

Napredna dijagnostika stanja vetroparkova

Jelena Balšić *, Mileta Žarković **

* Elektromreža Srbije - EMS AD, Elektrotehnički fakultet Univerzitet u Beogradu

** Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu

Rezime - Savremeni elektroenergetski sistemi se u sve većoj meri oslanjaju na obnovljive izvore energije, pri čemu vetroelektrane zauzimaju značajno mesto u strukturi proizvodnje. Zbog rada u promenljivim i često nepovoljnim uslovima okoline, vetroagregati su izloženi povećanom mehaničkom i električnom naprezanju, što dovodi do degradacije komponenti i povećanog rizika od kvarova. U tom kontekstu, monitoring stanja i pravovremena dijagnostika predstavljaju ključne alate za obezbeđenje visoke pouzdanosti, raspoloživosti i ekonomske isplativosti vetroparkova. U radu je dat pregled savremenih metoda monitoringa i dijagnostike stanja vetroagregata tokom eksploatacije. Posebna pažnja posvećena je praćenju kritičnih pod sistema, kao što su rotor i lopatice, reduktor, ležajevi, generator, energetske konvertori i sistem upravljanja. Analizirane su najčešće korišćene dijagnostičke tehnike, uključujući analizu vibracija, analizu ulja, termografiju, ultrazvučno ispitivanje, akustičnu emisiju, inspekciju lopatica i analizu električnih signala. Poseban akcenat rada stavljen je na primenu fazi logike u procesu dijagnostike stanja vetroagregata. Fazi logika omogućava integraciju nepreciznih, nepotpunih i heterogenih podataka, kao i uključivanje ekspertskog znanja u vidu lingvističkih pravila. Na taj način moguće je objediniti informacije iz više izvora monitoringa i dobiti jedinstvenu numeričku procenu stanja opreme i verovatnoće kvara. Fazi ekspertski sistemi doprinose pouzdanijem donošenju odluka o hitnosti intervencija, smanjenju vremena zastoja i optimizaciji strategija održavanja. Ovakav pristup omogućava prelazak sa korektivnog i preventivnog, na održavanje zasnovano na stvarnom stanju, čime se produžava radni vek opreme, povećava raspoloživost sistema i smanjuju ukupni troškovi eksploatacije.

Ključne reči – vetroparkovi, monitoring stanja, dijagnostika kvarova, fazi logika

I UVOD

U prethodne dve godine vetroenergetika je učestvovala sa do 20 % ukupne električne energije u Evropi. Sličan udeo u proizvodnji električne energije se očekuje i u bliskoj budućnosti na Balkanu. Pouzdani rad vetroparkova sa minimalnim brojem što kraćih zastoja u radu je od izuzetne važnosti za elektroenergetski sistem. Vetroparkovi su, međutim, sistemi visokog strukturnog i stohastičkog karaktera. Njihovo funkcionisanje uslovljeno je aerodinamičkim nelinearnostima, varijabilnošću resursa i mehaničkim zamorom ključnih komponenti (lopatice, prenosni sklopovi, generatori, konvertori, transformatori). U takvom kontekstu monitoring (kontinuirano praćenje parametara stanja) i dijagnostika (pravovremeno

otkrivanje i izolacija neispravnosti) nisu puka prateća aktivnost održavanja, već primarni mehanizam upravljanja rizikom, raspoloživošću i troškovima životnog ciklusa. Njihova uloga je dvojna: tehničko očuvanje integriteta opreme i stabilnosti rada, i ekonomska redukcija neisporučene energije i optimizacija intervencija.

Savremeni vetroparkovi generišu velike skupove podataka: SCADA (snaga, brzina rotora, uglovi zakretanja, parametri vetra), CMS (vibracije, akustika, temperatura, analiza ulja), kao i rezultate periodičnih *off-line* ispitivanja. Ključni izazovi su poznati: normalizacija na uslove vetra, sinhronizacija različitih frekvencija uzorkovanja, upravljanje nedostajućim podacima i, iznad svega, kontrola kompromisa između osetljivosti i lažnih alarma [1].

Naučni značaj rada ogleda se u formulisanju metodološkog okvira koji na sistematičan način spaja *model-based* i *data-driven* pristupe u dijagnostici vetroparkova. Praktični značaj je poboljšana rana detekcija kvarova koja omogućava planiranje intervencija u povoljnim meteo prozorima, povećanje raspoloživosti uz merljivo smanjenje proizvedene cene električne energije.

