

Filip Mikulecky
Fakultet elektrotehnike i računarstva
filip.mikulecky@fer.hr

Mentor: Viktor Milardić
Fakultet elektrotehnike i računarstva
viktor.milardic@fer.hr

KVALITATIVNO MODELIRANJE INDEKSA POUZDANOSTI ENERGETSKIH TRANSFORMATORA

SAŽETAK

Kontinuirano povećanje starosti visokonaponske opreme u elektroenergetskim sustavima povećava rizik njihovih kvarova i predstavlja jedan od značajnijih problema u vidu pouzdanosti mreže. Zbog svoje brojnosti, kompleksnosti i cijene energetske transformatore nije moguće u kratkom roku zamijeniti novima, te je zbog toga nužno kontinuirano pratiti stanje transformatora u svrhu ekonomski isplativog vođenja mreže. Prirodno se zato nameće zaključak da je potrebno razviti modele koji će rangirati postojeće transformatore u sustavu s obzirom na njihovo stanje. Povratna informacija takvih modela mora biti sažeta, a uobičajeno je da se stanje uređaja valorizira brojem u rasponu od 0 do 100 koji nadalje nazivamo indeksom pouzdanosti. Treba naglasiti da indeks pouzdanosti ne predstavlja egzaktno stanje uređaja, već ga kvantificira na način da se može prezentirati i usporediti na razini populacije transformatora. To implicira da je indeks pouzdanosti relativan indikator stanja uređaja što je analizirano u nastavku rada.

Ključne riječi: indeks pouzdanosti, energetski transformator, ispitivanja, kriterij

QUALITATIVE HEALTH INDEX MODELING FOR POWER TRANSFORMERS

SUMMARY

Continuous increase in the age of high-voltage equipment in power systems increases the risk of their failures and represents one of the major problems in network reliability. Due to high operating numbers, complexity and price, power transformers can not be replaced in short term. It is therefore necessary to continuously monitor the state of the transformer for the purpose of economically profitable network management. Naturally, the conclusion is that it is necessary to develop models that will rank the existing transformers in the system in view of their condition. The feedback of such models must be summarized, and it is customary that the condition of the device is valued by a number ranging from 0 to 100 which is further referred to as the health index. It should be emphasized that the health index does not represent the exact condition of the device, but quantifies it in a way that it can be presented and compared at the level of the transformer fleet.

