Broj rada: R1-04
DOI:10.46793/CIRED2026.R1-04_142

DIJAGNOSTIKA STANJA KABLOVA U ELEKTRODISTRIBUTIVNIM MREŽAMA

DIAGNOSTICS OF CABLE CONDITION IN POWER DISTRIBUTION NETWORKS

Aleksandar STOJIŠIĆ, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Srbija*
Mileta ŽARKOVIĆ, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Ovaj rad se bavi analizom stanja kablova primjenom fazi logike. Značaj fazi logike jeste u objektivnosti i kombinaciji analize pouzdanosti sa stanjem opreme, u cilju pravovremenog i pravilnog donošenja odluke o održavanju kablova. Cilj rada je formiranje ekspertskog sistema koji ukazuje na trenutno stanje, vjerovatnoću kvara, odnosno hitnost intervencije na kablovima koristeći dostupna mjerenja više parametara. U radu su predstavljene sve faze primjene fazi logike. Rad uvodi algoritam hibridne primjene fazi ekspertskih sistema koji kombinuju izlaze i ulaze ekspertskih sistema. Rezultati fazi analize pokazuju kvalitativnu i kvantitativnu procjenu stanja kablova, pri čemu se jasno razlikuju zdrava, degradirana i kritična stanja kabla i njegovih elemenata. Na osnovu dobijenih vrijednosti izlazne promjenljive moguće je odrediti stepen hitnosti intervencije, kao i prioritizaciju održavanja. Posebna prednost primjene fazi logike ogleda se u mogućnosti identifikacije prelaznih stanja izolacije, koja klasične metode često ne prepoznaju. Doprinos ovog rada ogleda se u razvoju i primjeni fazi logičkog modela za procjenu stanja kablova, definisanju odgovarajućih funkcija pripadnosti i baze pravila zasnovane na realnim mjernim podacima. Predloženi pristup omogućava dobijanje jedinstvenog indeksa stanja kabla, koji može da posluži kao osnova za planiranje preventivnog i prediktivnog održavanja, kao i za smanjenje rizika neplaniranih ispada i kvarova.

Ključne reči: dijagnostika, fazi logika, kablovi, održavanje, pouzdanost

ABSTRACT

This paper addresses the analysis of cable condition using fuzzy logic. The significance of fuzzy logic lies in its objectivity and in the integration of reliability analysis with equipment condition assessment, aiming at timely and accurate decision-making regarding cable maintenance. The objective of the paper is the development of an expert system that indicates the cables' current condition, probability of failure, and urgency of intervention, based on available measurements of multiple parameters. The paper presents all phases of fuzzy logic application. Furthermore, it introduces an algorithm for the hybrid application of fuzzy expert systems that combines the inputs and outputs of multiple expert systems. The results of the fuzzy analysis provide qualitative and quantitative assessments of cable condition, clearly distinguishing healthy, degraded, and critical states of the cable and its components. Based on the obtained values of the output variable, it is possible to determine the level of intervention urgency as well as maintenance

* Aleksandar Stojišić aco.pepi999@gmail.com; Mileta Žarković mileta@etf.rs

prioritization. A particular advantage of fuzzy logic application is its ability to identify transitional insulation states that are often not detected by conventional methods. The contribution of this paper lies in the development and application of a fuzzy logic model for cable condition assessment, the definition of appropriate membership functions, and the establishment of a rule base based on real measurement data. The proposed approach enables the derivation of an unified cable condition index, which can serve as a basis for preventive and predictive maintenance planning, as well as for reducing the risk of unplanned outages and failures.

Keywords: Cables, Diagnostics, Fuzzy logic, Maintenance, Reliability

UVOD

Pouzdana i kontinualna distribucija električne energije predstavlja jedan od osnovnih zahtjeva savremenih elektrodistributivnih sistema. U tom kontekstu, stanje energetskih kablova ima ključnu ulogu u obezbjeđivanju stabilnog rada mreže, minimizaciji tehničkih gubitaka i sprečavanju neplaniranih prekida u napajanju. Tokom eksploatacije, kablovi su izloženi različitim vrstama naprezanja – termičkim, električnim i mehaničkim – što dovodi do njihove postepene degradacije. Pravovremeno prepoznavanje promjena u njihovom stanju predstavlja značajan izazov, budući da su dostupni dijagnostički podaci često nepotpuni, neprecizni ili nepouzdani. U oblasti dijagnostike stanja kablova i dalje postoje otvorena pitanja koja se odnose na izbor adekvatnih metoda za obradu podataka, pouzdanu procjenu stepena degradacije i donošenje optimalnih odluka o održavanju. Tradicionalni pristupi često se oslanjaju na strogo definisane kriterijume i determinističke modele, koji ne uspjevaju u potpunosti da obuhvate složenost realnih uslova u elektrodistributivnim mrežama. Zbog toga se javlja potreba za primjenom naprednih metoda koje mogu efikasno da upravljaju neizvjesnošću i nepreciznošću podataka. Jedan od takvih pristupa zasniva se na primjeni fazi logike, koja omogućava modelovanje nejasnih i lingvistički definisanih varijabli, kao i integraciju ekspertskih znanja u proces odlučivanja. Motiv ovog rada jeste unapređenje postojećih metoda dijagnostike kroz razvoj modela zasnovanog na fazi logici, koji bi omogućio pouzdaniju procjenu stanja kablova u distributivnim mrežama. Cilj rada jeste procjena vjerovatnoće pojave kvara na kablu primjenom pristupa zasnovanog na fazi logici, kao i analiza njegovog doprinosa povećanju pouzdanosti sistema, smanjenju tehničkih gubitaka i optimizaciji procesa održavanja.

Održavanje visokonaponskih postrojenja razmatrano je u velikom broju radova, u kojima se primjenjuju i modifikuju tri osnovne strategije održavanja [1]. U savremenoj literaturi posebno je zastupljena primjena metoda iz oblasti vještačke inteligencije. U literaturi se koriste pojedinačne tehnike ili njihove kombinacije, kao što su Monte Karlo simulacija, fazi logika, vještačke neuronske mreže, genetski algoritmi i drugi optimizacioni postupci.

