

UNIVERZITET U BEOGRADU
TEHNIČKI FAKULTET U BORU

Jelena D. Velimirović

**RAZVOJ VIŠEKRITERIJUMSKOG MODELA
ZA UTVRĐIVANJE PRIORITETA ZAMENE
ENERGETSKE OPREME PRIMENOM
INTERVALNIH DIJAGRAMA UTICAJA**

doktorska disertacija

Bor, 2023

UNIVERSITY OF BELGRADE
TECHNICAL FACULTY IN BOR

Jelena D. Velimirović

**DEVELOPMENT OF A MULTI-CRITERIA
MODEL FOR DETERMINING THE PRIORITY
OF ENERGY EQUIPMENT REPLACEMENT
USING INTERVAL INFLUENCE DIAGRAMS**

Doctoral Dissertation

Bor, 2023

Mentor:

Prof. dr Đorđe Nikolić, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru

Predsednik komisije

Prof. dr Ivan Mihajlović, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

Članovi komisije:

1. Prof. dr Jordan Radosavljević, redovni profesor, Univerzitet u Prištini, Fakultet tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici
2. Prof. dr Predrag Đorđević, vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru
3. Prof. dr Marija Panić, vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru,
4. Prof. dr Dragan Pamučar, vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu, Fakultet organizacionih nauka

Datum odbrane:

Mihailu, Bogdanu i Lazaru

Zahvalnica

Najpre želim da se zahvalim svom mentoru profesoru dr Đorđu Nikoliću na ukazanom poverenju, strpljenju i korisnim savetima prilikom izrade ove disertacije.

Zahvalnost dugujem profesoru dr Ivanu Mihajloviću sa kojim sam započela ovaj istraživački rad na doktorskim studijama.

Takođe, zahvaljujem se i ostalim članovima Komisije na konstruktivnim komentarima koji su unapredili ovu disertaciju.

Posebnu zahvalnost dugujem profesoru dr Aleksandru Janjiću za nesebičnu stručnu i ljudsku pomoć tokom svih godina istraživačkog rada, naročito za omogućavanje pristupa podacima od značaja za ovaj rad.

Takođe, veliku zahvalnost dugujem profesoru dr Miomiru Stankoviću koji me je uveo u svet teorije odlučivanja i teorije rizika i sve vreme usmeravao svojim stručnim i dobronamernim predlozima.

Na kraju, ali ne po važnosti, zahvaljujem porodicama Velimirović i Ranitović na безусловnoj podršci. Posebnu zahvalnost dugujem mom Lazaru na inspiraciji, ljubavi i strpljenju.

Razvoj višekriterijumskog modela za utvrđivanje prioriteta zamene energetske opreme primenom intervalnih dijagrama uticaja

Sažetak

Savremeni elektroenergetski sistemi suočavaju se sa ozbiljnim izazovima, kao što su integracija obnovljivih izvora energije i aktivna potražnja, dok su neizvesnost i nepotpune informacije postale neizostavni deo planiranja, rada i kontrole sistema električne energije. Imajući u vidu da se složeni elektroenergetski sistem sastoji od mnogo međusobno zavisnih podсистema, analiziranje stanja sistema, održavanje pouzdanosti na željenom nivou i ublažavanje gubitaka postaje teže nego ikad. U cilju povećanja pouzdanosti elektroenergetskog sistema, svrha istraživanja u ovoj disertaciji jeste razvoj novog modela predviđanja rizika zasnovanog na dijagramima uticaja sa intervalnim verovatnoćama. Za uspešan razvoj modela, predložen je metodološki koncept koji predstavlja spoj dijagrama uticaja i intervalnih verovatnoća, što značajno poboljšava proces donošenja odluka u uslovima neizvesnosti. Ostvareni rezultati istraživanja jasno ukazuju na prednosti novog modela u odnosu na slične modele zasnovane na preciznim verovatnoćama. Značaj istraživanja i praktični doprinos se reflektuju kroz mogućnost predviđanja optimalnog vremena zamene energetske opreme, praćenja svih uzročno-posledičnih veza između elemenata posmatranog sistema, kao i kako promena stanja nekog od elemenata utiče na donošenje konačne odluke o aktivnostima koje treba preuzeti. Pokazano je da koncept zasnovan na intervalnim verovatnoćama uspešno prevazilazi ograničenja u pogledu nedostatka informacija i neravnoteže ekspertskog znanja i može biti odličan alat za pravilno donošenje odluka u uslovima neizvesnosti.

Ključne reči: neizvesnost, precizne verovatnoće, intervalne verovatnoće, dijagrami uticaja, prekidači, procena rizika

Naučna oblast: tehničko-tehnološke nauke

Uža naučna oblast: inženjerski menadžment

Development of a multi-criteria model for determining the priority of energy equipment replacement using interval influence diagrams

Abstract

Modern electric power systems face serious challenges, such as the integration of renewable energy sources and active demand, while uncertainty and incomplete information have become an indispensable part of the planning, operation and control of electric power system. Considering that a complex power system consists of many interdependent subsystems, analyzing the state of the system, maintaining reliability at the desired level and mitigating losses becomes more difficult than ever. In order to increase the reliability of the power system, the purpose of the research in this doctoral dissertation is the development of a new risk prediction model based on influence diagrams with interval probabilities. For the successful development of the model, a methodological concept was proposed that represents a combination of influence diagrams and interval probabilities, which significantly improves the decision-making process in conditions of uncertainty. The obtained research results clearly indicate the advantages of the new model compared to similar models based on precise probabilities. The significance of the research and practical contribution are reflected through the possibility of predicting the optimal time for replacing energy equipment, monitoring all cause-and-effect relationships between the elements of the observed system, as well as how a change in the state of one of the elements affects the final decision on the activities to be undertaken. It is shown that the concept based on interval probabilities successfully overcomes the limitations regarding the lack of information and the imbalance of expert knowledge and can be an excellent tool for decision-making under conditions of uncertainty.

Keywords: uncertainty; crisp probability; interval probability; influence diagrams; circuit breakers, risk assessment

Scientific fields: technical-technological science

Scientific subfield: engineering management

Sadržaj

POGLAVLJE 1

UVOD	1
1.1. Teorijski okvir istraživanja	2
1.2. Predmet i cilj istraživanja	12
1.3. Polazne hipoteze	14
1.4. Definisanje istraživačkih pitanja	15
1.5. Struktura disertacije	15

POGLAVLJE 2

MODELOVANJE ENERGETSKE OPREME	17
2.1. Vrste energetske opreme	17
2.1.1. Uljni prekidači	19
2.1.2. Pneumatski prekidači	19
2.1.3. Hidromatski prekidači	19
2.1.4. Vazdušni prekidači	20
2.1.5. Vakuumski prekidači	20
2.1.6. SF6 prekidači	20
2.1.7. Malouljni prekidači	21
2.2. Stanje energetske opreme	22
2.3. Održavanje energetske opreme	24
2.4. Životni vek energetske opreme	30

POGLAVLJE 3

METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA	34
3.1. Teorija verovatnoće	34
3.1.1. Uslovna verovatnoća	36
3.1.2. Nezavisnost	37
3.1.3. Bajesova formula	37
3.1.4. Bajesov faktor	38
3.2. Bajesove mreže	40
3.2.1. Klase ekvivalentnosti	45
3.3. Dijagrami uticaja	47

3.3.1. Stablo verovatnoća	47
3.3.2. Stablo odlučivanja	48
3.3.3. Definicija dijagrama uticaja	50
3.4. Intervalne verovatnoće	56
3.5. Teorija grubih skupova	62
3.6. Određivanje i procena rizika	65
3.6.1. Definicija rizika	67
3.6.2. Upravljanje rizikom u tehničkim sistemima	69
POGLAVLJE 4	
NUMERIČKI REZULTATI I DISKUSIJA	73
4.1. Model procene rizika prekidača	73
4.2. Određivanje performansi modela	82
POGLAVLJE 5	
ZAKLJUČAK	93
REFERENCE	96
PRILOG	107
BIOGRAFIJA	112

Popis slika

Slika 2.1.	Transformatorska stanica	17
Slika 2.2.	Šematski prikaz malouljnog prekidača za napon 110 kV	21
Slika 3.1.	Primer usmerenog acikličnog grafa	43
Slika 3.2.	Stablo verovatnoća	48
Slika 3.3.	Generičko stablo verovatnoća	48
Slika 3.4.	Generičko stablo verovatnoća	49
Slika 3.5.	Stablo verovatnoća sa četiri čvora	49
Slika 3.6.	Stablo verovatnoća sa četiri čvora pri čemu y ne utiče na x	50
Slika 3.7.	Stablo dodeljenih verovatnoća	50
Slika 3.8.	Definicije koje se koriste u dijagramima uticaja	52
Slika 3.9.	Dijagram uticaja sa dva čvora	53
Slika 3.10.	Dijagrami uticaja za $\{a, b, c \mid I\}$	55
Slika 3.11.	Okvir predloženog modela procene rizika korišćenjem intervalnih verovatnoća	68
Slika 4.1.	Procena rizika na osnovu dva kriterijuma	75
Slika 4.2.	Model procene rizika prekidača	76
Slika 4.3.	Dijagram uticaja za proračun rizika zamene prekidača	83

Popis tabela

Tabela 3.1.	Skala dokaza za Bajesov faktor	39
Tabela 4.1.	Procena rizika za primer sa slike 4.1.	76
Tabela 4.2.	Pad napona za tri tipa voda	79
Tabela 4.3.	Pad napona za dva naponska nivoa	79
Tabela 4.4.	Verovatnoća stanja vremenskih uslova	84
Tabela 4.5.	Uslovne verovatnoće stanja mreže	84
Tabela 4.6.	Uslovne verovatnoće nivoa opterećenja mreže	84
Tabela 4.7.	Uslovne verovatnoće stanja prekidača	85
Tabela 4.8.	Uslovne verovatnoće posledica	85
Tabela 4.9.	Ocene kriterijuma bezbednosti i životne sredine	86
Tabela 4.10.	Vrednosti odluke za precizne verovatnoće	86
Tabela 4.11.	Vrednosti odluke u zavisnosti od širina intervala	87
Tabela 4.12.	Procena rizika korišćenjem intervalnih verovatnoća za primer dat na slici 4.3.	88
Tabela 4.13.	Vrednosti rizika dobijene procenom stručnjaka za različite širine intervala	89
Tabela 4.14.	Konačne vrednosti rizika za različite širine intervala	90
Tabela 4.15.	Rezultati poređenja za različite širine intervala	91
Tabela 4.16.	Rezultati rangiranja odluka za različite širine intervala	92
Tabela P.1.1.	Deo informacija o posmatranim prekidačima	107

POGLAVLJE 1

UVOD

Električna energija je sastavni deo modernih ekonomija i ključna je za omogućavanje pružanja usluga u svim sektorima - od zdravstva preko bankarstva do saobraćaja. Zbog toga je danas obezbeđivanje bezbednog i pouzdanog snabdevanja električnom energijom od velike važnosti.

Nedavne poteškoće izazvane pandemijom Covid-19 podsećaju nas na značaj električne energije u svim aspektima naših života, od održavanja rada medicinske opreme i IT sistema do prilagođavanja rada na daljinu i video konferencija. Rastuća zavisnost savremenog društva od energije, posebno električne energije, znači da se više nego ikad mora raditi na povećanju otpornosti ovih sistema.

Dok električna energija danas čini samo petinu ukupne finalne potrošnje energije, njen udeo raste. Na osnovu izveštaja Međunarodne agencije za energetiku (IAE), ovaj trend će se ubrzati, a električna energija bi mogla nadmašiti naftu kao glavni izvor energije do 2040. godine [1].

Prema scenarijima IEA potražnja za električnom energijom raste za otprilike 50% za samo 20 godina, pri čemu je rast pretežno koncentrisan u privredama u nastajanju i razvoju. Gledajući unapred, očekuje se da će električna energija igrati veću ulogu u sistemima za grejanje i hlađenje, zatim u saobraćaju, kao i u mnogim digitalno integrisanim sektorima kao što su komunikacije, finansije i zdravstvo [2].

Trenutno energetske sektor prolazi kroz ključne promene: *dekarbonizaciju* sa brzim rastom obnovljivih izvora energije, koja podrazumeva da svaki sektor mora biti skoro u potpunosti dekarbonizovan, što znači da će energetske sistem na globalnom nivou pretrpeti značajne promene u narednim godinama; *digitalizaciju* koja pruža nove mogućnosti za privredu, kao i pomoć u upravljanju složenijim sistemima, ali takođe izlaže elektroenergetski sistem potencijalno štetnim sajber pretnjama i *klimatske promene* koje dovode do povećanja ekstremnijih vremenskih pojava.

Snabdevanje grejanjem će se dramatično promeniti da bi se ispunio cilj neto nulte emisije pre 2050. godine, s obzirom na to da prirodni gas mora biti ukinut i zamenjen ili električnim grejanjem ili vodonikom, što bi zauzvrat moglo povećati potražnju za električnom energijom i dodatno opteretiti sisteme električne energije [3].

Potražnja za električnom energijom se takođe menja zbog brzog rasta i prodora sve sofisticiranijih informacionih i komunikacionih tehnologija, koje će omogućiti nove energetske prakse, nove obrasce rada i nove modele ekonomske aktivnosti. Ove tehnologije otvaraju mogućnosti za pametno i fleksibilno upravljanje snabdevanjem i potražnjom, ali takođe stvaraju izazove i rizike jer se preduzeća, domaćinstva i energetske sistemi sve više oslanjaju na tehnologije koje pokreće električna energija [4].

1.1. Teorijski okvir istraživanja

Pouzdanost isporuke električne energije jeste jedan od glavnih zadataka koji elektroenergetske kompanije treba da ostvare. Jedan od veoma bitnih koraka ka ispunjenju tog cilja jeste preventivno održavanje i pravovremena zamena prekidača snage. Na taj način, prekidači snage zbog kojih postoji najveći rizik od iznenadnog otkaza celog sistema biće remontovani ili zamenjeni u optimalnom vremenskom intervalu čime će se smanjiti rizik od prekida isporuke električne energije.

Trenutno, elektroenergetski sistem naše zemlje ima u svom sastavu veliki broj trafostanica sa maloukljnim prekidačima snage čije je vreme eksploatacije pred istekom ili je već isteklo. Trenutna praksa zamene maloukljnih prekidača snage se ne zasniva na kriterijumima koji uvažavaju trenutno stanje istih. U cilju prevazilaženja ovog važnog nedostatka u postojećim praksama održavanja i modelima, istraživanje u ovoj disertaciji posvećeno je kreiranju modela koji će sagledati trenutno stanje prekidača snage i na osnovu izračunatog rizika koji oni predstavljaju u smislu pouzdanosti rada sistema, i omogućiti donosiocu odluke izbor koju akciju treba preduzeti kako bi se održala i povećala pouzdanost celog sistema.

Analiza pouzdanosti je od izuzetne važnosti za svaki inženjerski sistem. Neka istraživanja potvrđuju da je glavni cilj projektovanja elektroenergetskih sistema snabdevanje u promenljivim vremenskim uslovima, uz maksimalnu pouzdanost i minimalne troškove [5].

U studijama na temu obnovljive energije za sistem povezan na mrežu ili samostalan sistem, koje su autori prezentovali u radu [6], može se proceniti pouzdanost različitih kombinacija obnovljivih sistema sa različitim specifikacijama komponenti, konfiguracijom, raspoloživim obnovljivim izvorima i profilom opterećenja.

Glavni cilj procene pouzdanosti u elektroenergetskim sistemima je da obezbedi kvalitativnu analizu i indekse performansi napajanja za rad i sistem planiranja. Osim toga, održavanje visokog nivoa bezbednosti sistema je jedan od važnih aspekata elektroenergetskih sistema [7].

Struktura elektroenergetskih sistema može se promeniti imajući u vidu brigu o životnoj sredini, obnovljive izvore energije, regulisanje energetske politike, ekonomska pitanja i zahteve potrošača, u cilju povećanja pouzdanosti, postizanja pune efikasnosti i sigurnosti prilikom isporuke električne energije [8].

Važno je istaći da je osnovna funkcija elektroenergetskog sistema da ispuni očekivanja svojih kupaca uz održavanje prihvatljivog nivoa kvaliteta i kontinuiteta snabdevanja. Dalekovodi su potrebni za transport velike količine električne energije iz elektrana na različite lokacije kako bi se povećala pouzdanost snabdevanja i postiglo efikasno korišćenje elektroenergetskog sistema [9].

Za razliku od pitanja pouzdanosti u distributivnom sistemu, deregulacija elektroenergetskog sistema je tema koja otvara nove pravce istraživanja i sagledavanja problema distribuiranog elektroenergetskog sistema.

Za procenu pouzdanosti elektroenergetske opreme mogu se koristiti simulacione i analitičke metode. Metoda simulacije se koristi za predviđanje obrasca ponašanja sistema tokom određenog vremenskog perioda. Monte Karlo metoda simulacije je najčešće korišćena metoda u ovom kontekstu.

Analitičke metode kao što su stablo događaja, stablo greške i Markovljev proces zasnovane su na određenim matematičkim pravilima i koriste se za rešavanje problema poput onog opisanog u radu [10]. U tom radu autori su predložili novi Markovljev model za procenu pouzdanosti kapacitivnog naponskog generatora.

Integracijom Markovljevih modela za svaki podsistem kapacitivnog naponskog generatora, autori predlažu model sa deset stanja. Na kraju, kombinovanjem sličnih stanja, dobija se model sa tri stanja. Rezultati simulacije pokazuju koji podsistem igra važnu ulogu u radu kapacitivnog naponskog generatora [10].

Izračunati rezultati pokazuju da je kapacitivni naponski generator u više od 90% svog životnog veka u dobrom stanju i sa odgovarajućim kvalitetom merenja. Rezultati simulacije pokazuju koji podsistem igra važnu ulogu u njegovom radu. Na osnovu iznetih zaključaka, predloženi model je efikasan u proceni pouzdanosti generatora [10].

Vu i Li u radu [11] vrše procenu pouzdanosti sistema za prenos naizmenične struje/visokonaponske jednosmerne struje primenjujući Monte Karlo simulaciju. U ovom radu je predložen novi model osetljivosti koji se zasniva na derivatu trajanja stanja prema parametrima pouzdanosti, a model osetljivosti je primenjen na sistem naizmenične struje/visokonaponske jednosmerne struje. Stanja i trajanja povezane opreme od početka simuliranih godina do generisanog vremena stanja sistema se razmatraju i diferenciraju da bi se opisao derivat. U ovoj metodi, tačnost ulaznih informacija je kritična da bi se dobio ispravan i kvalitetan odgovor. Dobijeni numerički rezultati zasnovani na realnim ulaznim podacima potvrđuju izvodljivost i tačnost predloženog modela.

Autori u radu [12] primenjuju analizu stabla greške pri proceni pouzdanosti motora električnih vozila. Autori su kombinovano uradili procenu pogonskog motora i kontrolera motora koji rade kao jedan sistem u električnim vozilima. Oba ova dela se sastoje od više komponenti koji utiču na pouzdanost motornog sistema. Autori prvo teorijski predviđaju stopu otkaza kod svih komponenti motora, a zatim procenjuju pouzdanost celokupnog sistema motora.

Autori su u ovom istraživanju došli do sledećih zaključaka: zbog starenja motora i većeg broja radnih sati, pouzdanost se postepeno smanjuje; u celom sistemu motora, kontroler motora je nepouzdaniji od pogonskog motora bez obzira na vreme servisiranja; upravljački modul je najranjiviji deo kontrolera motora, ali i celokupnog sistema motora zbog velikog broja elektronskih komponenti. Da bi se dobilo validno stanje pouzdanosti motora, zajedno se moraju istražiti pitanja pouzdanosti pogonskog motora i kontrolera motora. U suprotnom, pouzdanost celokupnog sistema motora neće biti dobro procenjena [12].

U radu [13] autori uzimaju u obzir verovatnoću kvara za rezervni zaštitni sistem, dok su optimalni rutinski i samokontrolni vremenski intervali testiranja zaštitnog sistema određeni korišćenjem Markovljevog modela sa 21 stanjem. U predloženom Markovljevom

modelu razmatraju se svi objekti za samokontrolu i nadzor koji poboljšavaju pouzdanost sistema zaštite. Prema dobijenim rezultatima, optimalni rutinski interval testiranja sistema zaštite se povećava povećanjem indeksa efikasnosti samokontrolnih i nadzornih testova sistema zaštite.

Štaviše, ako zbir indeksa efikasnosti testova samoprovjere i praćenja primarne i udaljene rezervne zaštite sistema postane jedan, optimalni rutinski interval testiranja sistema zaštite ide u beskonačnost. To znači da nema potrebe za obavljanjem rutinskog testa. Rezultati simulacije pokazuju da su varijacije u indeksima pouzdanosti optimalnog rutinskog i samokontrolnog testiranja za zaštitu elektroenergetskog sistema značajne kada sistem daljinske rezervne zaštite nije u potpunosti pouzdan [13].

Procena pouzdanosti sistema zaštite korišćenjem Markovljevog modela sa sedamnaest stanja izvršena je u radu [14]. U ovom radu autori su se bavili istraživanjem uticaja performansi sistema rezervne zaštite na pouzdanost sistema zaštite dalekovoda i vremenski interval njegovih periodičnih ispitivanja. Na osnovu dobijenih rezultata, preporučljivo je uzeti u obzir verovatnoću kvara sistema daljinske rezervne zaštite pri određivanju optimalnog rutinskog intervala testiranja sistema zaštite.

Razmatranje efekata koje preventivno održavanje prekidača i zaštitnih sistema unutar trafostanica može imati na pouzdanost snabdevanja električnom energijom prikazano je u radu [15]. Izvođenjem preventivnog održavanja može se smanjiti verovatnoća kvara prekidača ukoliko se preventivno održavanje pažljivo sprovede. Optimalni interval održavanja ili frekvencija može se odrediti za zaštitu komponenti, kada se preventivno održavanje pažljivo sprovodi.

Ovaj optimalni interval ili frekvencija zavisi od topologije podstanice. Vrednost optimalne učestalosti održavanja sa stanovišta pouzdanosti veća je od vrednosti optimalne učestalosti održavanja sa ekonomskog stanovišta. U radu se takođe pokazuje da nepažljivo obavljeno preventivno održavanje može čak dovesti do smanjenja pouzdanosti snabdevanja električnom energijom [15].

Žao i dr. u radu [16] koriste Markovljev model za procenu pouzdanosti hibridnog jednosmernog prekidača, dok Karimabadi i dr. u radu [17] predlažu kombinovan Markovljev model preventivnog i prediktivnog održavanja za određivanje optimalne stope inspekcije prekidača opremljenih sistemom za praćenje stanja. Ovo istraživanje ukazuje da sistem za praćenje stanja i optimalna inspekcija prekidača produžava životni vek prekidača i smanjuje godišnje troškove njihovog održavanja.

Modelovanje životnog veka komponenti generatora pomoću Markovljevih lanaca opisano je u radu [18]. Optimalni raspored preventivnog održavanja se dobija korišćenjem naprednog algoritma nazvanog ubrzana optimizacija roja kvantnih čestica u kombinaciji sa Monte Karlo simulacijom.

Efikasnost pristupa se istražuje kroz studiju slučaja sa četiri različita scenarija: nema plana preventivnog održavanja, godišnje periodično preventivno održavanje, održavanje usmereno na pouzdanost i pametno održavanje. Rezultati sugerišu da je pristup pogodan za generatore elektroenergetskih sistema i da daje značajan doprinos znanju u oblasti održavanja [18].

Novi model pouzdanosti zasnovan na Markovljevom procesu za magnetno kontrolisan reaktor predložen je u radu [19]. U procesu modeliranja, prvo se struktura magnetno kontrolisanog reaktora deli na dva različita dela, a zatim se ekstrahovani Markovljevi modeli kombinuju na osnovu tehnike frekvencije/trajanja. Pošto promene temperature igraju značajnu ulogu u promeni stope kvarova električne opreme, u predloženom modelu je razmotren efekat temperaturnih promena u skladu sa standardom MIL-217F [19].

Markovljev model za ispitivanje uticaja ljudske greške na stopu otkaza i optimalnog intervala rutinskog testiranja sistema zaštite razmotren je u radu [20]. Model je primenjen za sistem zaštite energetskeg transformatora. Predloženi model ima sedamnaest stanja. Dobijeni rezultati su pokazali da ljudska greška značajno utiče na povećanje otkaza sistema zaštite, smanjenje željenih indeksa pouzdanosti i smanjenje optimalnog intervala rutinskog testiranja sistema zaštite, kao i na smanjenje troškova održavanja sistema [20].

Morais i dr. u radu [21] predstavljaju model održavanja usmeren na pouzdanost za naponske transformatore koji je razvijen na osnovu iskustva ekipa za održavanje jedne brazilske kompanije za prenos električne energije. Urađena je statistička procena kvarova u tom preduzeću kako bi se sagledao veliki broj mogućnosti kvarova

Autori u radu [22] razmatraju prednosti Bajesovih mreža u odnosu na stablo greške u analizi pouzdanosti i bezbednosti. Takođe, pokazuje se sposobnost Bajesovih mreža da ažurira verovatnoće, da predstavi promenljive sa više stanja, kao i zavisne kvarove. Primer preuzet iz literature je korišćen radi ilustracije primena i upoređivanja rezultata tehnike stabla greške i Bajesovih mreža.

Cilj koji su autori želeli da ostvare u radu [23] je da pokažu primenu Bajesovih mreža u analizi bezbednosti procesnih sistema. Prvi deo rada bavi se zajedničkim aspektima modeliranja za stablo greške i Bajesove mreže, dajući prednost Bajesovim mrežama zbog njihove sposobnosti ažuriranja verovatnoća.

Drugi deo je posvećen različitim karakteristikama modeliranja Bajesovih mreža pomažući da se inkorporiraju promenljive sa više stanja, zavisni kvarovi, funkcionalna neizvesnost i mišljenje stručnjaka koji se često susreću u bezbednosnoj analizi, ali ih metod stabla greške ne može uzeti u obzir. U radu se zaključuje da su Bajesove mreže superiorna tehnika u analizi bezbednosti [23].

Predviđanje izlazne snage i temperature gasne turbine i određivanje efikasne strategije za poboljšanje pouzdanosti, smanjenje troškova održavanja i povećanje produktivnosti korišćenjem vremenskih serija razmatrano je u radu [24]. Ovde je prikazana neuronska mreža za precizno predviđanje snage i vremenske serije izduvnih gasova iz gasnih turbina kako bi se poboljšale performanse predviđanja na osnovu podataka o performansama. Podaci o performansama potrebni za predviđanje sistema su prvobitno prikupljeni, a zatim normalizovani [24].

Zatim, na osnovu nelinearne veze između izlazne snage i alata za praćenje podataka o temperaturi, izračunata je izlazna temperatura snage i gasne turbine. Rezultati su pokazali da se predloženom metodom vremenskih serija može sa dobrom tačnošću predvideti temperatura izduvnih gasova turbine. Univerzalnost i tačnost ove metode pri donošenju

odluka ima primene u procesima popravke, povećanju pouzdanosti i produktivnosti u različitim kompleksnim postrojenjima [24].

Autori u radu [25] predstavljaju novi model procene pouzdanosti koji uzima u obzir distribuiranu proizvodnju energije (DG). U ovom radu je najpre kreiran probabilistički model na osnovu karakteristika proizvodnje energije [25].

Drugo, istražuje se autonomni način rada distributivnog sistema sa DG, a zatim se na osnovu DG modela i modela opterećenja predlaže metod proračuna verovatnoće uspešnog rada sistema. Treće, predložena je metodologija procene pouzdanosti distributivnog sistema sa DG poboljšanjem tradicionalnog algoritma minimalne putanje za procenu pouzdanosti distributivnog sistema. Predloženi metod se pokazao kao razuman i efikasan [25].

Analitički i praktični pristup proceni i analizi pouzdanosti fotonaponskih sistema priključenih na mrežu prikazan je u radu [26]. Metoda stabla grešaka sa funkcijom eksponencijalne raspodele verovatnoće se koristi za analizu komponenti velikih fotonaponskih sistema. Autori razmatraju različite sekvencijalne i paralelne kombinacije kvarova kako bi se pronašli svi realni načini na koje se mogu desiti neželjeni događaji.

Praćenjem kritičnih komponenti fotonaponskog sistema, moguće je ne samo poboljšati pouzdanost sistema, već i optimizovati troškove održavanja. Fotonaponski sistemi bi mogli imati visoku stopu pouzdanosti pod čestim održavanjem, ali često održavanje nije optimalno rešenje, te stoga treba optimizovati strategije održavanja u cilju smanjenja povezanih troškova [26].

Autori rada [27] su predložili metod optimizacije pouzdanosti u automatizovanim distributivnim mrežama sa verovatnoćom modela troškova prekida korisnika u prisustvu DG jedinica. U ovom radu je prikazano mešovito celobrojno nelinearno programiranje sa ciljem da se modeluje optimalno postavljanje ručnih i automatskih sekcioničkih prekidača i zaštitnih uređaja u distributivnim mrežama. Model raspodele verovatnoće troškova je razvijen na osnovu neuronske mreže kaskadne korelacije da bi se imala preciznija procena pouzdanosti. Da bi se osigurala efikasnost predložene formulacije, razmatrana su i tehnička i ekonomska ograničenja [27].

Autori u radu [28] su predstavili analizu pouzdanosti elektroenergetskog sistema i podeljenog malog elektroenergetskog sistema. Autori navode da je potrebno povećati pouzdanost snabdevanja energijom povećanjem pouzdanosti opreme, distribuiranom proizvodnjom energije i stvaranjem manjih elektroenergetskih sistema tokom perioda kvara radi povećanja ukupne pouzdanosti. Uticaj stvaranja malog elektroenergetskog sistema na pouzdanost snabdevanja energijom je istražen za određen podeljeni elektroenergetski sistem tokom pojave kvara [28].

Integrirani model odgovora na potražnju zasnovan na podsticajima DR i dinamičke rekonfiguracije predložen je u radu [29]. Da bi se rešio predloženi okvir sa ciljem smanjenja operativnih troškova korišćen je algoritam tržišta razmene (EMA).

Autori rada [30] bave se upravljanjem rizika u metro strukturama i predstavili su probabilistički pristup procene rizika i ekonomske procene za rešavanje problema planiranja proširenja prenosne mreže. U [31], u cilju modeliranja kvara i procene

pouzdanosti trafostanica elektroenergetskog sistema, primenjen je formalizam stohastičkih automatskih mreža.

Novi modeli predviđanja zasnovani na hibridnom modelu prognoze za predviđanje tržišta električne energije u elektroenergetskim sistemima predstavljeni su u radovima [32,33]. Efikasnost predložene metode u radu [32] je primenjena na realni inženjerski test slučaj i upoređena sa drugim različitim dobro poznatim metodama. Dobijeni rezultati dokazuju validnost predložene metode.

Predložena struktura opisana u radu [33] se sastoji od trostepenog mehanizma za predviđanje zasnovanog na neuronskoj mreži sa različitim algoritmima učenja. Predložena strategija je implementirana i testirana na stvarnim podacima Pensilvanija–Nju Džersi–Merilend kroz poređenje sa drugim tehnikama. Dobijeni numerički rezultati pokazuju validnost predložene metode.

Integrirani pristup koji se oslanja na pametnu saradnju programa za odgovor na potražnju heterogenih distribuiranih izvora energije sa ciljem planiranja višestrukih mikro-mreža orijentisanog na pouzdanost predložen je od strane autora u radu [34]. Autori upotrebljavaju novi pragmatični, robusni pristup optimizacije radi bavljenja intenzivnom neizvesnošću problema.

Tehnike rudarenja podataka (eng. data mining) koje uključuju tehnike klasifikacije i stručno mišljenje, kao što je teorija rasplnutih (fuzzy) skupova, koriste se za ispitivanje životnog veka prekidača i njihovog načina rada [35,36].

Fokus autora u radu [35] je na proceni stanja 11-kV–33-kV distributivnih prekidača. Koristeći dostupno ekspertsko znanje u vezi sa strukturiranim procesom rudarenja podataka, pragovi povezani sa karakteristikama koje predstavljaju svaku fazu rada prekidača mogu se definisati i koristiti za karakterizaciju različitih stanja prekidača.

Znanje i razumevanje zadovoljavajućeg i nezadovoljavajućeg stanja prekidača može se steći iz analize snimljenih podataka i kasnije se koristiti za formiranje osnove za procenu stanja i dijagnostičkih pravila implementiranih u sistem za podršku odlučivanju. Ovo znanje zatim čini osnovu sistema za podršku odlučivanju za procenu stanja ovih prekidača tokom rutinskog testiranja [35].

Lin i dr. u radu [36] predlažu model procene stanja prekidača koji kombinuje teoriju fazi skupova, analitički hijerarhijski proces (AHP) i rezonovanje zasnovano na dokazima (ER). Četiri faktora procene stanja prekidača su izabrana kao parametri uslova, i to električne karakteristike, mehaničke karakteristike, karakteristike izolacije i ostali faktori. Hijerarhijski sistem indeksa procene je konstruisan na osnovu podataka o preventivnim testovima, nadzoru, podataka o održavanju i operativnog okruženja [36].

Indeksi unetih parametara stanja se obrađuju pomoću funkcija pripadnosti fazi raspodele da bi se dobile relativne ocene oštećenja koje predstavljaju relativnu ocenu stanja prekidača prema grešci. Težine faktora i indeksa stanja prekidača generiše AHP na osnovu intervjua i povratnih informacija stručnjaka, a konačnu procenu određuje ER prema kombinovanim faktorima odluke [36].

Autori u radu [37] na osnovu razvoja mehanizama kvara, vrše modelovanje habanja kontakata prekidača. Cilj ovog rada je procena pouzdanosti prekidača, a samim tim i njegov preostali životni vek. Proces šoka se zasniva na dve slučajne varijable kao što su dolazak šokova i njihove veličine. Dolazak udaraca je modelovan primenom homogenog Poasonovog procesa (HPP).

Simulacijom su generisani datumi dolazaka kratkih spojeva sa njihovim veličinama. Isti princip simulacije se primenjuje na količinu kumulativnih istrošenih kontakata. Cilj koji se postiže je da se pronađe formulacija funkcije habanja u zavisnosti od broja zahteva prekidača. U radu su razmotreni i demonstrirani rezultati simulacije, gde je utvrđena pouzdanost opreme i njen preostali životni vek u realnim uslovima funkcionisanja [37].

Okvir za preciznu procenu stanja SF6 prekidača koristeći signale njihovog kontrolnog kola kao parametre kojima se lako pristupaju i koji su lako merljivi predložen je u radu [38]. Karakteristike koje se nalaze u ovim talasnim oblicima odgovaraju karakteristikama neophodnim za dijagnostičke svrhe i mogu da pokriju 50%-60% kvarova prekidača.

U ovom modelu, stanje prekidača (na osnovu njegovog rizika od otkaza) je kvalitativno klasifikovan u normalno, alarmno i vanredno stanje. Pored toga, da bi se izbegle bilo kakve nepotrebne aktivnosti održavanja tokom alarmnog stanja, stanje prekidača u svakom od tri navedena stanja se kvantifikuje u vidu indeksa zasnovanih na verovatnoći [38].

Lorton i dr. u radu [39] prognozu zasnivaju na izračunavanju raspodele preostalog korisnog veka trajanja sistema na osnovu dostupnih informacija. Ovaj rad predlaže metod za rešavanje sledećih izazova - prvo, kreirani model treba da objedini dva klasična pristupa opisivanju složenih sistema: pristup odozdo prema gore i pristup odozgo nadole; drugo, prognoza mora da integriše onlajn informacije kako bi obezbedila specifičan rezultat za svaki sistem u zavisnosti od njihovih životnih događaja; treće, prognoza mora da pruži smislene numeričke rezultate čija greška takođe mora biti pod kontrolom [39].

Izložena je metodologija u dva koraka za rešavanje ovog problema kada je stohastički model Markovljev. Prvi korak se sastoji u izračunavanju uslovnog zakona sistema, uzimajući u obzir zapažanja u vreme prognoze. Drugi korak zahteva proračun pouzdanosti sistema. Razvijen je algoritam za aproksimaciju uslovnog zakona zasnovan na metodi čestica. Dalje, dve nove metode izračunavanja pouzdanosti su razmatrane kada je osnovni proces deo po deo deterministički Markovljev proces. Metodologija je ilustrovana na dva primera. Ovaj metod omogućava izračunavanje aproksimacije potrebnog preostalog korisnog veka sistema [39].

Autori su u radu [40] pokazali da je upotreba Markovljevog modela veoma pogodna za kreiranje hibridnih prognostičkih aplikacija. Uzimajući u obzir deo po deo deterministički Markovljev proces, preostali korisni vek trajanja sistema se može proceniti tako što se najpre koristi dijagnostika, gde se stanje sistema procenjuje na mreži iz dostupnih zapažanja praćenja korišćenjem metode filtriranja čestica. U drugom koraku koji se naziva prognoza, preostali korisni vek trajanja sistema se procenjuje kao uslovna pouzdanost Monte Karlo simulacijom [40].

Dodatno, problemi dinamičke pouzdanosti se rešavaju korišćenjem deo po deo determinističkog Markovljevog procesa [41]. U ovim sistemima, u zavisnosti od uslova rada, moguće je posebno posmatrati i modelirati svaku komponentu od interesa za pouzdan rad sistema. Za razliku od tehnika koje su statične po prirodi i koje nisu u stanju da uzmu u obzir operativnu prirodu sistema u više stanja i prirodu otkaza i dinamičke varijacije okruženja u kojem rade, stohastični hibridni procesi integrišu karakteristike dinamičkog sistema sa konceptom dinamičke pouzdanosti [41].

Autori nude novi alat za modelovanje koji kombinuje tehniku dinamičkog stabla greške i stohastički hibridni automat u okviru Simulink okruženja. U tu svrhu je skup alata MatCarloRE prilagođen za interakciju sa Simulink dinamičkim sistemom. Dobijeni sklop predstavlja važan korak napred za isporuku kompjuterski podržanog alata za dinamičku pouzdanost [41].

Pored ove tehnike, dinamičke Bajesove mreže se veoma često koriste za problem dinamičke pouzdanosti [42]. Autori u ovom radu ispituju nekoliko verzija merila dinamičke pouzdanosti preuzetih iz literature. Svaka verzija se bavi određenim aspektima kao što su stope kvarova zavisne od stanja, kvar na zahtev i popravka.

U dinamičkoj proceni pouzdanosti potrebno je uzeti u obzir kompletno ponašanje sistema. U radu su korišćene dinamičke Bajesove mreže i softverski alat RADYBAN (Analiza pouzdanosti sa dinamičkim Bajesovim mrežama) sa ciljem izračunavanja nepouzdanosti sistema [42].

Autori u radu [43] predlažu okvir za dinamičku procenu pouzdanosti koristeći stablo greške i dinamičku Bajesovu mrežu rezervnog dizel generatora kao veoma bitnog dela nuklearne elektrane. U ovom okviru, informacije o verovatnoći kvara komponente se ažuriraju na osnovu posmatranih podataka. Okvir je moćan da izvrši kvalitativnu i kvantitativnu analizu sistema. Valjanost okvira se vrši primenom na nekoliko sistema nuklearne elektrane. Izračunata pouzdanost je zatim upoređena sa tri korišćene tehnike. Ovaj pristup je potvrđen i verifikovan operativnim podacima u realnom vremenu i dobijena je značajna tačnost od 99% [43].

Dinamičko stablo greške se u poslednje vreme često koristi za analizu pouzdanosti sistema [44]. Markovljev model je najčešće korišćena metoda, koja može tačno da odražava odnos između procesa prelaza stanja i dinamičkog prenosa logičke kapije u dinamičkom stablu greške. Na osnovu modularnog pristupa, u ovom radu je istraživani hibridni modul greške.