Key words: health index, power transformers, testing, criteria

1. UVOD

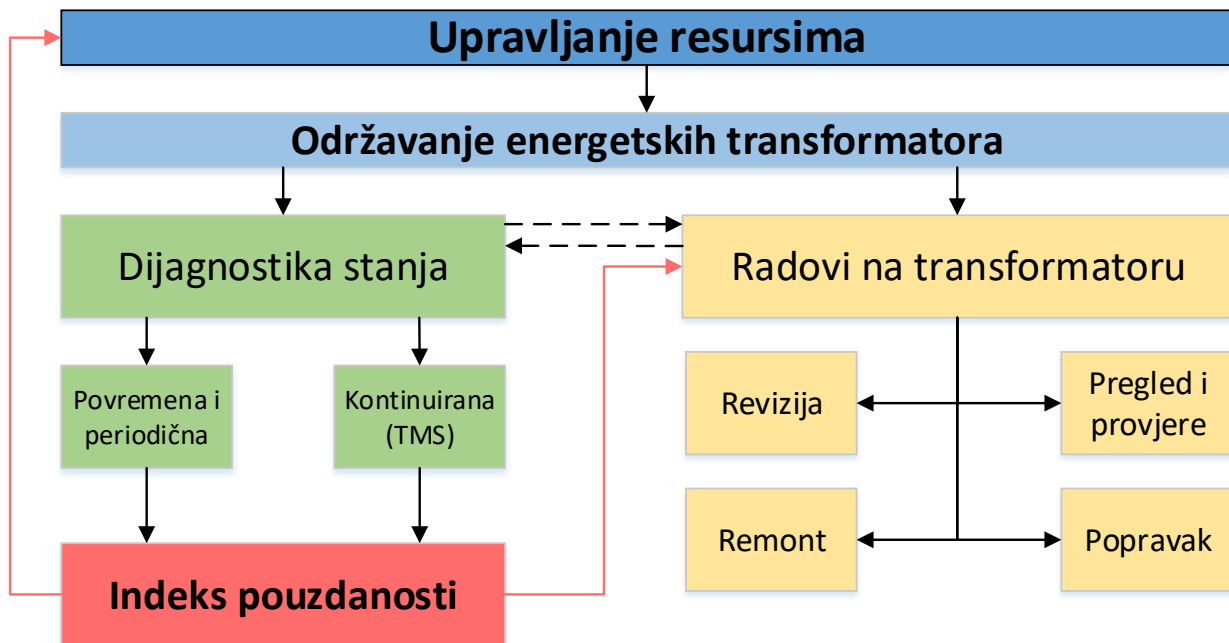
Operatori prijenosnih i distribucijskih sustava koriste različite pristupe za ocjenu stanja energetskih transformatora. Dvije su glavne metodologije, odnosno pristupa problemu; „bottom-up” i „top-down” [1]. „Bottom-up” analiza se fokusira na analizu degradacijskog procesa i procjenu stanja svakog uređaja individualno. Temelji takve analize nalaze se u servisnim i dijagnostičkim izvješćima, povijesti opterećenja i slično. „Top-down” analiza istražuje stanje cijele populacije međusobno usporedivih uređaja pomoću analitičkih alata, odnosno statističkih distribucija. U takvom razmatranju potrebne su informacije o starosti i broju kvarova uređaja s obzirom na ukupnu populaciju, a rezultati mogu biti primjerice procjena frekvencije kvarova. Ovaj rad razmatra analizu stanja transformatora na individualnoj razini.

Pouzdanost transformatora najviše ovisi o mehaničkim i električkim karakteristikama izolacijskog sustava, što je vidljivo iz tablice I. koja prikazuje zastupljenost kvarova s obzirom na podsustave transformatora. U ovom radu smatra se da je izolacijski sustav transformatora sačinjen od papira impregniranog mineralnim uljem. Ta izvedba danas je najzastupljenija, te će se većina razmatranja svoditi upravo na tu izvedbu izolacije.

Tablica I. Zastupljenost kvarova s obzirom pojedine podsustave transformatora [1]

MJESTO KVARA					
Namoti	Spojevi	Provodnik	Regulacijska sklopka	Jezgra	Ostalo
47,4%	6,3%	14,4%	23,2%	3,8%	4,9%

Model izrađen u ovom radu bazira se na podacima iz dijagnostike stanja koja se obavlja na temelju redovitih održavanja, inspekcija i dijagnostičkih ispitivanja. S obzirom na vremensko razdoblje primjene razlikujemo povremena (periodična) i kontinuirana dijagnostička ispitivanja. Težinskim ocjenjivanjem podataka iz dijagnostičkih ispitivanja radi se indeks pouzdanosti kojim se određuju ekonomski optimalno organizirani radovi na populaciji transformatora. Indeks pouzdanosti treba omogućavati brz i efikasan način evaluacije i usporedbe populacije transformatora. Na taj način operator sustava može jednostavno detektirati rizične jedinice i donositi utemeljene odluke u relativno kratkom vremenu. Na dijagramu I. prikazane su sastavnice održavanja energetskih transformatora i uloga indeksa pouzdanosti u tom procesu.



Dijagram 1. Sastavnice održavanja energetskih transformatora

Najvažniji izvor podataka za određivanje stanja transformatora su dijagnostička ispitivanja kojih ima mnogo, a razlikuju se i prakse prikupljanja dijagnostičkih podataka u ovisnosti o potrebama, iskustvima, klimatskim uvjetima, ali i ekonomskim mogućnostima operatora sustava. Zbog toga se kriteriji za modeliranje indeksa pouzdanosti najčešće usklađuju prema zahtjevima naručitelja.