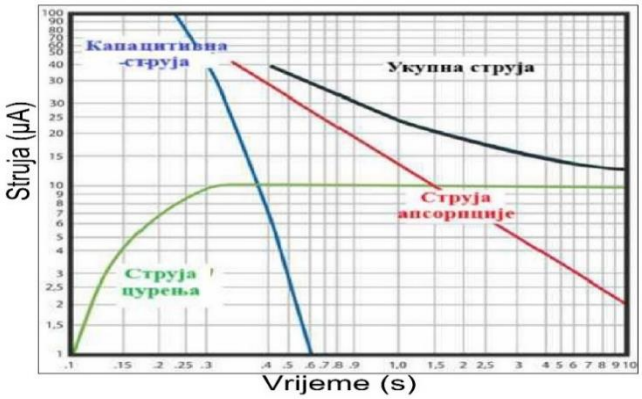
U ovom radu primjenjuje se hibridni sistem zasnovan na fazi logici. Takav pristup doprinosi povećanju robusnosti i adaptivnosti sistema, budući da je svaki podsistem specijalizovan za određeni aspekt problema, dok se neizvjesnost propagira i obrađuje kroz više nivoa zaključivanja. Standardne metode ne uzimaju u obzir mjernu nesigurnost, neizvjesnost i povezanost podataka više monitoringa koji figurišu u metodama [2].

Struktura rada obuhvata sledeća poglavlja: ulazne veličine, model hibridnog fazi sistema, rezultati i zaključak.

1 ULAZNE VELIČINE

Generalno posmatrano, IEC standardi su pretežno usmjereni na precizno definisanje zahtjeva i metoda ispitivanja novih kablova, dok tehnički dokumenti organizacija CIGRE i IEEE pružaju praktičnije smjernice za terenska ispitivanja i dijagnostiku stanja energetskih kablova.

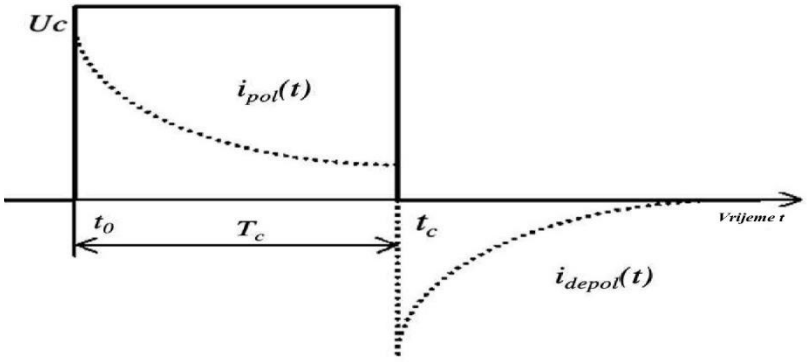
Brojne metode dijagnostike zasnovane na testiranju u vremenskom domenu razvijene su prije više od tri decenije i postale su popularne u primjeni dijagnostike kablova. Osnovni princip mjerenja odziva na jednosmjerni napon kod takvih metoda zasniva se na mjerenju ukupnog protoka struje unutar izolacionog sistema. Ukupna struja se može podijeliti u tri glavne komponente: kapacitivnu struju, struju apsorpcije i struju curenja.



Slika 1 – Raspodjela struja u izolaciji tokom izlaganja jednosmjernom naponu, izvor: [2]

Kapacitivna struja predstavlja struju koja puni kapacitet izolacionog sistema tokom ispitivanja i najčešće se mjeri na interfejsima slojeva koji su odvojeni dielektrikom. Ova struja je prijelaznog karaktera; započinje na relativno visokom nivou, a zatim eksponencijalno opada do zanemarljivih vrijednosti. Struja curenja predstavlja mjeru sposobnosti izolacije da ograniči prolazak električne struje kroz izolacioni materijal pod djelovanjem električnog polja i relativno je stabilna tokom vremena, pod određenim uslovima. Ona obuhvata zapreminsku i površinsku struju curenja, kao i struje koje mogu nastati uslijed prisustva parcijalnih pražnjenja. Stabilizacija ove struje u velikoj mjeri zavisi od svojstava materijala i dinamike kretanja naelektrisanih čestica u izolaciji. Struja apsorpcije odgovorna je za distribuciju naelektrisanih čestica unutar dielektrične strukture, kao i za reorijentaciju molekula dielektrika pod dejstvom primjenjenog električnog polja. Kretanje naelektrisanih čestica dovodi do promjene raspodjele naelektrisanja na spoljašnjim elektrodama, što se može mjeriti.

U ispitivanju se primjenjuje jednosmjerni (DC) napon tipičnog opsega od 1 do 5 kV, u trajanju od 5 do 30 minuta. Tokom ovog procesa kabl se najprije puni, a zatim prazni kroz otpornik. Nakon toga se snimaju i analiziraju struje polarizacije (i_{pol}) i depolarizacije (i_{depol}) u vremenskom domenu, kako bi se procijenila ukupna degradacija kablovskih izolacionih sistema u eksploataciji.



Slika 2 – Princip mjerenja polarizacione i depolarizacione struje, izvor: [2]

Struja depolarizacije nastaje u trenutku t_c kao rezultat relaksacionih procesa polarizacije nakon prestanka naponskog opterećenja. Analiza struje depolarizacije koristi se za procjenu stepena degradacije izolacije.

1.1 Indeks polarizacije i indeks apsorpcije

Vremenska konstanta kapacitivne komponente struje je mala, dok je trajanje apsorpcione komponente znatno duže i uslovljeno polarizacionim procesima unutar dielektrika. Na ovu komponentu značajno utiče prisustvo vlage i drugih produkata. Vremenska konstanta apsorpcionih procesa se, zbog prisustva vlage i polarnih nečistoća nastalih starenjem izolacionog sistema, značajno smanjuje. Ova osobina apsorpcionih procesa koristi se za procjenu stepena ovlaženosti izolacije, na osnovu odnosa izmjerenih vrijednosti izolacionog otpora. Karakteristične vrijednosti izolacionog otpora, koje se mjere u različitim vremenskim intervalima od početka mjerenja su: desetominutna vrijednost izolacionog otpora ($R_{10'}$), petominutna vrijednost izolacionog otpora ($R_{5'}$), jednominutna vrijednost izolacionog otpora ($R_{60''}$), tridesetosekundna vrijednost izolacionog otpora ($R_{30''}$) i petnaestosekundna vrijednost izolacionog otpora ($R_{15''}$).

Indeks polarizacije (IP) definiše se kao odnos desetominutne i jednominutne vrijednosti izolacionog otpora.

$$IP = \frac{R_{10'}}{R_{60''}} \tag{1}$$

Indeks apsorpcije (engl. *Dielectric Absorption Ratio*, DAR) definiše se kao odnos jednominutne i tridesetosekundne vrijednosti izolacionog otpora.

$$DAR = \frac{R_{60''}}{R_{30''}} \tag{2}$$

Ova dva indeksa govore o stanju ovlaženosti i ostarjelosti elektroizolacionog sistema, kao i njegovoj zaprljanosti. U sledećim tabelama je prikazana procjena stanja izolacije kablova na osnovu ovih indeksa.