Prvo, podstablo greške koje sadrži složenu statičku/dinamičku logičku kapiju se transformiše u četiri uobičajene kombinacione logičke kapije kroz pretprocesiranje dinamičke kapije u modulu. Zatim je složenost modela smanjena uključivanjem četiri uobičajene kombinacione logičke kapije i korišćenjem binarnog grafa odlučivanja za rešavanje redosleda promenljivih u proračunu verovatnoće kvara statičkog podstabla. Primer sistema za proizvodnju eksploziva amonijum nitrat/gorivo za eksplozivno vozilo BCZH-15 korišćen je da se proverí izvodljivost predstavljene metode [44].

Nova metoda razvijena za pristupe hibridne prognostike zasnovana na kombinaciji determinističkih i stohastičkih svojstava zvanih Petrijeve mreže hibridnih čestica opisana je

u [45]. Glavna prednost ove metode je što uzima u obzir neizvesnost zasnovanu na znanju u procesu dijagnoze. Ova tehnika se bavi pojavama neuočljivih diskretnih događaja (kao što su greške) i otporna je na lažna zapažanja. Takođe procenjuje kontinuirano stanje sistema korišćenjem filtriranja čestica. Ovaj pristup je demonstriran na sistemu sa tri rezervoara, a dobijeni eksperimentalni rezultati ilustruju kako se različite vrste neizvesnosti uzimaju u obzir pri upotrebi Petrijevih mreža hibridnih čestica [45].

Ovaj rad predlaže dinamičan pristup kvantifikovanja otpornosti pod različitim uslovima. Pristup koristi stohastičke Petrijeve mreže zajedno sa simulacijom Monte Carlo za modeliranje i analizu metrike otpornosti. Predloženi pristup je testiran na sirovom sistemu naftovoda. Primena predloženog pristupa problemu kontrole korozije cevovoda pokazala je njegovu primenljivost i efikasnost [45].

Pristup bi pomogao da se odredi prioritet akcija za sprečavanje i kontrolu korozije pre faze kvara ili zamene opreme u ranom uzrastu. Rezultati ispitivanja pokazuju jasno razumevanje karakteristika otpornosti sistema i njene evoluirajuće prirode. Ovaj rad je uveo koncept dinamičkog modeliranja otpornosti kao dinamičkog pristupa za kvantifikaciju otpornosti i metrike otpornosti pod različitim uslovima dok se rukuje stohastičkim procesima koji su u interakciji sa sistemom i mogu uticati na njegove performanse [46].

Automatizovana vozila sa vođenjem (eng. *Automated Guided Vehicle System*- AGVS) se intenzivno koriste za inteligentni prevoz i distribuciju materijala u skladištima zbog njihovih atributa visoke efikasnosti i niskih troškova. Takva vozila putuju u unapred definisanom putu za pružanje željenih zadataka bez nadzora operatera. Mnogo truda u ovoj oblasti usmerilo se pre svega na optimizaciju rute i upravljanje saobraćajem ovih AGVS-a. Da bi se osigurala njihova dodata vrednost, uzimajući tipični AGV transportni sistem kao primer, u ovom radu se istražuju sposobnosti za procenu pitanja pouzdanosti u AGV-ovima [46].

Pouzdanost AGV sistema analizira se putem analize stabla grešaka i pouzdanost misije vozila se procenjuje korišćenjem metode Petrijevih mreža. Izvođenjem analize može se razmatrati prihvatljivost neuspeha misije, a samim tim i mogućnost usluge i potencijalni profit AGV sistema [47].

U ovom radu, kvantitativna i kvalitativna procena pouzdanosti elektroenergetskog modela nuklearne elektrane vrši se korišćenjem metode stabla greške. Kvantitativna procena pouzdanosti zasniva se na proračunu verovatnoće kvara dobijene od stabla greške. Pored toga, u sistemu se identifikuju faktori važnosti: fuses-vesely, vrednost smanjenja rizika i vrednost dostignuća rizika [47].

Pored toga, metoda minimalnog seta koristi se kao sredstvo za kvalitativnu procenu pouzdanosti. Dobijeni rezultati pružaju uvid u nivo pouzdanosti sistema napajanja kao i njene važne komponente. U praksi, pouzdanost električnih sistema može se poboljšati korišćenjem odgovarajućih tehnika kao što su redundancija, raznolikost, optimizacija vremena pregleda i slično [48].

Grafovi hibridnih veza koji čine osnovu modela opisanog u radu [49] predstavljaju još jedan alat za hibridnu prognostiku, koji uz pomoć Monte Karlo simulacija omogućava određivanje varijabli sa ograničenjima u prediktivnom modelu. U ovom radu autori

proširuju prognostički okvir zasnovan na modelima na modele hibridnih sistema koji kombinuju kontinuiranu i diskretnu dinamiku. Kao studiju slučaja, razmatraju problem predviđanja konflikta u sistemu vazdušnog prostora, u kojem su modeli aviona hibridni dinamički sistemi [49].

Neophodni uslovi za korišćenje svih prethodno objašnjenih metodologija je tačna baza podataka o kvarovima i već poznata raspodela verovatnoća stanja opreme. Vrlo malo istraživačkih studija bavilo se neizvesnošću, tačnošću i pouzdanošću rezultata inspekcije, iako simulacije i modeli odlučivanja direktno zavise od ovih rezultata. Probabilističke neizvesnosti zahtevaju odgovarajuće matematičko modeliranje i kvantifikaciju kada se predviđa buduće stanje prirode ili vrednost određenih parametara [49].

Pojam verovatnoće je veoma blisko povezan sa pojmom simetrije. Na osnovu simetrije možemo govoriti o jednakim uslovima za slučajne događaje. Pojam verovatnoće možemo proširiti na intervalne verovatnoće, posebno kada određujemo zbirnu vrednost verovatnoće koju procenjuje nekoliko stručnjaka i situaciju u kojoj postoji nesavršeno znanje (kada jedna strana ima različite informacije od druge) [49].

Poreklo neizvesnosti u inženjerskim sistemima potiče i iz aleatorskih i iz epistemičkih razloga. Pregled problema hibridne neizvesnosti kada su prisutna oba ova tipa, uključujući modelovanje neizvesnosti, analizu propagacije, analizu pouzdanosti konstrukcije i optimizaciju dizajna zasnovanu na pouzdanosti, opisan je od strane autora u [50]. Ovaj rad daje pregled četiri gorenavedena glavna istraživačka i sumira glavne naučne probleme, tehničke poteškoće i trenutni status istraživanja svakog pravca. Na osnovu pregleda, ovaj rad takođe daje smernice za buduća istraživanja hibridne analize neizvesnosti intervala verovatnoće.

Kutije verovatnoće (p-kutije) se često koriste u inženjerskoj analizi kada je tačna verovatnoća distribucije verovatnoće slučajne promenljive nepoznata [51]. Oni nude matematički direktan opis nepreciznih verovatnoća, definisanih preko donjih i gornjih granica kumulativne funkcije raspodele. Ova metoda pruža praktične načine integracije stručnih mišljenja i mnogo vrsta izvora neizvesnosti. Takođe može modelirati složene sisteme.

Sajmon i Biking uvode metod modelovanja i primenjuju ga na sistem detekcije požara sa različitim vrstama ulaznih p-kutija radi ilustracije [52]. P-kutije se koriste u akustičkoj analizi [53], pouzdanosti konstrukcija [54], analizi rizika [55] i mnogim drugim oblastima inženjerstva.

Okvir p-kutija koji objašnjava nepreciznost u stohastičkim procesima uzimajući u obzir dodatnu epistemičku neizvesnost u autokorelacionoj strukturi procesa opisan je u [56,57]. Surogatni modeli za propagirajuće kutije verovatnoće uključuju Kriging modele [58]. Adaptivne šeme zasnovane na Gausovim modelima procesa koje se mogu primeniti na parametarske i p-kutije bez distribucije date su u [59].

Najčešće se propagacija p-kutija analizira korišćenjem Monte Karlo simulacije, ali je sveobuhvatan pregled računskih metoda za širenje p-kutija u ulaznim modelima dat u [51]. Studija Monte Karlo metoda za opšti slučaj propagiranja nepreciznih verovatnoća opisana je u [60].

Prethodne metodologije nude kompletno rešenje za analizu mogućih granica određene slučajne promenljive. Međutim, praktična implementacija ovih granica u donošenju odluka zasnovanih na riziku do sada nije istražena.

Elektroenergetski sistemi su sada toliko složeni i čvrsto povezani da ne postoji način da se u potpunosti izbegnu veliki prekidi, ali naša zavisnost od električne energije znači da više nego ikada, moramo da planiramo ove prekide i da budemo spremni za njih.

Novim tehnologijama su potrebni novi alati za planiranje. Kroz upotrebu probabilističkih simulacija, donosioci odluka stižu dublje razumevanje elemenata koji čine sistem vrednovanjem njihovog pojedinačnog doprinosa, uključujući prekide rada sistema, rezerve sistema, opterećenje sistema, odgovor na potražnju i sl.

Mogući ishodi se mogu simulirati za mnogo različitih slučajnih obrazaca. Ovo daje tačniji odgovor u odnosu na poređenje sa razmatranjem svakog dela infrastrukture posebno i daje širu sliku mogućih ishoda.

1.2. Predmet i cilj istraživanja

Osnovni cilj svakog preduzeća je očuvanje i optimizacija kvaliteta svojih poslovanja i usluga. Danas, složena elektroenergetska mreža postaje otpornija, bezbednija i efikasnija zbog velikih količina podataka koji se prikupljaju, čuvaju i analiziraju upotrebom novih tehnologija.

Savremeni elektroenergetski sistemi suočavaju se sa ozbiljnim izazovima, kao što su integracija obnovljivih izvora energije i aktivne potražnje, ali i neizvesnosti koje velike količine nepotpunih podataka unose u sistem rada, planiranja i kontrole električne energije. S tim u vezi, poboljšanje stabilnosti i povećanje pouzdanosti ovakvog sistema postaje posebno važno.

Nove tehnologije u energetsom sektoru uključuju održavanje zasnovano na riziku i predviđanje zamene zastarele infrastrukture smanjenjem troškova, otkrivanjem kvarova, dijagnozom kvarova, itd. Ove tehnologije se takođe mogu primeniti na praćenje rutinskih svakodnevnih operacija, čineći ih preciznijim, efikasnijim i otpornijim [61].

Održavanje pouzdanosti, smanjenje operativnih troškova i ostvarenje profita je teško postići bez odgovarajuće analize rizika i upravljanja neizvesnošću [62].

Oprema elektroenergetskog sistema kao što su dalekovodi, energetske transformatori i prekidači obično su dizajnirani za rad od nekoliko decenija. Sasvim je prirodno da se oprema kvari kako stari. Kvar bilo kog dela opreme može dovesti do ozbiljnijih problema u pogledu troškova i pouzdanosti. Ovo predstavlja podstrek za pronalazak boljih strategija upravljanja imovinom i dovodi do potrebe za razvojem optimalne politike održavanja opreme.

Najbolja strategija održavanja se najčešće pronalazi iz sledećih radnji – bez održavanja i popravljati tek nakon kvara, remont ili potpuna zamena određenog dela energetske opreme. Neke aktivnosti, poput manjeg ili većeg remonta, mogu se obavljati u redovnom vremenskom intervalu ili u zavisnosti od stanja opreme [63].

Danas su rizik i neizvesnost sastavni deo procesa donošenja odluka i upravo je jedan od najnovijih pristupa održavanje zasnovano na upravljanju rizicima, koje procenjuje rizik od otkaza opreme i posledice koje takav otkaz može proizvesti na sistem [64–66]. Kvantifikacijom rizika može se dobiti najefikasnija strategija održavanja i optimalan nivo rizika za upravljanje imovinom distributivne mreže [66].

Jedan od najbitnijih delova elektroenergetskog sistema čine prekidači snage. Minimizacija troškova, veća pouzdanost celokupnog sistema kao i utvrđivanje preostalog vremena eksploatacije samo su neki od razloga redovnog praćenja stanja i održavanja prekidača snage.

Cena koštanja otkaza sistema je parameter zbog kojeg je veoma važno analizirati i predvideti preostalo vreme eksploatacije prekidača snage, odnosno njegov životni vek koji je preostao. Znajući taj podatak, donosilac odluke može na vreme reagovati malim remontom, velikim remontom ili zamenom prekidača snage, čime se omogućava kontinuitet u isporuci električne energije i sprečava iznenadni otkaz sistema koji dovodi do prekida isporuke električne energije, povećanje troškova zbog angažovanja dodatnih ekipa za utvrđivanje i otklanjanje kvara, pronalaženje potrebnih rezervnih delova i slično.

Redovnim merenjima i vizuelnim pregledima prekidača snage može se steći utisak o njegovom trenutnom stanju, pouzdanosti i preostalom vremenu eksploatacije. U skladu sa tim mogu se isplanirati akcije usmerene na određivanje najboljeg vremenskog intervala za remont ili zamenu prekidača.

U zavisnosti od trenutnog stanja prekidača snage vrši se procena da li je bolje izvršiti remont ili zamenu postojećeg prekidača snage tako što se sa jedne strane posmatra cena preduzete akcije a sa druge strane kolika se pouzdanost ostvaruje preduzetom akcijom. Treba imati u vidu da u nekim situacijama, iako ne deluje ekonomski isplativo, zamena prekidača predstavlja bolje rešenje u smislu pouzdanosti sistema jer remont dotrajalog dela prekidača snage može omogućiti trenutnu pouzdanost sistema dok ostali delovi koji u tom trenutku nisu remontovani mogu izazvati otkaz prekidača i celog sistema.

Iz svega navedenog može se uočiti važnost redovnog praćenja stanja, održavanja i zamene prekidača snage što dovodi do toga da je obavezno utvrditi uslove, kriterijume i optimalni vremenski interval preduzimanja neophodne aktivnosti. Izračunavanjem rizika, uz prikupljene podatke o trenutnom stanju prekidača snage, stvorila bi se realna slika o prekidačima koji predstavljaju najveću pretnju za pouzdan i bezbedan rad sistema.

Takođe, stekao bi se uvid koji od posmatranih prekidača snage izazivaju najveće ekonomske posledice ukoliko bi došlo do njihovog otkaza. Kako bi se sve nabrojane posledice sprečile, pristupilo bi se hitnoj zameni onih prekidača koji predstavljaju najveću opasnost za sistem u smislu pouzdanosti, bezbednosti i ekonomije poslovanja.

Predmet istraživanja ove disertacije je određivanje optimalnog vremena zamene postojeće energetske opreme u elektroenergetskim postrojenjima. Grafički modeli odlučivanja poput Bajesovih mreža i dijagrama uticaja, intervalna aritmetika, metode višekriterijumske analize se koriste za proučavanje i rešavanje problema određivanja optimalnog vremena zamene opreme u elektroenergetskim postrojenjima.

Na osnovu prethodne analize navedenog istraživačkog problema i upotrebom predloženog modela zasnovanog na dijagramima uticaja sa intervalnim verovatnoćama, mogu se izvesti sledeći ciljevi istraživanja:

- smanjivanje bezbednosnog rizika u elektrodistributivnom postrojenju;
- smanjivanje ekološkog rizika od havarije opreme u elektrodistributivnom postrojenju;
- smanjivanje ekonomskog rizika usled prekida napajanja (mogući izdaci za otklanjanje kvarova i šteta usled neisporučene električne energije);
- povećanje tačnosti predviđanja stanja opreme korišćenjem savremenih probabilističkih tehnika;
- efikasnije planiranje sredstava za održavanje.

1.3. Polazne hipoteze

Polazne hipoteze na kojima se zasniva predmet istraživanja formirane su detaljnim proučavanjem adekvatne literature iz ove oblasti. Postojeće procedure zamene opreme ne uzimaju u obzir kompletan model energetskog postrojenja. Hipoteza H_0 polazi od pretpostavke da postrojenje može da se modeluje na adekvatan način i da obuhvati sve parametre od interesa. Imajući u vidu publikovane naučne rezultate osnovna hipoteza se može formulisati na sledeći način:

H_0 : Moguće je predvideti optimalno vreme zamene opreme u energetskom postrojenju formiranjem matematičkog modela

Eksperimentalna istraživanja ustanovila su da postoji zavisnost starenja opreme od više ulaznih parametara (način održavanja, vremenksi uslovi, način eksploatacije opreme...).

H_1 : Vreme zamene opreme zavisi od većeg broja kriterijuma koje je moguće simultano vrednovati

Bajesove mreže i dijagrami uticaja su dokazani alati za tretiranje neizvesnosti jer koriste verovatnoće za opis stanja sistema. Zbog toga se pravilnim modelovanjem ulaznih i izlaznih veličina može modelovati neizvesnost i u pogledu zamene opreme ovim grafičkim alatima.

H_2 : Neizvesnost u pogledu različitih mogućih vrednosti kriterijuma za zamenu opreme i očekivanih posledica moguće je modelovati grafičkim modelima poput Bajesovih mreža

Jedna od tehnika koja se koristi za procenu stanja opreme jeste vizuelna inspekcija. Kako bi ocena stanja opreme dobijena korišćenjem ove tehnike bila što tačnija, angažuje se više eksperata koji vrše ocenjivanje.

Grupno odlučivanje više eksperata uključenih u određivanje verovatnoća nužno dovodi do određenog opsega vrednosti verovatnoća posmatranog događaja. Najbolji način

za prevazilaženje problema grupnog odlučivanja jeste korišćenje intervalnih verovatnoća za modelovanje sistema.

H3: Nesigurnost u pogledu procene određenih vrednosti kriterijuma za zamenu opreme moguće je modelovati metodom intervalnih verovatnoća

1.4. Definisanje istraživačkih pitanja

Suštinska istraživačka pitanja, proistekla iz teorijsko-hipotetičkog konteksta koncipirana su na sledeći način:

OI1: Da li je moguće predvideti optimalno vreme zamene opreme u energetsom postrojenju formiranjem matematičkog modela?

OI2: Da li vreme zamene opreme zavisi od većeg broja kriterijuma koje je moguće simultano vrednovati?

OI3: Da li je moguće modelovati neizvesnost u pogledu različitih mogućih vrednosti kriterijuma za zamenu opreme i očekivanih posledica grafičkim modelima poput dijagrama uticaja?

OI4: Da li je moguće modelovati nesigurnost u pogledu procene određenih vrednosti kriterijuma za zamenu opreme metodom intervalnih verovatnoća?

1.5. Struktura disertacije

Ova disertacija se sastoji od pet poglavlja. Uvodno poglavlje pruža uvid u predmet i cilj istraživanja, kao i u definisanje polaznih hipoteza i istraživačkih pitanja. U okviru uvodnog dela sagledana su istraživanja čije su teme: analiza pouzdanosti elektroenergetskih sistema, životni vek elemenata elektroenergetske infrastrukture, analitičke i simulacione metode koje se koriste za procenu pouzdanosti sistema, donošenje odluka u uslovima neizvesnosti, održavanje elektroenergetskih sistema, Bajesove mreže i dijagrami uticaja kao alati za podršku odlučivanju, hibridni modeli za analizu pouzdanosti, model procene starenja prekidača snage, dinamičke procene pouzdanosti sistema, kao i modeli predikcije životnog veka prekidača snage.

Drugo poglavlje se bavi pregledom energetske opreme, sa posebnim osvrtom na prekidače snage. Maloljni prekidači snage, koji predstavljaju kritičnu tačku elektroenergetske infrastrukture i za koje je razvijen idelani scenario zamene u optimalnom vremenu su detaljnije objašnjeni u ovom poglavlju. Nakon toga, objašnjeni su kriterijumi od kojih zavisi i na osnovu kojih se procenjuje starenje opreme, pri čemu je prikazan i model starenja. Životni vek i posledice starenja energetske opreme opisani su na kraju poglavlja.

Matematički opis metoda koje su korišćene za modelovanje posmatranog sistema detaljno je predstavljen u trećem poglavlju. Polazeći od osnova teorije verovatnoće i Bajesovih mreža, predstavljeni su dijagrami uticaja. Zatim, objašnjene su intervalne verovatnoće i data je teorija grubih skupova. Definicija pojma rizika je predstavljena na kraju poglavlja kao i opis upravljanja rizikom u tehničkim sistemima.

Detaljan opis novog modela procene rizika prekidača snage koji se razmatra u ovoj disertaciji, kao i dobijeni numerički rezultati za prognozu otkaza prekidača zasnovani na

dijagramima uticaja sa intervalnim verovatnoćama predstavljani su u četvrtom poglavlju. Takođe, izvršena je analiza uticaja širine intervala na donošenje odluka za razmatrani scenario, nakon čega je urađeno predviđanje najboljeg scenarija zamene najkritičnijih maloukljnih prekidača snage u optimalnom vremenu. Na kraju poglavlja, prikazana je diskusija dobijenih rezultata.

Poslednje poglavlje predstavlja zaključak ove disertacije, iznosi potencijalna ograničenja i daje smernice za buduća istraživanja.

POGLAVLJE 2

MODELOVANJE ENERGETSKE OPREME

U ovom poglavlju dat je kratak pregled energetske opreme, sa posebnim osvrtom na prekidače snage. Objasnjeni su kriterijumi na osnovu kojih se procenjuje starenje opreme, pri čemu je objasnjen i model starenja. Životni vek i posledice starenja energetske opreme dati su na kraju poglavlja.

2.1. Vrste energetske opreme

Elektroenergetski sistem predstavlja kompleksni tehnički sistem projektovan tako da obezbedi nesmetanu isporuku električne energije minimizujući troškove u samom sistemu. Postrojenja u kojima se vrši proizvodnja električne energije nazivaju se elektranama. Termoelektrane, hidroelektrane i nuklearne elektrane su postrojenja u kojima se proizvode najveće količine električne energije. Proizvedena količina električne energije se do krajnjih potrošača prenosi preko prenosne i distributivne mreže [67,68].

Generatori, razvodna postrojenja, transformatori i električna kola čine elektroenergetski deo elektrana. Razvodna postrojenja omogućavaju razvođenje električne energije. Transformatorska stanica predstavlja razvodno postrojenje koje u svom sastavu ima transformatore.



Slika 2.1. Transformatorska stanica

Ostali sastavni delovi razvodnog postrojenja su [67,68]:

- provodnici,
- raskolpni aparati,
- merni transformatori,
- izolatori,
- osigurači i
- odvodnici prenapona.

Pored trajne struje opterećenja, u strujnim kolima razvodnog postrojenja mogu se javiti i sledeće prekomerne struje:

- struja uključenja,
- struja preopterećenja i
- struja kvara.

Rasklopni aparati se u zavisnosti od svoje prekidne moći dele na rastavljače i prekidače. Prekidači predstavljaju sklopne uređaje čija je funkcija uključivanje i isključivanje različitih elemenata sistema, kao i automatsko prekidanje strujnog kola u slučaju kvara.

Rastavljači nisu konstruisani da mogu da prekidaju struju. Za razliku od njih, prekidači su dizajnirani tako da mogu da prekidaju apsolutno sve struje. Gledano iz ugla celog elektroenergetskog sistema, prekidači imaju jednu od najvažnijih uloga u pouzdanom radu sistema.

Gašenje električnog luka predstavlja najveći problem isključenja velikih struja. Da bi došlo do gašenja električnog luka, mora biti ispunjen uslov da je snaga njegovog zagrevanja manja od snage odvođenja toplote, jer se toplota električnog luka odvodi zbog njegove visoke temperature. Na struju električnog luka od koje zavisi snaga luka se ne može uticati. Na odvođenje toplote električnog luka se jedino može uticati [67,68].

Postoji nekoliko načina za odvođenje toplote električnog luka. Najčešći načini su:

- razvlačenje električnog luka,
- produvavanje električnog luka i
- razbijanje električnog luka na više delova.

Prolazak struje kroz nulu u slučaju naizmenične struje značajno olakšava gašenje električnog luka. Električni luk se u tom trenutku najlakše gasi. Međutim, novi problem se javlja u situacijama kada su napon i struja u protivfazi, jer se u trenutku prolaska struje kroz nulu i gašenjem električnog luka na kontaktima javlja napon. Da ne bi došlo do ponovnog paljenja električnog luka, dejonizacija prostora se mora obaviti veoma brzo kako bi bio u stanju da izdrži taj napon [67,68].

U cilju što efikasnijeg gašenja električnog luka, projektovane su specijalne komore u kojima se vrši prekidanje struje kod prekidača. U zavisnosti od toga koje se sredstvo koristi za gašenje električnog luka, prekidači se svrstavaju u sledeće grupe:

- uljni prekidači (sredstvo za gašenje električnog luka je ulje),
- malouljni prekidači (sredstvo za gašenje električnog luka je ulje),
- pneumatski prekidači (sredstvo za gašenje električnog luka je komprimovani vazduh),
- vakuumski prekidači (sredstvo za gašenje električnog luka je vakuum)
- SF6 prekidači (sredstvo za gašenje električnog luka je gas SF6)
- vazdušni prekidači (sredstvo za gašenje električnog luka je vazduh)
- hidromatski prekidači (sredstvo za gašenje električnog luka je vazduh)

2.1.1. Uljni prekidači

Hronološki posmatrano, prvo su konstruisani uljni prekidači. U komori koja sadrži velike količine ulja postavljeni su kontakti. Ovi prekidači su veoma jednostavne konstrukcije, ali količina ulja potrebna za njihov rad se meri u tonama. Ovolika količina ulja predstavlja veliku opasnost od požara i od izlivanja u životnu sredinu. Pomeranjem kontakta, električni luk koji se javlja tom prilikom stvara gasni prostor oko sebe. Nivo ulja raste kao posledica nastale uljne pare. Električni luk se gasi pre nego što ulje počne da izlazi kroz otvor za gasove. Pojava uljnih para predstavlja najveću manu uljnih prekidača jer može doći do eksplozije prekidača i havarije postrojenja. Uljni prekidači se više ne proizvode i ne koriste.

2.1.2. Pneumatski prekidači

Kod pneumatskih prekidača, električni luk se gasi pomoću sabijenog vazduha dobijenog iz specijalnog kompresorskog postrojenja. Sabijeni vazduh ima bolja svojstva u pogledu odvođenja toplote i dejonizacije od atmosferskog vazduha. Ovi prekidači su pogodni za srednje i visoke napone. Električni luk se hladi tako što na njega sabijeni vazduh struji uzdužno ili poprečno, pri čemu dolazi svež vazduh i sprečava ponovno paljenje električnog luka.

2.1.3. Hidromatski prekidači

Gašenje električnog luka kod hidromatskih prekidača se obavlja pomoću destilovane vode u koju je dodat glikol. Glikol omogućava da se tačka smrzavanja destilovane vode smanji. Manja tačka smrzavanja omogućava manje isparavanje. Kada se pojavi električni luk, glikol omogućava povećanje pare koja efikasno deluje na gašenje elektrog luka. Inače, naziv hidromatski prekidači potiče od hidrina, koji je zajednički naziv za smešu glikola i destilovane vode.

2.1.4. Vazdušni prekidači

Karakteristika vazdušnih prekidača se ogleda u tome da se električni luk prekida tako što se kontakti razdvoje na dovoljno veliki razmak. Zbog uticaja magnetnog polja oko električnog luka, on ima promenljiv oblik. Gašenje električnog luka se ostvaruje tako što se daljina luka povećava a njegov poprečni presek smanjuje. Na taj način se omogućava hlađenje električnog luka i njegovo razbijanje na mnogo manjih delova. Konstrukcija vazdušnih prekidača je veoma jednostavna i odlikuje ih dug vremenski period eksploatacije.

2.1.5. Vakuumski prekidači

Gledano iz mehaničkog ugla, konstrukcija vakuumskih prekidača je najjednostavnija. Oni predstavljaju najsavremenije rešenje za napone do 38kV, dok se za veće napone ne upotrebljavaju jer nisu ekonomski isplativi. U svim sredinama osim vakuuma električni luk čine elektroni i joni. Elektroni ne postoje kod vakuumskih prekidača već samo joni. Zbog toga, vakuum omogućava veoma efikasno prekidanje struje. Struja ne utiče na vreme prekidanja kao što je slučaj sa ostalim vrstama prekidača, što se ogleda i kroz znatno manje vreme prekidanja vakuumskih prekidača. Prednost ovih prekidača se ogleda u sledećem:

- trajanje kontakta je znatno duže nego kod ostalih vrsta prekidača,
- jedino održavanje se ogleda u periodičnim kontrolama pogonskog mehanizma,
- kontakti su uvek čisti,
- rizik od eksplozije i požara je veoma mali,
- vek eksploatacije je veoma dug,
- hod kontakta je veoma mali,
- dimenzije i masa su male,
- nivo buke prilikom rada je mali.

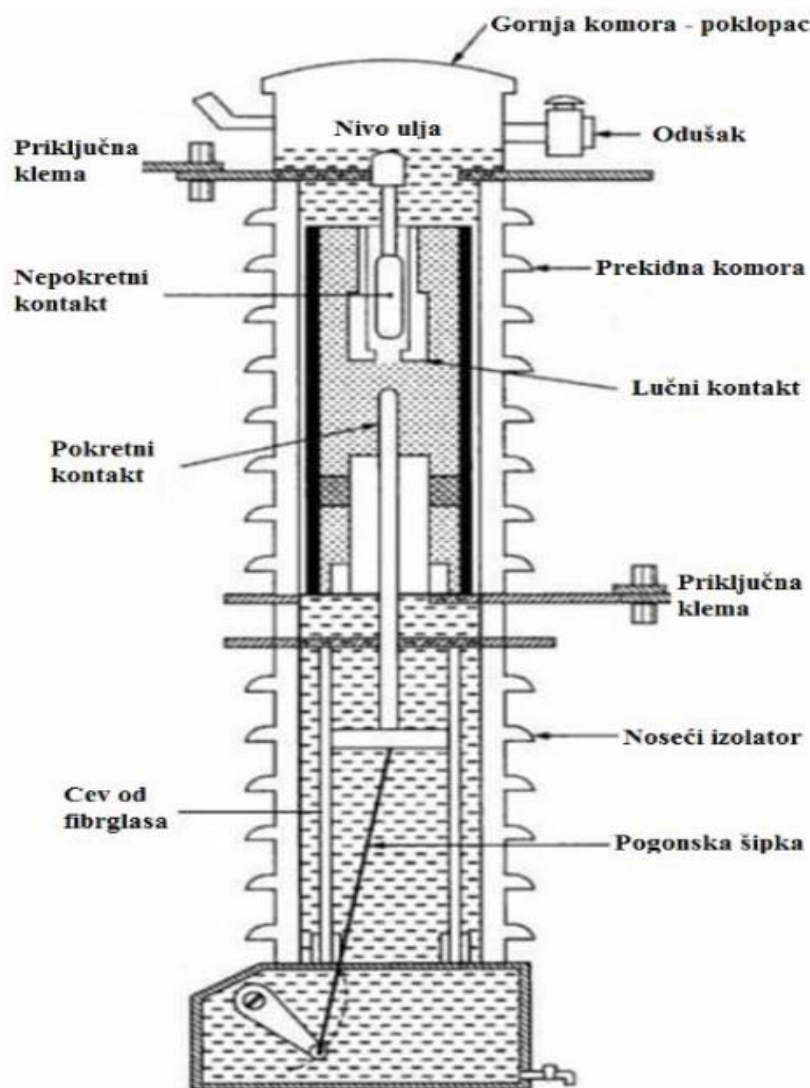
Nedostaci ovih prekidača se ogledaju u visokoj ceni i pojavi prenapona u slučaju prekida niskih induktivnih struja.

2.1.6. SF6 prekidači

SF6 ili sumpor heksafluorid prekidači su najviše korišćeni visokonaponski prekidači. Kod ovih prekidača, električni luk se gasi pomoću sumpornog heksafluorida. Ovaj gas nije zapaljiv i nema reakcije sa okolinom sve do 500°C. Odlikuje ga velika hemijska stabilnost, nije otrovan i ima veliku dielektričnu čvrstoću, čak veću od ulja pri odgovarajućem pritisku. Efikasnost pri gašenju električnog luka ovog gasa je oko sto puta veća od vazduha. Takođe, zbog svojih osobina gas SF6 se veoma često upotrebljava i kao izolator. Vreme eksploatacije ovih prekidača je oko 25-30 godina. Prednost ovih prekidača se ogleda i u tome što se mogu reciklirati. Takođe, odlikuje ih velika efikasnost i mala količina gasa potrebna za gašenje električnog luka [67,68].

2.1.7. Malouljni prekidači

Malouljni prekidači, uz prekidače SF₆, čine tip prekidača koji je najviše zastupljen u prenosnoj elektroenergetskoj mreži u Srbiji. Proučavanjem rada uljnih prekidača uočeno je da je moguće konstruisati nov tip prekidača koji bi koristio znatno manje količine ulja u procesu gašenja električnog luka. Pravilnom konstrukcijom ostvareno je da se procenat potrebnog ulja za uspešan rad u odnosu na uljne prekidače smanji za 95-98%. Ovo je ostvareno delom i time što se umesto ulja koriste čvrsti izolatori prema zemlji i između faza. Značajno manja količina ulja potrebna za rad ovih prekidača automatski značajno smanjuje opasnosti od zagađenja i požara. Takođe, održavanje ovih prekidača dosta je jednostavnije od uljnih prekidača. Zbog navedenih prednosti, proizvodnja uljnih prekidača je obustavljena i zamenjeni su malouljnim prekidačima. Zbog brojnosti ovih prekidača u trafostanicama u Srbiji, i potrebe za njihovom zamenom u cilju očuvanja pouzdanog rada elektroenergetskog sistema, u ovoj disertaciji je posebna pažnja posvećena ovom tipu prekidača [67,68].



Slika 2.2. Šematski prikaz malouljnog prekidača za napon 110 kV

Sastavni delovi malouljnog prekidača su:

- komora za gašenje električnog luka,
- obrtni izolator,
- noseći izolator i
- pogonski mehanizam.

Komore za gašenje električnog luka su zakačene za noseće izolatore. Ujedno, noseći izolatori imaju ulogu da drže na propisanom rastojanju komore od nosećih metalnih konstrukcija.

Pogonski mehanizam je sa pokretnim kontaktima u komorama povezan preko obrtnog izolatora.

Energija koja se akumulira u okviru pogonskog mehanizma obezbeđuje dovoljnu količinu snage za nesmetani rad prekidača. Pogonski mehanizam prekidača je motorno-opružni, što znači da se sastoji od opruga i motora pomoću kojih se opruge navijaju. Naizmeničnim naponom od 220V, frekvencije 50Hz se napajaju motori pomoću kojih se navijaju opruge. Podešeno je tako da se navijanje motora kreće kada se prekidači uključe. Opruge koje su navijene moraju da imaju toliku količinu energije da mogu izvršiti sledeće operacije: isključivanje prekidača, uključivanje prekidača i ponovno isključivanje prekidača. Zbog složenosti mehanizma, neophodno je redovno održavanje [67,68].

Ceo mehanizam je veoma složen i zahteva redovne preglede i pažljivo održavanje.

2.2. Stanje energetske opreme

Vreme eksploatacije jednog prekidača direktno zavisi od uslova u kojima taj prekidač radi. Da bi se radni uslovi prekidača smatrali normalnim, potrebno je ispuniti sledeće [68]:

- granične vrednosti temperature okoline treba da budu od -25°C do 40°C ,
- maksimalna dnevna prosečna temperatura do 35°C ,
- minimalna temperatura u zatvorenom do -5°C ,
- količina leda ne treba da prelazi 5 kg/m^2
- maksimalni pritisak vetra 70 dN/m^2 ,
- bez prašine,
- bez zagađenja,
- bez dima,
- bez opasnih isparenja, itd.

Najveći broj problema povezanih sa malouljnim prekidačima ogleda se u mehaničkim oštećenjima izolatora, pogonskog mehanizma i obrtnog izolatora, kao i curenju ulja.

Da bi se malouljni prekidači održali u ispravnom radnom režimu potrebno je redovno raditi dijagnostiku trenutnog stanja [67,68].

Prva dijagnostička metoda obuhvata ispitivanje da li se isključivanje i uključivanje polova prekidača vrši istovremeno. Vršiti se pojedinačno ispitivanje svih polova. Takođe, vrši se i merenje vremena posebno za onoliko komora koliko poseduje prekidač [67,68].

Parametri koji se uzimaju u razmatranje su struje kalemova koje učestvuju u procesu isključenje-uključenje, kao i signali koji se mogu očitati sa signalne sklopke (sa njenih pomoćnih kontakata).

Merenje ovih parametara se vrši posebnim uređajima namenjenim za ispitivanje stanja prekidača, kao što je Programma TM 1800. Podaci očitani ovim uređajem se upisuju u odgovarajuću bazu podataka, gde se upoređuju sa podacima unešenim prilikom ranijih merenja. Razlike koje se mogu uočiti među unetim podacima ukazuju na trenutno stanje posmatranih parametara.

Drugo ispitivanje je vezano za elemente povezane sa uključivanjem prekidača. Tu spadaju motori pomoću kojih se navijaju opruge, špulne, releji pomoćni itd. Svi nabrojani elementi, u propisanom intervalu napona napajanja, trebalo bi da rade ispravno. Interval napona napajanja iznosi 85-110% od nazivnog napona na kalemovima [67,68].

Naizmenični napon od 220V služi za napajanje motora pomoću kojih se opruge navijaju. Odgovarajućim uređajima moguće je meriti struje motora u toku navijanja opruge. Što se opruga više navije, struja motora je veća. Merenjem ovih struja i poređenjem sa ranije izmerenim vrednostima utvrđuje se stanje ove komponente.

Treće ispitivanje se odnosi na kvalitet ulja. Kako maloluljni prekidači u svom radu koriste male količine ulja, ne rade se složena i skupa ispitivanja jer je jednostavnije i jeftinije zameniti ulje koje ne ispunjava standarde za prozirnost i boju, što eksperti mogu lako vizuelno utvrditi. Pored ovoga, može se izmeriti i probojnost ulja, odnosno njegova dielektrična čvrstoća. U zavisnosti od dielektrične čvrstoće, ulja za prekidače se svrstavaju u kategoriju A, kategoriju B i kategoriju C. Ukoliko ulje spada u kategoriju C, potrebno je odmah izvršiti njegovu zamenu. Ukoliko ulje pripada kategoriji B, potrebno je izvršiti dodatna ispitivanja da bi se utvrdilo da li je potrebna zamena. Ulje kategorije A je odlično i ne treba ga menjati [67,68].

Kvalitet glavnih kontakata prekidača utvrđuje se merenjem prelaznih otpornosti kontakata. Može biti opisan vrednošću pada napona ili omskom otpornošću. Ukoliko je kontaktna otpornost veća od referentne vrednosti to znači da su kontakti nagoreli, istrošeni, i da kontaktni prsti nepokretnog kontakta vrše slab pritisak na pokretni kontakt. Ispitivanje kvaliteta glavnih kontakata predstavlja četvrto ispitivanje u okviru dijagnostičkog procesa [67,68].

Peto ispitivanje se vrši pomoću termovizijske kamere. Snimanjem prekidača termovizijskom kamerom dobija se jasna slika o svim delovima prekidača sa povećanom temperaturom, i sa spoljašnje i sa unutrašnje strane prekidača. Na taj način se mogu otkriti kritični delovi prekidača. Istrošeni kontakti najčešće dovode do povećane temperature prekidača [67,68].

Na osnovu svih prikupljenih podataka vrši se odgovarajuća analiza i donosi ocena o trenutnom stanju energetske opreme, u ovom slučaju maloluljnih prekidača. Na osnovu dobijene ocene, preduzimaju se dalji koraci u pogledu održavanja opreme.