II METODOLOGIJA I SIGNALI

Savremeno održavanje vetroelektrana temelji se na dijagnostici stanja, koja se realizuje kroz merenje parametara stanja sistema i obradu rezultata utvrđenim metodama. Ranije strategije održavanja, koje su se oslanjale na isključivo subjektivnu procenu stanja opreme, često su vodile održavanju tek nakon nastanka kvara, sa svim negativnim implikacijama koje takav pristup nosi. Pažljivo odabran i implementiran sistem dijagnostike može pomoći operatoru da izbegne situacije koje dovode do trajnog oštećenja sistema vetroelektrane. Pored toga, takav sistem omogućava vrlo rano otkrivanje oštećenja u početnim stadijumima, što omogućava sprovođenje aktivnosti održavanja pre pojave kvara. Najčešći kvarovi elise su greške u njenoj proizvodnji, a značajno utiču i greške operatora, kao i grmljavine i taloženje leda na lopaticama [2]. Usled ovih uzroka dolazi do pukotina na lopaticama, koje se najčešće javljaju na spojevima. Elisa je postavljena na glavnom ležaju, na kome se javljaju oštećenja i kvarovi karakteristični za kotrljajuće ležajeve, a koji se otkrivaju utvrđenim metodama ispitivanja kotrljajućih ležajeva. Reduktor je deo vetroelektrane kod koga najčešće dolazi do kvara; na reduktoru otkazuju kotrljajući ležajevi, a nešto ređe i zupčanici na kojima nastaju pukotine. Reduktori su generatori buke, te se njihovoj dijagnostici i održavanju mora posvećivati posebna pažnja.

Svaki mehanički defekt na vetroturbini dovodi do promene dinamičkog odziva sistema, što se manifestuje promenom amplitudno-frekventnog spektra vibracija. Osnovni zadatak vibracione dijagnostike je identifikacija tih promena i njihovo povezivanje sa fizičkim uzrokom. Podaci se prikupljaju u toku rada turbine i analiziraju u vremenskom i frekvencijskom domenu [3]. Analiza uključuje RMS (*Root Mean Square*) vrednosti vibracija, spektralne karakteristike, harmonike u cilju detekcije defekata. RMS ukazuje na srednju energetska snagu signala i dobro pokazuje opšti nivo vibracija, ali ne uočava kratke impulse koji ukazuju na rana oštećenja. Svaka komponenta ima svoje karakteristične frekvencije i prisustvo kvara se ogleda u promeni amplituda i faza, kao i u pojavi bočnih spektralnih komponenti (*sideband*).

Pored RMS vrednosti, za ranu detekciju kvarova koriste se statistički indikatori kao što su *Crest Factor* (CF) i *Kurtosis* [4]. Analiza vibracija otkriva: neuravnoteženost rotora, neusaglašenost osovine i oštećenja ležajeva ili zupčanika. Za procenu ukupnog nivoa vibracija rotirajućih mašina koriste se standardi ISO 10816 [International Organization for Standardization, ISO 10816: *Mechanical Vibration — Evaluation of Machine Vibration by Measurements on Non-Rotating Parts*, Geneva, Switzerland: ISO] i ISO 20816 [International Organization for Standardization, ISO 20816: *Mechanical Vibration — Measurement and Evaluation of Machine Vibration*], koji definišu granične vrednosti efektivne (RMS) brzine vibracija merene na kućištu mašine. Prikazane vrednosti u Tabeli 1.1 odnose se na industrijske mašine srednje i velike snage i koriste se kao orijentacioni pokazatelji. Za vetroturbine preporučuje se primena ISO 20816-21 i prilagođavanje praga specifičnostima turbine.

Tabela 1. Granične vrednosti za analizu vibracija

RMS vrednost (mm/s)	Stanje
≤ 2.8 mm/s	Normalno
2.8 – 4.5 mm/s	Alarm
≥ 4.5 mm/s	Hitno

Analiza ulja ključna je za ranu dijagnostiku habanja zupčanika i kotrljajućih ležajeva i za otkrivanje zagađenja (voda, prašina, produkti raspada aditiva). Sastav i svojstva ulja se menjaju ranije pre nego što poraste temperatura ili dođe do buke.

Tabela 2. Granične vrednosti za analizu ulja

Parametar	Granica
ISO čestice	> 20/18/15
Gvožđe	>150 ppm
Voda	>0.1% (1000 ppm)
Viskozitet	$\pm 10\%$ od normalne

Temperatura je važna za zaštitu, ali je manje pouzdana za ranu dijagnostiku (na nju utiču ambijent i režim rada) [5]. Praktično: pregrevanje glavnog ležaja najčešće ukazuje na neadekvatno podmazivanje (ili povećano opterećenje/deformaciju), dok je

pregrevanje reduktora najčešće posledica lošeg podmazivanja. Parametri mazivog ulja kao što su nivo viskoziteta, sadržaj vode, broj i identifikacija čestica, pritisak i temperatura mere se radi ranog otkrivanja defekata reduktora i ležaja. Nadzor stanja ulja u vetroagregatima obuhvata on-line senzore i off-line laboratorijsku analizu gde se aproksimativne granične vrednosti predstavljene u Tabeli 2.

Pregrevanje je jedan od najranijih vidljivih signala kvarova u elektro-mehaničkim sklopovima [6]. Termografija i merenje temperature retko daju ranu detekciju kvarova, ali kombinaciji sa analizom vibracija i ulja značajno povećavaju pouzdanost dijagnoze i ubrzavaju donošenje ispravnih odluka u vetroparku. Infracrvena kamera registruje toplotno zračenje tela i prevodi ga u temperaturnu mapu (termogram). Svakoju tački na površini komponenata (ležaj, reduktor, generator, kablovi, konektori, kočnice) pridružuje se temperatura uz korekciju za emisivnost materijala, odbojno zračenje i uticaj rastojanja/atmosfere. Ova analiza otkriva: pregrejane ležajeve, generatore, kablove, loše, slabe električne spojeve i kočnice u neprestanom kontaktu.