Tabela I – Procjena stanja izolacije kablova na osnovu *IP* i *DAR* indeksa, izvor [3]

Vrijednost *IP*-e	Vrijednost *DAR*-a	Stanje izolacije
< 2	< 1,25	Loše
2 – 4	< 1,6	Prihvatljivo
> 4	> 1,6	Dobro

1.2 Normalizovano dielektrično pražnjenje

Normalizovano dielektrično pražnjenje (engl. *Normalized Dielectric Discharge*, DD) predstavlja odziv polarizacione struje izmjeren nakon jednog minuta izloženosti kabla naponskom naprezanju. Dobijena vrijednost normalizuje se dijeljenjem proizvodom ukupne kapacitivnosti ispitivanog kabla (C_0) i primjenjenog ispitnog napona (U).

$$DD = \frac{i_{pol,1\,min}}{U * C_0} \tag{3}$$

Tabela II – Procjena stanja izolacije kablova na osnovu normalizovanog dielektričnog pražnjenja, izvor [3]

Vrijednost *DD*-a	Stanje kabla
> 7	Loše
4 – 7	Sumnjivo
2 – 4	Prihvatljivo
< 2	Dobro

1.3 Prividna izolaciona provodljivost i stepen nelinearnosti

Prividna izolaciona provodljivost (σ_{app}) izračunava se kao razlika između polarizacione i depolarizacione struje izmjerenih nakon istog vremenskog perioda (najčešće 10 minuta). Uzimanjem u obzir geometrijskog faktora, odnosno dijeljenjem kapacitivnošću kabla, dobijena vrijednost prividne izolacione provodljivosti može se koristiti za poređenje kablova različitih dimenzija.

$$\sigma_{app} = \frac{i_{pol} - i_{depol}}{U * C_0} \tag{4}$$

Stepen nelinearnosti (engl. *Degree of Nonlinearity Factor*, DONL) koristi se za procjenu nelinearnosti izolacije kabla. Definiše se kao odnos depolarizacionih struja izmjerenih nakon 20 sekundi pri ispitnim naponima od 5 kV i 1 kV.

$$DONL = \frac{i_{depol,U=5\ kV,t=20\ s}}{5 * i_{depol,U=1\ kV,t=20\ s}} \tag{5}$$

Faktor DONL često se kombinuje sa prividnom izolacionom provodljivošću radi procjene opšteg stanja izolacije kablova. Kriterijumi procjene prikazani su u narednoj tabeli.

Tabela III – Orijentacione vrijednosti za stepen nelinearnosti kabla, izvor [4]

σ_{app} & *DONL*	Uslovi izolacije kabla
$\sigma_{app} < 10 \times 10^{-16}$, *DONL* = 1	Dobro
$100 \times 10^{-16} < \sigma_{app} < 1000 \times 10^{-16}$, *DONL* = 1	Široka degradacija
$\sigma_{app} < 10 \times 10^{-16}$, *DONL* > 1,2	Loši spojevi
$\sigma_{app} > 10 \times 10^{-16}$, *DONL* > 1,2	Teška degradacija

1.4 Izotermna analiza struje

Izotermna analiza struje (engl. *Isothermal Relaxation Current*, IRC) sprovodi se razdvajanjem tri tipa curenja naelektrisanja na osnovu integracije depolarizacione struje tokom vremena [5]. Pri tome se analiziraju tri eksponencijalne komponente struje različitih vremenskih konstanti, koje odgovaraju struji glavne izolacije kabla, (I_1), struji koja potiče od poluprovodnog sloja, (I_2) i struji povezanoj sa defektima izolacije, (I_3).

Faktor starenja IRC-a zatim se izračunava na osnovu maksimalnih vrijednosti dva identifikovana relaksaciona naelektrisanja koja potiču od defekata izolacije i poluprovodnih slojeva.

$$IRC = \frac{I_3}{I_2} \tag{6}$$

Sledeća tabela daje primjer različitih klasa starenja kablova u zavisnosti od vrijednosti IRC-a.

Tabela IV – Klase starenja električnih kablova u odnosu na faktor *IRC* starenja, izvor [4]

Vrijednost *IRC*-a	Stanje izolacije kabla
< 1,75	Dobro
1,75 – 1,90	Umjereno
1,90 – 2,10	Staro
> 2,10	Kritično

1.5 Dijagnostički faktor

Mjerenje povratnog napona (engl. *Recovery Voltage Measurement*, RVM) predstavlja metodu u kojoj se kabl puni jednosmjernim naponom tokom određenog vremenskog perioda. Zbog pojednostavljenja interpretacije starenja kablova, istraživači su uveli dijagnostički faktor D, definisan kao odnos maksimalne vrijednosti povratnog napona izmjerenog pri naponu $2U$ i vrijednosti izmjerene pri naponu U [6].

$$D = \frac{RVM_{\max}(2U)}{RVM_{\max}(U)} \tag{7}$$

Tabela V – Interpretacija dijagnostičkog faktora izmjerenog pomoću RVM-a, izvor [3]

Vrijednost *D*-a	Procjena
2 – 2,5	Kabl u dobrom stanju
2,5 – 3	Kabl sa umjerenom degradacijom izolacije
> 3	Kabl sa značajnom degradacijom izolacije

1.6 Faktor gubitaka

Mjerenje faktora gubitaka ($tan\ (\delta)$) na veoma niskim frekvencijama (engl. *Very Low Frequency*, VLF) predstavlja jednu od najšire primjenjivanih metoda u terenskoj dijagnostici energetskih kablova, posebno kod starijih instalacija.

Tabela VI – Preporučene granične vrijednosti promjene faktora gubitaka za papirnu izolaciju, izvor [4]

Vrijednost $tan\ (\delta)$ pri VLF U ($\times 10^{-3}$)	Procjena
< 90	Dobro
90 – 200	Sumnjivo
> 200	Loše

1.7 Rastvoreni gasovi

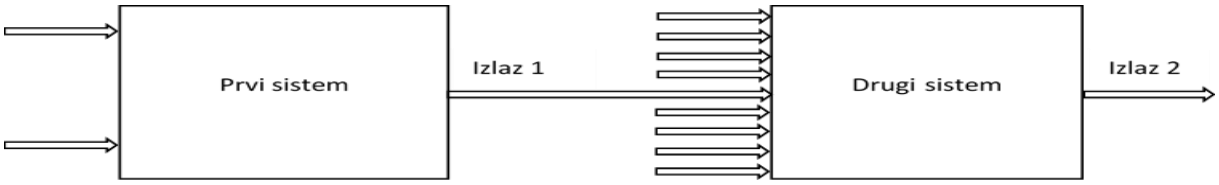
Ispitivanje tečnosti u uljno-papirnim kablovima kod kojih je izolacioni sistem izveden od papirne izolacije uronjene u izolaciono ulje pod određenim pritiskom, pri čemu ulje ima funkciju poboljšanja dielektričnih svojstava i smanjenja pojave parcijalnih pražnjenja, predstavlja efikasnu metodu za procjenu stanja izolacionog sistema. Jedna od najvažnijih metoda jeste analiza rastvorenih gasova (engl. *Dissolved Gas Analysis*, DGA). Za ulazne veličine, kao primjer su uzeti gasovi iz sledeće tabele.