2.3. Održavanje energetske opreme

Da bi jedan tehnički sistem bio održiv i isplativ, potrebno je redovno sprovoditi niz mera koji utiču da oprema na kojoj se tehnički sistem zasniva ima što duži vek trajanja. Skup mera kojima se ovaj cilj postiže definisan je strategijom održavanja. Ubrzani razvoj i povećanje složenosti tehničkih sistema uslovalo je da se strategijskom održavanju dodeli ključna uloga u omogućavanju pouzdanog i isplativog rada tehničkih sistema.

Razvoj strategijskog održavanja kao posebne discipline omogućio je da se kreiraju novi načini održavanja, izgrade nove tehnike održavanja, kao i stvore potpuno novi pogledi u smislu organizacije održavanja. Sve navedeno ima za cilj da se ukupni troškovi rada tehničkog sistema značajno smanje i time poveća očekivana dobit.

Korektivno i preventivno održavanje predstavljaju dva osnovna tipa strategije održavanja [69].

Korektivna strategija održavanja (*run to failure*) definiše održavanje tehničkih sistema u smislu da se ništa ne preduzima dok se ne desi kvar u sistemu. Tek kada se dogodi kvar, vrši se popravka elemenata ili njihova zamena. Ovaj vid održavanja se i danas puno koristi za niskonaponske mreže kao i za mreže na koje su priključeni potrošači manje važnosti.

Preventivna strategija održavanja definiše održavanje tehničkih sistema u smislu da se preduzimaju sve potrebne preventivne aktivnosti održavanja u cilju sprečavanja i odlaganja otkaza elemenata sistema. Preventivno održavanje se može posmatrati iz sledećih uglova:

- remont ili zamena elemenata sistema u tačno unapred definisanim intervalima vremena. Ovaj način održavanja predstavlja primarni način održavanja koji se primenjuje u elektrodistributivnim preduzećima. U skladu sa preporukama proizvođača elemenata sistema, kao i pravila propisanih zakonom, definišu se vremenski intervali u kojima se moraju preduzeti adekvatne aktivnosti u smislu zamene određenih elemenata sistema ili njihovog održavanja. Gledano iz ugla finansija, ovo održavanje je najmanje isplativo jer se aktivnosti sprovode bez obzira na trenutno stanje elemenata sistema.
- održavanje koje zavisi od prikupljenih podataka na osnovu kojih se može ustanoviti trenutno stanje posmatranih elemenata sistema (CBM). Da bi ovaj vid održavanja omogućio očekivane rezultate potrebno je stalno prikupljanje podataka o elementima sistema i njihova analiza. Da bi se podaci prikupili blagovremeno i na propisani način potrebna je adekvatna merna oprema, koja se delom i ugrađuje u sistem, što dovodi do neminovno viših troškova. Kombinacija ove i prethodno opisane strategije održavanja predstavlja najzastupljeniji način održavanja elemenata sistema.
- održavanje koje zasniva na proceni pouzdanosti elemenata sistema (RCM). Ovaj vid održavanja je najnoviji pristup kojim se teži da se proceni efekat održavanja na pouzdanost elemenata sistema, kao i procena efekta održavanja na pouzdanost celog posmatranog sistema.

U cilju određivanja koji će tip strategije održavanja biti primenjen, elektrodistributivni sistem se posmatra kao tehnički sistem čije se performanse smanjuju u toku vremena. U dosadašnjoj literaturi razmatrani su različiti modeli pomoću kojih se procenjuje pouzdanost i potencijalni rizik u zavisnosti od smanjenja performansi sistema u toku vremena.

Koji od razmatranih modela će biti uzet kao referentni zavisi od više faktora, kao što su kompleksnost elektrodistributivne mreže, količina i tačnost prikupljenih podataka o elementima sistema, očekivana preciznost izlaznih rezultata.

Posmatrano iz ugla da li se preventivno održavanje vrši u jednakim ili nejednakim intervalima vremena, razlikujemo:

- preventivno održavanje koje se vrši u jednakim intervalima vremena;
- preventivno održavanje koje se vrši u nejednakim intervalima vremena (za koje se još koristi i izraz sekvencijalno).

S obzirom na to da se performanse posmatranog elektrodistributivnog sistema smanjuju u toku vremena, unapred definisani intervali vremena u kojima se vrši preventivno održavanje elemenata sistema se takođe smanjuju u toku vremena.

U odnosu na nivo održavanja, može se napraviti sledeća podela [70]:

- savršeno održavanje i
- nesavršeno održavanje.

Kada se na elemente sistema, kao i ceo sistem, primeni savršeno održavanje, sistem se dovodi u idealno stanje. U okviru nesavršenog održavanja, razlikuje se normalno i minimalno održavanje. Ukoliko se na sistem primeni minimalno održavanje, pouzdanost sistema će biti veoma mala, odnosno sistem će biti kao što je bio u trenutku pre kvara. Sprovođenje normalnog održavanja, dovodi sistem u stanje koje predstavlja kompromis između idealnog stanja i stanja u trenutku pre kvara sistema.

Savršena kontrola sistema, koja podrazumeva da se pri svakoj kontroli pronalaze i odmah rešavaju kvarovi, sa maksimalnom verovatnoćom tačnosti, predstavlja jednu kategoriju održavanja sistema. Drugu kategoriju održavanja sistema predstavlja održavanje sa nesavršenom kontrolom sistema.

Na osnovu takve kontrole sistema, utvrđuje se trenutno stanje posmatrane opreme i vrši donošenje odluke o daljim aktivnostima, koje se mogu ogledati u malom remontu, velikom remontu ili ne preduzimanju nikakve aktivnosti. Takođe, donosi se odluka o vremenu naredne kontrole posmatranog sistema.

Posmatrano iz ugla koja se tehnika održavanja primenjuje, može se razlikovati pet modela:

- bazični model održavanja,
- model baziran na Markovljevom principu,
- model zasnovan na proceni pouzdanosti elemenata sistema,
- model oslonjen na ekspertske sisteme,

- model čije održavanje zavisi od procenjenog rizika.

Najjednostavniji tip bazičnog modela održavanja fokusira se na održavanje jednog elementa sistema, čiji se period eksploatacije može opisati određenom funkcijom gustine raspodele verovatnoće [71]. U suštini, ovaj model održavanja razmatra dva slučaja:

- zamena posmatranog elementa predstavlja akciju koja se preduzima u okviru održavanja,
- u unapred određenim intervalima vremena, vrši se kontrola i donosi odluka o održavanju posmatranog elementa (mali remont ili veliki remont).

Srodni modeli ovog tipa održavanja odnose se na:

- utvrđivanje koliki je broj zamena pojedinačnih elemenata optimalan u jedinici vremena,
- definisanje koja je frekvencija optimalna uz uslov da vreme zastoja bude minimalno u jedinici vremena,
- utvrđivanje koliki je optimalan broj kontrole elementa sistema uz uslov da dobitak bude maksimalan.

U zavisnosti od unapred zadatih i potrebnih optimizacionih kriterijuma vrši se određivanje optimalnih perioda preventivnog održavanja. Jedan od važnih optimizacionih kriterijuma jeste ukupan trošak, pri čemu je cilj odrediti optimalne vremenske periode preventivnog održavanja elemenata sistema kako bi suma ukupnih troškova bila minimalna [72].

Ukoliko se kao kriterijum optimizacije ne stave troškovi u prvi plan, moguće je optimizaciju sprovesti u zavisnosti od toga koliko bi proces održavanja trajao, uz uslov da je raspoloživost postrojenja minimalna [73,74]. Ukupni troškovi se realnije mogu sagledati i uvažiti kroz model kapitalnih remonta koji optimizaciju troškova prilagođava različitim vremenskim okvirima [75].

Kao kriterijum na osnovu kojeg se može izvršiti optimizacija idealnog vremena za preduzimanje akcije planskog održavanja elektrodistributivnog sistema može se razmotriti koja je verovatnoća da se potencijalni kvar može blagovremeno otkriti i otkloniti, uz uslov da troškovi budu minimalni [76].

Autori u radu [77] analiziraju stopu kvara prekidača koristeći podatke o istorijskim kvarovima za postojeće prekidače u visokonaponskim trafostanicama na Tajlandu od 1992. do 2011. godine. Prekidači su dalje analizirani i klasifikovani na osnovu uzroka kvara. Utvrđene su stope kvarova potkomponenti prekidača koje su potom svrstane u tri kategorije. Stope otkaza pojedinačnih potkomponenti su izračunate. Dobijeni rezultati su dalje korišćeni za donošenje odluka o preventivnom održavanju prekidača.

Generalno, bazični modeli održavanja, koji su modifikovani u skladu sa postavljenim zadatkom, predstavljaju dobar alat za određivanje idealnog vremena preduzimanja akcije nad onim elementima sistema čije preventivno održavanje podrazumeva zamenu posmatranog elementa sistema novim elementom. Analiza pouzdanosti elemenata elektroenergetskog sistema kao i samog sistema razmotrena je u [78].

Primena proračuna pouzdanosti na bazi Bajesove statistike na 245 kV prekidačima kao i njihov radni mehanizam prikazani su u radu [79]. Korišćenjem Bajesove teoreme, priorna funkcija gustine verovatnoće kvarova u komponentama prekidača, koja se izračunava na osnovu podataka o kvarovima prekidača i pogonskog mehanizma u radu, kombinuje se sa podacima o kvarovima registrovanim tokom opsežnih testova mehaničkog razvoja. Tokom testova izvedeno je više od 32000 operacija otvaranja. Na osnovu posteriorne funkcije gustine verovatnoće, procenjuje se pouzdanost komponenti prekidača i ukupna pouzdanost prekidača.

Da bi se poboljšala pouzdanost i stabilnost sistema jednosmerne struje visokog napona, potreban je optimalan dizajn hibridnih prekidača kako bi se smanjila vršna struja kvara, vreme prekida i vreme oporavka. Autori u studiji [80] razvijaju model optimizacije zasnovan na višestrukom genetskom algoritmu za identifikaciju optimalnih parametara za hibridne prekidače. Model se sastoji od tri objektivne funkcije koje obezbeđuju kompromis između smanjenja vršne struja kvara, vremena prekida i vremena oporavka. Pored toga, u ovoj studiji su predstavljeni rezultati poređenja između optimalnog dizajna modela hibridnog prekidača koristeći predloženi algoritam i modela tipičnog hibridnog prekidača kako bi se pokazala efikasnost predloženog metoda optimizacije.

Model baziran na Markovljevom principu, tj. na stanjima posmatranog sistema i prelascima iz jednog stanja sistema u drugo stanje, predstavlja veoma koristan metod za optimizaciju procesa održavanja [81]. Model je dao odlične rezultate i kada je primenjen prevashodno samo na zadatak održavanja.

U zavisnosti od početnih uslova optimizacije, tj. da li je cilj optimizovati sistem u zavisnosti od vremena potrebnog za remont, u zavisnosti od minimizacije troškova, ili na primer u zavisnosti od vrste potencijalnog kvara, donosi se i odluka koji će metod održavanja biti primenjen.

Na primer, izračunavanje na koji period vremena je optimalno vršiti održavanje sistema kako bi sistem bio u radnom stanju, uz početne uslove da Vejbulova raspodela verovatnoće opisuje preostalo vreme do pojave kvara, dok eksponencijalna raspodela verovatnoće opisuje vreme potrebno za popravku, prikazano je u radu [82]. Verovatnoća otkaza ima novu vrednost posle svake akcije preventivnog održavanja, pri čemu se akcija preventivnog održavanja ne može posmatrati kao savršeno održavanje već proporcionalno zavisi od vrednosti verovatnoće otkaza.

U radu [83] projektovan je hibridni prekidač. Ispitane su prekidne karakteristike ovog eksperimentalnog prototipa, pa se na taj način mogu identifikovati prekidi struje u slučaju različitih vremenskih konstanti. Takođe, ispitivani hibridni prekidač je optimizovan kako bi se povećao njegov kapacitet.

U radu [84] predstavljen je algoritam za optimizaciju prekidača prema njegovom kritičnom „ di/dt ” stresu i struji kvara. Rezultati simulacije potvrđuju efikasnost predstavljenog algoritma.

Model zasnovan na proceni pouzdanosti elemenata sistema ima za cilj određivanje akcija koje je potrebno izvršiti kako bi posmatrani elementi sistema bili funkcionalno ispravni. Ovaj model održavanja spada u kvalitativne pristupe. Fokus ovog modela

preventivnog održavanja jeste preventivno održavanje onih kvarova koji imaju veliku verovatnoću da će se dogoditi. Poslednjih godina, ovaj metod je široko prihvaćen u elektrodistributivnim sistemima [85].

Proučavanje prekidnih performansi prekidača je od velikog značaja za distributivni sistem. U radu [86] je uspostavljen simulacioni model na osnovu kojeg je moguće vršiti ispitivanje prekidnih performansi prekidača. Ovaj model može pružiti reference za izbor i optimizaciju parametara prekidača i poboljšanje performansi.

Prilikom kreiranja strategije održavanja mora se voditi računa o važnim razlikama koje postoje između distributivnog, prenosnog i proizvodnog sistema.

Definisanje strategije održavanja koja se zasniva pre svega na pouzdanosti najjednostavnije je uraditi za distributivni sistem jer je broj kombinacija koje treba analizirati, razmotriti i preduzeti veliki zbog velikog broja objekata koji se razmatraju u istim vremenskim intervalima. Jedna od odluka koje može biti donešena u ovom slučaju jeste ne preduzimati nikakvu akciju na održavanju, a što je direktna posledica toga što nemaju sve distributivne mreže jednak značaj (npr. broj i značaj potrošača su različiti).

Problem održavanja, kroz definiciju objektivne funkcije, može se posmatrati iz tri ugla:

- održavanje uz uslov da troškovi održavanja budu minimalni, pri čemu je dovoljno da pouzdanost bude na dozvoljenom minimumu [87];
- održavanje uz uslov da pouzdanost bude maksimalna, odnosno da količina energije koja nije isporučena bude minimalna;
- održavanje uz uslov da ukupni troškovi budu minimalni. Pod ukupnim troškovima ovde se, pre svega, pored redovnih troškova u vezi sa održavanjem sistema, sagledavaju i troškovi iz ugla potrošača do kojih dolazi zbog otkaza elemenata sistema. U ovim slučajevima, kost benefit analiza predstavlja adekvatan alat za razmatranje i kreiranje potencijalnog modela održavanja [88,89].

Model održavanja oslonjen na ekspertske sisteme postavlja eksperte kao centralne donosiocje odluka prilikom analize stanja sistema i pronalaženje i utvrđivanje kvarova. Electricite de France, koji spada u najveće elektrodistributivne operatere na svetu, može poslužiti kao dobar primer upotrebe ekspertskih sistema u procesu održavanja [90]. Održavanje se sprovodi u šest faza.

U prvoj fazi, utvrđuje se uloga elemenata sistema kao i celog postrojenja. Druga faza se sastoji od uočavanja kvarova i utvrđivanja kompleksnosti uočenih kvarova na osnovu ekspertskog mišljenja. Kompleksnost kvarova se opisuje skalom od 1 do 4, pri čemu ocena 1 znači da kvar nije ozbiljan, dok ocena 4 znači da je kvar veoma ozbiljan. U trećoj fazi, za svaki razmatrani element sistema upisuju se podaci na osnovu iskustva kao i procena verovatnoće otkaza ili učestanosti otkaza.

Izračunavanje kritičnosti elemenata sistema obavlja se u četvrtoj fazi i jednaka je proizvodu učestanosti kvara i nivou kompleksnosti kvara. Kao rezultat ovog proizvoda dobija se ocena u rasponu od 1 do 16. Ukoliko je dobijena ocena posmatranog elementa sistema veća od praga kritičnosti taj element sistema se označava kao kritičan.

Određivanje aktivnosti na održavanju predstavlja petu fazu postupka. Aktivnosti se određuju u zavisnosti od kompleksnosti posla i efikasnosti. Svakom posmatranom elementu sistema se određuje stepen primenljivosti koji je jednak proizvodu kompleksnosti i efikasnosti. Kao i u prethodnoj fazi, rezultat je izražen ocenama od 1 do 16. Ukoliko je dobijena primenljivost veća od praga primenljivosti razmatrana aktivnost se primenjuje.

Na kraju postupka, u šestoj fazi, na osnovu mišljenja eksperata zasnovanog na dobijenim rezultatima u prethodnim fazama i formiranjem stabla odlučivanja pristupa se grupisanju poslova.

Održavanje na bazi ekspertskih sistema pri čemu ulazne podatke čini ekspertsko znanje o potencijalnim aktivnostima na održavanju i baza elemenata opreme od interesa razmotreno je u radu [91]. Moguće je uspostavljanje korelacije između kvarova na posmatranoj mreži u prošlosti i topologije mreže, što zapravo prikazuje vezu između topologije mreže i potrošača koji zavise od te mreže. U tom slučaju, imajući uvid u tačnu topologiju mreže i strukturu potrošača, održavanje se planira sekvencijalno, najpre za one sektore gde nije teško utvrditi kvar i one sektore gde se održavanjem značajno povećava pouzdanost celih mrežnih blokova [92].

Slični ekspertski sistemi su razvijeni i za korektivni tip održavanja. Ekspertsko mišljenje vrlo često biva presudno u oceni stanja elemenata sistema, na osnovu čega se određuje koji će tip akcije održavanja biti preuzet [93].

Važnost ekspertskog ocenjivanja stanja elemenata sistema, kao i celog sistema uopšte, za uspešno određivanje u kom redosledu preduzeti akcije na održavanju razmotrena je u radovima [94,95]. Konačno rangiranje redosleda akcija održavanja postiže se uz pomoć fazi skupova, čime se osigurava i pravilno uvažavanje znanja zasnovanog na iskustvu inženjera koji rade na održavanju.

Prekidači snage predstavljaju, uz energetske transformatore, elemente koji su ključni za pouzdan rad elektroenergetskog sistema. Pravilno i redovno održavanje prekidača snage je zbog toga od krucijalnog značaja.

U prenosnoj mreži Srbije, tehničko uputstvo elektrodistribucije Srbije daje smernice za održavanje malouljnih i SF6 prekidača [96]. Kontrola stanja malouljnih prekidača se vrši na dnevnom, nedeljnom, mesečnom i godišnjem nivou. Redovna kontrola malouljnih prekidača obuhvata sledeće provere i prati [67,68]:

- stepen čistoće izolatora,
- stanje svih izolatora u mehaničkom smislu,
- trenutni nivo i boja ulja u prekidaču,
- da li dolazi do curenja ulja,
- kvalitet veze prekidača i postolja,
- stanje stezaljki,
- stanje kontakta ka uzemljivaču,
- pogonski mehanizam sa unutrašnje strane – stanje,

- temperatura delova prekidača itd.

Nakon analize svih prikupljenih podataka tokom kontrole stanja prekidača, uzimajući u obzir tehničke preporuke proizvođača, planove isključenja i slične aktivnosti, donosi se odluka da li će i koja aktivnost biti sprovedena nad kontrolisanim prekidačima. Aktivnost može biti dodatna provera ili remont. Nad isključenim prekidačem se odvijaju sledeće aktivnosti [67,68]:

- uklanjanje nečistoća sa spoljnih površina svih izolatora,
- zaustavlja se curenje ulja,
- provera podmazanosti svih pokretnih delova prekidača,
- provera delova povezanih sa grejačem,
- provera uzemljenja,
- zamena ili podešavanje signalnih sklopki,
- zamena ulja ako probojnost nije u skladu sa propisanim vrednostima,
- zamena ulja ako boja i nivo nisu u skladu sa propisanim vrednostima,
- provera istovremenosti polova prekidača,
- utvrđivanje pada napona na stezaljkama,
- snimanje struje motora pomoću kojeg se vrši namotavanje opruge,
- razna funkcionalna ispitivanja itd.

Posle šest godina korišćenja malouljnih prekidača, prema tehničkim preporukama, potrebno je izvršiti detaljni pregled komore za gašenje električnog luka i vrši se uklanjanje nečistoća sa kontakta. Takođe, hod kontakta se proverava i ukoliko je potrebno vrši se njihova obrada.

Ukoliko dobijeni rezultati redovnih kontrola nisu zadovoljavajući, predviđene su vanredne kontrole i održavanje. Vanredno održavanje je predviđeno u sledećim situacijama [67,68]:

- ispadi sistema su česti,
- opterećenje mreže je veliko u dugom vremenskom periodu,
- jake vremenske nepogode,
- kvarovi u sistemu,
- predviđeni važni periodi velike eksploatacije.

Vanredne kontrole mogu biti izvršene i na zahtev različitih inspekcija.

2.4. Životni vek energetske opreme

Životni vek energetske opreme zavisi od velikog broja spoljašnjih i unutrašnjih faktora. Iako proizvođači energetske opreme navode u specifikaciji vremenski period u kome će energetska oprema raditi pouzdano, taj vremenski period je uglavnom povezan sa uslovima u kojima energetska oprema funkcioniše. Što su eksploatacioni uslovi više

udaljeni od idelanih uslova za rad energetske opreme, to je životni vek energetske opreme kraći [97].

Što se tiče malouljnih prekidača koji su tema ove disertacije, njihov životni vek je uslovljen stanjem kontakta i pogonskog mehanizma, kao i kvalitetom ulja. U svojim specifikacijama, proizvođači navode životni vek prekidača na koji direktno utiču dva faktora. Prvi faktor jeste broj isključenja, dok je drugi faktor veličina struje kratkih spojeva.

Jedan od parametara koji se može takođe koristiti u proceni životnog veka prekidača jeste ekvivalentan broj isključenja na prazno definisan na sledeći način:

$$n = 300 \left(\frac{I_i}{I_{n,i}} \right)^k, \quad (2.1)$$

gde je:

koeficijent $k=1.5$,

I_i – struja koja se isključuje (njena efektivna vrednost),

$I_{n,i}$ – simetrična struja isključenja malouljnog prekidača (njena nazivna vrednost).

Ovaj broj n jednak je 1 u slučaju kada je $I=0$ (isključenje u praznom hodu). Kada zbir brojeva n dostigne graničnu vrednost D potrebno je izvršiti vanredni remont. U slučaju malouljnih prekidača koje proizvodi Minel i koji su najzastupljeniji u elektroenergetskom sistemu Srbije granična vrednost je $D = 1500$.

Generalni remont malouljnih prekidača prema specifikaciji proizvođača potrebno je uraditi na 10-12 godina ili 5000 pogonskih isključenja. Generalni remont podrazumeva sledeće aktivnosti:

- kompletnu proveru svih mehaničkih delova prekidača,
- detaljnu proveru komore za gašenje električnog luka,
- kompletnu promenu ulja,
- zamena ili obrada svih kontakta,
- kompletno podmazivanje svih pokretnih delova prekidača,
- promena zaptivača,
- detaljna provera visokonaponskih priključaka prekidača.

Pouzdanost sistema se može opisati sledećom relacijom [78]:

$$R(t) = P\{T > t\}, \quad (2.2)$$

i predstavlja verovatnoću ispravnosti sistema u datom trenutku posmatranja. Promenljiva T predstavlja vreme u kome sistem radi ispravno, dok je sa t označen period od početka puštanja u rad sistema do momenta posmatranja.

Nasuprot pouzdanosti, nepouzdanost sistema se definiše kao verovatnoća neispravnosti sistema u momentu posmatranja [78]:

$$F(t) = P\{T \leq t\}. \quad (2.3)$$

Zbir verovatnoća pouzdanosti sistema i nepouzdanosti sistema jednak je jedan. Verovatnoća otkaza sistema jednaka je [78]:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}. \quad (2.4)$$

Još jedan parametar koji može ukazati na stanje sistema jeste intenzitet otkaza:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}. \quad (2.5)$$

Određivanje srednjeg vremena trajanja ispravnog rada sistema može pomoći u realnoj proceni stanja sistema:

$$m = \int_0^{\infty} R(t) dt. \quad (2.6)$$

Izračunavanjem funkcije opstanka uređaja može se odrediti verovatnoća da sistem neće raditi u nekom trenutku u budućnosti [98]:

$$\bar{F}(t) = 1 - F(t) = P[T > t]. \quad (2.7)$$

Generalno gledano, tokom perioda eksploatacije, malouljni prekidači prolaze kroz različite faze:

- rad bez kvarova,
- mali kvarovi na prekidaču,
- veliki kvarovi na prekidaču i
- otkaz prekidača.

U skladu sa tim životni vek malouljnih prekidača se definiše kao period od trenutka posmatranja do trenutka otkaza. Preostali životni vek malouljnog prekidača se može definisati kao period od momenta početka pogoršanog rada do momenta otkaza. U tom periodu je moguće izvršiti intervenciju na malouljnim prekidačima, otkloniti nedostake koji su se javili u radu i na taj način produžiti životni vek malouljnih prekidača.

Životni vek elektroenergetske opreme, kao i malouljnih prekidača, se može posmatrati kroz fizički, tehnički i ekonomski životni vek [97].

Dužina fizičkog životnog veka malouljnih prekidača direktno je srazmerna preventivnom održavanju. Ukoliko se preventivno održavanje obavlja na vreme i u skladu sa preporukama proizvođača, fizički životni vek se može znatno produžiti.

Dužina tehničkog životnog veka malouljnih prekidača se može produžiti zamenom određenih delova prekidača iz tehničkih razloga.

Ekonomski životni vek podrazumeva procenu opreme iz ugla ekonomske vrednosti. Iako malouljni prekidači mogu biti fizički i tehnički upotrebljivi, ukoliko se proceni da oni nisu više vredni iz ekonomskog ugla, biće zamenjeni.

Životni vek malouljnih prekidača može biti opisan kroz tri faze. Prva faza podrazumeva veću verovatnoću pojave kvara zbog raznih mogućih grešaka u proizvodnji i montaži. Zatim, sledi druga faza, odnosno faza normalnog rada, gde je broj kvarova relativno mali i konstantan. U trećoj fazi, zbog vremena i uslova eksploatacije dolazi do povećanja broja kvarova i verovatnoća pojave otkaza se značajno povećava.

POGLAVLJE 3

METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

U ovom poglavlju dat je detaljan opis metoda korišćenih za modelovanje posmatranog sistema u ovoj disertaciji.

Generalno gledano, realizovani model procene rizika se sastoji od tri glavna koraka. U prvom koraku se vrši prikupljanje podataka o trenutnom stanju opreme od interesa, u ovom slučaju prekidača snage. U okviru ovog koraka, na osnovu prikupljenih podataka najpre se vrši identifikacija kritičnih tačaka u posmatranom sistemu, a zatim radi analiza uzroka kvarova i uticaja kvarova na funkcionisanje sistema.

U drugom koraku vrši se procena rizika pomoću intervalnih verovatnoća. U okviru drugog koraka, najpre se vrši ekspertska procena faktora koji utiču na rizik. Faktori se kvantifikuju intervalnim verovatnoćama. Zatim se formiraju i izračunavaju matrice težine faktora rizika korišćenjem grubih skupova. Nakon toga, formiraju se matrice za procenu rizika.

U trećem koraku, dobija se redosled prioriteta rizika za razmatrani model. Nakon izračunavanja matrice procene rizika i redosleda prioriteta izračunatih rizika na osnovu intervalne teorije verovatnoće, vrši se rangiranje prioriteta. Na osnovu dobijenih rezultata, donosi se odluka koju akciju treba preduzeti nad razmatranim prekidačima snage u cilju efikasnog i pouzdanog rada elektroenergetskog sistema.

Kako se model razvijen u ovom radu zasniva na dijagramima uticaja sa intervalnim verovatnoćama, posebna pažnja u ovom poglavlju posvećena je opisu dijagrama uticaja i teorije intervalnih verovatnoća.

U cilju boljeg razumevanja intervalnih verovatnoća i kreiranja granica intervala opisana je i teorija grubih skupova. Bajesove mreže i teorija verovatnoće su još dva dela detaljno opisana u ovom poglavlju s obzirom na to da se vrednosti čvorova koji čine dijagram uticaja izračunavaju na osnovu Bajesove teoreme, dok teorija verovatnoće predstavlja osnov na kome se zasnivaju metodi pomoću kojih se rešavaju dijagrami uticaja.

Na kraju poglavlja definisan je pojam rizika i dat je opis upravljanja rizikom u tehničkim sistemima.

3.1. Teorija verovatnoće

Početak savremenog razvoja teorije verovatnoće vezan je za 1933. godinu i objavljivanje naučnog rada u kome je Kolmogorov predstavio osnovne postavke aksiomatske zasnovanosti teorije verovatnoće [99]. Ovakva postavka omogućila je kreiranje teorije u okviru koje su opisane osobine pojmova verovatnoće i događaja kao određenih matematičkih objekata.

Teorija je omogućila povezivanje pojmova verovatnoće i događaja sa matematičkim pojmovima poput brojeva, funkcija, skupova, itd.

Skup elementarnih događaja Ω predstavlja osnovni pojam u teoriji verovatnoće. Ovaj skup je neprazan skup. Elementarni događaji označeni sa ω predstavljaju elemente skupa Ω [100].

Podskup skupa Ω je događaj T . Događaj T čine elementarni događaji ω sa svojstvom kojim je definisan događaj T . Ukoliko se neki od elementarnih događaja ω koji pripadaju događaju T realizovao, onda se i događaj T realizovao.

Događaj koji se prilikom vršenja eksperimenta mora dogoditi naziva se sigurni događaj i u ovom slučaju je to skup elementarnih događaja Ω . Nasuprot sigurnom događaju jeste prazan skup $\emptyset$ koji je nemoguć događaj.

Suprotan događaj od događaja T , označen sa $\bar{T}$, je komplement $\Omega \setminus T$ koji se realizuje jedino ako se događaj T ne realizuje. Ukoliko važi $T \subseteq K$ onda događaj T implicira događaj K .

Skup $T \cap K$ je presek ova dva događaja i realizuje se jedino u slučaju kada se i događaj T i događaj K realizuju. Događaji T i K se isključuju ako je njihov presek prazan skup $\emptyset$, odnosno ako ova dva događaja disjunktne skupovi.

Ako važi $T_i \cap K_n = \emptyset$ onda familija konačnih ili prebrojivih međusobno disjunktne podskupova $\{T_i\}$, $i \in \mathbb{N}$, predstavlja familiju događaja koji se međusobno isključuju [100].

Skup $T \cup K$ je unija ova dva događaja i realizuje se jedino u slučaju ako se realizuje bar jedan od ova dva događaja. Unija $\bigcup_{i=1}^{\infty} T_i$ jednaka je $\sum_{i=1}^{\infty} T_i$ za slučaj unije familije međusobno disjunktne događaja [100].

Nad skupom događaja važe svi odnosi, pravila i operacije koji važe u teoriji skupova. Sledeća dva aksioma teorije verovatnoće omogućavaju opisivanje verovatnosnog eksperimenta formiranjem potrebnog matematičkog modela.

Skup svih podskupova skupa Ω , odnosno partitivni skup, označen je sa $\mathcal{P}(\Omega)$.

Aksiom σ – polja: Neka je $\mathcal{M}$ podskup $\mathcal{P}(\Omega)$. Ako važi [100]:

- $\Omega \in \mathcal{M}$,
- ako $T \in \mathcal{M}$, važi $\bar{T} \in \mathcal{M}$,
- ako $T_i \subseteq \mathcal{M}$, $i \in \mathbb{N}$, važi $\bigcup_{i=1}^{\infty} T_i \in \mathcal{M}$,

u tom slučaju je $\mathcal{M}$ σ – polje nad Ω .

Za σ – polje važi sledeće:

- $\emptyset \in \mathcal{M}$,
- ako $T_1, T_2, \dots, T_n \in \mathcal{M}$, važi $\bigcup_{i=1}^n T_i \in \mathcal{M}$,

- ako $T_1, T_2, \dots, T_n \in \mathcal{M}$, važi $\bigcap_{i=1}^n T_i \in \mathcal{M}$,
- ako $T_i \subseteq \mathcal{M}$, $i \in \mathbb{N}$, važi $\bigcap_{i=1}^{\infty} T_i \in \mathcal{M}$.

Postulat verovatnoće: Pretpostavimo da je $\mathcal{M}$ σ -polje nad skupom Ω . Funkcija $P : \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{R}$ koja ispunjava sledeće [100]:

- $P(\Omega)=1$,
- $\forall T \in \mathcal{M}, P(T) \geq 0$,
- ako $T_i \subseteq \mathcal{M}$, $i \in \mathbb{N}$, $T_i \cap T_j = \emptyset$, $i \neq j$, važi $P\left(\sum_{i=1}^{\infty} T_i\right) = \sum_{i=1}^{\infty} P(T_i)$,

je verovatnoca na $\mathcal{M}$.

Trojka $(\Omega, \mathcal{M}, P)$ predstavlja prostor verovatnoća, pri čemu je skup elementarnih događaja označen sa Ω , $\mathcal{M}$ je σ -algebra nad skupom elementarnih događaja Ω , dok je P verovatnoća na $\mathcal{M}$. Događaj T je skoro siguran događaj ako su ispunjeni sledeći uslovi $T \neq \emptyset$ i $P(T)=1$. Događaj K je skoro nemoguć događaj za slučaj $K \neq \emptyset$ i $P(K)=0$ [100].

3.1.1. Uslovna verovatnoća

Pretpostavimo da je matematički model posmatranog verovatnosnog eksperimenta prostor verovatnoća $(\Omega, \mathcal{M}, P)$. Verovatnoća $P(T)$ predstavlja verovatnoću realizacije svakog događaja $T \in \mathcal{M}$. Ukoliko je događaj T na bilo koji način povezan sa događajem K , verovatnoća realizacije događaja T može zavisiti od informacije da li se u eksperimentu događaj $K \in \mathcal{M}$ realizovao.

Za prostor verovatnoća $(\Omega, \mathcal{M}, P)$, $T, K \in \mathcal{M}$, $P(K) \geq 0$, uslovna verovatnoća $P(T|K)$ definisana je na sledeći način [100]:

$$P(T|K) = \frac{P(TK)}{P(K)}. \quad (3.1)$$

Verovatnoću preseka za $P(T) > 0$ i $P(K) > 0$ dobijamo iz definicije uslovne verovatnoće $P(T|K) = P(TK)/P(K)$ i $P(K|T) = P(TK)/P(T)$:

$$P(TK) = P(T) \cdot P(K|T) = P(K) \cdot P(T|K). \quad (3.2)$$

Uopštenjem izraza (3.2) primenom matematičke indukcije dobijamo:

$$P(T_1 T_2 \dots T_n) = P(T_1) \cdot P(T_2|T_1) \cdot P(T_3|T_1 T_2) \cdots P(T_n|T_1 T_2 \cdots T_{n-1}). \quad (3.3)$$

3.1.2. Nezavisnost

Dva događaja T i K su nezavisni ako je ispunjen sledeći uslov [100]:

$$P(TK) = P(T)P(K). \quad (3.4)$$

Ako su događaj T i događaj K nezavisni događaji, pri čemu je ispunjen uslov da je $P(K) > 0$, onda važi:

$$P(T|K) = P(T). \quad (3.5)$$

Osobine koje su posledica definicije nezavisnosti su sledeće [98]:

- $\forall T$ i Ω su nezavisni,
- T i K su nezavisni za $\forall K \in \mathcal{M}$ ukoliko je $P(T) = 0$,
- $\bar{T}$ i K , T i $\bar{K}$, $\bar{T}$ i $\bar{K}$ su nezavisni jedino u slučaju ako su događaji T i K nezavisni,
- ukoliko su događaji T i K nezavisni, važi $P(T|K) = P(T)$ i $P(K|T) = P(K)$.

Ako za svaki konačan niz indeksa $i_1, i_2, \dots, i_n$ važi:

$$P(T_{i_1} T_{i_2} \dots T_{i_n}) = P(T_{i_1}) P(T_{i_2}) \dots P(T_{i_n}), \quad (3.6)$$

onda su događaji $T_1, T_2, \dots, T_k, \dots$ totalno nezavisni. Važno je uočiti da nezavisnost u parovima ne implicira totalnu nezavisnost.

3.1.3. Bajesova formula

Za prostor verovatnoća $(\Omega, \mathcal{M}, P)$, događaje $H_1, H_2, \dots, H_n \in \mathcal{M}$ nazivamo hipotezama ako su ispunjeni sledeći uslovi [100]:

- $P(H_i) > 0$, $i = 1, \dots, n$,
- događaji $H_1, \dots, H_n$ su međusobno isključivi,
- $H_1 + \dots + H_n = \Omega$.

Skup događaja $\{H_1, \dots, H_n\}$ predstavlja potpuni sistem događaja.

Formula potpune verovatnoće: Ukoliko je $H_1 + \dots + H_n = \Omega$, tada za $\forall T \in \mathcal{M}$ vazi [100]:

$$P(T) = \sum_{i=1}^n P(T|H_i) \cdot P(H_i). \quad (3.7)$$

Dokaz:

$$P(T) = P\left(\sum_{i=1}^n TH_i\right) = \sum_{i=1}^n P(TH_i) = \sum_{i=1}^n P(T | H_i) \cdot P(H_i).$$

Bajesova formula: Ukoliko je $H_1 + \dots + H_n = \Omega$, tada za $\forall T \in \mathcal{M}$, $P(T) > 0$ važi [100]:

$$P(H_l | T) = \frac{P(T | H_l)P(H_l)}{\sum_{i=1}^n P(T | H_i)P(H_i)}, \quad l = 1, 2, \dots, n. \quad (3.8)$$

Dokaz:

$$P(H_l | T) = \frac{P(H_l T)}{P(T)}, \quad P(T | H_l) = \frac{P(H_l T)}{P(H_l)}. \quad (3.9)$$

Na osnovu (3.3) sledi:

$$P(H_l)P(T | H_l) = P(T)P(H_l | T) \quad (3.10)$$

odakle je:

$$P(H_l | T) = \frac{P(H_l)P(T | H_l)}{P(T)}, \quad (3.11)$$

$$P(T) = P(H_1)P(T | H_1) + \dots + P(H_n)P(T | H_n) = \sum_{i=1}^n P(H_i)P(T | H_i). \quad (3.12)$$

Zamenom (3.12) u (3.11) dobija se:

$$P(H_l | T) = \frac{P(H_l T)}{P(T)} = \frac{P(T | H_l)P(H_l)}{\sum_{i=1}^n P(T | H_i)P(H_i)}, \quad l = 1, \dots, n. \quad (3.13)$$

3.1.4. Bajesov faktor

U slučajevima kada ne postoji dovoljno jasna veza u uzročno-posledične odnose između varijabli i ishoda prilikom izgradnje modela, može se koristiti Bajesov faktor (BF) u cilju provere koji model bolje opisuje razmatrane podatke i tako odrediti u kojoj meri parametar utiče na ishod verovatnoće. Nakon korišćenja Bajesove teoreme za izgradnju dva modela sa različitim promenljivim vezama zavisnosti i procene verovatnoće modela na osnovu podataka, može se izračunati Bajesov faktor koristeći opštu jednačinu [101]:

$$BF = \frac{p(o_1 | pod)}{p(o_2 | pod)} = \frac{\frac{p(pod | o_1) p(o_1)}{p(pod)}}{\frac{p(pod | o_2) p(o_2)}{p(pod)}} = \frac{p(pod | o_1)}{p(pod | o_2)}. \quad (3.14)$$

Osnovna intuicija je da su prethodne i naknadne informacije kombinovane u odnosu koji pruža dokaze u korist jednog modela u odnosu na drugi. Dva modela u jednačini Bajesovog faktora predstavljaju dva različita stanja promenljivih koje utiču na podatke (*pod*).

Na primer, ako su podaci koji se proučavaju merenja temperature uzeta sa više senzora, model 1 (o_1) može biti verovatnoća da svi senzori funkcionišu normalno, a model 2 (o_2) verovatnoća da su svi senzori otkazali. Bajesovi faktori su veoma fleksibilni, omogućavajući istovremeno upoređivanje više hipoteza.