2. OSNOVNI KRITERIJI PRI MODELIRANJU INDEKSA POUZDANOSTI

Kriterija za ocjenu stanja transformatora je mnogo, kao i dijagnostičkih metoda. U ovom radu model indeksa pouzdanosti bit će kreiran s osnovnim kriterijima. Model je koncipiran tako da su kriteriji lako promjenjivi, a izmjene jednostavne, što isti čini modularnim. Ocjena stanja transformatora izvodi se na temelju sljedećih kriterija:

1. Kriterij stanja transformatora na temelju rezultata ispitivanja
2. Kriterij vizualnog pregleda
3. Kriterij važnosti transformatora u sustavu
4. Kriterij starosti transformatora
5. Kriterij prosječnog opterećenja transformatora

2.1. Kriterij stanja transformatora na temelju dijagnostičkih ispitivanja

Procjena stanja transformatora na temelju dijagnostičkih ispitivanja najčešće imaju najveću težinu u modelima pouzdanosti. Osim što direktno opisuju stanje internih komponenti transformatora, sadrže, u određenoj mjeri, i informaciju o ostarjelosti, te radnim uvjetima transformatora. S obzirom na primjenu, razlikuje se povremena (periodična) i kontinuirana (on-line) dijagnostika transformatora. Iako kontinuirana dijagnostika otvara nove mogućnosti pri ocjeni stanja transformatora, u nas vrlo mali broj transformatora ima ugrađene takve sustave pa se zato neće uzeti u obzir pri modeliranju indeksa pouzdanosti.

Najopćenitije, dijagnostička ispitivanja mogu se podijeliti na:

- a) ispitivanja na terenu – uglavnom se svode na električka ispitivanja koja koriste uređaje za mjerenje električkih, ultrazvučnih, toplinskih veličina, te ispitivanje vizualnim pregledom
- b) ispitivanja u laboratoriju – obuhvaćaju laboratorijska ispitivanja izolacijskih materijala u transformatoru

2.2. Kriterij vizualnog pregleda

Vizualni pregled prvi je i neizostavan korak u dijagnostici transformatora, a služi i za potvrđivanje nalaza ostalih primijenjenih dijagnostičkih metoda. Pregledom se uočavaju nedostatci kao što su curenje ulja, onečišćenje hladnjaka, provodnika i slično. Iako naziv metode sugerira korištenje osjeta vida, pri provođenju ove vrste ispitivanja treba upotrijebiti sva raspoloživa osjetila koja mogu sugerirati potencijalne probleme u normalnom pogonu transformatora. Iskustvo osobe koja provodi takvu vrstu dijagnostike od temeljne je važnosti jer svaki transformator ima karakterističan zvuk i vibracije u pogonu, a promjena istih može imati dijagnostičku važnost. Dodatno vizualni pregled može se proširiti metodom termovizijskog snimanja transformatora u svrhu utvrđivanja temperature vizualno dostupnih dijelova transformatora. Iako termovizijom nije moguće odrediti temperaturu unutar kotla, vrlo je efikasna za detekciju pregrijanja priključaka provodnika. Općenito vizualni pregled je jednostavna, brza i jeftina, a možda i najvažnije pravovremenom primjenom iste moguće je registrirati nedostatke prije nego se pojave značajnije smetnje u redovnom pogonu transformatora što ju čini dijagnostički vrlo vrijednom.

2.3. Kriterij važnosti transformatora u sustavu

Važnost transformatora u sustavu definirana je snagom, naponskim redom te najvažnije ekonomskom štetom uzrokovanom uslijed ispada s mreže i internim propisima za održavanje elektro opreme operatora prijenosnog, odnosno distribucijskog sustava. Prema tako definiranoj važnosti određuju

se intervali primjene dijagnostičkih ispitivanja čija je učestalost veća u početku i na kraju životnog vijeka. Dijagnostičke metode proširenog opsega i specijalne dijagnostičke metode u pravilu nemaju predefiniiran raspored primjene osim u slučajevima prvog puštanja u pogon kada se uglavnom koristi široki spektar dijagnostičkih ispitivanja zbog utvrđivanja početnog, odnosno referentnog stanja transformatora koje se nadalje koristi kao referenca za naknadnu dijagnostiku. S obzirom na te kriterije transformatore dijelimo u kategorije koje održavaju važnost transformatora u sustavu i zahtjevnost njihovog održavanja.