Tabela VII – Granične vrijednosti koncentracije gasa, izvor [7]

Gas	Normalna koncentracija [ppm]	Sumnjivo [ppm]	Opasno [ppm]
Azot (N_2)	75	> 300	> 500
Metan (CH_4)	15	> 50	> 100

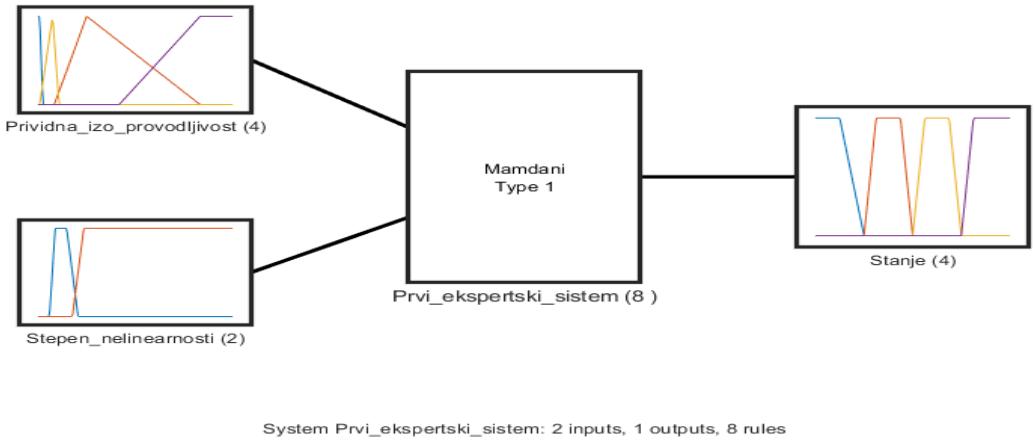
2 MODEL HIBRIDNOG FAZI SISTEMA

U kontekstu hibridnog sistema, kakav se koristi, gdje izlaz jednog ekspertskog sistema predstavlja ulaz drugog, fazi logika omogućava modularnost i hijerarhijsku organizaciju odlučivanja. U radu su napravljena dva ekspertska sistema.



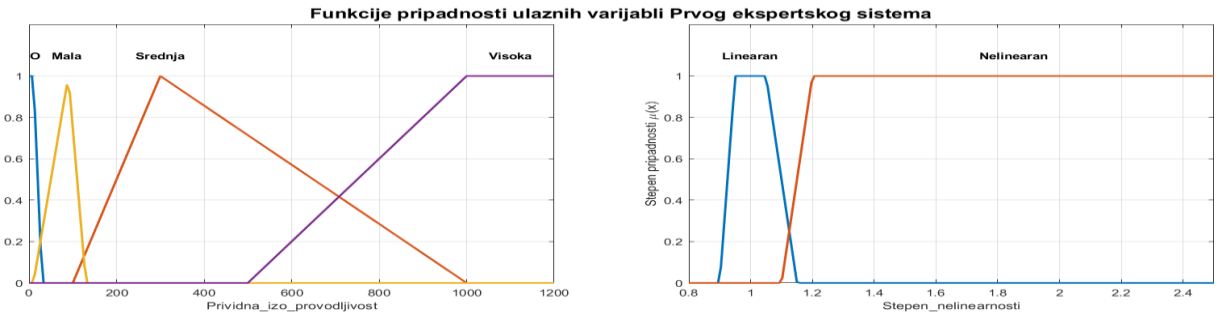
Slika 3 – Blok dijagram hibridnog fazi sistema

U prvoj fazi su u prvom ekspertskom sistemu, kao ulazne veličine korišćeni prividna izolaciona provodljivost i stepen nelinearnosti, a u drugom ekspertskom sistemu izlaz prvog sistema zajedno sa ostalim ulaznim veličinama navedenim u prethodnom poglavlju. Za svaku od ulaznih veličina definisane su funkcije pripadnosti na osnovu navedenih tabela. U drugoj fazi u oba ekspertska sistema primjenjen je *Mamdani* sistem zaključivanja [8]. Pravila zaključivanja za prvi ekspertski sistem definisana su na osnovu Tabele III, dok je za drugi ekspertski sistem formulisano petnaest gradaciono raspoređenih pravila zaključivanja, od najboljeg ka najlošijem stanju kabla. U trećoj fazi prvog sistema dato je opšte stanje izolacije, dok u drugom sistemu izlaz predstavlja vjerovatnoću kvara kabla. Arhitektura oba sistema, funkcije pripadnosti i pravila prikazani su na sledećim slikama.



Slika 4 – Arhitektura prvog ekspertskog sistema

Definisane funkcije pripadnosti za ulazne veličine u prvi ekspertski sistem su prikazane na sledećoj slici.

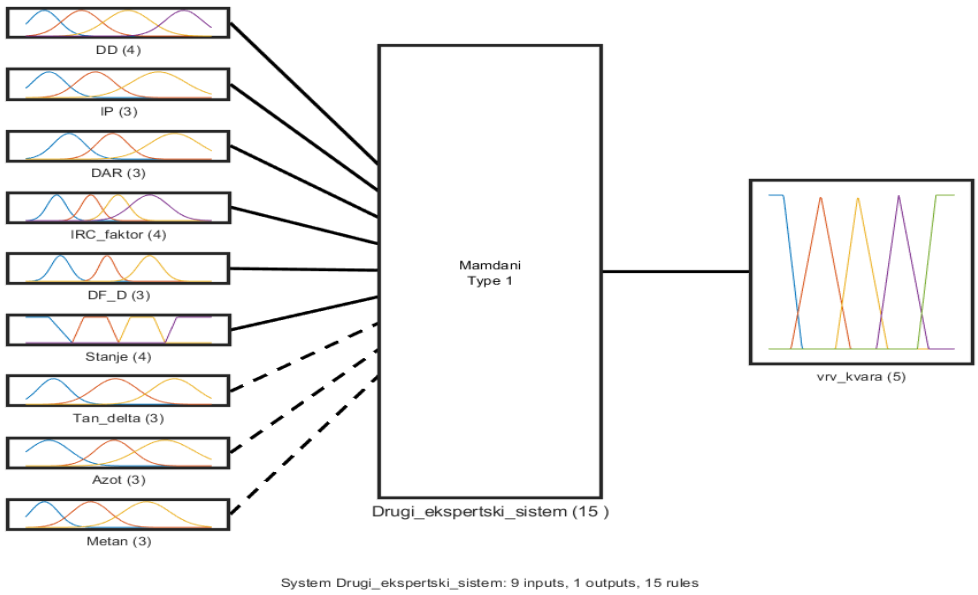


Slika 5 – Funkcije pripadnosti prvog sistema

Na osnovu sledećih pravila primjenjen je sistem zaključivanja za prvi sistem.