BF vrednosti blizu 1, ukazuju da su dva modela skoro identična, a BF vrednosti daleko od 1 ukazuju da je verovatnoća da se jedan model pojavi veća od drugog. Konkretno, ako je $BF > 1$, model 1 opisuje razmatrane podatke bolje od modela 2.

Ako je $BF < 1$, model 2 opisuje razmatrane podatke bolje od modela 1. Ako bi Bajesov faktor 5 ukazivao na podatak o temperaturi, verovatnoća da senzori funkcionišu normalno je pet puta veća od verovatnoće da su senzori otkazali.

Tabela 3.1. prikazuje skalu dokaza korišćenjem Bajesovog faktora [101].

Tabela 3.1. Skala dokaza za Bajesov faktor

Bajesov faktor	Interpretacija
$BF < 1/10$	Jaki dokazi za Model 2
$1/10 < BF < 1/3$	Umereni dokazi za Model 2
$1/3 < BF < 1$	Slabi dokazi za Model 2
$1 < BF < 3$	Slabi dokazi za Model 1
$3 < BF < 10$	Umereni dokazi za Model 1
$BF > 10$	Jaki dokazi za Model 1

Iako su Bajesovi faktori prilično intuitivni i lako razumljivi, često ih je prilično teško izračunati. Postoje alternative Bajesovom faktoru za procenu modela kao što je Bajesov informacioni kriterijum (BIC). Formula za BIC je [101]:

$$-2 \cdot \ln p(pod | q) \approx BIC = -2 \cdot \ln L + q \ln(m), \quad (3.15)$$

gde je:

pod = posmatrani podatak;

m = broj tačaka podatka u pod , broj opservacija, ili ekvivalentno, veličina uzorka;

q = broj slobodnih parametara za procenu. Ako je procenjeni model linearna regresija, q je broj regresora, uključujući konstantu;

$p(pod|q)$ = verovatnoća posmatranih podataka s obzirom na broj parametara;

L = maksimizirana vrednost funkcije verovatnoće za procenjeni model.

Uopštena formula totalne verovatnoće: Ukoliko je $H_1 + \dots + H_n = \Omega$, i ako je $P(T) > 0$ i $P(TH_i) > 0$ za sve $i = 1, \dots, n$, tada važi [100]:

$$P(K|T) = \sum_{i=1}^n P(K|TH_i) \cdot P(H_i|T). \quad (3.16)$$

Dokaz:

$$\begin{aligned} P(K|T) &= \frac{P(KT)}{P(T)} = \frac{P\left(\sum_{i=1}^n KTH_i\right)}{P(T)} = \frac{1}{P(T)} \sum_{i=1}^n P(KTH_i) = \sum_{i=1}^n \frac{P(KTH_i)}{P(TH_i)} \cdot \frac{P(TH_i)}{P(T)} = \\ &= \sum_{i=1}^n P(K|TH_i) \cdot P(H_i|T) \end{aligned} \quad (3.17)$$

3.2. Bajesove mreže

Jedan od najboljih i najkorišćenijih alata za opisivanje neizvesnosti u izabranom domenu jesu Bajesove mreže [102]. Pomoću Bajesovih mreža, koje predstavljaju verovatnosne grafičke modele, moguće je neizvesno znanje intuitivno kvantifikovati. Nakon kvantifikacije, algoritmi zaključivanja se mogu primeniti na Bajesovu mrežu u cilju dobijanja verovatnosnih informacija o posmatranim promenljivima.

Bajesove mreže se mogu veoma uspešno primeniti i na problem klasifikacije. Klasifikatori koji se najčešće koriste su naivni Bajes i naivni Bajes koji ima prošireno stablo odlučivanja. Ovi klasifikatori se mogu posmatrati kao algoritmi učenja ili kao algoritmi zaključivanja za Bajesove mreže koje imaju određeni tip topologije.

Prilikom kreiranja nekog modela potrebno je definisati parametre koji čine taj model. Ukoliko se parametri definišu kao verovatnoće određene tačnim numeričkim vrednostima onda se Bajesove mreže mogu posmatrati kao precizni modeli.

Neizvesno stanje promenljive u pojedinim slučajevima ne može biti uspešno opisano pomoću jedne funkcije raspodele gustine verovatnoće, pa se u tim situacijama koriste skupovi funkcija raspodele gustine verovatnoće koji omogućavaju realniji opis.

U određenim slučajevima, intervalne verovatnoće mogu odlično poslužiti za modelovanje našeg znanja u određenom domenu, pri čemu su te intervalne verovatnoće komplementarne sa osobinama skupa funkcija raspodele gustine verovatnoće. U odnosu na kriterijum racionalnosti, konveksni i zatvoreni skupovi ovakve vrste pripadaju grupi kredal skupova [103].

Pristupi u kojima se kvantifikacija verovatnoća zasniva na intervalnim vrednostima se posmatraju kao neprecizni [104]. Generalizovane Bajesove mreže, koje se mogu posmatrati

kao nova klasa grafičkih modela zasnovana na nepreciznim verovatnoćama, definišu se kao kredalne mreže [105].

Kredalni skupovi se često koriste za opis stručnog znanja s obzirom na njegovu kvalitativnu prirodu. Sistemi zasnovani na znanju predstavljaju jednu od prirodnijih primena kredalnih mreža [106-108].

Takođe, kada je potrebno kreirati model koji se zasniva na malom skupu podataka ili nepotpunom skupu podataka, sa fokusom na dobijanje verovatnoća iz podataka, kredalni skupovi predstavljaju pouzdano rešenje. U skladu sa tim, klasifikatori koji se baziraju na Bajesovim mrežama mogu se proširiti da ispunjavaju uslove da se svrstaju u klasifikatore koji se baziraju na kredalnim mrežama.

Razlika između ove dve vrste klasifikatora ogleda se najbolje na primeru nepotpunih skupova informacija na osnovu kojih treba doneti odluku o identifikaciji jedne klase. Klasifikatori koji se baziraju na kredalnim mrežama omogućavaju neodlučnost između više klasa ukoliko nije moguće izdvojiti jednu klasu kao dominantnu.

Na ovaj način se dobija zaključak koji omogućava manje informacija nego zaključak dobijen na osnovu klasifikatora koji se zasnivaju na Bajesovim mrežama. Samim tim, taj zaključak je i robusniji. Klasifikatori koji se zasnivaju na Bajesovim mrežama uvek detektuju dominantnu klasu koja je zapravo klasa sa maksimalnom verovatnoćom.

Neizvesno znanje u mnogim domenima može se veoma uspešno modelovati pomoću Bajesovih mreža. Da bi model što bolje oslikavao stanje koje opisuje, potrebno je što preciznije odrediti vrednosti uslovnih verovatnoća koje su povezane sa svakom promenljivom za bilo koju moguću vrednost roditelja.

S obzirom na to da je veoma teško odrediti precizne vrednosti verovatnoća, mnogo realističniji model se dobija ukoliko se neizvesnost modeluje intervalnim vrednostima verovatnoća [104]. To znači da bi se umesto pojedinačnih funkcija mase verovatnoće razmatrali zatvoreni konveksni skupovi funkcija mase verovatnoće, odnosno razmatrale bi se generalizovane Bajesove mreže.

Usmereni aciklični graf, u ovom kontekstu, služi za kvalitativni opis verovatnosnog modela. Vrhovi grafa, koji predstavljaju promenljive, nazivaju se čvorovi. Grane predstavljaju vezu između dva čvora. Krajevi grana su u obliku strelica i opisuju zavisnost između promenljivih. To znači da je jedan čvor roditelj drugog čvora i da su međusobno zavisni. Pretpostavke nezavisnosti su implicirane u Bajesovim mrežama odsustvom veze.

Roditelji od X_i , prema acikličnom usmerenom grafu G , su zajedničke promenljive $\Pi_i \subset X$, za $\forall i, i = 0, \dots, n$, gde $X := (X_0, X_1, \dots, X_n)$ predstavlja skup promenljivih koje su u korespondenciji jedan-na-jedan sa čvorovima G . Skup promenljivih X_i uzima svoje vrednosti na konačnom skupu Ω_{X_i} , gde Π_i u $\Omega_{\Pi_i} := \times_{X_j \in \Pi_i} \Omega_{X_j}$, za $\forall i, i = 0, \dots, n$.

Proizvod Dekartovog proizvod je označen simbolom $\times$. Kao što je opisano u [109], bilo koja promenljiva je uslovno nezavisna od svojih nepotomskih neroditelja u odnosu na svoje roditelje.

To znači da graf G predstavlja stohastičke relacije nezavisnosti ako je ispunjen Markovljev uslov.

Specifikacija uslovne funkcije mase verovatnoće $P(X_i | \pi_i)$, za $\forall \pi_i \in \Omega_{\Pi_i}$ i $i = 0, \dots, n$ indukuje putem grafa, za $\forall x \in \Omega_X := \times_{i=0}^n \Omega_{X_i}$ faktorizaciju [110]:

$$P(x) := \prod_{i=0}^n P(x_i | \pi_i). \quad (3.18)$$

gde su vrednosti x_i i π_i one koje su konzistentne sa x .

Lokalni modeli X_i , $i = 0, \dots, n$, zapravo predstavljaju funkcije mase verovatnoće za X_i zapisane kao $\{P(X_i | \pi_i)\}_{\pi_i \in \Omega_{\Pi_i}}$. Iz jednačine (3.18), koristeći združenu funkciju mase verovatnoće uspostavlja se zaključivanje u Bajesovim mrežama.

Na primer, sabiranjem drugih promenljivih iz združene funkcije gustine verovatnoće, marginalna funkcija mase verovatnoće je jednaka [108]:

$$P(x_0) = \sum_{x_1, \dots, x_n} \prod_{i=0}^n P(x_i | \pi_i). \quad (3.19)$$

gde je $x_0 \in \Omega_{X_0}$, dok se umesto $\sum_{x \in \Omega_X}$, koristi $\sum_x$. Takođe, vrednost iz jednačine (3.19) može se izračunati na drugi način korišćenjem procedure linearne kombinacije lokalnih verovatnoća povezanih sa proizvoljnim $X_j \in X$:

$$P(x_0) = \sum_{x_j, \pi_j} \left[P(x_0 | x_j, \pi_j) \cdot P(\pi_j) \right] \cdot P(x_j | \pi_j). \quad (3.20)$$

U ovom slučaju, verovatnoće $P(x_j | \pi_j)$ su određene iz specifikacije zajedničke raspodele verovatnoće, dok se iz jednačine (3.19) dobijaju bezuslovne verovatnoće $P(\pi_j)$.

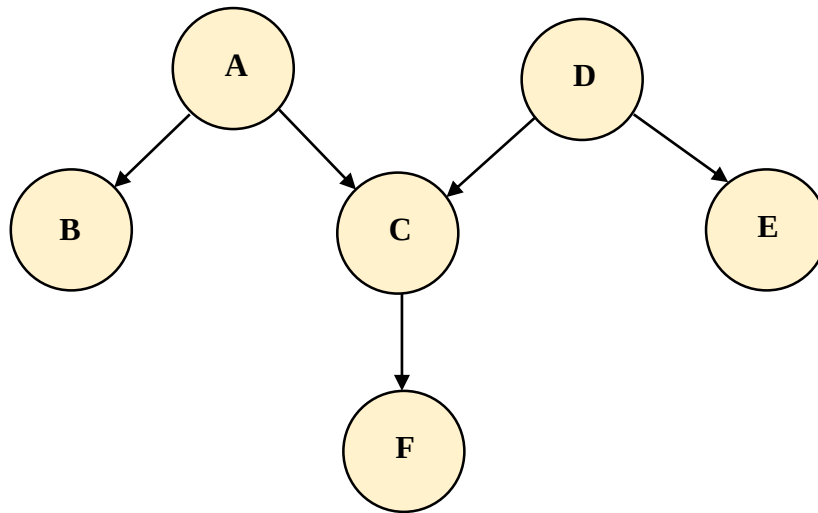
Za uslovne verovatnoće važi $P(x_0 | x_j, \pi_j) = P(x_0, x_j, \pi_j) / P(x_j, \pi_j)$ uz uslov $P(x_j, \pi_j) > 0$. Iz jednačine (3.20), podrazumevajući da je $X_j = X_0$ sledi:

$$P(x_0) = \sum_{\pi_0} P(\pi_0) \cdot P(x_0 | \pi_0). \quad (3.21)$$

Za $X_0 \in \Pi_j$, prethodna jednačina postaje:

$$P(x_0) = \sum_{x_j, \pi_j'} P(x_0, \pi_j') P(x_j | x_0, \pi_j'), \quad \Pi_j' := \Pi_j \setminus \{X_0\}. \quad (3.22)$$

Posmatrano iz matematičkog ugla, za predstavljanje Bajesovih mreža potrebna je struktura koja predstavlja graf i verovatnoće koje su dodeljene čvorovima. Odnosi između delova struktura prikazani su korišćenjem primera sa slike 3.1.



Slika 3.1. Primer usmerenog acikličnog grafa

Za skup čvorova V i skup uređenih parova čvorova E iz skupa V , uređeni par $[V, E]$ predstavlja usmereni graf G . Usmereni graf G je aciklični graf ukoliko ne sadrži nijednu petlju. Slučajne promenljive predstavljaju čvorove grafa.

Odnosi između čvorova određeni su pomoću grana. Za primer sa slike 3.1. odnosi su sledeći:

- čvorovi su: $\{A, D, B, C, E, F\}$;
- roditelji su oni čvorovi iz kojih grana ide ka drugim čvorovima. U ovom slučaju, roditelji čvorova su (čvorovi A i D nemaju roditelje):
 - $rod(B) = \{A\}$;
 - $rod(C) = \{A, D\}$;
 - $rod(E) = \{D\}$;
 - $rod(F) = \{C\}$;
- deca su oni čvorovi u koje idu grane:
 - deca čvora A su B i C ;
 - deca čvora D su C i E ;
 - dete čvora C je F ;
 - čvorovi B, E, F nemaju decu;
- preci su svi čvorovi u nizu iz kojih grane idu ka drugim čvorovima:
 - predak čvora B je A ;
 - preci čvora C su A i D ;
 - predak čvora E je D ;
 - preci čvora F su C, A i D ;
 - čvorovi A i D nemaju pretke;
- potomci su svi čvorovi u nizu u koje idu grane:

- potomci čvora A su B, C, F ;
- potomci čvora D su E, C, F ;
- potomak čvora C je F ;
- čvorovi B, E, F nemaju potomke;
- nepotomci nekog čvora su sam taj čvor i svi njegovi preci:
 - nepotomak čvora A je čvor A ;
 - nepotomak čvora D je čvor D ;
 - nepotomci čvora B su čvorovi B, A ;
 - nepotomci čvora C su čvorovi C, A, D ;
 - nepotomci čvora E su čvorovi E, D ;
 - nepotomci čvora F su čvorovi F, C, A, D ;
- čvor koji nema roditelje je koren:
 - koreni su čvorovi A i D ;
- čvor koji nema decu je list:
 - listovi su čvorovi: B, E, F .

Uslovne zavisnosti na grafu moguće je proceniti korišćenjem statističkih metoda, zbog čega se Bajesove mreže nazivaju i mrežama poverenja.

Pretpostavimo postojanje usmerenog acikličnog grafa $G(V, E)$ i zajedničku distribuciju raspodela verovatnoća slučajnih promenljivih P iz skupa V . Ako je ispunjen uslov da za svaku promenljivu $X \in V$, pri čemu je X uslovno nezavisna od skupa svih njenih nepotomaka, onda (G, P) zadovoljava Markovljevo svojstvo.

U tom slučaju i G i P međusobno zadovoljavaju Markovljevo svojstvo. Kada (G, P) zadovoljava Markovljevo svojstvo, onda je (G, P) Bajesova mreža.

Prednosti Bajesovih mreža su sledeće [104]:

- Bajesove mreže vizuelno predstavljaju sve relacije između varijabli u sistemu sa povezanim granama;
- Lako je prepoznati zavisnost i nezavisnost između različitih čvorova;
- Bajesove mreže mogu da obrađuju situacije u kojima je skup podataka nekompletan pošto model uzima u obzir zavisnosti između svih varijabli;
- Bajesove mreže mogu mapirati scenarije u kojima nije izvodljivo/praktično meriti sve promenljive zbog sistemskih ograničenja (troškovi, nedovoljno senzora, itd.);
- Može se koristiti za bilo koji model sistema.

Ograničenja Bajesovih mreža su sledeća [104]:

- Sve grane moraju biti izračunate da bi se izračunala verovatnoća bilo koje grane;
- Kvalitet rezultata mreže zavisi od kvaliteta prethodnih verovanja ili modela. Promenljiva je samo deo Bajesove mreže ako se veruje da sistem zavisi od nje;
- Izračunavanje mreže je NP-teško (nedeterminističko polinomsko vremensko teško);
- Proračuni i verovatnoće pomoću Bajesovog pravila i marginalizacije mogu postati složeni i često ih karakterišu suptilne formulacije, a mora se voditi računa da se pravilno izračunaju.

Bajesove mreže se koriste kada verovatnoća da će se desiti jedan događaj zavisi od verovatnoće da se dogodio prethodni događaj. Ovo je veoma važno u industriji jer u mnogim procesima promenljive imaju uslovne odnose, što znači da su zavisne jedna od druge. Bajesove mreže se koriste za modelovanje procesa u širokom spektru primene.

Neki od njih uključuju [104]:

- Održavanje elektroenergetske opreme;
- Dijagnoza bolesti;
- Klasifikacija dokumenata;
- Obrađivanje slike;
- Sistemi za podršku odlučivanju;
- Prikupljanje podataka za istraživanje dubokog svemira;
- Veštačka inteligencija;
- Predviđanje vremena.

Korišćenjem uzorka sa slike 4.1, zajednička raspodela verovatnoće je:

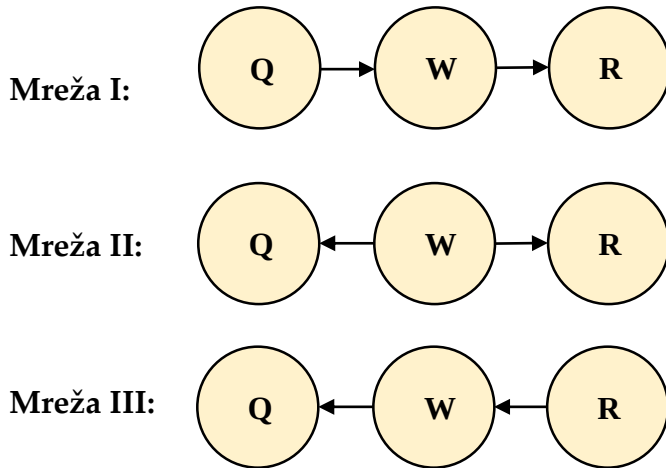
$$P(A, B, C, D, E, F) = P(A)P(D)P(B|A)P(C|A, D)P(E|D)P(F|C). \quad (3.23)$$

Ako čvor nema roditelja, kao što je čvor A , njegova distribucija verovatnoće se opisuje kao bezuslovna. Inače, lokalna distribucija verovatnoće čvora je uslovljena drugim čvorovima.

3.2.1. Klase ekvivalentnosti

Svaka Bajesova mreža pripada grupi Bajesovih mreža poznatih kao klasa ekvivalencije. U datoj klasi ekvivalencije, sve Bajesove mreže mogu se opisati istim zajedničkim izrazom verovatnoće.

Kao primer, sledeći skup Bajesovih mreža sadrži klasu ekvivalencije [104]:



Uzročnost koju implicira svaka od ovih mreža je različita, ali ista združena funkcija verovatnoće ih sve opisuje. Sledeće jednačine pokazuju kako se svaka mreža može kreirati iz istog izraza originalne združene funkcije verovatnoće:

Mreža 1:

$$P(Q, W, R) = P(Q)P(W|Q)P(R|W). \quad (3.24)$$

Mreža 2:

$$\begin{aligned} P(Q, W, R) &= P(Q)P(W|Q)P(R|W) = P(Q) \frac{P(Q|W)P(W)}{P(Q)} P(R|W) = \\ &= P(Q|W)P(W)P(R|W) \end{aligned} \quad (3.25)$$

Mreža 3:

$$\begin{aligned} P(Q, W, R) &= P(Q|W)P(W)P(R|W) = P(Q|W)P(W) \frac{P(W|R)P(R)}{P(W)} = \\ &= P(Q|W)P(W|R)P(R) \end{aligned} \quad (3.26)$$

Sve zamene su zasnovane na Bajesovom pravilu.

Postojanje klasa ekvivalencije pokazuje da se uzročnost ne može utvrditi nasumičnim zapažanjima. Kontrolisana studija – koja neke promenljive drži konstantnim dok druge mogu da se menjaju da bi se odredio efekat svake od njih – neophodna je da bi se utvrdila tačna uzročna veza skupa promenljivih.

3.3. Dijagrami uticaja

Jedan od najtežih aspekata donošenja odluka jeste donošenje odluka u uslovima neizvesnosti. Verovatnoća zavisnosti predstavlja onu zavisnost koja nastaje kao rezultat neizvesnosti. Ako postoje dve poznate promenljive i treća promenljiva koja je jednaka zbiru te dve promenljive, onda je lako zaključiti da treća promenljiva zavisi i od jedne i od druge poznate promenljive.

Međutim, ako imamo slučaj da je jedna promenljiva poznata a druga slučajna, u tom slučaju je treća promenljiva, koja je isto kao u prethodnom slučaju jednaka zbiru ove dve promenljive, verovatno zavisna od druge promenljive, ali ne i od prve. Razlog je taj što nam poznavanje specifične vrednosti druge promenljive govori nešto novo o trećoj promenljivoj, ali ne postoji takva mogućnost u odnosu na prvu promenljivu [111].

Probabilistička nezavisnost, kao i samo dodeljivanje verovatnoće, zavisi od stanja informacija koje poseduje ekspert koji vrši ocenjivanje. Ako su a , b i c tri slučajne promenljive od interesa, koje mogu biti kontinuirane ili diskretne, tada je $\{a | I\}$ raspodela verovatnoće dodeljena a u odnosu na stanje informacije I .

Promenljive a i b su probabilistički nezavisne s obzirom na stanje informacije I ako je [111]:

$$\{a, b | I\} = \{a | I\} \{b | I\}, \quad (3.27)$$

ili ekvivalentno:

$$\{a | b, I\} = \{a | I\}. \quad (3.28)$$

Bez obzira da li su x i y probabilistički nezavisni, može se pisati:

$$\{a, b | I\} = \{a | b, I\} \{b | I\} = \{b | a, I\} \{a | I\}. \quad (3.29)$$

Ovo nazivamo „lančano pravilo verovatnoća“. Za n promenljivih postoji $n!$ mogućih proširenja, od kojih svako zahteva dodeljivanje različitog skupa verovatnoća i svako je logički ekvivalentno ostatku. Međutim, iako su procene logički ekvivalentne, mogu postojati značajne razlike u lakoći sa kojom donosilac odluke može da ih pruži. Stoga je pitanje koje proširenje koristiti u problemu daleko od trivijalnog [111].

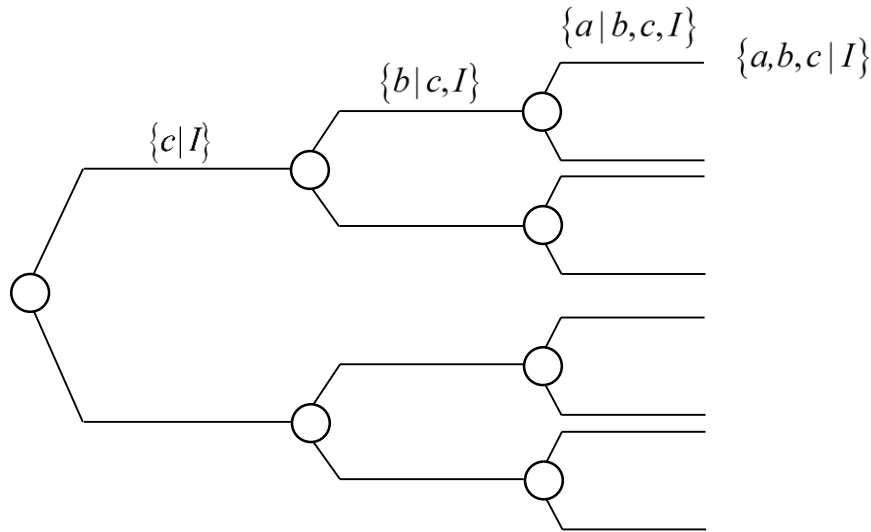
3.3.1. Stablo verovatnoća

Stablo verovatnoće predstavlja niz čvorova sa granama koje izlaze iz svakog čvora i predstavljaju različite moguće vrednosti promenljivih. Prvo dodeljivanje je verovatnoća različitih vrednosti c . Verovatnoća svake vrednosti b se uslovno dodeljuje određenoj vrednosti c i postavlja se na deo stabla označen tom vrednošću.

Proširena raspodela verovatnoće [111]:

$$\{a, b, c | I\} = \{a | b, c, I\} \{b | c, I\} \{c | I\}. \quad (3.30)$$

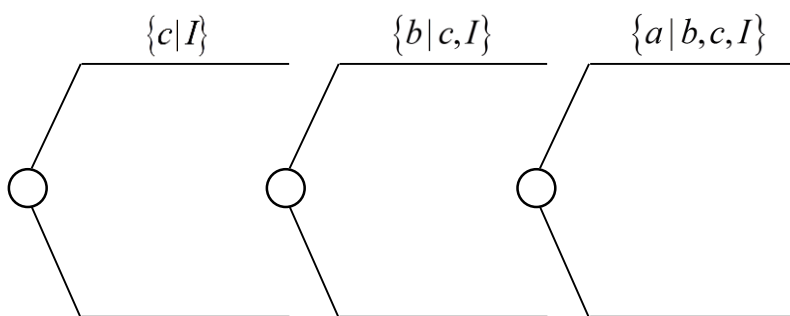
ilustrovana je na sledećoj slici.



Slika 3.2. Stablo verovatnoća [111]

Verovatnoće različitih nivoa a se procenjuju datim određenim vrednostima c i b i postavljaju se na deo stabla određen tim vrednostima. Stablo je kompletirano kada je ovo urađeno za sve moguće vrednosti a , b , i c . Verovatnoća bilo koje određene putanje kroz stablo se dobija množenjem vrednosti duž grana $\{a, b, c | I\}$. Obratite pažnju da konvencija o stablu koristi male krugove za predstavljanje slučajnih čvorova.

Ako se ne želi fokus na detaljne veze u stablu, stablo verovatnoća se može predstaviti u generičkom obliku kao na sledećoj slici [111].

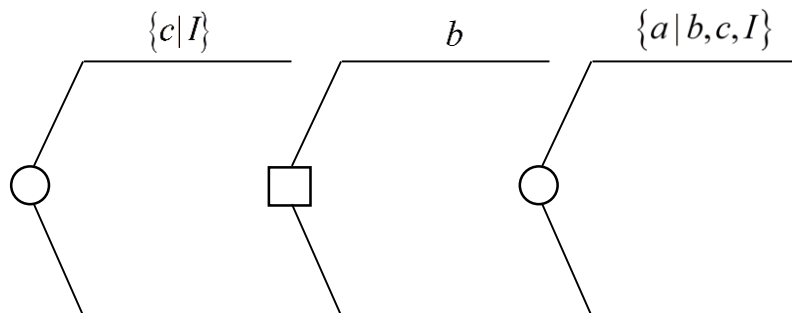


Slika 3.3. Generičko stablo verovatnoća [111]

3.3.2. Stablo odlučivanja

Ako vrednost promenljive kontroliše donosilac odluke, ona je u stablu predstavljena čvorom odlučivanja. Dakle, ako je b promenljiva odluke, slika 3.3 se može zameniti slikom 3.4. Ovo stablo pokazuje da je donosilac odluke najpre nije siguran u vezi

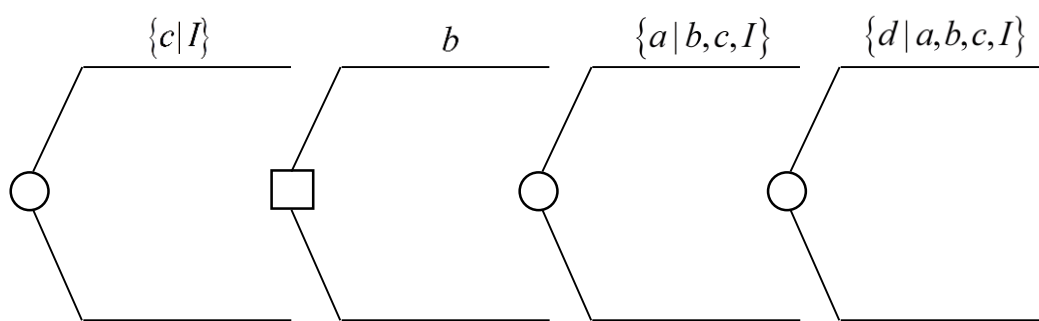
promenljive c i da je zbog toga dodelio raspodelu verovatnoće $\{c | I\}$. Međutim, on će znati c u trenutku kada mora da postavi promenljivu odluke b . Ovaj čvor je, kao i svi čvorovi odluke, predstavljen malim kvadratom. Kada su promenljive c i b date, donosilac odluke će i dalje biti nesiguran u vezi sa promenljivom a ; ova neizvesnost je predstavljena sa $\{a | b, c, I\}$. Ako se, kao što je obično slučaj, može dati mnogo tvrdnji o nezavisnosti, procene je najbolje uraditi drugačijim redosledom od onog koji se koristi u stablu odlučivanja [111].



Slika 3.4. Generičko stablo verovatnoća [111]

Ovo znači da se prvo kreira stablo verovatnoća u formi proširenja koja je pogodna za donosioca odluka i da se koristi za dodelu. Zatim se informacije obrađuju u formi koju zahteva stablo odlučivanja. Ovo se često naziva „korišćenjem Bajesovog pravila“ ili „okretanjem drveta“.

Stablo na slici 3.5. je stablo sa slike 3.4. prošireno sa jednom dodatnom promenljivom d . Promenljiva c se može tumačiti kao rezultat testa koji će postati poznat, b kao odluku donosioca odluke, a kao promenljivu ishoda za koju je test relevantan, i d kao vrednost koja će biti dobijena ako test pokaže c , odluka je promenljiva b , dok je a vrednost promenljive ishoda.



Slika 3.5. Stablo verovatnoća sa četiri čvora [111]

Često b neće uticati na a ni na koji način, iako b utiče na d [111]:

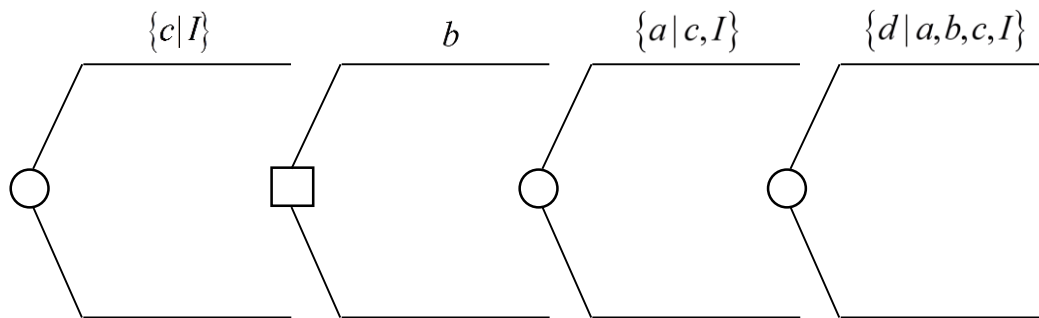
$$\{a | b, c, I\} = \{a | c, I\}. \quad (3.31)$$

Tvrdnja opisana prethodnim izrazom ilustrovana je stablom prikazanim na slici 3.6. Ovo stablo zahteva specifikaciju $\{c | I\}$ i $\{a | c, I\}$ verovatnoća različitih rezultata ispitivanja

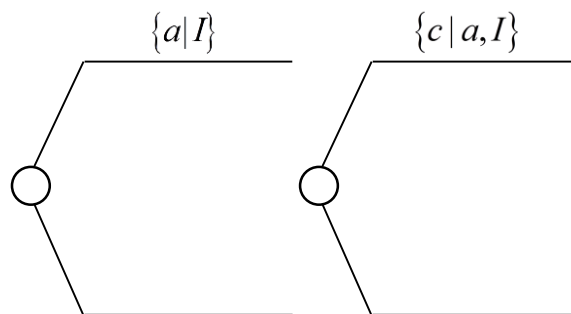
i verovatnoća različitih ishoda datih rezultata ispitivanja. Ali obično u situacijama ove vrste, donosilac odluke bi rađe direktno dodelio verovatnoće različitih ishoda $\{a|I\}$, a zatim verovatnoće različitih rezultata testa s obzirom na ishod $\{c|a, I\}$.

Drugim rečima, on bi više voleo da svoje procene izvrši u stablu verovatnoće na slici 3.7, a zatim da ih obradi kako bi se uklopili u stablo odlučivanja sa slike 3.6. Jer:

$$\{a|I\}\{c|a, I\} = \{c|I\}\{a|c, I\} = \{a, c|I\}. \quad (3.32)$$



Slika 3.6. Stablo verovatnoća sa četiri čvora pri čemu b ne utiče na a [111]



Slika 3.7. Stablo dodeljenih verovatnoća [111]

3.3.3. Definicija dijagrama uticaja

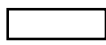
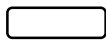
Dijagram uticaja je način opisivanja zavisnosti između slučajnih promenljivih i odluka. Oni omogućavaju definisanje i predstavljanje glavnih elemenata svakog razmatranog problema kao i uzročno-posledične odnose između tih elemenata. Ovo je omogućeno time što se generalni razmatrani problem posmatra kao skup manjih problema od kojih se sastoji, pri čemu se vrši njihovo zasebno procenjivanje. Važnost dijagrama uticaja se ogleda i u tome što omogućavaju da se proverí kako će promena vrednosti verovatnoća početnih pretpostavki uticati na konačnu odluku ili na odluku u određenoj tački odlučivanja od interesa [112].

Razvoj alata za podršku odlučivanju, pored već razvijenih normativnih strategija pomoću kojih se mogu donositi odluke, bio je sledeći cilj u razvoju teorije odlučivanja u XX veku. Uspešan alat je trebalo da omogući jasnu strukturu problema koji se razmatra, razumljivu grafičku predstavu i mogućnost izbora više opcija koje utiču na konačno rešenje

posmatranog problema. Razvijena su dva alata koji su ispunjavali navedene uslove, a to su dijagrami uticaja i stabla odlučivanja [112].

I jedan i drugi alat se zasnivaju na tri komponente i to prepoznavanje situacije od interesa, meru neizvesnosti stanja i meru relativne poželjnosti povezanih rezultata. Ove komponente treba da se kombinuju i koriste za komparaciju suprostavljenih opcija odlučivanja [112].

Dijagrami uticaja predstavljaju grafičke modele koji omogućavaju detaljan uvid celog opsega neizvesnosti i vrednosti u zadatku odlučivanja. Dijagram uticaja čine sledeći elementi [113]:

-  - spoljašnji uticaj;
-  - čvor odluke;
-  - međupromenljiva;
-  - čvor vrednosti;
-  - čvor slučaja;
-  - uticaj između promenljivih;
-  - informacija između promenljivih.

Spoljašnji uticaj se obeležava krugom. Vrednost ovih varijabli se ne menja u zavisnosti od odluke koja je doneta. Čvor odluke se obeležava pravougaonikom i direktno zavisi od donosioca odluke, tj. reprezentuje njegovu odluku. Varijabla koja se dobija u obliku funkcije odluke i ostalih varijabli predstavlja međupromenljivu. Kvantitativni kriterijum u odnosu na kog se radi proces optimizacije obeležen je rombom i označava čvor vrednosti. Slučajna varijabla čija vrednost prati određenu funkciju gustine raspodele verovatnoće se obeležava elipsom i predstavlja čvor slučaja. Uticaj između varijabli prikazuje se strelicom. Informacija između varijabli na dijagramu uticaja obeležava se isprekidanom strelicom [113].

Dijagrami uticaja se izračunavaju i ocenjuju pomoću metoda koji su bazirani na verovatnoći. Bajesova teorema je osnova za određivanje vrednosti čvorova. Komplikovane veze između varijabli i složene situacije se mogu uspešno rešiti pomoću Bajesovih mreža.

Neizvesnost, kao sastavni deo dijagrama uticaja, može se posmatrati kroz dve dimenzije: kontinuirana naspram diskretne i skalarna naspram vektorske.

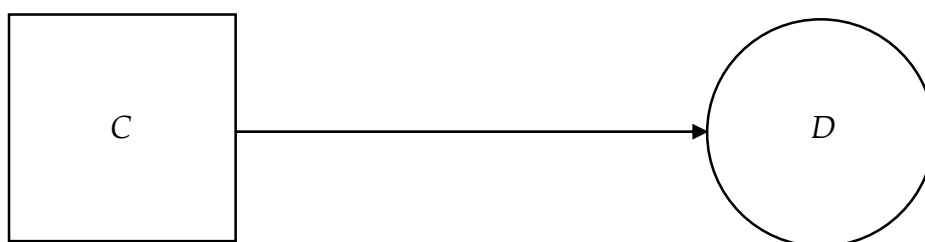
Slučajna varijabla koja je u potpunosti određena kontinuiranom funkcijom gustine raspodele verovatnoće, poput Gausove raspodele, predstavlja kontinuiranu neizvesnost. Diskretna neizvesnost je slučajna varijabla opisana bilo kojom vrednošću koja pripada podskupu realnih brojeva koji je prebrojiv. Binarni događaj predstavlja specijalan slučaj diskretne neizvesnosti [113].

Neizvesnost koja može biti opisana samo jednim brojem naziva se skalarna neizvesnost. Kada je neizvesnost opisana pomoću vektora onda je u pitanju vektorska neizvesnost. Vektor u ovom slučaju obično bude predstavljen u obliku vremenske serije.

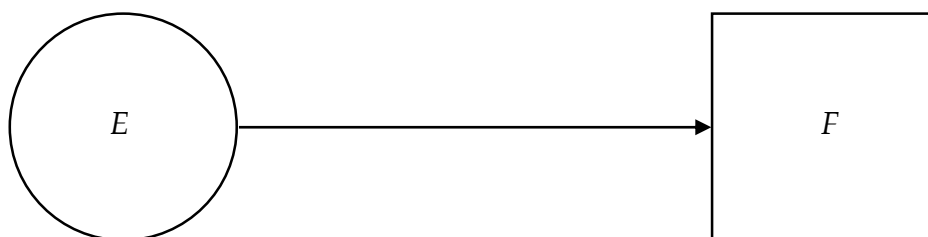
Izračunata neizvesnost je specifičan slučaj neizvesnosti jer neizvesnost potiče iz razloga što se izračunava na osnovu drugih neizvesnosti.



Verovatnoće povezane sa slučajnom promenljivom B zavise od ishoda slučajne promenljive A



Verovatnoća slučajne promenljive D zavisi od odluke C



Donosilac odluke zna ishod slučajne promenljive E kada se donosi odluka F



Donosilac odluke zna odluku G kada se donosi odluka H [111]

Slika 3.8. Definicije koje se koriste u dijagramima uticaja

Vrste zavisnosti između slučajnih promenljivih i odluka opisane pomoću dijagrama uticaja prikazane su na slici 3.8 [111, 112].

