leq 1$.



Slika 7.3 Ilustracija različitih vrednosti ρ parametra [116]

Bliža vrednost $\hat{\rho}$ broju 1 ili -1 označava bolje linearno poklapanje. Ukoliko je to „+1“ onda znači da se vrednosti x_i i y_i nalaze na pravoj liniji, tj. da je u pitanju savršeno poklapanje sa pozitivnim nagibom, dok „-1“ označava savršeno poklapanje sa negativnim nagibom. Koeficijent korelacije koji je jednak nuli označava da su podaci nasumice raspoređeni i da ne

postoji šablon ili korelacija u odnosu na regresiju linije modela. Ilustracija vrednosti ρ parametra predstavljena je na slici 7.3.

7.1.2 ODREĐIVANJE RASPODELE U SLUČAJU OTKAZA USLED PREKORAČENOG BROJA PREKINUTIH STRUJA KRATKOG SPOJA

Hi kvadratni test (eng. Chi-squared test ili χ^2 test) predstavlja test statističke hipoteze i koristi se za utvrđivanje značajne razlike između očekivanog intenziteta događaja i intenziteta događaja dobijenog posmatranjem [121]. Zbog svoje jednostavnosti ova metoda će biti iskorišćena za proveru da li uneti podaci (broj prekida struje kratkog spoja) odgovaraju razmatranoj raspodeli [122]. Proračun se vrši sledećom formulom [121]:

$$\chi^2 = \sum \frac{(O - E)^2}{E}, \quad (7.10)$$

gde je:

χ^2 – hi kvadratna vrednost,

O – zabeležena (posmatrana) vrednost,

E – očekivana vrednost.

Procedura sprovođenja hi kvadratnog [116]:

1. Postavljanje pretpostavke
 - a) Nulta pretpostavka: Pretpostavka da ne postoji značajna razlika između zabeleženih i očekivanih vrednosti,
 - b) Alternativna pretpostavka: Pretpostavka da postoji značajna razlika između zabeleženih i očekivanih vrednosti,
2. Proračun hi kvadratnog testa pomoću formule (7.10),
3. Stepni slobode: Kod hi kvadratnog testa, stepeni slobode zavise od izabrane raspodele i oni se računaju kao: $k - g - 1$,
gde je:
 k - broj klasa (u ovom slučaju to je broj kvarova čiji se intenzitet prati),
 g - broj parametara raspodele koja se koristi,
4. Odabira se nivo značajnosti: Nivo značajnosti (α) može biti bilo koja vrednost u rasponu 0-100 %, ali je uobičajeno da se bira nivo značajnosti od 5 % ili 1 %, između ostalog i zato što su za njih već izračunate vrednosti u statističkim tablicama. Vrednost nivoa značajnosti od 0.05 znači da postoji verovatnoća od 5 % da je uočena veza između

varijabli nastala delovanjem slučaja, odnosno da podaci ne prate odgovarajuću raspodelu,

5. Na osnovu broja stepeni slobode i izabranog nivoa značajnosti iz tabele graničnih vrednosti [123] očitava se odgovarajuća vrednost,
6. Vrednost hi kvadratnog testa se upoređuje sa vrednošću koja je očitana u tabeli. Ako je proračunata vrednost veća od vrednosti iz tabele, nulta pretpostavka će biti odbačena i zaključice se da postoji značajna razlika između zabeležene i očekivane vrednosti. U suprotnom, nulta pretpostavka će biti prihvaćena.

7.2 PRORAČUN RIZIKA

Neplanirani otkaz prekidača može dovesti do velikih posledica u električnoj mreži i EES kao celini. Tako na primer, u slučaju da 10 kV prekidač otkáže da izvrši operaciju isključenja, doći će do delovanja rezervne zaštite koja će isključiti mnogo veći broj potrošača. U slučaju da prekidač otkáže da izvrši operaciju uključanja, biće potrebna njegova hitna popravka ili zamena, što će zahtevati neplanirano angažovanje radne snage, vozila, materijala i opreme. U oba slučaja doći će do dužeg perioda neplanirane beznaponske pauze, čije će posledice imati veliki ekonomski gubitak, pogotovu ukoliko konfiguracija mreže (radijalna mreža) ne dozvoljava da kupci dobiju napajanje sa druge strane tokom trajanja radova u samoj TS.

Troškovi otkaza prekidača računaju se kao zbir troškova radne snage i troškova neisporučene energije, dok vreme potrebno za otklanjanje kvara zavisi od udaljenosti TS, dostupnosti rezervne opreme i raspoložive radne snage. Na osnovu navedenog, u ovoj disertaciji se predlaže sledeća formula za proračun troškova [124]:

$$C(t) = C_{kWh} \cdot P \cdot t_{rep} + C_{\frac{1h}{work}} \cdot t_{rep}, \quad (7.11)$$

gde je:

C_{kWh} - cena električne energije [€/kWh],

P - prosečna snaga izvoda [kW],

t_{rep} - potrebno vreme za zamenu prekidača [h],

$C_{1h/work}$ - troškovi radova po jednom času [€/h].

Za prosečnu cenu energije uzeta je vrednost od $C_{kWh} = 5 \text{ €/kWh}$ [125], dok je cena radnog sata angažovanja radnika (koja uključuje i troškove materijala i prevoza) $C_{1h/work} = 100 \text{ €/h}$ [125].

Na osnovu dobijenih vrednosti verovatnoća i troškova otkaza prekidača izračunava se rizik, na način kako je to definisano u poglavlju 4, odnosno:

$$R(t) = w \cdot (p_1(t) + p_2(t)) \cdot C(t), \quad (7.12)$$

gde je:

- w – težinski faktor koji uračunava važnost izvoda,
- $p_1(t)$ – verovatnoća otkaza prekidača zbog prekoračene vrednosti pada napona u godini t ,
- $p_2(t)$ – verovatnoća dostizanja maksimalnog broja operacija m u godini t ,
- $C(t)$ – troškovi neisporučene energije usled kvara prekidača i troškovi popravke.

Kako bi se što realnije opisao rizik otkaza prekidača u proračunu se koristi težinski faktor w koji uzima u obzir važnost konkretnog izvoda. Izbor težinskih faktora je izvršen tako da je prioritet stavljen na značajne kupce na izvodu (bolnice, državne institucije, industrijski i proizvodni pogoni) pa se stoga oni nalaze u prvoj kategoriji značajnosti, dok su manje bitni potrošači (gradski centar, velika stambena naselja...) svrstana u drugu kategoriju. Na kraju, izvodi koji imaju mali broj potrošača ili isključivo potrošače iz kategorije domaćinstva postavljeni su u treću kategoriju.

U slučaju predložene analize rizika kod maloljnih prekidača prate se dva parametra: pad napona i broj struja kratkog spoja. Pad napona se ne menja naglo i njegova promena je postepena tokom godina. Sa druge strane, broj prekinutih struja kratkog spoja je nepredvidiv događaj. Broj kvarova na mreži može biti učestaliji u toku jednog perioda vremena i prekoračiti dozvoljeni broj kod određenog prekidača. Upravo je to ključni parametar za dinamičku analizu rizika, jer bi pri svakom prekidu struje kratkog spoja bilo potrebno proceniti rizik prekidača za budući period.

8 VERIFIKACIJA PREDLOŽENOG PRISTUPA

Otpornost kontakata je najbitniji i univerzalni pokazatelj kod svih električnih kontakata i uvek se uzima u obzir kao sastavni deo ukupne otpornosti strujnog kola uređaja. Iz tog razloga, iako su vrednosti te otpornosti manje u poređenju sa ukupnom otpornošću strujnog kola, promene otpornosti kontakata ponekad mogu izazvati značajne kvarove uređaja. To je zato što otpornost kontakta može značajno varirati promenom stvarne površine kontakata, pritiska kontakata, promenom debljine otpornog sloja i drugih faktora, što može uticati na preciznost ili ispravnost rada uređaja.

U ovoj doktorskoj disertaciji analizirani su malouljni prekidači za srednji napon i ispitivani su prema uputstvu samog proizvođača [67]. Ispitivanje je vršeno tokom svake druge godine, kao što je to definisano u [60].

Prekidači su ispitivani merenjem statičke otpornosti, koje se vrši kada se kontakti nalaze u zatvorenom položaju. Dok se kroz kontakt propušta struja (vrednost koju definiše proizvođač) meri se napon na njihovim krajevima. Time se dobija vrednost pada napona, a ukoliko je potrebna vrednost otpornosti, ona se dobija uz pomoć Omovog zakona deljenjem napona i struje.

Kako je komora za gašenje luka zatvorenog oblika, jedino dostupno mesto za merenje su ulazni i izlazni provodnici, pa će izmerena otpornost R između ove dve tačke biti zbir svih otpornosti kontakata koje se nalaze u tom nizu.

Postupak merenja padova napona (prikazan na slikama od 8.1 do 8.4) koji je korišćen u ovoj disertaciji je sledeći:

- Izvod se isključi, otvaraju su rastavljači (sabirnički i izlazni rastavljač), ubacuju se noževi za uzemljenje (ukoliko to dozvoljava konfiguracija mreže) i postavljaju se pomoćni uzemljivači,
- Izvrši se uključenje prekidača,
- Na priključne krajeve prekidača vezuju se štipaljke ispitnog uređaja za merenje prelazne otpornosti,
- Ispred štipaljki ispitnog uređaja, na priključnom kraju što bliže ulazu u prekidač, postavljaju se štipaljke za merenje pada napona (slika 8.2),
- Pušta se jednosmerna struja $I = 100$ A, i očitava se vrednost pada napona (slika 8.4)

- Postupak se ponavlja na sledeća dva pola prekidača (praksa je takva da se merenje započinje od levog pola prekidača),
- Po završenom merenju prekidač se isključuje i uklanjaju se pomoćni uzemljivači.

Dozvoljene vrednosti padova napona koje je propisao proizvođač [67] navedene u tabeli 8.1.

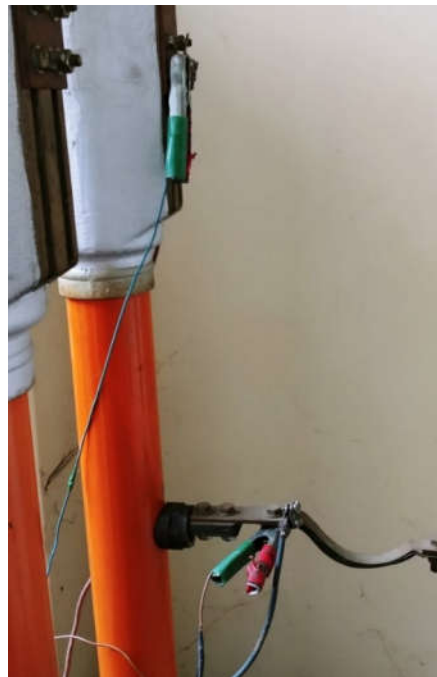
Tabela 8.1 Dozvoljene vrednosti padova napona analiziranih prekidača

Naznačeni napon prekidača [kV]	Jednosmerna struja pri merenju [A]	Naznačena struja prekidača [A]	Dozvoljeni pad napona [mV] +25 %
12 17,5 24	100	500	14
12 17,5 24		630	10
12 17,5 24		800	7,0
12 17,5 24		1250	4,2
12 17,5 24		1600	3,5
35		630	9,0
35		800	7,0
35		1250/1600	4,3

Proizvođač analiziranih prekidača [67] navodi dozvoljeni pad napona prekidača koji su već u pogonu od +25 %. Drugi proizvođač malouljnih prekidača u svom katalogu [66] daje dve različite vrednosti dozvoljenih padova napona u zavisnosti od toga da li se prekidač prvi put pušta u rad ili je već u pogonu. U slučaju prekidača koji je već u pogonu dozvoljeni pad napona je 20 % veći u odnosu na prekidač koji se prvi put stavlja u pogon.



Slika 8.1 35 kV prekidač pripremljen za postupak merenja padova napona



Slika 8.2 Postupak merenja padova napona na 35 kV prekidaču – veza priključnih krajeva



a)



b)

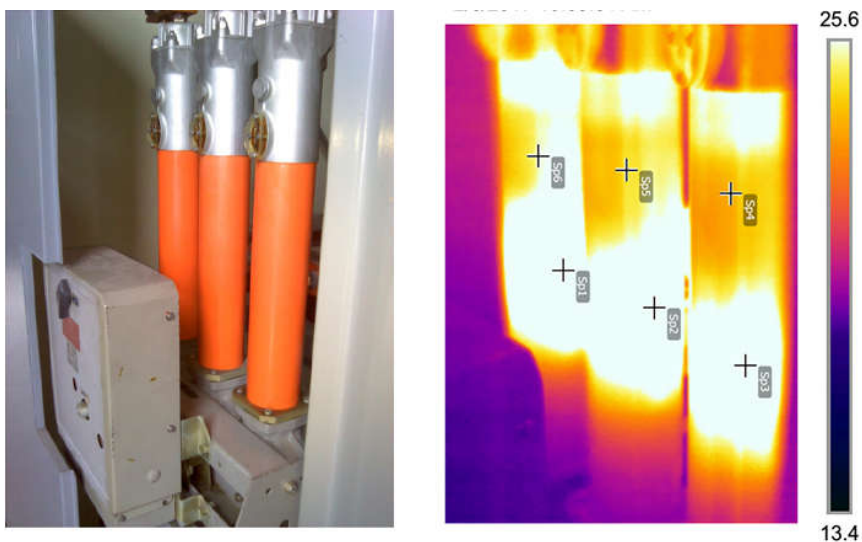
Slika 8.3 Priključni krajevi 10 kV prekidača: a) izlazni kraj, b) ulazni kraj



Slika 8.4 Očitavanje vrednosti pada napona

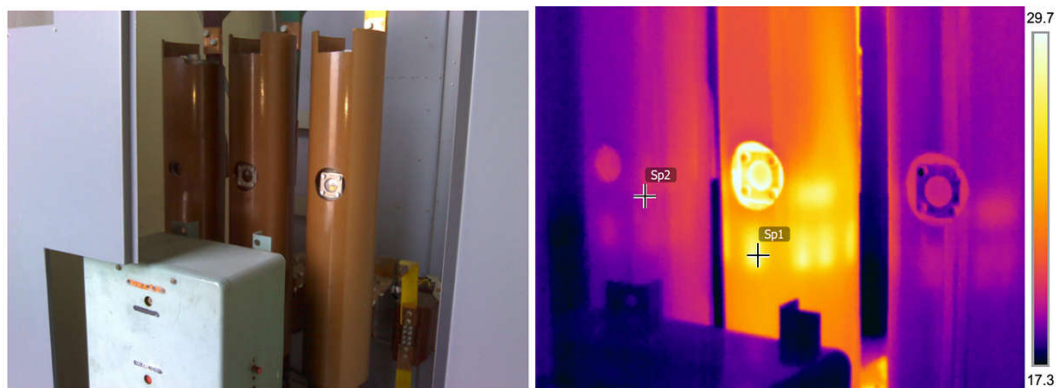
Primer uticaja otpornosti kontakata na zagrevanje prekidača može se uočiti i prilikom sprovođenja termovizijskog snimanja. Termovizijsko ispitivanje prekidača se sprovodi jednom godišnje. Primer izvršene termovizije dva 6 kV prekidača je prikazan na slikama 8.5 i 8.6. Na desnoj slici 8.5 može se jasno uočiti postojanje tačaka sa znatno većom razlikom temperature, u predelu gde se nalaze kontakti prekidača. Slična situacija je i na slici 8.6 gde se čak mogu jasno videti „ruže“ kontakata prekidača.

Kod prekidača sa slike 8.5, dozvoljeni pad napona na polovima je 7 mV dok je u trenutku vršenja termovizije izmerena vrednost bila sledeća (levi, srednji i desni pol): 33 mV, 35 mV, 31 mV. Za prekidač sa slike 8.6 izmerene su sledeće vrednosti pada napona: 41 mV, 37 mV, 39 mV, od dozvoljenih 7 mV.



Slika 8.5 Termovizijski snimak zagrevanja kontakta prekidača

Razlike između izmerene temperature najtoplije tačke i temperature okoline (slika 8.5) na mestu S_{p1} je $36.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, dok je na mestu S_{p6} iznosi $34.9\text{ }^{\circ}\text{C}$.

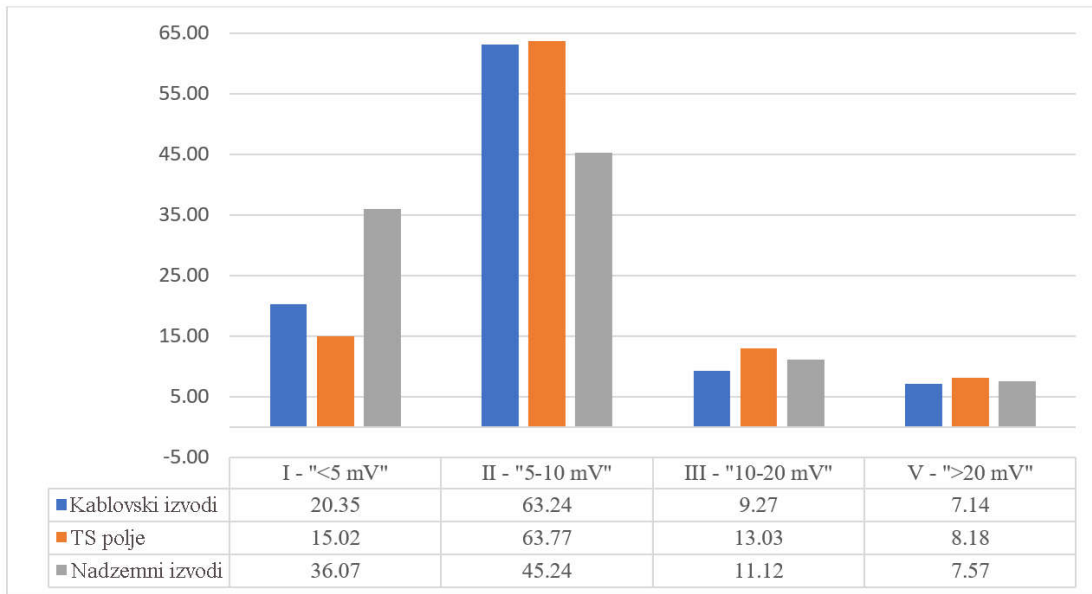


Slika 8.6 Termovizijski snimak zagrevanja „ruža“ kontakta prekidača

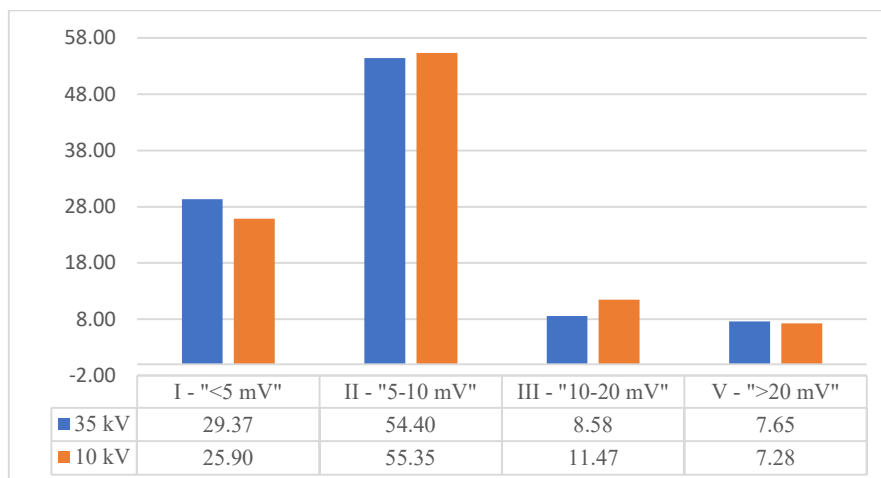
Pri opterećenju od $I = 300\text{ A}$ razlika temperature najtoplije tačke u odnosu na temperaturu okoline (slika 8.6) u tački S_{p1} je $38\text{ }^{\circ}\text{C}$, a u tački S_{p2} je $29,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

8.1 ANALIZA PRIKUPLJENIH PODATAKA

Analiza starenja prekidača u ovoj disertaciji izvršena je na osnovu 13-ogodišnjih podataka sa 427 SN (10 kV i 35 kV) malouljnih prekidača iz 42 TS 35/10 kV/kV. Na slikama 8.7 i 8.8 prikazane su raspodele merenih vrednosti padova napona [126], koje su podeljene u četiri različite kategorije, tokom prvog perioda prikupljanja podataka (2007-2017).



Slika 8.7 Raspodela padova napona za svaki tip voda



Slika 8.8 Raspodela padova napona u odnosu na naponski nivo

8.1.1 ODREĐIVANJE RASPODELE OTKAZA USLED PREKORAČENOG PADA NAPONA

U poglavlju 5.2 predstavljene su najčešće korišćene raspodele životnog veka. Weibulova raspodela pruža najbolji uvid u stanje analiziranih prekidača, jer se interpretacijom njenih parametara mogu doneti bitni zaključci vezani za njihovo stanje. Parametri raspodele pored trenutnog stanja prekidača (da li se starenje ubrzava i kojim tempom) pokazuju i vreme do njegovog otkaza. Proračunom koeficijenta korelacije nad unetim podacima utvrđeno je da postoji visok nivo poklapanja sa Weibulovom raspodelom. Vrednosti koeficijenta korelacije (ρ) prikazane su u tabeli 8.2.

Analiza rizika od otkaza prekidača je izvršena sa podacima iz dva različita vremenska perioda. U prvom periodu raspolagalo se sa podacima iz perioda od 2007 do 2017 godine. U međuvremenu su prikupljeni novi podaci zaključno sa 2020 godinom. Samim tim, sagledano je poklapanje većeg broja podataka sa trendom iz prethodnog perioda. U oba slučaja sagledana je razlika između koeficijenata korelacije i parametra Vejbulove raspodele. U tabeli 8.2 su uporedo predstavljene vrednosti koeficijenata korelacije kroz 10 različitih potkategorija za oba vremenska perioda. Kako drugi vremenski period (u trajanju od tri godine) ne sadrži dovoljno podataka da bi se analizirao samostalno (jer se ispitivanja prekidača vrši na dve godine), vršena je analiza celokupnih podataka.

Tabela 8.2 Vrednosti koeficijenta korelacije za I i II period

Tip izvoda	Koeficijenti korelacije	
	I period 2007-2017	II period 2007-2020
Nadzemni +25 %	0.985	0.986
Nadzemni	0.993	0.997
Kablovski +25 %	0.976	0.984
Kablovski	0.965	0.977
10 kV izvodi +25 %	0.988	0.995
10 kV izvodi	0.989	0.992
35 kV izvodi +25 %	0.972	0.971
35 kV izvodi	0.984	0.989
Svi izvodi +25 %	0.989	0.988
Svi izvodi	0.990	0.993

Na osnovu tabele 8.2 može se zaključiti da sa povećanjem uzorka podataka dolazi do većeg približavanja bliskosti podataka Vejbulovoj raspodeli (što je vrednost koeficijenta ρ bliža jedinici, to je veća podudarnost Vejbulovoj raspodeli) [127]. Na osnovu tabele 8.2 zaključuje se da su prikupljeni podaci otkaza prekidača na osnovu prekoračenih padova napona veoma bliski Vejbulovoj raspodeli.

Kao rezultati proračuna formirani su sledeći grafici (prilozi 1 i 2):

- nepouzdanost [%],
- pouzdanosti,
- nepouzdanosti,
- gustine raspodele verovatnoće,
- intenziteta otkaza i
- raspodele Vejbulovih parametara.

Tokom kompletne analize korišćena je Weibulova raspodela sa 2 parametra (β – parametar oblika i η – parametar razmere). Za procenu parametara Weibulove raspodele postoji više statističkih metoda, kao što su: metoda momenata, metoda procenata (eng. method of percentile), metoda maksimalne verovatnoće i Bajesova metoda (eng. Bayesian method). U matematičkom modelu pri određivanju parametara Weibulove raspodele korišćena je metoda najmanjih kvadrata [128, 129].

Koristeći Weibulovu raspodelu izračunata je Weibulova kumulativna funkcija raspodele za sve kategorije prekidača. U tabeli 8.3 predstavljeni su dobijeni parametri raspodele za dva posmatrana vremenska perioda.

Tabela 8.3 Weibulovi parametri za I i II period

Tip izvoda	I period: 2007-2017			II period: 2007-2020		
	η	β	Otkazali / Ispravni	η	β	Otkazali / Ispravni
Nadzemni +25 %	39.09	5.147	100/87	39.42	5.069	111/78
Nadzemni	37.08	4.797	131/56	37.42	4.935	141/48
Kablovski +25 %	41.54	6.055	63/169	44.52	5.268	66/167
Kablovski	38.09	6.070	97/135	40.23	5.490	101/134
10 kV izvodi +25 %	43.44	5.627	87/224	45.50	5.100	97/215
10 kV izvodi	40.39	5.071	135/176	42.00	4.918	142/172
35 kV izvodi +25 %	35.24	5.593	79/31	35.78	5.419	80/30
35 kV izvodi	33.83	5.615	96/14	34.14	5.662	99/11
Svi izvodi +25 %	40.37	5.582	166/255	41.77	5.206	177/245
Svi izvodi	37.98	5.281	231/190	39.16	5.134	242/182

Iz tabele 8.3, u kojoj su prikazane vrednosti parametara Weibulove raspodele za oba vremenska perioda kroz 10 potkategorija, uočava se povećanje broja otkazalih prekidača u rasponu od poslednje tri godine (na osnovu upoređivanja podataka iz I i II perioda). Samim tim može se uočiti da vrednosti parametara Weibulove raspodele prate trend promena stanja prekidača [128].

Na osnovu tabele 8.3, u kojoj su prikazane dobijene vrednosti Weibulovih parametara β i η , može se posmatrati starost prekidača i uticaj pojedinih kategorija na njegovo stanje. Prikazani Weibulovi parametri za svaki tip izvoda i naponski nivo su razvrstani i po kriterijumu vrednosti pada napona na normalnu vrednost pada napona i vrednost koja je povišena za 25 % (vrednost odabrana na osnovu preporuka proizvođača). Vrednost parametra β pokazuje da su

prekidači na kablovskim izvodima ($\beta \sim 6$) u gorem stanju u odnosu na nadzemne izvode ($\beta \sim 5$), tj. imaju odmakli stadijum habanja.

Sa druge strane η parametar pokazuje da je kod 10 kV prekidača sa +25 % dozvoljene vrednosti pada napona najduži period dostizanja 63.2 % otkazalih prekidača. Na osnovu sprovedene analize pokazuje se da je najkraće vreme otkaza prekidača kod 35 kV izvoda i iznosi oko 35 god.

8.1.2 ODREĐIVANJE RASPODELE OTKAZA USLED PREKORAČENOG BROJA PREKINUTIH STRUJA KRATKOG SPOJA

Za modeliranje verovatnoće otkaza prekidača usled dostignutog maksimalnog broja isključenih struja kratkog spoja koristi se Puasonova raspodela, jer je verovatnoća dostizanja maksimalnog broja operacija pri isključenju struje kratkog spoja u toku naredne godine diskretna funkcija, sa približno ujednačenim intenzitetom tokom godine.

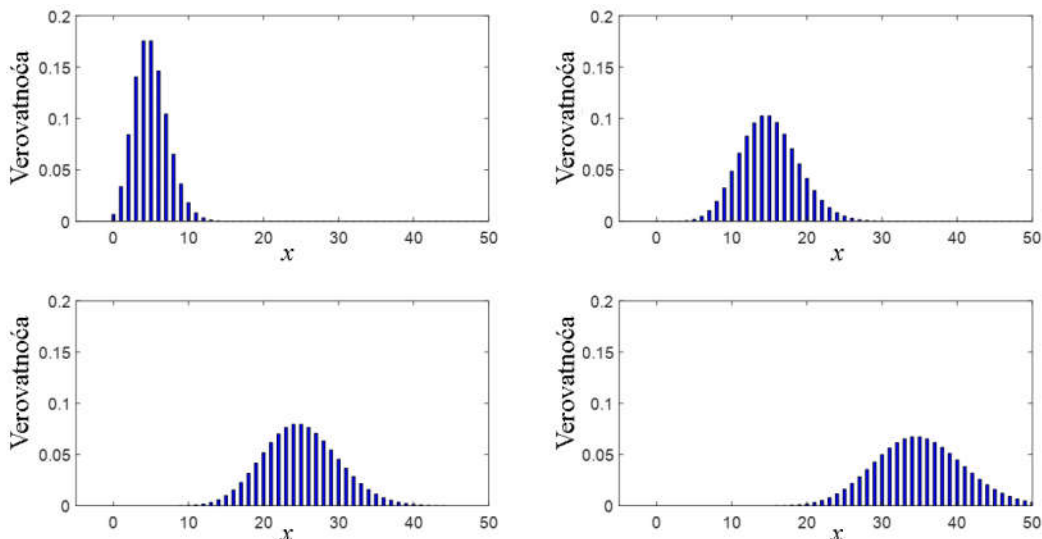
Potvrda ispravnosti upotrebe Puasonove raspodele vrši se hi kvadratnim testom (poglavlje 7.1.2). Kod analiziranih prekidača hi kvadratni test je pokazao poklapanje sa Puasonovom raspodelom kod 89 % prekidača [128].

Kvarovi u električnoj mreži su uslovljeni konfiguracijom terena, kvalitetom mreže, kao i meteorološkim karakteristikama područja. Iz tog razloga broj kvarova može biti promenljiv iz godine u godinu. U svrhu ove analize, za proračun verovatnoće prekoračenja maksimalnog broja prekinutih struja kvara, smatra se da se uslovi u mreži neće bitno menjati, tj. da intenzitet pojave kvarova tokom godina neće značajno varirati.

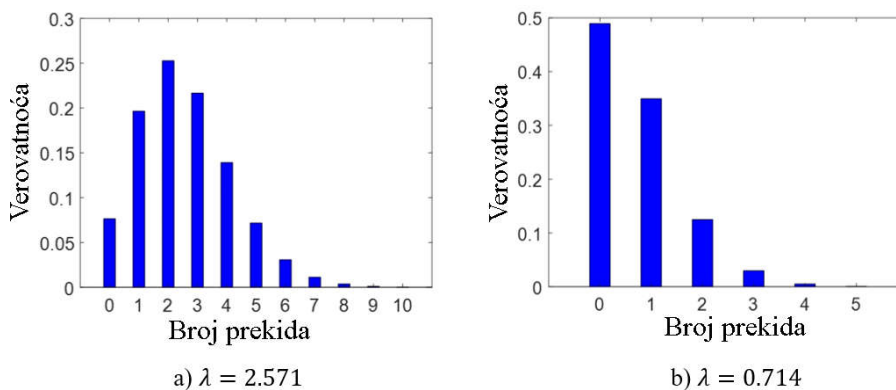
Pomoću Puasonove raspodele određuje se verovatnoća otkaza prekidača u narednoj godini na osnovu istorije kvarova. Sličan način proračuna je već korišćen u drugim radovima. Tako je u [114] Puasonova raspodela iskorišćena za modeliranje kvarova komponenata u EES, koristeći statističke podatke održavanja i popravke.

Nakon prekoračenog broja isključenja naznačene struje kratkog spoja maloljni prekidači [67] moraju biti remontovani, pri čemu bi im bila zamenjena komora za gašenje luka i ulje. Maksimalni broj prekinutih struja kratkog spoja zavisi od veličine struje kratkog spoja. Zbog ilustracije u prilogu 3 je predstavljena Puasonova raspodela za maksimalno dozvoljeni broj prekinutih struja kratkog spoja od 6 i od 20 isključenja.

Verovatnoća dostizanja maksimalnog broja prekida struje kratkog spoja u narednoj godini p_2 se izračunava kao u formuli (5.28). Na slici 8.9 kao ilustracija predstavljena je Puasonova raspodela za četiri različite vrednosti parametra λ , dok je na slici 8.10 prikazana Puasonova raspodela za analizirane prekidače (prilog 3).



Slika 8.9 Puasonova raspodela za različite vrednosti λ (5, 15, 25, 35)



Slika 8.10 Puasonova raspodela za slučaj iz priloga 3:

a) tabela p3. 2 , vrsta 23; b) tabela p3.1, vrsta 1

Primer proračuna hi kvadratnog testa, tj. da li broj kvarova na jednom izvodu odgovara Puasonovoj raspodeli, biće predstavljen na primeru jednog prekidača. Na analiziranom 10 kV izvodu br. 24 (prilog 3, tabela p3.3) zabeležen je broj isključenja struja kratkog spoja u periodu od 7 godina i vrednosti su prikazane u tabeli 8.4.

Tabela 8.4 Broj zabeleženih isključenja struja kratkog spoja na jednom 10 kV izvodu

Godina	Br. pojave I_{ks}
2013	0
2014	0
2015	0
2016	0
2017	0
2018	1
2019	1

Na osnovu tabele kvarova formira se tabela intenziteta pojave kvarova u posmatranom periodu, što je i prikazano u tabeli 8.5.

Tabela 8.5 Intenzitet pojave kvarova u periodu od 7 godina

Br. kvarova (k)	Intenzitet (O)
0	5
1	2
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0
>10	0

Sa k je označen broj kvarova na uzorku od $n=7$, što predstavlja broj godina tokom kojih je praćeno isključenje prekidača usled struja kratkog spoja (tabela 8.4). Tako, na primer, tokom pet godina nije bilo kvarova, dok se jedan kvar dogodio dva puta (tabela 8.5).

Provera opravdanosti upotrebe Puasonove raspodele vrši se kroz dve pretpostavke:

1. Nulta pretpostavka: H_0 : podaci X podležu Puasonovoj raspodeli - $X \sim Poisson$,
2. Alternativna pretpostavka: H_1 : podaci X ne podležu Puasonovoj raspodeli.

Procena srednje vrednosti Puasonove raspodele se vrši na sledeći način:

$$\lambda = \frac{(0 \cdot 5 + 1 \cdot 2 + 2 \cdot 0 + 3 \cdot 0 + 4 \cdot 0 + 5 \cdot 0 + 6 \cdot 0 + 7 \cdot 0 + 8 \cdot 0 + 9 \cdot 0 + 10 \cdot 0)}{7} \quad (8.1)$$

$$\lambda = 0.2857$$

Puasonova verovatnoća pojave kvara, za $k=0$, se računa na sledeći način:

$$p_0 = P(k = 0) = \frac{e^{-0.2857} (0.2857)^0}{0!} = 0.7515, \quad (8.2)$$

dok je očekivani broj događaja:

$$E_0 = p_0 \cdot n = 0.7515 \cdot 7 = 5.26. \quad (8.3)$$

Očekivane vrednosti pojave događaja izračunate na osnovu prikazanog postupka predstavljene su u tabeli 8.6.

Tabela 8.6 Tabela očekivanih vrednosti kvarova

Br. kvarova (k)	Puasonova verovatnoća	Zabeležen broj događaja (O_i)	Očekivani broj događaja (E_k)
0	0.7515	5	5.2603
1	0.2147	2	1.5030
2	0.0307	0	0.2147
3	0.0029	0	0.0204
4	0.0002	0	0.0015
5	0.0000	0	0.0001
6	0.0000	0	0.0000
7	0.0000	0	0.0000
8	0.0000	0	0.0000
9	0.0000	0	0.0000
>10	0.0000	0	0.0000

Hi kvadratna vrednost se dobija formulom (7.10):

$$\begin{aligned} \chi^2 &= \sum_{i=0}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} = \\ &= \frac{(5 - 5.2603)^2}{5.2603} + \frac{(2 - 1.5030)^2}{1.5030} + \frac{(0 - 0.2147)^2}{0.2147} + \frac{(0 - 0.0015)^2}{0.0015} \dots \\ \chi^2 &= 0.4139. \end{aligned} \quad (8.4)$$

Kod Puasonove raspodele broj stepeni slobode je $k - 2$, jer je samo jedan parametar procenjen iz uzorka podataka, to jest:

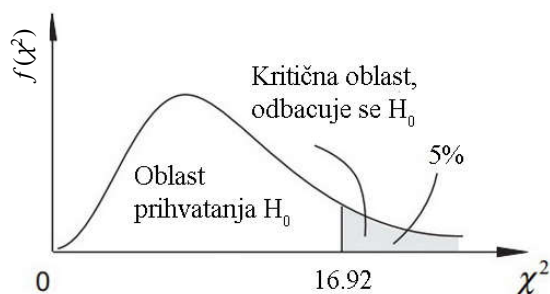
$$k - g - 1 = 11 - 1 - 1 = 9. \quad (8.5)$$

Tabela 8.7 Tablica graničnih vrednosti [123]

Stepeni slobode	Nivoi značajnosti								
	0.995	0.99	0.975	0.95	0.9	0.1	0.05	0.025	0.01
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	2.71	3.84	5.02	6.63
2	0.01	0.02	0.05	0.10	0.21	4.61	5.99	7.38	9.21
3	0.07	0.11	0.22	0.35	0.58	6.25	7.81	9.35	11.34
4	0.21	0.30	0.48	0.71	1.06	7.78	9.49	11.14	13.28
5	0.41	0.55	0.83	1.15	1.61	9.24	11.07	12.83	15.09
6	0.68	0.87	1.24	1.64	2.20	10.64	12.59	14.45	16.81
7	0.99	1.24	1.69	2.17	2.83	12.02	14.07	16.01	18.48
8	1.34	1.65	2.18	2.73	3.49	13.36	15.51	17.53	20.09
9	1.73	2.09	2.70	3.33	4.17	14.68	16.92	19.02	21.67
10	2.16	2.56	3.25	3.94	4.87	15.99	18.31	20.48	23.21

U tabeli 8.7 se na osnovu broja stepeni slobode (a to je 9) i nivoa značajnosti od 0.05, očitava vrednost od 16.92. Tablica graničnih vrednosti χ^2 pokazuje kolika je najveća vrednost izračunatog χ^2 pri kojoj pretpostavka može biti prihvaćena [130].

Ukoliko je $\chi^2 < 16.92$ smatra se da je nulta pretpostavka tačna, tj. da ne postoji dokaz za odbacivanje pretpostavke da podaci prate Puasonovu raspodelu (slika 8.11).



Slika 8.11 Prikaz regiona u kome je pretpostavka ispravna

Proračun koji je predložen u ovom poglavlju primenjen je nad podacima o broju prekida struje kratkog spoja. Kompletan proračun je prikazan u prilogu 3, u tabeli p3.3. Sproveden proračun pokazuje poklapanje unetih podataka sa Puasonovom raspodelom kod većine prekidača (89 %).

8.1.3 REZULTATI PRORAČUNA RIZIKA

U disertaciji je demonstriran proces procene rizika koristeći podatke populacije od 427 prekidača iz različitih kategorija. U prilogu 5 prikazana je tabela p5.1 sa vrednostima

verovatnoća, troškova i rizika svih prekidača, dok su u tabeli 8.8 izdvojeni podaci za 25 prekidača sa najvećim rizikom. Za verovatnoću otkaza usled prekoračene vrednosti pada napona proračun je izvršen korišćenjem kriterijuma „svi izvodi +25%“, dok je verovatnoća otkaza usled prekoračenog broja prekinutih struja kratkog spoja dobijen za graničnu vrednost od 10 prekida.

Rezultati rizika prekidača pokazuju da se proces njihovog starenja može odrediti i pomoću izmerenih vrednosti padova napona i broja isključenih struja kratkog spoja. Iako bi detaljnija baza podataka (tačna evidencija svih intervencija koje su vršene na prekidaču) omogućila dodatni uvid u stanje prekidača, njihovo postojanje gotovo da se ne može očekivati u većini DEES. Sa druge strane svi podaci korišćeni u ovoj analizi su već dostupni i obrada podataka ne zahteva nikakva finansijska ulaganja, povećano angažovanje radne snage ili upotrebu posebne opreme, te se iz tog razloga može iskoristiti za brzu analizu i dobijanje uvida u stanje prekidača.

Koristeći predloženi pristup mogu se dobiti informacije na osnovu kojih se omogućava planiranje održavanja prekidača u budućnosti, planiranje zamene ili budućih investicija. Samim tim, moguće je analizirati opravdanost njihove zamene u odnosu na njihovo održavanje nakon perioda prekoračenja ekonomskog životnog veka.

Tabela 8.8 Prekidači sa najvećim rizikom

R.br.	Br. Izvoda	U_n [kV]	Tip voda	Godište prekidača	p_2	p_1	Troškovi C [€]	Rizik [€]
1	107	10	TS polje	1971	0	0.8916	84000	224673.2
2	106	10	TS polje	1971	0	0.8916	79500	212637.1
3	111	35	nadzemni	1980	0	0.5531	128100	212542.0
4	112	10	TS polje	1980	0	0.5531	123900	205573.4
5	164	35	nadzemni	1979	0.208266	0.5979	73800	178494.9
6	143	10	TS polje	1980	0	0.5531	93600	155300.0
7	203	35	nadzemni	1980	0	0.5531	92400	153309.0
8	202	35	nadzemni	1980	0	0.5531	90300	149824.7
9	204	10	TS polje	1980	0	0.5531	84000	139371.8
10	144	10	TS polje	1980	0	0.5531	82800	137380.8
11	217	35	nadzemni	1980	0	0.5531	82500	136883.0
12	218	10	TS polje	1980	0	0.5531	79500	131905.4
13	82	35	nadzemni	1970	0	0.9144	48000	131669.0
14	98	10	TS polje	1977	0	0.6853	63000	129523.5
15	134	10	TS polje	1980	8.28E-10	0.5531	78000	129416.7
16	219	35	nadzemni	1980	0	0.5531	78000	129416.7
17	139	10	TS polje	1977	0	0.6853	61200	125822.8
18	210	10	TS polje	1980	0	0.5531	74400	123443.6
19	239	35	nadzemni	1972	0	0.8652	46800	121473.6
20	209	35	kablovski	1980	0	0.5531	68400	113488.5
21	13	35	TS polje	1977	5.92E-14	0.6853	54000	111020.1
22	14	10	TS polje	1977	5.92E-14	0.6853	52200	107319.4
23	156	10	TS polje	1980	0	0.5531	63600	105524.4
24	76	10	TS polje	1980	0	0.5531	63000	104528.8
25	149	35	nadzemni	1980	0.000758	0.5531	61200	101681.6

U prethodnoj tabeli p_1 je verovatnoća otkaza prekidača usled prekoračenja dozvoljene vrednosti pada napona na polovima prekidača, dok je p_2 verovatnoća otkaza usled prekoračenog broja isključenih struja kratkog spoja.

9 UTICAJ STANJA PREKIDAČA NA RASPOLOŽIVOST TS

9.1 ODREĐIVANJE RASPOLOŽIVOSTI TS

Primer analize pokazatelja pouzdanosti postrojenja biće prikazan na jednoj TS 35/10 kV/kV, koja poseduje dva transformatora 35/10 kV/kV od 8 MVA, po jedan sistem sabirnica 10 kV i 35 kV, dva nadzemna dovoda 35 kV i deset 10 kV izvoda [124, 129, 131]. Jednopolna šema TS je prikazana na slici 9.1.