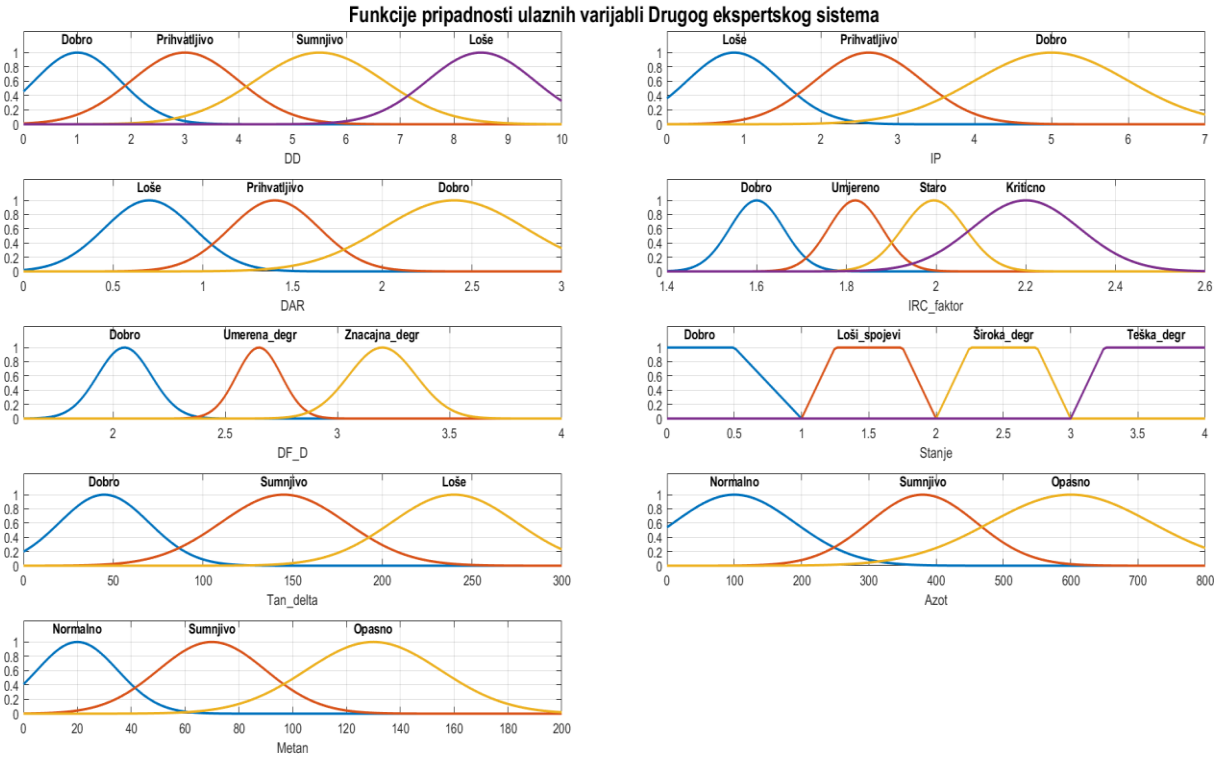
```
1. If (Prividna_izo_provodljivost is O) and (Stepen_nelinearnosti is Linearan) then (Uslovi_izo_kabla is
Dobro) (1)
2. If (Prividna_izo_provodljivost is O) and (Stepen_nelinearnosti is Nelinearan) then (Uslovi_izo_kabla is
Loši_spojevi) (1)
3. If (Prividna_izo_provodljivost is Mala) and (Stepen_nelinearnosti is Linearan) then (Uslovi_izo_kabla is
Široka_degradacija) (1)
4. If (Prividna_izo_provodljivost is Srednja) and (Stepen_nelinearnosti is Linearan) then (Uslovi_izo_kabla
is Široka_degradacija) (1)
5. If (Prividna_izo_provodljivost is Visoka) and (Stepen_nelinearnosti is Linearan) then (Uslovi_izo_kabla
is Teška_degradacija) (1)
6. If (Prividna_izo_provodljivost is Mala) and (Stepen_nelinearnosti is Nelinearan) then (Uslovi_izo_kabla
is Teška_degradacija) (1)
7. If (Prividna_izo_provodljivost is Srednja) and (Stepen_nelinearnosti is Nelinearan) then
(Uslovi_izo_kabla is Teška_degradacija) (1)
8. If (Prividna_izo_provodljivost is Visoka) and (Stepen_nelinearnosti is Nelinearan) then
(Uslovi_izo_kabla is Teška_degradacija) (1)
```

Slika 6 – Pravila prvog sistema



Slika 7 – Arhitektura drugog ekspertskog sistema

Definisane funkcije pripadnosti za ulazne veličine u drugi ekspertski sistem prikazane su na sledećoj slici.