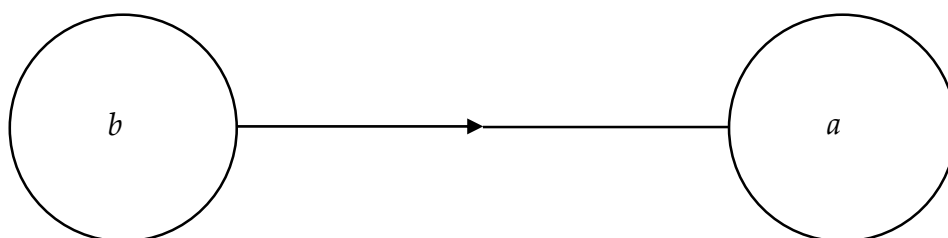
Na osnovu slike 3.8. može se uočiti da postoje četiri tipa zavisnosti. Ukoliko između dve neizvesnosti postoji strelica, to znači da između njih verovatnoća zavisnosti postoji.

U suprotnom, ukoliko ne postoji strelica između njih, znači da verovatnoća zavisnosti ne postoji. Red uslovljenosti definisan je smerom strelice. Verovatnoće neizvesnosti na vrhu strelice uslovljene su ishodom neizvesnosti na drugom kraju strelice [112].

Kada je ishod neizvesnosti poznat u trenutku kada se odluka donese obeležava se strelicom usmerenom od neizvesnosti ka odluci [112].

Strelica usmerena od odluke ka neizvesnosti znači da od izbora koji je napravljen u odluci zavise verovatnoće za neizvesnost. Ovaj slučaj izaziva veliko ograničenje jer se može doći u situaciju da se možda ne može izračunati vrednost te neizvesnosti.

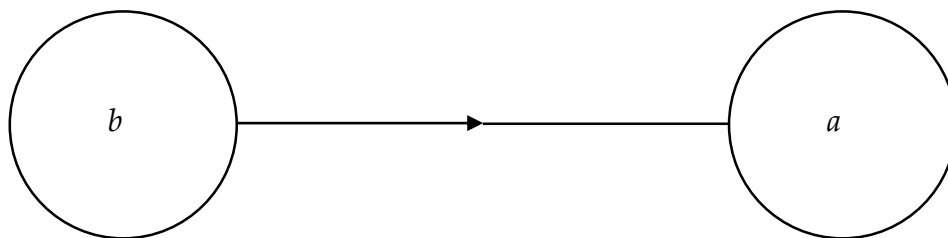
Ovakve situacije je moguće sprečiti modifikacijom dijagrama uticaja tako što će se dodati izračunate neizvesnosti. Tada nema potrebe za strelicama koje idu od odluka do neizvesnosti, i dijagram uticaja koji nema takve uzročno-posledične veze pripada Hauardovom kanonskom obliku [112].



(a) jednostavan dijagram uticaja



(b) jednostavan dijagram uticaja



(c) alternativni prikaz dijagrama uticaja prikazanog na slici (b)

Slika 3.9. Dijagram uticaja sa dva čvora [111]

U četvrtom slučaju, kada su dve odluke povezane strelicom znači da je poznata odluka na drugom kraju strelice u momentu kada se donosi odluka na vrhu strelice [112].

Dijagram uticaja na slici 3.9.(a) pokazuje da raspodela verovatnoće dodeljena a može zavisiti od vrednosti b , dok dijagram uticaja na slici 3.9.(b) tvrdi da su a i b verovatno nezavisni.

Dijagram uticaja na slici 3.9.(a) ne daje nikakvu tvrdnju o verovatnom odnosu a i b , pošto, svaka zajednička verovatnoća može biti predstavljena u obliku [111]:

$$\{a, b | I\} = \{a | b, I\} \{b | I\}. \quad (3.33)$$

Međutim, kako je:

$$\{a, b | I\} = \{b | a, I\} \{a | I\}. \quad (3.34)$$

dijagram uticaja sa slike 3.9.(b) može se predstaviti kao na slici 3.9.(c). Obe slike su potpuno opšte predstave koje ne zahtevaju tvrdnje o nezavisnosti.

Iako je smer strelice irelevantan za ovaj jednostavan primer, koristi se u složenijim problemima da bi se specificirala stanja informacija na osnovu kojih se daju tvrdnje o nezavisnosti [111].

U slučaju kada se posmatraju tri promenljive, a , b i c , postoji šest dijagrama uticaja potpune opštosti, kao što je prikazano na slici 3.10.

Tri pravila koja moraju biti ispunjena pri formiranju dijagrama uticaja su da u dijagramima uticaja nema petlji, sve odluke moraju biti donete i ne sme biti zaborava.

Prema prvom pravilu, petlja na dijagramima uticaja je zabranjena jer ne može predstavljati bilo kakav mogući redosled proširenja. Međutim, čvorovi mogu imati dodatnu strelicu koja dolazi iz bilo kog prethodnika.

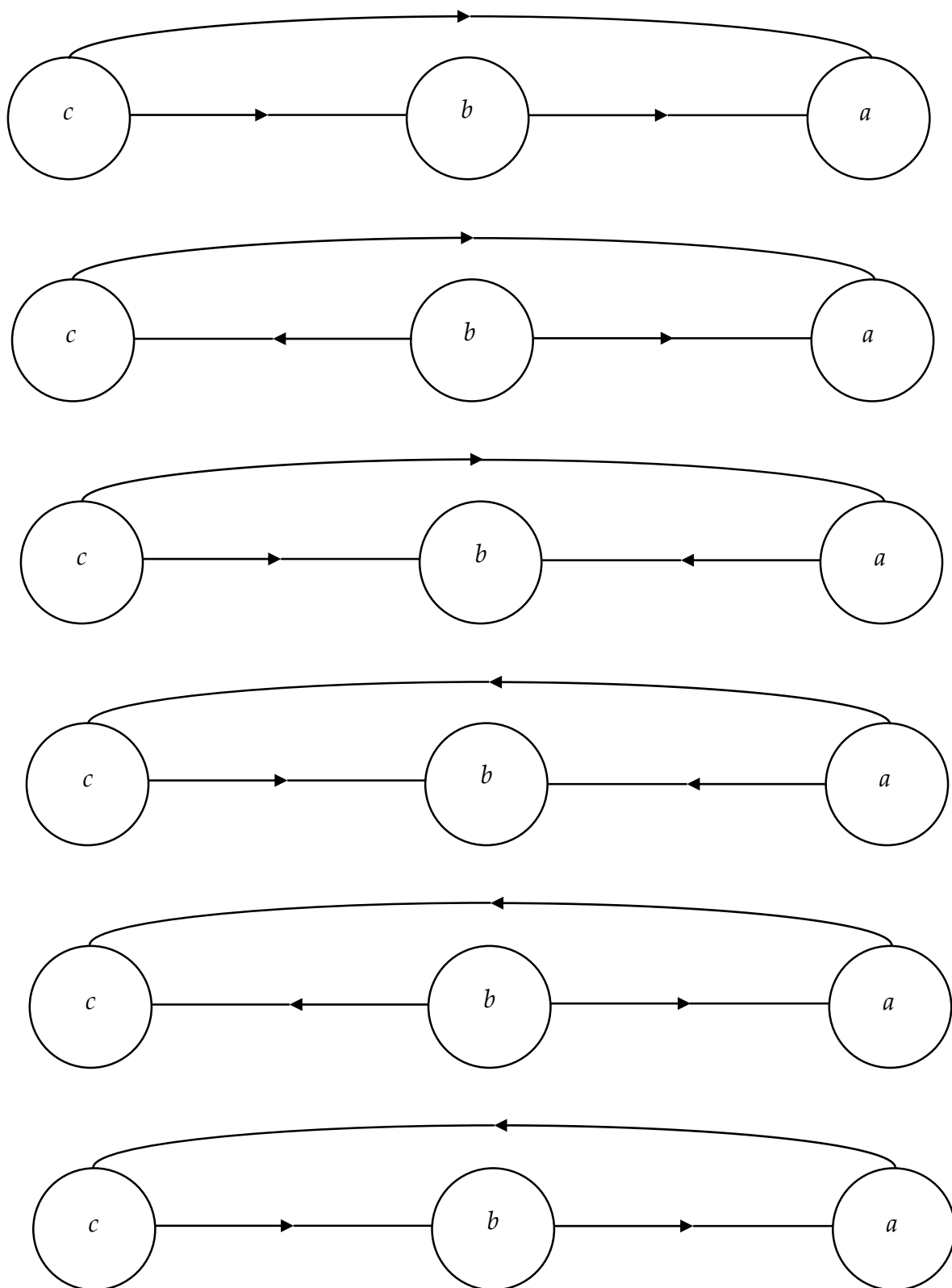
Što se tiče čvorova odluke, prema dijagramu uticaja jedina dostupna informacija kada se donese bilo kakva odluka je ona koju predstavljaju direktni prethodnici odluke. Dodavanje nove strelice, ili uticaja uslovljenih informacijama, doprinelo bi uništenju originalne logike dijagrama uticaja koja je važila do momenta dodavanja nove strelice. Situacija za slučajne čvorove je složenija.

Dijagram uticaja, kada posmatramo čvorove slučaja, delimično ograničava redosled verovatnoće uslovljavanja (proširenja) za čvorove slučaja [111,112].

U opštem slučaju, dodela verovatnoće za dati čvor slučaja, a , može biti uslovljena svim nenaslednicima (osim samog a). Obeležimo ovaj skup sa N_a , i neka je D_a skup direktnih prethodnika a .

Skup D_a je, naravno, sadržan u N_a . Dijagram potvrđuje da je dodela verovatnoće a datog N_a ista kao i a datog D_a ; to je [111]:

$$\{a | N_a, E\} = \{a | D_a, E\}. \quad (3.35)$$



Slika 3.10. Dijagrami uticaja za $\{a, b, c \mid I\}$ [111]

Dodavanje nove strelice ili uslovljavajućeg uticaja od elementa N_a na a bi povećalo skup direktnih prethodnika. Logika dijagrama uticaja ostala bi ista, međutim, došlo bi do gubitka informacija u vezi sa nezavisnošću dodatnog uslovljavajućeg uticaja.

Prema drugom pravilu, sve odluke moraju biti donete u cilju optimizacije iste mere vrednosti. Međutim, za izračunavanje jedne mere vrednosti može se koristiti više čvorova vrednosti [111,112].

Treće pravilo se odnosi na to da svaka informacija koja je poznata u trenutku kada se odluka donese mora biti savršeno zapamćena, odnosno ne sme biti zaboravljena, kada se donese bilo koja naredna odluka. Ovo podrazumeva da mora postojati strelica između svakog para odluka, pri čemu su uključeni samo čvorovi odluke. Postojanje strelice između neizvesnosti i odluke zahteva i postojanje strelice od te neizvesnosti do bilo koje naredne odluke [111,112].

Neki dijagrami uticaja nemaju odgovarajuća stabla odlučivanja. Za razliku od čvorova u stablu odlučivanja, čvorovi u dijagramu uticaja ne moraju biti potpuno poređani niti moraju direktno zavisiti od svih prethodnika. Ako dijagram predstavlja jednog donosioca odluke koji ne zaboravlja informacije, onda skup direktnih prethodnika jedne odluke mora biti podskup skupa direktnog prethodnika bilo koje naredne odluke [111,112].

3.4. Intervalne verovatnoće

Polje intervalne analize je kreirano kao sredstvo za ograničavanje greške koja nastaje kada se proračuni izvode na realnim brojevima pomoću digitalnog računara [114]. Naučno izračunavanje najčešće počinje sa netačnim/nepreciznim početnim podacima. Cilj je odrediti približne vrednosti određenih veličina iz formula ili jednačina koje će obično biti samo približni opisi prirodnih odnosa između uključenih veličina.

Često postoji potreba za korišćenjem približne aritmetike, koja nosi samo određeni broj decimalnih (ili binarnih) cifara zbog neefikasnosti pokušaja da se prenesu sve cifre [115].

Interval S je zatvoren, ograničen skup realnih brojeva [116]:

$$s \in S, \{s : S^D \leq s \leq S^G\}, \quad (3.36)$$

i predstavljen je sa $S = [S^D, S^G]$, gde su S^D i S^G donja i gornja granica S , respektivno. Širina S , u oznaci $w(S)$, je data sa:

$$w(S) = S^G - S^D + \varepsilon, \quad (3.37)$$

gde je ε proizvoljno mali broj koji sprečava $w(S)$ da bude 0. Dakle, ako je S interval od jedne tačke, onda je $w(S) = \varepsilon$.

Presek dva intervala S i L definisan je [117]:

$$S \cap L = \begin{cases} \emptyset, & \text{if } S^D > L^G \vee L^D > S^G \\ \left[\max(S^D, L^D), \min(S^G, L^G) \right], & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.38)$$

Pravila intervalne aritmetike opisana su sledećim izrazima [117]:

$$\left[S^D, S^G \right] + \left[L^D, L^G \right] = \left[S^D + L^D, S^G + L^G \right], \quad (3.39)$$

$$\left[S^D, S^G \right] - \left[L^D, L^G \right] = \left[S^D - L^G, S^G - L^D \right], \quad (3.40)$$

$$\left[S^D, S^G \right] \cdot \left[L^D, L^G \right] = \left[\min(S^D L^D, S^D L^G, S^G L^D, S^G L^G), \max(S^D L^D, S^D L^G, S^G L^D, S^G L^G) \right], \quad (3.41)$$

$$\left[S^D, S^G \right] / \left[L^D, L^G \right] = \left[\frac{\min(S^D / L^D, S^D / L^G, S^G / L^D, S^G / L^G)}{\max(S^D / L^D, S^D / L^G, S^G / L^D, S^G / L^G)} \right], \quad (3.42)$$

dok je interval koji je rezultat funkcije F na intervalu S dat sa:

$$F(S) = F\left(\left[S^D, S^G \right]\right) = \left[\min(F(S^D), F(S^G)), \max(F(S^D), F(S^G)) \right], \quad (3.43)$$

Operacija S/L je nedefinisana kada je $L^D \leq 0 \leq L^G$.

Za dva intervala $S = [S^D, S^G]$ i $L = [L^D, L^G]$, postavlja se pitanje kolika je verovatnoća da je za bilo koja dva realna broja $s \in S$ i $l \in L$, $s < op > l$ tačna, gde je $< op >$ operator u skupu $\{=, \neq, <, \leq, >, \geq\}$. Znamo da je verovatnoća da je $s = l$ jednaka 0 ako je $S \cap L = \emptyset$. Inače, ako se označi deo S u $S \cap L$ kao S_I , i deo L u $S \cap L$ kao L_I , onda je verovatnoća da je bilo koji određeni s u S_I , dat sa $\varepsilon / w(S_I)$, gde je ε neki proizvoljno mali broj.

Slično tome, verovatnoća da je bilo koji određeni broj l u $S \cap L$ je dat sa $\varepsilon / w(L_I)$. Verovatnoća da neko s leži u $S \cap L$ je $w(S_I) / w(S)$ i verovatnoća da neko l leži u $S \cap L$ je $w(L_I) / w(L)$. Napominjući da je $S_I = L_I$, zaključuje se da je verovatnoća da je $s = l$ data sa:

$$P(s = l) = \frac{\varepsilon}{w(S_I)} \cdot \frac{\varepsilon}{w(L_I)} \cdot \frac{w(S_I)}{w(S)} \cdot \frac{w(L_I)}{w(L)} = \frac{\varepsilon^2}{w(S) \cdot w(L)}, \quad (3.44)$$

kada je $w(S_I) \neq 0$ [117].

Lako se može uočiti da jednačina (4.44) takođe važi kada su S i L intervali od jedne tačke. Ako su s i l tačke, onda je $w(S) = w(L) = \varepsilon$. Ako se S i L seku, odnosno predstavljaju istu vrednost, onda je [117]:

$$P(s=l) = \frac{\varepsilon^2}{w(S) \cdot w(L)} = \frac{\varepsilon^2}{\varepsilon \cdot \varepsilon} = 1, \quad (3.45)$$

Komplement od $P(s=l)$ je:

$$P(s \neq l) = 1 - P(s=l) = 1 - \frac{\varepsilon^2}{w(S) \cdot w(L)}, \quad (3.46)$$

Analizirajući verovatnoću da je $s < l$, primećuje se da postoji šest različitih slučajeva u kojima se može izračunati $P(s < l)$. U svakom od tih šest slučajeva, kad god postoje intervali koji se seku, verovatnoća $s < l$ je data verovatnoćom da je neko s u $S \cap L$, $w(S_I)/w(S)$, verovatnoća da je neko l u $S \cap L$, $w(L_I)/w(L) = w(S_I)/w(L)$, i verovatnoća da je s manje od l u $S \cap L$. Pošto nema informacija o raspodeli vrednosti s i l unutar njihovih odgovarajućih intervala, pretpostavlja se da su one ravnomerno raspoređene. Dakle, postoji čak i šansa da $s < l$ [113]:

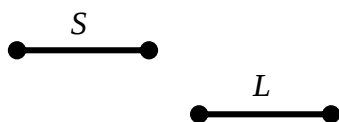
$$P(s < l) = \frac{1}{2}, \quad (3.47)$$

unutar intervala preseka. Prema tome, verovatnoća da su s i l u $S \cap L$ i $s < l$ unutar preseka je:

$$P(s < l)_I = \frac{1}{2} \cdot \frac{w(S_I)}{w(S)} \cdot \frac{w(L_I)}{w(L)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{w(S_I)^2}{w(S) \cdot w(L)}, \quad (3.48)$$

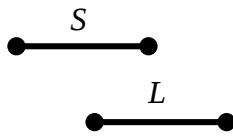
Verovatnoća da je $s < l$, i da s prethodi intervalu preseka je označena $P(s < l)_p$, dok je sa $P(s < l)_f$ označena verovatnoća da je s u intervalu preseka, a l sledi. Šest mogućih slučajeva za $s < l$ su [117]:

Slučaj 1.



U ovom slučaju, S i L se ne seku. Ceo interval S prethodi celom intervalu L te je stoga $P(s < l) = 1$.

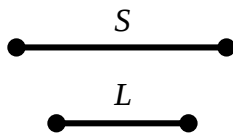
Slučaj 2.



U ovom slučaju $P(s < l)$ verovatnoća je da s prethodi $S \cap L$ ili da je $s < l$ u okviru $S \cap L$ ili s je u $S \cap L$, a l sledi. Stoga:

$$P(s < l) = P(s < l)_I + P(s < l)_P + P(s < l)_F, \quad (3.49)$$

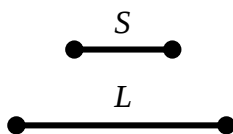
Slučaj 3.



U ovom slučaju $P(s < l)$ je verovatnoća da s prethodi $S \cap L$ ili $s < l$ u $S \cap L$. To znači da je:

$$P(s < l) = P(s < l)_I + P(s < l)_P, \quad (3.50)$$

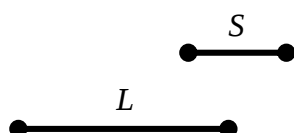
Slučaj 4.



Ovde, $P(s < l)$ je verovatnoća da je $s < l$ u $S \cap L$ ili s je u $S \cap L$ i l sledi, pa je:

$$P(s < l) = P(s < l)_I + P(s < l)_F, \quad (3.51)$$

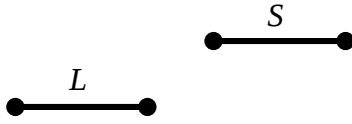
Slučaj 5.



U ovom slučaju, $P(s < l)$ je verovatnoća da je $s < l$ u $S \cap L$, ili:

$$P(s < l) = P(s < l)_I, \quad (3.52)$$

Slučaj 6.



Ovde ceo interval S prati interval L , tako da je:

$$P(s < l) = 0, \quad (3.53)$$

Da bi se odredila vrednost za $w(S_I)$, iz slučajeva 2, 3, 4, i 5 uočava se da postoje četiri moguća izraza koja se mogu formirati. To su:

$$\begin{aligned} w(S_I) &= S^G - L^D, \\ w(S_I) &= L^G - L^D, \\ w(S_I) &= S^G - S^D, \\ w(S_I) &= L^G - S^D. \end{aligned} \quad (3.54)$$

Minimumi ovih razlika daju tačan presek za gornja četiri slučaja. Može se uočiti da će za slučaj 1, presek 1 uvek biti negativan, što ukazuje da ne postoji presek. Za slučaj 6, presek 4 biće negativan. Sada kombinujući ove rezultate dobija se [117]:

$$w(S_I) = \max(\min(S^G - L^D, L^G - L^D, S^G - S^D, L^G - S^D), 0), \quad (3.55)$$

Ako bilo koja od četiri razlike izraza (3.54) daje negativan rezultat, onda ne postoji interval preseka tako da je $w(S_I) = 0$. Inače, minimalna vrednost je stvarni interval preseka. Verovatnoća da je $s < l$ u S_I dobija se umetanjem jednačine (3.55) u jednačinu (3.46):

$$P(s < l)_I = \frac{\left(\max(\min(S^G - L^D, L^G - L^D, S^G - S^D, L^G - S^D), 0) \right)^2}{2 \cdot w(S) \cdot w(L)}, \quad (3.56)$$

Za $P(s < l)_p$ cilj je pronaći verovatnoću da s prethodi preseku S i L (ako ih ima), i da l sledi iza (prati) s u svakom slučaju. U slučaju 1, $w(S_I) = 0$ zato što S ceo prethodi L tako da je $P(s < l)_p = w(S)/w(S) = 1$. Obrnuto, L potpuno prati S i onda je verovatnoća da l prati s $w(L)/w(L) = 1$.

Za slučajeve 2 i 3, vrednost S koja prethodi S_I je $L^D - S^D$ i $P(s < l)_p = (L^D - S^D)/w(S)$. Ovde se opet može reći da je verovatnoća da l prati s jednaka 1, kada s prethodi S_I .

Za slučajeve 4, 5, i 6, s nikada ne prethodi S_I tako da je $P(s < l)_p = 0$. Treba imati na umu da je za ove slučajeve verovatnoća da l prati s nevažna.

Sada se ovi slučajevi mogu kombinovati za formiranje [117]:

$$P(s < l)_P = \frac{\min(w(S), \max(L^D - S^D, 0))}{w(S)} \cdot \frac{w(L)}{w(L)}, \quad (3.57)$$

Za $P(s < l)_F$ verovatnoća da je s u S_I i da l sledi, $w(S_I) = 0$ u slučajevima 1 i 6, tako da je $P(s < l)_F = 0$. U slučajevima 3 i 5, nijedan deo L ne prati S_I , tako da je opet $P(s < l)_F = 0$.

Za slučajeve 2 i 4, vrednost L koja prati S_I je $L^G - S^G$, i $P(s < l)_F = (L^G - S^G)/w(L)$. Znamo da verovatnoća da je s u S_I je $w(S_I)/w(S)$, i verovatnoća da l prati S_I za kombinovane slučajeve je $\max(L^G - S^G, 0)/w(L)$.

Stoga sledi [117]:

$$P(s < l)_F = \frac{w(S_I)}{w(S)} \cdot \frac{\max(L^G - S^G, 0)}{w(L)}, \quad (3.58)$$

i uopštem slučaju,

$$P(s < l) = P(s < l)_I + P(s < l)_P + P(s < l)_F, \quad (3.59)$$

Sada treba obratiti pažnju na pronalaženje faktora poverenja za logičke relacije promenljivih koje se sastoje od dvostrukih intervala realnih brojeva.

Da bi se izvela jednačina za S i L koja se sastoji od dvostrukih intervala, treba uočiti da je verovatnoća $s < op > l$ istinita i može se izraziti kao zbir verovatnoća svake kombinacije svakog intervala S and L [117]:

$$\begin{aligned} &S_1 \text{ and } L_1, \\ &S_1 \text{ and } L_2, \\ &S_2 \text{ and } L_1, \\ &S_2 \text{ and } L_2. \end{aligned} \quad (3.60)$$

Uopšteno govoreći, neka $S_{I_{ij}}$, predstavlja presek S_i i L_j , N broj intervala u S i M broj intervala u L . Dakle, $P(s < op > l)$ za više intervala se može izraziti kao:

$$P(s < op > l) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M P(S_i < op > L_j), \quad (3.61)$$

Dakle, na osnovu jednačine (3.44) imamo [117]:

$$P(s = l) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M C_0 \cdot \frac{\varepsilon^2}{w(S) \cdot w(L)}, \quad (3.62)$$

gde je:

$$C_0 \begin{cases} 1, \text{ if } w(S_{I_{ij}}) > 0 \\ 0, \text{ if } w(S_{I_{ij}}) = 0 \end{cases} \quad (3.63)$$

Iz jednačine (3.36) sledi [117]:

$$P(s \neq l) = 1 - P(s = l), \quad (3.64)$$

Jednačine (3.46), (3.57) i (3.58) daju:

$$P(s < l) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \left[C_1 \cdot \frac{w(S_{I_{ij}})^2}{w(S) \cdot w(L)} + \frac{\min(w(S_i), \max(L_j^D - S_i^D, 0))}{w(S)} \cdot \frac{w(L_j)}{w(L)} + \frac{w(S_{I_{ij}})}{w(S)} \cdot \frac{\max(L_j^G - S_i^G, 0)}{w(L)} \right], \quad (3.65)$$

gde je:

$$C_0 \begin{cases} 0, \text{ when } w(S) = \varepsilon \text{ or } w(L) = \varepsilon \\ \frac{1}{2}, \text{ when } w(S) > \varepsilon \text{ and } w(L) > \varepsilon \end{cases} \quad (3.66)$$

Prvi izraz odgovara $P(s < l)_I$, drugi odgovara $P(s < l)_P$, a treći $P(s < l)_F$.

Iz jednačine (3.55) sledi [117]:

$$w(S_{I_{ij}}) = \max\left(\min(S_i^G - L_j^D, L_j^G - L_j^D, S_i^G - S_i^D, L_j^G - S_i^D), 0\right), \quad (3.67)$$

3.5. Teorija grubih skupova

Teorija grubih skupova je prvobitno razvijena za konačni univerzum diskursa u kome je baza znanja particija, koja se dobija bilo kojom relacijom ekvivalencije definisanom na univerzumu diskursa [118,119].

U gruboj teoriji skupova, podaci su organizovani u tabeli koja se zove tabela odlučivanja. Redovi tabele odluka odgovaraju objektima, a kolone atributima. U skupu podataka oznaka klase označava klasu kojoj svaki red pripada. Oznaka klase se zove atribut odluke, ostali atributi su atributi uslova.

Teorija grubih skupova definiše tri regiona na osnovu ekvivalentnih klasa indukovanih vrednostima atributa: donja aproksimacija, gornja aproksimacija i granica. Donja aproksimacija sadrži sve objekte koji su klasifikovani tačno na osnovu prikupljenih podataka, a gornja aproksimacija sadrži sve objekte koji se mogu klasifikovati sa određenom

verovatnoćom, dok je granica razlika između gornje aproksimacije i donje aproksimacije [118,119].

Neka je G određeni skup koji se zove univerzum, i neka je E relacija ekvivalencije na G . Par $V = (G, E)$ naziva se aproksimacioni prostor, dok E predstavlja relaciju nerazberivosti. Ako $h, u \in U$ i $(h, u) \in E$ kažemo da se h i u ne razlikuju u V .

Podskupovi G biće označeni sa B, C, D , moguće sa indeksima. Prazan skup će biti označen sa 0 , a univerzum G će biti označen sa 1 .

Klase ekvivalencije relacije E su elementarni skupovi (atomi) u V . Skup svih elementarnih skupova u V biće označen sa G/E .

Pretpostavljamo da je prazan skup takođe elementaran u svakom V .

Svaka konačna unija elementarnih skupova u V naziva se sastavljeni skup u V . Porodica svih sastavljenih skupova u V biće označena kao $Com(V)$. Očigledno je $Com(V)$ Bulova algebra, tj. porodica svih sastavljenih skupova je zatvorena pod presekom, unijom i komplementom skupova [118,119].

Neka je B određeni podskup G . Najmanje sastavljeni skup u V koji sadrži B označava najbolju gornju aproksimaciju B u V , predstavljeno simbolima $V_V^U(B)$. Najveći sastavljeni skup u V koji sadrži B označava najbolju nižu aproksimaciju B u V , simbolima predstavljeno $V_V^L(B)$.

Ako je poznato V , umesto $V_V^U(B)$ i $V_V^L(B)$ označavaće se $V^U(B)$ i $V^L(B)$. Skup $T_V(B) = V_V^U(B) - V_V^L(B)$ (kraće $T(B)$) zvaće se granicom B u V .

Skupovi $H_V^L(B) = B - V_V^L(B)$ (kraće $H^L(B)$) i $H_V^U(B) = V_V^U(B) - B$, (kraće $H^U(B)$) se pominju kao unutrašnja i spoljašnja ivica B u V , respektivno. Naravno $T_V(B) = H_V^U(B) \cup H_V^L(B)$.

Dve funkcije pripadnosti $\in_V^L, \in_V^U$, zvane jaka i slaba pripadnost, respektivno, definisane su kao [118,119]:

$$\begin{aligned} h \in_V^L B &\Leftrightarrow h \in V_V^L(B) \\ h \in_V^U B &\Leftrightarrow h \in V_V^U(B)' \end{aligned} \quad (3.68)$$

Ako je $h \in_V^L B$, to znači da B sigurno pripada B u V , dok $h \in_V^U B$ znači da B moguće pripada B u V . Tako se mogu tumačiti aproksimacije kao parnjake nužnosti i mogućnosti u modalnoj logici.

Naravno, važi:

$$\begin{aligned} V_V^L(B) &= \{h : h \in_V^L B\} \\ V_V^U(B) &= \{h : h \in_V^U B\}' \end{aligned} \quad (3.69)$$

Lako je proveriti da li prostor aproksimacije $V=(G,E)$ definiše jedinstveno topološki prostor, J_V gde je $J_V=(G, Com(V))$, i $Com(V)$ su porodica svih otvorenih skupova u J_V i G/E je osnova za J_V .

Iz definicije (donje i gornje) aproksimacije sledi da je $Com(V)$ skup svih otvorenih i zatvorenih skupova u J_V . Stoga, $V_V^L(B)$ i $V_V^U(B)$ može se tumačiti kao unutrašnjost i zatvaranje skupa B u topološkom prostoru J_V , respektivno.

Ako je $V_V^L(B)=V_V^U(B)$ za svaki $B \subset G$, onda $V=(G,E)$ nazivamo diskretnim aproksimacionim prostorom. Naravno diskretni prostor aproksimacije V generiše diskretni topološki prostor J_V .

Neka je $V=(G,E)$ aproksimacioni prostor i neka $B, C \subset G$. Važi:

- skupovi B, C su približno jednaki donjoj granici u V , simbolima $B \approx C \Leftrightarrow V_V^L(B)=V_V^L(C)$.

- skupovi B, C su približno jednaki gornjoj granici u V , simbolima $B \simeq C \Leftrightarrow V_V^U(B)=V_V^U(C)$.

- skupovi B, C su približno jednaki u V , simbolima $B \approx C \Leftrightarrow B \approx C \wedge B \simeq C$

Neka je $V=(G,E)$ aproksimacioni prostor, i neka su $\approx, \simeq, \approx$, relacije ekvivalentnosti $P(G)$. Svaki aproksimacioni prostor $V=(G,E)$ definiše se sledećim trima aproksimacionim prostorima:

$$V^{L*}=(P(G), \approx)$$

$$V^{U*}=(P(G), \simeq) \tag{3.70}$$

$$V^*=(P(G), \approx),$$

u kom su objekti podskupovi G , a relacije $\approx, \simeq, \approx$, su relacije nerazberivosti u odgovarajućim prostorima V^{L*}, V^{U*}, V^* .

Aproksimacioni prostor V^* (V^{L*}, V^{U*}) naziva se (*donje, gornje*) proširenje V . Klase ekvivalencije relacija $\approx (\approx, \simeq)$ nazivaju se grubi (*donji, gornji*) skupovi.

Dakle, grubi (donji, gornji) skup je porodica podskupova od G , koji su ekvivalentni u odnosu na relaciju nerazberivosti $\approx (\approx, \simeq)$.

Svaki aproksimacioni prostor V^{L*}, V^{U*}, V^* indukuje topologiju $Com(V^{L*}), Com(V^{U*})$, i $Com(V^*)$ respektivno, pa otuda i topološki prostori:

$$J_{V^{L^*}} = (P(G), \text{Com}(V^{L^*}))$$

$$J_{V^{U^*}} = (P(G), \text{Com}(V^{U^*})) \quad (3.71)$$

$$J_{V^*} = (P(G), \text{Com}(V^*))$$

dok, $P(G)/\approx$, $P(G)/\simeq$, i $P(G)/\sim$ su baze za odgovarajuće topološke prostore.

Drugim rečima, $P(G)/\approx$, $P(G)/\simeq$, $P(G)/\sim$ su porodice ekvivalentnih klasa relacija $\approx$, $\simeq$, $\sim$ respektivno, tj., porodice osnovnih klasa u odgovarajućim aproksimacionim prostorima V^{L^*} , V^{U^*} , V^* . Dakle, skupovi koji su u istoj klasi ekvivalencije aproksimacionog prostora $V^*(V^{L^*}, V^{U^*})$, su u smislu slični i nismo u mogućnosti da ih razlikujemo u prostoru aproksimacije $V^*(V^{L^*}, V^{U^*})$.

3.6. Određivanje i procena rizika

Svaka odluka u čovekovom svakodnevnom životu predstavlja vrstu rizika. Rizici su prisutni u svakoj sferi čovekovog delovanja. Takođe, ogroman broj rizika dolazi i iz čovekove okoline i često se identifikuju kao vanredne situacije. U zavisnosti da li spadaju u čiste ili spekulativne, rizici se dele na istorijske i ekonomske rizike.

U zavisnosti od toga da li postoji mogućnost ili nemogućnost izbora i izvesnost ili neizvesnost ishoda zavisi da li postoji ili ne postoji rizik. Da li će neki događaj biti izvestan ili neizvestan zavisi od stanja okruženja gde se razmatrani događaj realizuje. Postoje sledeća stanja okruženja:

- stanje određenosti;
- stanje rizika;
- stanje neizvesnosti.

Neizvesnost nastaje zbog [120]:

- postojanje suprotnih interesa;
- prirodne nepogode;
- nepredvidivost prirodnih pojava;
- nedostatak informacija od značaja za posmatranu pojavu ili objekat;
- nepredvidivost posledica naučno-tehnološkog razvoja;
- ograničenost resursa pri donošenju odluka;
- ograničenost mogućnosti saznanja.

Elementi koji čine suštinu rizika su [120]:

- mogućnost biranja alternativa;
- verovatnoća ostvarivanja željenog rezultata;
- nedostatak uverenja da je postavljeni cilj moguće dostići;

- mogućnost gubitaka;
- mogućnost odustajanja od željenog cilja.

U zavisnosti od naučne discipline, prirodnih ili društvenih nauka, rizik se posmatra i opisuje na različite načine [121]. U skladu sa tim, različite naučne discipline primenjuju različite forme znanja o neivesnosti. Dok se u lingvistici rizik posmatra kroz koncept, u ekonomiji kroz fenomen odlučivanja, u umetnosti kroz emocionalni fenomen, u logici i matematici se rizik posmatra kroz prizmu fenomena koji može da se izračuna. Neophodna forma znanja za lingvistiku je terminologija i značenje, za ekonomiju principi odlučivanja i postulati, za umetnost emocija, dok je za logiku i matematiku proračun [121].

Priroda rizika može biti objektivna, subjektivna ili objektivno-subjektivna. Nemogućnost jednoznačnog predviđanja pojave rezultata koji se očekuje zbog različitih stohastičkih procesa u kompleksnim sistemima povezana je sa objektivnom prirodom rizika. Donošenje odluka pojedinaca u potencijalnim vanrednim situacijama povezana je sa subjektivnom prirodom rizika. Iako se mnoge vanredne situacije dešavaju nezavisno od želje čoveka, čovek je osnovni faktor u tim situacijama. Kada je postojanje rizika uslovljeno procesima koji zavise od čoveka, kao i procesima koji ne zavise od čovekovih saznanja i želje, onda je priroda rizika objektivno-subjektivna.

Priroda rizika može biti posmatrana kroz klasičan pristup zasnovan na teoriji verovatnoće i savremen pristup zasnovan na nelinearnoj dinamici. Za razliku od klasičnog pristupa, savremeni pristup slučajnost ne posmatra samo kao posledicu delovanja mnogo različitih faktora, već uvodi i pojam osetljivosti sistema na početne uslove koji utiču na slučajnost.

Razvoj tehnologije poslednjih decenija XX veka doprineo je sagledavanju novih rizika sa sledećim karakteristikama [122]:

- ne postoji ograničenost vremensko-prostornih štetnih dejstava;
- nemogućnost formiranja uzročno-posledičnog odnosa koji bi doveo do odgovornosti pojedinca ili organizacije, već je prouzrokovana šteta posledica odluka i ponašanja velikog broja ljudi i velikih sistema;
- nemogućnost tačne spoznaje novih rizika zbog njihove apstraktnosti;
- dinamička struktura rizika koja onemogućava tačno sagledavanje iz ekonomskog ugla;
- nemogućnost predviđanja novih rizika zbog nemogućnosti sagledavanja štetnog uticaja upotrebe savremene tehnologije.

Savremeni rizici, odnosno rizici budućnosti predstavljaju rizike koji se moraju posmatrati kao kompleksni sistemi kako bi mogli da budu sagledani na pravi način. Savremeni rizici se grupišu u sledeće kategorije [123]:

- rizici tehnologije (biotehnologija, genetički inženjering, nanotehnologija, sajber tehnologija, smart tehnologija...),
- rizici čiji konačan oblik još nije kreiran (upotreba azbesta u slabo razvijenim zemljama, rizici lanca snabdevanja, rizici prehrambene industrije...),

- rizici čija je verovatnoća negativnih posledica veoma velika (klimatske promene, pandemije, megagrađovi, geopolitika, terorizam...).

3.6.1. Definicija rizika

Rizik se ne može definisati jednom opštom definicijom jer se rizik zasniva na više različitih pojmova. Takođe, rizik se može posmatrati sa jedne strane kao subjektivna kategorija, dok sa druge strane može imati i ontološki karakter [124].

Prema Avenu, definicije rizika se mogu podeliti u devet kategorija [124]:

- rizik predstavlja planirani gubitak;
- rizik predstavlja verovatnoću pojave neplaniranog događaja;
- rizik je realna neizvesnost;
- rizik je neizvesnost;
- rizik je šansa ili potencijal gubitka;
- rizik predstavlja važnost prepoznatih konsekvenci;
- rizik je jednak konsekvencama;
- važnost prepoznatih konsekvenci i odgovarajuća neizvesnost čine rizik;
- rizik je jednak uticaju neizvesnosti na posmatrane ciljeve.

U skladu sa ovim kategorijama rizik se može definisati na sledeće načine [122,124]:

- rizik je jednak pretpostavljenoj nepouzdanosti sistema;
- rizik je verovatnoća da se zbog izvesne pretnje jave nepoželjne posledice po živi svet i okolinu [125];
- rizik predstavlja neizvesnot koju je moguće odrediti [126];
- rizik opisuje nepredvidivost krajnjih rezultata, akcija i događaja [127];
- rizik je jednak verovatnoći događaja koji dovodi do gubitka ili povrede [128];
- rizik je mera dalekosežnosti neočekivanih efekata [129];
- rizik je pojava koja dovodi ljudski život i vrednosti u opasnost sa neizvesnim ishodom [130];
- rizik predstavlja uzročno-posledičnu vezu između neizvesnosti i događaja, odnosno posledica, povezanih sa tim neizvesnostima [131];
- rizik je jednak intenzitetu neizvesnosti na ostvarivanje ciljeva [132].