Na osnovu jednopolne šeme i definicija iz poglavlja 6 sačinjena je šema funkcionalnih blokova za datu TS, koja je prikazana na slici 9.2. Funkcionalni blokovi „K“ i „S“ su skoro identični i obuhvataju 35 kV dovode u TS. Ove funkcionalne blokove čine: linijski rastavljač sa uzemljivačem, prekidač 35 kV, jedan naponski transformator i 3 strujna transformatora. Blok „S“ ne sadrži strujne transformatore jer se izvod štiti u izvornoj TS. Po definiciji, ispad (ili remont) bilo kog elementa u bloku zahteva stavljanje van pogona svih ostalih elemenata koji čine funkcionalni blok.

Blokovi „M“ i „N“ su identični i obuhvataju po dva 35 kV rastavljača. Obnavljanje blokova „M“ i „N“ zahteva isključenje cele TS.

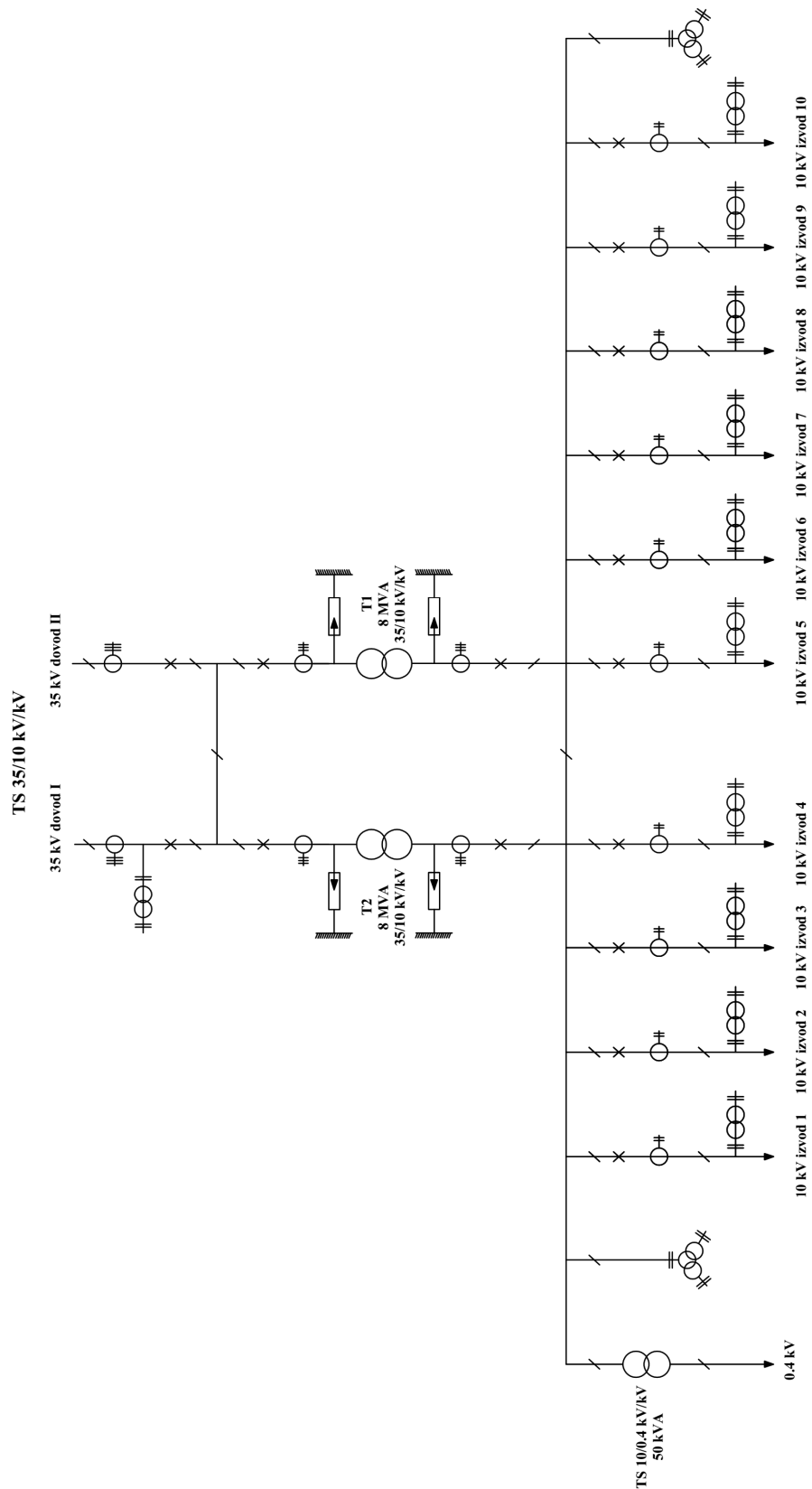
Blok „A“ je sekcioni rastavljač na 35 kV sabirnicama, koji je u normalnom pogonu zatvoren. Njime se manipuliše u retkim situacijama i može se smatrati da je verovatnoća njegovog kvara jako niska. Isti je slučaj i sa sekcionim rastavljačem na 10 kV sabirnicama koji je predstavljen funkcionalnim blokom „B“. Međutim, ukoliko dođe do toga da je potrebna njihova zamena/remont, potrebno je isključenje cele TS.

Blokovi „T1“ i „T2“ obuhvataju TS polja. Jedan blok čine: dva prekidača (10 kV i 35 kV), transformator, šest odvodnika prenapona (tri na 10 kV i tri na 35 kV strani) i šest strujnih transformatora (tri na 10 kV i tri na 35 kV strani). U slučaju ispada/remonta jednog TS polja svi izvodi se mogu nesmetano napajati preko drugog transformatora.

Blokovi „L“ i „J“ predstavljaju 10 kV rastavljače. Svaki blok obuhvata rastavljač TS polja i rastavljač 10 kV izvoda.

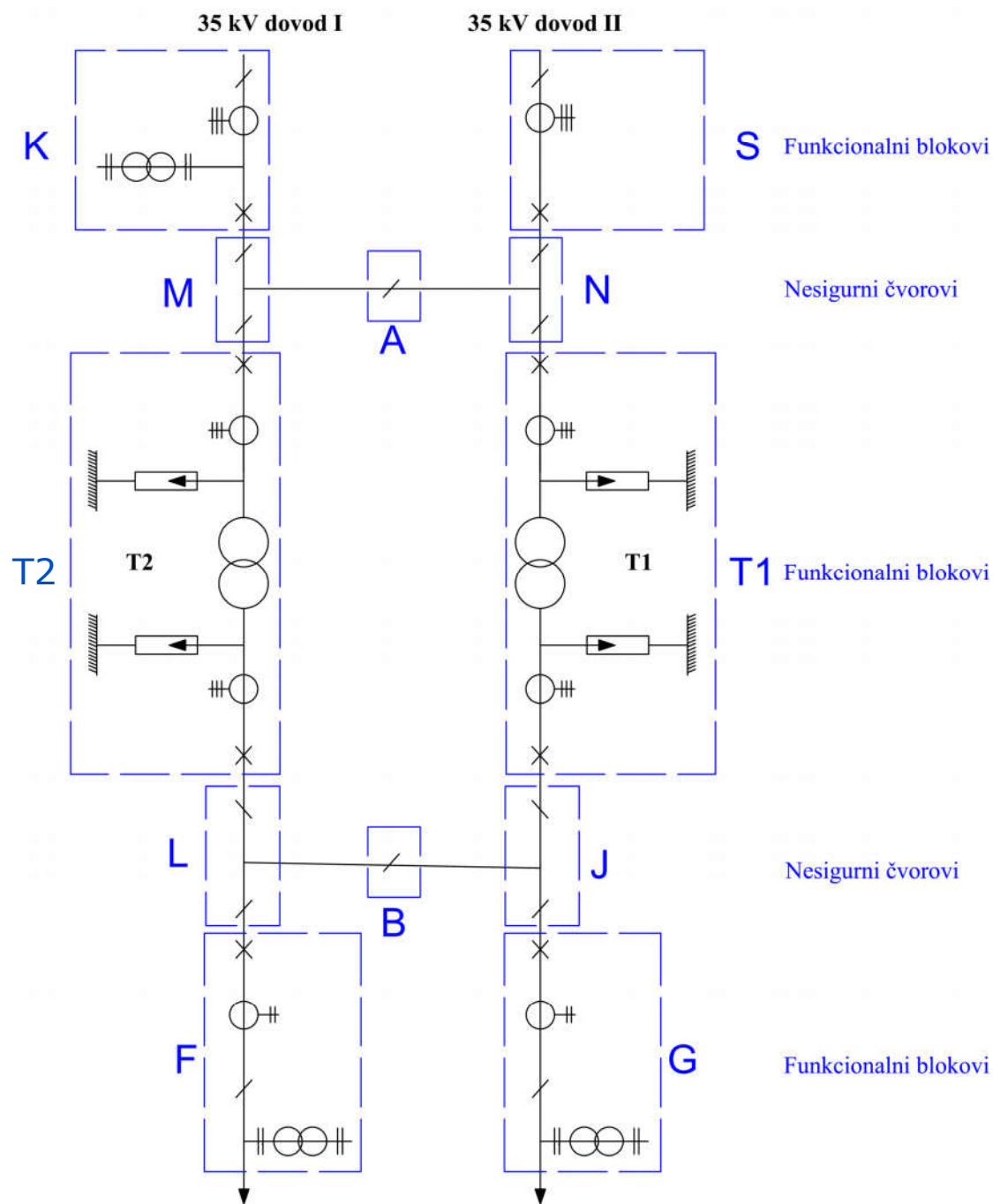
Blokovi „F“ i „G“ predstavljaju 10 kV izvode. Jedan blok se sastoji od: 10 kV prekidača, dva strujna transformatora, izlaznog rastavljača sa uzemljivačem i obuhvatnim transformatorom.

Za potrebe ovog proračuna uzeta su samo dva od ukupno deset 10 kV izvoda koja mogu biti vezana u „prsten“ tj. napajati iste potrošače. Na osnovu šeme funkcionalnih blokova, na slici 9.3 je prikazan funkcionalni graf za datu TS.

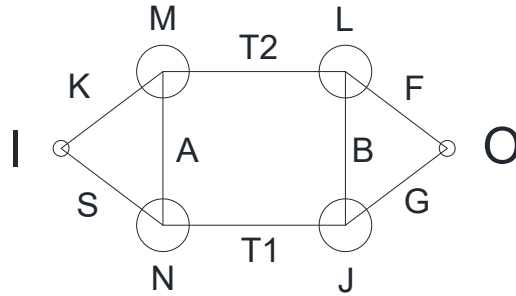


Slika 9.1 Jednopolna šema razmatrane TS 35/10 kV/kV

TS 35/10 kV/kV



Slika 9.2 Funkcionalni blokovi i nesigurni čvorovi TS sa slike 9.1



Slika 9.3 Funkcionalni graf za posmatrano postrojenje

9.1.1 METODA MINIMALNIH PUTEVA

U konkretnom slučaju (na osnovu slike 9.3) broj čvorova grafa je $m=6$, na osnovu čega se dobija matrica povezanosti C , dimenzija 6×6 . Kao što je rečeno, element matrice C_{ij} predstavlja granu koja povezuje čvorove „ i “ i „ j “, pa je:

$$C = \begin{bmatrix} 0 & K & S & 0 & 0 & 0 \\ K & 0 & A & T2 & 0 & 0 \\ S & A & 0 & 0 & T1 & 0 \\ 0 & T2 & 0 & 0 & B & F \\ 0 & 0 & T1 & B & 0 & G \\ 0 & 0 & 0 & F & G & 0 \end{bmatrix}. \quad (9.1)$$

Nakon svih proračuna (predstavljenih u poglavlju 6) za posmatrani funkcionalni graf, dobijaju se sledeći minimalni putevi:

- III: $FKT_2, SGT_1,$
- IV: $KAT_1G, KT_2BG, SAT_2F, ST_1BF,$
- V: $KAT_1BF, SAT_2BG.$

9.1.2 METODA MINIMALNIH PRESEKA

Za određivanje minimalnih preseka koriste se prethodno dobijeni minimalni putevi. Ukoliko su minimalni putevi dati sledećim redom:

$FKT_2; SGT_1; KAT_1G; KT_2BG; SAT_2F; ST_1BF; KAT_1BF; SAT_2BG,$

a grane su definisane u sledećem redosledu:

$K, S, A, T_1, T_2, B, F, G,$

za graf sa slike 9.3 matrica minimalnih puteva je:

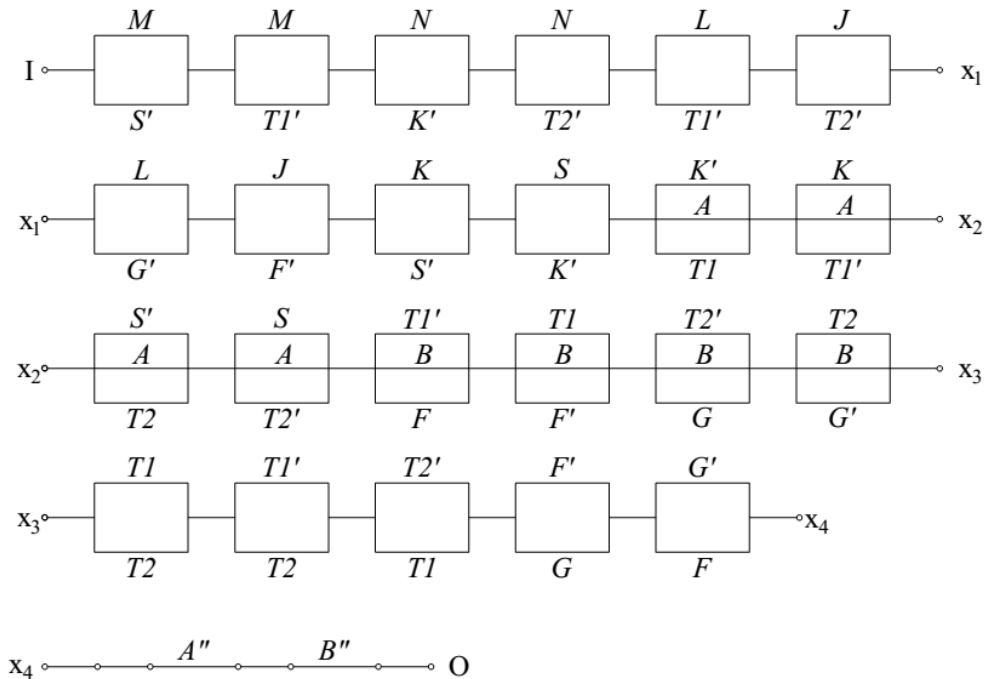
$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (9.2)$$

Nakon sprovedenog proračuna (poglavlje 6) dobijeni su sledeći minimalni preseci:

II: $K-S, T_1-T_2, F-G,$

III: $K-A-T_1, S-A-T_2, T_1-B-F, T_2-B-G.$

Graf sa minimalnim presecima je prikazan na slici 9.4, i sastoji se iz redne veze svih minimalnih preseka.



Slika 9.4 Ekvivalentni graf sa minimalnim presecima

Koristeći vrednosti pokazatelja pouzdanosti elemenata postrojenja iz [48, 132] (prilog 4, tabela p4.1), izračunate neraspoloživosti prekidača (prilog 4, tabela p4.2), kao i izračunatih

vrednosti pokazatelja pouzdanosti prekidača (tabele p4.3 i p4.4), izračunati su pokazatelji pouzdanosti cele TS (detaljan postupak proračuna prikazan je u prilogu 4).

Koristeći pokazatelje pouzdanosti prekidača iz tekuće godine, neraspoloživost i intenziteta otkaza za ceo ekvivalentni graf dobijaju se na sledeći način:

$$\begin{aligned}
 U_{TS} = & U_{T1,T2} + 2 \cdot U_{T1',T2} + 2 \cdot U_{M,S'} + 2 \cdot U_{M,T1'} + 2 \cdot U_{L,T1'} + 2 \cdot U_{L,G'} \\
 & + 2 \cdot U_{K,S'} + 2 \cdot U_{A,T1,K'} + 2 \cdot U_{A,K,T1'} + 2 \cdot U_{B,F,T1'} \\
 & + 2 \cdot U_{B,T1,F'} + 2 \cdot U_{F',G} + 2 \cdot U_{A''} = 5.02E - 05,
 \end{aligned} \quad (9.3)$$

$$\begin{aligned}
 \lambda_{TS} = & \lambda_{T1,T2} + 2 \cdot \lambda_{T1',T2} + 2 \cdot \lambda_{M,S'} + 2 \cdot \lambda_{M,T1'} + 2 \cdot \lambda_{L,T1'} + 2 \cdot \lambda_{L,G'} \\
 & + 2 \cdot \lambda_{K,S'} + 2 \cdot \lambda_{A,T1,K'} + 2 \cdot \lambda_{A,K,T1'} + 2 \cdot \lambda_{B,F,T1'} \\
 & + 2 \cdot \lambda_{B,T1,F'} + 2 \cdot \lambda_{F',G} + 2 \cdot \lambda_{A''} = 0.050821 (1/god).
 \end{aligned} \quad (9.4)$$

9.2 EKONOMSKI ASPEKTI ZAMENE PREKIDAČA

Ekonomski proračun isplativosti zamene prekidača analiziraće se kroz nekoliko scenarija koji obuhvataju zamenu jednog ili više prekidača.

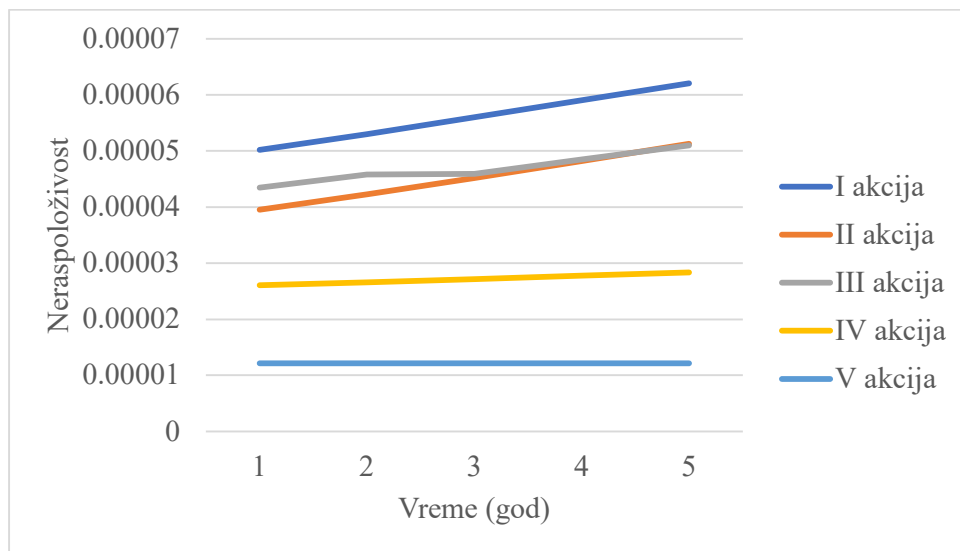
U tabeli 9.1 predstavljene su vrednosti neraspoloživosti odnosno intenziteta otkaza cele TS, na osnovu vrednosti iz tabela p4.3 i p4.4. Analiziran je uticaj zamene prekidača na neraspoloživost TS kroz sprovođenje 5 različitih akcija:

I akcija	bez zamene prekidača,
II akcija	zamena prekidača svih 10 kV izvoda,
III akcija	zamena prekidača na 35 kV dovodima,
IV akcija	zamena na prekidača u TS poljima,
V akcija	zamena svih prekidača u TS.

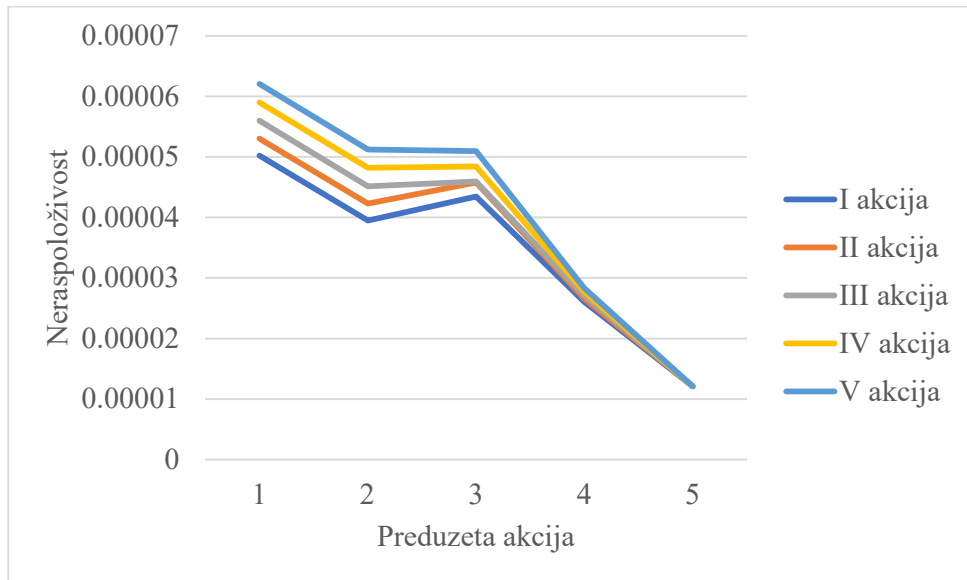
Tabela 9.1 Neraspoloživost i intenzitet otkaza postrojenja u odnosu na trenutak preduzimanja odgovarajuće akcije

Neraspoloživost TS					
Godina	Akcija				
	I	II	III	IV	V
1	5.02E-05	3.95E-05	4.35E-05	2.60374E-05	1.21199E-05
2	5.3E-05	4.23E-05	4.58E-05	2.65873E-05	1.21199E-05
3	5.6E-05	4.52E-05	4.6E-05	2.71543E-05	1.21199E-05
4	5.9E-05	4.82E-05	4.84E-05	2.77324E-05	1.21199E-05
5	6.21E-05	5.13E-05	5.1E-05	2.83174E-05	1.21199E-05
Intenzitet otkaza [1/god]					
Godina	Akcija				
	I	II	III	IV	V
1	0.050821	0.04804	0.048892	0.020085496	0.013694599
2	0.056208	0.053402	0.05408	0.020792094	0.013694599
3	0.062237	0.059369	0.058219	0.021542696	0.013694599
4	0.068804	0.065929	0.064582	0.022327912	0.013694599
5	0.075976	0.073116	0.071562	0.023150517	0.013694599

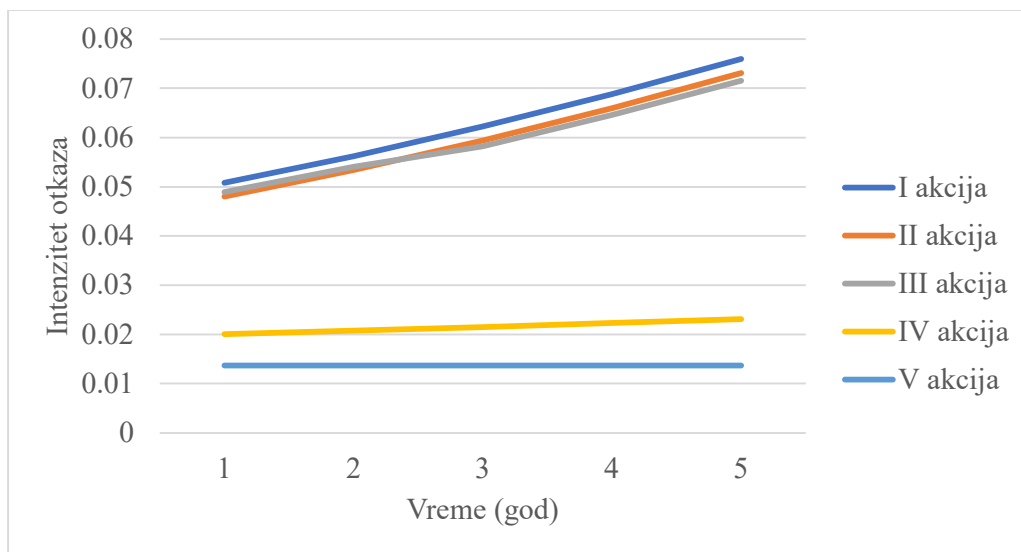
U drugoj i petoj akciji verovatnoća otkaza prekidača usled dostizanja maksimalnog dozvoljenog broja isključenih struja kratkog spoja nema gotovo nikakav uticaj, jer su u tim akcijama zamenjeni svi 10 kV prekidači, koji su u normalnoj eksploataciji najčešće izloženi pojavi kvarova. Grafički prikaz neraspoloživosti, odnosno intenziteta otkaza iz tabela 9.1 predstavljeni su redom na slikama 9.5-9.8, u zavisnosti od trenutka započinjanja akcije i vrste akcije.



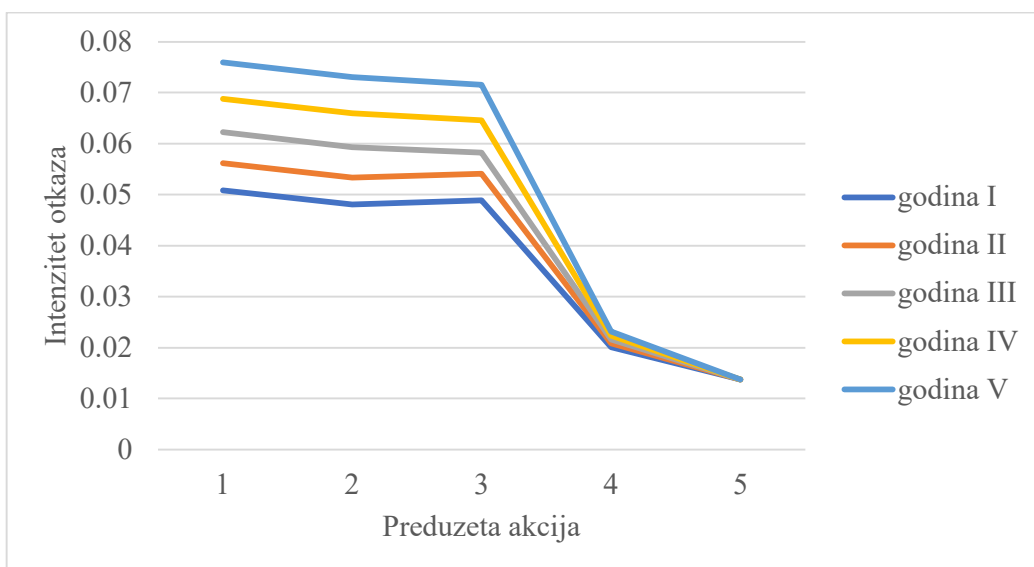
Slika 9.5 Neraspoloživost postrojenja u zavisnosti od trenutka započinjanja akcije (kolone u tabeli 9.1)



Slika 9.6 Neraspoloživost postrojenja za svaki tip akcije (vrste u tabeli 9.1)



Slika 9.7 Intenzitet otkaza u odnosu na trenutak početka akcije



Slika 9.8 Intenzitet otkaza prekidača za svaki tip akcije

Troškovi sprovođenja svake akcije dobijeni su pomoću vrednosti navedenih u tabeli 9.2 [125]. Troškovi su generalno podeljeni na troškove održavanja i troškove zamene prekidača. U proseku po jednom prekidaču vreme održavanja traje 2 h, a vreme zamene 6 h. U zavisnosti od lokacije prekidača u troškove će biti uračunata i neisporučena energija, gde je cena 1 kWh računata sa 5 € [125]. Troškovi angažovanja radne snage će iznositi 100 €/h po radniku [125], a obuhvataće troškove transporta i troškove sitnog materijala i opreme.

Tabela 9.2 Vrednosti korišćene u proračunu troškova

Vrednosti korišćene u proračunu	
Trajanje radova tokom održavanja prekidača	2 [h]
Trajanje zamene prekidača	6 [h]
Broj radnika pri održavanju	2
Broj radnika prilikom zamene	4
Troškovi angažovanja radnika i materijala	100 [€/h]
Prosečna snaga 10 kV izvoda	0.5 [MW]
Cena kWh	5 [€/kWh]
Cena novog 10 kV prekidača	2 000 [€]
Cena novog 35 kV prekidača	5 000 [€]

Očekivani troškovi obuhvataju troškove zamene prekidača (u zavisnosti od izabrane akcije) i stalne troškove održavanja (u proračunu, održavanje se sprovodi jednom godišnje)

preostalih prekidača u TS. Koristeći vrednosti iz tabele 9.2 i proračuna troškova predstavljenog u poglavlju 7.2 (formula 7.11) dobijaju se troškovi izvršenja akcija i oni su prikazani u tabeli 9.3. Primer proračuna troškova održavanja kod I akcije je sledeći:

$$C_I = (\text{trajanje održavanja}[h]) \cdot (\text{br. radnika}) \cdot \left(\text{troškovi dnevnica i materijala} \left[\frac{\text{€}}{h} \right] \right) + (\text{trajanje održavanja}[h]) \cdot (\text{prosečna snaga izvoda}[kW]) \cdot \left(\text{cena električne energije} \left[\frac{\text{€}}{kWh} \right] \right). \quad (9.5)$$

U datom primeru, prilikom održavanja 6 prekidača (dovod i TS polje) kupci neće ostajati bez snabdevanja električnom energijom, pa su u tom slučaju računaju samo troškovi radova. U slučaju ostalih prekidača računaju se troškovi radova i troškovi neisporučene energije. Dati primer se odnosi na situaciju kada dva 10 kV prekidača napajaju prstenastu mrežu,

$$C_I = 2 \cdot (2 \cdot 2 \cdot 100 + 2 \cdot 0,5 \cdot 1000 \cdot 5) + 6 \cdot (2 \cdot 2 \cdot 100) = 13\,200 \text{ [€]}. \quad (9.6)$$

Tabela 9.3 Troškovi izvršenih akcija

	Opis akcije	Održavanje [€]	Zamena [€]	Ukupni troškovi [€]	Vreme otplate [god]
I akcija	Bez zamene prekidača, samo troškovi održavanja	13 200	0	13 200	-
II akcija	Zamena prekidača svih 10 kV izvoda	2 400	38 800	41 200	3,6
III akcija	Zamena prekidača na 35 kV dovodima	12 400	14 800	27 200	18,5
IV akcija	Zamena prekidača u TS poljima	11 600	23 600	35 200	14,7
V akcija	Zamena svih prekidača u TS	0	77 200	77 200	5,8

U tabeli 9.3 dati su troškovi sprovođenja akcija tokom prve godine. Troškovi se dele na troškove zamene prekidača kao i na troškove održavanja starih prekidača koji u određenoj akciji nisu bili predmet zamene. U poslednjoj koloni prikazano je vreme otplate investicije, uzimajući u obzir samo uštedu novca na održavanju prekidača. Primer proračuna vremena otplate za III akciju je:

$$\frac{\text{troškovi zamene (III akcija)}}{\text{uk. održ. – održ. nakon akcije III}} = \frac{14800}{13200 - 12400} = 18.5. \quad (9.7)$$

U tabeli 9.4 su date vrednosti nerasploživosti i intenziteta otkaza TS nakon sprovođenja svake akcije. U koloni „Razlika“ izračunat je odnos dobijen od pokazatelja pouzdanosti u odnosu na I akciju (situacija kada u TS nije bilo nikakvih promena). Primer proračuna razlike prikazan je sledećom formulom:

$$\text{Razlika [\%]} = \frac{U (\text{I akcija}) - U (\text{IV akcija})}{U (\text{I akcija})} \cdot 100\% . \quad (9.8)$$

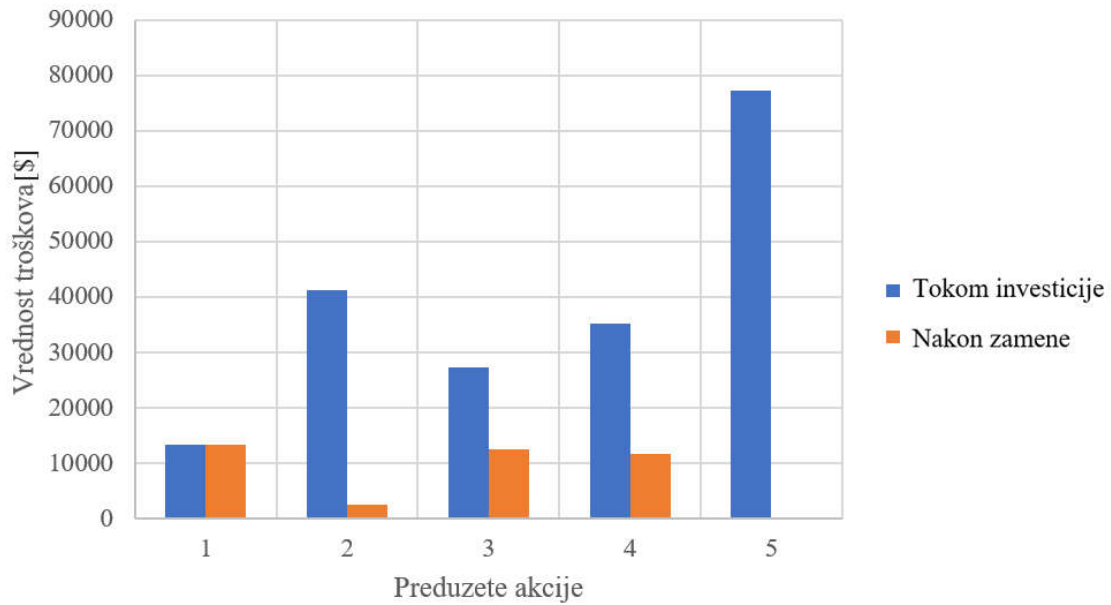
U koloni „Ulaganje“ prikazani su troškovi zamene prekidača iz tabele 9.3, i na kraju u koloni „Odnos“ izračunat je odnos uloženih sredstava u odnosu na ostvareno smanjenje neraspoloživosti TS. „Odnos“ je izračunat deljenjem odgovarajućih vrednosti iz kolone „Razlika“ (tabela 9.4) i kolone „Ukupni troškovi“ (tabela 9.3), na sledeći način:

$$\text{Odnos} = \frac{\text{Razlika [\%]}}{\text{Održavanje [€]} + \text{Zamena [€]}} \cdot 100\% . \quad (9.9)$$

Tabela 9.4 Pokazatelji pouzdanosti nakon preduzete akcije zamene prekidača

Akcija	Pokazatelji	Nakon izvršene akcije	Razlika [%]	Ulaganja [€]	Odnos $U[\%]/[€]$
I Bez zamena	U	5.02E-05	-	-	-
	λ	0.050821	-		
II Zamena prekidača na 10 kV izvodima	U	3.95E-05	21.3	38 800	0.00051
	λ	0.04804	5.47		
III Zamena prekidača na 35 kV dovodima	U	4.35E-05	13.4	14 800	0,00049
	λ	0.048892	3.79		
IV Zamena prekidača u TS poljima	U	2.6E-05	48.1	23 600	0,00136
	λ	0.020085	60.4		
V Zamena svih prekidača u TS	U	1.21E-05	75.8	77 200	0,00098
	λ	0.013695	73.05		

Na slici 9.9 grafički su prikazana novčana sredstva koja se u svakoj akciji izdvajaju za održavanje, odnosno zamenu prekidača. Plavom bojom označeni su troškovi u trenutku sprovođenja akcije (npr. akcija III obuhvata troškove zamene dva 35 kV prekidača, ali i troškove održavanja ostalih prekidača u TS), dok su narandžastom bojom označeni troškovi nakon investicije (npr. akcija III, nakon investicija, u narednoj godini održavaju se dva prekidača manje).



Slika 9.9 Grafik troškova svake akcije

Na osnovu vrednosti dobijenih u tabelama 9.3 i 9.4, može se zaključiti da je u konkretnom slučaju najbolji odnos uložених sredstava i povećane raspoloživosti TS kod akcije IV (zamena prekidača u TS poljima).

Sa druge strane, ukoliko se posmatra vreme otplate investicije na osnovu uštede u održavanju (tabela 9.3), najbrža otplata uložених sredstava je kod akcije II (zamena 10 kV prekidača) i ona iznosi 3.6 godina, dok se akcija IV otplaćuje znatno sporije za 14.7 godina.

9.2.1 UTICAJ POUZDANOSTI PREKIDAČA NA TROŠKOVE ODRŽAVANJA

U prethodnom proračunu troškova korišćeni su troškovi zamene i održavanja starih prekidača. Međutim, dodatno povećanje troškova održavanja može nastati kada se uzmu u obzir varijabilni troškovi uslovljeni neplaniranim otkazom prekidača, tj. uzimanjem u obzir njegove nepouzdanosti. U tabeli 9.5 predstavljeni su troškovi uzrokovani neplaniranim otkazom prekidača, koji su dobijeni na osnovu verovatnoće otkaza svakog prekidača u TS (prilog 4, tabele p4.3 i p4.4).

Varijabilni troškovi su izračunati na sledeći način:

$$C_{var} = p_3 \cdot C_{cb1} \cdot \quad (9.10)$$

U zavisnosti od lokacije prekidača, troškovi njegove zamene se računaju:

$$C_{cb-tr,do} = C_{cb2} + C_{rad} \cdot \quad (9.11)$$

$$C_{cb-10kv} = C_{cb2} + C_{rad} + C_{en} \cdot \quad (9.12)$$

C_{var} – varijabilni troškovi prekidača [€],

p_3 – nepouzdanost prekidača (prilog 4, tabele p4.3 i p4.4),

C_{cb1} – troškovi zamene prekidača [€],

$C_{cb-tr,do}$ – troškovi zamene prekidača u TS polju i na 35 kV dovodu [€],

$C_{cb-10kv}$ – troškovi zamene 10 kV prekidača na izvodu [€],

C_{cb2} – cena jednog prekidača [€],

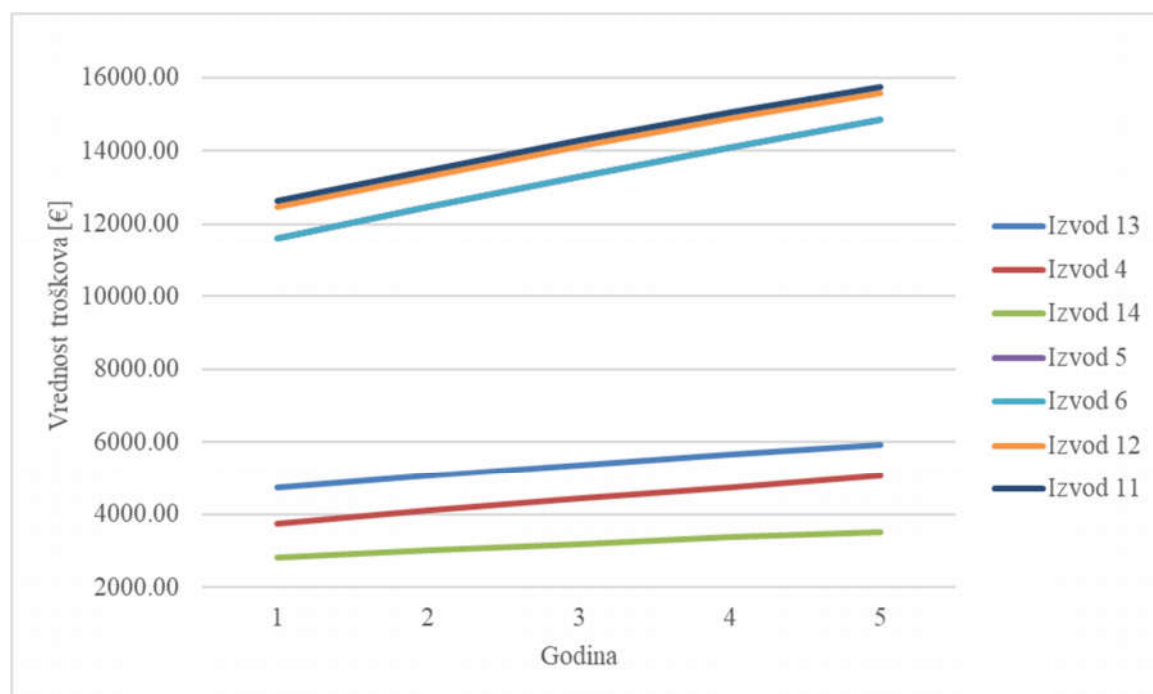
C_{rad} – troškovi radova [€],

C_{en} – troškovi neisporučene energije [€].

Tabela 9.5 Varijabilni troškovi po prekidaču, uzrokovani verovatnoćom otkaza prekidača u narednom periodu

Varijabilni troškovi [€]							
Naziv izvoda	Tip voda		Godina				
			I	II	III	IV	V
Izvod 13	T1 35 kV	TS polje	4752.28	5071.22	5377.58	5666.18	5935.54
Izvod 14	T1 10 kV	TS polje	2825.68	3015.32	3197.48	3369.08	3529.24
Izvod 4	Dovod 1 35 kV	Nadzemni	3759.94	4092.94	4424.46	4752.28	5071.22
Izvod 2	Dovod 2 35 kV	Nadzemni	3759.94	4092.94	4424.46	4752.28	5071.22
Izvod 24	T2 35 kV	TS polje	4752.28	5071.22	5377.58	5666.18	5935.54
Izvod 23	T2 10 kV	TS polje	2825.68	3015.32	3197.48	3369.08	3529.24
Izvod 5	Izvod 10 kV	Kablovski	11599.26	12458.68	13294.82	14097.98	14854.58
Izvod 6	Izvod 10 kV	Kablovski	11599.27	12458.69	13294.83	14097.99	14854.59
Izvod 7	Izvod 10 kV	Kablovski	11599.26	12458.68	13294.82	14097.98	14854.58
Izvod 8	Izvod 10 kV	Kablovski	11599.26	12458.68	13294.82	14097.98	14854.58
Izvod 9	Izvod 10 kV	Kablovski	11599.26	12458.68	13294.82	14097.98	14854.58
Izvod 10	Izvod 10 kV	Kablovski	11599.27	12458.69	13294.83	14097.99	14854.59
Izvod 62	Izvod 10 kV	Kablovski	11599.26	12458.68	13294.82	14097.98	14854.58
Izvod 22	Izvod 10 kV	Nadzemni	11599.79	12459.21	13295.35	14098.51	14855.11
Izvod 12	Izvod 10 kV	Nadzemni	12473.40	13309.54	14112.70	14869.30	15575.46
Izvod 11	Izvod 10 kV	Nadzemni	12643.84	13479.98	14283.14	15039.74	15745.90

Na slici 9.10 grafički su prikazani varijabilni troškovi grupe od sedam prekidača. Prekidači na 10 kV izvodima potencijalno donose najveće troškove, jer njihovim otkazom dolazi do prekida snabdevanja električnom energijom.