Slika 8 – Funkcije pripadnosti drugog sistema

Na osnovu definisanih pravila fuzzy logike izvršena je klasifikacija stanja izolacionog sistema u pet kategorija, koje obuhvataju stabilno stanje, početnu termičku i površinsku degradaciju, razvoj unutrašnjih defekata i starenje papirne izolacije, ozbiljnu dielektričnu degradaciju, kao i rizik od proboja izolacije. Pravila korišćena za donošenje zaključka prikazana su na sledećoj slici.

```
1. If (DD is Dobro) and (IP is Dobro) and (DAR is Dobro) and (IRC_faktor is Dobro) and (DF_D is Dobro) and (Stanje is Dobro) and
(Tan_delta is Dobro) and (Azot is Normalno) and (Metan is Normalno) then (vrv_kvara is Ništa) (1)
2. If (DD is Prihvatljivo) and (IP is Dobro) and (DAR is Dobro) and (IRC_faktor is Dobro) and (DF_D is Dobro) and (Stanje is Dobro) and
(Tan_delta is Dobro) and (Azot is Normalno) and (Metan is Normalno) then (vrv_kvara is Ništa) (1)
3. If (DD is Prihvatljivo) and (IP is Prihvatljivo) and (DAR is Prihvatljivo) and (IRC_faktor is Umjereno) and (DF_D is Dobro) and
(Stanje is Dobro) and (Tan_delta is Dobro) and (Azot is Normalno) and (Metan is Normalno) then (vrv_kvara is Pažnja) (1)
4. If (DD is Sumnjivo) and (IP is Prihvatljivo) and (DAR is Prihvatljivo) and (IRC_faktor is Umjereno) and (DF_D is Dobro) and (Stanje is
Loši_spojevi) and (Tan_delta is Dobro) and (Azot is Normalno) and (Metan is Normalno) then (vrv_kvara is Pažnja) (1)
5. If (DD is Dobro) and (IP is Dobro) and (DAR is Dobro) and (IRC_faktor is Dobro) and (DF_D is Dobro) and (Stanje is Loši_spojevi) and
(Tan_delta is Sumnjivo) and (Azot is Sumnjivo) and (Metan is Normalno) then (vrv_kvara is Pažnja) (1)
6. If (DD is Sumnjivo) and (IP is Prihvatljivo) and (DAR is Prihvatljivo) and (IRC_faktor is Staro) and (DF_D is Umerena_degr) and
(Stanje is Široka_degr) and (Tan_delta is Sumnjivo) and (Azot is Sumnjivo) and (Metan is Sumnjivo) then (vrv_kvara is 60_dana) (1)
7. If (DD is Sumnjivo) and (IP is Loše) and (DAR is Prihvatljivo) and (IRC_faktor is Staro) and (DF_D is Dobro) and (Stanje is Dobro) and
(Tan_delta is Sumnjivo) and (Azot is Opasno) and (Metan is Sumnjivo) then (vrv_kvara is 60_dana) (1)
8. If (DD is Loše) and (IP is Prihvatljivo) and (DAR is Prihvatljivo) and (IRC_faktor is Umjereno) and (DF_D is Umerena_degr) and (Stanje
is Loši_spojevi) and (Tan_delta is Sumnjivo) and (Azot is Normalno) and (Metan is Sumnjivo) then (vrv_kvara is 60_dana) (1)
9. If (DD is Sumnjivo) and (IP is Loše) and (DAR is Loše) and (IRC_faktor is Staro) and (DF_D is Znacajna_degr) and (Stanje is
Široka_degr) and (Tan_delta is Loše) and (Azot is Sumnjivo) and (Metan is Opasno) then (vrv_kvara is 30_dana) (1)
10. If (DD is Loše) and (IP is Prihvatljivo) and (DAR is Loše) and (IRC_faktor is Staro) and (DF_D is Znacajna_degr) and (Stanje is
Loši_spojevi) and (Tan_delta is Loše) and (Azot is Opasno) and (Metan is Opasno) then (vrv_kvara is 30_dana) (1)
11. If (DD is Sumnjivo) and (IP is Loše) and (DAR is Prihvatljivo) and (IRC_faktor is Kriticno) and (DF_D is Umerena_degr) and (Stanje is
Široka_degr) and (Tan_delta is Sumnjivo) and (Azot is Opasno) and (Metan is Opasno) then (vrv_kvara is 30_dana) (1)
12. If (DD is Loše) and (IP is Loše) and (DAR is Prihvatljivo) and (IRC_faktor is Staro) and (DF_D is Znacajna_degr) and (Stanje is
Teška_degr) and (Tan_delta is Sumnjivo) and (Azot is Sumnjivo) and (Metan is Sumnjivo) then (vrv_kvara is 30_dana) (1)
13. If (DD is Loše) and (IP is Loše) and (DAR is Loše) and (IRC_faktor is Kriticno) and (DF_D is Znacajna_degr) and (Stanje is
Teška_degr) and (Tan_delta is Loše) and (Azot is Opasno) and (Metan is Opasno) then (vrv_kvara is Hitno) (1)
14. If (DD is Sumnjivo) and (IP is Loše) and (DAR is Loše) and (IRC_faktor is Kriticno) and (DF_D is Znacajna_degr) and (Stanje is
Teška_degr) and (Tan_delta is Loše) and (Azot is Opasno) and (Metan is Opasno) then (vrv_kvara is Hitno) (1)
15. If (DD is Loše) and (IP is Loše) and (DAR is Loše) and (IRC_faktor is Staro) and (DF_D is Znacajna_degr) and (Stanje is Teška_degr)
and (Tan_delta is Loše) and (Azot is Opasno) and (Metan is Opasno) then (vrv_kvara is Hitno) (1)
```

Slika 9 – Pravila drugog sistema

3 REZULTATI

U sledećim tabelama će biti prikazani rezultati izlaza ekspertskih sistema.

Tabela VIII – Primjeri ulaznih vrijednosti i izlaza prvog ekspertskog sistema

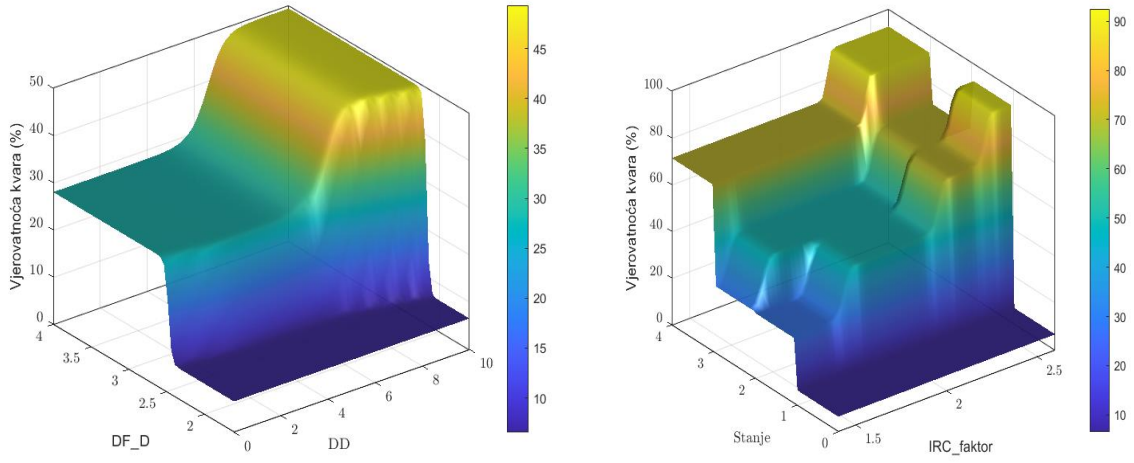
	Primjer 1	Primjer 2	Primjer 3	Primjer 4
σ_{app}	8×10^{-16}	5×10^{-16}	500×10^{-16}	250×10^{-16}
DONL	1	1,4	1	2
Stanje izolacije	0,38 (Dobro)	1,5 (Loši spojevi)	2,5 (Široka degradacija)	3,56 (Teška degradacija)