Oznake korištene u tablici II. su sljedeće:

0 . . . referentna ispitivanja, prije prvog puštanja u pogon, odnosno nakon remonta ili popravka

M . . . tijekom prvog do trećeg mjeseca pogona

G . . . nakon prve godine dana pogona

Brojčana oznaka . . . interval primjene u godinama

Slova označavaju važnost transformatora u sustavu.

A . . . posebno važni transformatori kod kojih se zahtijeva povećana pogonska sigurnost – nemaju zamjenu i čiji ispad uzrokuje velike ekonomske štete

B . . . transformatori kod kojih se zahtijeva uobičajena pogonska sigurnost – ispad neće prouzročiti obustavu isporuke energije

Rimski broj označava zahtjevnost transformatora s obzirom na održavanje.

I . . . transformatori najvišeg napona opreme $U_m > 170 \text{ kV}$

II . . . transformatori najvišeg napona opreme $52 \text{ kV} < U_m \leq 170 \text{ kV}$

III . . . transformatori najvišeg napona opreme $U_m \leq 52 \text{ kV}$

Tablica II. Učestalost primjene standardnog opsega ispitivanja transformatora starih manje od 30 godina u normalnom pogonu [2]

DIJAGNOSTIČKA METODA	Kategorija transformatora		
	A I, A II	A III, B I, B II	B III
Fizikalno kemijska analiza ulja	0, 2	0, 4	0, 5
Kromatografska analiza plinova	0, M, 1	0, G, 2	G
Termovizijsko snimanje	M, 1	M, 1	G, 5
Ispitivanje električkim metodama	0, 2	0, 4	0

2.4 Kriterij starosti transformatora

Starost transformatora ukazuje na istrošenost istog, koja je definirana s više parametara, a neki od njih su: opterećenje, starost, dizajn, te kvaliteta održavanja. Trajanje pogona transformatora se ne mora podudarati sa starosti no uobičajeno je da su im vrijednosti vrlo bliske, stoga će se u modeliranju indeksa pouzdanosti koristiti podaci o starosti transformatora.

2.5 Kriterij prosječnog opterećenja transformatora

Opterećeniji transformatori brže stare, prvenstveno zbog viših radnih temperatura. Mrežni transformatori općenito rade tek sa dijelom svoje nazivne radne snage. Ostatak se čuva kao redundancija u slučaju ispada nekog od paralelno spojenih transformatora. Prema tome određuje se kriterij opterećenosti transformatora, tablica III, koji će biti korišten u 3. poglavlju.