Slika 9.10 Varijabilni troškovi prekidača

9.2.2 DISKONTOVANJE - SVOĐENJE TROŠKOVA AKCIJA NA SADAŠNJI TRENUTAK

Svođenje troškova planiranih investicija na sadašnji trenutak vrši se pomoću sledećeg izraza:

$$C_s = \frac{C_b}{(1+i)^n}, \quad (9.13)$$

gde je:

C_s – sadašnja novčana vrednost [€],

C_b – buduća novčana vrednost [€],

i – vrednost kamate,

n – vremenski period [god],

$\frac{1}{(1+i)^n}$ - diskontni faktor.

Za vrednost kamatne stope uzeta je vrednost od $i = 9\%$ [125], dok je buduća novčana vrednost (troškovi koji se očekuju u narednih 5 godina) računata na sledeći način:

$$C_b = (C_{od} + C_{inv} + C_{ot}), \quad (9.14)$$

gde su:

C_{od} – troškovi redovnog održavanja prekidača (tabela 9.3) [€],

C_{inv} – troškovi investicija prilikom zamene prekidača (tabela 9.3) [€],

C_{ot} – nepredviđeni troškovi usled otkaza prekidača (tabela 9.5) [€].

Tabela 9.6 Svedeni troškovi [€] za sprovođenje akcija u narednih 5 godina

Akcija		Godina				
		1	2	3	4	5
I	Ukupno	153 788	164 018	173 954	209 869	232 031
	Svedeno		138 051	134 324	148 676	150 804
II	Ukupno	181 617	185 700	198 288	210 560	222 395
	Svedeno		156 300	153 115	149 166	144 541
III	Ukupno	160 268	183 033	205 505	227 564	249 088
	Svedeno		154 055	158 688	161 212	161 890
IV	Ukupno	160 632	183 045	205 204	226 998	248 301
	Svedeno		154 066	158 455	160 811	161 379
V	Ukupno	217 788	241 218	264 354	287 069	309 231
	Svedeno		203 029	204 130	203 367	200 979

Svedeni troškovi svih akcija predstavljani su u tabeli 9.6. Na osnovu tabele može se sagledati opravdanost investiranja u određenom vremenskom periodu, tj. da li je opravdano odmah investirati ili se investicija može odložiti za budući period. Za konkretan primer, V akcija pokazuje isplativost ulaganja u petoj godini u odnosu na drugu, treću i četvrtu godinu. Slična situacije je i kod II akcije, gde je isplativije ulaganje u kasnijim godinama u odnosu na sadašnji trenutak.

Akciju IV je isplativije sprovesti u narednoj godini u odnosu na posmatrani trenutak. Ako se uporede rezultati prikazani u tabeli 9.4 navedena akcija poseduje najbolji odnos uloženi sredstava i povećane raspoloživosti TS.

Akcija V je sledeća koja pruža najbolji odnos povećane raspoloživosti TS i uloženi sredstava (tabela 9.4) i ukoliko se ona odabere za sprovođenje najisplativije je takvu investiciju izvršiti nakon pet godina.

10 SOFTVER ZA PRORAČUN RIZIKA PREKIDAČA

Matematički model za dinamički proračun rizika prekidača i raspoloživosti TS može biti programski realizovan u nekom programskom paketu. U ovoj disertaciji predstavljen je primer jednog takvog rešenja. Naime, predloženi softver na osnovu unetih vrednosti padova napona, isključenih struja kratkog spoja (svaki put kada se isključenje dogodi), i postojeće baze podataka o svakom prekidaču (tip voda, naponski nivo, starost) može računati rizik otkaza prekidača, raspoloživost TS i upozoravati korisnika ukoliko dolazi do prekoračenja dozvoljenih vrednosti.

Automatizovan unos podataka omogućava dobijanje rezultata u realnom vremenu, a samim tim otklanja problem vremenskog kašnjenja u reagovanju na novonastalu situaciju. Blagovremeno poznavanje stanja opreme je preduslov za brzo reagovanje i sprečavanje nastanka troškova neočekivanog otkaza.

U prilogu 6 prikazane su opcije (prozori) predloženog softvera. Predviđene su sledeće opcije:

- izbor TS,
- prikaz jednopolne šeme TS,
- prikaz trenutnih pokazatelja pouzdanosti TS,
- tabelarni prikaz svih izmerenih podataka koji čine bazu konkretnog prekidača,
- stanje prekidača kroz sledeće grafike:
 - Vejbulova raspodela,
 - broj isključenih struja kratkog spoja,
 - izmereni padovi napona.
- opcija za unos novih vrednosti,
- proračun rizika,
- proračun raspoloživosti TS,
- troškovi investicija kroz 5 akcija zamene prekidača,
- proračun verovatnoća otkaza prekidača.

11 ZAKLJUČAK

U eksploataciji postoji veliki broj malouljnih prekidača koji su i dalje u pogonu, iako je njihov ekonomski životni vek prekoračen. Praćenje njihovog stanja kroz ugradnju opreme za kontrolu kvaliteta rada bilo bi skupo i nepraktično. Sa druge strane, sve češća zamena malouljnih prekidača vakuumskim zahteva poznavanje njihovog stanja, kako bi se zamena izvršila tamo gde je to najpotrebnije.

U ovoj disertaciji predložen je pristup za dinamičku procenu rizika malouljnih prekidača na srednjem naponu, uz upotrebu postojećih merenih podataka koji su prikupljeni tokom redovnog ispitivanja prekidača. Nakon sprovedenog istraživanja, koje je predstavljeno u ovoj disertaciji, ostvareni naučni doprinosi su sledeći:

- Razvijen je novi pristup za procenu stanja prekidača, odnosno preostalog životnog veka na osnovu trenutno dostupnih podataka.
- Formiran je matematički model starenja prekidača. Određene su matematičke raspodele koje odgovaraju otkazu prekidača usled prekoračenog pada napona i broju prekinutih struja kratkog spoja.
- Razvijen je novi pristup za procenu rizika otkaza prekidača.
- Određen je uticaj pokazatelja pouzdanosti prekidača na raspoloživost transformatorske stanice.
- Na osnovu rizika otkaza prekidača formirana je relevantna lista prekidača za zamenu.
- Izvršena je analiza ekonomske isplativosti zamene prekidača na osnovu rizika njihovog otkaza. Ekonomska opravdanost investiranja u zamenu prekidača se proverava uticajem njegove zamene na raspoloživost TS i proračunom novčanih troškova takve investicije. U disertaciji zamena prekidača se analizira kroz pet različitih akcija, od kojih svaka uključuje zamenu određene grupe prekidača u TS. Na kraju se ukupni troškovi investicija određuju za period od pet godina i sprovedeno je svođenje troškova na sadašnju vrednost.

U disertaciji je prikazan ekonomski proračun i proračun raspoloživosti jedne 35/10 kV/kV transformatorske stanice. U konkretnom slučaju rezultati su pokazali da je najisplativija zamena prekidača na TS polju, jer je kod te akcije najbolji odnos između novčanih investicija i povećane raspoloživosti TS. Ekonomska analiza zamene

prekidača na TS polju je pokazala isplativost ulaganja već u narednoj godini u odnosu na sadašnji trenutak.

- Kreiran je softver koji izvršava proračune predložene u novom pristupu za određivanje preostalog životnog veka prekidača. Pored toga softver može odrediti Vejbulovu i Puasonovu raspodelu za proizvoljno unete vrednosti parametara i grafički prikazivati stanje svakog prekidača (broj zabeleženih struja kratkog spoja, izmerene vrednosti padova napona).

Cilj upotrebe navedenog softvera je da se pokaže da proces određivanja rizika prekidača može biti automatizovan, tj. da se proračun rizika automatski izvrši svaki put kada se unesu novi podaci (merenja padova napona, odnosno isključenje struje kratkog spoja).

U predloženom pristupu se otklanjaju nedostaci postojećih strategija zamene prekidača, time što se određuje trenutno stanje svakog prekidača. Ulazni podaci koji su korišćeni za izradu modela starenja prekidača već postoje u službama koje se bave redovnim ispitivanjem TS. Samim tim, za vršenje predložene analize nisu potrebna dodatna novčana ulaganja u opremu i radnu snagu, koja su neophodna kod do sada poznatih metoda za određivanje preostalog životnog veka prekidača.

Pored mogućnosti formiranja najekonomičnije strategije zamene prekidača, predložen pristup se može iskoristiti i za planiranje održavanja prekidača za predstojeći period, zatim planiranje budućih troškova održavanja, zamene i investicija.

Pristup za određivanje preostalog životnog veka prekidača predstavljen u disertaciji se može koristiti i za vakuumske prekidače, s obzirom na to da su i kod njih pad napona i broj prekinutih struja kratkog spoja ograničavajući faktor životnog veka. Samim tim, predloženi pristup nije ograničen upotrebom samo kod maloljnih prekidača.

Istraživanja autora koja su predstavljena u ovoj disertaciji verifikovana su u radovima [118, 124, 126, 127, 128, 129, 131].

Predlog za buduća istraživanja i mogući pravci daljeg razvoja modela

Prikupljanjem dodatnih podataka, koji karakterišu radne uslove prekidača, može povećati preciznost rezultata i pružiti bolji uvid u njegov životni vek. Za sprovođenje dodatnih istraživanja predlaže se prikupljanje sledećih podataka:

- Broj kupaca na 10 kV izvodu,
- Dužina 10 kV i 35 kV izvoda,
- Tip terena na kome se izvod prostire (za nadzemne izvode). Predloženi tipovi terena mogu biti: šumsko područje, područje bez vegetacije, naseljeno područje.
- Uticaj sredine na stanje prekidača. Odrediti TS gde su prisutni zagađivači u vazduhu (blizina rudnika ili hemijskih postrojenja).
- Uvođenje obaveze vođenja evidencije o kvarovima prekidača i akcijama koje se sprovode nad svakim prekidačem, kao što su:
 - zamena ulja u prekidaču nakon što postane zatamnjeno,
 - podmazivanje radnog mehanizma prekidača,
 - sprovođenje manjih popravki (zamena kalema za uključanje/isključenje i podešavanje radnog mehanizma),
 - informacije o većim nepravilnostima rada prekidača (nemogućnost uključanja/isključanja) i elementima koji su uzrok kvara.
- Integracija predloženog softvera sa postojećim informacionim sistemom, kako bi se iskoristili podaci koji se već unose u bazu podataka. Na taj način softver može prikupljati podatke iz različitih službi i vršiti automatsku analizu rizika prekidača. Brojevi prekida struje kratkog spoja se beleže u dispečerskom centru i mogu automatski biti upisivani u bazu podataka. Takođe, nakon merenja padova napona sačinjava se izveštaj i ti podaci mogu biti upisivani u bazu podataka. Nakon svakog novog unosa rizik se može automatski izračunavati i u slučaju prekoračenja određene vrednosti obavestavati nadležnu službu koja može planirati dalje akcije.

12 LITERATURA

- [1] J. van Casteren, *Power System Reliability Assessment using the Weibull-Markov Model*, Department of Electric Power Engineering Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2001.
- [2] “Life Cycle Management of Power Distribution Equipment”, Siemens Industry, April 2016.
- [3] T. Lindquist, *On reliability and maintenance modelling of ageing equipment in electric power systems*, PhD dissertation, KTH, Stockholm, 2008.
- [4] Y. Hu, S. Liu, H. Lu, H. Zhang, “Remaining useful life assessment and its application in the decision for remanufacturing”, *Procedia CIRP*, vol. 15, pp. 212–217, 2014.
- [5] H. Picard, J. Verstraten, M. Hakkens, R. Vervaet, “Decision model for End of Life management of switchgears”, *El. and Instr. Appl. in the Petroleum & Chem. Ind., PCIC Europe 4th European Conference*, Jun. 2007. DOI: 10.1109/PCICEUROPE.2007.4354015.
- [6] C. Okoh, R. Roy, J. Mehnen, L. Redding, “Overview of Remaining Useful Life Prediction Techniques in Through-Life Engineering Services”, *ScienceDirect, Procedia CIRP*, vol. 16, pp. 158 – 163, 2014.
- [7] J. Z. Sikorska, M. Hodkiewicz, L. Ma, “Prognostic modelling options for remaining useful life estimation by industry”, *Mech. Syst. and sign. Process*, vol. 25, no. 5, pp. 1803-1836, Jul. 2011.
- [8] X. S. Si, W. Wang, C. H. Hu, D. H. Zhou, “Remaining useful life estimation – A review on the statistical data driven approaches”, *European Journal of Operational Research*, vol. 2013, no. 1, pp. 1-14, Aug. 2011.
- [9] A. H. A. Bakar, H. A. Illias, M. K. Othman, H. Mokhils, “Identification of failure root causes using condition-based monitoring data on a 33 kV switchgear”, *El. Power and Energy Systems*, vol. 47, pp. 305-312, May, 2013.
- [10] S. Natti, M. Kezunovic, “Assessing circuit breaker performance using condition-based data and Bayesian approach”, *El. Power Systems Research*, vol. 81, no. 9, pp. 1796-1804, Sep. 2011.
- [11] A. Janssen, D. Makareinis, C. E. Sölver, “International Survey on Circuit-Breaker Reliability Data for Substation and System Studies”, *IEEE Trans Power Deliv.* vol. 29, pp. 808-814, Apr. 2014.
- [12] P. Sun, H. Jiang, H. Yu, X. Huang, Y. Sun, X. Wang, “Reliability evaluation of high voltage circuit breaker based on IFAHP and GA”, *ICAEEES*, Nov. 2015. doi:10.2991/icaees-15.2015.206
- [13] J. F. Boudreau, S. Poirier, “End-of-life assessment of electric power equipment allowing for non-constant hazard rate – Application to circuit breakers”, *El. Power and Energy Systems*, vol. 62, pp. 556-561, Nov. 2014.

- [14] X. Zhang, E. Gockenbach, Z. Liu, H. Chen, L. Yang, "Reliability estimation of high voltage SF6 circuit breakers by statistical analysis on the basis of the field data", *El. Power System Research*, vol. 103, pp. 105-113, Oct. 2013.
- [15] L. Jian, T. Tianyuan, "LS-SVM based substation circuit breaker maintenance scheduling optimization", *El. Power and Energy System*, vol. 64, pp. 1251-1258, Jan. 2015.
- [16] G. Balzer, F. Heil, P. Kirchesch, R. Meister, C. Neumann, "Evaluation of failure data of HV circuit-breakers for condition based maintenance", *CIGRE*, Paris, report A3-305, 2004.
- [17] T. M. Lindquist, L. Bertling, R. Eriksson, "Circuit breaker failure data and reliability modelling", *IET Gen., Transm. & Distrib.* vol. 2, no. 6, pp. 813-820, Nov. 2008.
- [18] X. Zahg, E. Gockenbach, "Age-dependent maintenance strategies of medium-voltage circuit-breakers and transformers", *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 8, pp. 1709–1717, Aug. 2011.
- [19] J.-F. Boudreau, R. Doche „Impact of Mechanical Operations on Minimum-oil Circuit Breaker Reliability“, *CIGRE*, Paris, Aug. 2014.
- [20] Raf. Medjoudj, Rab. Medjoudj, D.Aissani, "Reliability modeling and data analysis of vacuum circuit breaker subject to random shocks", *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, vol. 5, no. 11, 2011.
- [21] Z. Liu, *Reliability Analysis of Breaker Arrangements in High Voltage Stations: A Fault Tree Approach*, Department of Energy and Environment, Division of Electric Power Engineering, Chalmers University Of Technology, Göteborg, Sweden, 2008.
- [22] Y. Guan, M. Kezunovic, P. Dehghanian, G. Gurralla, „Assessing Circuit Breaker Life Cycle using Condition-based Data“, *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, July 2013.
- [23] M. Nitoi, M. Pavelescu, „Modelling ageing at the level of electrical systems from Cernavoda NPP“, *Romanian Journal of Physics*, ISSN 1221-146X, v. 55(1-2), pp. 53-67, 2010.
- [24] M. Kezunovic, S. Natti, "Risk-Based Maintenance Approach: A Case of Circuit Breaker Condition Based Monitoring", *3rd International CIGRE workshop on Liberalization and Modernization of power systems*, Irkutsk, Russia, 2006.
- [25] S. Natti, P. Jirutitijaroen, M. Kezunovic, C. Singh, "Circuit Breaker and Transformer Inspection and Maintenance: Probabilistic Models", *8th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, Iowa State University, Sep. 2004.
- [26] P. Dehghanian, T. Popovic, M. Kezunovic "Circuit Breaker Operational Health Assessment via Condition Monitoring Data", *The 46th North American Power Symposium*, Washington, Sep. 2014.
- [27] G. Balzer, O. Schmitt, M. Halfmann, A. Hossle, „Maintenance and refurbishment strategies for m.v. substations“, *16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*, Aug. 2002.

- [28] A. Janjić, Z. Stajić, S. Milosavljević, “Višekriterijumska analiza odlučivanja o zameni prekidača u TS 110/x kV”, *CIREĐ Srbija*, 2012.
- [29] P. Choonhapran, *Applications of High Voltage Circuit-Breakers and Development of Aging Models*, Technischen Universitat Darmstadt, 2007.
- [30] A. R. Kumar, V. Krishnan, „A Study on System Reliability in Weibull Distribution“, *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering*, Vol. 5, Issue 3, March 2017.
- [31] K. P. Soman, K. B. Misra, "A least square estimation of three parameters of a Weibull distribution", *Microelectronics Reliability* 32, pp.303-305, March 1992, doi: 10.1016/0026-2714(92)90057-R
- [32] F. Yang, H. Ren, Z. Hu, "Maximum Likelihood Estimation for Three-Parameter Weibull Distribution Using Evolutionary Strategy", *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2019, <https://doi.org/10.1155/2019/6281781>
- [33] M. Dong, A. B. Nassif, „Combining Modified Weibull Distribution Models for Power System Reliability Forecast“, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 34, Issue: 2, March 2019.
- [34] D. Zhou, “Comparison of Two Popular Methods for Transformer Weibull Lifetime Modelling”, *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 2, issue 4, April 2013.
- [35] D. Zhou, “Transformer lifetime modelling based on condition monitoring data”, *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, ISSN: 2231-1963, May 2013.
- [36] D. Zhou, Z. Wang, P. Jarman, C. Li „Data Requisites for Transformer Statistical Lifetime Modelling—Part II: Combination of Random and Aging-Related Failures“, *IEEE transactions on power delivery*, vol. 29, no. 1, Feb. 2014.
- [37] G. Liang, S. Li, Y. Qi, J. Cao, Y. Hao, W. Chen, „A Transformer Replacement Decision Method Based on Probability Assessment of Failure Rate“, *Energy and Power Engineering*, 9, pp. 748-755, April 2017.
- [38] A. A. Romero-Quete, H. D. Gómez, J. D. Molina, G. Moreno, „A Practical method for risk assessment in power transformer fleets“, *Dyna*, vol. 84, no. 200, May 2016.
- [39] F. Iberraken, Raf. Medjoudj, Rab. Medjoudj, .Dj. Aissani, K.D. Haim, „Reliability-Based Preventive Maintenance of Oil Circuit Breaker subject to Competing Failure Processes“, *International Journal of Performability Engineering* 9(5):495-504, Sep. 2013.
- [40] T. Suwanasri, M. T. Hlaing, C. Suwanasri, “Failure Rate Analysis of Power Circuit Breaker in High Voltage Substation”, *International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, Durham, UK, 2014.
- [41] R. Medjoudj, H. Bediaf, Dj. Aissani, „Power System Reliability: Mathematical Models and Applications“, *System Reliability - Chapter 15*, Dec. 2017. DOI: 10.5772/intechopen.71926

- [42] W. Li, J. Zhou, J. Lu, W. Yan "A Probabilistic Analysis Approach to Making Decision on Retirement of Aged Equipment in Transmission Systems", *IEEE transac. on power delivery*, vol. 22, pp. 1891–1896, no. 3, July 2007.
- [43] S. Suwansanri, S. Lipirodjanapong, "Failure rate analysis of circuit breaker and its preventive maintenance application", *International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, 2014.
- [44] H. H. Goh, S. Y. Sim, N. I. bin Hamzah, S. Bin Mazlan, C. W. Ling, Q. S. Chua, K. C. Goh, „Types of circuit breaker and its application in substation protection“, *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol.8, no.1, pp. 213-220, Oct. 2017.
- [45] G. Leonhardt, M. Marchi, G. Rivetti, „Choosing the right MV circuit-breaker“, *ABB Review* 4/2000, <https://library.e.abb.com/public/a7ec529b5068af83c1256efd0041f92f/26-34%20M564.pdf>, 10.02.2019.
- [46] A. Greenwood, "Vacuum Switchgear", The Institution of Engineering and Technology, 1994.
- [47] F. Ledbetter, D. Walterscheid, "Medium-voltage vacuum circuit breaker life extension: an approach utilizing industry standardized maintenance intervals, new testing techniques, and modern replacement parts", *Circuit Breaker Seminar, Doble Engineering Company*, 2017.
- [48] J. Nahman, V. Mijailović, *Razvodna postrojenja*, Akademska misao Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2005.
- [49] K. C. Randall, "Oil Circuit Breakers", *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. XXXIV, no. 1, pp. 247-268, Jan. 1915, doi: 10.1109/T-AIEE.1915.4765216.
- [50] V.N. Maller, M.S. Naidu, *Advances in High Voltage Insulation and Arc Interruption in SF6 and Vacuum*, Pergamon, 1981.
- [51] H.M. Ryan, G.R. Jones, *SF6 Switchgear*, The Institution of Engineering and Technology, 2011.
- [52] O. Tola, J. G. Ambafi, „Reliability Study of Electric Circuit Breakers (A case study)“, *Innovations in science and engineering 1*, pp. 104-114, 2011.
- [53] P. G. Slade, *The Vacuum Interrupter, Theory, Design, and Application*, 2nd Edition, CRC Press, 2020.
- [54] IEC 62271-100, "High-voltage switchgear and controlgear – Part 100: Alternating-current circuit-breakers", 2.2 Edition, June 2017.
- [55] R. Radetić, *Priručnik za održavanje VNO*, Elektromreža Srbije, nov. 2017.
- [56] M. S. Silva, J. A. Jardini, L. C. Magrini „On-line condition monitoring system for in-service circuit breaker“, *18 International conference on electricity distribution*, Turin, June 2005.
- [57] W. Li, E. Vaahedi, P. Choudhury, „Power system equipment aging“, *IEEE Power and Energy Magazine* 4(3), pp.52 - 58, June 2006.
- [58] Procedura održavanja QF-C-032 (Lista održavanja TS 35/X kV/kV), 2019.
- [59] Procedura održavanja QF-C-040 (Lista ispitivanja prelazne otpornosti na glavnim kontaktima prekidača i otpornosti izolovanosti), 2019.

- [60] *Tehničke preporuke elektrodistribucije Srbije*, JP EPS Direkcija za distribuciju električne energije Srbije, Beograd, mart 2000.
- [61] Facilities instructions, standards and techniques, “Maintenance of power circuit breakers”, *US department of the interior Bureau of reclamation*, Denver, vol. 3-16, 1999.
- [62] IEC 62271-1, "High-voltage switchgear and controlgear – Part 1: Common specifications for alternating current switchgear and controlgear", 2nd Edition, July 2017.
- [63] J. White, “Critical Maintenance for Circuit Breakers”, *Shermco Industries*, 2007.
- [64] G. J. Anders, ”Optimal Maintenance Policies for Power Equipment”, *Innovations in Power System Reliability*, XVI, p. 364, 2011.
- [65] M. Hirschbold, “How predictive maintenance for circuit breakers optimizes safety, reliability and costs”, *Schneider Electric*, 2016.
- [66] Minimum oil circuit breakers for internal assembly - M series, *Koncar-medium voltage electrical apparatus*, Zagreb, 2005.
- [67] Minel, Uputstvo za rukovanje i održavanje malouljnih sredjenaponskih prekidača za unutrašnju montažu, 1984.
- [68] M. Braunović, V. V. Konchits, N. K. Myshkin, *Fundamentals of Electrical Contacts*, CRC Press, 2006.
- [69] E. Nasrallah, F. Brikci, S. Perron, "Electrical contacts in MV & HV Power Circuit breakers", *Electric Energy T&D magazine*, issue 1, vol 11., jan-feb. 2007.
- [70] K. Lemelson, "The failure of closed heavy current contact pieces in insulating oil at high temperature", *Proc. 6th Int. Conf. Electric contact phenom., IIT*, Chicago, June 1972.
- [71] J.B.P. Williamson, “Deterioration processes in electrical connectors”, *Proc. 4th Int. Conf. Electr. Contact phenom.*, Swansea, Wales, 1968.
- [72] R. D. Garzon, *High Voltage Circuit Breakers, Design and Applications*, CRC Press, June 4, 2002.
- [73] C.H. Flurscheim, *Power circuit breaker theory and design*, IEE Power engineering series 1, London, 1982.
- [74] ISO 31000:2018 Risk management — Guidelines, Edition 2, Feb. 2018.
- [75] C. J. Wallnerström, *On Risk Management of Electrical Distribution Systems and the Impact of Regulations*, Licentiate Thesis, KTH - Royal Institute of Technology, Stockholm, Jan. 2008.
- [76] S. Natti, M. Kezunovic, “A risk-based decision approach for maintenance scheduling strategies for transmission system equipment”, *Proceedings of the 10th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, pp. 1-6, 2008.
- [77] Y. Jiang, J. McCalley, T. V. Voorhis, “Risk based resource optimization for transmission system maintenance”, *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 21, no. 3, pp 1191-1200, Aug. 2006.
- [78] S. R. K. Yeddanapudi, Y. Li, J. McCalley et al. “Risk based allocation of distribution system maintenance resources”, *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 23, no. 2, pp. 287-295, May. 2008.

- [79] A. Janjić, D. Popović, "Selective maintenance schedule of distribution networks based on risk management approach", *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 22, no. 2, pp. 597-604, May. 2007.
- [80] W. Li, *Risk assessment of power systems: models, methods, and applications*, Wiley-IEEE Press, 2014.
- [81] H. Wan, J. McCalley, V. Vitall, "Risk based voltage security assessment", *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 15, no. 4, pp 1247-1254, Nov. 2000.
- [82] D.E. Nordgard, K. Sand, I. Wangensteen, „Risk assessment methods applied to electricity distribution system asset management“, *ESREL conference*, Prague, 2009.
- [83] X. Guang-Bin, C. Zhen, X.Y. Xiao, "Dynamic risk assessment of power system catastrophic event caused by cascading failure", *Electricity Distribution (CICED)*, 2012. DOI: 10.1109/CICED.2012.6508482
- [84] Y. Shiwen, H. Hui, W. Chengzhi, G. Hao, F. Hao, "Review on Risk Assessment of Power System", *Procedia Computer Science*, vol. 109, pp. 1200-1205, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.05.399>
- [85] R. Pan, D. Lee, P. Yontay, L. M. Sanchez, *Advances in System Reliability Engineering – Chapter 9*, "System Reliability Assessment Through Bayesian Network Modeling", pp. 227-241, Academic Press, 2019.
- [86] L. Mili, Q. Qiu, "Risk assessment of catastrophic failures in electric power systems", *Int. J. Critical Infrastructures*, Vol. 1, No. 1, 2004.
- [87] IEC 31010:2019 Risk management — Risk assessment techniques, Edition 2, Jun, 2019.
- [88] ISO Guide 73:2009 Risk management — Vocabulary, Edition 1, Nov. 2009.
- [89] J. Tixier, G. Dusserre, O. Salvi, D. Gaston, "Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 15, issue 4, 2002.
- [90] Y. Shiwen, H. Huia, W. Chengzhib, G. Haoa, F. Haoa, "Review on Risk Assessment of Power System", *Procedia computer science*, vol. 109, pp. 1200-1205, 2017.
- [91] IEC 31010 Risk Management – Risk assessment techniques, 2009.
- [92] Q. Qiu, "Risk Assessment of Power System Catastrophic Failures and Hidden Failure Monitoring & Control System", *Faculty of the Virginia Polytechnic Institute Dissertation*, Dec. 2003.
- [93] N. Komendantova, D. Kroos, "Protecting Electricity Networks from Natural Hazards", *Organization for Security and Co-operation in Europe*, May 2016.
- [94] R. P. Y. Mehairjan, *Risk Based Maintenance in Electricity Network Organizations*, Springer International Publishing, 2017.
- [95] S. Sakai, "Risk-based Maintenance", *JR East Technical Review*, vol. 17, 2010.
- [96] J. Nahman, V. Mijailović, *Pouzdanost sistema za distribuciju električne energije*, Akademska misao, Beograd, 2009.

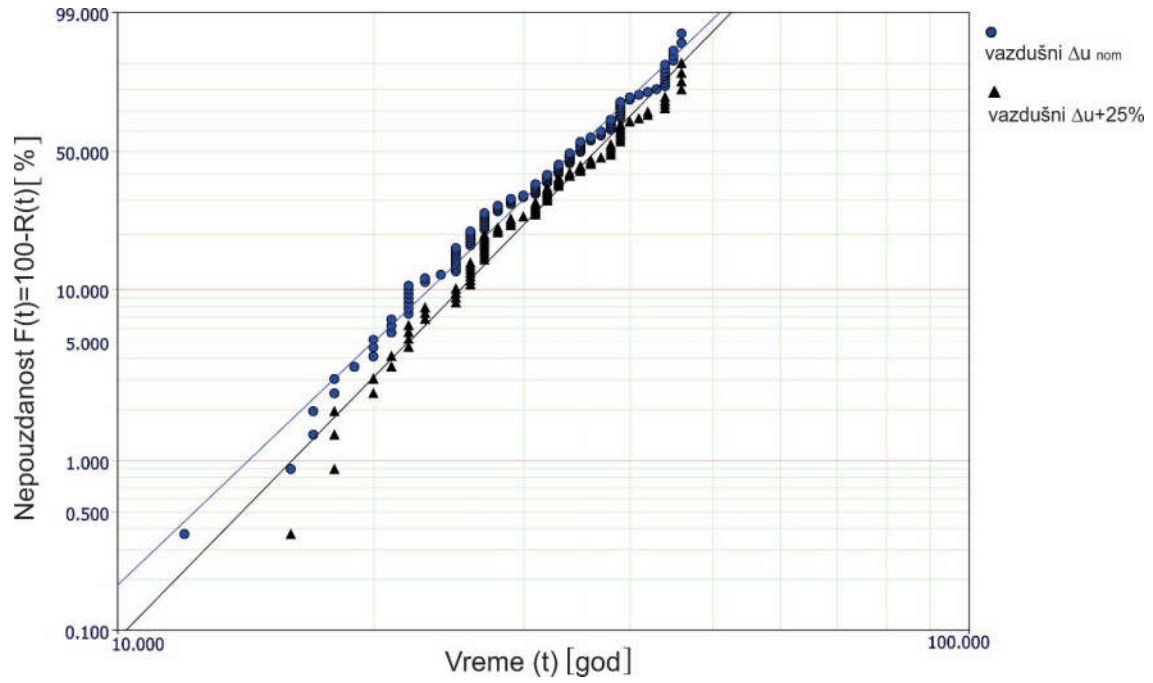
- [97] J. Nahman, *Metode analize pouzdanosti elektroenergetskih sistema*, Naučna knjiga, Beograd, 1992.
- [98] M. Finkelstein, *Failure rate modelling for reliability and risk*, Springer-Verlag London, 2008.
- [99] R.E. Brown, *Electric Power distribution reliability*, CRC Press, 2009.
- [100] M. Ohring, *Solution Manual to Accompany Engineering Materials Science*, Academic Press Inc. 1995.
- [101] M. Lovrić, *International Encyclopedia of Statistical Science*, Springer, 2014. https://doi.org/10.1007/978-3-642-04898-2_439
- [102] A. W. Marshall, I. Olkin, *Life Distributions*, pp 291-307, Springer Series in Statistics, New York, https://doi.org/10.1007/978-0-387-68477-2_8
- [103] F. Daly, D. J. Hand, C. Jones, D. Lunn, K. McConway, *Elements of Statistics*, Addison-Wesley, 1995.
- [104] D. Đorić, J. Mališić, V. Jevremović, E. N. Đorić, *Atlas raspodela*, Građevinski fakultet, Beograd, 2007.
- [105] L. Bachioua, "Extended Lognormal Distribution: Properties and Applications", *The Scientific World Journal*, April 2020.
- [106] D. Čović, *Vejbulova raspodela i njena primena u teoriji pouzdanosti*, Univerzitet u Novom Sadu, Departman za matematiku i informatiku, 2017.
- [107] Warwick Manufacturing Group, *The use of Weibull in defect data analysis*, University of Warwick, 2007.
- [108] C. D. Lai, D. N. P. Murthy, M. Xie, *Weibull Distributions and Their Applications*, Springer Handbook of Engineering Statistics, London, https://doi.org/10.1007/978-1-84628-288-1_3
- [109] N. L. Johnson, A. W. Kemp, S. Kotz, *Univariate Discrete Distributions*, Wiley Series in Probability and Statistics, 3rd edition, DOI:10.1002/0471715816
- [110] E. von Collani, K. Dräger, *Binomial Distribution Handbook for Scientists and Engineers*, Birkhäuser Basel, 2001.
- [111] S. L. Miller, D. Childers, *Probability and Random Processes*, Academic Press, 2012.
- [112] C. Forbes, M. Evans, N. Hastings, B. Peacock, *Statistical Distributions*, 4th Edition, Wiley, 2010.
- [113] J. Mun, *Understanding and Choosing the Right Probability Distributions*, Wiley, 2012. <https://doi.org/10.1002/9781119197096.app03>
- [114] A. Ünsal, B. Mumyalmaz, N. S. Tunaboyleu „Predicting the failures of transformers in a power system using the Poisson distribution: a case study“, *ELECO 2005 International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, Bursa, Dec. 2005.
- [115] J. Zhao, F. Zhang, C. Zhao, G. Wu, H. Wang, X. Cao, "The Properties and Application of Poisson Distribution", *Journal of Physics Conference Series* 1550:032109, May 2020.

- [116] S. V. Vukadinović, *Elementi teorije verovatnoće i matematičke statistike*, Privredni pregled, Beograd, 1981.
- [117] J. Nahman, "Praktična metoda proračuna pouzdanosti razvodnih postrojenja", *JUKO CIGRE*, ref.23.01, Bled, 1985.
- [118] D. Stevanović, A. Janjić, D. Tasić, "Replacement strategy of medium-voltage circuit breakers based on the segmented risk estimation", *Electrical Engineering (Archiv für Elektrotechnik)*, ISSN 0948-7921, Vol. 101. No. 2, pp. 527-536, 2019., doi.org/10.1007/s00202-019-00803-y.
- [119] P. Westerlund, *Condition measuring and lifetime modelling of disconnectors, circuit breakers and other electrical power transmission equipment*, Doctoral Thesis, Stockholm, Sweden, 2017.
- [120] K. Molugaram, G. S. Rao, *Statistical Techniques for Transportation Engineering, Chapter 5 - Curve Fitting*, Butterworth-Heinemann, Pages 281-292, 2017, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811555-8.00005-2>.
- [121] S. M. Ross, *Introductory Statistics, chapter 13 - Chi-Squared Goodness-of-Fit Tests*, 4th edition, Academic Press, 2017.
- [122] M. Sulaimon, O. Olutayo, "The Chi-Square Goodness-Of-Fit Test for a Poisson distribution: Application to the Banking System", *International Journal of Research*, vol. 03 issue 08 :448 – 455, Apr. 2016.
- [123] B. Everitt, *The Analysis of Contingency Tables*, Chapman and Hall, 1977.
- [124] D. Stevanović, A. Janjić, "Influence of circuit breaker replacement on power station reliability", *FACTA UNIVERSITATIS, Series: Electronics and Energetics*, vol. 32, no 3, pp. 331-344, Sep. 2019, doi.org/10.2298/FUEE1903331S
- [125] Studija za potrebe JP EPS, „Tehničko-ekonomska analiza sredstava i postupaka za skraćenje vremena prekida isporuke električne energije kupcima zbog opravki kvarova u distributivnoj mreži“, *Netico solution, Elektronski fakultet Niš, Elektrotehnički institut Nikola Tesla*, ugovor br. 1026-10/15, 05.05.2015.
- [126] D. Stevanović, A. Janjić, "Circuit Breaker Voltage Drop Analysis", *2nd Virtual International Conference on Science, Technology and Management in Energy, eEnergetics 2016*, 22-23 September 2016, Niš, Serbia, Proceedings pp.9-12.
- [127] D. Stevanović, A. Janjić, Dragan Tasić, "Statistical Analysis of Minimum Oil Breaker Failures", *14th International Conference on Applied Electromagnetics*, Niš, August 26-28, 2019., CD Proceedings Paper O2-3, ISBN 978-86-6125-212-9.
- [128] D. Stevanović, "Analysis of Weibull and Poisson Distribution use in Medium Voltage Circuit Breakers RUL Assessment", *Global Journal of Researches in Engineering: Electrical and Electronics Engineering*, vol. 20, issue 2, 2020.

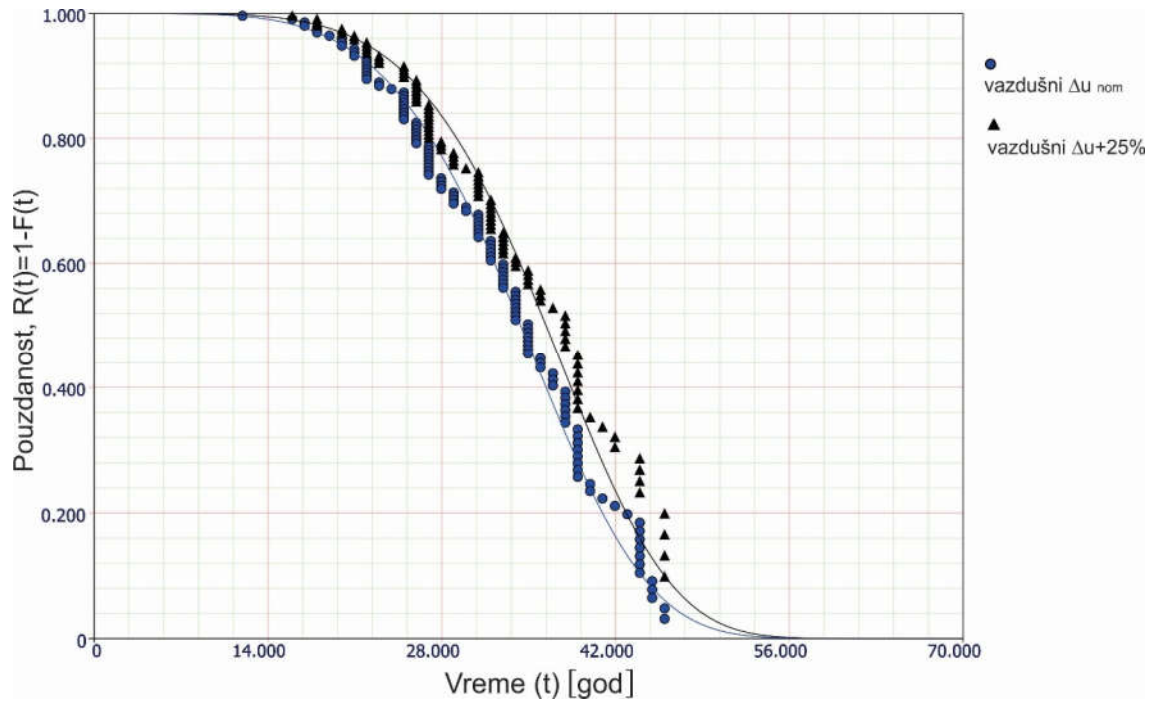
- [129] D. Stevanović, A. Janjić, "Circuit Breaker Replacement Strategy Based on the Substation Risk Assessment", *4th Virtual International Conference on Science, Technology and Management in Energy, eNergetics 2018*, October 25-26, Niš, Serbia, Proceedings pp. 235-240.
- [130] A. Grubišić, *Hi-kvadrat test i njegove primjene*, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Sveučilište u Zagrebu, 2004
- [131] D. Stevanović, A. Janjić, D. Tasić, "Metodologija za određivanje vremena zamene prekidača na bazi pouzdanosti i integrisanog faktora rizika", *Tehnika, Savez inženjera i tehničara Srbije*, Beograd, br. 5, str. 687- 693, ISSN 0040-2176, 2019 god.
- [132] F. Wang, B. W. Tuinema, M. Gibescu, M. A. M. M. van der Meijden, "Reliability evaluation of substations subject to protection system failures," *2013 IEEE Grenoble Conference*, 2013, pp. 1-6, doi: 10.1109/PTC.2013.6652162.
- [133] D. R. Dolas, M.D. Jaybhaye, S. D. Deshmukh, „Estimation the System Reliability using Weibull Distribution“, *International Proceedings of Economics Development and Research*, vol. 75, 2014.
- [134] W. Li, *Risk Assessment Of Power Systems: Models, Methods, and Applications*, John Wiley & Sons, 2005.