Kombinacija događaja A , posledica C događaja A i pridružena neizvesnost U predstavlja rizik [133]:

$$Rizik = (A, C, U). \quad (3.72)$$

Ovako definisan, rizik se posmtara kao neizvesnost i ozbiljnost posledica aktivnosti.

Za opis neizvesnosti obično se koriste verovatnoće P bazirane na znanju [133]:

$$Rizik = (A, C, P, U, K), \quad (3.73)$$

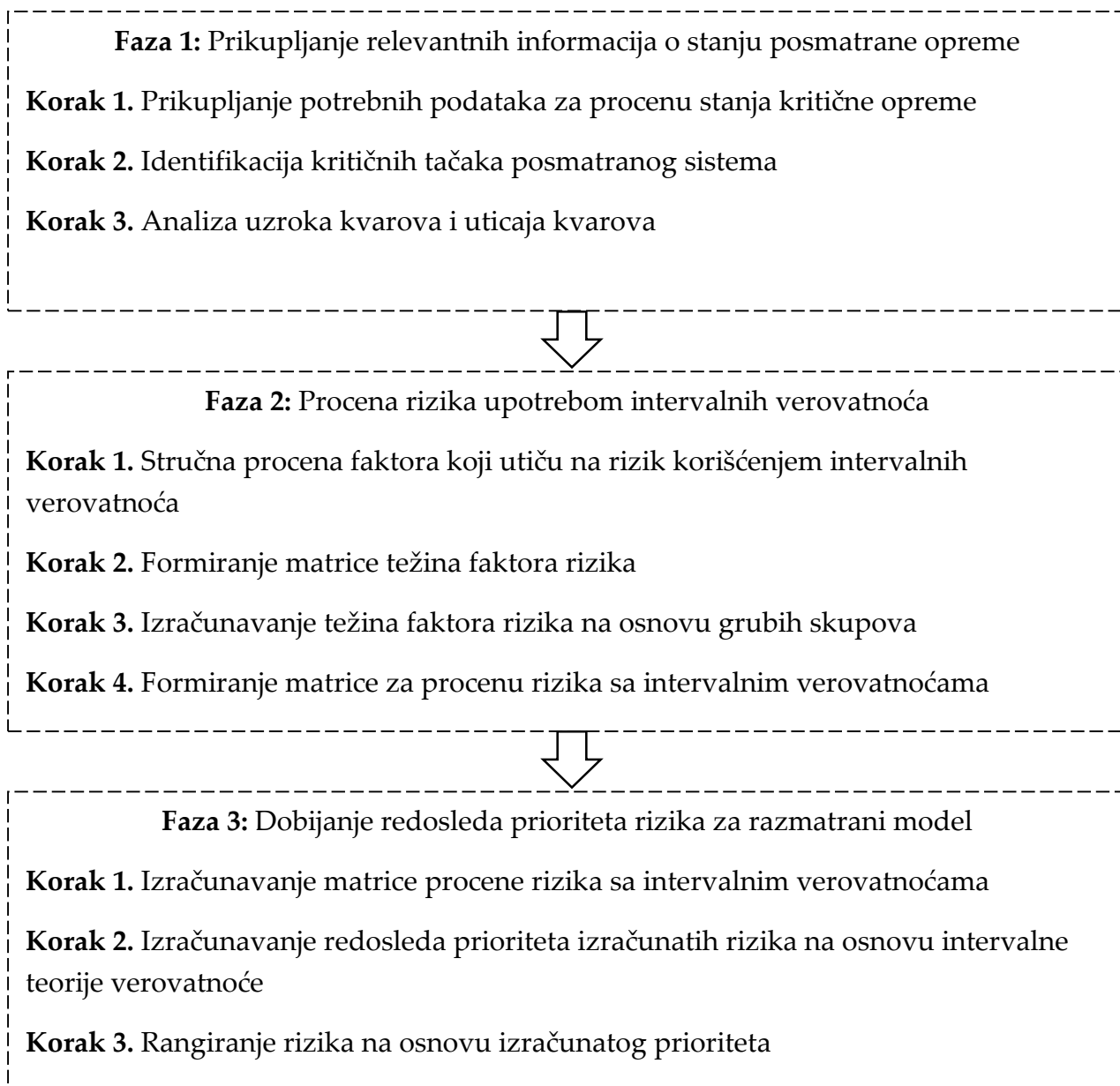
gde je P subjektivna verovatnoća događaja A bazirana na znanju, dok je sa K opisano određeno znanje.

U opštem slučaju, rizik je jednak:

$$Rizik = (A, C, Q, U, K), \quad (3.74)$$

gde Q može biti kvantitativna ili kvalitativna mera neizvesnosti.

Na slici 3.11. je prikazan okvir za procenu rizika zasnovan na ekspertskoj proceni korišćenjem intervalnih verovatnoća.



Slika 3.11. Okvir predloženog modela procene rizika korišćenjem intervalnih verovatnoća

3.6.2. Upravljanje rizikom u tehničkim sistemima

Upravljanje rizikom u tehničkim sistemima je od vitalnog značaja za pouzdan rad posmatranog sistema. Održavanje zasnovano na pouzdanosti (RCM) je nadograđeno novim pristupom koji predstavlja održavanje koje se zasniva na riziku (RBI). Ova dva pristupa su veoma slična u smislu da RBI funkcionalnost sistema opisuje na osnovu istih upita kao i RCM, čime ostvaruje svoje ciljeve.

Razlika između ova dva pristupa se ogleda u korišćenoj metodologiji pomoću koje se određuje kojem će se događaju dodeliti koliki prioritet u smislu pojave otkaza komponenti. U skladu sa tim, vrši se izbor koju akciju preduzeti u cilju održavanja radi sprečavanja otkaza komponenti.

Za uspešnu primenu RBI neophodno je izvršiti kvantifikaciju rizika, tj. potrebno je formirati ocene o trenutnom stanju posmatranih elemenata od kojih zavisi pouzdan rad sistema, kao i ocene o stanju celokupnog sistema, ili određenog dela sistema [134-139]. Na taj način, formira se matrica rizika na osnovu koje je moguće analizirati uzročno-posledične veze između rizika i aktivnosti za smanjenje posmatranog rizika.

Formiranje skale pomoću koje se vrši ocenjivanje može biti izvršeno na više načina. Jedan od načina prikazan je u radu [140], gde se razmatrani kriterijumi ocenjuju ocenama od jedan do pet, pri čemu najmanja ocena opisuje najveću verovatnoću pojave nepovoljnog scenarija, dok je najveća ocena, u ovom slučaju pet, jednaka najmanjoj verovatnoći pojave nepovoljnog scenarija. Takođe, posledice nepovoljnih scenarija se takođe ocenjuju ocenama od jedan do pet, tako da ocena jedan označava da su posledice zanemarljive, dok ocena pet označava veoma ozbiljne posledice.

Prioritet aktivnosti koja će biti preuzeta zavisi od zone kojoj pripada posmatrani rizik. Obično se definišu zone velikog rizika, srednjeg rizika i malog rizika, i određuju se na osnovu formirane matrice rizika. Na ovaj način izvršno je sagledavanje rizika srednjenaponskih prekidača snage u bezbednosnom smislu uklopničara [141]. Na isti način izvršeno je i ocenjivanje stanja sistema u [142].

Na stanje posmatrane komponente sistema utiče više različitih značajnih faktora. Da bi se realno sagledao uticaj više različitih faktora na stanje posmatrane komponente, vrši se formiranje jedinstvenog indeksa na osnovu svih faktora.

U zavisnosti od procene stanja postoji mogućnost i formiranja pokazatelja rizika. Rizik može biti ocenjen težinskim faktorima, odgovarajućom skalom, na isti način kao što se vrši ocenjivanje faktora rizika.

Na primer, postupak koji se primenjuje u ogromnom broju britanskih distributivnih kompanija, za ocenu rizika na osnovu stanja posmatranih komponenti je [143]:

- pomoću skale od 1 do 10, vrši se ocenjivanje trenutnog stanja i ispravnosti opreme;
- trenutno stanje i ispravnost opreme upoređuje se sa performansama;
- vrši se procena stanja i karakteristika u budućem vremenu;
- vrši se predikcija potencijalnih aktivnosti u cilju veće pouzdanosti sistema;

- sagledavaju se posledice otkaza;
- kreira se što je moguće sveobuhvatniji model rizika;
- vrši se predviđanje potencijalnih aktivnosti u cilju minimizacije rizika;
- ponovno sagledavanje i usaglašavanje raspoloživih informacija i procedura.

U uputstvima CIGRE za dodelu prioriteta aktivnostima koje bi trebalo sprovesti u cilju servisiranja nadzemnih vodova, sadržana je sledeća odredba: menadžment, između ostalih ciljeva, treba da u posmatranom investicionom periodu maksimalno smanji godišnje troškove, odnosno njihovu svedenu vrednost. Zbir očekivanih troškova i novčanog godišnjeg rizika jednak je godišnjim troškovima:

$$\text{Godišnji troškovi} = \text{Planirani troškovi} + \text{Godišnji novčani rizik} . \quad (3.75)$$

Očekivane troškove čine investicije diskontovane na početnu godinu, održavanje i operativni troškovi. Troškovi, izraženi u novcu, koji nastaju zbog otkaza sistema, definišu rizik. Pored novca, rizik se može predstaviti i oceniti i na druge načine [138,139].

Ozbilnost štetnog događaja može se posmatrati i kroz razne druge odnose, kao što je razlika između trenutnog napona i nominalnog napona, opterećenje mreže, nestabilnost napona i slično. Prikazani model razmatra sisteme koji obuhvataju i proces proizvodnje i proces prenosa, tako da za uspešnu primenu u distributivnom sistemu potrebne su određene korekcije modela.

Uticaj aktivnosti održavanja m u posmatranom trenutku t na određenu komponentu k ima za efekat smanjenje rizika jer se održavanjem produžava životni vek posmatrane komponente i smanjuje verovatnoća otkaza.

Svrha opisanog modela jeste ostvarivanje najviše pouzdanosti sistema pravovremenim održavanjem delova koji čine sistem, uklapajući se u finansijska i ograničenja u smislu ljudskih kapaciteta, ispunjavajući sigurnosne standarde distributivne mreže.

Upravljanje rizikom postaje začajan činilac u oceni kvaliteta distributivnih mreža od momenta kada je tržište električne energije postalo slobodno. Pre toga, kvalitet se procenjivao pre svega na osnovu pouzdanosti sistema.

Veoma često se rizik i pouzdanost koriste u istom smislu, pri čemu se polazi od pretpostavke da imaju iste posledice. Veća pouzdanost sistema znači manji rizik. Takođe, veliki rizik sistema znači malu pouzdanost istog. Zbog toga, rizik se određuje kao proizvod verovatnoće da će doći do otkaza u sistemu i realnih troškova kojima taj otkaz doprinosi. Procenjivanjem svake pojedinačne komponente, omogućava se definisanje rizika nad celim razmatranim sistemom.

Zaključci koji se mogu dobiti analizirajući rešenja zasnovana na analizi rizika i paradigmi probablističkog izbora, koja su primenjena na problem planiranja, su sledeći:

- Ne postoji potvrda pretpostavki paradigmi probablističkog izbora u velikom broju slučajeva u smislu statističke sigurnosti da će povoljni događaji nadomestiti nepovoljne događaje.

- Linearna priroda paradigme probabilističkog izbora u sistemu događaja utiče negativno na veliki broj kompromisnih rešenja.
- Cilj paradigme probabilističkog izbora jeste davanje većeg prioriteta rešenjima koja su više rizična.

Posmatrano iz ugla korporativnog i strateškog nivoa, strogo sprovođenje procesa upravljanja rizikom omogućava značajno unapređenje svih operativnih parametara. O značaju ovog procesa govori i podatak da je veliki broj bogatijih zemalja već ratifikovala standarde od nacionalnog značaja za upravljanjem rizikom.

Standard ISO 31000 definiše osnovne postulate upravljanja rizikom [132]:

- Stvaranje i zaštita vrednosti omogućena je upravljanjem rizikom. Upravljanje rizikom igra važnu ulogu u ispunjenju postavljenih ciljeva, zaštiti ljudi i životne sredine, kvalitetu, vođenju projekata, efikasnosti u radu, održanju ugleda.
- Neizostavni deo svih kratkoročnih i dugoročnih planova i procesa jeste upravljanje rizikom. Upravljanje rizikom se ne može posmatrati kao zasebna aktivnost odvojena od ostalih aktivnosti u okviru jedne organizacije.
- Donošenje odluka, kao jedan od najznačajnijih procesa u okviru jedne organizacije, značajno je olakšan pomoću procesa upravljanja rizikom. Upravljanje rizikom omogućava ekspertima da prilikom donošenja odluka imaju potpuniji uvid o svim parametrima koji utiču na donoše odluke.
- Upravljanje rizikom uzima u obzir faktor neizvesnosti prilikom donošenja odluka, izvor i osobine tih neizvesnosti, kao i njihov potencijalni uticaj.
- Upravljanje rizikom obuhvata detaljan, strukturisan, i okvir ograničen vremenom, što se značajno ispoljava kroz efikasnost i pouzdanost.
- Najpouzdanije raspoložive informacije su osnov na kome se zasniva upravljanje rizikom. Donosioci odluka imaju zadatak da na najbolji mogući način sagledaju sve dostupne podatke od interesa imajući u vidu moguće potencijalne nedostatke u podacima.
- Upravljanje rizikom je kompatibilno sa kompletnim okvirom organizacije.
- Upravljanje rizikom priznaje sposobnosti, opažanja i namere spoljašnjih i unutrašnjih ljudi, koji mogu da olakšavaju ili ometaju ostvarivanje ciljeva organizacije.
- Uključivanje donosioca odluke, kao i ostalih zainteresovanih strana, u odgovarajućem momentu, omogućava da proces upravljanja rizikom bude odgovorno i nepristrasno.
- Upravljanje rizikom je živ proces podložan izmenama. Kako se zbog nepredvidivih događaja uslovi upravljanja rizikom menjaju tako se i sam proces menja jer dolazi do pojave novih, promene postojećih i gubitka već postojećih rizika.

- Neprestano poboljšanje organizacije u svim aspektima omogućeno je procesom upravljanja rizikom.

POGLAVLJE 4

NUMERIČKI REZULTATI I DISKUSIJA

U ovom poglavlju biće predstavljeni numerički rezultati dobijeni novom tehnikom za prognozu otkaza prekidača zasnovanu na dijagramima uticaja sa intervalnim verovatnoćama. Takođe, izvršena je analiza o uticaju širine intervala na donošenje odluka za razmatrani scenario, nakon čega je izvršeno predviđanje najboljeg scenarija zamene najkritičnijih prekidača u optimalnom vremenu. Na kraju poglavlja prikazana je diskusija dobijenih rezultata.

4.1. Model procene rizika prekidača

Zamena najrizičnijih prekidača je dobra osnova za ostvarivanje veće pouzdanosti energetskog sistema, minimizovanje količine električne energije koja nije isporučena, a samim tim i uštedu u pogledu angažovanih ljudskih resursa ako se prekidač zameni pre njegovog neplaniranog kvara. Danas su prekidači sa malo ulja zamenjeni prekidačima zasnovanim na savremenim tehnologijama, kao što su vakuumski i SF6 prekidači.

Međutim, uprkos tome, većina trafostanica i dalje ima u radu veliki broj malouljnih prekidača. Karakteristika malouljnih prekidača jeste obavezno redovno održavanje, koje se ogleda u kontroli stanja ulja i podmazanosti mehanizma, kao i u vizuelnoj kontroli stanja prekidača.

Iz ovih razloga postoji potreba da se prekidači zanovani na starijoj tehnologiji zamene, zbog čega je važno utvrditi kriterijume i tempo njihove zamene. Analiza stanja prekidača i utvrđivanje rizika omogućilo bi uvid u broj najrizičnijih prekidača. Dodatno, iz ugla stabilnosti energetskog sistema i ekonomičnosti poslovanja, definisali bi se prekidači čiji kvarovi mogu izazvati najveće posledice. Na ovaj način treba predložiti za hitnu zamenu prekidače sa najvećim rizikom.

Pošto je veoma teško odrediti precizne verovatnoće preostalog veka trajanja prekidača i rizik koji oni predstavljaju za ceo elektroenergetski sistem, u ovoj disertaciji uveden je nov koncept primene intervalne verovatnoće kako bismo pronašli najbolju strategiju za dati set prekidača. Naime, na osnovu prikupljenih i dostupnih podataka o prekidačima, grupa eksperata je izvršila procenu situacije sa intervalnim verovatnoćama umesto sa preciznim verovatnoćama.

Podaci, na osnovu kojih su eksperti formirali svoje ocene i na osnovu kojih je kreiran model predstavljen u ovoj disertaciji, prikupljeni su adekvatnim merenjima i vizuelnim pregledom malouljnih prekidača snage, u skladu sa tehničkim preporukama i uputstvima proizvođača [144]. Svi prikupljeni podaci se unose u odgovarajuću bazu podataka i stavljaju se ekspertima na analizu i tumačenje.

Baza podataka se sastoji od informacija o maloukljnim prekidačima snage koji se nalaze u trafostanicama 35/10 kV koje pripadaju ogranku Elektrodistribucije Zaječar. Ukupan broj razmatranih trafostanica na tom području je četrdest i dva, dok je broj razmatranih prekidača snage četrdesto dvadeset sedam. Baza se sastoji od podataka prikupljenih u periodu od jedne decenije. Ogranak Elektrodistribucije Zaječar predstavlja jedan od šest ogrankova koji sačinjavaju Distributivno područje Niš. Osnovna delatnost ogranka jeste distribucija električne energije i upravljanje distributivnim sistemom.

Baza podataka korišćena za model kreiran u ovoj disertaciji sadržala je sledeće podatke:

- vrednost pada napona (podaci su prikupljeni merenjem tako što se jednosmerna struja, čija je vrednost definisana unapred preporukom proizvođača ili standardom IEC 62271-1, pušta kroz pol prekidača koji je zatvoren, i u tom trenutku se vrši očitavanje vrednosti [145]. Izmerene vrednosti se upoređuju sa vrednostima iz specifikacije i utvrđuje se stanje prekidača). Merenjem ove vrednosti, iz Omovog zakona jednostovano se izračunava otpornost kontakta (statičko merenje otpornosti kontakta);
- vrednost otpornosti kontakta – dinamičko merenje (u trenutku otvaranja kontakta struja se pušta i napon se meri, pri čemu se posmatra uključeno stanje. Na taj način se dobija vrednost otpornosti za vreme trajanja celog intervala otvaranja kontakta);
- merenje vremena (vrši se merenje koje pokazuje koliko je vremena potrebno da stanje položaja prekidača bude promenjeno od momenta davanja komande. Ovo merenje se izvodi nad glavnim kontaktima i pokazuje, između ostalog, da li postoji habanje kontakta);
- merenje struje špulni i motora (merenjem struje špulni dobija se kriva koja predstavlja struju u momentu kada se izdaje signal za manipulaciju položajem prekidača. Merenjem struje motora dobija se informacija o vrednostima ustaljene i udarne struje, kao i o trajanju vremenskog intervala potrebnog da bi se opruga namotala);
- kretanje kontakta (vrši se procera pokretnih delova prekidača, celog mehanizma i utvrđuje da li je došlo do habanja);
- merenje podnaponskih uslova (vrši se merenje radi utvrđivanja koja je najmanja vrednost napona za normalan rad prekidača).

Drugi podaci koji se odnose na prekidače, a koji su prikupljeni merenjem i/ili vizuelnim pregledom za potrebe analize su: naponski nivo prekidača (utvrđuje se merenjem), tip izvoda (određuje se u zavisnosti od mesta ugradnje), godina proizvodnje (utisnuta na pločici prekidača), broj isključenja kvara, broj isključenja struje kratkog spoja, broj potrošača na izvodu (utvrđuje se neposredno) i prosečna potrošnja energije (određuje se merenjem).

U normalnom režimu rada, od momenta puštanja prekidača snage u rad, prikupljanje podataka i utvrđivanje trenutnog stanja vrši se na svake dve godine. Ukoliko prekidači

snage ne rade prema utvrđenim specifikacijama i ukoliko dolazi do iznenadnih otkaza, pregledi se obavljaju u znatno kraćim vremenskim intervalima [146]. Podaci o srednjenaponskim prekidačima, koji su tema ove disertacije, sakupljaju se na svakih dvanaest meseci ili na svakih dve hiljade aktivacija.

Kao što je opisano u [147,148], proizvod verovatnoće događaja $p(E)$ i njegove posledice $Cons(E)$ za razmatrani događaj E određuje rizik povezan sa tim događajem.

$$Risk(E) = p(E) \cdot Cons(E). \quad (4.1)$$

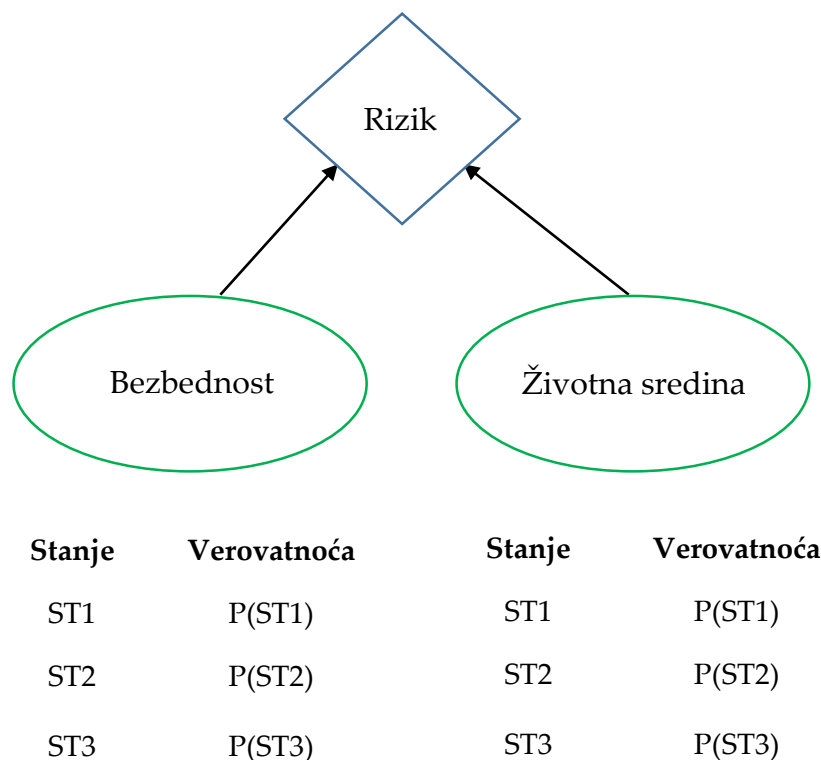
U slučaju kada se posmatraju empirijski parametri skaliranja x , y i w , prethodna jednačina postaje [149]:

$$Risk(E) = p(E)^y \cdot w \cdot Cons(E)^x. \quad (4.2)$$

Generalno, za izračunate verovatnoće opisane jednačinama (3.18)-(3.22) i (4.1)-(4.2), rizik se može izračunati na sledeći način:

$$R_i = f(C(\pi_i), P(\pi_i)). \quad (4.3)$$

Rizik se takođe može prikazati u tabeli, kao što je primer dat na slici 4.1 [150].

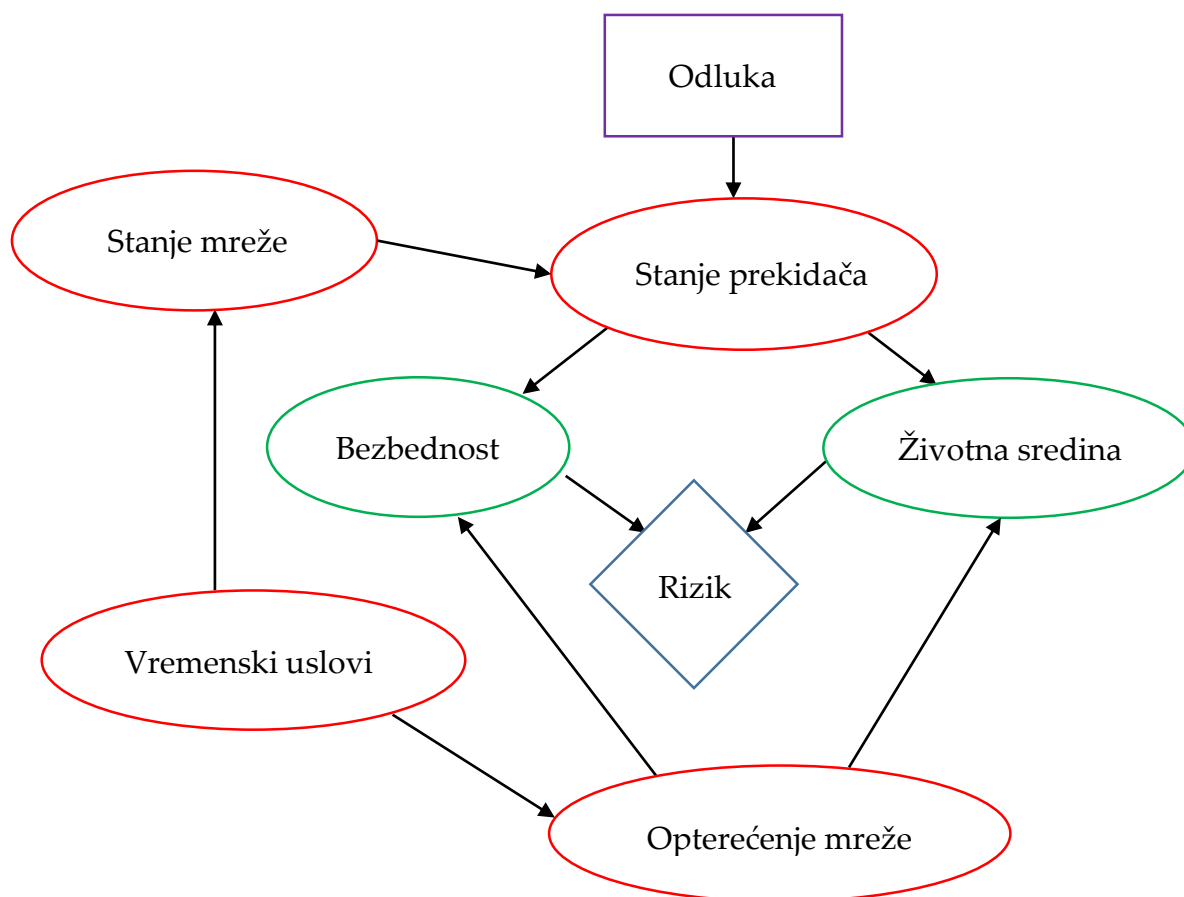


Slika 4.1. Procena rizika na osnovu dva kriterijuma

Na osnovu nivoa ova dva kriterijuma, rizik može imati vrednosti u rasponu od 1 (bez rizika) do 10 (najveći rizik). Procena rizika korišćenjem tačnih vrednosti verovatnoća za primer dat na slici 4.1 prikazana je u tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Procena rizika za primer sa slike 4.1.

Bezbednost	Verovatnoća	Životna sredina	Verovatnoća	Rizik
ST1	P(ST1)	ST1	P(ST1)	1
ST1	P(ST1)	ST2	P(ST2)	2
ST1	P(ST1)	ST3	P(ST3)	3
ST2	P(ST2)	ST1	P(ST1)	4
ST2	P(ST2)	ST2	P(ST2)	7
ST2	P(ST2)	ST3	P(ST3)	6
ST3	P(ST3)	ST1	P(ST1)	5
ST3	P(ST3)	ST2	P(ST2)	8
ST3	P(ST3)	ST3	P(ST3)	10



Slika 4.2. Model procene rizika prekidača [150]

Kompletan model procene rizika strategije održavanja prekidača koji se razmatra u ovoj disertaciji prikazan je na slici 4.2. Grafički simboli na slici 4.2 ukazuju na sledeće: narandžasta elipsa prikazuje spoljašnji uticaj, odnosno egzogenu promenljivu, vrednost koja nije uslovljena prethodnim odlukama; crvene i zelene elipse označavaju slučajne čvorove opisane slučajnim promenljivima definisanim diskretnim raspodelama verovatnoće. Odluka je predstavljena ljubičastim pravougaonikom. Endogene promenljive su određene kao funkcije odluke. Plavi romb predstavlja predmet optimizacije i klasifikovan je kao kvantitativni kriterijum. Uticaj između varijabli je opisan strelicom.

Model procene rizika prikazan na slici 4.2. kreiran je za trafostanicu sa malouklonim prekidačima. Tri alternative koje se razmatraju i koriste za donošenje odluka su ne činiti ništa, izvoditi manje intervencije ili vršiti veliki remont prekidača. Bezbednost i životna sredina su dva kriterijuma za procenu rizika na osnovu kojih se procenjuju alternative [150].

Prekidač je u radnim uslovima (NRS), nauspešno zatvaranje prekidača (NZP) i neuspešno otvaranje prekidača (NOP) su tri načina rada prekidača koja su važna u proceni. Loši vremenski uslovi dovode do toga da prekidači budu izloženi težim uslovima rada jer se povećava broj kvarova, što dovodi do pogoršanja stanja mreže i povećanja opterećenja mreže [150]. Ovo je dalje izraženo u slučaju kada je distributivna mreža pretežno nadzemna i kada dolazi do čestog nestanka struje. Vrsta distributivne mreže značajno utiče na stanje prekidača. Stanje prekidača utiče na životnu sredinu na način da curenje ulja može imati štetan uticaj na životnu sredinu. U bezbednosnom smislu, stanje prekidača može izazvati opasno dejstvo električne struje na čoveka, a može dovesti i do mehaničkih povreda, uticaja elektromagnetnog zračenja, prekomerne buke i sl [150].

Zbog neizvesnosti u pogledu vremenske prognoze — i posledično tehničkog stanja mreže, maksimalne potražnje snage mreže (opterećenja) i mogućih načina kvara — ekspertima je vrlo teško da odrede tačne vrednosti verovatnoća u tim uslovima.

Prema dijagramu prikazanom na slici 4.2., ukupan rizik prekidača se izračunava kao kombinacija dva pojedinačna rizika, a to su:

- Bezbednosni rizik, prvenstveno vezan za zdravlje i bezbednost rukovaoca trafostanice;
- Rizik po životnu sredinu u smislu izlivanja transformatorskog ulja u zemljište ili vodotoke i paljenja transformatorskog ulja i njegovog isparavanja.

Komponente prikazane na slici 4.2. koje utiču na rizik i donošenje odluka su opisane u nastavku.

Prosečan životni vek prekidača zavisi od mnogih faktora kao što su intenzitet eksploatacije, radni uslovi i nivo održavanja. U literaturi se može pronaći da se nominalni očekivani životni vek moluljnih prekidača kreće od 31.2 godine do 35 godina [151,152]. Glavni uzrok pogoršanja stanja prekidača je njegova starost, zatim, broj izvršenih operacija pri normalnom opterećenju i pri kvaru i radni uslovi kao što su temperatura i zagađenje okoline.

Stanje prekidača se može ustanoviti na osnovu otpornosti kontakata. Otpornost kontakata predstavlja jednu od najbitnijih svojstava električne mreže. Poznavanje vrednosti

otpornosti omogućava rano otkrivanje nepravilnosti u radu prekidača snage. Kada strani materijali prodru do površine kontakata dolazi do povećanja otpornosti. Povećanje otpornosti može dovesti do povećanja temperature i pogoršanja stanja prekidača. Pored povećanja temperature, na vrednost otpornosti kontakta direktno utiču i habanje, oksidacija i udarna sila. Dinamička i statička otpornost su dva načina merenja za određivanje vrednosti otpornosti. Na osnovu baze podataka koja sadrži vrednosti otpornosti merene u određenom periodu pod određenim uslovima moguće je kreirati prediktivni model na osnovu koga se može proceniti životni vek prekidača snage i planirati akcije održavanja.

Kako Omov zakon uspostavlja vezu između otpornosti i napona, u praksi se za ocenu stanja prekidača više upotrebljava vrednost pada napona jer se jednostavnije određuje postupkom merenja. Vrednost nazivnog napona prekidača snage manje utiče na dozvoljene vrednosti padova napona od vrednosti nazivne struje prekidača snage.

Uputstvo proizvođača prekidača snage propisuje dozvoljene vrednosti padova napona i one iznose +25%. Dozvoljena vrednost pada napona novog prekidača koji se priključuje u sistem je 20% manja od dozvoljene vrednosti pada napona prekidača koji je već priključen u sistem i radi određeno vreme.

Bez obzira na učestalost otvaranja i zatvaranja prekidača u određenom vremenskom periodu, postoji realna potreba za održavanjem. Ukoliko se položaj prekidača nije menjao duže od šest meseci potrebno je izvršiti proveru ispravnosti rada tako što će se posmatranom prekidaču više puta promeniti trenutni položaj (uključiti/isključiti). Takođe, potrebno je fizički ukloniti naslage koje se nakupe na kontaktima i mehaničkim delovima koji se kreću.

Česte promene položaja stanja prekidača snage (uključiti/isključiti) utiču na unutrašnju izolaciju u smislu dielektrične čvrstoće kao i na uslove koji vladaju u prostoru između kontakata, što dovodi do prekomerne potrošnje kontakata i uništavanje zidova komore.

Prilikom izrade električnih kontakata, glavni cilj kojem se teži jeste omogućiti što duži nesmetani rad prekidača snage. Tokom vremena, materijali od kojih se električni kontakti izrađuju gube određena svojstva i utiču na životni vek prekidača snage. Pronalaženje načina da i ostareli električni kontakti rade pouzdano i nakon isteka optimalnog predviđenog roka za njihov rad ogleda se pre svega u velikim ekonomskim benefitima za ceo sistem.

Preventivno delovanje i otkrivanje kvarova u što kraćem vremenskom intervalu značajno povećavaju pouzdanost celog sistema. Na taj način se sprečavaju velike havarije, sprečava zagađenje životne sredine, povećava bezbednost radnika i opreme.

U ovoj disertaciji su, na osnovu prikupljenih podataka, analize i proračuni rađeni za srednjenaponske malouljne prekidače koje je proizveo Minel. Deo podatka prikazan je u tabeli u prilogu (Tabela P.1.1.). Provera razmatranih prekidača snage je vršena isključivo prema preporukama proizvođača iz uputstva. U skladu sa propisima EPS-a definisanim u dokumentu pod nazivom Tehničke preporuke TP 15, provera prekidača snage vršena je na dve godine po rasporedu koji je unapred određen [96]. Takođe, propisane su i obavezne procedure koje se odnose na vizuelnu kontrolu prekidača i merenje pada napona. Procedura

QF-C-040 se odnosi na podatke dobijene merenjem pada napona prekidača snage, dok se procedure QF-C-032 i QF-C-033 odnose na vizuelnu kontrolu prekidača snage [153,154].

U tabelama 4.2. i 4.3. prikazane su vrednosti pada napona za tri tipa voda i za dva naponska nivoa, grupisane u četiri opsega vrednosti u zavisnosti od visine pada napona.

U prvom koraku, određeno je stanje svakog prekidača u zavisnosti da li njegov pad napona prelazi dozvoljenu vrednost ili ne. Za otkazale prekidače određena je godina u kojoj su dostigli to stanje. Ovi podaci su dalje podeljeni u sledeće kategorije u zavisnosti da li su prekidači montirani na:

- 35kV izvodima,
- 10kV izvodima,
- nadzemnim izvodima,
- kablovskim izvodima,

ili se posmatraju svi prekidači.

Tabela 4.2. Pad napona za tri tipa voda

	Pad napona [mV]			
	< 5	5-10	10-20	> 20
Kablovski vod [%]	20.41	63.44	9.30	6.86
Trafo polje [%]	15.06	63.91	13.08	7.94
Vazdušni vod [%]	36.07	45.24	11.12	7.57

Tabela 4.3. Pad napona za dva naponska nivoa

	Pad napona [mV]			
	< 5	5-10	10-20	> 20
10 kV [%]	25.91	55.37	11.48	7.24
35 kV [%]	29.37	54.40	8.58	7.65

Iz uputstva proizvođača, dozvoljeni pad napona zavisi od nazivne struje i nazivnog napona prekidača, i proizvođač dozvoljava da ove vrednosti mogu biti prekoračene za 25%. Tolerancija vrednosti do 25% omogućava da se procena stanja prekidača odredi u prvom slučaju za vrednosti kao u tabeli proizvođača, dok u drugom slučaju vrednosti iznose 25% više nego u tabeli proizvođača. Ovo omogućava sagledavanje uticaja oba slučaja na otkaz prekidača.

Procena stanja prekidača se zasniva na podacima iz nekoliko kategorija, kao što su starost prekidača, odnosno koliko dugo je prekidač bio u radu, ambijentalni i radni uslovi, redovnost održavanja i rezultati testa.

Sledeća skala se koristi za opisivanje stanja prekidača [150]:

Ocena 1: Loš—prekidač dugo radi, pod lošim ambijentalnim i radnim uslovima, neredovno održavanje i testiranje, loši rezultati ispitivanja;

Ocena 2: Srednje loš—prekidač dugo radi, pod lošim ambijentalnim i radnim uslovima, neki rezultati ispitivanja su loši;

Ocena 3: Srednji—prekidač dugo radi, u lošim ambijentalnim i radnim uslovima, ali redovno održavan i testiran, zadovoljavajući rezultati;

Ocena 4: Veoma dobar—prekidači novije generacije, radi u dobrim uslovima rada, zadovoljavajući rezultati;

Ocena 5: Odličan — noviji prekidači, kratko u radu, zadovoljavajući rezultati ispitivanja, redovno održavanje i testiranje.

Ove ocene za stanje prekidača su zapravo formirane na osnovu prikupljenih podataka o starenju, vrsti prekidača i održavanju.

Za procenu starosti prekidača koristite se ocene u opsegu od 1 do 5, sa nižim vrednostima koje ukazuju na bolje stanje opreme („manje je više“). Ocena se dodeljuje u zavisnosti od opsega kojem prekidač pripada prema starosti (<10 godina = ocena 1, 10–20 godina = ocena 2, 21–30 godina = ocena 3, 31–40 godina = ocena 4, >40 godina = ocena 5) [150].

Što se tiče tipa prekidača, uočena su tri najčešće korišćena tipa u podstanicama: malouljni, vakuumski i SF6 prekidači. U zavisnosti od primenjene tehnologije, svaki prekidač karakteriše određeni intenzitet kvara koji se može nazvati karakterističnim i koji je odlika same tehnologije. Međutim, stvarni intenzitet kvarova zavisi od mnogih dodatnih faktora, od kojih su dva najvažnija uslovi (radni i ambijentalni) u kojima prekidač radi i stanje samog prekidača. Radni uslovi se odnose na nivo opterećenja, stanje zaštite, stanje mreže koju napaja ta trafostanica. Ambijentalni uslovi se odnose pre svega na temperaturu u samoj stanici koja značajno utiče na stanje opreme. Kako je svaki od ovih efekata veoma teško kvantifikovati, često se usvaja princip faktora korekcije koji određuje realniju vrednost stope otkaza [150].

Redovnost i kvalitet održavanja su važni faktori koji utiču na stanje same opreme. Kvalitet održavanja uključuje nekoliko faktora:

- periodičnost i obim testiranja;
- obuka osoblja za održavanje;
- dostupnost rezervnih delova;
- praćenje stanja prekidača.