Tabela IX – Primjeri ulaznih vrijednosti i izlaza drugog ekspertskog sistema

	Primjer 1	Primjer 2	Primjer 3	Primjer 4	Primjer 5
DD	3	5	6,5	8	9
IP	5	3	1,9	1,5	1,2
DAR	1,7	1,4	1,3	1,25	1,15
IRC	1,7	1,8	2	2,05	2,1
D	2,2	2,0	2,4	3,05	3,5
Stanje	0,38	1,5	0,38	2,5	3,56
$tan\ (\delta)$	70×10^{-3}	80×10^{-3}	130×10^{-3}	190×10^{-3}	250×10^{-3}
N_2	60	250	600	450	600
CH_4	15	40	60	80	120
Vjerovatnoća	6,5%	28%	49,3%	70,9%	92,5%

Analiza rezultata dobijenih primjenom hibridnog fazi sistema jasno ukazuje na složenost dijagnostike kablovskih vodova u realnim uslovima eksploatacije. Izlazna varijabla *Stanje* iz prvog ekspertskog sistema ima ulogu u lokalizaciji i identifikaciji prirode defekta, ali se njena interpretacija mora vršiti uz uvažavanje stvarne konfiguracije i uslova eksploatacije pojedinačnih dionica kablovskog voda. U praktičnim uslovima rada, elektroenergetski kabl rijetko prolazi kroz homogenu sredinu. Kablovska trasa najčešće se sastoji od više dionica koje mogu biti položene u tlu različitog sastava, nivoa vlažnosti i termičkih karakteristika ili djelimično prolaziti kroz kablovske kanale i zaštitne cijevi. Iz tog razloga, činjenica da je na jednoj dionici stanje izolacije zadovoljavajuće ne podrazumijeva isti nivo integriteta i na prethodnim ili narednim segmentima, koji mogu biti izloženi drugačijim mikroklimatskim i mehaničkim uticajima. Dodatni, a često i kritičan faktor u ovoj analizi predstavljaju kablovske spojnice i završnice. Kao mjesta na kojima se narušava fabrički kontinuitet izolacionog sistema, spojnice i završnice

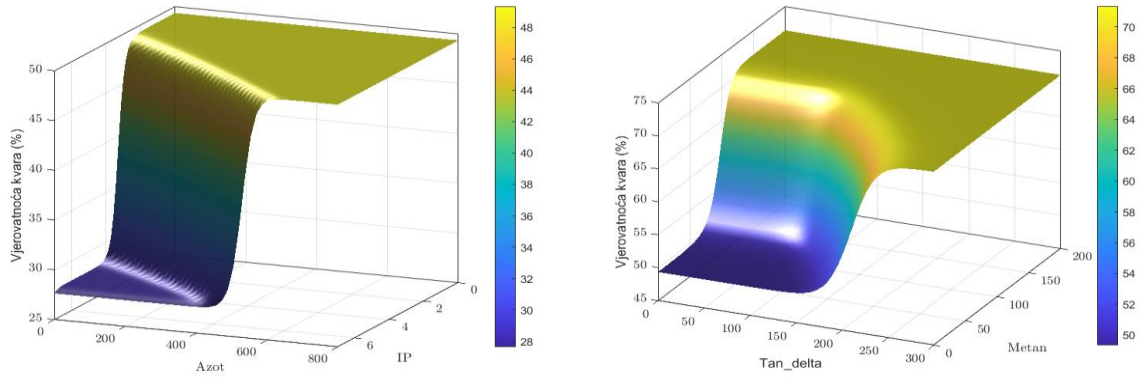
predstavljaju zone povećanog dielektričnog i termičkog naprezanja. Integrisanjem varijable *Stanje* u drugi ekspertski sistem omogućeno je prepoznavanje specifičnih lokalnih defekata. Na primjer, vrijednost 1,50 (Loši spojevi) direktno ukazuje na prisustvo anomalija lokalizovanih na kablovskom priboru, kao što su prodor vlage u spojnicu ili završnicu ili neadekvatno izvedeni kontakti. Sa druge strane, integralne dijagnostičke metode, poput mjerenja faktora dielektričnih gubitaka, kablovski vod posmatraju kao jedinstvenu cjelinu. U takvim uslovima, izražena degradacija jedne spojnice ili završnice kabla može značajno pogoršati ukupni rezultat mjerenja čitavog voda, pri čemu se može prikriti činjenica da je preostali dio kabla u zadovoljavajućem stanju. Predloženi model uspješno prevazilazi navedeni izazov. Formiranjem sveobuhvatnog skupa pravila, kojim se istovremeno analizira svih devet ulaznih varijabli, sistem omogućava uravnoteženo odlučivanje između globalnih pokazatelja degradacije i starenja i lokalizovanih defekata na spojnicama ili završnicama ili pojedinačnim dionicama kabla. Na taj način smanjuje se vjerovatnoća preranog i ekonomski neopravdanog otpisivanja kompletnih kablovskih trasa, dok se upravljanje održavanjem usmjerava ka ciljanim, pravovremenim i tehnički opravdanim lokalnim intervencijama. U radu su korišćeni test primjeri sa simuliranim ulaznim vrijednostima u svrhu matematičke verifikacije algoritma. Predloženi model u realnom pogonu omogućava kategorizaciju kablova i planiranje preventivnog održavanja mreže. Vrijednosti vjerovatnoće kvara prikazane u Tabeli IX dobijene su procesom agregacije i defazifikacije unutar drugog nivoa predloženog hibridnog sistema. Za svaki testirani scenario, aktivirana pravila iz baze su, pomoću *Mamdani* metode inferencije, formirala ukupnu izlaznu površinu zaključka. Konačna numerička vrijednost u tabeli izračunata je primjenom metode težišta (*Centroid*), koja pronalazi geometrijski centar dobijene površine i prevodi ga u jasan procenat. Prikazani rezultati u Tabeli IX direktno oslikavaju nelinearnu interakciju svih devet ulaznih dijagnostičkih parametara za različite situacije. Na sledećim prikazanim slikama može se uočiti uticaj promjena analiziranih ulaznih veličina na izlaz sistema, dok su preostale ulazne veličine održavane na konstantim vrijednostima iz Tabele IX za date primjere. Monoton karakter 3D površina u oblastima nominalnih vrijednosti dijagnostičkih parametara na Slikama 10 (a) i (b) ukazuje na stabilno ponašanje sistema u režimu očuvane izolacije, što rezultuje baznim vjerovatnoćama kvara (od 6,5% za Primjer 1, odnosno 28% za Primjer 2). Međutim, prekoračenje kritičnih pragova vodi ka nelinearnom prelazu u režim ubrzanog starenja dielektrika kroz stepenaste skokove funkcije prenosa.