13 PRILOG 1

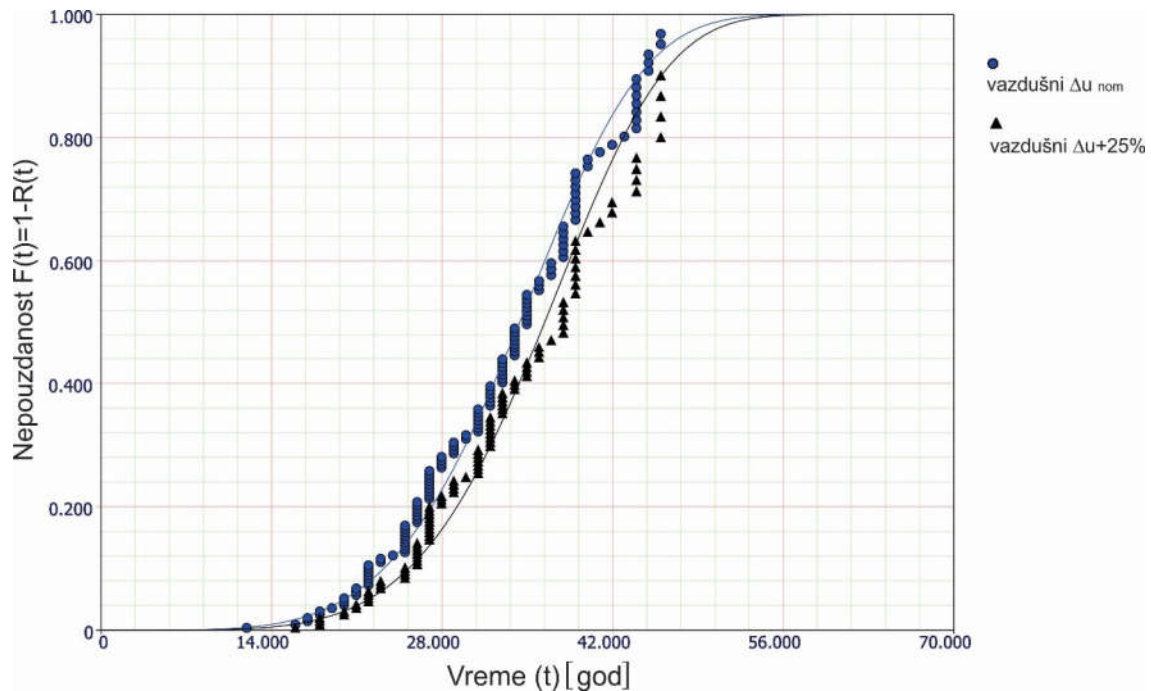
PREKIDAČI NA NADZEMNIM VODOVIMA



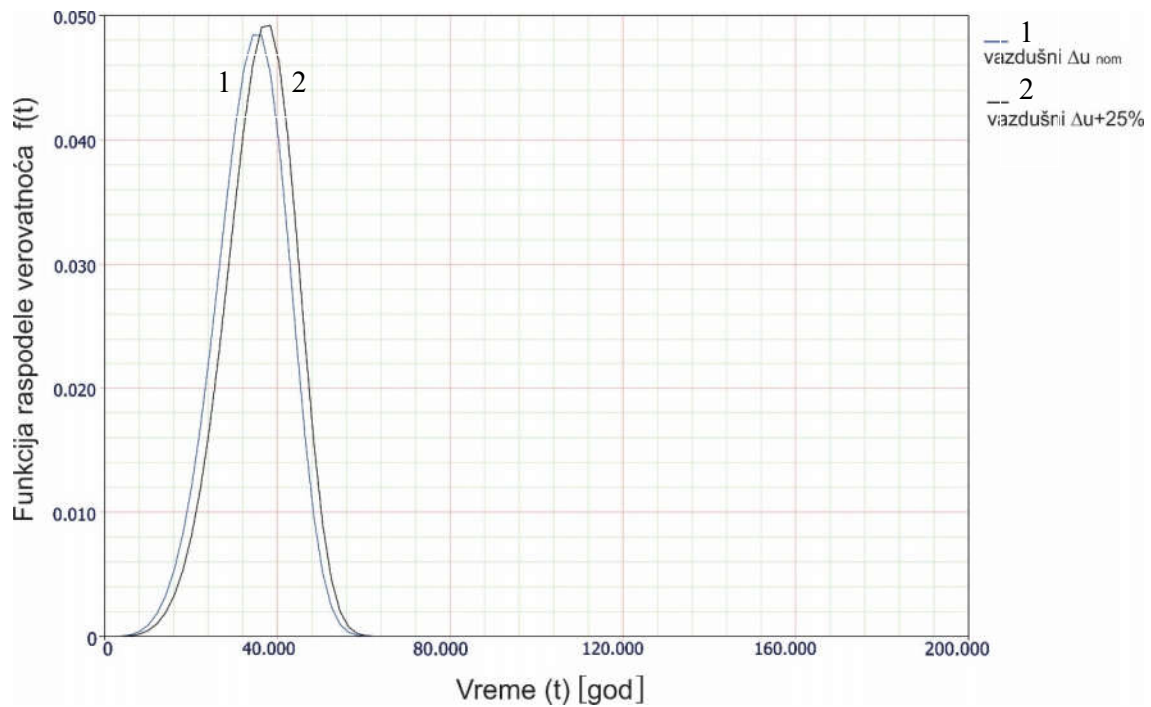
Slika p1.1 Nepouzdanost prekidača na nadzemnim vodovima



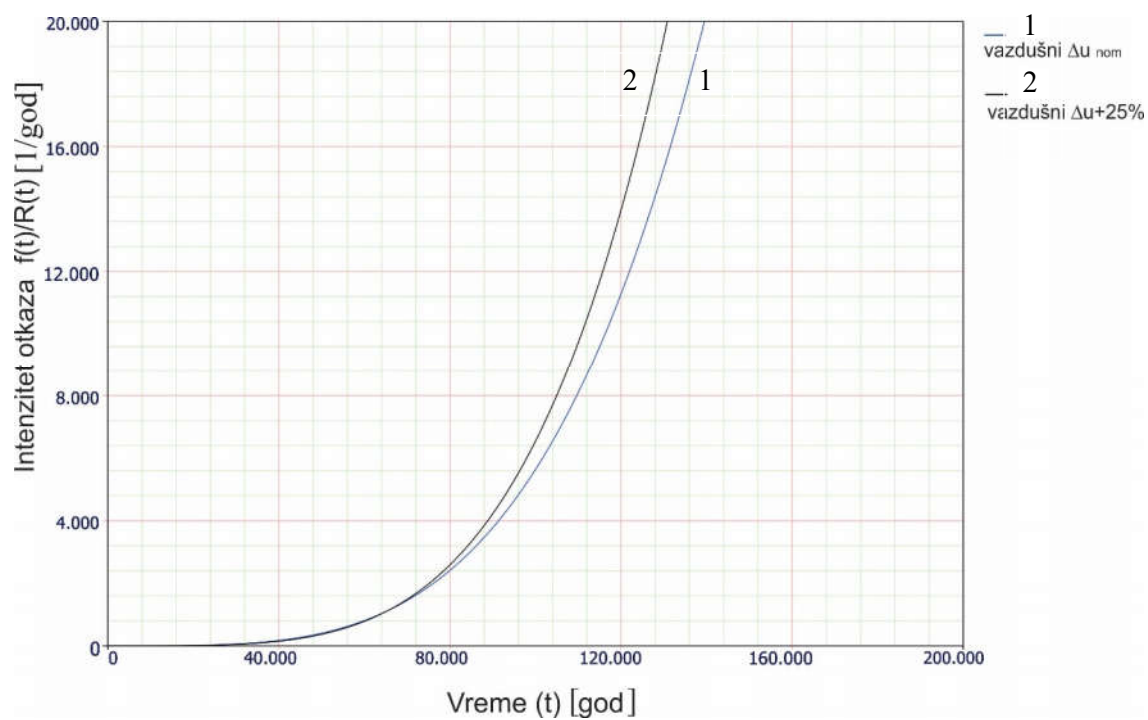
Slika p1.2 Pouzdanost prekidača na nadzemnim vodovima



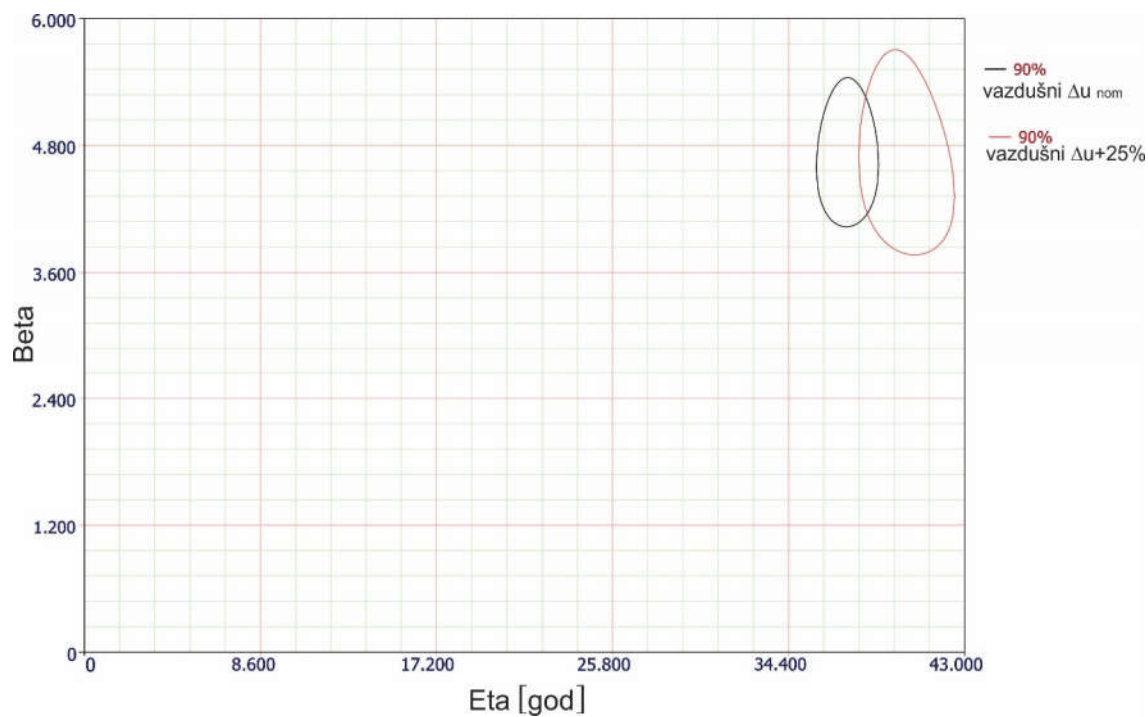
Slika p1.3 Nepouzdanost prekidača na nadzemnim vodovima



Slika p113.4 Gustina raspodele verovatnoće otkaza prekidača na nadzemnim vodovima

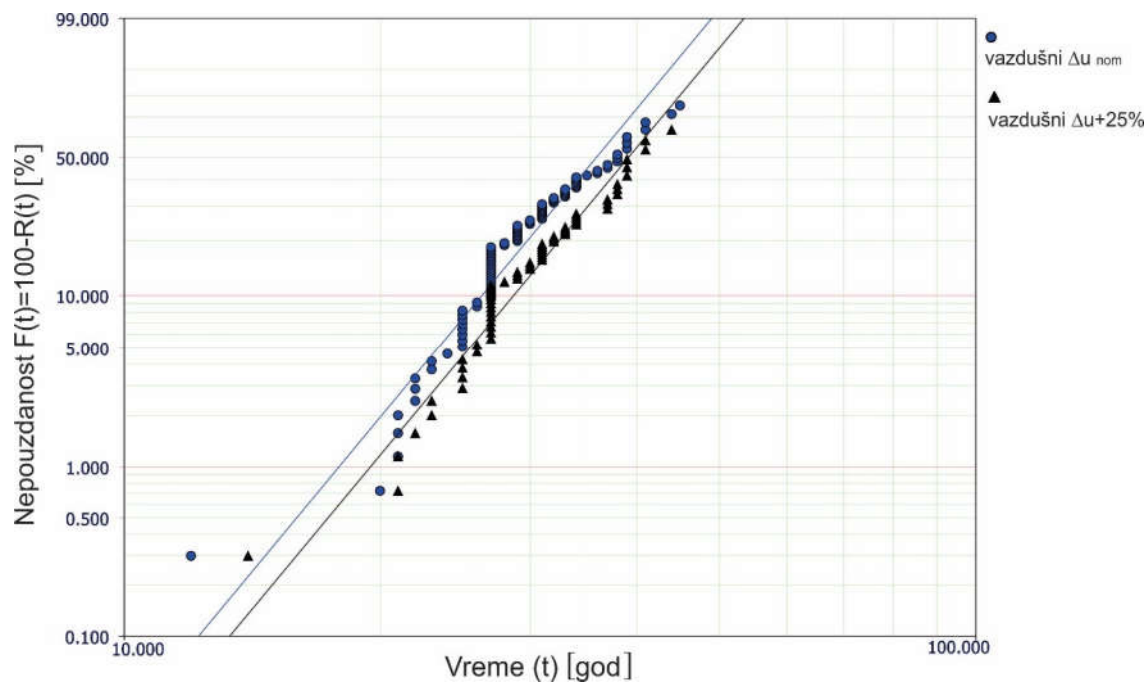


Slika p1.5 Intenzitet otkaza prekidača na nadzemnim vodovima

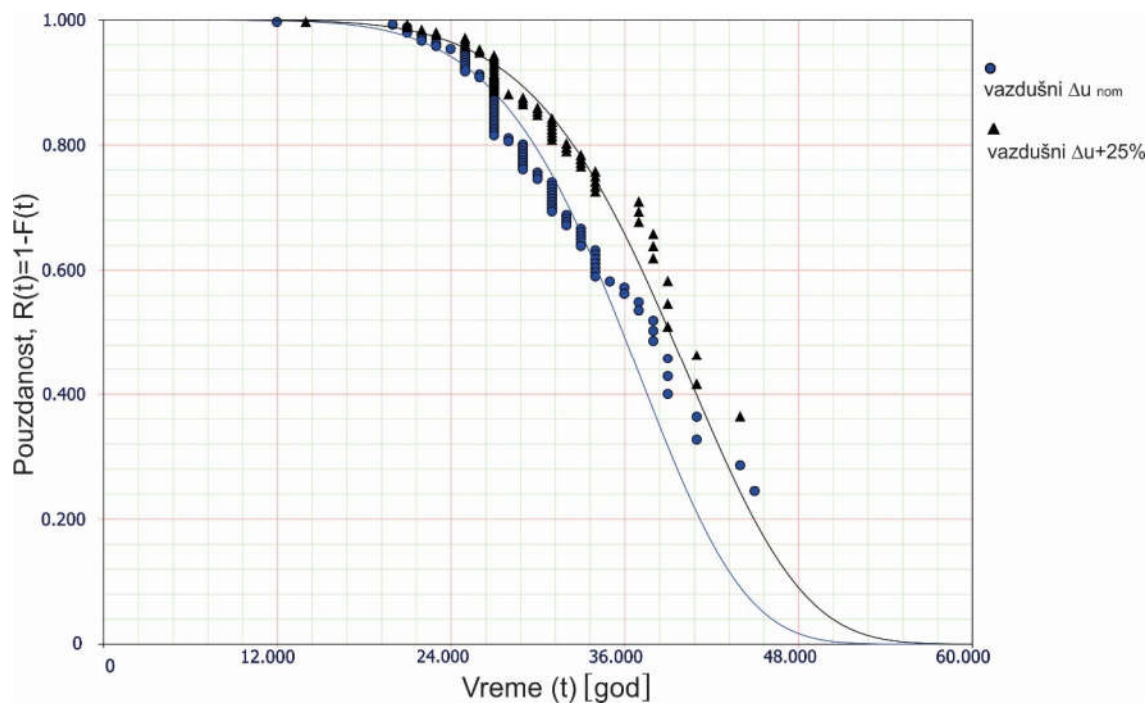


Slika p1.6 Parametri Weibulovi raspodele kod prekidača na nadzemnim vodovima

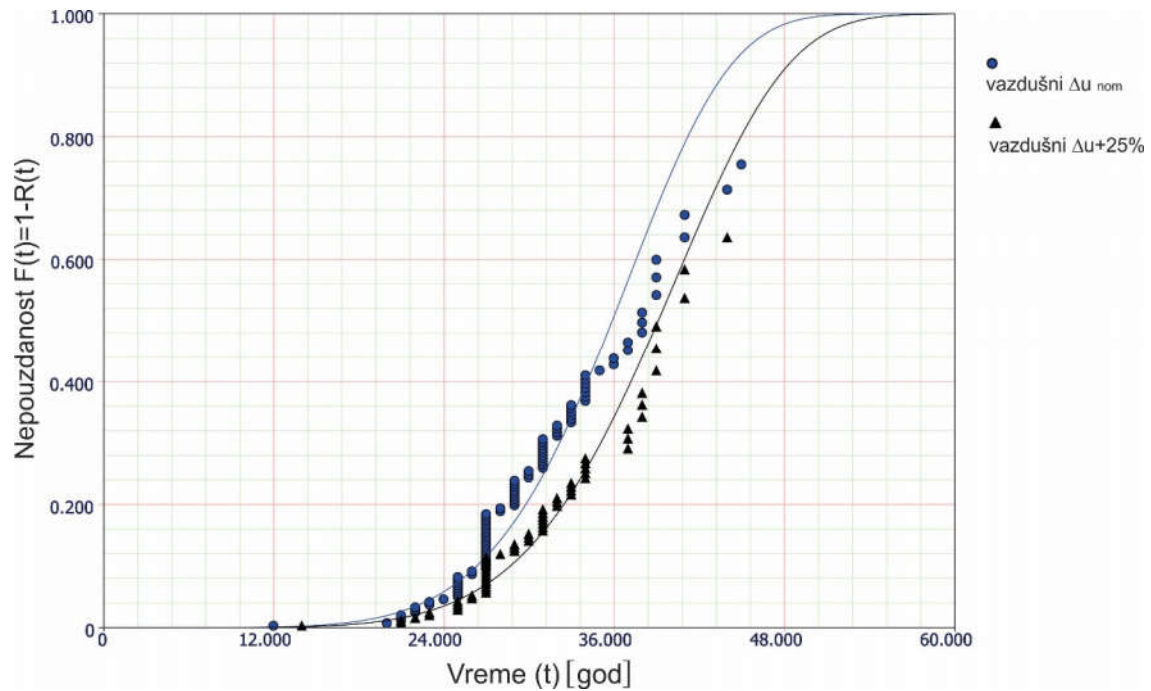
PREKIDAČI NA KABLOVSKIM VODOVIMA



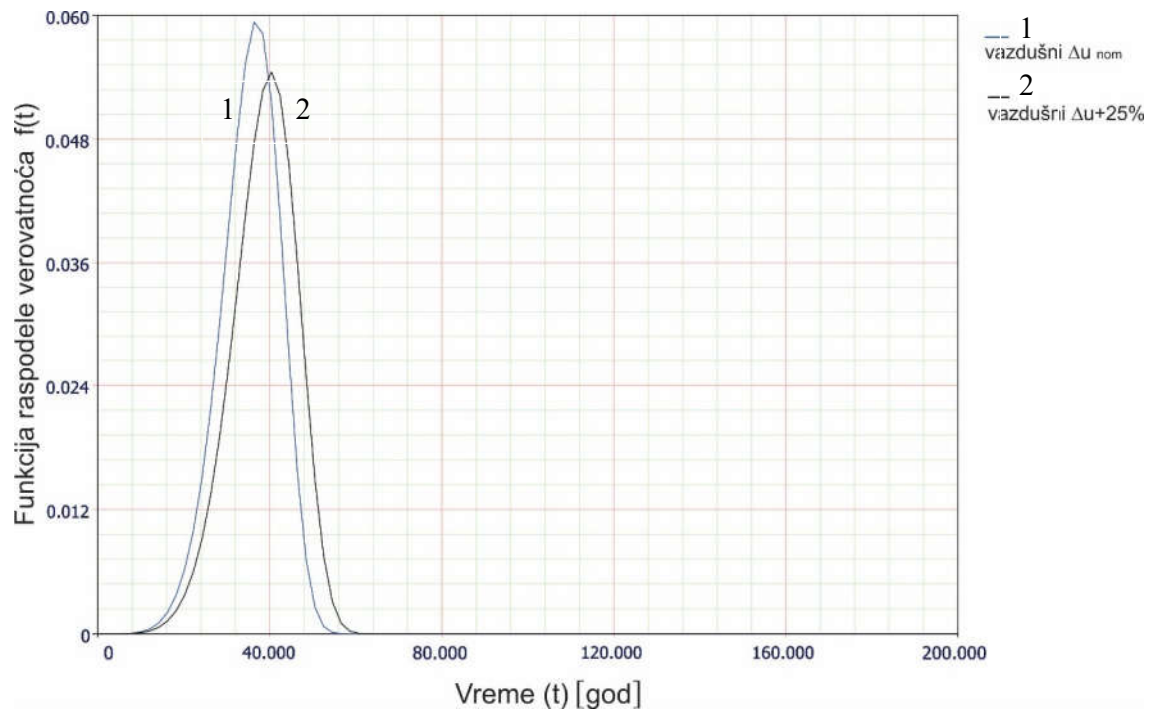
Slika p1.7 Nepouzdanost prekidača na kablovskim vodovima



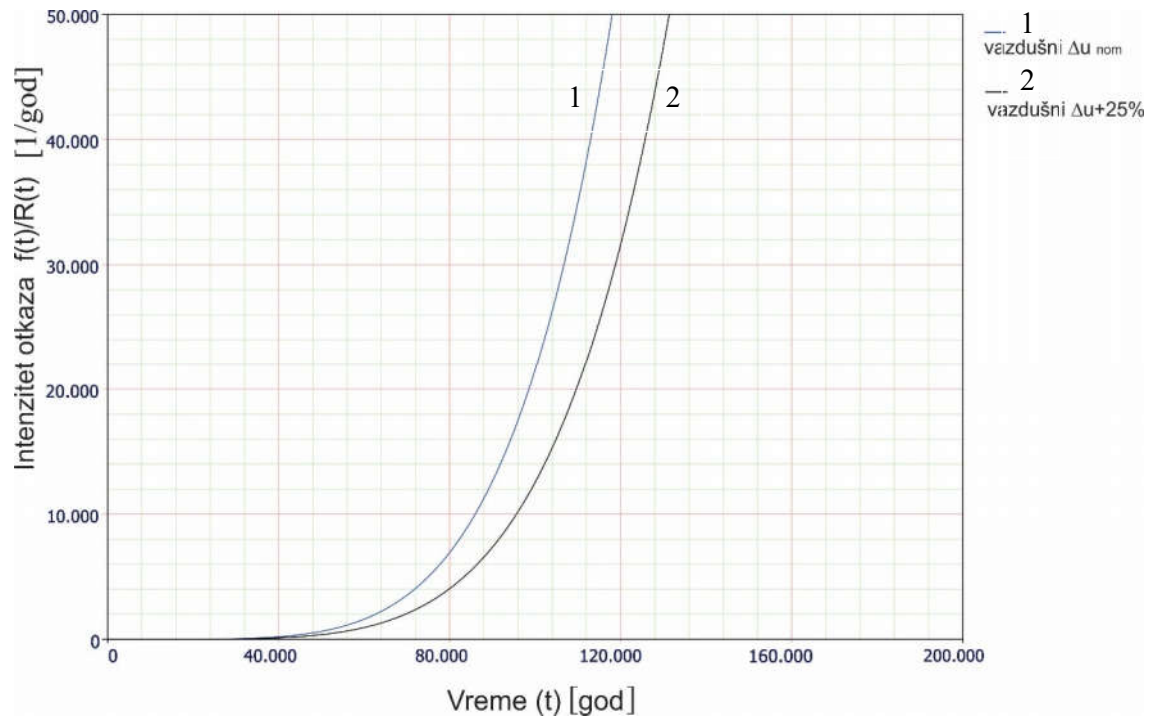
Slika p1.8 Pouzdanost prekidača na kablovskim vodovima



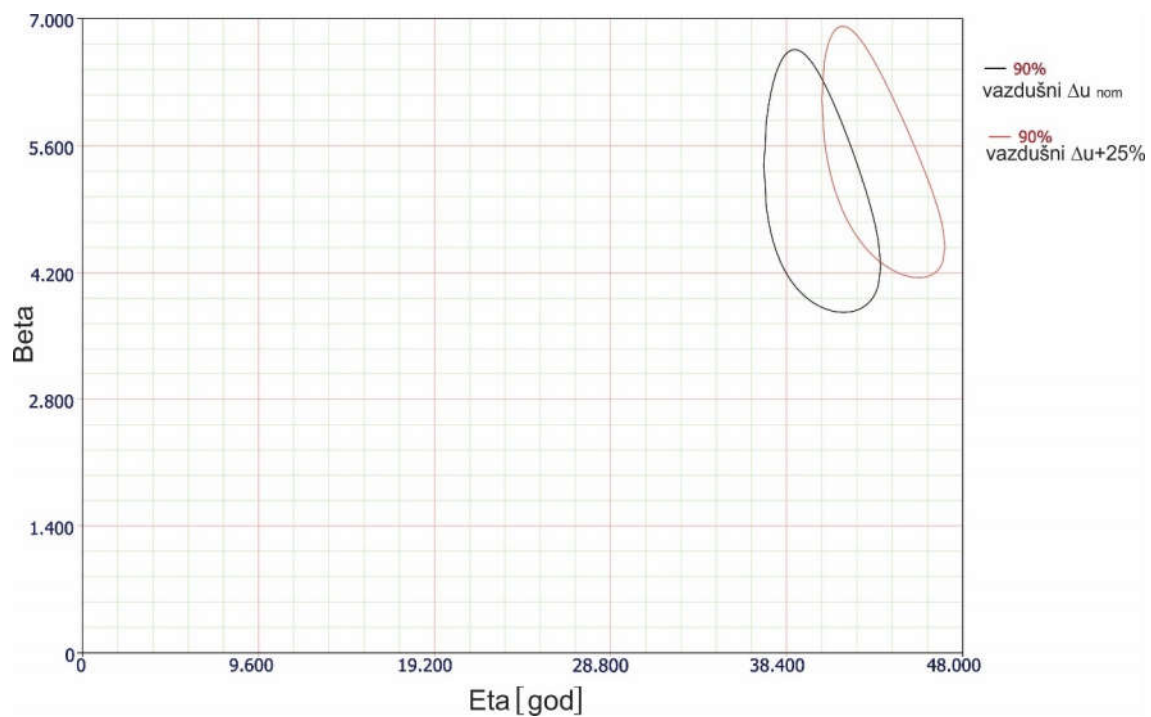
Slika p1.9 Nepouzdanost prekidača na kablovskim vodovima



Slika p1.10 Gustina raspodele verovatnoće otkaza prekidača na kablovskim vodovima

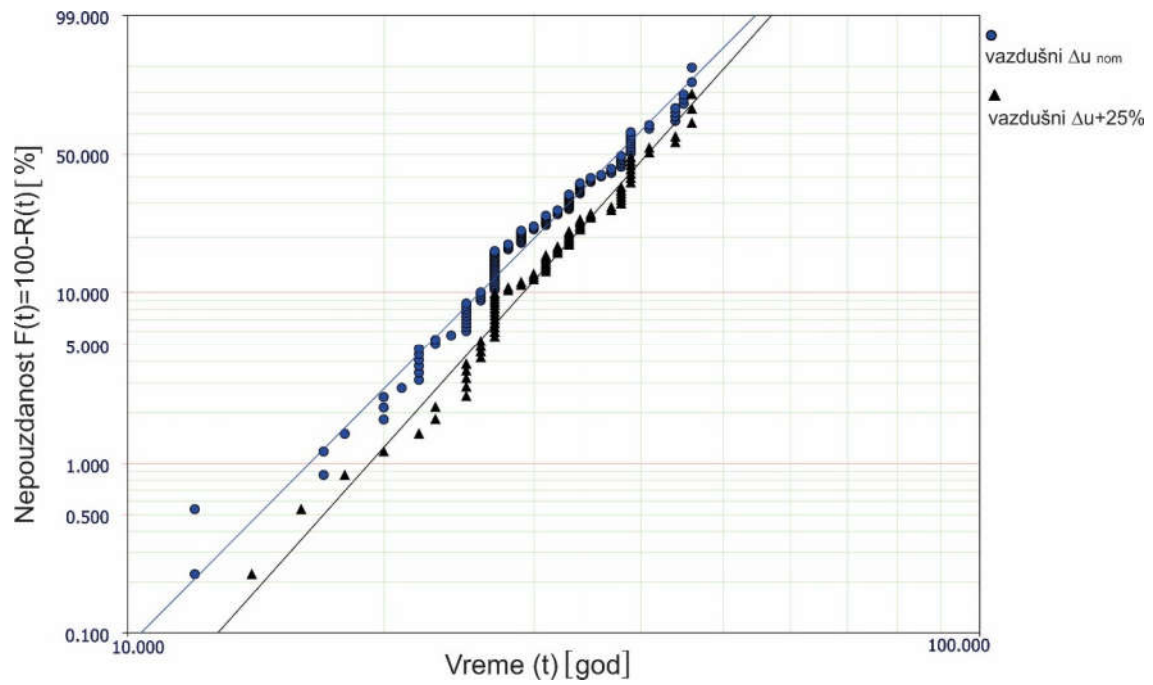


Slika p1.11 Intenzitet otkaza prekidača na kablovskim vodovima

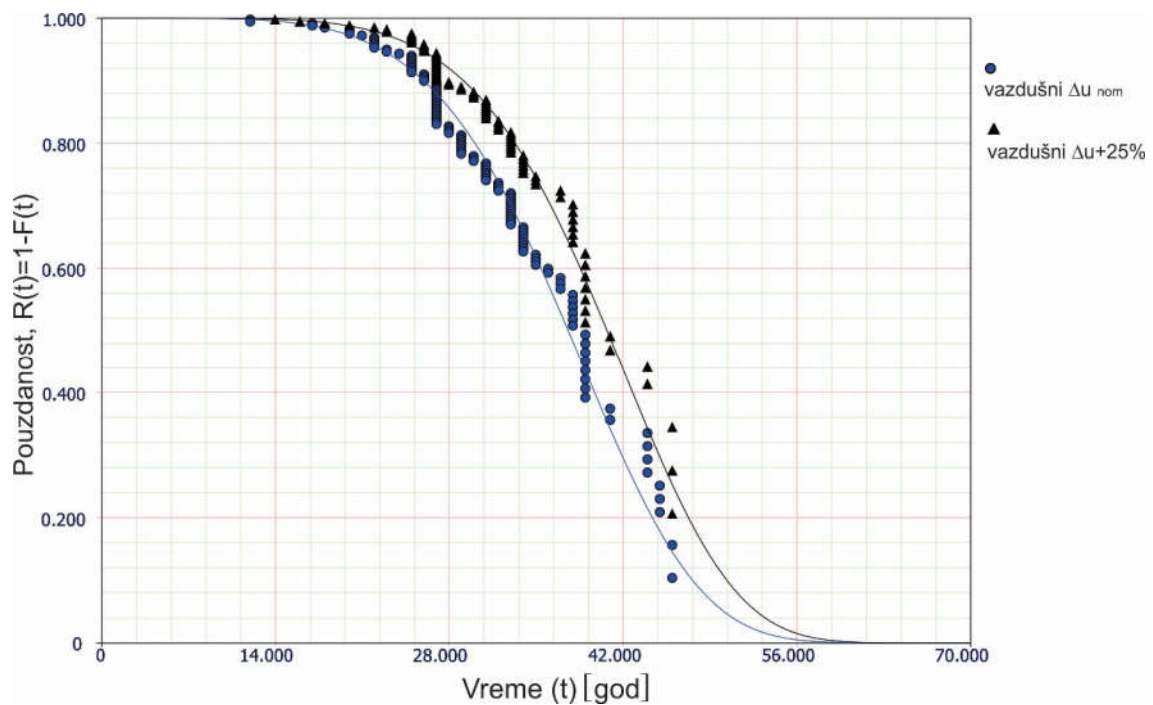


Slika p1.12 Parametri Wejbulovi raspodele kod prekidača na kablovskim vodovima

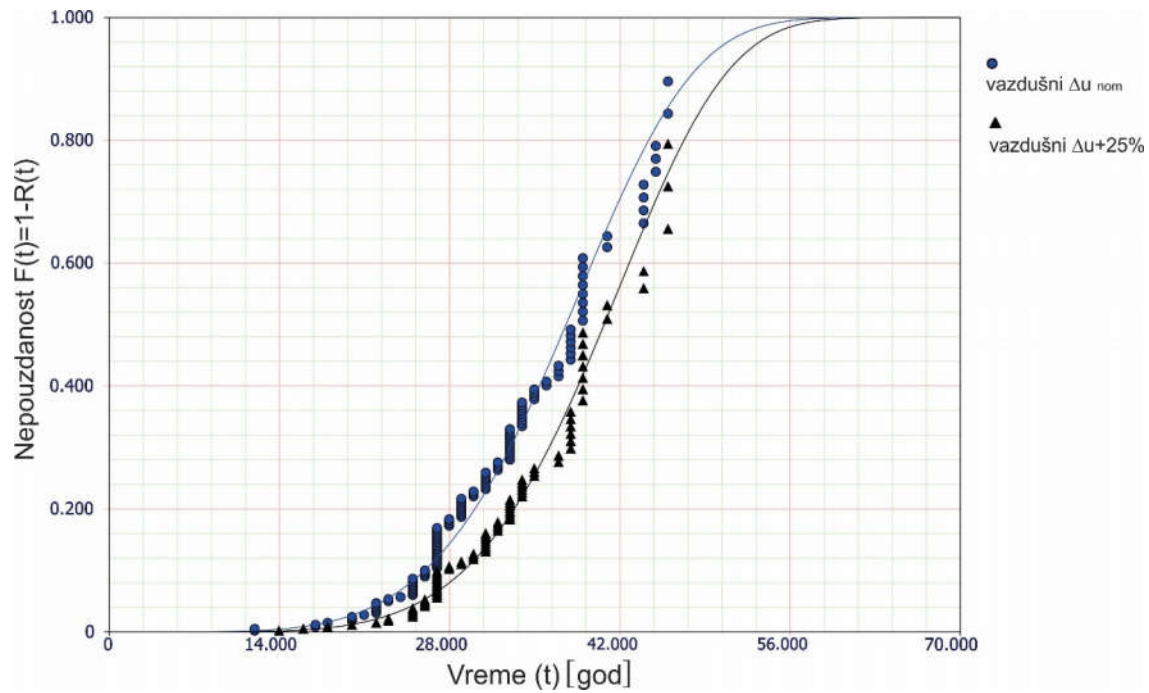
PREKIDAČI NA 10 KV VODOVIMA



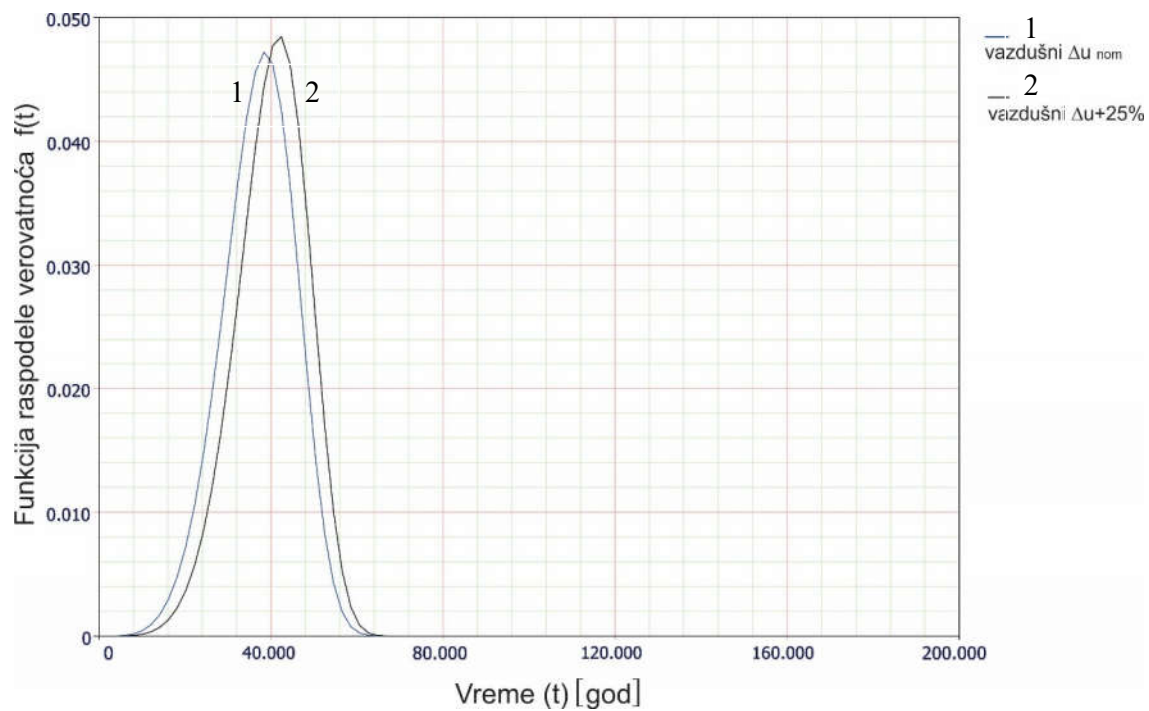
Slika p1.13 Nepouzdanost prekidača na 10 kV vodovima



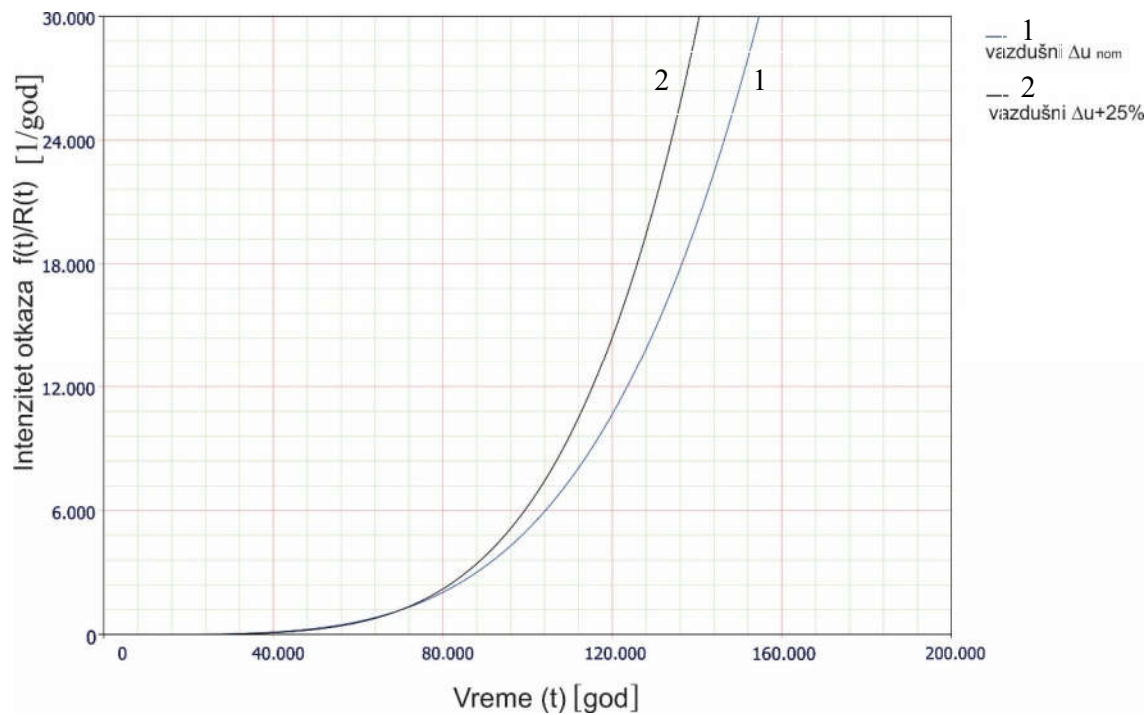
Slika p1.14 Pouzdanost prekidača na 10 kV vodovima



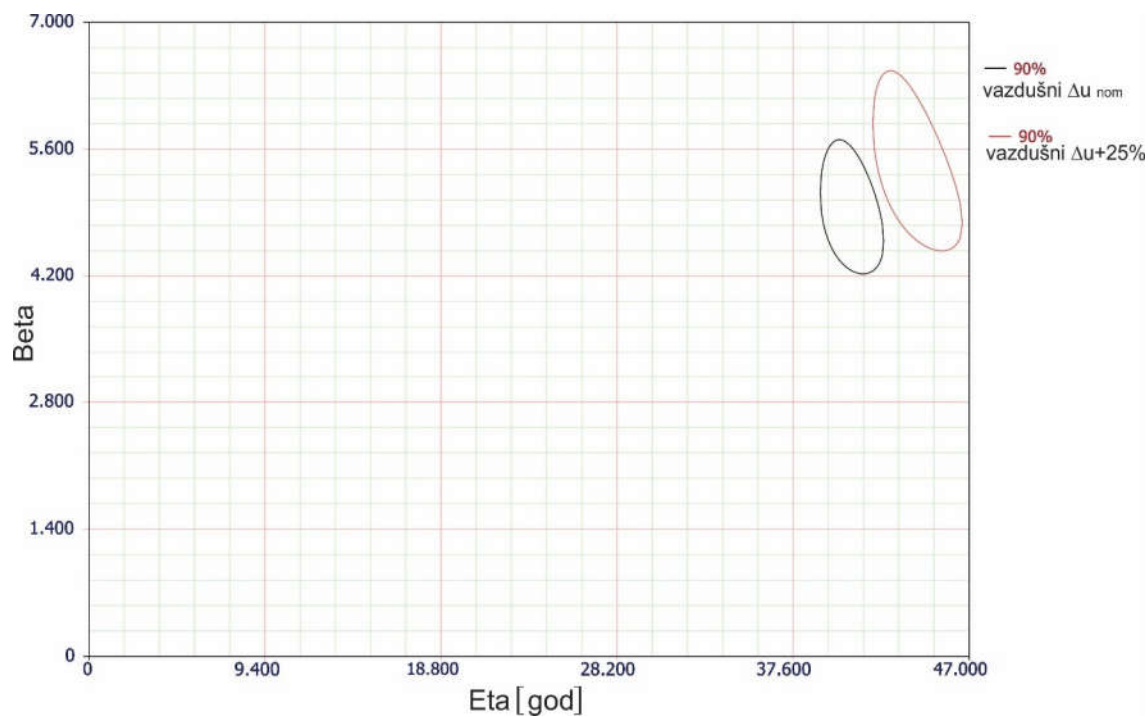
Slika p1.15 Nepouzdanost prekidača na 10 kV vodovima