Sledeća skala sa pet nivoa ocenjivanja može se koristiti za procenu nivoa održavanja [150]:

Ocena 1: održavanje se vrši u redovnim intervalima, svi rezervni delovi su lako dostupni, postoji onlajn praćenje stanja prekidača. Osoblje je dobro obučeno. Postojeći kontrolni parametri skoro sigurno otkrivaju grešku;

Ocena 2: održavanje se obavlja u redovnim intervalima, osoblje je dobro obučeno. Velika verovatnoća da će praćeni parametri signalizirati grešku;

Ocena 3: umerena verovatnoća da će praćeni parametri signalizirati kvar;

Ocena 4: mala verovatnoća da će praćeni parametri signalizirati kvar;

Ocena 5: nijedan postojeći nadgledani parametar ne može da otkrije grešku. Održavanje se ne obavlja u redovnim intervalima, rezervni delovi nisu lako dostupni, a ne postoji onlajn praćenje stanja prekidača. Osoblje nije dobro obučeno.

Tip i opterećenje mreže takođe značajno utiču na stanje prekidača. Za ocenu se može koristiti skala sa pet nivoa procene, gde se nakon procene uslova utvrđuje vrednost korektivnog faktora koji se koristi za dalje proračune. Opis ocena je sledeći [150]:

Ocena 1: izuzetno malo opterećenje. Distributivna mreža je uglavnom podzemna, sa kratkim kablovima i mogućnošću rezervacije;

Ocena 2: srednje opterećenje, prosečan procenat nadzemne distributivne mreže, retki nestanci struje;

Ocena 3: srednje opterećenje, veći procenat nadzemne distributivne mreže, česti nestanci struje;

Ocena 4: visoko opterećenje, posebno u zimskim uslovima. Visok procenat zastupljenosti nadzemne distributivne mreže, česti nestanci struje;

Ocena 5: izuzetno veliko opterećenje. Distributivna mreža je uglavnom nadzemna, sa dugim linijama i bez mogućnosti rezervacije. Greška se javlja bez upozorenja.

Uslovi mreže i opterećenje direktno zavise od vremenskih uslova. Loši vremenski uslovi koreliraju sa povećanim brojem kvarova, što znači da će prekidači biti izloženi težim uslovima rada jer će se stanje mreže pogoršati, a opterećenje mreže povećati. Dobri vremenski uslovi poboljšavaju stanje mreže, smanjuju opterećenje mreže i obezbeđuju stabilne uslove rada prekidača.

Ocene kriterijuma bezbednosti i životne sredine takođe su izražene brojčanim ocenama (od 1 do 5).

Bezbednost [150]:

Ocena 1: veoma opasno dejstvo električne struje na ljude; toksični i kancerogeni efekti polihlorovanih bifenila (piralensko transformatorsko ulje); opasnost od mehaničkih povreda pri radu na trafostanicama je veoma velika ako je izloženost opasnosti vrlo česta (izloženost opasnosti u toku jedne smene od 61–80% radnog vremena); veoma veliki uticaj elektromagnetnog zračenja na čoveka; veoma veliki uticaj buke na organe sluha;

Ocena 2: opasno dejstvo električne struje na ljude; rizik od mehaničkih povreda pri radu na trafostanicama je visok ako je izloženost opasnosti česta (izloženost opasnosti u toku jedne smene od 41–60% radnog vremena); veliki uticaj elektromagnetnog zračenja na čoveka; veliki uticaj buke na organe sluha;

Ocena 3: srednje opasno dejstvo električne struje na ljude; opasnost od mehaničkih povreda pri radu na trafostanicama je srednja ako je izloženost opasnosti povremena (izloženost

opasnosti u toku jedne smene od 21–40% radnog vremena); prosečan efekat elektromagnetnog zračenja na čoveka; umeren uticaj buke na čula sluha;

Ocena 4: nisko opasno dejstvo električne struje na ljude; opasnost od mehaničkih povreda pri radu na trafostanicama je mala ako je izloženost opasnosti veoma retka (izloženost opasnosti u toku jedne smene je manja od 20% radnog vremena); mali uticaj elektromagnetnog zračenja na čoveka; mali efekat buke na čula sluha;

Ocena 5: zanemarljivo dejstvo električne struje na čoveka; opasnost od mehaničkih povreda pri radu na trafostanicama je zanemarljiva ako je izloženost opasnosti veoma retka (izloženost opasnosti u toku jedne smene je manja od 20% radnog vremena); zanemarljiv uticaj elektromagnetnog zračenja na čoveka; zanemarljiv uticaj buke na čula sluha;

Životna sredina [150]:

Ocena 1: trafostanica se nalazi u centru grada ili u gusto naseljenom mestu, blizina vodotoka ili vodovodnih objekata je manja od 10 m, ili postoje nepokretna kulturna dobra, ne postoji komunalna infrastruktura ili put do trafostanice nije popločan;

Ocena 2: trafostanica se nalazi na periferiji grada (u blizini trafostanice su uglavnom mala domaćinstva), udaljenost od vodotoka ili vodovodnih objekata je 50 m, ima nepokretnih dobara kulturnog nasleđa, komunalna infrastruktura je delimično izgrađena, trafostanica je dolazi se neasfaltiranim putem koji se odvaja od lokalnog asfaltiranog puta;

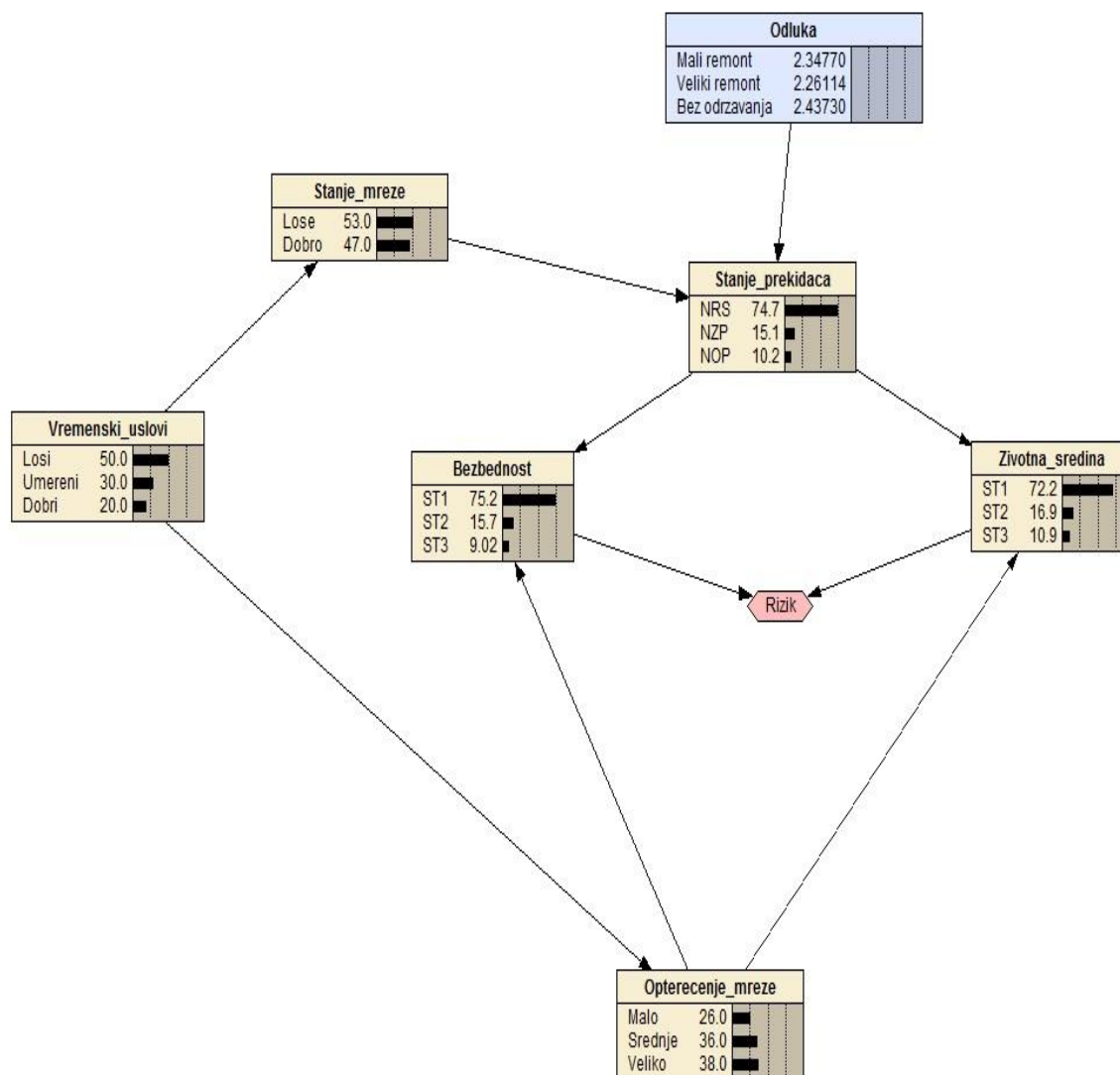
Ocena 3: trafostanica se nalazi na periferiji grada, naseljeno mesto je udaljeno 50 m, nema ugroženih biljnih i životinjskih vrsta, nema nepokretnih dobara kulturnog nasleđa, blizina vodotoka ili izvorišta je 200 m, do trafostanice vodi asfaltni put koji se odvaja od regionalnog ili magistralnog puta, postoji izgrađena komunalna infrastruktura;

Ocena 4: trafostanica se nalazi van naselja, na udaljenosti od 150 m postoje individualni stambeni objekti, na udaljenosti od 300 m nema vodotoka ili vodosnabdevanja, nema ugroženih biljnih i životinjskih vrsta, nema nepokretnih dobara kulturnog nasleđa, postoji komunalna infrastruktura, asfaltni put (regionalni ili magistralni) vodi do trafostanice;

Ocena 5: trafostanica je van naselja, najbliži stambeni objekti su na udaljenosti od 300 m, na udaljenosti od 500 m nema vodotoka ili vodovodnih objekata, nema ugroženih biljnih i životinjskih vrsta, nema nepokretnih dobara kulturnog nasleđa, postoji komunalna infrastruktura, do trafostanice vodi asfaltni put (regionalni ili magistralni).

4.2. Određivanje performansi modela

Za proračun rizika zamene prekidača opisanog dijagramom uticaja sa slike 4.3. razmotrena su dva slučaja. U prvom slučaju za proračun rizika su korišćene precizne verovatnoće, dok su u drugom slučaju korišćene intervalne verovatnoće [150]. Proračuni su urađeni korišćenjem programa Netica (Norsys Software Corp.) [155]



Slika 4.3. Dijagram uticaja za proračun rizika zamene prekidača [150, 155]

Odluka o eventualnoj zameni prekidača zavisi od izračunatog rizika za održavanje postojećih prekidača u funkciji. Rizik se sastoji od bezbednosnog i ekološkog rizika, okarakterisan sa tri moguća stanja (označena sa ST1, ST2 i ST3 na slici 4.3). I bezbednost i uticaj opreme na životnu sredinu zavise od stanja prekidača, na koje utiču nivo održavanja (čvor odluke), vremenske prilike, stanje mreže i opterećenje mreže (čvorovi šanse) [150].

Kao što se može videti na slici 4.3, normalno radno stanje (NRS), neuspešno zatvaranje prekidača (NZP) i neuspešno otvaranje prekidača (NOP) predstavljaju tri moguća stanja razmatranih prekidača. Konačna odluka o tome da li će se primenjivati manje održavanje, veće održavanje ili ništa ne činiti donosi se na osnovu dva kriterijuma, bezbednosti i životne sredine. Na osnovu nivoa ova dva kriterijuma, rizik može imati vrednosti u rasponu od 1 (bez rizika) do 10 (najveći rizik) [150].

U ovoj disertaciji, za zadatak definisan na slici 4.3., formirana je grupa od pet eksperata, za ocenjivanje stanja, koji su ispunjavali sledeće uslove – bili su visoko kvalifikovani za razmatrati zadatak, imali dovoljno iskustva u proceni stanja sistema sličnog posmatranom sistemu, bili upoznati sa razmišljanjem o verovatnoći i bili su u stanju da modeluju sistem u odnosu na dostupne podatke. Odabrano je pet eksperata zbog složenosti sistema koji se posmatra i radi postizanja veće ukupne tačnosti prilikom evaluacije.

Na osnovu mišljenja stručnjaka i na osnovu prethodno prikupljenih podataka, utvrđene su verovatnoće pojave svakog od uslova: vremenskih uslova, opterećenja i stanja mreže. Dodatno, stručnjaci su utvrdili uslovne verovatnoće na osnovu kojih su izračunate vrednosti stanja u čvorovima stanje prekidača, bezbednost i okruženje. Vrednosti verovatnoće odgovaraju srednjim vrednostima verovatnoće dobijenim od stručnjaka.

Tabela 4.4. Verovatnoća stanja vremenskih uslova

Stanje	Opis	Verovatnoća
Loše	Teški vremenski uslovi	0.5
Srednje	Nema ekstremnih temperatura ispod - 20 stepeni	0.3
Dobro	Dobri vremenski uslovi, bez ekstremnih temperatura ispod -10 stepeni	0.2

Tabela 4.5. Uslovne verovatnoće stanja mreže

Vreme	Stanje	
	Dobri uslovi, nema povećanja stope otkaza	Loši uslovi – nema održavanja, povećan broj otkaza
Loše	0.6	0.4
Srednje	0.5	0.5
Dobro	0.4	0.6

Tabela 4.6. Uslovne verovatnoće nivoa opterećenja mreže

Vreme	Stanje		
	Malo opterećenje	Srednje opterećenje	Veliko opterećenje
Loše	0.1	0.3	0.6
Srednje	0.3	0.5	0.2
Dobro	0.6	0.3	0.1

Tabela 4.7. Uslovne verovatnoće stanja prekidača

Odluka	Stanje mreže	NRS	NZP	NOP
Mali remont	Dobro	0.7	0.2	0.1
Mali remont	Loše	0.8	0.1	0.1
Veliki remont	Dobro	0.8	0.1	0.1
Veliki remont	Loše	0.9	0.1	0.0
Bez održavanja	Dobro	0.6	0.2	0.2
Bez održavanja	Loše	0.7	0.2	0.1

Tabela 4.8. Uslovne verovatnoće posledica

Opterećenje	Stanje prekidača	Bezbednost			Životna sredina		
		ST1	ST2	ST3	ST1	ST2	ST3
Malo	NRS	0.9	0.1	0.0	0.8	0.1	0.1
Malo	NZP	0.8	0.1	0.1	0.8	0.1	0.1
Malo	NOP	0.7	0.2	0.1	0.7	0.2	0.1
Srednje	NRS	0.8	0.1	0.1	0.8	0.1	0.1
Srednje	NZP	0.7	0.2	0.1	0.5	0.3	0.2
Srednje	NOP	0.6	0.3	0.1	0.6	0.3	0.1
Veliko	NRS	0.7	0.2	0.1	0.7	0.2	0.1
Veliko	NZP	0.6	0.2	0.2	0.6	0.3	0.1
Veliko	NOP	0.5	0.3	0.2	0.5	0.3	0.2

Ocene kriterijuma bezbednosti i životne sredine izražene su broječanim ocenama (od 1 do 10) i predstavljene su u tabeli 4.9.

Za vrednosti verovatnoće prikazane u tabelama 4.4 – 4.9, dobijeni su rezultati prikazani na slici 4.3.

Na osnovu tabele 4.9. i jednačine (4.3), konačna odluka koju treba doneti na osnovu primera datog na slici 4.3. prikazana je u tabeli 4.10.

Tabela 4.9. Ocene kriterijuma bezbednosti i životne sredine

Bezbednost	Verovatnoća [%]	Životna sredina	Verovatnoća [%]	Rizik
ST1	75.2	ST1	72.2	1
ST1	75.2	ST2	16.9	2
ST1	75.2	ST3	10.9	3
ST2	15.7	ST1	72.2	4
ST2	15.7	ST2	16.9	7
ST2	15.7	ST3	10.9	6
ST3	9.02	ST1	72.2	5
ST3	9.02	ST2	16.9	8
ST3	9.02	ST3	10.9	10

Kao što se može uočiti iz tabele 4.10., za precizne vrednosti promenljivih prikazanih na slici 4.3. veliki remont se uzima kao konačna strategija zbog najniže vrednosti rizika.

Tabela 4.10. Vrednosti odluke za precizne verovatnoće.

Odluka	Rizik sa preciznim verovatnoćama	Rang
Mali remont	2.34770	2
Veliki remont	2.26114	1
Bez održavanja	2.43730	3

U drugom slučaju isti zadatak je urađen sa intervalnim verovatnoćama. Umesto preciznih vrednosti verovatnoće za procenu mogućih stanja čvorova slučajnosti, dozvoljena širina intervala po kojoj su stručnjaci procenili stanje je određena tako što je prvo ispitano kako je širina intervala uticala na konačnu procenu.

Precizni brojevi w_{sj} , koji se koriste za određivanje rizika u slučaju 1 se mogu transformisati u intervalne brojeve kao što je opisano u prethodnom poglavlju:

$$IN(w_{sj}^k) = [w_{sj}^{kL}, w_{sj}^{kU}]. \quad (4.4)$$

U jednačini (5.4), donja i gornja granica intervalnog broja su označene su sa w_{sj}^{kL} and w_{sj}^{kU} , dok w_{sj}^k ($k = 1, 2, \dots, m; s = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, l$) predstavlja k -tog eksperta za s -ti otkaz u odnosu na j -ti faktor rizika.

U ovom slučaju, matrica intervalnog broja je:

$$W_{in} = \begin{bmatrix} [L(w_{1j}^{1L}), U(w_{1j}^{1U})] & [L(w_{1j}^{2L}), U(w_{1j}^{2U})] & \dots & [L(w_{1j}^{5L}), U(w_{1j}^{5U})] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ [L(w_{nj}^{1L}), U(w_{nj}^{1U})] & [L(w_{nj}^{2L}), U(w_{nj}^{2U})] & \dots & [L(w_{nj}^{5L}), U(w_{nj}^{5U})] \end{bmatrix}. \quad (4.5)$$

Prosečna vrednost intervalnog broja $\overline{IN(w_{sj}^k)}, w_{sj}^k (k = 1, 2, \dots, m; s = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, l)$, je:

$$\overline{IN(w_{sj}^k)} = [L(w_{sj}^{kL}), U(w_{sj}^{kU})]. \quad (4.6)$$

$$L(w_{sj}^{kL}) = (w_{sj}^{1L} + w_{sj}^{2L} + \dots + w_{sj}^{kL}) / k. \quad (4.7)$$

$$U(w_{sj}^{kU}) = (w_{sj}^{1U} + w_{sj}^{2U} + \dots + w_{sj}^{kU}) / k. \quad (4.8)$$

Donja i gornja granica prosečne vrednosti intervalnog broja su označene sa $L(w_{sj}^{kL})$ i $U(w_{sj}^{kU})$.

Tabela 4.11. Vrednosti odluke u zavisnosti od širina intervala

	1%	2%	3%	4%	5%
Mali remont	[2.227 2.428]	[2.141 2.527]	[2.049 2.629]	[1.961 2.755]	[1.840 2.841]
Veliki remont	[2.144 2.359]	[2.039 2.483]	[1.939 2.605]	[1.867 2.691]	[1.763 2.833]
Bez održavanja	[2.324 2.510]	[2.243 2.608]	[2.159 2.705]	[2.073 2.816]	[1.971 2.899]
	6%	7%	8%	9%	10%
Mali remont	[1.783 2.966]	[1.688 3.083]	[1.605 3.225]	[1.556 3.296]	[1.467 3.482]
Veliki remont	[1.676 2.947]	[1.567 3.017]	[1.476 3.158]	[1.371 3.313]	[1.332 3.366]
Bez održavanja	[1.876 2.981]	[1.829 3.133]	[1.726 3.228]	[1.600 3.375]	[1.549 3.457]

Da bi se omogućilo da stručnjaci imaju što širi interval prilikom evaluacije, prvo je urađena analiza koliko širina intervala utiče na odluku za primer dat na slici 4.3.

Analiza je urađena tako da, u odnosu na vrednosti verovatnoća prikazanih na slici 4.3, formirana je intervalna verovatnoća u skladu sa jednačinama (4.4)–(4.8), gde vrednosti preciznih verovatnoća predstavljaju centar novoformiranog intervala. Analiza je obavljena za širinu intervala od 1% do 10%. Dobijeni rezultati su prikazani u tabeli 4.11. [150].

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da se stručnjacima može dozvoliti formiranje širine intervala od 5% do 10%. To znači da su stručnjaci davali intervalne

verovatnoće umesto preciznih verovatnoća prilikom evaluacije, uz ograničenje da su precizne verovatnoće bile unutar tog intervala ili predstavljale donju ili gornju granicu intervala.

Važno je napomenuti da stručnjacima nisu date unapred definisane vrednosti centra intervala ni za jedan čvor, već su svoje procene vrednosti intervala davali isključivo na osnovu dostupnih podataka i svoje stručnosti.

Što se tiče rizika, korišćeno je pravilo 1 – najmanji rizik, 10 – najveći rizik (kao što je prikazano u tabeli 4.12.).

Tabela 4.12. Procena rizika korišćenjem intervalnih verovatnoća za primer dat na slici 4.3.

Bezbednost	Intervalna verovatnoća [%]	Životna sredina	Intervalna verovatnoća [%]	Rizik
ST1	[71.0 79.0]	ST1	[68.0 77.0]	1
ST1	[71.0 79.0]	ST2	[13.0 20.0]	2
ST1	[71.0 79.0]	ST3	[5.00 17.0]	3
ST2	[12.0 19.0]	ST1	[68.0 77.0]	4
ST2	[12.0 19.0]	ST2	[13.0 20.0]	7
ST2	[12.0 19.0]	ST3	[5.00 17.0]	6
ST3	[3.00 14.0]	ST1	[68.0 77.0]	5
ST3	[3.00 14.0]	ST2	[13.0 20.0]	8
ST3	[3.00 14.0]	ST3	[5.00 17.0]	10

Korišćenjem prethodno opisane metodologije za slučaj dijagrama uticaja sa intervalnim verovatnoćama, na osnovu stručnih procena, u kombinaciji sa Monte Karlo simulacijom uz poštovanje sledećeg uslova:

$$\begin{aligned}
 0 \leq L(a_i) \leq p(a_i) \leq U(a_i) \leq 1 \\
 \sum_{i=1}^n p(a_i) = 1
 \end{aligned}
 \tag{4.9}$$

dobijeni su rezultati prikazani u tabeli 4.13.

Tabela 4.13. Vrednosti rizika dobijene procenom stručnjaka za različite širine intervala

5%					
	E1	E2	E3	E4	E5
Mali remont	[1.905 2.933]	[1.931 2.982]	[2.213 3.359]	[1.783 2.803]	[1.856 2.940]
Veliki remont	[1.827 2.951]	[1.872 3.015]	[2.121 3.288]	[1.695 2.763]	[1.736 2.881]
Bez održavanja	[2.051 2.999]	[2.076 3.039]	[2.294 3.379]	[1.860 2.797]	[1.948 2.971]
6%					
	E1	E2	E3	E4	E5
Mali remont	[1.932 3.165]	[2.064 3.339]	[2.116 3.468]	[1.845 3.006]	[1.988 3.298]
Veliki remont	[1.828 3.118]	[1.992 3.319]	[2.040 3.484]	[1.749 3.044]	[1.934 3.289]
Bez održavanja	[2.036 3.214]	[2.107 3.320]	[2.197 3.462]	[1.914 3.047]	[2.015 3.312]
7%					
	E1	E2	E3	E4	E5
Mali remont	[1.733 3.177]	[1.907 3.471]	[1.985 3.515]	[1.883 3.247]	[1.959 3.592]
Veliki remont	[1.638 3.222]	[1.839 3.564]	[1.902 3.454]	[1.835 3.259]	[1.894 3.583]
Bez održavanja	[1.921 3.235]	[2.137 3.529]	[2.071 3.491]	[1.981 3.269]	[2.073 3.606]
8%					
	E1	E2	E3	E4	E5
Mali remont	[1.729 3.368]	[1.866 3.587]	[1.924 3.625]	[1.881 3.374]	[1.776 3.505]
Veliki remont	[1.623 3.274]	[1.780 3.550]	[1.824 3.618]	[1.828 3.504]	[1.772 3.504]
Bez održavanja	[1.816 3.358]	[1.971 3.599]	[1.959 3.647]	[1.999 3.429]	[1.891 3.469]
9%					
	E1	E2	E3	E4	E5
Mali remont	[1.712 3.476]	[1.882 3.820]	[2.035 4.062]	[1.859 3.680]	[1.862 3.789]
Veliki remont	[1.685 3.610]	[1.882 3.891]	[2.002 4.086]	[1.841 3.717]	[1.868 3.817]
Bez održavanja	[1.879 3.505]	[1.967 3.781]	[2.214 4.054]	[1.913 3.715]	[1.970 3.828]
10%					
	E1	E2	E3	E4	E5
Mali remont	[1.807 3.789]	[2.103 4.248]	[2.097 4.097]	[2.018 4.067]	[2.108 4.329]
Veliki remont	[1.703 3.815]	[2.002 4.364]	[1.975 4.265]	[2.027 4.059]	[1.955 4.336]
Bez održavanja	[1.962 3.860]	[2.209 4.274]	[2.211 4.180]	[2.180 4.255]	[2.166 4.405]

Konačna odluka o tome koja će akcija biti sprovedena donosi se formiranjem intervala na osnovu jednačina (4.6)–(4.8). Na osnovu ovih jednačina, konačna odluka o tome koja će se akcija sprovesti za svaki interval posebno je prikazana u tabeli 4.14. Na osnovu podataka prikazanih u tabeli 4.14, može se zaključiti da predloženi model određivanja rizika korišćenjem intervalnih verovatnoća u velikoj meri olakšava rad stručnjaka i daje vrlo realnu sliku radnji koje treba preduzeti.

Tabela 4.14. Konačne vrednosti rizika za različite širine intervala

Odluka	5%	6%	7%
Mali remont	[1.938 3.003]	[1.989 3.255]	[1.893 3.400]
Veliki remont	[1.850 2.979]	[1.909 3.251]	[1.822 3.416]
Bez održavanja	[2.046 3.037]	[2.054 3.271]	[2.037 3.426]
Odluka	8%	9%	10%
Mali remont	[1.835 3.492]	[1.870 3.765]	[2.027 4.106]
Veliki remont	[1.765 3.490]	[1.856 3.824]	[1.932 4.168]
Bez održavanja	[1.927 3.500]	[1.989 3.777]	[2.146 4.195]

Veza između dva intervalna broja $\tilde{a} = [a^L, a^U]$ i $\tilde{b} = [b^L, b^U]$ je opisana sledećom jednačinom:

$$P_{\tilde{b} \leq \tilde{a}} = \begin{cases} 1, & b^U \leq a^L \\ \frac{a^U - b^U}{a^U - a^L} + \frac{a^L - b^L}{b^U - b^L} \cdot \frac{b^U - a^L}{a^U - a^L} + \frac{1}{2} \cdot \frac{b^U - a^L}{a^U - a^L} \cdot \frac{b^U - a^L}{b^U - b^L}, & b^L \leq a^L < b^U \leq a^U \\ \frac{a^U - b^U}{a^U - a^L} + \frac{1}{2} \cdot \frac{b^U - a^L}{a^U - a^L}, & a^L < b^L < b^U \leq a^U \\ \frac{1}{2} \cdot \frac{a^U - b^L}{b^U - b^L} \cdot \frac{a^U - b^L}{a^U - a^L}, & a^L \leq b^L < a^U \leq b^U \\ \frac{a^L - b^L}{b^U - b^L} + \frac{1}{2} \cdot \frac{a^U - a^L}{b^U - b^L}, & b^L \leq a^L < a^U \leq b^U \\ 0, & a^U \leq b^L \end{cases}. \quad (4.10)$$

Iz prethodne jednačine (4.10) se može odrediti veza između $\tilde{a}$ i $\tilde{b}$ sa stepenom α , gde je $P_{\tilde{b} \leq \tilde{a}} = \alpha$ ($0 \leq \alpha \leq 1$). Za slučaj gde je $\alpha > 0.5$ znači da je $\tilde{a}$ veće $\tilde{b}$, dok $\alpha < 0.5$ implicira da je $\tilde{a}$ manje $\tilde{b}$, $\alpha = 0.5$ znači da su $\tilde{a}$ i $\tilde{b}$ jednaki.

Pomoću jednačine (4.10) izvršili smo poređenje intervala različitih potencijalnih odluka da bismo dobili verovatnoću poređenja kako bismo rangirali prioritete rizika razmatranih odluka. Dobijeni rezultati su dati u tabeli 4.15. Uzimajući za primer mali remont i bez održavanja za 5% širine intervala, interval mali remont je [1.94, 3.00], dok je bez održavanja [2.05, 3.03] na osnovu jednačine (4.10):

$$P_{bez_o \leq mali_r} = \frac{1}{2} \times \frac{3.003 - 2.046}{3.037 - 2.046} \times \frac{3.003 - 2.046}{3.003 - 1.938} = 0.434. \quad (4.11)$$

Pošto je $P_{bez_o \leq mali_r} = 0.434 < 0.5$ prioritet rizika za bez održavanja je veći od malog remonta. Slično, druge verovatnoće poređenja su date u tabeli 4.15.

Tabela 4.15. Rezultati poređenja za različite širine intervala

	5%			6%		
	Mali remont	Veliki remont	Bez održavanja	Mali remont	Veliki remont	Bez održavanja
Mali remont		0.5494	0.4339		0.5313	0.4681
Veliki remont	-		0.3890	-		0.4386
Bez održavanja	-	-		-	-	
	7%			8%		
	Mali remont	Veliki remont	Bez održavanja	Mali remont	Veliki remont	Bez održavanja
Mali remont		0.5173	0.4438		0.5209	0.4698
Veliki remont	-		0.4294	-		0.4502
Bez održavanja	-	-		-	-	
	9%			10%		
	Mali remont	Veliki remont	Bez održavanja	Mali remont	Veliki remont	Bez održavanja
Mali remont		0.4886	0.4655		0.5074	0.4509
Veliki remont	-		0.4782	-		0.4462
Bez održavanja	-	-		-	-	

Na osnovu rezultata dobijenih iz prethodne tabele, sledeća tabela prikazuje rezultate rangiranja različitih odluka za svaki interval širine pojedinačno.

Na osnovu rezultata rangiranja (tabela 4.16), lako se uočava da je najbolji izbor za posmatrani sistem veliki remont jer je prioritet rizika najveći za svaku prikazanu širinu intervala (osim za širinu intervala od 9%, gde je drugi po prioritetu).

Imajući ovo u vidu, kao i rezultat dobijen za precizne vrednosti, može se videti koliko bolje rešenje predstavlja model odlučivanja primenjen u ovoj disertaciji [150].

Naime, za razliku od preciznih vrednosti, koje je veoma teško odrediti u uslovima neizvesnosti, omogućavanje stručnjacima da procene stanje sistema u širokom opsegu vrednosti značajno olakšava pravilno donošenje odluka.

Tabela 4.16. Rezultati rangiranja odluka za različite širine intervala

Odluka	5%	Rang	6%	Rang	7%	Rang
Mali remont	[1.938 3.003]	2	[1.989 3.255]	2	[1.893 3.400]	2
Veliki remont	[1.850 2.979]	1	[1.909 3.251]	1	[1.822 3.416]	1
Bez održavanja	[2.046 3.037]	3	[2.054 3.271]	3	[2.037 3.426]	3
Odluka	8%	Rang	9%	Rang	10%	Rang
Mali remont	[1.835 3.492]	2	[1.870 3.765]	1	[2.027 4.106]	2
Veliki remont	[1.765 3.490]	1	[1.856 3.824]	2	[1.932 4.168]	1
Bez održavanja	[1.927 3.500]	3	[1.989 3.777]	3	[2.146 4.195]	3

Pokazalo se kao ispravna odluka dozvoliti stručnjacima da u uslovima neizvesnosti koriste intervalne vrednosti umesto preciznih vrednosti jer se na taj način može značajno uticati na ispravno donošenje konačne odluke.

POGLAVLJE 5

ZAKLJUČAK

Iako je vreme eksploatacije malouljnih prekidača snage pri kraju ili je već prekoračeno, njihov broj je i dalje ogroman u elektroenergetskom sistemu naše zemlje i na njima se zasniva pouzdanost celog sistema. Gledano iz ekonomskog ugla, ulaganje u opremu koja bi pratila, snimala i analizirala njihovo trenutno stanje nije isplativo.

Međutim, radi održavanja potrebnog nivoa pouzdanosti sistema, potrebno je razviti što precizniji metod koji će na osnovu dostupnih podataka oceniti preostalo vreme eksploatacije malouljnih prekidača snage. Na taj način, na osnovu informacija o njihovom trenutnom stanju, moguće je doneti odluku o remontu ili zameni najkritičnijih prekidača snage i na taj način smanjiti rizik ood iznenadnog otkaza sistema.

U ovoj disretaciji, razvijen je metod za ocenu rizika malouljnih prekidača na srednjenaponskom nivou koji se zasniva na numeričko-grafičkom modelu sa intervalnim verovatnoćama. Metod je razvijen na osnovu sakupljenih podataka merenjem i vizuelnim pregledom u zakonski propisanim vremenskim intervalima.

Realizacija istraživanja u okviru ove disertacije omogućila je razvoj originalnog numeričkog modela za određivanje optimalnog vremena remonta ili zamene postojeće elektroenergetske opreme (u ovom slučaju malouljnih prekidača) u elektroenergetskim postrojenjima. Ostvareni cilj povećava pouzdanost celokupnog elektroenergetskog sistema, smanjuje troškove koji nastaju usled neisporučene električne energije, utiče na povećanje bezbednosti radnika i zaštitu životne sredine, kao i na smanjenje ukupnog posmatranog rizika.

Pored toga, naučni doprinos rada ogleda se i u razvoju originalnih grafičkih matematičkih modela za ocenu stanja elektroenergetske opreme. Uz pomoć teorije verovatnoće, Bajesovih mreža i dijagrama uticaja, formiraju se grafički modeli koji omogućavaju jasno praćenje svih uzročno-posledičnih veza između elemenata koji čine sistem. Na taj način, donosiocima odluke se znatno olakšava posao i omogućava ispravna procena kako elemenata koji čini sistem, tako i celog sistema.

Razvijeni model u ovoj disertaciji, za razliku od nekih ranije korišćenih modela, uzima u obzir neizvesnost u pogledu budućeg stanja opreme i rizika. Takođe, uveden je model ekspertskog grupnog odlučivanja, pri čemu se koriste intervali maksimalne dozvoljene širine u skladu sa prethodno izvršenim testiranjima. Na taj način je omogućeno donosiocima odluke da umesto preciznih vrednosti verovatnoća, kako je ranije bio slučaj, koriste intervalne vrednosti verovatnoća za ocenu trenutnog stanja razmatrane opreme.

Kvalifikovani donosioci odluka, na osnovu realnih raspoloživih prethodno prikupljenih podataka, imajući u vidu i podatke koji nedostaju, donose ocene o stanju posmatranih elemenata sistema u vidu intervalnih verovatnoća. Na taj način, ekspertima se olakšava ispravno donošenje odluka, kako za elemente sistema za koje podaci postoje, tako

i za elemente sistema za koje podaci nedostaju. Takođe, na ovaj način je omogućeno i ispravnije donošenje odluka u uslovima neizvesnosti.

Prednost predloženog modela se ogleda i u tome što omogućava uvid u trenutno stanje svakog pojedinačno razmatranog prekidača snage, što trenutnim postojećim modelima nije bilo moguće ostvariti. Prikupljeni podaci na kojima se zasniva razvijeni model prikupljaju se godinama i deo su tehničke dokumentacije o merenjima izvršenim nad prekidačima snage. To znači da predloženi model ne zahteva prikupljanje novih vrsta podataka, odnosno ne zahteva kupovinu novih uređaja za merenje i angažovanje dodatnih radnika, za razliku od trenutno poznatih metoda na osnovu kojih je moguće odrediti preostali vek eksploatacije prekidača snage.

Model se može iskoristiti i za donošenje odluka o preventivnom održavanju prekidača snage u budućnosti, vršenju malog ili velikog remonta, planiranju zamene prekidača snage, proceni troškova održavanja i proceni ukupnog rizika sistema.

Ovaj model može bit iskorišćen za procenu preostalog vremena eksploatacije i za ostale vrste prekidača snage čiji vreme eksploatacije zavisi od istih ili približnih faktora od kojih zavise i malouljni prekidači snage.

Zaključci koji se mogu izvesti na osnovu postavljenih istraživačkih pitanja su sledeći:

- Moguće je predvideti optimalno vreme zamene elektroenergetske opreme (u ovom slučaju malouljnih prekidača snage) formiranjem modela dijagrama uticaja sa intervalnim verovatnoćama. Model razvijen u ovoj disertaciji omogućava jasnu sliku o akciji održavanja koju treba preuzeti. Na osnovu razvijenog modela moguće je tačno oceniti da li je za pouzdan rad elektroenergetskog sistema potrebno izvršiti mali remon, veliki remont ili je neophodno izvršiti kompletnu zamenu posmatranog prekidača snage.
- Optimalno vreme zamene elektroenergetske opreme zavisi od više različitih kriterijuma koje je moguće simultano vrednovati. Model razvijen u ovoj disertaciji koji se zasniva na dijagramima uticaja omogućava praćenje svih uzročno-posledičnih veza između posmatranih elemenata sistema. Na taj način je omogućeno simultano menjanje vrednosti posmatranih elemenata i praćenje kako te promene utiču na konačnu odluku.
- Dijagrami uticaja su se pokazali kao odličan alat u situacijama kada je potrebno modelovati neizvesnost, odnosno kada je potrebno formirati ocene o nekom kriterijumu u slučajevima kada podaci na osnovu kojih se formiraju te ocene nedostaju. Na osnovu dobijenih rezultata u ovoj disertaciji pokazano je da razvijeni model veoma uspešno prevazilazi ove situacije i omogućava donošenje odluka koje doprinose pouzdanom radu sistema.
- Uvođenjem intervalnih verovatnoća u proračun, donosiocima odluke je znatno olakšana procena stanja posmatranih elemenata sistema u uslovima neizvesnosti. Za razliku od modela sa preciznim vrednostima, koje je veoma teško tačno odrediti u uslovima neizvesnosti ili u uslovima kada određeni podaci nedostaju, intervalne verovatnoće daju određenu sigurnost donosiocima odluke u pogledu vrednovanja i donošenja realnih ocena. Tako da, model razvijen u ovoj disertaciji,

baziran na dijagramima uticaja sa intervalnim verovatnoćama predstavlja odličan alat za donošenje odluka u uslovima neizvesnosti.

Na osnovu izvedenih zaključaka može se uočiti da su sve polazne hipoteze na kojima se zasniva predmet istraživanja uspešno potvrđene realizacijom predloženog modela.

Iako predloženi metod pokazuje značajne prednosti pri donošenju odluka u uslovima neizvesnosti, može imati i određene nedostatke. Prvo, povećanje broja učenih alternativa koje utiču na donošenje odluka može dovesti do povećanja potrebne snage računara i potrebnog realnog vremena za izvođenje računskih operacija, što može povećati troškove i vreme donošenja odluka. Takođe, veliki broj alternativa i kriterijuma za ocenjivanje zahteva povećanje vremena koje je potrebno donosiocima odluke da izvrše ocenjivanje.

Drugi nedostatak jeste nepotpuna baza podataka o elementima koji se ocenjuju, što znatno otežava posao donošenja odluka u realnom vremenu.

U cilju preciznijeg određivanja preostalog životnog veka prekidača bilo bi dobro proširiti postojeće baze podataka novim podacima koji opisuju uslove u kojima se prekidač eksploatiše. U tom smislu, trebalo bi prikupiti podatke o broju korisnika na posmatranom vodu, dužinama vodova, na kakvom terenu je vod izgrađen, kao i da li postoje neki prirodni zagađivači na trasi voda. Takođe, potrebno je detaljnije informacije prikupiti o vrstama kvarova na prekidačima snage i o aktivnostima koje su primenjene da bi kvar bio otklonjen.