Tabela 3. Granične vrednosti za termografiju

Poruka	Granica
Pažnja	25°C iznad normalne
Alarm	40°C iznad ambijentalne
Visok rizik	ležajevi > 70°C

Analizira se oblik i harmonik električnih signala (struje i napona) generatora i pretvarača. Električni problemi često menjaju signale i mogu ukazati na: oštećenje rotorskih šipki, neuravnoteženost između faza i degradaciju izolacije.

Tabela 4. Granične vrednosti za analiza električnih signala

Parametar	Granica
THD(ukupna harmonijska distorzija)	>5–8%
Asimetrija napona	>2%

III FAZI LOGIKA

Monitoringom se prate parametri potrebni za ispravan rad opreme, a u postupku dijagnostike se izmerene vrednosti tih parametara upoređuju sa referentnim vrednostima [7]. U prethodnom poglavlju prikazane su okvirne i preporučene granične, alarmne vrednosti parametara. Na osnovu upoređivanja, moguće je utvrditi nastanak ili napredovanje već postojećeg kvara na opremi. Nedostatak ovakve metode je u tome što ona unosi suviše subjektivnosti kod ocenjivanja rezultata monitoringa. Druge dijagnostičke metode sagledavaju samo rezultate pojedinačnog monitoringa i ne pružaju uvid u celokupno stanje ispitivanog elektroenergetskog elementa, pa samim tim mogu dovesti i do pogrešne odluke. Takođe, u samom procesu dijagnostike stanja opreme često je potrebno upotrebiti i pravila, smernice i preporuke iz IEEE i IEC standarda i iskustva radnih grupa CIGRE i CIRED koja ponekad nisu u potpunosti konzistentna i egzaktna. Pomenute nedostatke postojećih

dijagnostičkih metoda moguće je prevazići primenom naprednih tehnika od kojih je jedna fazi logika (*fuzzy theory*). Dakle, samo sagledavanjem svih prikupljenih podataka u okviru monitoringa, može se proceniti verovatnoća kvara elektroenergetске opreme u razvodnom postrojenju. Za element elektroenergetskog sistema moguće je formirati Fazi ekspertske sisteme koji bi ukazivali na trenutno stanje i verovatnoću kvara odnosno hitnost intervencije na njima u cilju sprečavanja pojave kvara. Mnogi socijalni, tehnički i ekonomski sistemi ne raspolažu potpuno preciznim ulaznim podacima, već podacima sa izvesnom dozom neizvesnosti. Ljudi u takvim uslovima koriste intuiciju, iskustvo i subjektivnu procenu. Zadatak fazi teorije je da omogućiti formalno-matematički aparat koji može da tretira neodređenost i subjektivnost na sistematičan način. Osnovu ove oblasti čini teorija fazi skupova i njena primena u vidu fazi logike. Fazi logika omogućava aproksimativno rezonovanje i čini osnovu ekspertskih sistema, kontrole i donošenja odluka u uslovima nepotpunih ili nejasnih informacija. Fazi logika predstavlja snažan alat za formalizaciju neodređenosti i subjektivnosti u ljudskom rezonovanju. Njena prednost je mogućnost da modeluje složene sisteme i da daje približna, ali praktično upotrebljiva rešenja u realnom vremenu. Zahvaljujući primeni u tehnici, ekonomiji i društvenim naukama, fazi logika je postala most između ljudskog načina razmišljanja i mašinskog procesiranja informacija.

Postoje četiri faze u kreiranju svakog fazi ekspertskog sistema:

- fazifikacija – pretvaranje ulaznih podataka u fazi vrednosti,
- inferencija – procena pravila,
- agregacija – kombinacija izlaza i
- defazifikacija – pretvaranje fazi izlaza u jasan rezultat.

Na osnovu statistike kvarova kod vetroagregata i na osnovu vrste kvarova na koje ukazuju nabrojani parametri, ekspertski sistem se može podeliti na nekoliko podsistema koji se odnose na: analizu ulja, vibracija, ultrazvučno testiranje, akustično emitovanje, inspekciju lopatica, analizu električnih signala i termografsku sliku. Predložena dva ekspertiska podsistema sa svojim izlazima ujedno ukazuju na stanje i na verovatnoću nastanka kvara na pojedinim delovima vetroagregata Slika 2. Izlazi svakog ekspertskog podsistema se množe sa težinskim faktorima (w_i). Izlazi pomnoženi sa težinskim faktorima se sabiraju i dele sa brojem fazi podsistema i na taj način se dobija konačni izlaz. Ako težinski faktori uzimaju svi vrednost jedan, onda su oba podsistema podjednako važna. Odabirom vrednosti težinskih faktora moguće je pojačati neki od izlaza podsistema i tako dati na važnosti konkretnom delu vetroagregata. Pojačanjem težinskih faktora određenog podsistema, odgovarajući deo vetroagregata ima veći udeo u kompletnom stanju.