Slika p1.16 Gustina raspodele verovatnoće otkaza prekidača na 10 kV vodovima

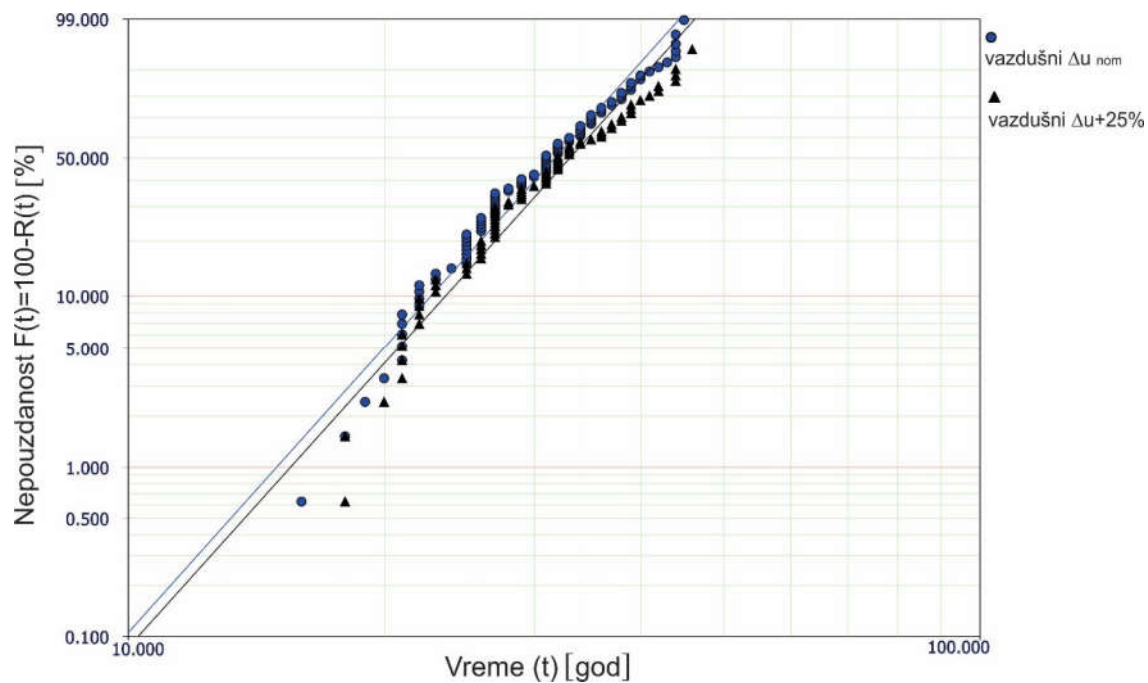


Slika p1.17 Intenzitet otkaza prekidača na 10 kV vodovima

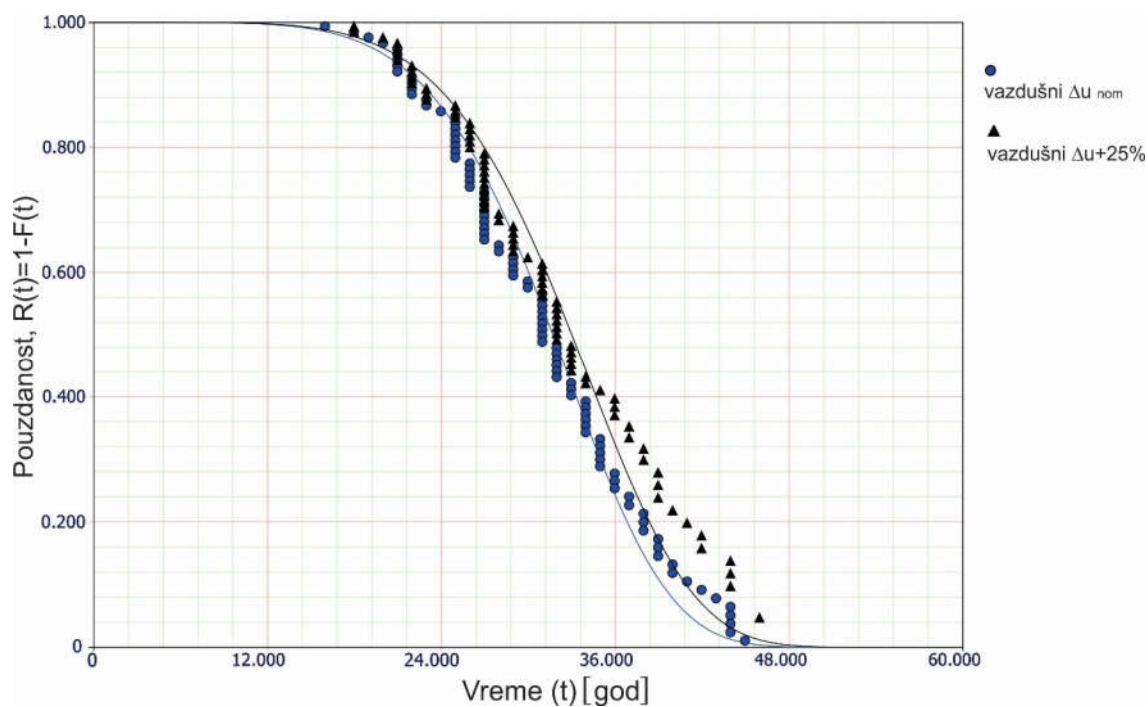


Slika p1.18 Parametri Weibulovi raspodele kod prekidača na 10 kV vodovima

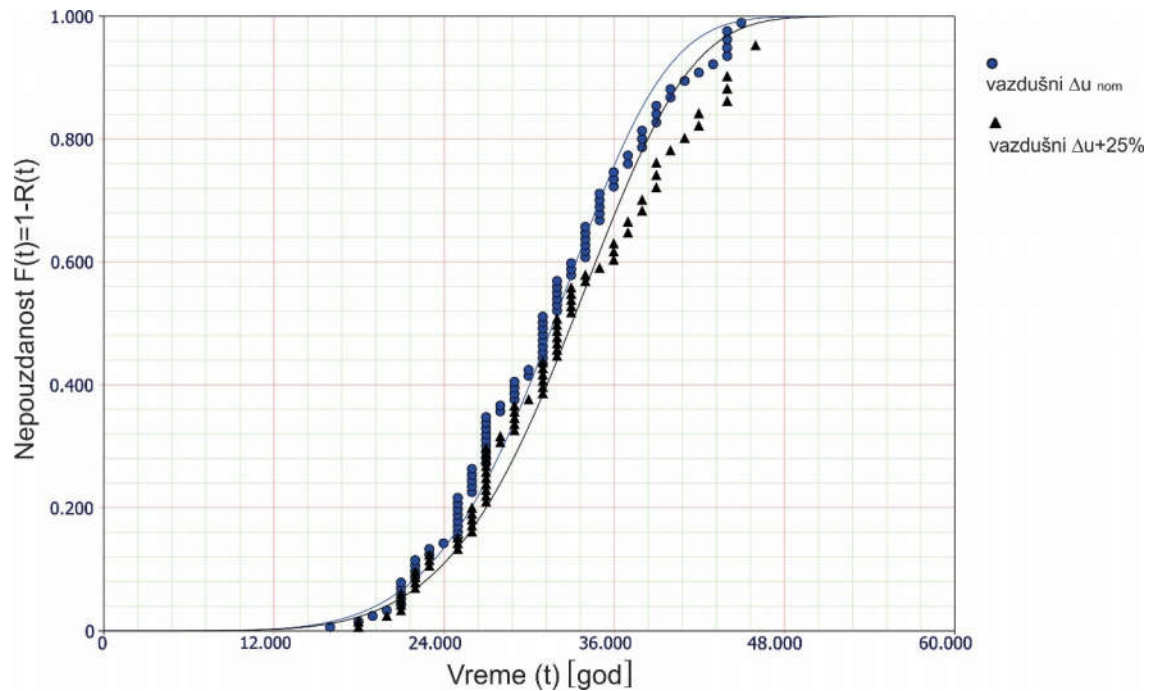
PREKIDAČI NA 35 KV VODOVIMA



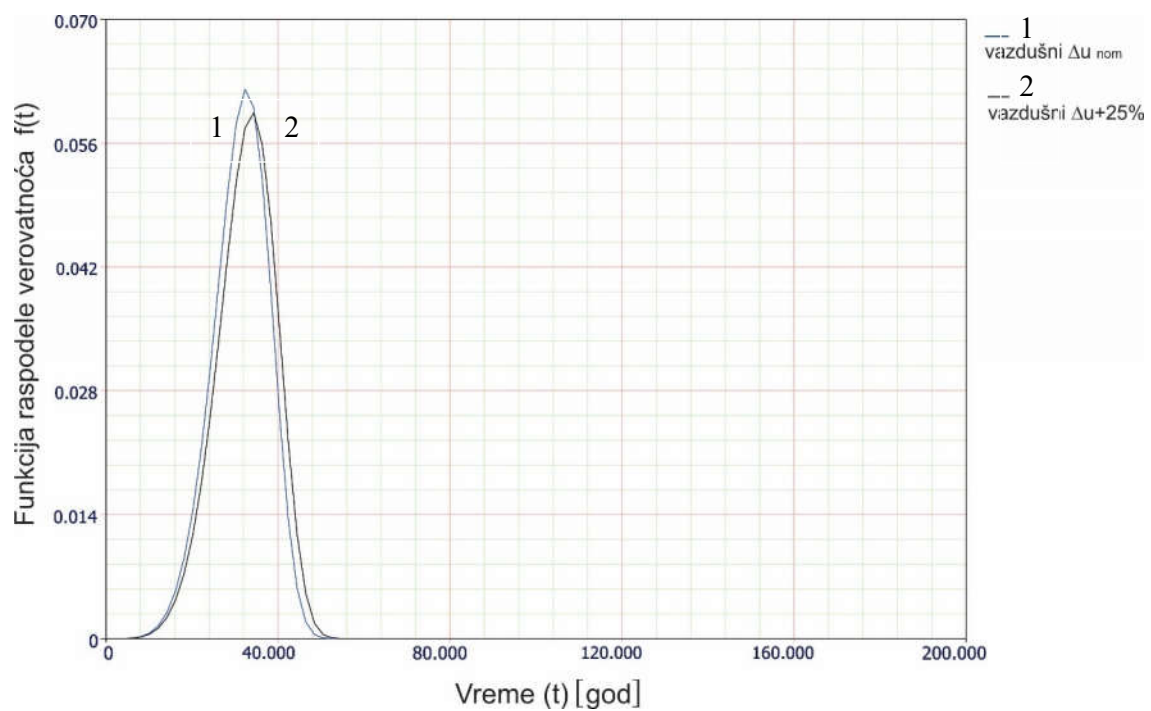
Slika p1.19 Nepouzdanost prekidača na 35 kV vodovima



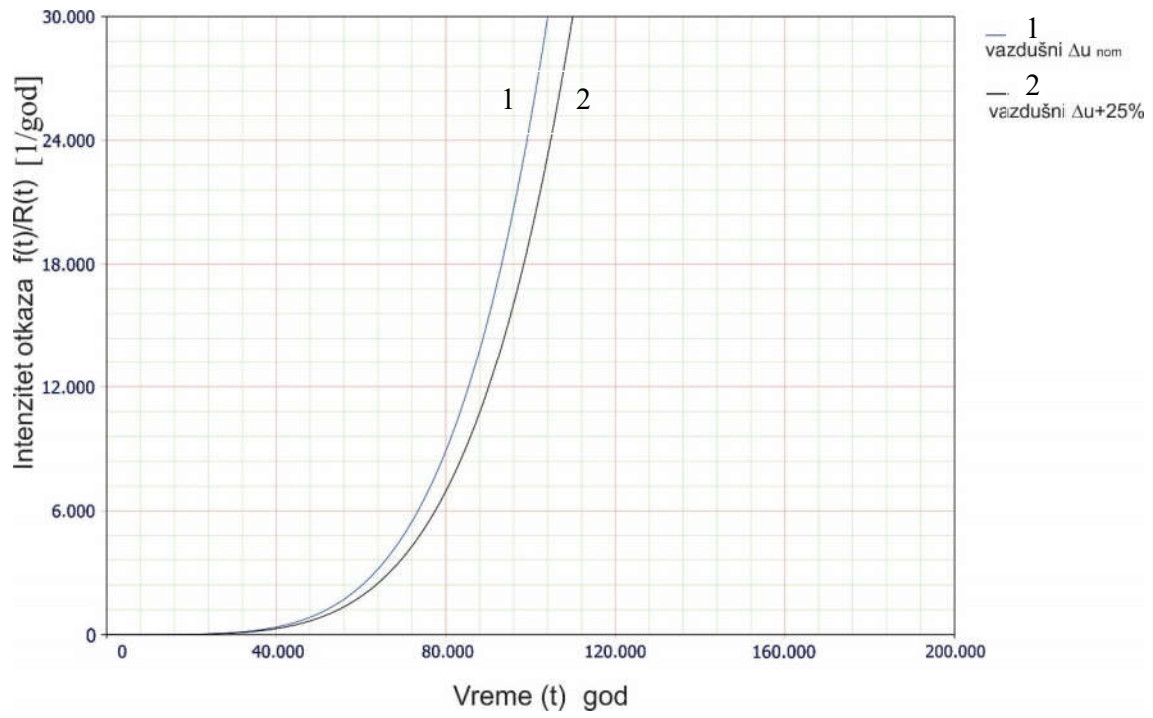
Slika p1.20 Pouzdanost prekidača na 35 kV vodovima



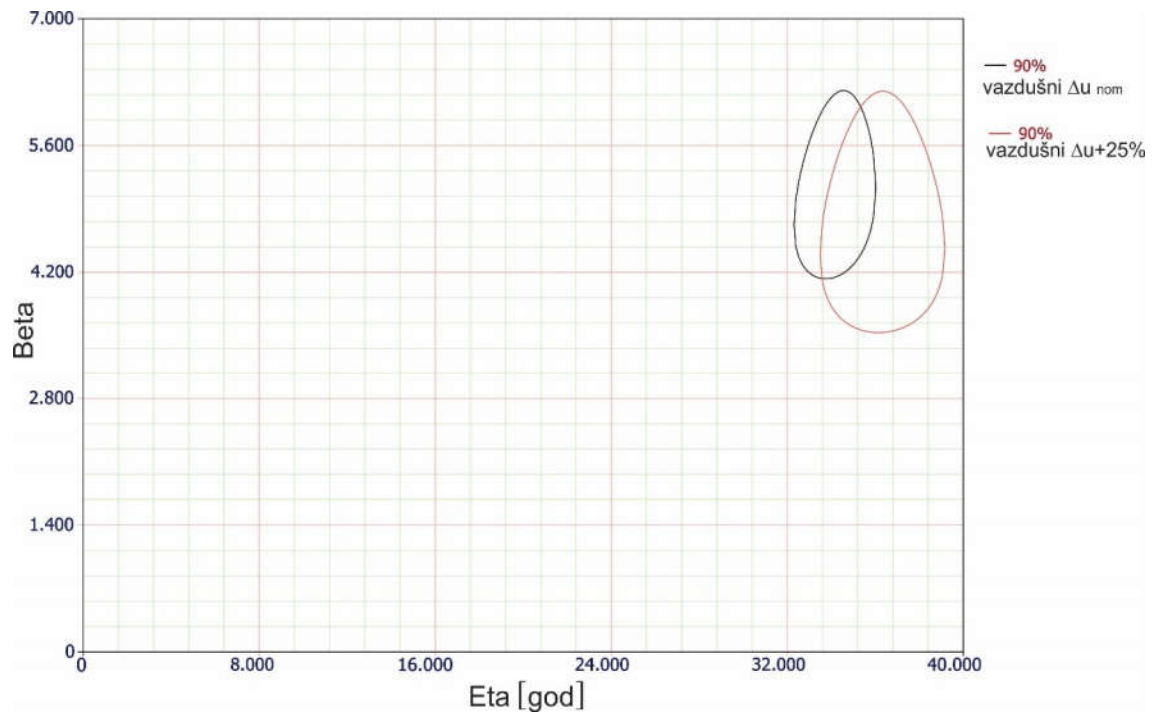
Slika p1.21 Nepouzdanost prekidača na 35 kV vodovima



Slika p1.22 Gustina raspodele verovatnoće otkaza prekidača na 35 kV vodovima

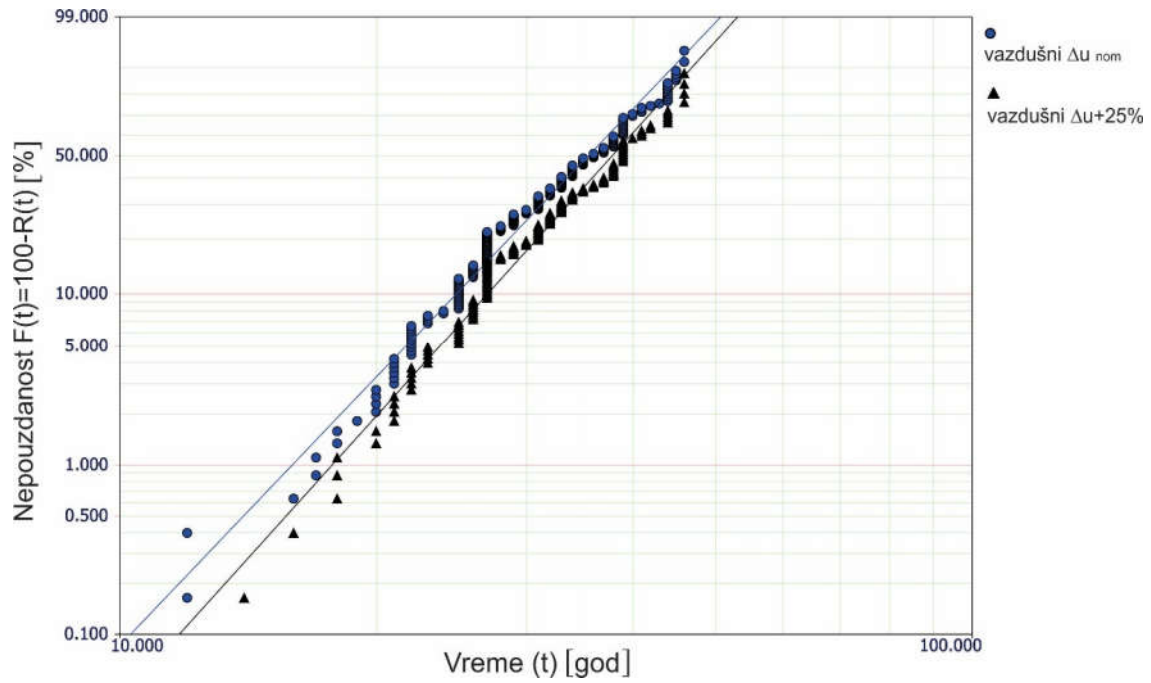


Slika p1.23 Intenzitet otkaza prekidača na 35 kV vodovima

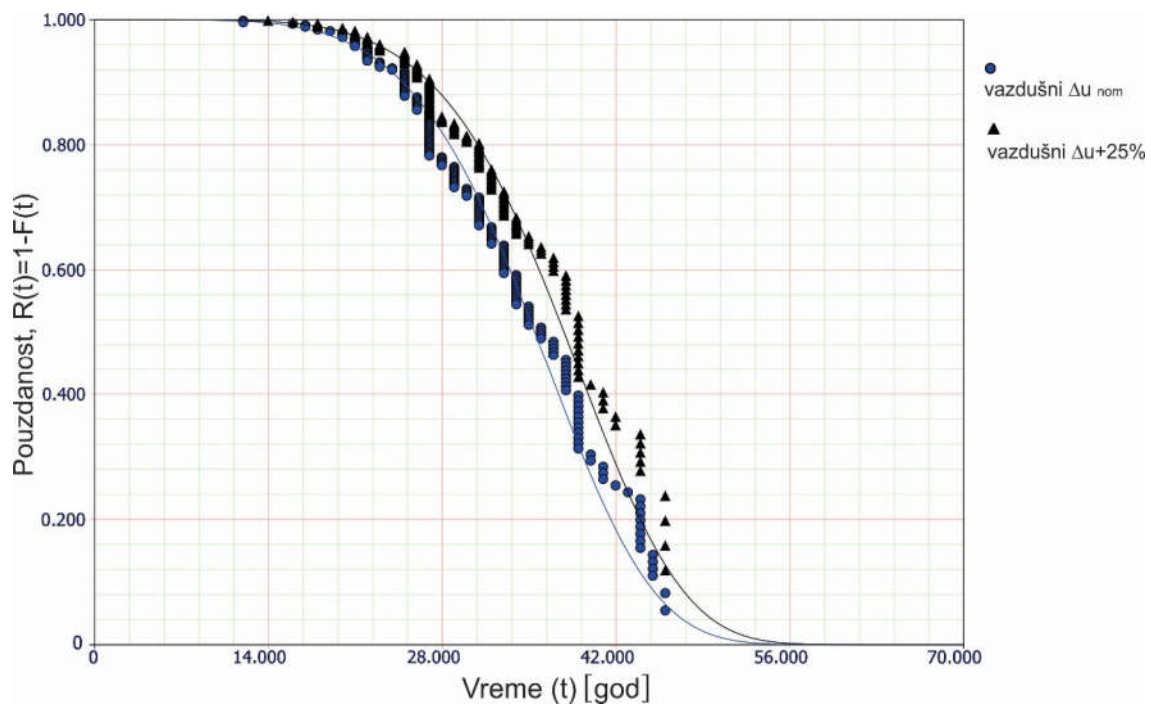


Slika p1.24 Parametri Weibulovi raspodele kod prekidača na 35 kV vodovima

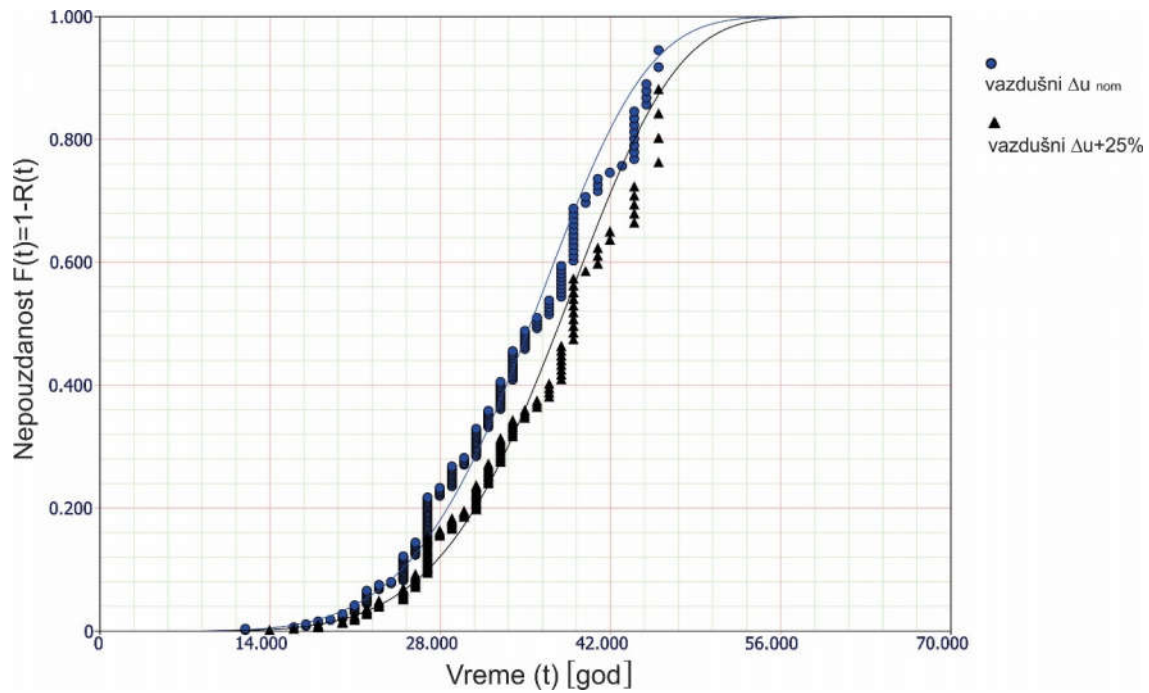
SVI PREKIDAČI



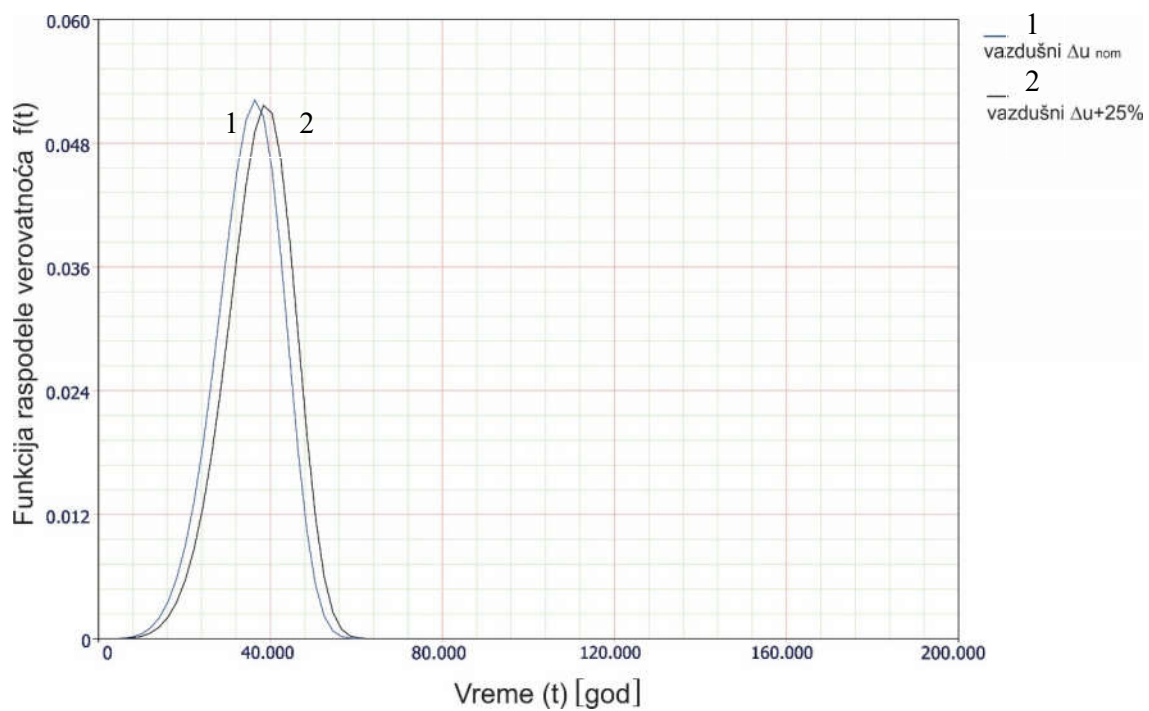
Slika p1.25 Nepouzdanost prekidača na svim tipovima vodova



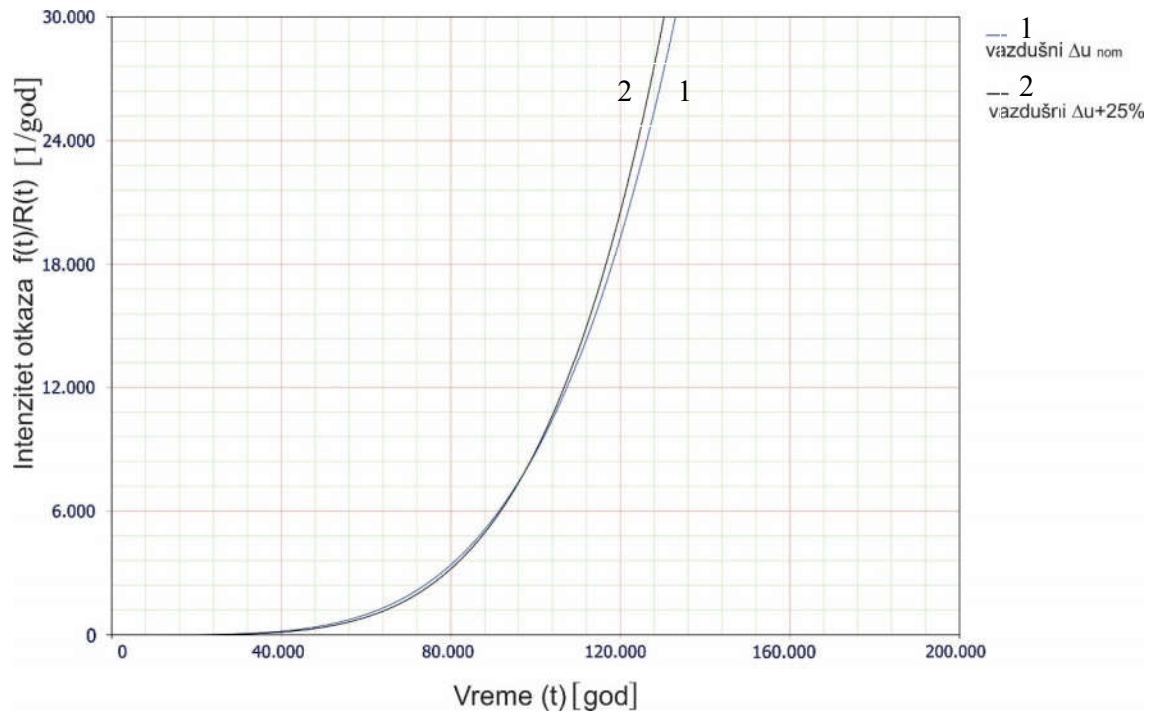
Slika p1.26 Pouzdanost prekidača na svim tipovima vodova



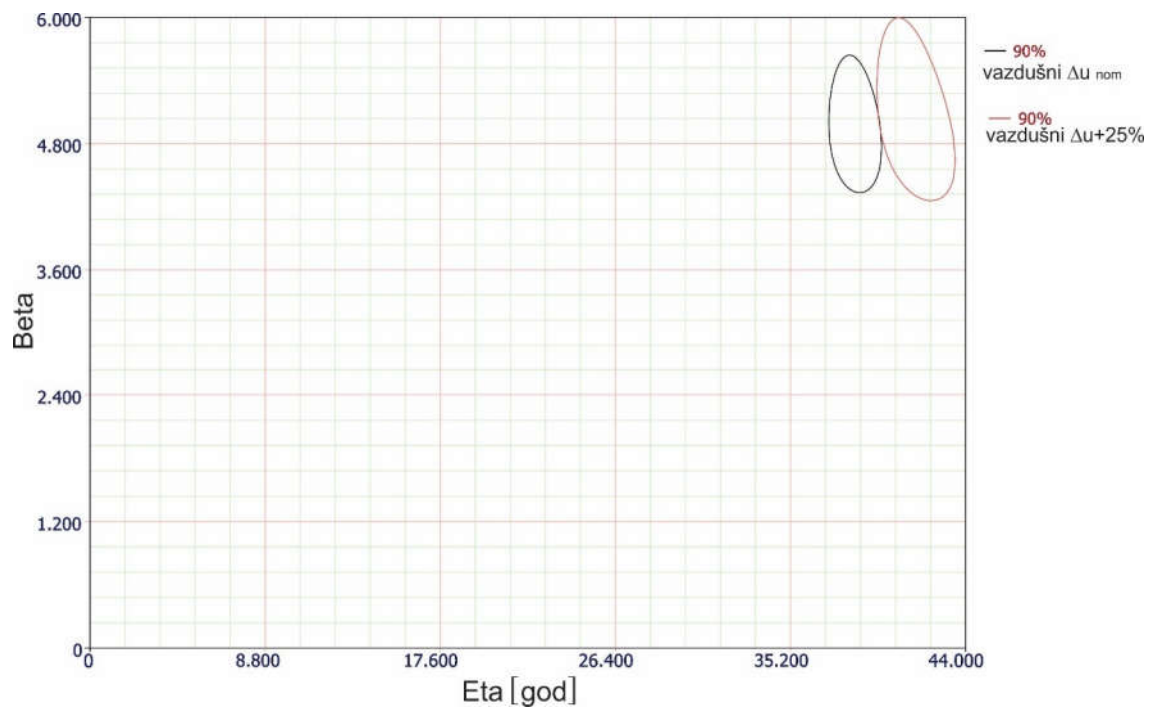
Slika p1.27 Nepouzdanost prekidača na svim tipovima vodova



Slika p1.28 Gustina raspodele verovatnoće otkaza prekidača na svim tipovima vodova

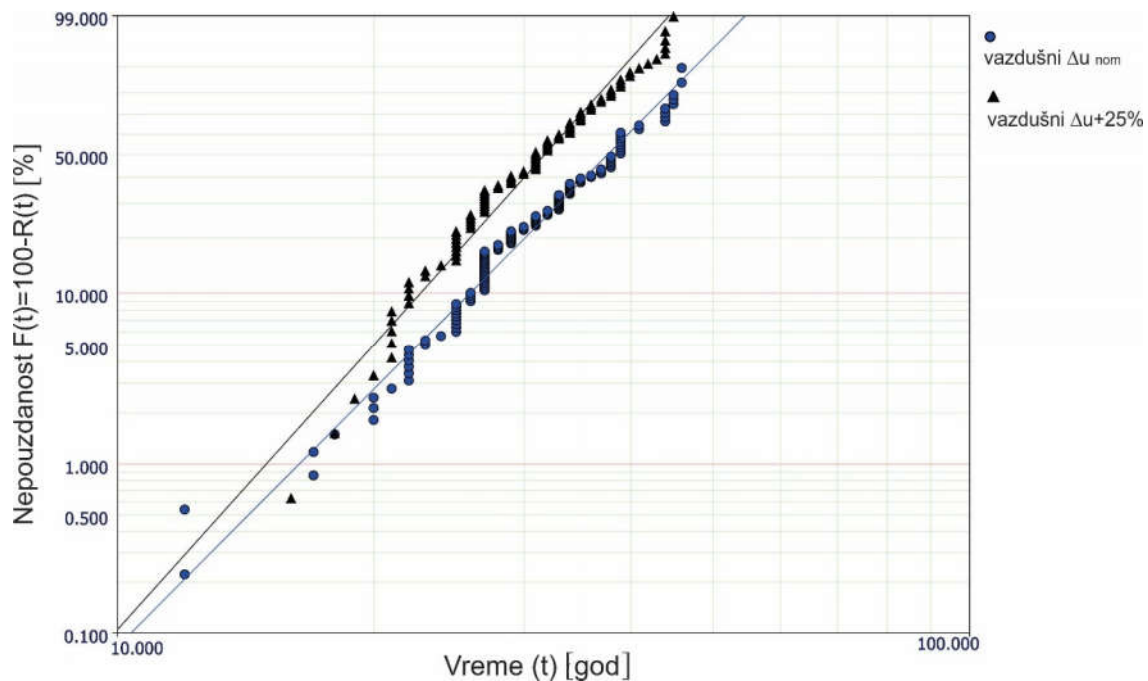


Slika p1.29 Intenzitet otkaza na svim tipovima vodova

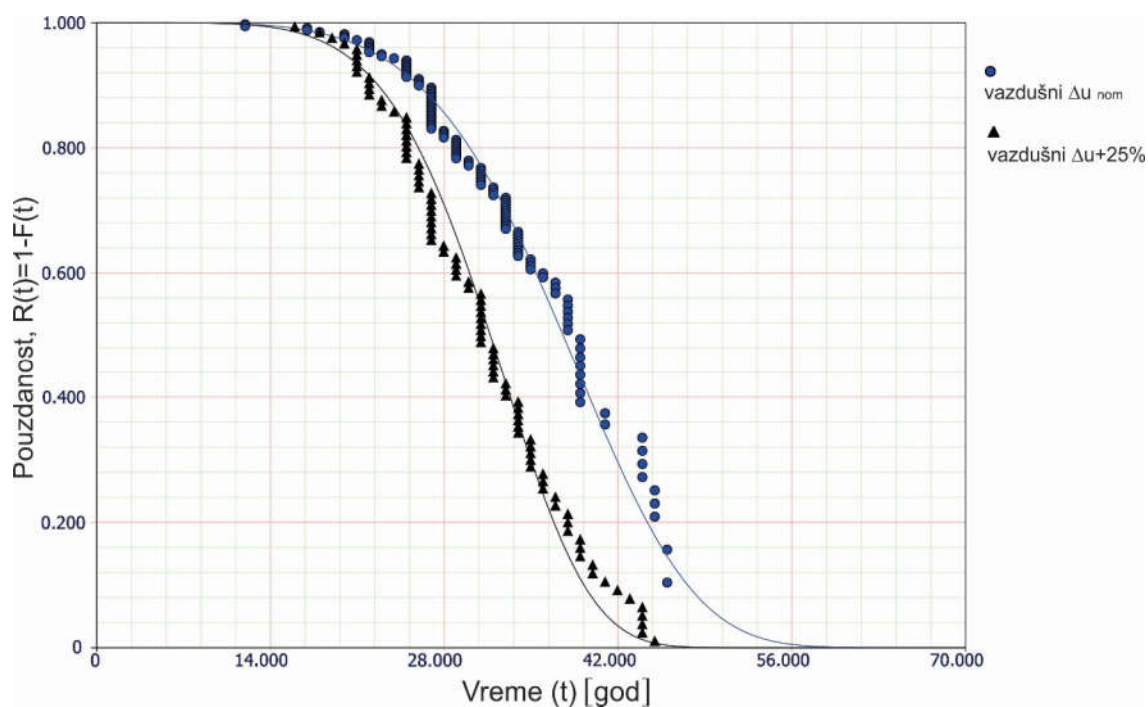


Slika p1.30 Parametri Weibulovi raspodele kod prekidača na svim tipovima vodova

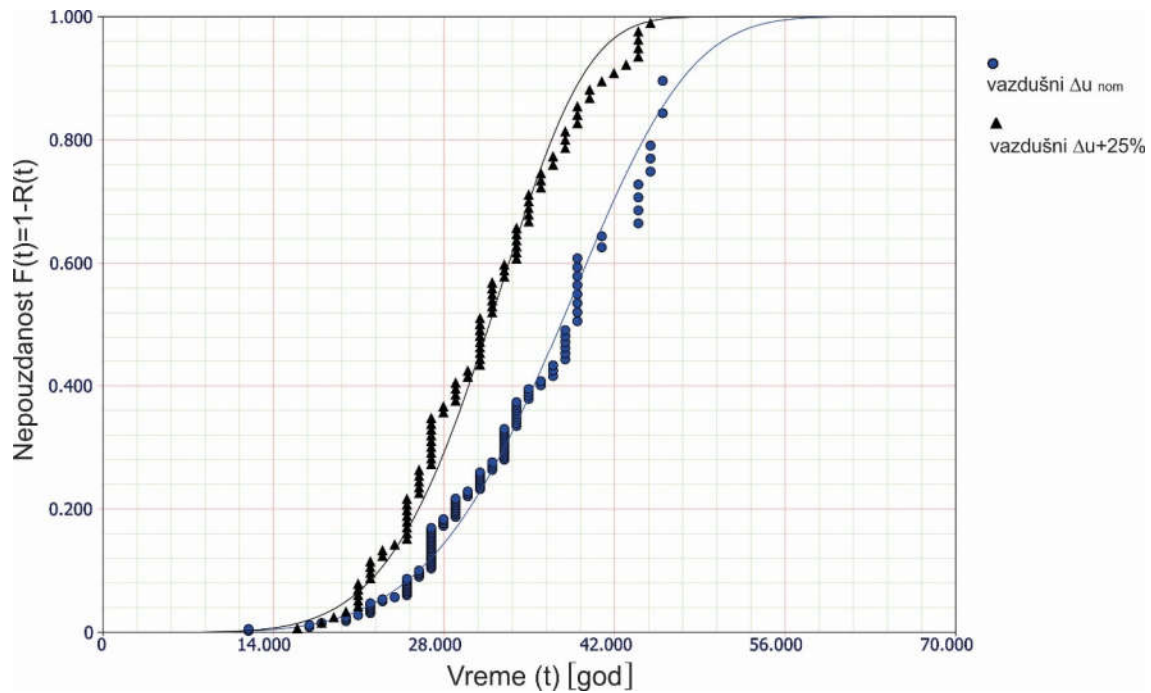
UPOREDNI PRIKAZ 10 KV I 35 KV PREKIDAČA



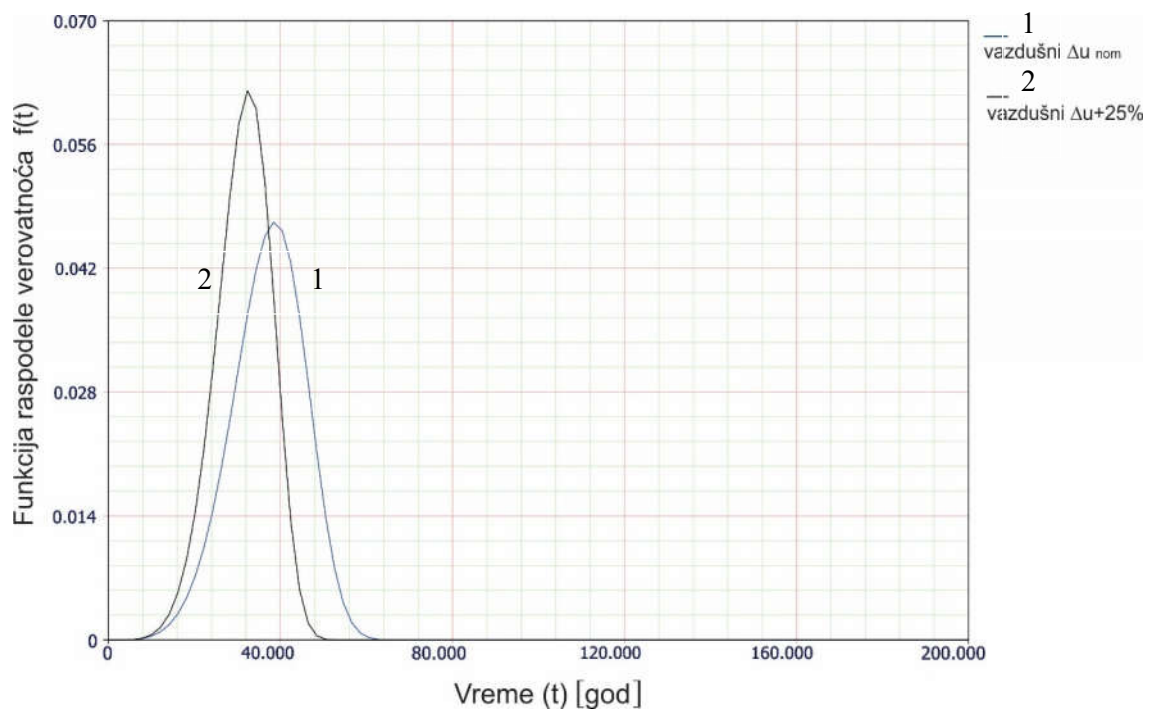
Slika p1.31 Nepouzdanost 10 kV i 35 kV prekidača



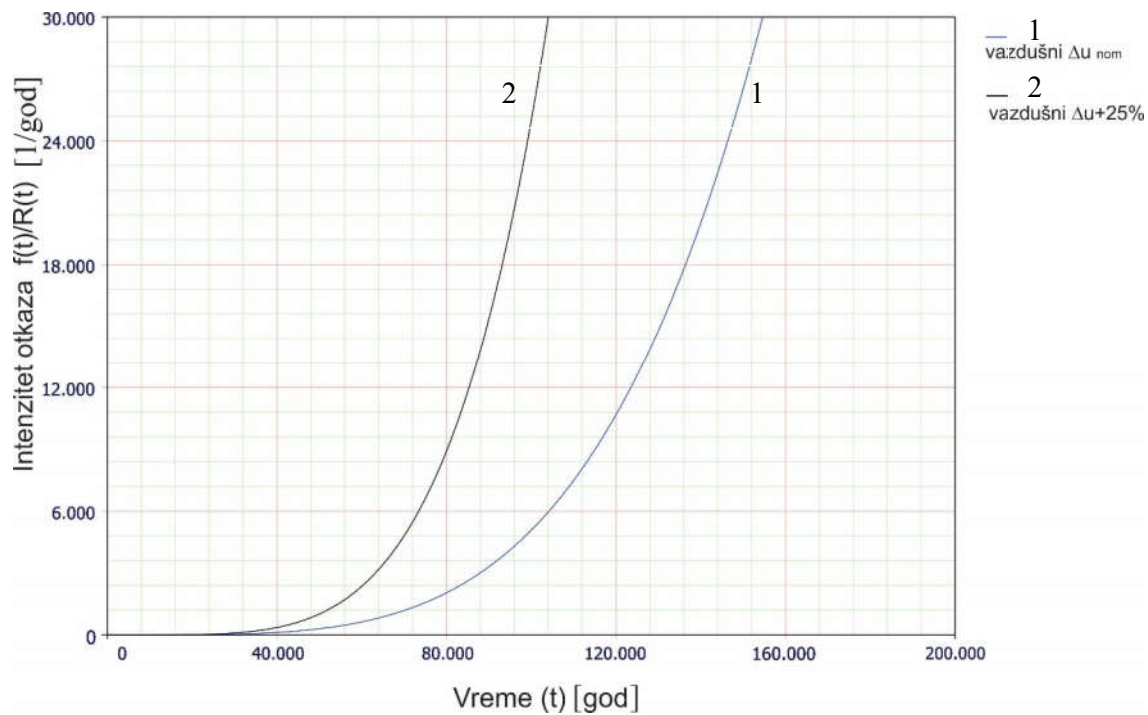
Slika p1.32 Pouzdanost 10 kV i 35 kV prekidača