Metodologiju treba testirati na modelima velikih dimenzija sa velikim brojem čvorova i to će biti fokus budućeg istraživanja.

Takođe, plan budućeg istraživanja može biti razvoj integrisanog sistema za podršku odlučivanju koji će omogućiti višekriterijumski pristup i grupno odlučivanje.

REFERENCE

- [1] IEA. (2020). *Power systems in transition: Challenges and opportunities ahead for electricity security*, OECD Publishing, Paris
- [2] IEA. (2021). *World Energy Outlook 2021*, IEA, Paris
- [3] UNFCCC. (2015). Adoption of the Paris agreement, 21st conference of the parties
- [4] Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. (2018). Annual Report Energy Partnerships and Energy Dialogues, Berlin
- [5] Toshchakov, P. V., Kotov, O. M., & Kostarev, A. F. (2013). Evaluation of versions of electric power grid repair schemes from the results of structural reliability calculations.
- [6] Gazijahani, F. S., Ravadanegh, S. N., & Salehi, J. (2018). Stochastic multi-objective model for optimal energy exchange optimization of networked microgrids with presence of renewable generation under risk-based strategies. *ISA transactions*, 73, 100-111.
- [7] Akbary, P., Ghiasi, M., Pourkheranjani, M. R. R., Alipour, H., & Ghadimi, N. (2019). Extracting appropriate nodal marginal prices for all types of committed reserve. *Computational Economics*, 53(1), 1-26.
- [8] Ahadi, A., Ghadimi, N., & Mirabbasi, D. (2015). An analytical methodology for assessment of smart monitoring impact on future electric power distribution system reliability. *Complexity*, 21(1), 99-113.
- [9] Golshan, M. H., & Arefifar, S. A. (2006). Distributed generation, reactive sources and network-configuration planning for power and energy-loss reduction. *IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 153(2), 127-136.
- [10] Haghgoo, O., & Damchi, Y. (2022). Reliability modelling of capacitor voltage transformer using proposed Markov model. *Electric Power Systems Research*, 202, 107573.
- [11] Wu, Z., & Li, S. (2019). Reliability evaluation and sensitivity analysis to AC/UHVDC systems based on sequential Monte Carlo simulation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34(4), 3156-3167.
- [12] Shu, X., Guo, Y., Yang, W., Wei, K., Zhu, Y., & Zou, H. (2019). A detailed reliability study of the motor system in pure electric vans by the approach of fault tree analysis. *IEEE Access*, 8, 5295-5307.
- [13] Damchi, Y., & Sadeh, J. (2013). Determination of the optimum routine and selfchecking test time intervals for power system protection considering remote back-up protection system failure. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 7(10), 1163-1171.
- [14] Damchi, Y., & Sadeh, J. (2013). Effect of remote back-up protection system failure on the optimum routine test time interval of power system protection. *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 9(4), 237-245.

- [15] Meeuwssen, J. J., & Kling, W. L. (1997). Effects of preventive maintenance on circuit breakers and protection systems upon substation reliability. *Electric power systems research*, 40(3), 181-188.
- [16] Zhao, S., Yan, X., Wang, B., Wang, E., & Ma, L. (2019). Research on reliability evaluation method of DC circuit breaker based on Markov model. *Electric Power Systems Research*, 173, 1-5.
- [17] Karimabadi, A., Hajiabadi, M. E., Kamyab, E., & Shojaei, A. A. (2020). Determining the optimal inspection rate of circuit breakers equipped with condition monitoring devices using new maintenance Markov model. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 30(4), e12272.
- [18] Alvarez-Alvarado, M. S., & Jayaweera, D. (2020). Reliability-based smart-maintenance model for power system generators. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 14(9), 1770-1780.
- [19] Haghshenas, M., & Hooshmand, R. (2019). Modeling and Reliability Evaluation of Magnetically Controlled Reactor based on the Markov Process Technique. *Nashriyyah-i Muhandisi-i Barq va Muhandisi-i Kampyutar-i Iran*, 73(3), 165.
- [20] Mirsamadi, A., Damchi, Y., & Assili, M. (2021). Impact of Human Error Modeling on Failure Rate and Optimum Routine Test Interval of Protection System. *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 17(1), 1734-1734.
- [21] Morais, D. R., Rolim, J. G., Coser, J., & Zurn, H. H. (2006, June). Reliability centered maintenance for capacitor voltage transformers. In *2006 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems* (pp. 1-6). IEEE.
- [22] Hamza, Z., & Hacene, S. (2019). Reliability and safety analysis using fault tree and Bayesian networks. *International Journal of Computer Aided Engineering and Technology*, 11(1), 73-86.
- [23] Khakzad, N., Khan, F., & Amyotte, P. (2011). Safety analysis in process facilities: Comparison of fault tree and Bayesian network approaches. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(8), 925-932.
- [24] Vafaeenezhad, H., Mostafavi, S. M., & Yaghoobi, H. (2015, November). Improve reliability, predict temperature and power output of the gas turbine by using time series. In *2015 30th International Power System Conference (PSC)* (pp. 21-24). IEEE.
- [25] Jikeng, L., Xudong, W., & Ling, Q. (2011). Reliability evaluation for the distribution system with distributed generation. *European Transactions on Electrical Power*, 21(1), 895-909.
- [26] Ahadi, A., Ghadimi, N., & Mirabbasi, D. (2014). Reliability assessment for components of large scale photovoltaic systems. *Journal of Power Sources*, 264, 211-219.
- [27] Heidari, A., Agelidis, V. G., Kia, M., Pou, J., Aghaei, J., Shafie-Khah, M., & Catalão, J. P. (2016). Reliability optimization of automated distribution networks with probability customer interruption cost model in the presence of DG units. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(1), 305-315.

- [28] Deveikis, T., Miliune, R., & Nevardauskas, E. V. (2013). Reliability of divided small electric energy system. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 19(10), 21-24.
- [29] Gazijahani, F. S., & Salehi, J. (2018). Integrated DR and reconfiguration scheduling for optimal operation of microgrids using Hong's point estimate method. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 99, 481-492.
- [30] Ghiasi, V., Ghiasi, S., Omar, H., Ebrahimi, B., & Ghiasi, M. (2010, March). A review of metro tunnel safety parameters and role of risk management, Tehran Metro. In *Fourth International Symposium on Tunnel Safety and Security, Frankfurt am Main, Germany* (pp. 511-515).
- [31] Šnipas, M., Radziukynas, V., & Valakevičius, E. (2017). Modeling reliability of power systems substations by using stochastic automata networks. *Reliability Engineering & System Safety*, 157, 13-22.
- [32] Ghiasi, M., Irani Jam, M., Teimourian, M., Zarrabi, H., & Yousefi, N. (2019). A new prediction model of electricity load based on hybrid forecast engine. *International Journal of Ambient Energy*, 40(2), 179-186.
- [33] Ghiasi, M., Ahmadinia, E., Lariche, M., Zarrabi, H., & Simoes, R. (2018). A new spinning reserve requirement prediction with hybrid model. *Smart Science*, 6(3), 212-221.
- [34] Gazijahani, F. S., & Salehi, J. (2018). Reliability constrained two-stage optimization of multiple renewable-based microgrids incorporating critical energy peak pricing demand response program using robust optimization approach. *Energy*, 161, 999-1015.
- [35] Strachan, S. M., McArthur, S. D., Stephen, B., McDonald, J. R., & Campbell, A. (2006). Providing decision support for the condition-based maintenance of circuit breakers through data mining of trip coil current signatures. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22(1), 178-186.
- [36] Lin, P. C., Gu, J. C., & Yang, M. T. (2014). Intelligent maintenance model for condition assessment of circuit breakers using fuzzy set theory and evidential reasoning. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 8(7), 1244-1253.
- [37] Medjoudj, R., Medjoudj, R., & Aissani, D. (2011). Reliability Modeling and Data Analysis of Vacuum Circuit Breaker Subject to Random Shocks. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 5(11), 1441-1445.
- [38] Razi-Kazemi, A. A., Vakilian, M., Niayesh, K., & Lehtonen, M. (2015). Data Mining of Online Diagnosed Waveforms for Probabilistic Condition Assessment of SF₆ Circuit Breakers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30(3), 1354-1362.
- [39] Lorton, A., Fouladirad, M., & Grall, A. (2013). A methodology for probabilistic model-based prognosis. *European Journal of Operational Research*, 225(3), 443-454.
- [40] Nguyen, D. N., Dieulle, L., & Grall, A. (2015). Remaining useful lifetime prognosis of controlled systems: a case of stochastically deteriorating actuator. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015.

- [41] Chiacchio, F., D'Urso, D., Compagno, L., Pennisi, M., Pappalardo, F., & Manno, G. (2016). SHyFTA, a Stochastic Hybrid Fault Tree Automaton for the modelling and simulation of dynamic reliability problems. *Expert Systems with Applications*, 47, 42-57.
- [42] Codetta-Raiteri, D., & Portinale, L. (2014). Approaching dynamic reliability with predictive and diagnostic purposes by exploiting dynamic Bayesian networks. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 228(5), 488-503.
- [43] Mamdikar, M. R., Kumar, V., & Singh, P. (2022). Dynamic reliability analysis framework using fault tree and dynamic Bayesian network: A case study of NPP. *Nuclear Engineering and Technology*, 54(4), 1213-1220.
- [44] Jiang, G. J., Li, Z. Y., Qiao, G., Chen, H. X., Li, H. B., & Sun, H. H. (2021). Reliability Analysis of Dynamic Fault Tree Based on Binary Decision Diagrams for Explosive Vehicle. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021.
- [45] Gaudel, Q., Chanthery, E., & Ribot, P. (2015). Hybrid particle petri nets for systems health monitoring under uncertainty. *International Journal of Prognostics and Health Management*, 6(4).
- [46] Taleb-Berrouane, M., & Khan, F. (2019). Dynamic resilience modelling of process systems. *CHEMICAL ENGINEERING*, 77, 313-318.
- [47] Yan, R., Jackson, L. M., & Dunnett, S. J. (2017). Automated guided vehicle mission reliability modelling using a combined fault tree and Petri net approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92(5), 1825-1837.
- [48] Kemikem, D., Boudour, M., Benabid, R., & Tehrani, K. (2018, June). Quantitative and qualitative reliability assessment of reparable electrical power supply systems using fault tree method and importance factors. In *2018 13th Annual Conference on System of Systems Engineering (SoSE)* (pp. 452-458). IEEE.
- [49] Daigle, M., Roychoudhury, I., & Bregon, A. (2015). Model-based prognostics of hybrid systems. In *Annual Conference of the PHM Society* (Vol. 7, No. 1).
- [50] Jiang, C., Zheng, J., & Han, X. (2018). Probability-interval hybrid uncertainty analysis for structures with both aleatory and epistemic uncertainties: a review. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 57(6), 2485-2502.
- [51] Faes, M. G., Daub, M., Marelli, S., Patelli, E., & Beer, M. (2021). Engineering analysis with probability boxes: A review on computational methods. *Structural Safety*, 93, 102092.
- [52] Simon, C., & Bicking, F. (2017). Hybrid computation of uncertainty in reliability analysis with p-box and evidential networks. *Reliability Engineering & System Safety*, 167, 629-638.
- [53] Chen, N., Yu, D., Xia, B., & Beer, M. (2016). Uncertainty analysis of a structural-acoustic problem using imprecise probabilities based on p-box representations. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 80, 45-57.

- [54] Crespo, L. G., Kenny, S. P., & Giesy, D. P. (2013). Reliability analysis of polynomial systems subject to p-box uncertainties. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 37(1-2), 121-136.
- [55] Montgomery, V. J., Coolen, F. P., & Hart, A. D. (2009). Bayesian probability boxes in risk assessment. *Journal of statistical theory and practice*, 3(1), 69-83.
- [56] Dannert, M. M., Fau, A., Fleury, R. M., Broggi, M., Nackenhorst, U., & Beer, M. (2018). A probability-box approach on uncertain correlation lengths by stochastic finite element method. *PAMM*, 18(1), e201800114.
- [57] Faes, M., & Moens, D. (2019). Imprecise random field analysis with parametrized kernel functions. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 134, 106334.
- [58] Zhang, J., Xiao, M., & Gao, L. (2019). An active learning reliability method combining Kriging constructed with exploration and exploitation of failure region and subset simulation. *Reliability Engineering & System Safety*, 188, 90-102.
- [59] Schöbi, R., & Sudret, B. (2017). Structural reliability analysis for p-boxes using multi-level meta-models. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 48, 27-38.
- [60] Troffaes, M. C. (2018). Imprecise Monte Carlo simulation and iterative importance sampling for the estimation of lower previsions. *International Journal of Approximate Reasoning*, 101, 31-48.
- [61] Gao, D. W., Wang, Q., Zhang, F., Yang, X., Huang, Z., Ma, S., & Wang, F. Y. (2019). Application of AI techniques in monitoring and operation of power systems. *Frontiers in Energy*, 13(1), 71-85.
- [62] Peng, C., Lei, S., Hou, Y., & Wu, F. (2015). Uncertainty management in power system operation. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 1(1), 28-35.
- [63] Janjic, A. (2018). Distribution network risk assessment using multicriteria fuzzy influence diagram. *Advances in Fuzzy Systems*, 2018.
- [64] Jordehi, A. R. (2018). How to deal with uncertainties in electric power systems? A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 96, 145-155.
- [65] Reinders, J., Morren, J., & Slootweg, J. G. (2018). Uncertainty in power system planning and operation: an integrated approach. In *IEEE Young Researchers Symposium in Electrical Power Engineering (YRS 2018)*.
- [66] Vachtsevanos, G. J., & Vachtsevanos, G. J. (2006). *Intelligent fault diagnosis and prognosis for engineering systems* (Vol. 456). Hoboken: Wiley.
- [67] Ćirić, R., Mandić, S. (2015). *Održavanje elektroenergetske opreme*. AGM knjiga, Beograd
- [68] Radetić R. (2017). *Priručnik za održavanje visokonaponske opreme*. Elektromreža Srbije.
- [69] Endrenyi, J., Aboresheid, S., Allan, R. N., Anders, G. J., Asgarpour, S., Billinton, R., & Singh, C. (2001). The present status of maintenance strategies and the impact of maintenance on reliability. *IEEE Transactions on power systems*, 16(4), 638-646.
- [70] Wu, S., & Clements-Croome, D. (2005). Optimal maintenance policies under different operational schedules. *IEEE Transactions on Reliability*, 54(2), 338-346.

- [71] Dhillon, B. S. (2002). *Engineering maintenance: a modern approach*. CRC press.
- [72] Rudenko, J., Ušakov, I. (1989). *Pouzdanost energetskih sistema (na ruskom)*. Nauka Novosibirsk.
- [73] Zhang, T., Nakamura, M., & Hatazaki, H. (2002, January). Optimizing maintenance scheduling of equipment by element maintenance interval adjustment considering system availability. In *2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 02CH37309)* (Vol. 1, pp. 205-210). IEEE.
- [74] Chitra, T. (2003, January). Life based maintenance policy for minimum cost. In *Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2003*. (pp. 470-474). IEEE.
- [75] Nahman, J., Mijailović, V. (2002). *Izabrana poglavlja iz visokonaponskih postrojenja*. Akademska misao, Beograd.
- [76] Nahman, J. (2004). *Optimalno vreme remonta i broja rezervnih delova*. Elektrodistribucija, Beograd
- [77] Lipirodjanapong, S., Suwanasri, C., Suwanasri, T., & Wangdee, W. (2015). Empirical Circuit Breaker Failure Rate Assessment and Modeling in a Preventive Maintenance Application. *Electric Power Components and Systems*, 43(16), 1832-1842.
- [78] Nahman, J. (1992). *Metode analize pouzdanosti elektroenergetskih sistema*. Naučna knjiga, Beograd
- [79] Muratović, M., Sokolija, K., & Kapetanović, M. (2013, November). Modelling of high voltage SF6 circuit breaker reliability based on Bayesian statistics. In *2013 7th IEEE GCC Conference and Exhibition (GCC)* (pp. 303-308). IEEE.
- [80] Nguyen, V. V., Nguyen, N. T., Nguyen, Q. T., Bui, V. H., & Su, W. (2022). Optimal Design Parameters for Hybrid DC Circuit Breakers Using a Multi-Objective Genetic Algorithm. *Algorithms*, 15(9), 298.
- [81] Endrenyi, J., Anders, G. J., & Da Silva, A. L. (1998). Probabilistic evaluation of the effect of maintenance on reliability. An application [to power systems]. *IEEE Transactions on power systems*, 13(2), 576-583.
- [82] Meeuwsen, J. J., Kling, W. L., & Ploem, W. A. G. A. (1997). The influence of protection system failures and preventive maintenance on protection systems in distribution systems. *IEEE transactions on power delivery*, 12(1), 125-133.
- [83] Bösche, D., Wilkening, E. D., Köpf, H., & Kurrat, M. (2016). Hybrid DC circuit breaker feasibility study. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 7(3), 354-362.
- [84] Liu, L., Liu, S., & Popov, M. (2018). Optimized algorithm of active injection circuit to calibrate DC circuit breaker. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 103, 369-376.
- [85] Shahidehpour, M., & Marwali, M. (2012). *Maintenance scheduling in restructured power systems*. Springer Science & Business Media.

- [86] Zhang, Z., Gao, C., Chen, S., Xue, Z., & Li, X. (2022, October). Optimization Design of Interruption Characteristics of LVDC Hybrid Circuit Breaker. In *2022 IEEE 67th Holm Conference on Electrical Contacts (HLM)* (pp. 1-8). IEEE.
- [87] Li, F., & Brown, R. E. (2004). A cost-effective approach of prioritizing distribution maintenance based on system reliability. *IEEE transactions on power delivery*, 19(1), 439-441.
- [88] Bertling, L., Allan, R., & Eriksson, R. (2005). A reliability-centered asset maintenance method for assessing the impact of maintenance in power distribution systems. *IEEE Transactions on power systems*, 20(1), 75-82.
- [89] Obergünner, M., Zdrallek, M., Schweer, A., & Schick, E. (2005, June). Optimal resource planning for maintenance of distribution networks. In *CIREN 2005-18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution* (pp. 1-4). IET.
- [90] da Rosa, M. A., & Lemos, F. B. (2004). Operation and maintenance planning of distribution system based in performance index and structural reliability. In *2004 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems* (pp. 156-161). IEEE.
- [91] Van Noortwijk, J. M., Dekker, A., Cooke, R. M., & Mazzuchi, T. A. (1992). Expert judgment in maintenance optimization. *IEEE Transactions on Reliability*, 41(3), 427-432.
- [92] Rolim, J. G., & da Silva Filho, C. R. (2000, April). An intelligent tool for maintenance scheduling of distribution systems. In *DRPT2000. International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. Proceedings (Cat. No. 00EX382)* (pp. 215-220). IEEE.
- [93] Bretthauer, G., Gamaleja, T., Handschin, E., Neumann, U., & Koffmann, W. (1998). Integrated maintenance scheduling system for electrical energy systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 13(2), 655-660.
- [94] Hjartarson, T., Jesus, B., Hughes, D. T., & Godfrey, R. M. (2003, September). Development of health indices for asset condition assessment. In *2003 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (IEEE Cat. No. 03CH37495)* (Vol. 2, pp. 541-544). IEEE.
- [95] Lang, B. P., & Pahwa, A. (2000). Power distribution system reliability planning using a fuzzy knowledge-based approach. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 15(1), 279-284.
- [96] JP EPS. (2000). *Tehničke preporuke elektrodistribucije Srbije*. Direkcija za distribuciju električne energije Srbije, Beograd.
- [97] Li, W., Vaahedi, E., & Choudhury, P. (2006). Power system equipment aging. *IEEE Power and Energy Magazine*, 4(3), 52-58.
- [98] Finkelstein, M. (2008). *Failure rate modelling for reliability and risk*. Springer Science & Business Media.
- [99] Kolmogorov, A. (1933). Sulla determinazione empirica di una legge di distribuzione. *Inst. Ital. Attuari, Giorn.*, 4, 83-91.

- [100] Gnedenko, B. V., & Ushakov, I. A. (2018). *Theory of probability*. Routledge.
- [101] Woolf, P. (2021). *Bayesian Network Theory*. University of Michigan, Michigan.
- [102] Pearl, J. (1988). *Probabilistic reasoning in intelligent systems: networks of plausible inference*. Morgan Kaufmann.
- [103] Levi, I., (1980). *The Enterprise of Knowledge*. MIT Press, London
- [104] Walley, P. (1991). *Statistical reasoning with imprecise probabilities*. Chapman and Hall, New York
- [105] Cozman, F. G. (2000). Credal networks. *Artificial intelligence*, 120(2), 199-233.
- [106] Antonucci, A., Brühlmann, R., Piatti, A., & Zaffalon, M. (2009). Credal networks for military identification problems. *International Journal of Approximate Reasoning*, 50(4), 666-679.
- [107] Antonucci, A., Piatti, A., & Zaffalon, M. (2007, September). Credal networks for operational risk measurement and management. In *International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems* (pp. 604-611). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [108] Antonucci, A., Salvetti, A., & Zaffalon, M. (2007). Credal networks for hazard assessment of debris flows. *Advanced Methods for Decision Making and Risk Management in Sustainability Science*, 237-256.
- [109] Koller, D., & Friedman, N. (2009). *Probabilistic graphical models: principles and techniques*. MIT press.
- [110] Antonucci, A., De Campos, C. P., Huber, D., & Zaffalon, M. (2015). Approximate credal network updating by linear programming with applications to decision making. *International Journal of Approximate Reasoning*, 58, 25-38.
- [111] Howard, R. A., & Matheson, J. E. (2005). Influence diagrams. *Decision Analysis*, 2(3), 127-143.
- [112] Parnell, G. S., Terry Bresnick, M. B. A., Tani, S. N., & Johnson, E. R. (2013). *Handbook of decision analysis*. John Wiley & Sons.
- [113] Janjić, A., & Velimirović, L. (2016). Višekriterijumsko odlučivanje pri upravljanju imovinom u elektroprivrednim kompanijama. In *Analitički hijerarhijski proces - primena u energetici, zaštiti radne i životne sredine i obrazovanju* (pp. 1-20). Istraživačko-razvojni centar „Alfatec“ doo Niš, Centar za istraživanje kompleksnih sistema, Niš.
- [114] Good, D. I., & London, R. L. (1970). Computer interval arithmetic: Definition and proof of correct implementation. *Journal of the ACM (JACM)*, 17(4), 603-612.
- [115] Moore, R. E. (1975). *Mathematical elements of scientific computing*. Holt, Rinehart and Winston.
- [116] Moore, R. E. (1979). *Methods and applications of interval analysis*. Society for Industrial and Applied Mathematics.

- [117] Wadman, D., Schneider, M., & Schnaider, E. (1994). On the use of interval mathematics in fuzzy expert system. *International Journal of Intelligent Systems*, 9, 241-259.
- [118] Pawlak, Z. (1982). Rough sets. *International journal of computer & information sciences*, 11(5), 341-356.
- [119] Pawlak, Z. (1991). *Rough sets: Theoretical aspects of reasoning about data* (Vol. 9). Springer Science & Business Media.
- [120] www.risk24.ru
- [121] Althaus, C. E. (2005). A disciplinary perspective on the epistemological status of risk. *Risk Analysis: An International Journal*, 25(3), 567-588.
- [122] Savić, S., & Stanković, M. (2012). *Teorija sistema i rizika*. Akademska misao, Beograd
- [123] Matić, V. (2016). Rizici u nastajanju-eho crnih labudova. *Bankarstvo Magazine*, 45(4).
- [124] Aven, T. (2012). The risk concept—historical and recent development trends. *Reliability Engineering & System Safety*, 99, 33-44.
- [125] Beroggi, G., & Wallace, W. (Eds.). (1995). *Computer supported risk management* (Vol. 4). Springer Science & Business Media.
- [126] Knight, F. H. (1921). *Risk, uncertainty and profit* (Vol. 31). Houghton Mifflin.
- [127] Office, C. (2002). *Risk: Improving Government's Capability to Handle Risk and Uncertainty*. Strategy Unit Report.
- [128] Vujošević, M. (1995). Kvantitativni i kvalitativni pristupi proceni rizika u modelima odlučivanja, *Druga međunarodna konferencija Preventivni inženjering i životna sredina*, FZNR, Niš.
- [129] Lowrance, W. W. (1976). Of acceptable risk: Science and the determination of safety.
- [130] Rosa, E. A. (2003). The logical structure of the social amplification of risk framework (SARF): Metatheoretical foundations and policy implications. *The social amplification of risk*, 47, 47-49.
- [131] Aven, T. (2008). *Risk Analysis*, Wiley, New York.
- [132] International Organization for Standardization. (2018). *Risk Management: Guidelines*. ISO.
- [133] Aven, T. (2010). On how to define, understand and describe risk. *Reliability Engineering & System Safety*, 95(6), 623-631.
- [134] Heggset, J., Solvang, E., Nordgard, D. E., & Eggen, A. O. (2004). Prioritising Maintenance and renewal projects in distribution networks. In *2004 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems* (pp. 325-331). IEEE.
- [135] Hjartarson, T., Jesus, B., Hughes, D. T., & Godfrey, R. M. (2003, September). Development of health indices for asset condition assessment. In *2003 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (IEEE Cat. No. 03CH37495)* (Vol. 2, pp. 541-544). IEEE.

- [136] Hughes, D., Dennis, G., Walker, J., & Williamson, C. (2006). Condition based risk management (CBRM)—enabling asset condition information to be central to corporate decision making. In *Engineering asset management* (pp. 1212-1217). Springer, London.
- [137] Lindsay, K. E. (2001). CIGRE method for prioritizing maintenance for overhead lines. In *2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 01CH37194)* (Vol. 2, pp. 457-458). IEEE.
- [138] Ni, M., McCalley, J. D., Vittal, V., & Tayyib, T. (2003). Online risk-based security assessment. *IEEE Transactions on Power Systems*, 18(1), 258-265.
- [139] Jiang, Y., McCalley, J. D., & Van Voorhis, T. (2006). Risk-based resource optimization for transmission system maintenance. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(3), 1191-1200.
- [140] Heggset, J., Solvang, E., Nordgard, D. E., & Eggen, A. O. (2004, September). Prioritising Maintenance and renewal projects in distribution networks. In *2004 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems* (pp. 325-331). IEEE.
- [141] Nordgård, D. E., Solvang, E., & Solum, G. (2005, June). Developing and implementing a risk based maintenance strategy for distribution companies. In *CIGRE 2005-18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution* (pp. 1-5). IET.
- [142] Hjartarson, T., Jesus, B., Hughes, D. T., & Godfrey, R. M. (2003, September). Development of health indices for asset condition assessment. In *2003 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (IEEE Cat. No. 03CH37495)* (Vol. 2, pp. 541-544). IEEE.
- [143] Hughes, D., Dennis, G., Walker, J., & Williamson, C. (2006). Condition based risk management (CBRM)—enabling asset condition information to be central to corporate decision making. In *Engineering asset management* (pp. 1212-1217). Springer, London.
- [144] Minel. (1984). Uputstvo za rukovanje i održavanje maloljnih srednjenaponskih prekidača za unutrašnju montažu.
- [145] IEC 62271-1: 2017. (2017). High-voltage switchgear and controlgear-Part 1: Common specifications for alternating current switchgear and controlgear.
- [146] Minimum oil circuit breakers for internal assembly - M series, *Koncar-medium voltage electrical apparatus*, Zagreb, 2005.
- [147] Janjić, A., Stanković, M., & Velimirović, L. (2015). Multi-criteria influence diagrams—A tool for the sequential group risk assessment. In *Granular computing and decision-making* (pp. 165-193). Springer, Cham.
- [148] Janjic, A., Stajic, Z., & Radovic, I. (2011). A practical inference engine for risk assessment of power systems based on hybrid fuzzy influence diagrams. *Latest Advances in Information Science, Circuits and Systems*.

- [149] Zhang, Z., Jiang, Y., & McCalley, J. (2003, October). Condition based failure rate estimation for power transformers. In *Proc. of 35th North American Power Symposium*.
- [150] Velimirovic, J. D., & Janjic, A. (2021). Risk Assessment of Circuit Breakers Using Influence Diagrams with Interval Probabilities. *Symmetry*, 13(5), 737.
- [151] Balzer, G., Drescher, D., Heil, F., Kirchesch, P., Meister, R., & Neumann, C. (2004). Evaluation of failure data of HV circuit-breakers for condition based maintenance. In *CIGRE session* (pp. A3-305).
- [152] Radetić, R. (2017). *Priručnik za održavanje VNO*. Elektromreža Srbije.
- [153] Procedura održavanja QF-C-040 (Lista ispitivanja prelazne otpornosti na glavnim kontaktima prekidača i otpornosti izolovanosti), 2019.
- [154] Procedura održavanja QF-C-032 (Lista održavanja TS 35/X kV/kV), 2019.
- [155] <https://www.norsys.com/netica.html>

PRILOG

Tabela P.1.1. Deo informacija o posmatranim prekidačima

NI	GP	U _n	TV	DPN	SP
Radio stanica 1	1977	12	vazdušni	10	37
Rudnička	1983	12	kablovski	10	33
Hotel	1985	10	kablovski	10	31
Slatina	1982	10	vazdušni	10	34
Bučje 1	1982	10	vazdušni	10	34
Trgovište	1982	12	kablovski	10	33
Jugopetrol	1979	10	kablovski	10	36
Sastavak	1979	10	kablovski	10	36
Krivelj	1991	10	kablovski	14	24
Mali Krivelj	1981	10	kablovski	14	34
Njegoševa	1977	12	kablovski	14	38
Kobišnica	1977	12	vazdušni	14	38
Žimes	1977	12	vazdušni	10	38
Jasenica	1982	12	vazdušni	14	33
Plavna	1982	12	vazdušni	14	33
Jabukovac	1982	12	vazdušni	14	33
Krečana	1970	12	kablovski	10	45
Železnička stanica	1978	10	kablovski	10	38
Češalj	1978	10	kablovski	14	38
Sedmospratnica	1978	10	kablovski	14	38
Fabrika	1974	12	vazdušni	14	42
Šljivar	1976	12	vazdušni	7	40
Brza Palanka	1981	35	vazdušni	10	34
Ribare	1980	12	vazdušni	14	36
CS Carina	1977	12	kablovski	10	37
Hidro. met. zavod	1980	10	kablovski	10	35

Božilovac	1986	12	vazdušni	14	29
Dubrava	1982	12	kablovski	10	33
Minićevo	1982	12	kablovski	10	33
Branka Dinić	1979	12	kablovski	10	36
B. Metalac	1979	12	kablovski	10	36
Pariz	1979	12	kablovski	10	36
Bolnica	1979	12	kablovski	10	36
Žlne	1979	10	kablovski	10	36
Jaz	1979	10	kablovski	10	36
Radio stanica 2	1981	10	kablovski	14	34
Bučje 2	1981	10	kablovski	14	34
Carina 1	1989	12	vazdušni	10	26
T-1	1978	10	trafo polje	14	38
T-2	1978	10	trafo polje	10	38
Centralno	1978	10	kablovski	14	38
Lasta	1978	10	kablovski	14	38
Kotlara 2	1978	10	kablovski	14	38
Zlot	1974	12	vazdušni	14	42
Dubrava 2	1985	12	vazdušni	10	31
Topolnica	1985	12	vazdušni	10	31
Golubinje - Miroč	1985	12	vazdušni	10	31
Sela	1980	12	kablovski	10	35
Separacija	1980	12	vazdušni	10	35
Medicinski centar	1990	12	kablovski	14	23
Jugovićevo	1990	12	kablovski	14	23
Mlekara	1990	12	kablovski	14	23
Ciglana	1990	12	kablovski	14	23
Centar - sud	1980	12	vazdušni	10	35
Laznica	1980	12	vazdušni	14	36
Žagubica	1980	12	vazdušni	14	36
Rudna Glava	1987	12	vazdušni	10	27
NGC1	1985	10	kablovski	10	29

Selište	1990	12	vazdušni	10	25			
Moravska	1980	12	kablovski	7	33			
Vražogrnac	1987	12	vazdušni	10	28			
Vrtovac	1991	12	vazdušni	10	25			
Izvor	1978	12	vazdušni	14	38			
Vajuga	1985	12	vazdušni	14	31			
Donji Ključ	1985	12	vazdušni	14	31			
Kaličina	1971	12	vazdušni	14	45			
Krepoljin	1980	12	vazdušni	14	36			
Osanica	1980	10	vazdušni	14	36			
Sige	1980	12	vazdušni	10	36			
Vidikovac 2	1987	12	kablovski	10	27			
Kalna	1978	12	vazdušni	14	38			
NI	2013		2014		2015		2016	
	UBP	KS	UBP	KS	UBP	KS	UBP	KS
Radio stanica	1	0	1	0	1	0	2	3
Rudnička	4	0	6	0	6	0	1	0
Hotel	1	1	3	1	0	2	0	0
Slatina	1	0	7	4	6	4	0	0
Bučje 1	2	1	13	2	12	0	1	0
Trgovište	4	0	40	0	18	0	17	0
Jugopetrol	1	2	4	0	3	0	5	2
Sastavak	3	0	18	1	2	1	9	4
Krivelj	4	0	3	7	7	6	7	0
Mali Krivelj	53	2	72	6	60	8	46	5
Njegoševa	0	0	0	0	1	0	1	0
Kobišnica	5	0	16	0	3	0	7	0
Žimes	10	2	29	0	19	0	27	1
Jasenica	33	5	24	4	21	1	16	0
Plavna	38	16	33	21	20	10	25	12
Jabukovac	22	4	41	0	39	8	29	2
Krečana	0	0	2	0	1	0	3	1

Železnička stanica	0	0	0	0	1	0	1	0
Češalj	4	0	2	1	3	5	0	1
Sedmospratnica	0	0	1	1	6	1	2	0
Fabrika	3	0	1	1	1	0	1	1
Šljivar	11	4	8	0	8	2	10	1
Brza Palanka	0	1	4	1	4	2	1	2
Ribare	1	0	6	1	6	1	3	0
CS Carina	0	1	1	0	0	0	0	0
Hidro. met. zavod	5	5	0	0	1	0	0	0
Božilovac	2	0	19	1	11	0	0	0
Dubrava	1	1	4	0	1	0	0	0
Minićevo	6	4	10	3	0	0	0	0
Branka Dinić	1	0	1	0	0	0	0	0
B. Metalac	2	0	2	0	1	0	1	0
Pariz	1	0	2	0	1	0	0	0
Bolnica	4	0	1	0	2	0	0	0
Žlne	3	0	13	0	8	0	8	0
Jaz	1	0	2	2	1	0	0	0
Radio stanica 2	4	0	7	2	2	1	11	2
Bučje 2	25	0	26	6	7	2	4	3
Carina 1	0	1	0	0	0	0	1	0
T-1	0	0	0	0	0	0	0	0
T-2	0	0	0	0	0	0	0	0
Centralno	4	3	0	0	1	0	1	2
Lasta	0	0	0	0	0	2	5	0
Kotlara 2	2	0	1	0	0	0	0	0
Zlot	1	0	3	0	0	0	1	1
Dubrava 2	1	0	7	0	0	0	4	0
Topolnica	2	0	1	0	0	0	0	0
Golubinje - Miroč	2	0	0	2	0	0	2	1
Sela	8	2	4	0	4	0	3	0
Separacija	4	0	1	3	0	0	0	0

Medicinski centar	0	0	1	0	4	0	0	1
Jugovićeva	0	0	1	0	0	0	0	0
Mlekara	12	0	0	0	0	0	2	0
Ciglana	0	0	1	0	0	1	0	0
Centar - sud	0	0	1	0	0	0	0	0
Laznica	7	1	18	3	2	0	12	0
Žagubica	0	0	3	1	3	0	0	0
Rudna Glava	9	0	5	0	2	0	6	0
NGC 1	2	0	9	0	0	0	0	0
Selište	3	0	3	1	3	0	2	0
Moravska	0	0	1	0	0	0	0	0
Vražogrnac	3	4	20	5	17	1	8	3
Vrtovac	4	1	11	2	6	0	8	4
Izvor	6	1	5	6	4	0	5	0
Vajuga	17	0	12	0	3	0	5	0
Donji Ključ	14	0	6	1	1	0	9	0
Kaličina	1	1	8	0	2	0	13	2
Krepoljin	2	0	6	1	0	3	0	0
Osanica	0	2	13	0	1	0	4	0
Sige	4	0	9	0	1	0	5	1
Vidikovac 2	0	0	0	0	1	0	1	0
Kalna	3	1	0	0	0	0	0	0

NI - Naziv izvoda

GP - Godište prekidača

U_n - Nazivni napon [kV]

TV - Tip voda

DPN - Dozvoljeni pad napona [mV]

SP - Starost ispravnog prekidača

UBP – Ukupan broj prekida

KS – Kratak spoj

BIOGRAFIJA

Jelena Velimirović rođena je 08.06.1985. godine u Baru, Crna Gora, gde je završila osnovnu školu i gimnaziju sa odličnim uspehom.

Osnovne i masterske studije Engleskog jezika i književnosti završila je na Filozofskom fakultetu u Novom Sadu.

Masterske studije na Fakultetu zaštite na radu u Nišu, smer Upravljanje vanrednim situacijama, upisala je 2014. godine. Masterski rad pod nazivom Društveni mediji i ljudski resursi u vanrednim situacijama odbranila je sa ocenom 10.

Oktobra 2016. godine upisala je doktorske akademske studije na Tehničkom fakultetu u Boru, smer inženjerski menadžment. Položila je sve ispite predviđene Nastavnim planom i programom doktorskih akademskih studija ocenom 9.66 (devet i 66/100).

Dana 01.11.2016. godine zasnovala je radni odnos na Matematičkom institutu SANU u Beogradu kao istraživač-pripravnik. Od 2019. je anagažovana u zvanju istraživač-saradnik u istoj instituciji.

Kao istraživač bila je angažovana na projektu Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja III 044006 pod nazivom Razvoj novih informaciono-komunikacionih tehnologija korišćenjem naprednih matematičkih metoda, sa primenama u medicini, telekomunikacijama, energetici, zaštiti nacionalne baštine i obrazovanju.

Bila je član tima na dva međunarodna projekta iz oblasti mašinskog učenja i veštačke inteligencije, pod naslovima Development of Smart Water Management System (SWaMS) i Development of Advanced Energy Management System (AdEMS).

U dosadašnjem radu objavila je preko trideset naučnih radova, od kojih su pet štampana u međunarodnim časopisima sa SCI liste, a ostali u časopisima od međunarodnog značaja i referisani na međunarodnim i domaćim konferencijama i publikovani u odgovarajućim zbornicima. Koautor je i jedne istaknute monografije međunarodnog značaja.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора: Јелена Д. Велимировић

Број индекса: 4/2016

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Развој вишекритеријумског модела за утврђивање приоритета замене енергетске опреме применом интервалних дијаграма утицаја

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршила ауторска права и користила интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, 06.02.2023.год.



Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора: Јелена Д. Велимировић

Број индекса: 4/2016

Студијски програм: Инжењерски менаџмент

Наслов рада: Развој вишекритеријумског модела за утврђивање приоритета замене енергетске опреме применом интервалних дијаграма утицаја

Ментор: Проф. др Ђорђе Николић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, 06.02.2023.год.



Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Развој вишекритеријумског модела за утврђивање приоритета замене енергетске опреме применом интервалних дијаграма утицаја

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предала сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе 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 прерада (CC BY-NC-ND)
- ☒ 4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.
Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, 06.02.2023.год.



1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.