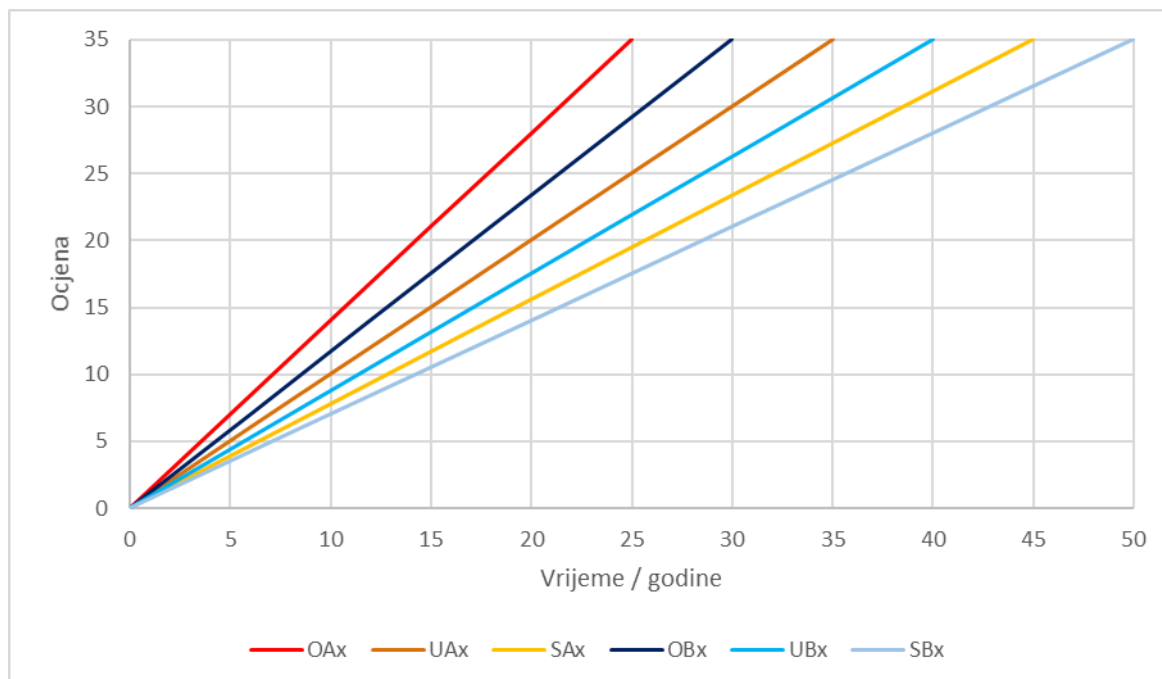
Tablica III. Kriterij opterećenja transformatora

OZNAKA	IZNOS PROSJEČNOG OPTEREĆENJA	NAPOMENA
O	>50%	Opterećen transformator
U	20-50%	Umjereno opterećen transformator
S	<20%	Slabo opterećen transformator

3. MODELIRANJE INDEKSA POUZDANOSTI

Indeks pouzdanosti računa se na temelju dijagnostičkih mjerenja standardnog opsega iz razloga što se isti periodično prikupljaju, kako je to predviđeno tablicom II. Najbolja moguća ocjena je modela iznosi 100 i pretpostavlja se da je tu ocjenu imao prilikom prvih tvorničkih testiranja. Prema tome moguće je da čak prije prvog puštanja u pogon transformator ima ocjenu manju od maksimalne što se može pripisati oštećenju uređaja u transportu ili pri montaži.

Na temelju kriterija o prosječnom opterećenju (O, U, S) i važnosti transformatora (A, B) pretpostavljena je linearna ovisnost ocjene modela indeksa pouzdanosti na temelju kriterija važnosti, starosti i opterećenja u odnosu na starost uređaja. Može se reći da je takva linearna ovisnost relativno dobro opisuje proces starenja redovno održavanog transformatora. Izostanak pravodobnog održavanja ubrzava proces degradacije izolacijskih materijala te tada kriterij s grafikona 1. više nije moguće primijeniti. Transformatori koji se ne nalaze u području karakteristika s grafikona 1., smatra se da im je životni vijek pri kraju i automatski im se dodjeljuje procjena „stanje ne zadovoljava“ prema tablici VI. Maksimalna kumulativna ocjena tih kriterija iznosi 35 bodova.



Grafikon 1. Kriteriji važnosti, starosti i opterećenja kumulativno

U tablici IV. prikazano je bodovanje modela na osnovu najvažnijih dijagnostičkih ispitivanja. Model je relativno jednostavan i sadržava najvažnije osnovne informacije o stanju transformatora. Ocjene pojedinih kriterija određene su prema važnosti u konzultaciji s literaturom [1], [2].