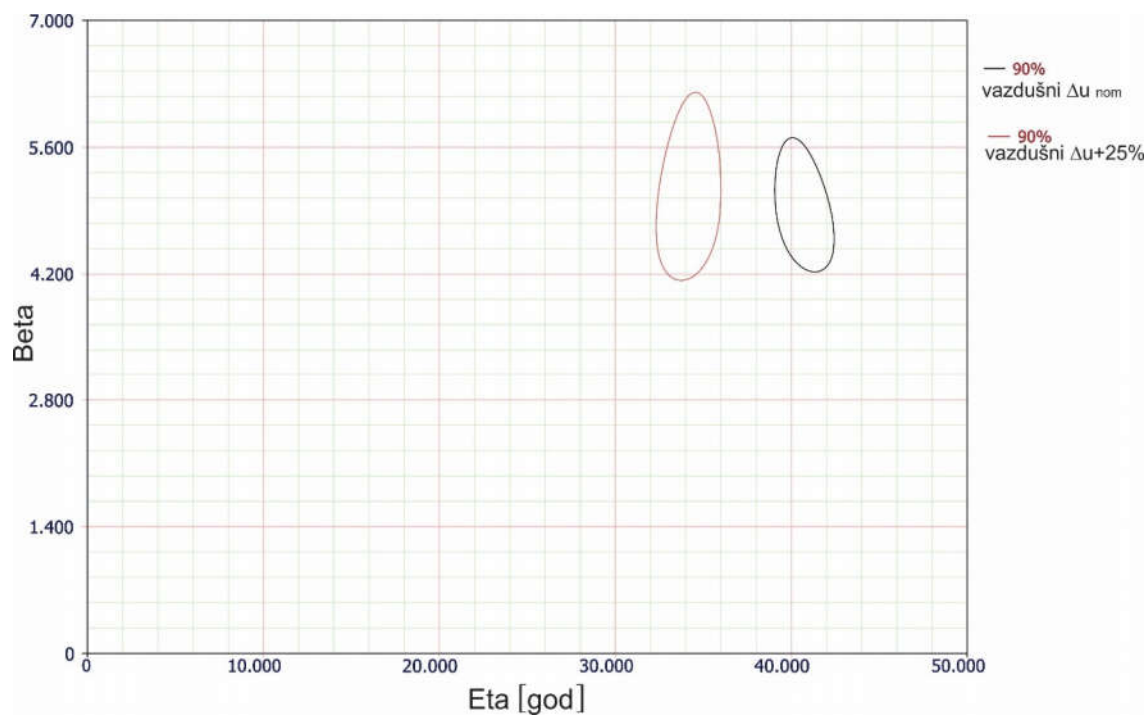
Slika p1.33 Nepouzdanost 10 kV i 35 kV prekidača



Slika p1.34 Gustina raspodele verovatnoće otkaza za 10 kV i 35 kV prekidače

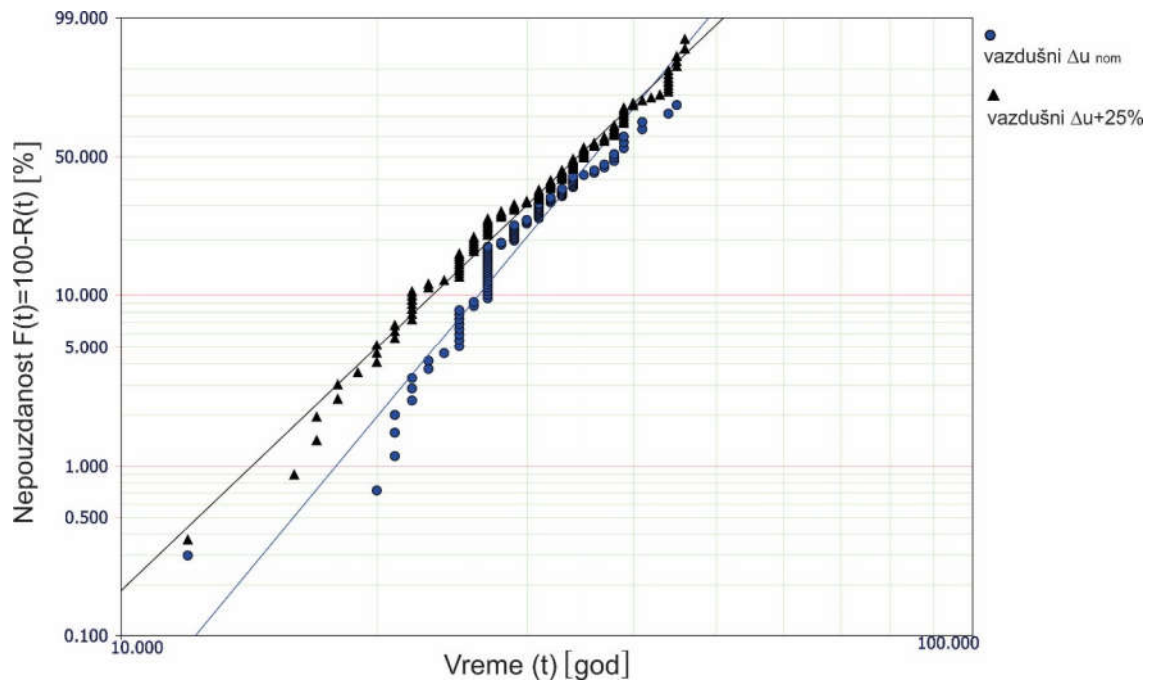


Slika p1.35 Intenzitet otkaza 10 kV i 35 kV prekidača

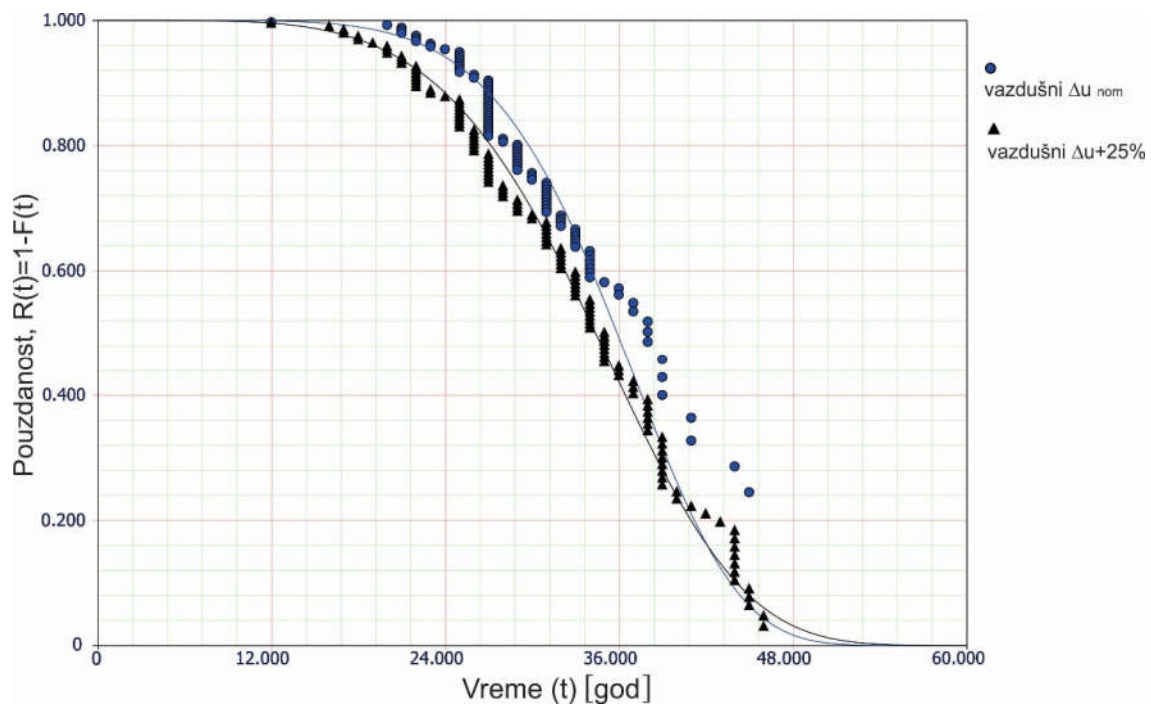


Slika p1.36 Parametri Wejbulovi raspodele kod 10 kV i 35 kV prekidača

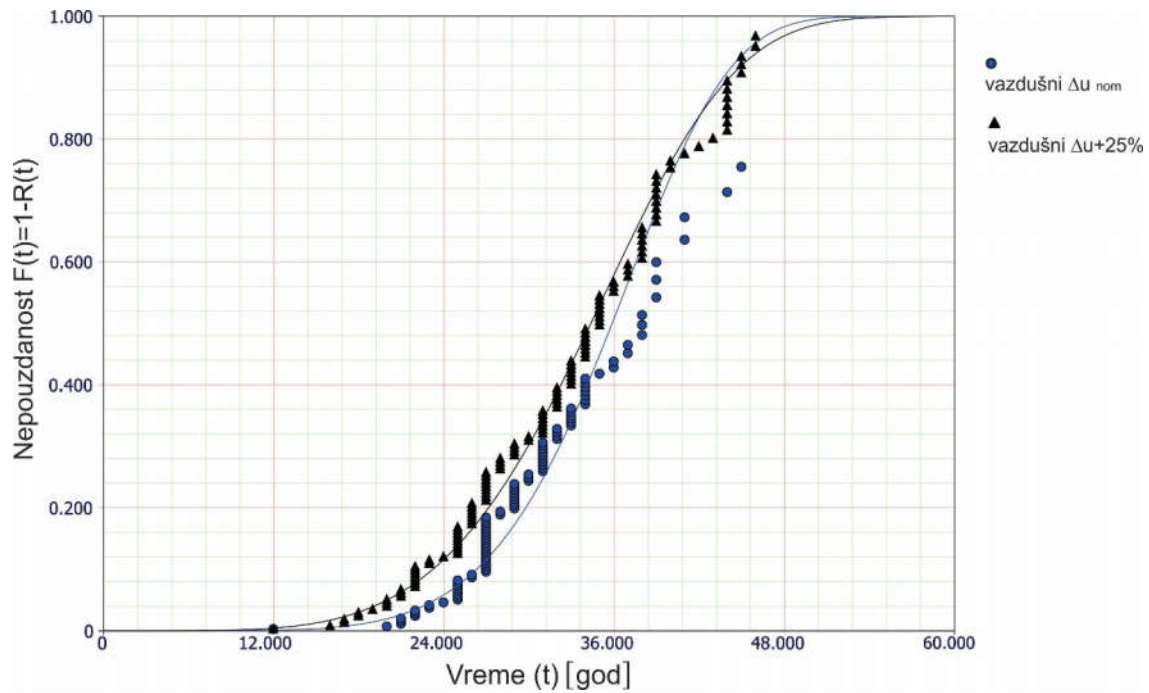
UPOREDNI PRIKAZ PREKIDAČA NADZEMNIH I KABLOVSKIH VODOVA



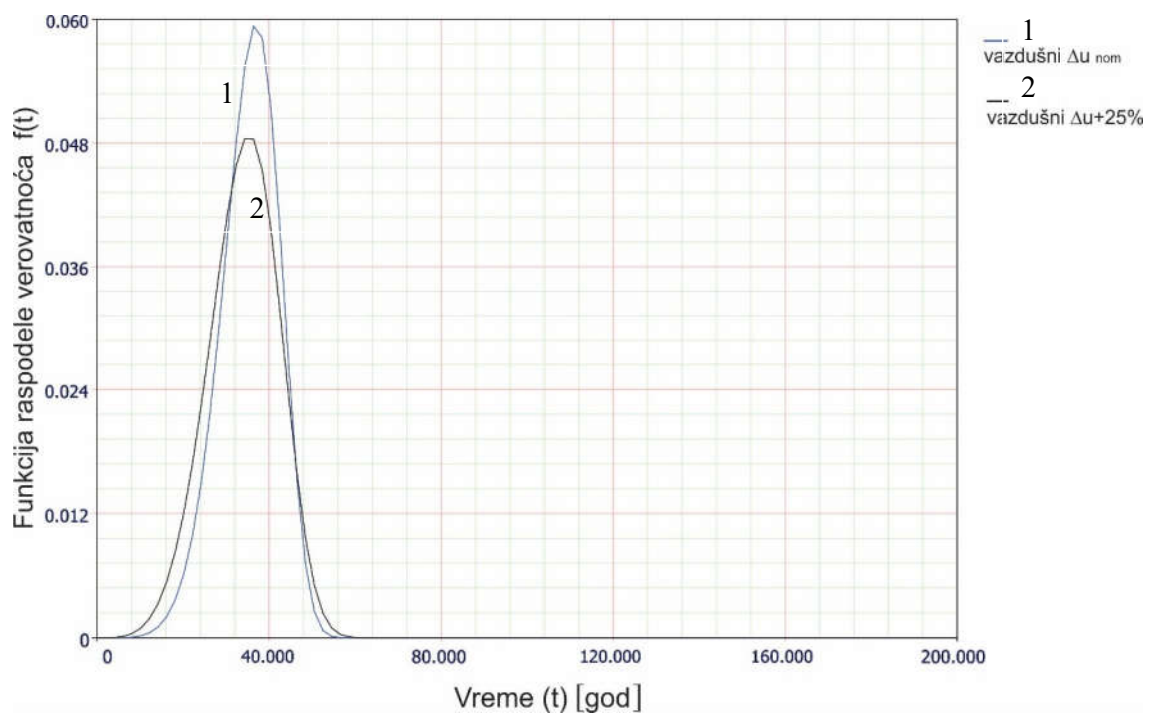
Slika p1.37 Nepouzdanost prekidača na kablovskim i nadzemnim vodovima



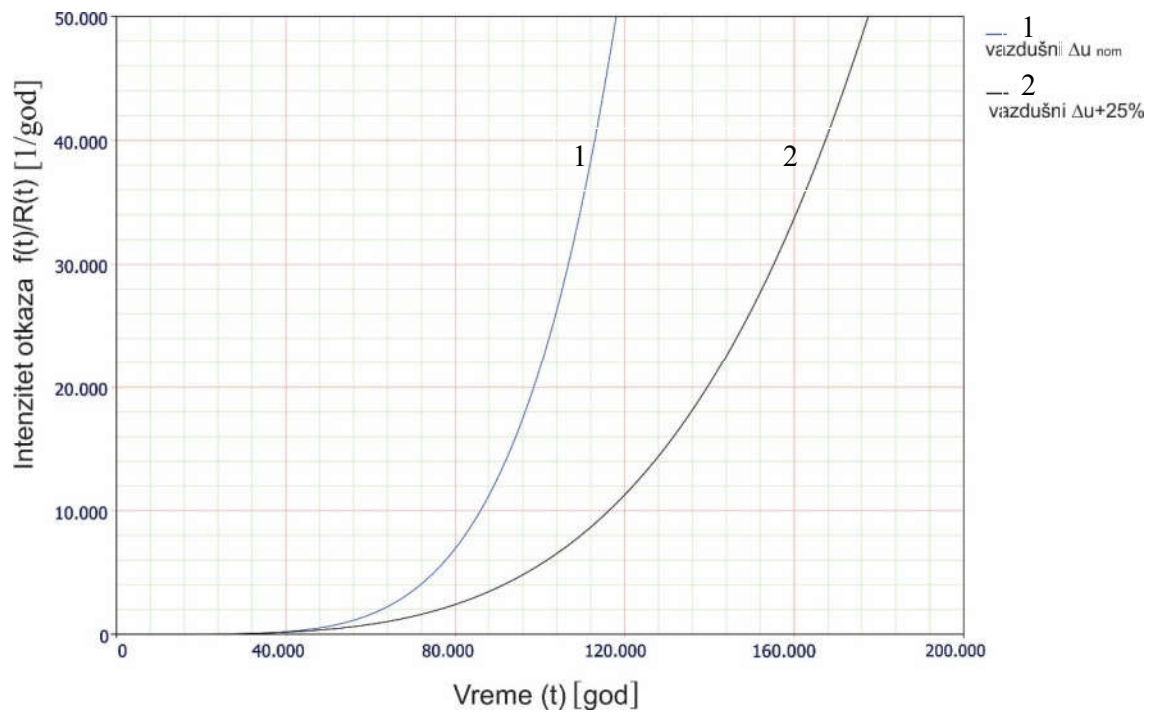
Slika p1.38 Pouzdanost prekidača na kablovskim i nadzemnim vodovima



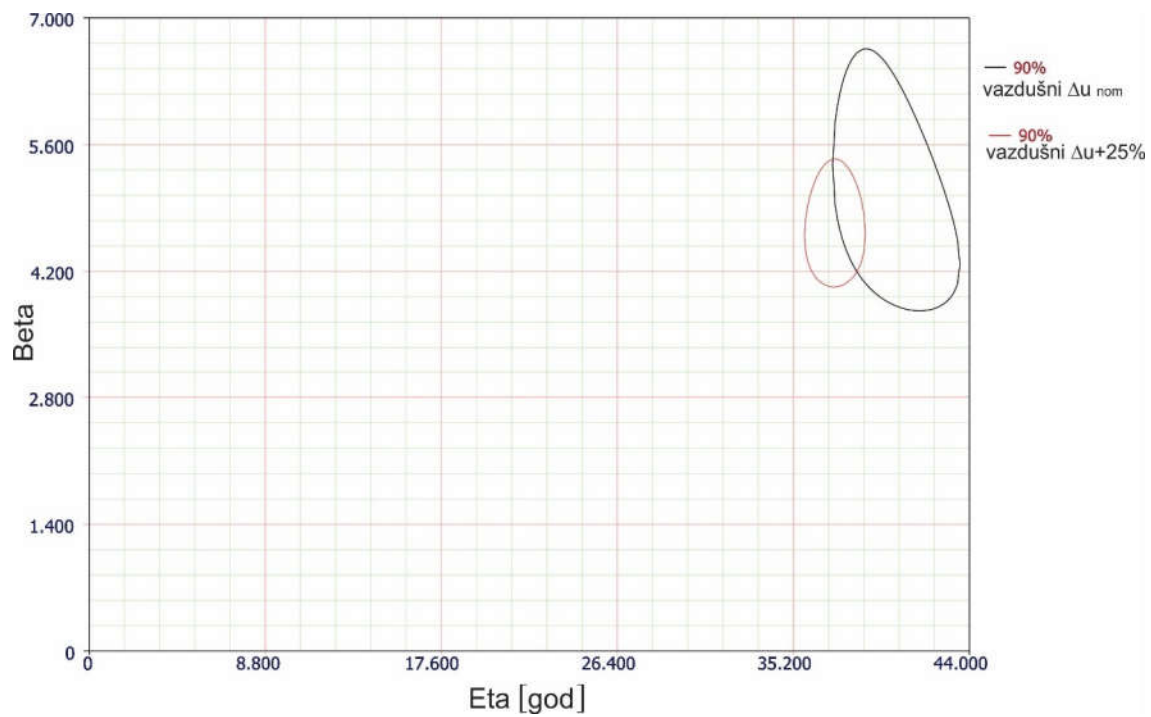
Slika p1.39 Nepouzdanost prekidača na kablovskim i nadzemnim vodovima



Slika p1.40 Gustina raspodele verovatnoće otkaza prekidača na kablovskim i nadzemnim vodovima



Slika p1.41 Intenzitet otkaza prekidača na kablovskim i nadzemnim vodovima



Slika p1.42 Parametri Weibulovi raspodele kod prekidača na kablovskim i nadzemnim vodovima

14 PRILOG 2

GRAFICI VEJBULOVE RASPODELE ZA SVAKI KRITERIJUM

Značenje oznaka na slikama:

PDF – funkcija gustine verovatnoće,

β – Weibulov parametar oblika,

η – Weibulov parametar razmere,

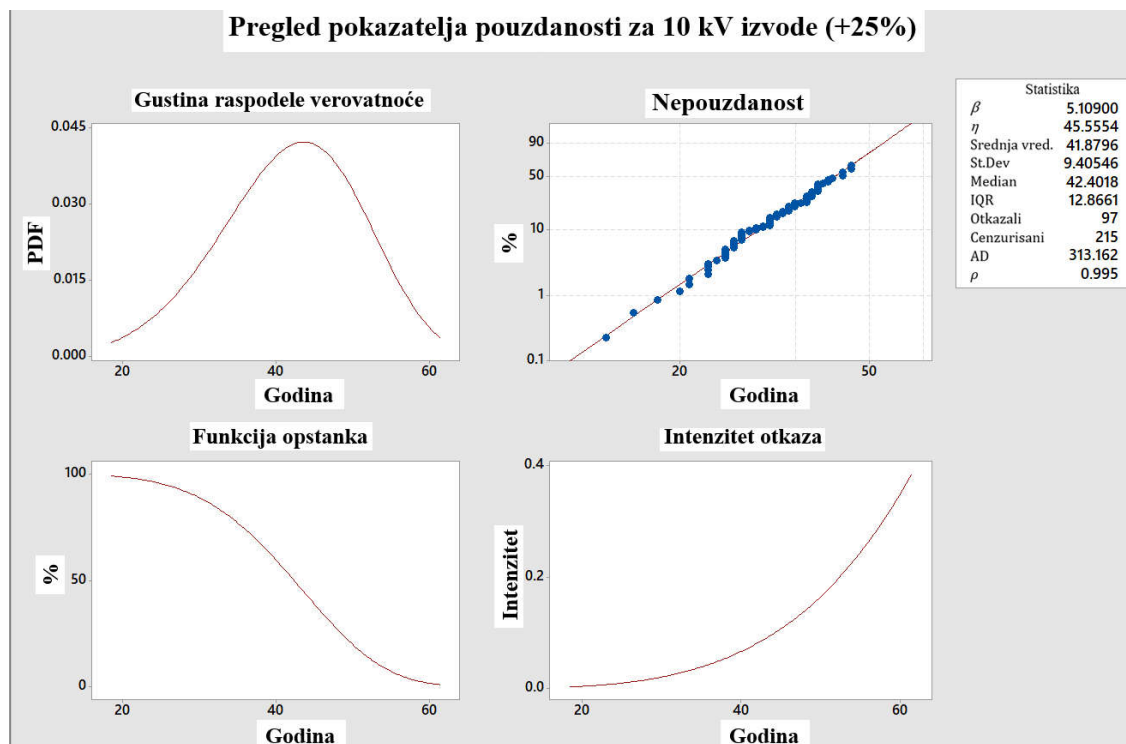
St.Dev – standardna devijacija

IQR - interquartile range, opisuje prostiranje podataka,

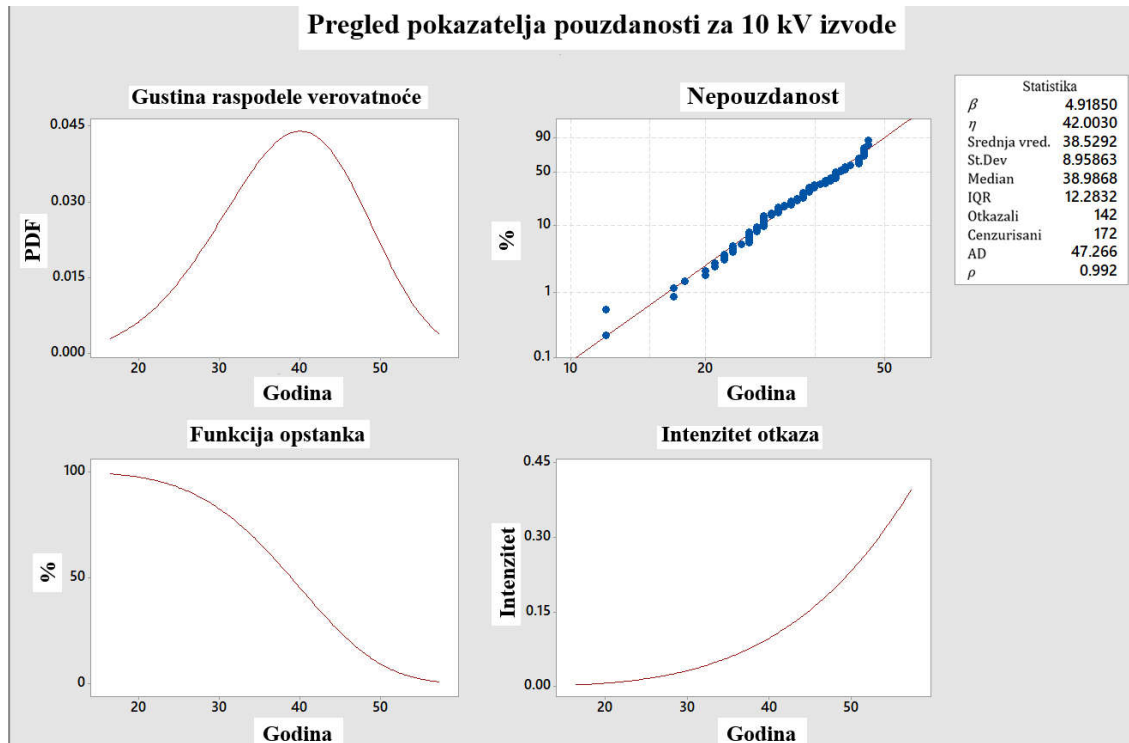
Cenzurisani - prekidači koji su i dalje ispravni po kriterijumi vrednosti pada napona,

AD - Anderson-Darling koeficijent poklapanja,

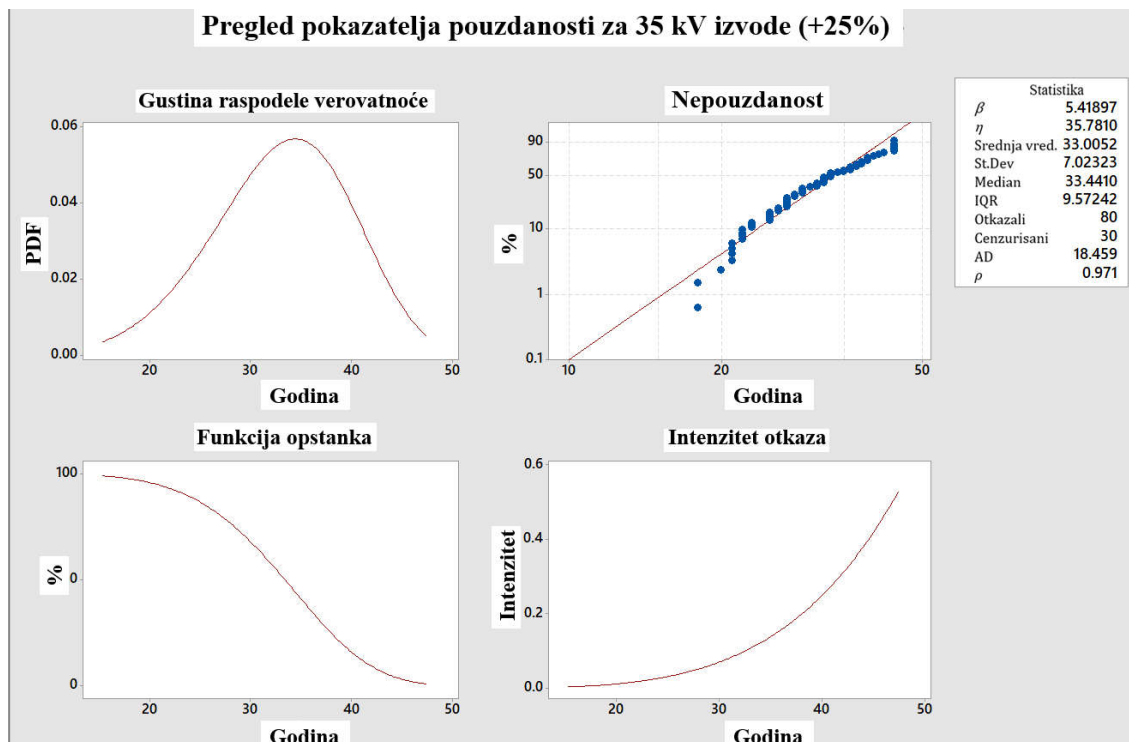
ρ - koeficijent korelacije.



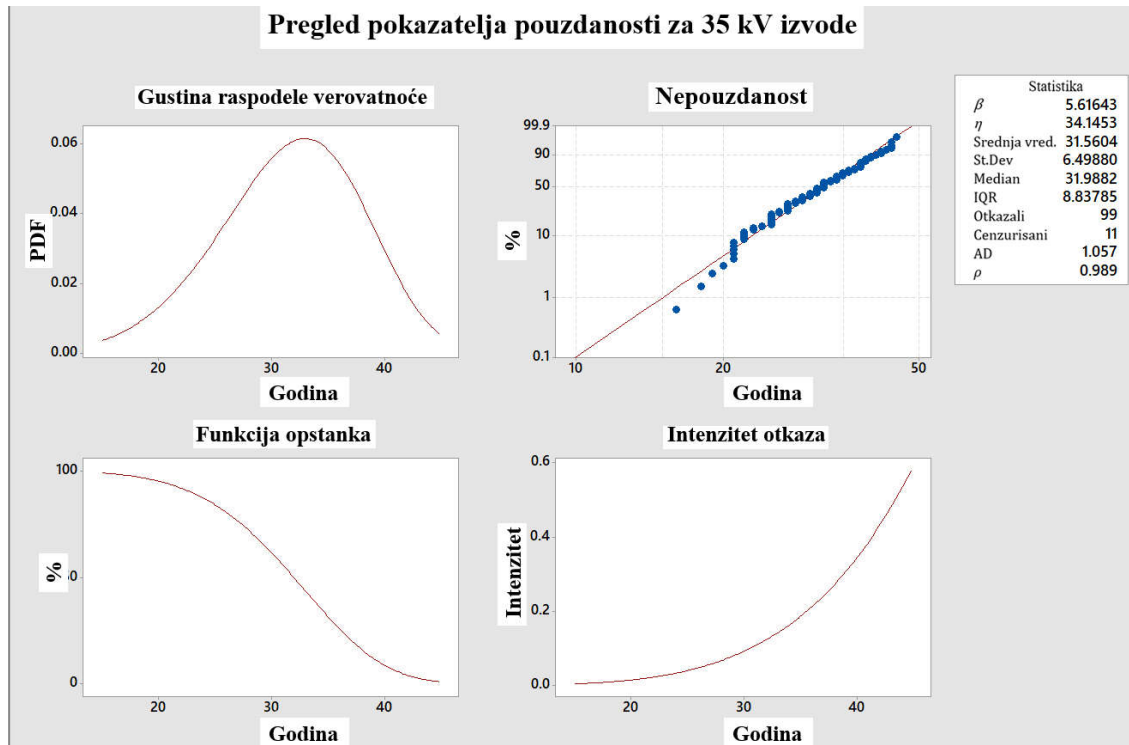
Slika p2.1 10 kV izvodi (pad napona +25 %)



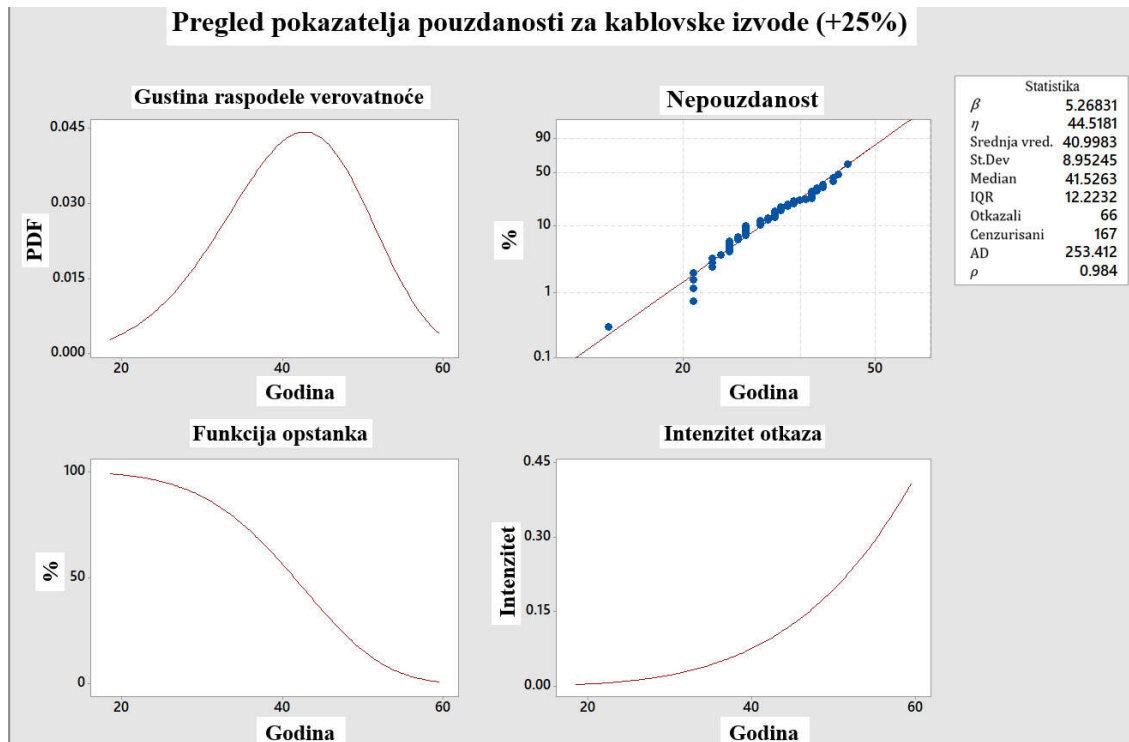
Slika p2.2 10 kV izvodi



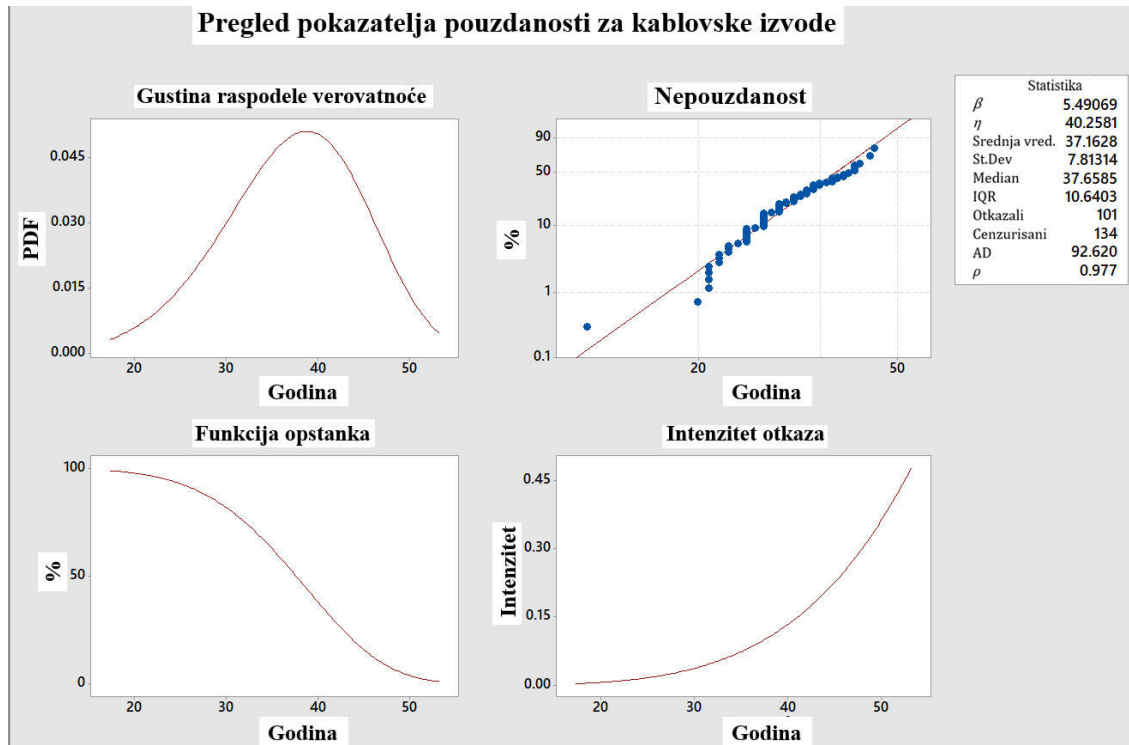
Slika p2.3 35 kV izvodi (pad napona +25 %)



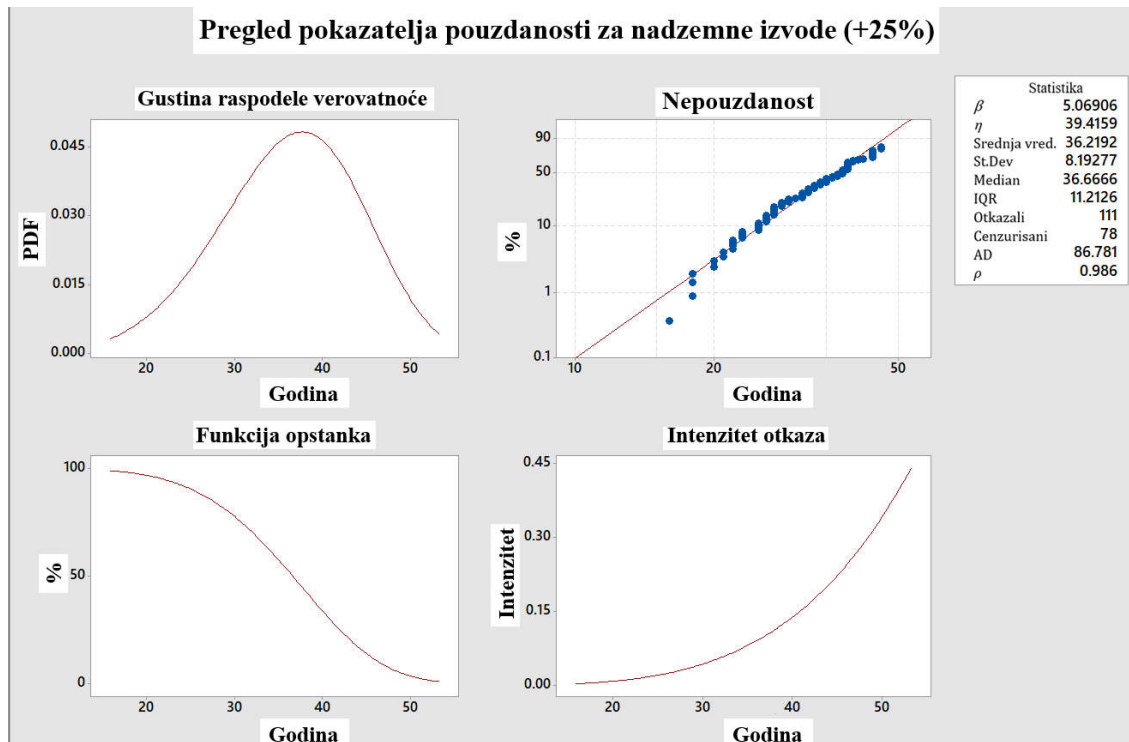
Slika p2.4 35 kV izvodi



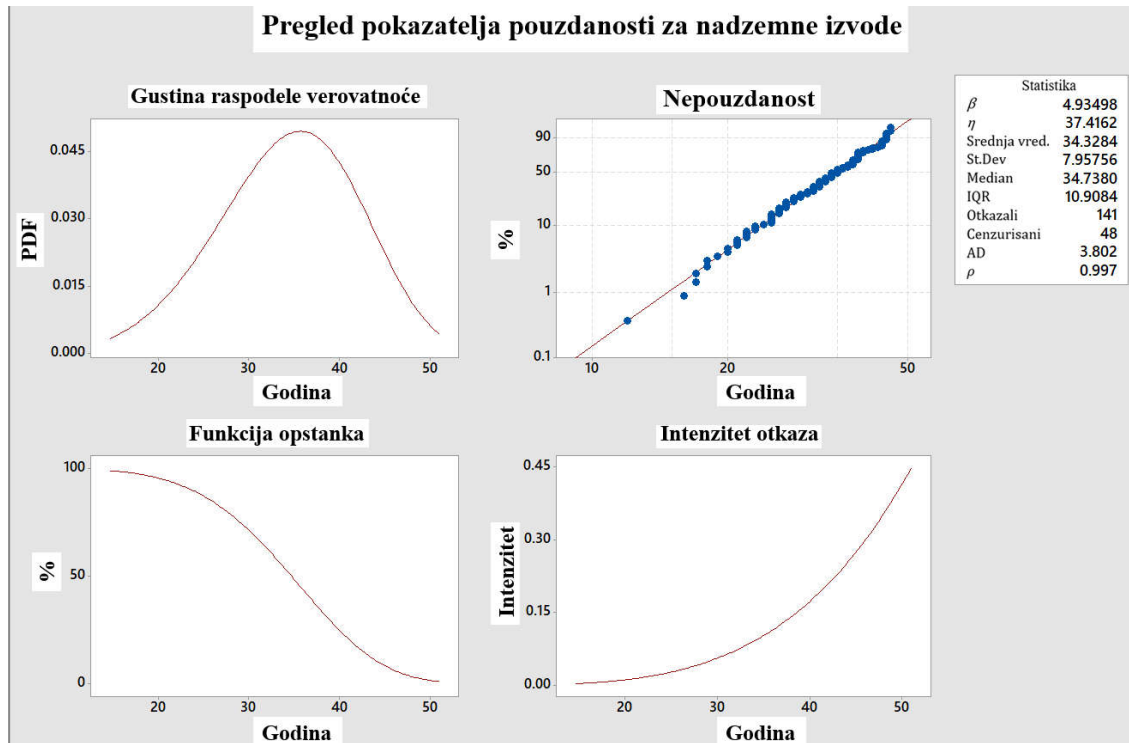
Slika p2.5 Kablovski izvodi (pad napona +25 %)