IV EKSPERTSKI SISTEMI

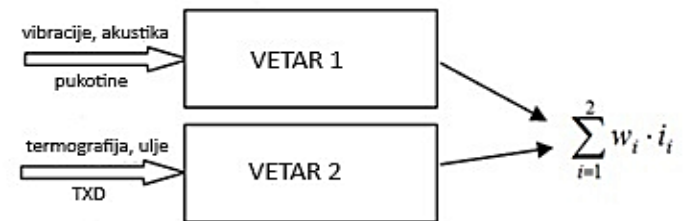
Prvi fazi ekspertski podsistem (Slika 1.) ima za ulaze:

- vibrosenzor,
- akustiku i
- pukotine.

Drugi fazi ekspertski podsistem ima za ulaze:

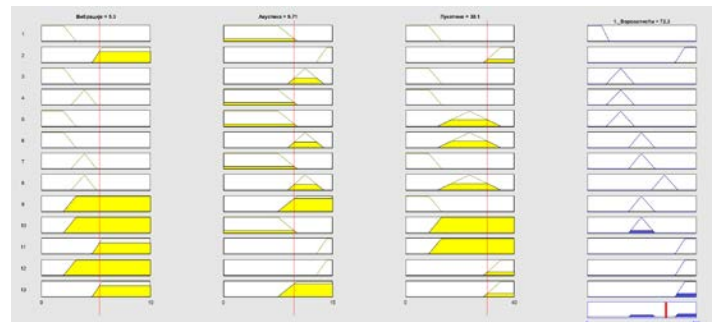
- termografija,

- ulje i
- THD (ukupna harmonijska distorzija).



Slika 1. Ekspertski sistem sa dva fazi ekspertiska podsistema

U skladu sa opisanim algoritmom metode primene fazi logike prvi korak u kreiranju fazi ekspertskog sistema je fazifikacija ulaza i izlaza. Fazifikacija (*fuzzification*) je proces u kome se realne ulazne vrednosti pretvaraju u fazi vrednosti, tj. stepene pripadnosti fazi skupovima koji imaju određena lingvistička svojstva. Fazifikacija naprosto modifikuje signale ulaza tako da mogu biti pravilno protumačeni i upoređeni sa pravilima u bazi pravila. Fazifikacija se takođe zove fazi uklapanje (*fuzzy matching*), kojim se računa sa kojim stepenom istinitosti se ulazni podaci poklapaju sa uslovima u fazi pravilima. Drugim rečima, ispituje se njihova pripadnost lingvističkim vrednostima definisanim fazi skupovima. Ovo omogućavaju upravo funkcije pripadnosti, koje u stvari mapiraju stepen istinitosti neke tvrdnje. Funkcija pripadnosti predstavlja kontinualno merilo sigurnosti da li je promenljiva klasifikovana kao ta lingvistička vrednost. Dakle, fazifikacija omogućava sistemu da radi sa nejasnim ili nepreciznim informacijama kao što su „sumnjivo“, ili „obrat pažnju“. Funkcije pripadnosti koje se najčešće koriste jesu trougaona i trapezoidna i mogu se uočiti za ulaze na Slici 2.



Slika 2. Grafički prikaz aktivacije pravila u MATLAB-u

Izlaz oba podsistema je predstavljen pomoću pet funkcija pripadnosti koje su u vezi sa porukama o potrebnim intervencijama na vetroparku:

- dobro stanje
- pažnja,
- sumnjivo
- alarm i
- hitna intervencija.

Izlazi svih fazi ekspertskih sistema su u opsegu od 0 do 1 ili od 0% do 100% verovatnoće kvara.

Sledeći korak u algoritmu jeste formiranje baze pravila. U fazi inferencije (*Inference*) primenjuju se pravila „ako – onda“ na

dobijene fazi vrednosti. Ova faza omogućava sistemu da na osnovu definisanih pravila proceni kakva bi trebalo da bude reakcija ili izlaz. Formiranje pravila je u obliku: *if* <uslov> *then* <posledica>, s tim što je moguće imati više paralelnih *if*-ova koji se povezuju veznicima „and“, „or“ i „not“, tako da se pomoću njih mogu graditi složena tvrdjenja. Redanjem pravila formira se baza pravila (Slika 3) koja se koristi kod fazi rezonovanja. Baza pravila se formira za svaki fazi ekspertske podsistem i sistem. Pravila se formiraju tako da budu logična i u skladu sa tabelama u vezi sa tumačenjem vrednosti ulaznih parametara.

```

1. If (Вибрације is добро) and (Акустика is добро) and (Пукотине is добро) then (1_Вероватноћа is добро) (1)
2. If (Вибрације is опасно) and (Акустика is опасно) and (Пукотине is опасно) then (1_Вероватноћа is опасно) (1)
3. If (Вибрације is добро) and (Акустика is сумњиво) and (Пукотине is добро) then (1_Вероватноћа is пажа) (1)
4. If (Вибрације is сумњиво) and (Акустика is добро) and (Пукотине is добро) then (1_Вероватноћа is пажа) (1)
5. If (Вибрације is добро) and (Акустика is добро) and (Пукотине is сумњиво) then (1_Вероватноћа is пажа) (1)
6. If (Вибрације is добро) and (Акустика is сумњиво) and (Пукотине is сумњиво) then (1_Вероватноћа is сумњиво) (1)
7. If (Вибрације is сумњиво) and (Акустика is добро) and (Пукотине is добро) then (1_Вероватноћа is сумњиво) (1)
8. If (Вибрације is сумњиво) and (Акустика is сумњиво) and (Пукотине is сумњиво) then (1_Вероватноћа is аларм) (1)
9. If (Вибрације is not добро) and (Акустика is добро) and (Пукотине is not добро) then (1_Вероватноћа is сумњиво) (1)
10. If (Вибрације is опасно) and (Акустика is добро) and (Пукотине is not добро) then (1_Вероватноћа is сумњиво) (1)
11. If (Вибрације is опасно) and (Акустика is опасно) and (Пукотине is not добро) then (1_Вероватноћа is опасно) (1)
12. If (Вибрације is not добро) and (Акустика is опасно) and (Пукотине is опасно) then (1_Вероватноћа is опасно) (1)
13. If (Вибрације is опасно) and (Акустика is not добро) and (Пукотине is опасно) then (1_Вероватноћа is опасно) (1)