Tablica IV. Sastavnice indeksa pouzdanosti, veća ocjena označava lošije stanje

SASTAVNICE INDEKSA POUZDANOSTI		OCJENA
Kriterij važnosti, opterećenja i starosti		35
Vizualni pregled		15
Laboratorijske ispitne metode	Kromatografska analiza plinova u ulju [DGA]	10
	Fizikalno kemijska analiza ulja [FKA]	5
Električne dijagnostičke metode	Otpor izolacije namota [Riz]	3
	C i tanδ izolacije namota [C, tanδ]	4
	C i tanδ izolacije provodnika [Cp, tanδp]	10
	Rasipni induktivitet namota [Lx]	10
	Otpor svih namota, u svim položajima regulacije [Rn]	5
	Struja magnetiziranja [I0]	3
Σ		100

Sastavnice indeksa pouzdanosti moguće je podijeliti i prema kriteriju reverzibilnosti, tablica V. Općenito tijekom pogona indeks pouzdanosti pada, što je i očekivano, no nekim sastavnicama indeksa pouzdanosti moguće je popraviti ocjenu naknadnim popravcima, odnosno servisiranjem transformatora. Prema tome sastavnice indeksa pouzdanosti dijele se na reverzibilnu i ireverzibilnu komponentu. Svaka komponenta zbog svojih specifičnosti koristi različite tehnologije za sanaciju, a razlikuju se u cijeni, složenosti i primjenjivosti. Za sanaciju nekih komponenti transformatora potreban je i prijevoz uređaja nazad u tvornicu. Druga, ireverzibilna komponenta, obuhvaća starenje izolacijskih materijala, ponajprije izolacijskog papira čije je stanje, u vidu mehaničkih karakteristika, temelj za analizu preostalog vijeka trajanja transformatora. Podjelom indeksa pouzdanosti na reverzibilnu i ireverzibilnu komponentu omogućuje se lakše odlučivanje s obzirom na održavanje i planiranje nabavke novih transformatora što bi inače bilo teže razlučiti [5].

Tablica V. Sastavnice indeksa pouzdanosti prema kriteriju reverzibilnosti

SASTAVNICE INDEKSA POUZDANOSTI PREMA KRITERIJU REVERZIBILNOSTI			
REVERZIBILNA KOMPONENTA		IREVERZIBILNA KOMPONENTA	
Kriterij	Ocjena	Kriterij	Ocjena
Vizualni pregled	15	Opterećenje	35
DGA	10	Starost	
FKA	5	Važnost	
Cp, tanδ	10	I0	3
Lx	10	Riz*	3
Rn	5	C, tanδ*	4
ΣR	55	ΣI	45

*moguće je u određenoj mjeri utjecati na promjenu istih (sušenjem izolacijskog sustava, regeneracijom ulja i slično), no starenje papirne izolacije je ireverzibilno

U tablici VI. prikazana je raspodjela bodova kojom se procjenjuje stanje transformatora na temelju vrijednosti iz tablice IV. Ipak stanje transformatora u stvarnosti se ne može prikazati ovako jednostavnim kriterijem, već je potrebno ugraditi neka ograničenja. Svaka od sastavnica indeksa pouzdanosti, s obzirom na izmjerene vrijednosti prilikom dijagnostike stanja, može direktno odrediti ocjenu stanja neovisno o ostalim komponentama u slučajevima ne dozvoljenih, odnosno kritičnih vrijednosti. Tada se bez obzira na ostala ispitivanja moraju poduzeti hitne radnje da bi se smanjila eventualna ekonomska šteta i ako je moguće sanirati otkrivene nedostatke u što je moguće kraćem roku.

Procjena stanja indeksa pouzdanosti u Tablici VI. računa se po formuli:

$$HI = 100 - \Sigma \quad (1)$$

gdje je: HI - indeks pouzdanosti, a Σ - zbroj ocjena iz Tablice IV.