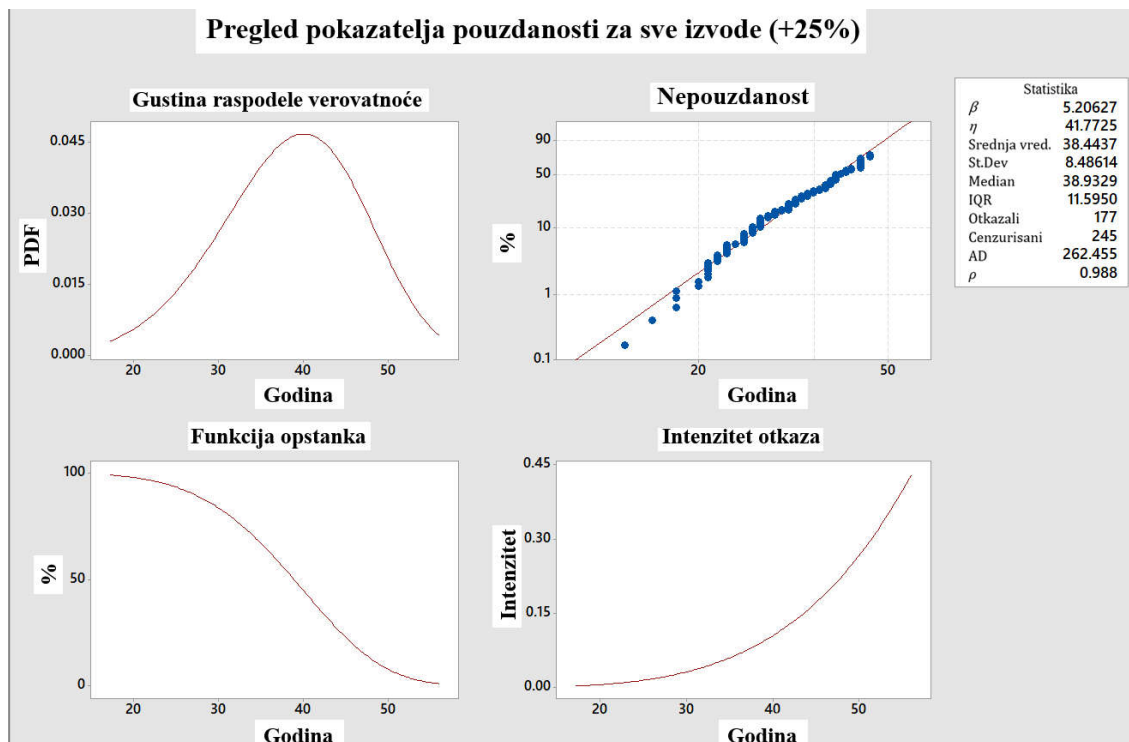
Slika p2.6 Kablovski izvodi



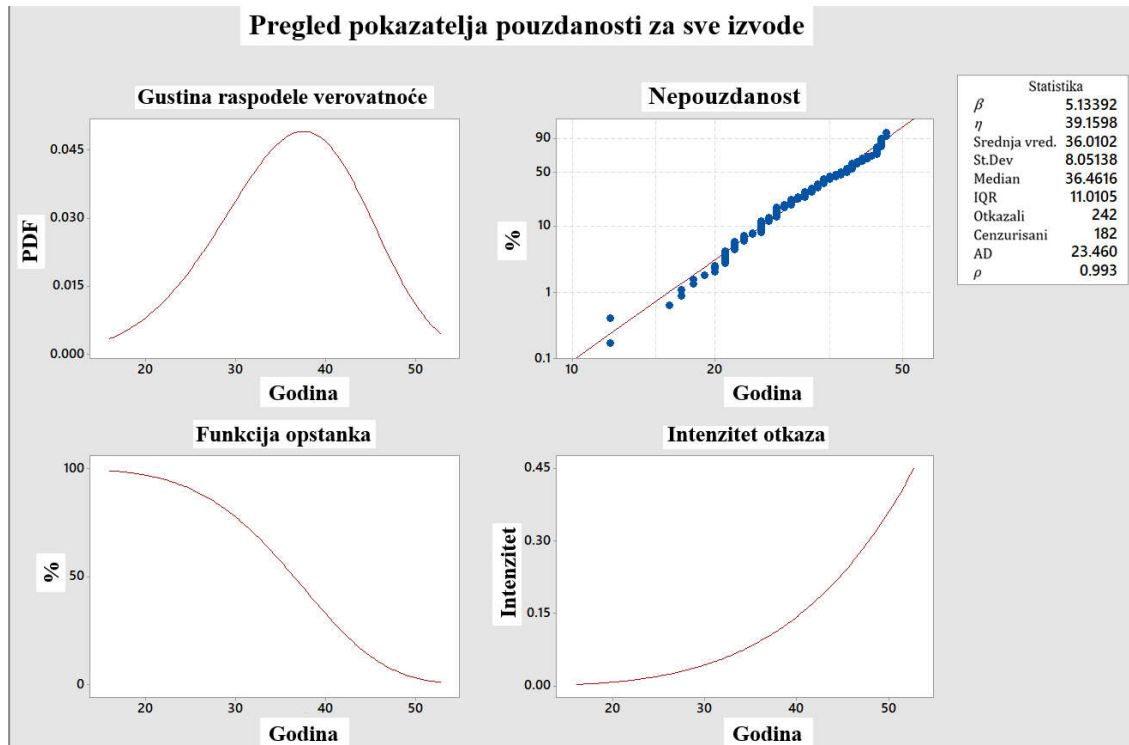
Slika p2.7 Nadzemni izvodi (pad napona +25 %)



Slika p2.8 Nadzemni izvodi



Slika p2.9 Svi izvodi (pad napona +25 %)



Slika p2.10 Svi izvodi

15 PRILOG 3

Tabela p3.1 Verovatnoća dostizanja 6 isključenih struja kratkog spoja

R.br.	Br. izvoda	Zabeležen broj isključenja I_{ks} po godini							λ [1/god]	Ostatak	p_2 [%]
		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019			
1	3	1	4	0	0	0	0	0	0.714286	1	34.97
2	6	0	0	0	0	0	3	0	0.428571	3	0.85
3	10	0	0	0	2	0	1	0	0.428571	3	0.85
4	12	1	0	0	1	2	0	0	0.571429	2	9.22
5	13	0	2	0	1	1	1	0	0.714286	1	34.97
6	14	2	0	0	0	0	3	0	0.714286	1	34.97
7	15	1	1	0	1	0	0	1	0.571429	2	9.22
8	19	1	1	2	0	0	0	0	0.571429	2	9.22
9	20	0	2	0	0	0	0	1	0.428571	3	0.85
10	22	1	1	0	0	0	2	0	0.571429	2	9.22
11	27	4	0	0	0	0	0	0	0.571429	2	9.22
12	31	0	0	0	0	2	2	0	0.571429	2	9.22
13	36	0	0	0	0	0	5	0	0.714286	1	34.97
14	37	2	0	0	2	0	0	0	0.571429	2	9.22
15	45	4	0	0	0	0	0	0	0.571429	2	9.22
16	46	0	0	1	0	2	0	0	0.428571	3	0.85
17	65	1	1	0	1	1	0	0	0.571429	2	9.22
18	69	0	0	2	0	1	0	1	0.571429	2	9.22
19	75	0	1	1	1	0	1	0	0.571429	2	9.22
20	86	0	0	0	0	0	2	3	0.714286	1	34.97
21	91	0	1	3	0	0	1	0	0.714286	1	34.97
22	92	2	0	0	0	0	2	0	0.571429	2	9.22
23	93	0	0	0	1	0	1	2	0.571429	2	9.22
24	98	1	1	0	0	0	2	1	0.714286	1	34.97
25	112	2	0	0	0	0	0	2	0.571429	2	9.22
26	121	0	0	3	0	0	1	0	0.571429	2	9.22
27	122	1	0	2	0	1	0	0	0.571429	2	9.22
28	148	0	2	0	0	0	3	0	0.714286	1	34.97
29	154	1	3	0	0	0	0	0	0.571429	2	9.22
30	155	0	0	0	0	0	0	5	0.714286	1	34.97

Ostatak - broj preostalih isključenja do otkaza prekidača

p_2 – verovatnoća otkaza prekidača usled prekoračenog broja isključenih struja kratkog spoja

Tabela p3.2 Verovatnoća dostizanja 20 isključenih struja kratkog spoja

R.br.	Br. izvoda	Zabeležen broj isključenja I_{ks} po godini							λ [1/god]	Ostatak	p_2 [%]
		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019			
1	11	0	2	1	2	2	4	5	2.285714	4	11.57
2	13	3	2	5	0	0	2	2	2	6	1.20
3	16	1	4	2	1	0	0	1	1.285714	11	0.00
4	18	3	1	4	0	2	1	0	1.571429	9	0.00
5	21	4	4	0	0	0	6	0	2	6	1.20
6	29	2	2	1	2	0	4	4	2.142857	5	4.42
7	30	0	0	0	0	6	3	2	1.571429	9	0.00
8	39	0	1	2	4	1	1	0	1.285714	11	0.00
9	43	6	2	0	3	1	1	2	2.142857	5	4.42
10	44	2	8	3	0	0	0	0	1.857143	7	0.24
11	62	0	2	0	1	4	0	3	1.428571	10	0.00
12	67	0	1	5	1	0	0	2	1.285714	11	0.00
13	68	3	0	0	2	0	2	0	1	13	0.00
14	77	1	2	0	4	3	3	4	2.428571	3	21.05
15	78	0	1	6	0	2	3	5	2.428571	3	21.05
16	80	1	1	2	2	2	6	2	2.285714	4	11.57
17	87	2	2	0	4	1	4	1	2	6	1.20
18	95	4	0	2	1	0	1	2	1.428571	10	0.00
19	96	2	2	1	0	0	2	1	1.142857	12	0.00
20	116	2	2	2	3	1	0	5	2.142857	5	4.42
21	117	2	4	1	0	0	1	2	1.428571	10	0.00
22	126	1	2	0	3	0	2	0	1.142857	12	0.00
23	127	4	5	1	3	2	0	3	2.571429	2	25.27
24	131	2	4	0	0	0	4	0	1.428571	10	0.00
25	136	1	3	1	0	0	1	1	1	13	0.00
26	137	2	2	1	3	3	2	1	2	6	1.20
27	139	3	2	3	3	3	4	1	2.714286	1	17.98
28	151	2	0	0	0	0	2	3	1	13	0.00
29	158	1	2	0	0	0	2	2	1	13	0.00

Tabela p3.3 Proračun usklađenosti analiziranih podataka (br. struja kratkog spoja) sa Puasonovom raspodelom

Br. izvoda	Zabeležen broj isključenja I_{ks} po godini							Ukupno	O_i /Intenz.	χ^2	$\chi^2 < p$
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019				
Izvod 1	0	0	0	1	0	0	0	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 2	0	0	0	0	0	2	0	2	0.285714	4.501155	+
Izvod 3	1	4	0	0	0	0	0	5	0.714286	27.60917	
Izvod 4	0	2	0	0	0	0	0	2	0.285714	4.501155	+
Izvod 5	1	0	0	0	0	0	0	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 6	0	0	0	0	0	3	0	3	0.428571	17.60974	
Izvod 7	0	0	0	0	0	1	1	2	0.285714	0.413968	+
Izvod 8	0	0	0	1	0	0	0	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 9	0	0	0	0	0	0	1	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 10	0	0	0	2	0	1	0	3	0.428571	1.381931	+
Izvod 11	0	0	0	3	1	2	0	6	0.857143	2.902568	+
Izvod 12	1	0	0	1	2	0	0	4	0.571429	0.367772	+
Izvod 13	0	2	0	1	1	1	0	5	0.714286	0.447199	+
Izvod 14	2	0	0	0	0	3	0	5	0.714286	6.243875	+
Izvod 15	1	1	0	1	0	0	1	4	0.571429	2.359916	+
Izvod 16	1	4	2	1	0	0	1	9	1.285714	3.847972	+
Izvod 17	0	2	2	0	1	0	1	6	0.857143	1.266166	+
Izvod 18	3	1	4	0	2	1	0	11	1.571429	1.827565	+
Izvod 19	1	1	2	0	0	0	0	4	0.571429	0.367772	+
Izvod 20	0	2	0	0	0	0	1	3	0.428571	1.381931	+
Izvod 21	4	4	0	0	0	6	0	14	2	28.09802	
Izvod 22	1	1	0	0	0	2	0	4	0.571429	0.367772	+
Izvod 23	0	0	0	0	0	1	0	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 24	0	0	0	0	0	1	1	2	0.285714	0.413968	+
Izvod 25	0	0	0	0	0	1	1	2	0.285714	0.413968	+
Izvod 26	0	0	0	1	0	0	0	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 27	4	0	0	0	0	0	0	4	0.571429	59.04907	
Izvod 28	0	1	0	0	0	0	0	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 29	2	2	1	2	0	4	4	15	2.142857	5.103337	+
Izvod 30	0	0	0	0	6	3	2	11	1.571429	38.50232	
Izvod 31	0	0	0	0	2	2	0	4	0.571429	5.52205	+
Izvod 32	0	0	0	0	0	1	0	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 33	0	0	0	0	0	2	3	5	0.714286	6.243875	+
Izvod 34	0	0	0	0	0	0	2	2	0.285714	4.501155	+
Izvod 35	0	1	0	0	0	0	0	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 36	0	0	0	0	0	5	0	5	0.714286	191.8416	
Izvod 37	2	0	0	2	0	0	0	4	0.571429	5.52205	+
Izvod 38	0	2	0	0	0	0	0	2	0.285714	4.501155	+

Tabela p3.3 Proračun usklađenosti analiziranih podataka (br. struja kratkog spoja) sa Puasonovom raspodelom - nastavak

Br. izvoda	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Ukupno	O_i /Intenz.	χ^2	$\chi^2 < p$
Izvod 40	0	7	7	0	12	9	2	37	5	93.40237	
Izvod 41	2	6	8	4	9	14	6	49	6.428571	6.295182	+
Izvod 42	0	2	1	2	2	4	5	16	2.285714	3.795601	+
Izvod 43	6	2	0	3	1	1	2	15	2.142857	8.410033	+
Izvod 44	2	8	3	0	0	0	0	13	1.857143	269.7683	
Izvod 45	4	0	0	0	0	0	0	4	0.571429	59.04907	
Izvod 46	0	0	1	0	2	0	0	3	0.428571	1.381931	+
Izvod 47	0	0	0	1	0	0	0	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 48	0	0	0	0	0	1	1	2	0.285714	0.413968	+
Izvod 49	2	0	0	1	1	2	0	6	0.857143	1.266166	+
Izvod 50	0	0	0	0	2	0	0	2	0.285714	4.501155	+
Izvod 51	0	0	0	2	2	2	0	6	0.857143	6.633564	+
Izvod 52	0	0	0	0	0	0	1	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 53	0	0	0	0	0	0	1	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 54	1	0	0	0	0	0	0	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 55	0	0	0	0	0	0	1	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 56	0	0	0	0	0	0	1	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 57	0	0	0	0	2	0	0	2	0.285714	4.501155	+
Izvod 58	0	0	0	1	0	0	0	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 59	7	3	1	0	3	8	4	26	3.714286	13.47672	+
Izvod 60	17	23	12	13	13	24	13	115	10	5.913455	+
Izvod 61	4	2	8	3	4	8	12	41	5.571429	9.465965	+
Izvod 62	0	2	0	1	4	0	3	10	1.428571	4.028178	+
Izvod 63	0	9	1	11	3	2	3	29	4	35.01329	
Izvod 64	0	0	0	1	0	0	0	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 65	1	1	0	1	1	0	0	4	0.571429	2.359916	+
Izvod 66	0	0	0	0	1	0	0	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 67	0	1	5	1	0	0	2	9	1.285714	17.53341	
Izvod 68	3	0	0	2	0	2	0	7	1	4.649779	+
Izvod 69	0	0	2	0	1	0	1	4	0.571429	0.367772	+
Izvod 70	4	3	0	0	0	0	0	7	1	14.35793	+
Izvod 71	0	1	1	0	0	1	0	3	0.428571	1.113904	+
Izvod 72	0	0	0	0	1	0	0	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 73	0	0	0	1	0	0	1	2	0.285714	0.413968	+
Izvod 74	0	0	0	0	0	1	0	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 75	0	1	1	1	0	1	0	4	0.571429	2.359916	+
Izvod 76	0	11	3	1	2	2	5	24	3.285714	69.78488	
Izvod 77	1	2	0	4	3	3	4	17	2.428571	3.023931	+
Izvod 78	0	1	6	0	2	3	5	17	2.428571	9.365136	+
Izvod 79	1	0	0	0	0	0	1	2	0.285714	0.413968	+
Izvod 80	0	0	0	1	4	0	1	6	0.857143	14.92467	+
Izvod 81	1	0	0	0	0	0	0	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 82	0	0	0	0	1	0	0	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 83	0	0	0	0	2	0	0	2	0.285714	4.501155	+

Tabela p3.3 Proračun usklađenosti analiziranih podataka (br. struja kratkog spoja) sa Puasonovom raspodelom - nastavak

Br. izvoda	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Ukupno	O_i /Intenz.	χ^2	$\chi^2 < p$
Izvod 85	1	0	0	0	0	0	0	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 86	1	0	0	2	0	0	0	3	0.428571	1.381931	+
Izvod 87	2	2	0	4	1	4	1	14	2	4.611374	+
Izvod 88	0	1	0	0	0	0	0	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 89	1	0	0	0	1	0	0	2	0.285714	0.413968	+
Izvod 90	0	1	0	0	0	0	0	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 91	0	1	3	0	0	1	0	5	0.714286	4.107766	+
Izvod 92	2	0	0	0	0	2	0	4	0.571429	5.52205	+
Izvod 93	0	0	0	1	0	1	2	4	0.571429	0.367772	+
Izvod 94	0	2	0	0	0	0	0	2	0.285714	4.501155	+
Izvod 95	4	0	2	1	0	1	2	10	1.428571	2.825238	+
Izvod 96	2	2	1	0	0	2	1	8	1.142857	2.533133	+
Izvod 97	0	0	0	1	0	1	0	2	0.285714	0.413968	+
Izvod 98	1	1	0	0	0	2	1	5	0.714286	0.447199	+
Izvod 99	0	0	0	0	0	7	0	7	1	1964.143	
Izvod 100	0	0	0	1	1	0	1	3	0.428571	1.113904	+
Izvod 101	2	0	0	2	0	2	0	6	0.857143	6.633564	+
Izvod 102	0	0	0	0	0	1	1	2	0.285714	0.413968	+
Izvod 103	6	6	4	2	1	1	0	20	2.857143	13.64371	+
Izvod 104	0	0	0	1	0	0	0	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 105	0	0	1	0	0	0	1	2	0.285714	0.413968	+
Izvod 106	0	0	1	0	0	0	0	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 107	0	0	1	0	0	0	0	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 108	0	2	1	2	0	1	0	6	0.857143	1.266166	+
Izvod 109	0	0	1	0	0	0	0	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 110	0	0	1	0	0	0	2	3	0.428571	1.381931	+
Izvod 111	0	0	1	0	0	0	0	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 112	2	0	0	0	0	0	2	4	0.571429	5.52205	+
Izvod 113	1	0	0	0	0	0	1	2	0.285714	0.413968	+
Izvod 114	0	0	0	0	0	0	1	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 115	0	3	0	0	0	0	0	3	0.428571	17.60974	
Izvod 116	2	2	2	3	1	0	5	15	2.142857	3.535808	+
Izvod 117	2	4	1	0	0	1	2	10	1.428571	2.825238	+
Izvod 118	2	0	0	0	0	0	0	2	0.285714	4.501155	+
Izvod 119	0	2	0	0	0	0	0	2	0.285714	4.501155	+
Izvod 120	1	1	2	2	2	6	2	16	2.285714	11.15391	+
Izvod 121	0	0	3	0	0	1	0	4	0.571429	7.901556	+
Izvod 122	1	0	2	0	1	0	0	4	0.571429	0.367772	+
Izvod 123	0	1	0	0	0	1	0	2	0.285714	0.413968	+
Izvod 124	0	0	2	0	0	0	0	2	0.285714	4.501155	+
Izvod 125	1	0	0	0	0	0	0	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 126	1	2	0	3	0	2	0	8	1.142857	1.967934	+
Izvod 127	4	5	1	3	2	0	3	18	2.571429	1.821126	+

Tabela p3.3 Proračun usklađenosti analiziranih podataka (br. struja kratkog spoja) sa Puasonovom raspodelom - nastavak

Br. izvoda	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Ukupno	O_i /Intenz.	χ^2	$\chi^2 < p$
Izvod 128	0	1	0	0	0	1	0	2	0.285714	0.413968	+
Izvod 129	0	0	1	0	0	0	0	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 130	0	1	0	0	0	1	0	2	0.285714	0.413968	+
Izvod 131	2	4	0	0	0	4	0	10	1.428571	16.86184	+
Izvod 132	0	0	0	0	0	2	0	2	0.285714	4.501155	+
Izvod 133	0	0	0	0	1	0	1	2	0.285714	0.413968	+
Izvod 134	1	0	0	0	0	0	0	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 135	0	0	0	0	1	0	0	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 136	1	3	1	0	0	1	1	7	1	3.096475	+
Izvod 137	2	2	1	3	3	2	1	14	2	3.028005	+
Izvod 138	0	0	1	0	1	1	0	3	0.428571	1.113904	+
Izvod 139	3	2	3	3	3	4	1	19	2.714286	5.684761	+
Izvod 140	1	7	3	4	9	3	0	27	3.857143	20.74229	
Izvod 141	0	0	0	1	0	0	0	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 142	0	0	0	0	0	1	0	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 143	0	0	0	1	2	0	0	3	0.428571	1.381931	+
Izvod 144	0	1	0	0	0	0	0	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 145	0	1	0	0	0	1	0	2	0.285714	0.413968	+
Izvod 146	0	0	0	0	2	0	0	2	0.285714	4.501155	+
Izvod 147	0	6	0	6	2	7	5	26	3.714286	27.74786	
Izvod 148	0	2	0	0	0	3	0	5	0.714286	6.243875	+
Izvod 149	0	1	0	1	0	0	0	2	0.285714	0.413968	+
Izvod 150	0	1	0	0	0	0	0	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 151	2	0	0	0	0	2	3	7	1	4.649779	+
Izvod 152	0	1	1	0	0	0	0	2	0.285714	0.413968	+
Izvod 153	0	1	1	0	0	0	0	2	0.285714	0.413968	+
Izvod 154	1	3	0	0	0	0	0	4	0.571429	7.901556	+
Izvod 155	0	0	0	0	0	0	5	5	0.714286	191.8416	
Izvod 156	0	0	0	0	0	0	2	2	0.285714	4.501155	+
Izvod 157	3	1	2	0	0	0	0	6	0.857143	2.902568	+
Izvod 158	1	2	0	0	0	2	2	7	1	3.873127	+
Izvod 159	0	2	0	0	0	1	0	3	0.428571	1.381931	+
Izvod 160	0	0	0	0	3	0	0	3	0.428571	17.60974	
Izvod 161	0	0	0	1	0	0	0	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 162	0	1	0	0	0	0	1	2	0.285714	0.413968	+
Izvod 163	0	0	0	0	0	0	3	3	0.428571	17.60974	
Izvod 164	0	0	1	0	0	0	0	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 165	0	1	0	0	0	0	0	1	0.142857	0.086185	+
Izvod 166	2	0	0	0	0	0	0	2	0.285714	4.501155	+
Izvod 167	3	2	5	0	0	2	2	14	2	6.722533	+
Ukupno	Broj podataka koji ispunjavaju H_0 pretpostavka (podaci odgovaraju Puasonovoj raspodeli)									89 %	148
	Broj podataka koji ne ispunjavaju H_0 pretpostavku									11 %	19

16 PRILOG 4

Proračun neraspoloživosti i intenziteta otkaza TS

Proračun neraspoloživosti i intenziteta otkaza TS prikazan u poglavlju 6 sprovodi se korišćenjem vrednosti iz tabele p4.1 [48, 132]. U nastavku priloga predstavljen je proračun pokazatelja pouzdanosti karakterističnih funkcionalnih blokova na osnovu kojih se izračunavaju pokazatelji pouzdanosti cele TS.

Tabela p4.1 Vrednosti neraspoloživosti i intenziteta otkaza elemenata postrojenja

Element postrojenja	λ [10 ⁻³ / god]		τ'' [h]		τ [h]	U Neraspoloživost
	opseg	izabrano	opseg	izabrano		
Transformator 35/10 kV/kV	5-20	12	25-30	10	24	$1.37 \cdot 10^{-4}$
Prekidač 35 kV	5-20	20	4-25	6	24	$8.22 \cdot 10^{-6}$
Prekidač 10 kV	0,5-40	35	8-25	6	24	$8.22 \cdot 10^{-6}$
Rastavljač	0,1-25	5	2-10	4	8	$2.74 \cdot 10^{-6}$
Naponski transformator	2-8	5	-	-	24	$5.48 \cdot 10^{-7}$
Strujni transformator	3-10	8	-	-	24	$5.48 \cdot 10^{-7}$
Odvodnik prenapona	1-7	5	-	-	2	$2.28 \cdot 10^{-7}$

U ovoj tabeli, τ je vreme popravke bloka, a τ'' ukupno trajanje prekida rada funkcionalnog bloka u toku perioda posmatranja T usled planskog remonta.

Intenzitet otkaza ($\lambda = 1/MTTF$), je približno jednak frekvenciji otkaza ($f = 1/MTBF$), jer je vreme popravke ($MTTR=6$ h) dosta manje u odnosu na $MTBF$ ($\sim 30 \div 40$ god.). Iz pomenutog razloga, u proračunima u ovoj disertaciji, umesto frekvencije otkaza korišćen je intenzitet otkaza (formula (16.1)).

$$\begin{aligned}
 f &= \frac{1}{MTTF + MTTR} = \frac{1}{MTTF + MTTR} \cdot \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \\
 &= \lambda \cdot \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} = \lambda \cdot \frac{MTTF}{MTBF} \approx \lambda,
 \end{aligned}
 \tag{16.1}$$

jer je $MTTR \ll MTTF$

gde je:

$MTBF$ – srednje vreme između dva otkaza komponente ($MTBF=MTTR+MTTF$),

$MTTR$ – srednje vreme popravke otkazale komponente,

$MTTF$ – srednje vreme do otkaza komponente.

Tabela p4.2 Neraspoloživost prekidača u TS za različite kriterijume

	η	β	$MTBF$ [god]	Intenzitet otkaza λ [1/god]	Neraspoloživost U
Nadzemni +25 %	39.42	5.069	36.22287	0.091146	6.24286E-05
Nadzemni	37.42	4.935	34.33187	0.09397	6.43631E-05
Kablovski +25 %	44.52	5.268	40.99996	0.083256	5.70249E-05
Kablovski	40.23	5.49	37.13655	0.09528	6.52603E-05
10 kV izvodi +25 %	45.5	5.1	41.82447	0.079355	5.4353E-05
10 kV izvodi	42	4.918	38.52621	0.083491	5.71859E-05
35 kV izvodi +25 %	35.78	5.419	33.00428	0.106	7.26024E-05
35 kV izvodi	34.14	5.662	31.5699	0.115145	7.88662E-05
Svi izvodi +25 %	41.77	5.206	38.44127	0.087891	6.01991E-05
Svi izvodi	39.16	5.134	36.0104	0.092699	6.34924E-05

U tabeli p4.2 $MTBF$ je izračunato na osnovu formule (5.18), a intenzitet otkaza po formuli (5.17) [133]. Neraspoloživost je određena sledećom formulom [134]:

$$U = \frac{f \cdot MTTR}{8760}.
 \tag{16.2}$$

Tabela p4.3 Podaci prekidača u TS i verovatnoća otkaza usled prekoračenog broja isključenja struje kratkog spoja

Br. izvoda	Naziv izvoda	Tip voda	Starost u 2020 god.	Ukupno isključenih k.s.	λ [1/god]	Br. kvarova do otkaza prekidača	Verovatnoća otkaza
Izvod 13	T1 35 kV	TS polje	43	1	0.1429	9	5.91988E-14
Izvod 14	T1 10 kV	TS polje	43	1	0.1429	9	5.91988E-14
Izvod 4	Dovod 1 35 kV	Nadzemni	34	1	0.1429	9	5.91988E-14
Izvod 2	Dovod 2 35 kV	Nadzemni	34	0	0	10	0
Izvod 24	T2 35 kV	TS polje	43	0	0	10	0
Izvod 23	T2 10 kV	TS polje	43	0	0	10	0
Izvod 5	Izvod 10 kV	Kablovski	43	1	0.1429	9	5.91988E-14
Izvod 6	Izvod 10 kV	Kablovski	43	3	0.4286	7	3.43246E-07
Izvod 7	Izvod 10 kV	Kablovski	43	2	0.2857	8	8.27658E-10
Izvod 8	Izvod 10 kV	Kablovski	43	1	0.1429	9	5.91988E-14
Izvod 9	Izvod 10 kV	Kablovski	43	1	0.1429	9	5.91988E-14
Izvod 10	Izvod 10 kV	Kablovski	43	3	0.4286	7	3.43246E-07
Izvod 62	Izvod 10 kV	Kablovski	43	1	0.1429	9	5.91988E-14
Izvod 22	Izvod 10 kV	Nadzemni	43	4	0.5714	6	2.73068E-05
Izvod 12	Izvod 10 kV	Nadzemni	43	5	0.7143	5	0.000758522
Izvod 11	Izvod 10 kV	Nadzemni	43	6	0.8571	4	0.009544412

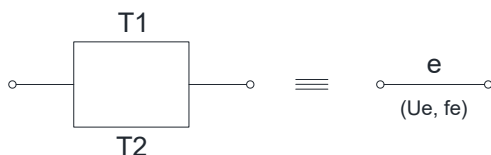
U tabeli p4.3 verovatnoća otkaza je određena uzimajući vrednost od 10 dozvoljenih isključenja struje kratkog spoja (za analizirane prekidače u zavisnosti od iznosa struje kratkog spoja broj dozvoljenih prekida se kreće od 6 do 20). Verovatnoća otkaza se odnosi na verovatnoću dostizanja maksimalno dozvoljenog broja prekida struje kratkog spoja u narednoj godini.

U tabeli p4.4 prikazane su vrednosti nepouzdanosti i intenziteta otkaza prekidača, u odnosu na njegovu starost, izračunate po formulama (5.15) i (5.17). Za proračun su korišćeni parametri Vejbulove raspodele za kriterijum „svi prekidači, pad napona +25%“. Pomenuta kategorija obuhvata sve prekidače (10 kV i 35 kV, odnosno nadzemne i kablovske izvode), a kao granična vrednost dozvoljenog pada napona koristi se naznačene vrednost pada napona uvećana za 25 %.

Tabela p4.4 Verovatnoća otkaza i intenzitet otkaza prekidača u TS za slučaj dostizanja maksimalnog pada napona

Starost [god.]	Verovatnoća otkaza	Intenzitet otkaza [1/god]
35	0.3384	0.0590
36	0.3785	0.0660
37	0.4204	0.0737
38	0.4637	0.0820
39	0.5081	0.0910
40	0.5531	0.1007
41	0.5979	0.1111
42	0.6422	0.1224
43	0.6853	0.1344
44	0.7267	0.1474
45	0.7657	0.1612
46	0.8021	0.1761
47	0.8353	0.1919
48	0.8652	0.2087

Proračun nerasploživosti i intenziteta otkaza funkcionalnog bloka T1, T2



Slika p4.1 Ekvivalentni graf za presek T1-T2

Grana T1 i T2 su identične i čine ih redna veza sledećih elemenata: prekidača 35 kV, tri strujna transformatora 35 kV, tri odvodnika prenapona 35 kV, transformator 35/10 kV/ kV, tri odvodnika prenapona 10 kV, tri strujna transformatora 10 kV, prekidač 10 kV. Nerasploživost grane T1 predstavlja zbir nerasploživosti elemenata koji sačinjavaju granu:

$$U_{T1} = U_{prek35kv} + 3 \cdot U_{st35kv} + 3 \cdot U_{odv35kv} + U_{TR} + 3 \cdot U_{od10kv} + 3 \cdot U_{st10kv} + U_{prek10kv} = 0.000158093. \quad (16.3)$$

Pri čemu su nerasploživost i intenzitet otkaza uzeti iz tabele p4.2, dok je nepouzdanost uzeta iz tabele p4.4.

Intenzitet isključenja bloka λ_{T1} biće približno jednaka zbiru intenziteta otkaza komponenata koja čine blok:

$$\lambda_{T1} = \lambda_{prek35kv} + 3 \cdot \lambda_{st35kv} + 3 \cdot \lambda_{odv35kv} + \lambda_{TR} + 3 \cdot \lambda_{od10kv} + 3 \cdot \lambda_{st10kv} + \lambda_{prek10kv} = 0.3894 (1/god). \quad (16.4)$$

Za vreme perioda posmatranja uzima se jedna godina, odnosno:

$$T = 8760 \text{ h} . \quad (16.5)$$

Za vrednost intenziteta otkaza λ_j'' komponente nad kojom se sprovodi planski remont uzima se vrednost intenziteta otkaza komponente koja se najčešće remontuje, u ovom slučaju to je prekidač 10 kV, pa na osnovu formule (6.38) sledi:

$$\lambda_j'' = \max(\lambda_{ij}), \quad (16.6)$$

$$\lambda_{T1}'' = 0.1474 \text{ [1/god]}. \quad (16.7)$$

Za blok koji je u procesu planskog remonta neraspoloživost i trajanje planskog remonta računaju se na osnovu formula (6.39) i (6.40) na sledeći način:

$$U_{T1}'' = \frac{\tau_{T1}''}{T} = \frac{6}{8760} = 0.000684932 , \quad (16.8)$$

$$r_{T1}'' = \frac{U_{T1}''}{\lambda_{T1}''} = \frac{0.000684932}{0.1474} = 0.004646754 , \quad (16.9)$$

$$P(\underline{T1} \cdot \underline{T2}) = P(\underline{T1}) \cdot P(\underline{T2}) = U_{T1} \cdot U_{T2} , \quad (16.10)$$

$$P(\underline{T1} \cdot \underline{T2}'') = \lambda(\underline{T1} \cdot \underline{T2}'') \cdot r_{\underline{T1}, \underline{T2}''} = \lambda_{T1} \cdot U_{T2}'' \cdot \frac{r_{T1}'' \cdot r_{T2}''}{r_{T1}'' + r_{T2}''} = \quad (16.11)$$

$$= U_{T1} \cdot U_{T2}'' \cdot \frac{r_{T2}''}{r_{T1}'' + r_{T2}''} ,$$

$$P(\underline{T2} \cdot \underline{T1}'') = U_{T2} \cdot U_{T1}'' \cdot \frac{r_{T1}''}{r_{T2}'' + r_{T1}''} . \quad (16.12)$$

Za vreme obnavljanja funkcionalnog bloka r_{T1} odabrana je vrednost od 6 h. Čime se dobija ekvivalentna neraspoloživost funkcionalnog bloka:

$$U_{ek} = U_{T1} \cdot U_{T2} + U_{T1} \cdot U_{T2}'' \cdot \frac{r_{T2}''}{r_{T1}'' + r_{T2}''} + U_{T2} \cdot U_{T1}'' \cdot \frac{r_{T1}''}{r_{T2}'' + r_{T1}''} = \quad (16.13)$$

$$= 2.516 \cdot 10^{-8} .$$

Ekvivalentna vrednost intenziteta kvarova:

$$\lambda(\underline{T1} \cdot \underline{T2}) = \lambda(\underline{T1}) \cdot P(\underline{T2}) + \lambda(\underline{T2}) \cdot P(\underline{T1}) = \lambda_{T1} \cdot U_{T2} + \lambda_{T2} \cdot U_{T1} , \quad (16.14)$$

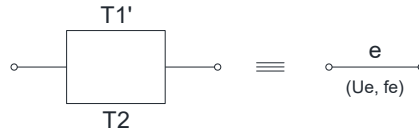
$$\lambda(\underline{T1} \cdot \underline{T2}'') = \lambda(\underline{T1}) \cdot P(\underline{T2}'') = \lambda_{T1} \cdot U_{T2}'' , \quad (16.15)$$

$$\lambda(\underline{T2} \cdot T1'') = \lambda_{T2} \cdot U_{T1}''. \quad (16.16)$$

Ekvivalentna vrednost intenziteta otkaza je:

$$\lambda_{ek} = \lambda_{T1} \cdot U_{T2} + \lambda_{T2} \cdot U_{T1}' + \lambda_{T1} \cdot U_{T2}'' + \lambda_{T2} \cdot U_{T1}'' = 0.000656547 [1/god]. \quad (16.17)$$

Proračun nerasploživosti i intenziteta kvarova funkcionalna bloka T₁' i T₂



Slika p4.2 Ekvivalentni graf za presek T₁' i T₂

Nerasploživost i intenzitet otkaza bloka T₁' i T₂ računaju se na osnovu formula (6.13) i (6.30):

$$\lambda'_{T1} = \lambda'_{CB35} + p_{CB35} \cdot \lambda'_{TR} = 0.0100805 [1/god], \quad (16.18)$$

$$U'_{T1} = s_{T1} \cdot \lambda'_{T1} = 0.020161, \quad (16.19)$$

gde je s_{T1} je trajanje manipulacija za ponovno uključenje ispravnih komponenata, u konkretnom slučaju usvaja se $s_{T1} = 0.5$ h.

$$P(T1' \cdot \underline{T2}) = U'_{T1} \cdot U_{T2}, \quad (16.20)$$

$$P(T1' \cdot T2'') = \lambda(T1' \cdot T2'') \cdot \frac{s_{T1} \cdot r_{T2}''}{s_{T1} + r_{T2}''} = U'_{T1} \cdot U_{T2}'' \cdot \frac{r_{T2}''}{s_{T1} + r_{T2}''}, \quad (16.21)$$

$$U_{ek} = U'_{T1} \cdot U_{T2} + U'_{T1} \cdot U_{T2}'' \cdot \frac{r_{T2}''}{s_{T1} + r_{T2}''} = 1.65723 \cdot 10^{-6}. \quad (16.22)$$

Intenzitet aktivnih kvarova funkcionalnog bloka T₁' i T₂ je:

$$\lambda(T1' \cdot \underline{T2}) = \lambda'_{T1} \cdot U_{T2} + \lambda_{T2} \cdot U'_{T1}, \quad (16.23)$$

$$\lambda(T1' \cdot T2'') = \lambda'_{T1} \cdot U_{T2}'', \quad (16.24)$$

$$\lambda_{ek} = \lambda'_{T1} \cdot U_{T2} + \lambda_{T2} \cdot U'_{T1} + \lambda'_{T1} \cdot U_{T2}'' = 0.003942343 [1/god]. \quad (16.25)$$

Proračun neraspoloživosti i intenziteta otkaza funkcionalnog bloka A“



Slika p4.3 Ekvivalentni graf za presek A“

$$\lambda_{ek} = \lambda_A'' = 0.00000274 [1/god], \quad (16.26)$$

$$U_{ek} = \lambda_A'' \cdot s_A = 0.00000274 \cdot 4 = 0.00001096, \quad (16.27)$$

gde je s_A vreme potrebno za ponovno uključenje u pogon ispravnih elemenata koje je isključila zaštita.