```

Slika 3. Baza pravila za fazi ekspertske podsistem

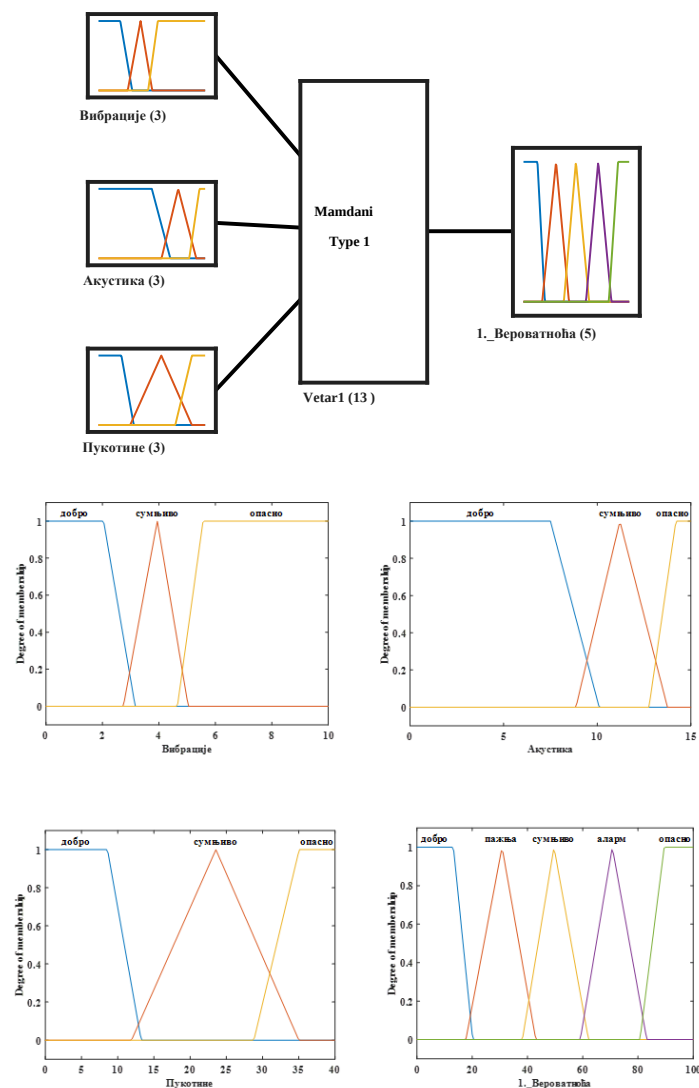
Postoje različiti tipovi i njihove modifikacije zaključivanja, inferencije u fazi logici, ali dva tipa zaključivanja koja su najzastupljenija su *Mamdani* i *Sugeno*. Kod oba tipa zaključivanja za neku unapred zadatu vrednost ulazne promenljive (koja se dobija merenjem, posmatranjem ili subjektivnom procenom) prolazi se kroz sva definisana pravila, tj. posmatra se koliko ima istine u svakoj pojedinačnoj tvrdnji. Tako se određuje vrednost jačine pravila. Kod zaključivanja se računa fazi skup iz zaključka fazi pravila u zavisnosti od jačine odgovarajućeg pravila. Postoje dva opšta pristupa koja se koriste kod Mamdani tipa zaključivanja: metod odsecanja i metod skaliranja, dok se kod Sugeno tipa zaključivanja izlaz fazi pravila dobija kao funkcija ulaznih fazi promenljivih koje u tom pravilu figurišu. Agregacija (*aggregation*) kombinuje rezultate više fazi pravila u jedan zajednički fazi izlaz. Cilj je da se dobije konačan fazi opis izlazne varijable pre defazifikacije. Zbog toga što se fazi sistem zasniva na pravilima koja se delimično preklapaju, određene ulazne vrednosti za sistem mogu da aktiviraju i više pravila odjednom pa je agregacija potrebna da kombinuje rezultate inferencije za svako aktivirano pravilo i oformi jedinstveni fazi skup za izlaznu promenljivu. U ovom radu je odabran Mamdani tip zaključivanja jer kao rezultat agregacije formira fazi skup čime se unosi neizvesnost u izlazu. Agregacija uzima sve prethodno isečene ili skalirane izlazne funkcije pripadnosti i sjedinjava u jednu izlaznu promenljivu koja predstavlja složenu figuru. Primer aktivacije pravila u grafičkom okruženju MATLAB je prikazan na slici 2.