.

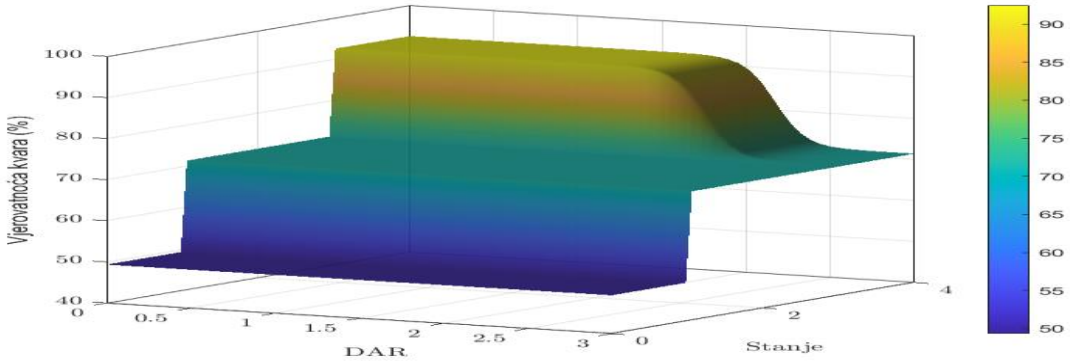
Slika 10 – Vjerovatnoća kvara kabla
(a) u funkciji faktora *D* i *DD* za Primjer 1; (b) u funkciji *Stanja* i faktora *IRC* za Primjer 2

U realnim eksploatacionim uslovima, povišena koncentracija azota bez istovremenog prisustva zapaljivih ugljovodoničnih gasova (u Primjeru 3, metan je fiksiran na bezbjednih 60 ppm) ne indicira neposrednu opasnost od proboja. Nasuprot tome, niske vrijednosti IP-a direktan su indikator kritične vlažnosti i degradacije dielektrika. Model prikazan na Slici 11 (a) stoga opravdano identifikuje indeks polarizacije kao dominantan dijagnostički parametar u ovom scenariju, linearno i nelinearno podižući vjerovatnoću kvara kako se degradacija dielektrika produbljuje. Povišene vrijednosti faktora dielektričnih gubitaka bez istovremenog prisustva zapaljivih ugljovodoničnih gasova ne indiciraju neposrednu opasnost od proboja. Umjesto toga, visoke vrijednosti metana direktan su indikator kritičnih lokalnih pregrijavanja, parcijalnih pražnjenja i ubrzane degradacije dielektrika. Metan, kao dominantan dijagnostički parametar na Slici 11 (b), linearno i nelinearno podiže vjerovatnoću kvara.



Slika 11 – Vjerovatnoća kvara kabla
(a) u funkciji indeksa *IP* i koncentracije azota za Primjer 3; (b) u funkciji koncentracije metana i *tan (δ)* za Primjer 4

Fiksirani horizontalni platoi pokazuju da kada izlaz iz prvog sistema locira anomaliju na kablovskom priboru, ta informacija trenutno preuzima primarni ponder u proračunu vjerovatnoće. Dinamika indeksa apsorpcije, koji kroz odnos otpora u prvoj minuti i tridesetoj sekundi reflektuje brze polarizacione procese, na Slici 12 ne mijenja makroskopske nivoe opasnosti, već se ispoljava kroz blago, nelinearno gradiranje. Promjena *DAR*-a u prelaznim opsezima ima sekundarni značaj u trenucima kada je kroz varijablu *Stanje* već detektovan kritičan prodor vlage u spojnicu ili neadekvatno izveden kontakt, čime se obezbjeđuje stabilna i bezbjednosno opravdana procjena vjerovatnoće kvara.



Slika 12 – Vjerovatnoća kvara kabla
u funkciji *Stanja* i indeska *DAR* za Primjer 5

4 ZAKLJUČAK

U ovom radu razvijen je hibridni fazi sistem koji kroz dva nivoa omogućava pouzdanu procjenu stanja kablovskih vodova. Prvi nivo je definisao da li je riječ o lokalnom oštećenju ili opštoj degradaciji, dok je drugi nivo povezao te podatke sa ostalim mjerenjima u jedinstvenu vjerovatnoću kvara. Podjelom sistema izbjegnut je prevelik broj pravila, čime je proračun na računaru postao znatno brži i stabilniji. Dobijeni rezultati omogućavaju kategorizaciju i rangiranje kablova prema stepenu kritičnosti u cilju optimalnog planiranja investicija i preventivnog održavanja mreže, a sam model se sa uljno punjenih, papirno izolovanih kablova sa metalnim plaštom (engl. *Oil-filled, paper insulated, metal-sheated cables)*, uz odgovarajuće prilagođavanje ulaznih varijabli, pravila odlučivanja i referentnih dijagnostičkih pragova, može proširiti i na ekstrudirane kablove sa umreženim polietilenom i etilen-propilen gumom (engl. *Cross-Linked Polyethylene*, XLPE, *Ethylene Propylene Rubber*, EPR), kao i na papirno izolovane i impregnirane kablove (engl. *Paper-Insulated Lead-Covered*, PILC, *Mass-Impregnated*, MI).

LITERATURA

[1] A. K. S. Jardine and A. H. C. Tsang, „Maintenance, Replacement, and Reliability: Theory and Applications”, *CRC Press*, 2013.
[2] M. D. Žarković, „Monitoring i dijagnostika razvodnog postrojenja na bazi fazi modela stanja visokonaponske opreme”, doktorska disertacija, Beograd, Srbija, 2018.
[3] X. Xu, „Power Cable Diagnostic Review”, *Rapport 2022:903*, Energiforsk, decembar 2022, ISBN 978-91-7673-903-7.
[4] BAUR GmbH, „Cable Diagnostic in MV Underground Cable Networks”, *BAUR GmbH*, Sulz, Austria.
[5] WG B1.28, „On-site Partial Discharge Assessment of HV and EHV Cable Systems”, *CIGRE Technical Brochure 728*, 2018.
[6] R. A. Hartlein, N. Hampton et al., „Diagnostic Testing of Underground Cable Systems (Cable Diagnostic Focused Initiative)”, National Electric Energy Testing, Research and Applications Center (NEETRAC), Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA, DOE Report No. DE-FC02-04CH11237, 2010.
[7] IEEE Std 1406-2020, „IEEE Guide for the Use of Gas-in-Fluid Analysis for Paper and Laminated Paper-Polypropylene Insulated Cable Systems”, *IEEE*, 2020.
[8] E. H. Mamdani and S. Assilian, „An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller”, *International Journal of Man-Machine Studies*, vol. 7, no. 1, 1975, pp. 1–13.