Neraspoloživost i intenzitet otkaza za ceo ekvivalentni graf

$$U \approx \sum_{i=1}^n U_{ei} \quad (16.28)$$

$$\begin{aligned} U_{TS} = & U_{T1,T2} + 2 \cdot U_{T1',T2} + 2 \cdot U_{M,S'} + 2 \cdot U_{M,T1'} + 2 \cdot U_{L,T1'} + 2 \cdot U_{L,G'} \\ & + 2 \cdot U_{K,S'} + 2 \cdot U_{A,T1,K'} + 2 \cdot U_{A,K,T1'} + 2 \cdot U_{B,F,T1'} + 2 \cdot U_{B,T1,F'} \\ & + 2 \cdot U_{F',G} + 2 \cdot U_{A''} = 2.60374 \cdot 10^{-5} \end{aligned} \quad (16.29)$$

$$\lambda \approx \sum_{i=1}^n \lambda_{ei} \quad (16.30)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{TS} = & \lambda_{T1,T2} + 2 \cdot \lambda_{T1',T2} + 2 \cdot \lambda_{M,S'} + 2 \cdot \lambda_{M,T1'} + 2 \cdot \lambda_{L,T1'} + 2 \cdot \lambda_{L,G'} \\ & + 2 \cdot \lambda_{K,S'} + 2 \cdot \lambda_{A,T1,K'} + 2 \cdot \lambda_{A,K,T1'} + 2 \cdot \lambda_{B,F,T1'} + 2 \cdot \lambda_{B,T1,F'} \\ & + 2 \cdot \lambda_{F',G} + 2 \cdot \lambda_{A''} = 0.020085496 [1/god] \end{aligned} \quad (16.31)$$

17 PRILOG 5

Tabela p5.1 Rizik otkaza prekidača

Br. izvoda	U_n [kV]	Tip voda	Godište prekidača	λ [1/god]	Preostali br. isklj.	p_2	p_1	C [€]	w	R [€]
Izvod 1	10	nadzemni	1970	0.143	9	5.92E-14	0.9144	8000	1	7314.9
Izvod 2	35	nadzemni	1986	0.000	10	0	0.3005	71400	3	64358.5
Izvod 3	10	TS polje	1986	0.000	10	0	0.3005	56700	3	51108.2
Izvod 4	35	nadzemni	1986	0.143	9	5.92E-14	0.3005	65100	3	58679.8
Izvod 5	10	kablovski	1977	0.143	9	5.92E-14	0.6853	4200	1	2878.3
Izvod 6	10	kablovski	1977	0.429	7	3.43E-07	0.6853	15400	2	21107.5
Izvod 7	10	kablovski	1977	0.286	8	8.28E-10	0.6853	2800	1	1918.9
Izvod 8	10	kablovski	1977	0.143	9	5.92E-14	0.6853	18200	2	24945.3
Izvod 9	10	kablovski	1977	0.143	9	5.92E-14	0.6853	11200	1	7675.5
Izvod 10	10	kablovski	1977	0.429	7	3.43E-07	0.6853	3500	1	2398.6
Izvod 11	10	nadzemni	1977	0.857	4	0.009544	0.6853	2100	1	1459.2
Izvod 12	10	nadzemni	1977	0.714	5	0.000759	0.6853	12600	2	17288.9
Izvod 13	35	TS polje	1977	0.143	9	5.92E-14	0.6853	54000	3	111020.1
Izvod 14	10	TS polje	1977	0.143	9	5.92E-14	0.6853	52200	3	107319.4
Izvod 15	10	kablovski	1983	0.286	8	8.28E-10	0.4204	4800	1	2017.8
Izvod 16	10	kablovski	1983	0.143	9	5.92E-14	0.4204	9000	1	3783.3
Izvod 17	10	kablovski	1983	0.714	5	0.000759	0.4204	4800	1	2021.4
Izvod 18	10	kablovski	1983	0.286	8	8.28E-10	0.4204	18000	2	15133.3
Izvod 19	10	TS polje	1981	0.000	10	0	0.5081	45000	3	68600.1
Izvod 20	10	kablovski	1985	0.571	6	2.73E-05	0.3384	12000	2	8121.8
Izvod 21	35	nadzemni	1982	0.000	10	0	0.4637	48600	3	67614.7
Izvod 22	10	nadzemni	1977	0.571	6	2.73E-05	0.6853	2400	1	1644.8
Izvod 23	10	TS polje	1977	0.000	10	0	0.0148	22800	2	672.6
Izvod 24	35	TS polje	1977	0.000	10	0	0.6853	42000	3	86349.0
Izvod 25	10	TS polje	1980	0.143	9	5.92E-14	0.5531	39000	3	64708.3
Izvod 26	10	TS polje	1980	0.143	9	5.92E-14	0.5531	39000	3	64708.3
Izvod 27	10	kablovski	1980	0.571	6	2.73E-05	0.5531	1000	1	553.1
Izvod 28	35	nadzemni	1979	0.000	10	0	0.5979	39600	3	71035.8
Izvod 29	10	nadzemni	1986	0.286	8	8.28E-10	0.3005	3600	1	1081.7
Izvod 30	10	nadzemni	1986	0.143	9	5.92E-14	0.3005	3000	1	901.4
Izvod 31	10	TS polje	1982	0.000	10	0	0.4637	19500	3	27129.4
Izvod 32	10	TS polje	1982	0.000	10	0	0.4637	21000	3	29216.2
Izvod 33	10	kablovski	1982	0.571	6	2.73E-05	0.4637	4000	1	1855.1
Izvod 34	10	kablovski	1982	0.429	7	3.43E-07	0.4637	6000	2	5565.0
Izvod 35	10	kablovski	1982	0.000	10	0	0.4637	6000	2	5565.0
Izvod 36	10	kablovski	1982	0.143	9	5.92E-14	0.4637	1000	1	463.7
Izvod 37	10	kablovski	1982	0.143	9	5.92E-14	0.4637	6000	2	5565.0
Izvod 38	10	kablovski	1982	0.429	7	3.43E-07	0.4637	10000	2	9275.0
Izvod 39	35	nadzemni	1979	0.000	10	0	0.5979	30000	3	53815.0
Izvod 40	10	TS polje	1979	0.000	10	0	0.5979	28500	3	51124.2

Tabela p5.1 Rizik otkaza prekidača - nastavak

Br. izvoda	U_n [kV]	Tip voda	Godište prekidača	λ [1/god]	Preostali br. isklj.	p_2	p_1	C [€]	w	R [€]
Izvod 41	35	nadzemni	1979	0.000	10	0	0.5979	39000	3	69959.5
Izvod 42	10	TS polje	1979	0.000	10	0	0.5979	33000	3	59196.5
Izvod 43	10	kablovski	1979	0.143	9	5.92E-14	0.5979	18000	2	21526.0
Izvod 44	10	kablovski	1979	0.000	10	0	0.5979	13000	2	15546.6
Izvod 45	10	kablovski	1979	0.143	9	5.92E-14	0.5979	14000	2	16742.4
Izvod 46	10	kablovski	1979	0.000	10	0	0.5979	15000	2	17938.3
Izvod 47	10	kablovski	1979	0.143	9	5.92E-14	0.5979	16000	2	19134.2
Izvod 48	10	kablovski	1978	0.286	8	8.28E-10	0.6422	13000	2	16697.7
Izvod 49	10	kablovski	1979	0.286	8	8.28E-10	0.5979	10000	2	11958.9
Izvod 50	10	kablovski	1981	0.000	10	0	0.5081	3000	2	3048.9
Izvod 51	10	kablovski	1979	0.714	5	0.000759	0.5979	4000	2	4789.6
Izvod 52	10	kablovski	1979	0.571	6	2.73E-05	0.5979	3000	2	3587.8
Izvod 53	10	kablovski	1979	0.286	8	8.28E-10	0.5979	4500	1	2690.7
Izvod 54	10	kablovski	1979	1.286	1	0.35544	0.5979	2000	1	1906.8
Izvod 55	10	kablovski	1979	0.000	10	0	0.5979	1000	1	597.9
Izvod 56	35	nadzemni	1977	0.000	10	0	0.6853	19000	2	26041.8
Izvod 57	10	TS polje	1977	0.000	10	0	0.6853	13000	2	17818.0
Izvod 58	10	kablovski	1977	0.571	6	2.73E-05	0.6853	11000	1	7538.7
Izvod 59	10	kablovski	1977	0.286	8	8.28E-10	0.6853	28500	3	58594.0
Izvod 60	10	kablovski	1977	0.000	10	0	0.6853	3000	1	2055.9
Izvod 61	10	kablovski	1977	0.429	7	3.43E-07	0.6853	13000	2	17818.1
Izvod 62	10	kablovski	1977	0.143	9	5.92E-14	0.6853	12000	2	16447.4
Izvod 63	10	nadzemni	1977	0.286	8	8.28E-10	0.6853	5000	1	3426.5
Izvod 64	10	nadzemni	1977	0.857	4	0.009544	0.6853	4500	1	3126.8
Izvod 65	10	nadzemni	1977	0.857	4	0.009544	0.6853	3000	2	4169.1
Izvod 66	10	TS polje	1990	0.000	10	0	0.1740	64800	3	33817.5
Izvod 67	35	nadzemni	1989	0.000	10	0	0.2016	64800	3	39192.9
Izvod 68	10	TS polje	1990	0.000	10	0	0.1740	66600	3	34756.9
Izvod 69	10	kablovski	1989	0.143	9	5.92E-14	0.2016	26400	2	10645.0
Izvod 70	10	nadzemni	1989	0.143	9	5.92E-14	0.2016	27600	2	11128.8
Izvod 71	10	kablovski	1989	0.143	9	5.92E-14	0.2016	18000	2	7257.9
Izvod 72	10	kablovski	1989	0.000	10	0	0.2016	19200	2	7741.8
Izvod 73	10	nadzemni	1989	0.000	10	0	0.2016	14400	2	5806.4
Izvod 74	10	nadzemni	1989	0.286	8	8.28E-10	0.2016	12000	2	4838.6
Izvod 75	10	nadzemni	1989	0.143	9	5.92E-14	0.2016	8400	1	1693.5
Izvod 76	10	TS polje	1980	0.000	10	0	0.5531	63000	3	104528.8
Izvod 77	10	nadzemni	1970	0.000	10	0	0.9144	6500	1	5943.4
Izvod 78	10	nadzemni	1970	1.429	0	0.239651	0.9144	4500	1	5193.1
Izvod 79	10	kablovski	1970	0.143	9	5.92E-14	0.9144	2500	1	2285.9
Izvod 80	10	kablovski	1970	0.571	6	2.73E-05	0.9144	7000	1	6400.8
Izvod 81	35	nadzemni	1970	0.571	6	2.73E-05	0.9144	6500	1	5943.6
Izvod 82	35	nadzemni	1970	0.000	10	0	0.9144	48000	3	131669.0
Izvod 83	10	TS polje	1978	0.000	10	0	0.6422	48000	3	92479.7

Tabela p5.1 Rizik otkaza prekidača - nastavak

Br. izvoda	U_n [kV]	Tip voda	Godište prekidača	λ [1/god]	Preostali br. isklj.	p_2	p_1	C [€]	w	R [€]
Izvod 84	35	nadzemni	1978	0.000	10	0	0.6422	45000	3	86699.7
Izvod 85	10	TS polje	1978	0.000	10	0	0.6422	43500	3	83809.7
Izvod 86	10	kablovski	1978	0.143	9	5.92E-14	0.6422	19000	2	24404.4
Izvod 87	10	kablovski	1978	1.286	1	0.35544	0.6422	18000	2	35915.7
Izvod 88	10	kablovski	1978	1.000	3	0.061313	0.6422	6500	1	4573.0
Izvod 89	10	kablovski	1978	0.571	6	2.73E-05	0.6422	12000	2	15413.9
Izvod 90	10	kablovski	1978	0.429	7	3.43E-07	0.6422	22000	2	28257.7
Izvod 91	10	kablovski	1978	0.143	9	5.92E-14	0.6422	21000	2	26973.2
Izvod 92	10	nadzemni	1974	0.286	8	8.28E-10	0.8021	5500	1	4411.4
Izvod 93	10	nadzemni	1985	0.143	9	5.92E-14	0.3384	5000	1	1691.9
Izvod 94	10	nadzemni	1974	0.571	6	2.73E-05	0.8021	9000	2	14437.7
Izvod 95	35	nadzemni	1991	0.000	10	0	0.1490	63000	3	28156.0
Izvod 96	10	TS polje	1990	0.000	10	0	0.1740	46500	3	24267.2
Izvod 97	10	nadzemni	1978	0.286	8	8.28E-10	0.6422	7200	1	4624.0
Izvod 98	10	TS polje	1977	0.000	10	0	0.6853	63000	3	129523.5
Izvod 99	10	kablovski	1985	0.571	6	2.73E-05	0.3384	30800	2	20845.9
Izvod 100	10	nadzemni	1985	0.143	9	5.92E-14	0.3384	26600	2	18001.8
Izvod 101	10	kablovski	1985	0.286	8	8.28E-10	0.3384	21000	2	14212.0
Izvod 102	10	nadzemni	1985	0.143	9	5.92E-14	0.3384	19600	2	13264.5
Izvod 103	10	nadzemni	1985	0.143	9	5.92E-14	0.3384	25200	2	17054.4
Izvod 104	10	kablovski	1985	0.143	9	5.92E-14	0.3384	21000	2	14212.0
Izvod 105	10	kablovski	1985	0.143	9	5.92E-14	0.3384	18200	2	12317.0
Izvod 106	10	TS polje	1971	0.000	10	0	0.8916	79500	3	212637.1
Izvod 107	10	TS polje	1971	0.000	10	0	0.8916	84000	3	224673.2
Izvod 108	10	kablovski	1971	0.143	9	5.92E-14	0.8916	22000	2	39228.6
Izvod 109	10	nadzemni	1971	0.429	7	3.43E-07	0.8916	24000	2	42794.9
Izvod 110	10	kablovski	1971	0.143	9	5.92E-14	0.8916	21000	2	37445.5
Izvod 111	35	nadzemni	1980	0.000	10	0	0.5531	128100	3	212542.0
Izvod 112	10	TS polje	1980	0.000	10	0	0.5531	123900	3	205573.4
Izvod 113	10	nadzemni	1980	0.714	5	0.000759	0.5531	7000	1	3876.7
Izvod 114	10	nadzemni	1980	0.571	6	2.73E-05	0.5531	6300	1	3484.5
Izvod 115	10	nadzemni	1980	0.571	6	2.73E-05	0.5531	14000	2	15486.5
Izvod 116	10	nadzemni	1980	0.571	6	2.73E-05	0.5531	6300	1	3484.5
Izvod 117	10	nadzemni	1980	0.286	8	8.28E-10	0.5531	8400	1	4645.7
Izvod 118	10	nadzemni	1976	1.429	0	0.239651	0.7267	7000	1	6764.1
Izvod 119	10	TS polje	1985	0.000	10	0	0.3384	39600	3	40199.6
Izvod 120	10	TS polje	1983	0.000	10	0	0.4204	55800	3	70369.8
Izvod 121	10	kablovski	1985	0.429	7	3.43E-07	0.3384	14400	2	9745.4
Izvod 122	10	kablovski	1983	0.429	7	3.43E-07	0.4204	14400	2	12106.6
Izvod 123	10	TS polje	1987	0.000	10	0	0.2649	58800	3	46733.1
Izvod 124	10	TS polje	1987	0.000	10	0	0.2649	60900	3	48402.1
Izvod 125	35	nadzemni	1987	0.000	10	0	0.2649	44800	2	23737.4
Izvod 126	10	kablovski	1987	0.000	10	0	0.2649	14000	1	3709.0

Tabela p5.1 Rizik otkaza prekidača - nastavak

Br. izvoda	U_n [kV]	Tip voda	Godište prekidača	λ [1/god]	Preostali br. isklj.	p_2	p_1	C [€]	w	R [€]
Izvod 127	10	kablovski	1987	0.000	10	0	0.2649	18200	2	9643.3
Izvod 128	10	kablovski	1987	1.143	2	0.208266	0.2649	12600	2	11924.4
Izvod 129	10	kablovski	1987	0.286	8	8.28E-10	0.2649	1400	1	370.9
Izvod 130	10	kablovski	1987	0.714	5	0.000759	0.2649	26600	2	14134.4
Izvod 131	10	kablovski	1989	1.000	3	0.061313	0.2016	15400	1	4049.0
Izvod 132	10	kablovski	1987	0.429	7	3.43E-07	0.2649	15400	2	8159.7
Izvod 133	10	kablovski	1989	0.857	4	0.009544	0.2016	19600	2	8277.2
Izvod 134	10	TS polje	1980	0.286	8	8.28E-10	0.5531	78000	3	129416.7
Izvod 135	10	nadzemni	1985	0.143	9	5.92E-14	0.3384	8000	1	2707.0
Izvod 136	10	kablovski	1985	0.000	10	0	0.3384	9000	1	3045.4
Izvod 137	10	nadzemni	1985	0.143	9	5.92E-14	0.3384	11000	1	3722.2
Izvod 138	10	kablovski	1985	0.000	10	0	0.3384	11500	1	3891.4
Izvod 139	10	TS polje	1977	0.000	10	0	0.6853	61200	3	125822.8
Izvod 140	10	kablovski	1992	0.143	9	5.92E-14	0.1266	7200	1	911.5
Izvod 141	10	kablovski	1985	0.143	9	5.92E-14	0.3384	7800	1	2639.4
Izvod 142	10	kablovski	1985	0.143	9	5.92E-14	0.3384	10800	2	7309.0
Izvod 143	10	TS polje	1980	0.000	10	0	0.5531	93600	3	155300.0
Izvod 144	10	TS polje	1980	0.000	10	0	0.5531	82800	3	137380.8
Izvod 145	10	kablovski	1987	0.000	10	0	0.2649	7800	1	2066.4
Izvod 146	10	kablovski	1980	0.000	10	0	0.5531	15600	2	17255.6
Izvod 147	10	kablovski	1980	0.571	6	2.73E-05	0.5531	8400	1	4646.0
Izvod 148	35	nadzemni	1980	0.000	10	0	0.5531	49200	3	81632.0
Izvod 149	35	nadzemni	1980	0.714	5	0.000759	0.5531	61200	3	101681.6
Izvod 150	35	nadzemni	1980	0.143	9	5.92E-14	0.5531	61200	3	101542.3
Izvod 151	10	kablovski	1980	0.000	10	0	0.5531	4800	1	2654.7
Izvod 152	10	nadzemni	1980	0.429	7	3.43E-07	0.5531	10400	2	11503.7
Izvod 153	10	nadzemni	1980	1.429	0	0.239651	0.5531	10800	3	25683.9
Izvod 154	10	nadzemni	1980	0.286	8	8.28E-10	0.5531	8000	2	8849.0
Izvod 155	10	nadzemni	1980	0.000	10	0	0.5531	11200	2	12388.6
Izvod 156	10	TS polje	1980	0.000	10	0	0.5531	63600	3	105524.4
Izvod 157	10	nadzemni	1981	0.286	8	8.28E-10	0.5081	6000	1	3048.9
Izvod 158	10	nadzemni	1981	0.286	8	8.28E-10	0.5081	7800	1	3963.6
Izvod 159	10	TS polje	1981	0.143	9	5.92E-14	0.5081	61500	3	93753.4
Izvod 160	10	nadzemni	1965	0.286	8	8.28E-10	0.9809	9500	1	9318.6
Izvod 161	35	nadzemni	1992	0.000	10	0	0.1266	60000	3	22786.6
Izvod 162	10	TS polje	1987	0.000	10	0	0.2649	61500	3	48879.0
Izvod 163	10	TS polje	1987	0.571	6	2.73E-05	0.2649	51000	3	40537.9
Izvod 164	35	nadzemni	1979	1.143	2	0.208266	0.5979	73800	3	178494.9
Izvod 165	10	kablovski	1987	0.143	9	5.92E-14	0.2649	7200	1	1907.5
Izvod 166	10	kablovski	1987	0.143	9	5.92E-14	0.2649	7800	1	2066.4
Izvod 167	10	kablovski	1987	0.286	8	8.28E-10	0.2649	8400	1	2225.4
Izvod 168	10	kablovski	1987	0.143	9	5.92E-14	0.2649	9000	1	2384.3
Izvod 169	10	nadzemni	1987	0.857	4	0.009544	0.2649	14400	2	7904.8

Tabela p5.1 Rizik otkaza prekidača - nastavak

Br. izvoda	U_n [kV]	Tip voda	Godište prekidača	λ [1/god]	Preostali br. isklj.	p_2	p_1	C [€]	w	R [€]
Izvod 170	10	kablovski	1987	0.000	10	0	0.2649	1800	1	476.9
Izvod 171	35	TS polje	1990	0.000	10	0	0.1740	93600	3	48847.5
Izvod 172	10	TS polje	1990	0.000	10	0	0.1740	77400	3	40393.2
Izvod 173	10	TS polje	1990	0.000	10	0	0.1740	60000	3	31312.5
Izvod 174	10	nadzemni	1990	0.286	8	8.28E-10	0.1740	6000	1	1043.8
Izvod 175	10	nadzemni	1990	1.429	0	0.239651	0.1740	6500	1	2688.5
Izvod 176	10	TS polje	1980	0.000	10	0	0.5531	30000	3	49775.6
Izvod 177	10	TS polje	1980	0.000	10	0	0.5531	28800	3	47784.6
Izvod 178	10	kablovski	1980	0.286	8	8.28E-10	0.5531	14400	2	15928.2
Izvod 179	10	kablovski	1980	0.000	10	0	0.5531	15200	2	16813.1
Izvod 180	10	kablovski	1980	0.286	8	8.28E-10	0.5531	16000	2	17698.0
Izvod 181	10	kablovski	1980	0.000	10	0	0.5531	14400	2	15928.2
Izvod 182	10	kablovski	1980	0.143	9	5.92E-14	0.5531	15200	2	16813.1
Izvod 183	10	kablovski	1980	0.000	10	0	0.5531	3600	1	1991.0
Izvod 184	10	kablovski	1980	0.286	8	8.28E-10	0.5531	17600	2	19467.8
Izvod 185	10	kablovski	1980	0.000	10	0	0.5531	1600	2	1769.8
Izvod 186	10	kablovski	1980	0.000	10	0	0.5531	2400	3	3982.1
Izvod 187	10	nadzemni	1990	1.000	3	0.061313	0.1740	7200	1	1694.0
Izvod 188	10	nadzemni	1990	0.429	7	3.43E-07	0.1740	5400	1	939.4
Izvod 189	10	TS polje	1985	0.000	10	0	0.3384	39600	3	40199.6
Izvod 190	10	TS polje	1985	0.000	10	0	0.3384	41400	3	42026.8
Izvod 191	10	kablovski	1975	0.143	9	5.92E-14	0.7657	7200	1	5513.2
Izvod 192	10	kablovski	1985	0.000	10	0	0.3384	13000	2	8797.9
Izvod 193	10	kablovski	1985	0.143	9	5.92E-14	0.3384	12000	2	8121.1
Izvod 194	10	kablovski	1985	0.000	10	0	0.3384	12000	2	8121.1
Izvod 195	10	TS polje	1987	0.143	9	5.92E-14	0.2649	78000	3	61992.8
Izvod 196	10	TS polje	1987	0.429	7	3.43E-07	0.2649	76500	3	60800.7
Izvod 197	10	nadzemni	1987	1.000	3	0.061313	0.2649	13300	1	4339.0
Izvod 198	10	nadzemni	1987	0.000	10	0	0.2649	12600	2	6676.2
Izvod 199	10	kablovski	1987	0.000	10	0	0.2649	11200	2	5934.4
Izvod 200	10	kablovski	1987	0.143	9	5.92E-14	0.2649	8400	1	2225.4
Izvod 201	10	kablovski	1987	0.000	10	0	0.2649	1400	1	370.9
Izvod 202	35	nadzemni	1980	0.000	10	0	0.5531	90300	3	149824.7
Izvod 203	35	nadzemni	1980	0.000	10	0	0.5531	92400	3	153309.0
Izvod 204	10	TS polje	1980	0.000	10	0	0.5531	84000	3	139371.8
Izvod 205	10	nadzemni	1980	0.000	10	0	0.5531	13300	1	7355.7
Izvod 206	10	nadzemni	1980	0.286	8	8.28E-10	0.5531	9100	1	5032.9
Izvod 207	10	nadzemni	1980	0.286	8	8.28E-10	0.5531	6300	1	3484.3
Izvod 208	10	nadzemni	1980	0.571	6	2.73E-05	0.5531	7000	1	3871.6
Izvod 209	35	kablovski	1980	0.000	10	0	0.5531	68400	3	113488.5
Izvod 210	10	TS polje	1980	0.000	10	0	0.5531	74400	3	123443.6
Izvod 211	35	kablovski	1980	0.000	10	0	0.5531	39600	3	65703.8
Izvod 212	10	TS polje	1980	0.000	10	0	0.5531	42000	3	69685.9

Tabela p5.1 Rizik otkaza prekidača - nastavak

Br. izvoda	U_n [kV]	Tip voda	Godište prekidača	λ [1/god]	Preostali br. isklj.	p_2	p_1	C [€]	w	R [€]
Izvod 213	10	kablovski	1980	0.000	10	0	0.5531	9600	2	10618.8
Izvod 214	10	kablovski	1980	0.000	10	0	0.5531	7200	2	7964.1
Izvod 215	10	kablovski	1980	0.714	5	0.000759	0.5531	9600	3	15950.0
Izvod 216	10	kablovski	1980	0.000	10	0	0.5531	8000	2	8849.0
Izvod 217	35	nadzemni	1980	0.000	10	0	0.5531	82500	3	136883.0
Izvod 218	10	TS polje	1980	0.000	10	0	0.5531	79500	3	131905.4
Izvod 219	35	nadzemni	1980	0.000	10	0	0.5531	78000	3	129416.7
Izvod 220	10	kablovski	1980	0.429	7	3.43E-07	0.5531	19000	2	21016.4
Izvod 221	10	kablovski	1980	0.143	9	5.92E-14	0.5531	3000	1	1659.2
Izvod 222	10	nadzemni	1980	0.000	10	0	0.5531	13500	3	22399.0
Izvod 223	10	kablovski	1980	0.286	8	8.28E-10	0.5531	18000	2	19910.3
Izvod 224	10	nadzemni	1980	0.857	4	0.009544	0.5531	14000	1	7876.5
Izvod 225	10	kablovski	1980	0.000	10	0	0.5531	31000	2	34289.9
Izvod 226	10	kablovski	1980	0.286	8	8.28E-10	0.5531	16500	1	9125.5
Izvod 227	10	nadzemni	1980	0.429	7	3.43E-07	0.5531	6000	1	3318.4
Izvod 228	10	TS polje	1990	0.000	10	0	0.1740	66000	3	34443.8
Izvod 229	10	TS polje	1990	0.000	10	0	0.1740	68400	3	35696.3
Izvod 230	35	kablovski	1990	0.000	10	0	0.1740	21600	3	11272.5
Izvod 231	10	kablovski	1990	0.429	7	3.43E-07	0.1740	9600	2	3340.0
Izvod 232	10	kablovski	1990	0.143	9	5.92E-14	0.1740	15200	2	5288.3
Izvod 233	10	kablovski	1990	0.286	8	8.28E-10	0.1740	16800	2	5845.0
Izvod 234	10	kablovski	1990	0.429	7	3.43E-07	0.1740	16800	2	5845.0
Izvod 235	10	kablovski	1990	0.143	9	5.92E-14	0.1740	31200	2	10855.0
Izvod 236	10	kablovski	1990	0.000	10	0	0.1740	8800	2	3061.7
Izvod 237	10	kablovski	1990	0.000	10	0	0.1740	2400	2	835.0
Izvod 238	10	kablovski	1990	0.143	9	5.92E-14	0.1740	15200	2	5288.3
Izvod 239	35	nadzemni	1972	0.000	10	0	0.8652	46800	3	121473.6
Izvod 240	10	TS polje	1985	0.000	10	0	0.3384	45600	3	46290.4
Izvod 241	10	TS polje	1975	0.000	10	0	0.7657	40800	3	93724.3
Izvod 242	10	nadzemni	1975	0.714	5	0.000759	0.7657	8400	1	6438.4

Značenje oznaka u tabeli p5.1:

U_n – nazivni napon voda,

λ – prosečna vrednost prekida struje kratkog spoja u posmatranom periodu,

p_1 - verovatnoća otkaza usled prekoračene vrednosti pada napona na polovima prekidača (za kriterijum „svi izvod +25% ΔU “),

p_2 - verovatnoća otkaza usled prekoračenog broja struja kratkog spoja,

C - novčani troškovi,

w – težinski faktor značaja izvoda,

R – rizik otkaza prekidača.

18 PRILOG 6

SOFTVER ZA PRORAČUN RIZIKA PREKIDAČA

Početni prozor softvera sadrži (slika p6.1):

Izbor TS, nakon čega postaju aktivne sledeće komande:

1. Prikaz jednopolne šeme TS,
2. Prikaz pokazatelja pouzdanosti TS (grafici nepouzdanosti i intenziteta otkaza koji su identični graficima koji su prikazani u prilogu 1),
3. Tabela prikaz svih izmerenih vrednosti koje čine bazu podataka korišćenih za proračun (slika p6.2),
4. Stanje prekidača. Za svaki pojedinačni prekidač u TS (izbor prekidača kao na slici p6.3) dobijaju se grafici Vejbulove raspodele, broja isključenih struja kratkog spoja i izmerenih padova napona (slika p6.4). Na slici p6.4, za odabrani prekidač grafički su prikazane vrednosti izmerenih padova napona sa graničnom linijom koja predstavlja maksimalno dozvoljenu vrednost. Na sledećem grafiku prikazana je nepouzdanost prekidača dobijena Vejbulovom raspodelom i isprekidanom linijom je prikazana trenutna vrednost nepouzdanosti. Na poslednjem grafiku su prikazani zabeleženi prekidi struje kratkog spoja sa isprekidanom linijom koja označava graničnu vrednost.
5. Unos novih vrednosti, gde se vrši upis novih vrednosti u bazu podataka (slika p6.5),
6. Proračun rizika (slika p6.6),
7. Proračun raspoloživost TS,
8. Proračun troškova sadrži prikaz proračuna za svaku od 5 navedenih akcija zamene prekidača (slika p6.7),
9. Proračun verovatnoće otkaza prekidača (slika p6.8 i p6.9). Na slici p6.9 nalaze se dva grafika. Na prvom grafiku, za odabrani prekidač, predstavljena je Puasonova raspodela na osnovu zabeleženih isključenja struje kratkog spoja i navedena je vrednost Puasonove verovatnoće otkaza. Na drugom grafiku se nalazi kriva Vejbulove raspodele nepouzdanosti, a isprekidanom linijom je označena trenutna vrednost nepouzdanosti prekidača u odnosu na njegovu trenutnu starost.

Proračun stanja prekidača

Izbor TS

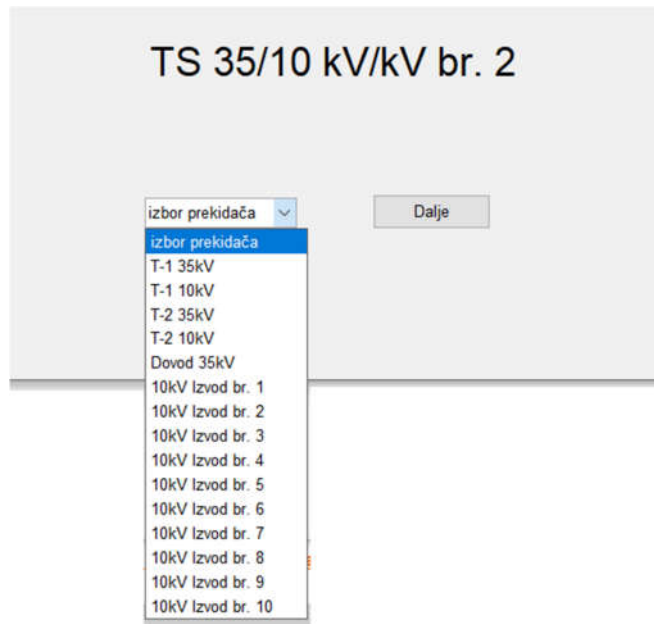
1. Jednopolna šema TS
2. Pokazatelji pouzdanosti
3. Trenutne vrednosti padova napona
4. Stanje prekidača
5. Unos novih vrednosti
6. Proračun rizika
7. Proračun pouzdanosti TS
8. Proračun troškova
9. Proračun verovatnoća p1 i p2

Slika p6.1 Početni prozor nakon pokretanja softvera

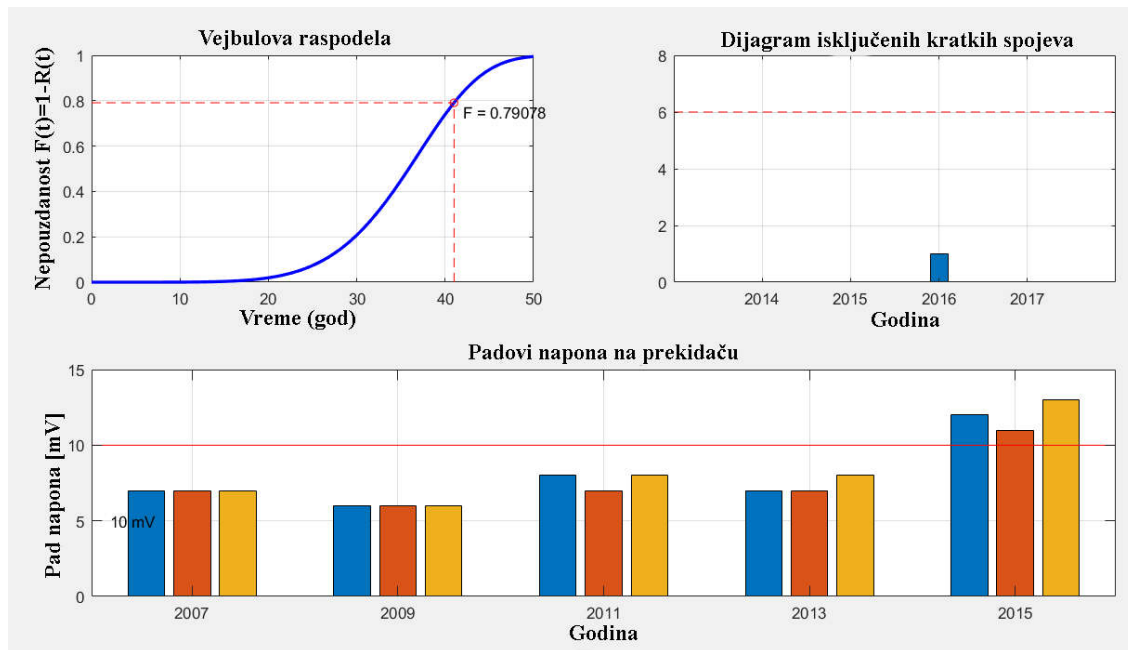
Trenutne vrednosti rizika prekidača u TS br.2

	Naponski nivo	Godište	Starost	Težinski faktor	p1 - verovatnoća	p2 - verovatnoća	C (\$) - troškovi	R - riz
T1 35 kV	36	1986	33	2	0.6230	0	24300	1.5139e
T1 10 kV	12	1986	33	2	0.2610	0	19400	5.0634e
T2 35 kV	36	1986	33	2	0.6230	0	24300	1.5139e
T2 10 kV	12	1986	33	2	0.2610	0	19400	5.0634e
Dovod 35kV	36	1986	33	2	0.6230	1.2749e-09	22200	1.3831e
10kV Izvod br. 1	12	1977	42	2	0.6590	2.7381e-07	4700	3.0973e
10kV Izvod br. 2	12	1977	42	2	0.6590	1.2749e-09	8200	5.4038e
10kV Izvod br. 3	12	1977	42	1	0.6590	1.2749e-09	3300	2.1747e
10kV Izvod br. 4	12	1977	42	1	0.6590	2.7381e-07	9600	6.3264e
10kV Izvod br. 5	12	1977	42	2	0.6590	1.2749e-09	11700	7.7103e
10kV Izvod br. 6	12	1977	42	2	0.6590	1.4165e-05	4000	2.6361e
10kV Izvod br. 7	12	1977	42	2	0.6590	1.3055e-04	2600	1.7137e
10kV Izvod br. 8	12	1977	42	3	0.6590	0.0166	11100	7.4988e
10kV Izvod br. 9	12	1977	42	1	0.6590	5.9418e-04	5700	3.7597e

Slika p6.2 Trenutne vrednosti rizika



Slika p6.3 Prikaz stanja izabranog prekidača



Slika p6.4 Stanje izabranog prekidača

TS 35/10 kV/kV br. 2

unos novih vrednosti padova napona i broja kratkih spojeva

Godina

<p>T-1 35kV</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> </div> <p style="text-align: right; margin-right: 5px;">Broj lks</p> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-top: 2px;"></div>	<p>10kV Izvod br. 1</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> </div> <p style="text-align: right; margin-right: 5px;">Broj lks</p> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-top: 2px;"></div>	<p>10kV Izvod br. 6</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> </div> <p style="text-align: right; margin-right: 5px;">Broj lks</p> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-top: 2px;"></div>	
<p>T-1 10kV</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> </div> <p style="text-align: right; margin-right: 5px;">Broj lks</p> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-top: 2px;"></div>	<p>10kV Izvod br. 2</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> </div> <p style="text-align: right; margin-right: 5px;">Broj lks</p> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-top: 2px;"></div>	<p>10kV Izvod br. 7</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> </div> <p style="text-align: right; margin-right: 5px;">Broj lks</p> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-top: 2px;"></div>	
<p>T-2 35kV</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> </div> <p style="text-align: right; margin-right: 5px;">Broj lks</p> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-top: 2px;"></div>	<p>10kV Izvod br. 3</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> </div> <p style="text-align: right; margin-right: 5px;">Broj lks</p> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-top: 2px;"></div>	<p>10kV Izvod br. 8</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> </div> <p style="text-align: right; margin-right: 5px;">Broj lks</p> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-top: 2px;"></div>	
<p>T-2 10kV</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> </div> <p style="text-align: right; margin-right: 5px;">Broj lks</p> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-top: 2px;"></div>	<p>10kV Izvod br. 4</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> </div> <p style="text-align: right; margin-right: 5px;">Broj lks</p> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-top: 2px;"></div>	<p>10kV Izvod br. 9</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> </div> <p style="text-align: right; margin-right: 5px;">Broj lks</p> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-top: 2px;"></div>	
<p>Dovod 35kV br.1</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> </div> <p style="text-align: right; margin-right: 5px;">Broj lks</p> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-top: 2px;"></div>	<p>10kV Izvod br. 5</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> </div> <p style="text-align: right; margin-right: 5px;">Broj lks</p> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-top: 2px;"></div>	<p>10kV Izvod br. 10</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-bottom: 2px;"></div> </div> <p style="text-align: right; margin-right: 5px;">Broj lks</p> <div style="border: 1px solid black; width: 30px; height: 20px; margin-top: 2px;"></div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">izvrši upis</div>

Slika p6.5 Unos novih vrednosti padova napona i broja kratkih spojeva

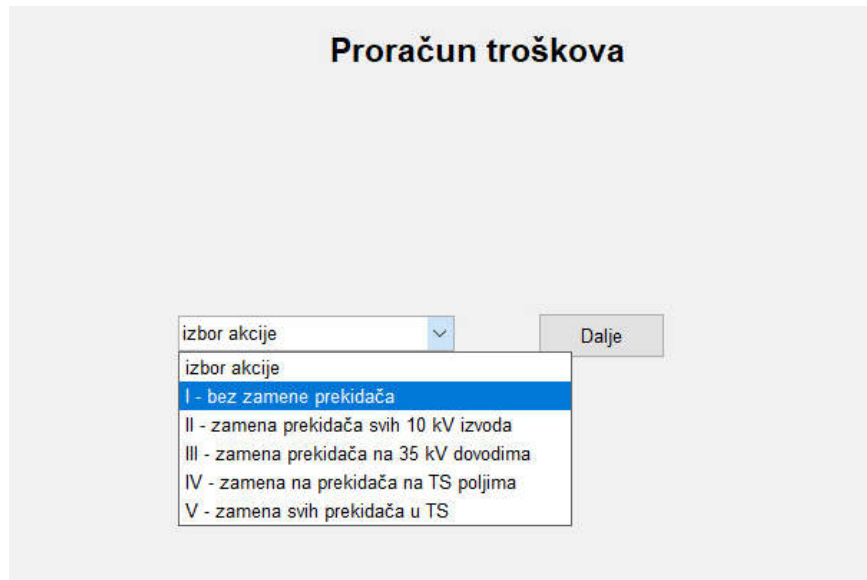
PRORAČUN RIZIKA PREKIDAČA

$$R(t) = w \cdot (p_1(t) + p_2(t)) \cdot C(t)$$

Sadašnja vrednost rizika

Buduća vrednost rizika

Slika p6.6 Proračun sadašnje ili buduće vrednosti rizika



Slika p6.7 Sagledavanje troškova različitih vrsta investicija

Wejbulova raspodela

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$$

parametar oblika (beta)

parametar razmere (eta)

trenutna starost prekidača [god]

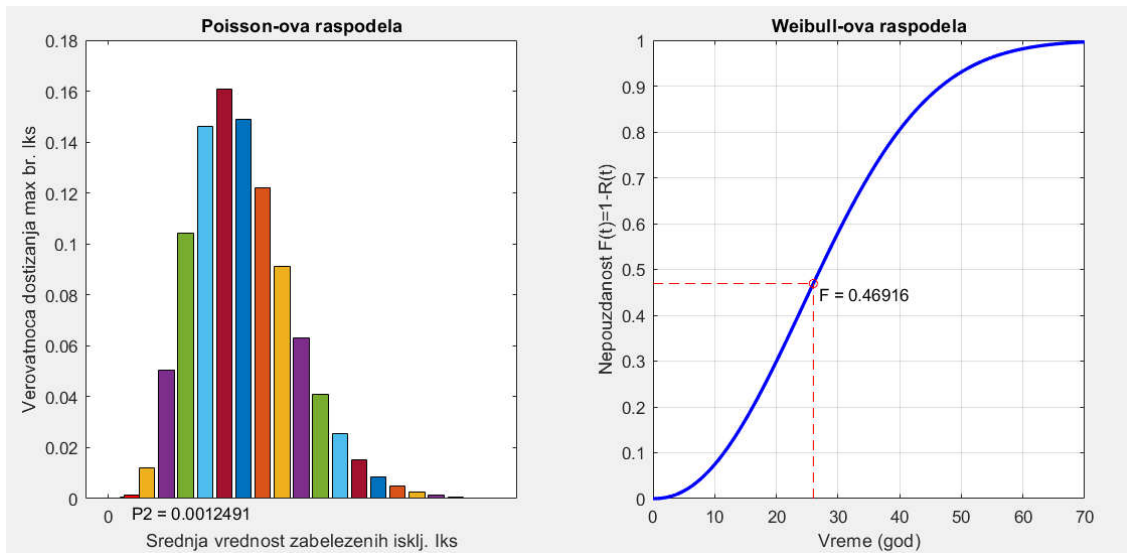
Puasonova raspodela

$$p(x; \lambda) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!}$$

max broj isključenja lks

srednja vrednost zabeleženih lks

Slika p6.8 Proračun verovatnoće otkaza prekidača



Slika p6.9 Rezultat proračuna verovatnoće

BIOGRAFIJA

Dragan Stevanović, diplomirani inženjer elektrotehnike, master elektroenergetike, rođen je 3.februara.1985. godine u Sokobanji, Republika Srbija. Osnovnu školu „Dimitrije Dragović“ završio je u Sokobanji sa odličnim uspehom 2000. godine. Srednju „Elektro-mašinsku“ školu završio je u Aleksincu 2004. godine sa odličnim uspehom. Iste godine je upisao Elektronski fakultet u Nišu, na kome je diplomirao 2009. godine na smeru za Elektroenergetiku sa prosečnom ocenom 7.74 u toku studija, i ocenom 10 na diplomskom ispitu.

Naredne godine, nakon završetka studija dobija zaposlenje u P.D. „Jugoistok“ D.O.O. u ogranaku ED Vranje kao samostalni stručni saradnik za plansku energetiku, gde obavlja poslove planiranja razvoja SN mreže kao i njeno ucrtavanje u geografski informacioni sistem. Tokom marta meseca 2014. godine dobija premeštaj na radno mesto stručni saradnik za relejnu zaštitu u ED Zaječar. Na tom radnom mestu obavlja poslove podešavanja i ispitivanja relejne zaštite 35 kV i 10 kV izvoda i transformatora, vrši podešavanje i praćenje rada reklozera. Od oktobra 2019. god. radi u Beogradu na radnom mestu stručni saradnik za naponska ispitivanja, gde obavlja poslove lociranja kvarova na kablovima naponskih nivoa: 0.4 kV, 10 kV i 35 kV, i ispitivanje 10/0.4 kV/kV TS pre njihovog puštanja u pogon.

Doktorske studije na Elektronskom fakultetu u Nišu na smeru Elektroenergetika upisuje novembra 2013. godine.

U svom naučno-istraživačkom radu bavio se analizom preostalog životnog veka malouljnih prekidača i objavio je nekoliko radova iz te oblasti. Objavio je 9 stručnih radova, od koji 5 radova na stručnim konferencijama i 4 rada u stručnim časopisima.

Govori engleski i nemački jezik.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом

„Одређивање преосталог животног века и стратегије замене малоуљних прекидача на основу динамичке анализе ризика“

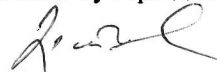
која је одбрањена на Електронском факултету Универзитета у Нишу:

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да ову дисертацију, ни у целини, нити у деловима, нисам пријављивао/ла на другим факултетима, нити универзитетима;
- да нисам повредио/ла ауторска права, нити злоупотребио/ла интелектуалну својину других лица.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са ауторством и добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада, и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу, као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

У Нишу, _____

Потпис аутора дисертације:



Драган А. Стевановић
(Име, средње слово и презиме)

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу унесе моју докторску дисертацију, под насловом:

„Одређивање преосталог животног века и стратегије замене малоуљних прекидача на основу динамичке анализе ризика“

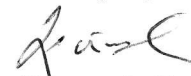
Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском облику, погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons), за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прераде (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

У Нишу, _____

Потпис аутора дисертације:



Драган А. Стевановић

(Име, средње слово и презиме)

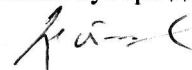
**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ЕЛЕКТРОНСКОГ И ШТАМПАНОГ ОБЛИКА
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Наслов дисертације: „Одређивање преосталог животног века и стратегије замене
малоуљних прекидача на основу динамичке анализе ризика“

Изјављујем да је електронски облик моје докторске дисертације, коју сам
предао/ла за уношење у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, истоветан
штампаном облику.

У Нишу, , _____

Потпис аутора дисертације:



Драган А. Стевановић

(Име, средње слово и презиме)