Sledeći korak algoritma primene fazi logike je defazifikacija koja generiše konačni rezultat sistema. To je korak koji daje jasan i upotrebljiv rezultat na osnovu fazi logike. Najčešće korišćena metoda defazifikacije koja je korišćena i u ovom radu je se centar gravitacije (*centroid / center of gravity*).

V REZULTATI

Kompletan postupak kreiranja fazi ekspertske sistema i primene fazi logike moguće je provesti kroz softversku alat MATLAB nudi alat *Fuzzy Logic Toolbox* koji omogućava jednostavno kreiranje fazi logičkih sistema putem grafičkog interfejsa. Kao

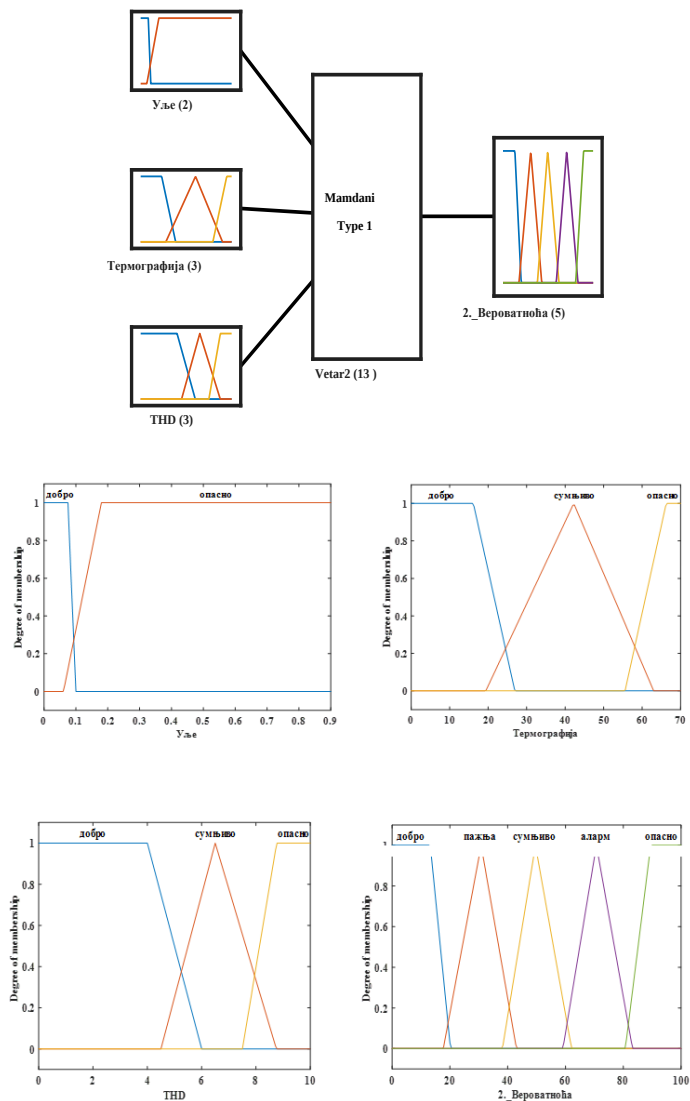
što je već pomenuto, u ovom radu realizovana je primena fazi logike na vetroagregatu kroz dva podsistema — VETAR 1 (mehanički indikatori na Slici 4) i VETAR 2 (termo/elektro indikatori na Slici 5). Za potrebe analize konstruisan je FIS model sa jasno definisanim ulaznim i izlaznim promenljivama, funkcijama pripadnosti i bazom pravila. Posebna pažnja je posvećena grafičkim prikazima. Ovi prikazi su ključni za intuitivno razumevanje ponašanja sistema, vizuelizaciju nelinearnosti, zasićenja i graničnih zona u kojima dolazi do nagle promene izlazne procene rizika. Vizuelizacija preko *Surface Viewer*-a dodatno olakšava izbor pragova i tumačenje međuzavisnosti: na preseccima površi (držanjem jedne promenljive konstantnom) vide se karakteristične „S-krive“ koje opisuju kako sistem postepeno „uključuje“ sve više pravila. Takvi presecci su pogodni za obrazlaganje operativnih smernica, npr. koja kombinacija vibracija i akustike zahteva dalju dijagnostiku, ili koja kombinacija termografije i THD ukazuje na elektro-tehnički problem.



Slika 4. Fazi ekspertske podsistem sa ulazima i izlazom i funkcije pripadnosti za ulaz i izlaz podsistema Vetar 1

Vizuelni prikaz “površi” (surface) izlaza sistema kao funkciju dva izabrana ulaza je 3D slika 6. Površ je 3D grafikon koji

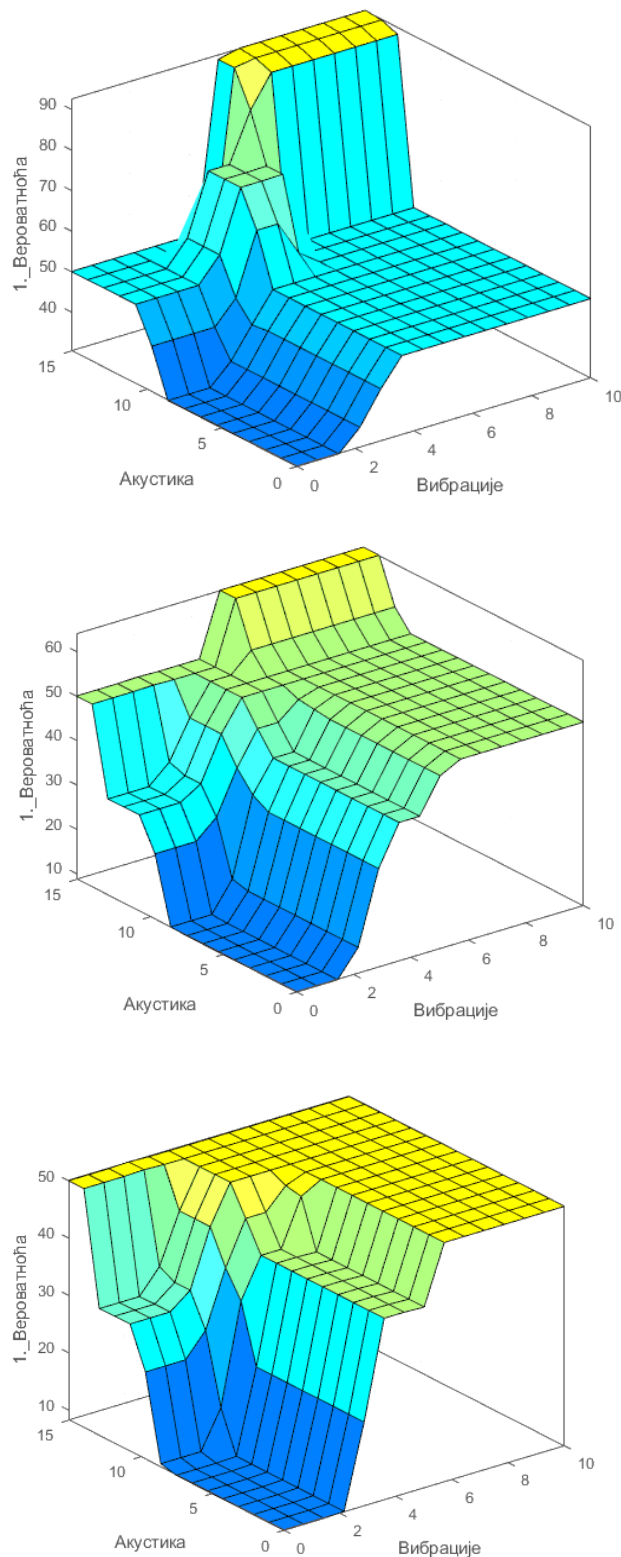
pokazuje kako se izlaz sistem menja kada se dva ulaza menjaju u svojim domenima, dok se ostali ulazi zadržavaju fiksnim referentnim vrednostima. Slike 6-8 ukazuju na promenu mehaničke verovatnoće kvara pri promeni parametara akustike i vibracija, a pri čemu je parametar pukotine fiksiran. Na Slici 6 se može uočiti logično povećanje vrednosti verovatnoće kvara na z-osi pri većem parametru pukotine. Na svim slikama pri povećanju parametra akustike i vibracija povećava se i verovatnoća kvara.



Слика 5. Fazi експертски подсистем са ulazima i izlazom i funkcije pripadnosti za ulaz i izlaz podсистема Vetar 2

Tabelarni primer vrednosti ulaza i izlaznih procena u radu služi samo kao ilustracija numeričke konzistentnosti i praćenja očekivanog trenda (rast ulaza → rast izlazne verovatnoće) i ne nosi težište interpretacije. Glavni uvidi potiču upravo sa prikazanih površi i funkcija pripadnosti: one omogućavaju da se vizuelno identifikuju zone niskog rizika, tranzicione zone pojačane osetljivosti i visokorizične zone, kako u podсистему VETAR 1, tako i u VETAR 2. Na ovaj način slike u radu ne predstavljaju samo ilustraciju, već i dokaz da je predloženi fazi pristup pogodan za tumačenje složenih, međusobno zavisnih

indikatora stanja vetroagregata i za podršku donošenju odluka u monitoringu i dijagnostici.



Слика 6. Вероватноћа у функцији акустике (x) и вибрације (y) при фиксном трећем ulazu (38, 25 i 5).

Tabela 5. Primer vrednosti ulaza i izlaznih procena

Ulazi	Pr. 1	Pr. 2	Pr. 3	Pr. 4	Pr. 5	Pr. 6
Vibracije	0,69	2,11	2,78	2,82	6,15	8,78
Akustika	0,71	3,43	3,5	10,8	9,02	14,7
Pukotine	2,92	11,6	12,1	27,7	33	38,5
Izlaz 1	8,22%	16,4%	34,1%	54,1%	73,4%	92,6%
Ulje	0,017	0,081	0,091	0,86	0,643	0,86
Termografija	3,35	10,1	12,3	19,7	27,2	68,1
THD	0,48	0,73	1,37	3,51	1,37	9,8
Izlaz 2	8,31%	20,4%	33,6%	58,1%	71%	93,4%
Izlaz	8,26%	18,4%	33,85%	56,1%	72%	93%

VI ZAKLJUČAK

Sistematična primena vibracione analize, analize ulja, termografije, ultrazvuka, akustične emisije, inspekcije lopatica i analize električnih signala omogućava rano prepoznavanje degradacija na kritičnim komponentama i planirano održavanje pre nastanka skupih kvarova i dugih zastoja. Suočeni sa stohastičnim opterećenjima i režimskim zavisnostima, ovi metodi daju najveću vrednost kada su normalizovani na uslove rada i kada se njihovi rezultati tumače u međusobnoj fuziji. Doprinos rada je primena fazi logike kao transparentnog, inženjerski razumljivog okvira za integraciju takvih heterogenih i delimično neodređenih informacija. Predložena arhitektura sa dva podsistema (mehanički i termo/elektro) omogućava jasno razdvajanje uzročno-posledičnih veza i efikasnu raspodelu težina ukupne procene stanja. Predložena metodologija je testirana na moguću ulazima monitoringa radi provere logičnosti. Rad utvrđuje da je fazi logika pogodna i efektivna za tumačenje složenih, međusobno zavisnih indikatora stanja vetroagregata. Uspešno spaja inženjersku intuiciju i formalizam, obezbeđujući da se neodređenost i varijabilnost svakodnevne eksploatacije prevedu u jasnu meru rizika koja podržava preventivno održavanje, povećanje raspoloživosti i smanjenje operativnih

rizika. Takav pristup predstavlja realnu osnovu za tehnički zreliji i ekonomski održiviji rad vetroparkova, a ujedno i platformu za dalje unapređenje analitike, integraciju novih senzora i uspešnu koordinaciju održavanja.

LITERATURA

- [1] Antunović, R., Halep, A. Diagnostic of wind power., Mašinstvo, Vol. 4, No. 13, pp. 203-210, 2016.
- [2] Son, J., Kang, D., Boo, D., Ko, K. An experimental study on the fault diagnosis of wind turbines through a condition monitoring system, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 32, No. 12, pp. 5573-5582, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12206-018-1103-y>
- [3] Liu, W.Y., Tang, B.P., Han, J.G., Lu, X.N., Hua, N.N., He, Z.Z. The structure health condition monitoring and fault diagnosis methods in wind turbines: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 44, pp. 466-472, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.005>
- [4] Lu, B., Li, Y., Wu, X., Yang, Z. A review of recent advances in wind turbine condition monitoring and fault diagnosis, in Proc. 2009 IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications, Lincoln, NE, USA, 24-26 June 2009. <https://doi.org/10.1109/PEMWA.2009.5208325>
- [5] Hossain, M.L., Abu-Siada, A., Mueen, S.M. Methods for advanced wind turbine condition monitoring, Energies, Vol. 11, No. 5, pp. 1309, 2018. <https://doi.org/10.3390/en11051309>
- [6] Niemann, H., Poulsen, N.K., Mirzaei, M., Henriksen, L.C. Fault diagnosis and condition monitoring of wind turbines, International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, Vol. 32, No. 4, pp. 586-613, 2017. <https://doi.org/10.1002/acs.2782>
- [7] Žarković, M. Monitoring i dijagnostika stanja razvodnog postrojenja na bazi fazi modela stanja visokonaponske opreme, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2018.

AUTORI

Jelena Balšić – diplomirani inž.elektrotehnike i računarstva, EMS AD, jelenabalsic02@gmail.com, ORCID [0009-0006-3639-1762](https://orcid.org/0009-0006-3639-1762)

Dr Mileta Žarković – vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, mileta@etf.rs, ORCID [0000-0001-5855-6595](https://orcid.org/0000-0001-5855-6595)

Advanced Condition Diagnostics of Wind Farms

Abstract – Modern power systems increasingly rely on renewable energy sources, with wind power plants playing a significant role in the generation mix. Due to operation under variable and often harsh environmental conditions, wind turbines are exposed to increased mechanical and electrical stresses, which lead to component degradation and an elevated risk of failures. In this context, condition monitoring and timely fault diagnostics represent essential tools for ensuring high reliability, availability, and economic viability of wind farms. This paper presents an overview of state of the art methods for condition monitoring and fault diagnostics of wind turbines during operation. Special attention is devoted to the monitoring of critical subsystems, including the rotor and blades, gearbox, bearings, generator, power electronic converters, and control system. The most commonly applied diagnostic techniques are analyzed, such as vibration analysis, oil analysis, thermography, ultrasonic testing, acoustic emission, blade inspection, and electrical signal analysis. Particular emphasis is placed on the application of fuzzy logic in the wind turbine condition diagnostics process. Fuzzy logic enables the integration of imprecise, incomplete, and heterogeneous data, as well as the incorporation of expert knowledge through linguistic rules. In this way, information from multiple monitoring sources can be unified to obtain a single numerical assessment of equipment condition and failure probability. Fuzzy expert systems contribute to more reliable decision-making regarding the urgency of maintenance actions, reduction of downtime, and optimization of maintenance strategies. Such an approach supports the transition from corrective and preventive maintenance to condition-based maintenance, thereby extending equipment lifetime, increasing system availability, and reducing overall operating costs.

Index terms – Wind farms, Condition monitoring, Fault diagnostics, Fuzzy logic