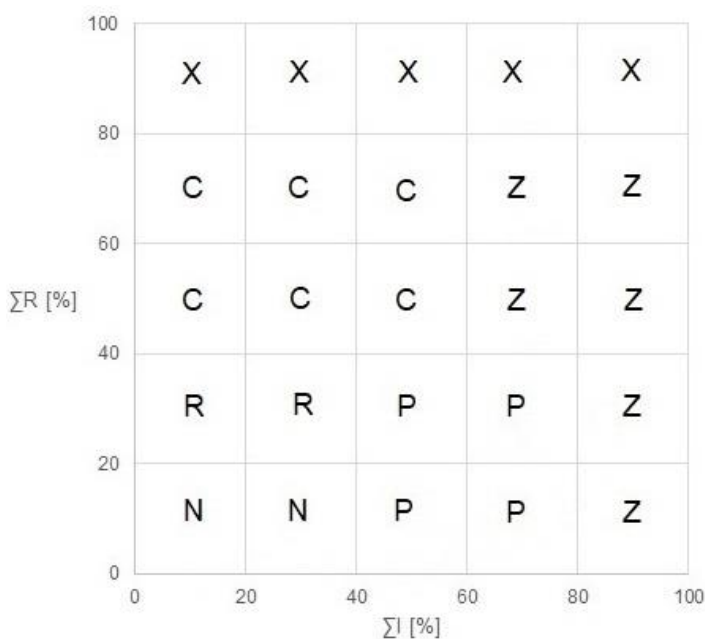
Tablica VI. Procjena stanja transformatora na temelju indeksa pouzdanosti

INDEKS POUZDANOSTI	
HI = 100 - Σ	STANJE
80 – 100	Normalno
60 – 80	Zadovoljava
35 – 60	Ne zadovoljava
0 – 35	Kritično

Prikaz rezultata u tablici analize nije prikladan za razmatranja s obzirom na optimizaciju kratkotrajnih, dugotrajnih i strateških odluka operatora prijenosnog i distribucijskog sustava. Prema tome potrebno je uvesti jednostavan i sažet prikaz rezultata, a pritom se ne smiju gubiti informacije potrebne za odlučivanja u vođenju populacije transformatora. U literaturi [5] predstavljen je 2D prikaz ocjene stanja u kojem smjer apscise odgovara ireverzibilnoj komponenti, dok smjer ordinate odgovara reverzibilnoj komponenti. Takav prikaz određen je sa svim prethodno navedenim karakteristikama potrebnim za optimalno vođenje populacije transformatora, a isti je modificiran da bi se uklapao u razvijen model indeksa pouzdanosti. Reverzibilna i ireverzibilna komponenta, radi preglednosti, prikazane su u postotnim vrijednostima. Takav prikaz, temeljen na reverzibilnoj i ireverzibilnoj komponenti indeksa pouzdanosti, u ovom radu naziva se matricom stanja koja je prikazana na grafikonu 2. Princip odlučivanja, s obzirom na provedenu dijagnostiku stanja, opisno je prikazan u matrici stanja pripadajućim slovom i po potrebi je podložan promjenama, u skladu sa zahtjevima operatora prijenosnog sustava.

Oznake u grafikonu 2. su:

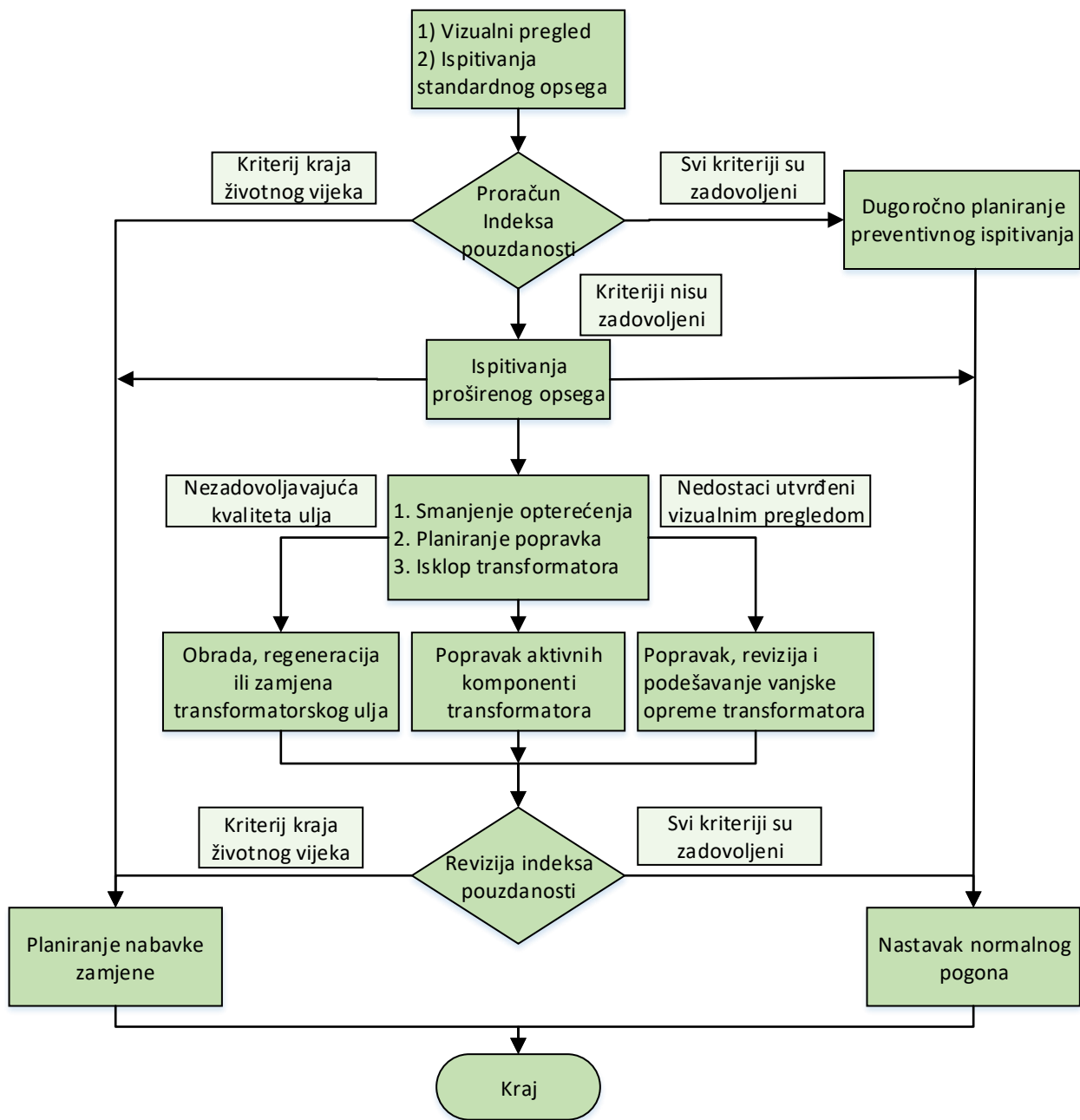
- N . . . normalno stanje transformatora, nije potrebno poduzimati korektivne radnje
- R . . . primijeniti korektivne radnje radi poboljšanja reverzibilne komponente indeksa pouzdanosti
- P . . . potrebno procijeniti učinak mjera za produljenje životnog vijeka transformatora i eventualno ih primijeniti u cilju usporavanja degradacije izolacijskog sustava transformatora
- C . . . primijeniti korektivne radnje radi poboljšanja reverzibilne komponente indeksa pouzdanosti, po potrebi uvesti pogonska ograničenja u normalnom radu i povećati frekvenciju i obujam prikupljanja podataka
- X . . . transformator je potrebno isključiti iz pogona, primijeniti korektivne radnje radi poboljšanja reverzibilne komponente indeksa pouzdanosti
- Z . . . planirati zamjenu transformatora



Grafikon 2. Matrica stanja – 2D prikaz ocjene stanja transformatora

4. SHEMA PROVEDBE MODELA POUZDANOSTI

Na dijagramu II. prikazana je shema provedbe modela pouzdanosti koja prikazuje postupak odlučivanja pri korištenju modela indeksa pouzdanosti pomoću dijagrama toka. Prednost u odnosu na konvencionalno odlučivanje je u tome što se odluka bazira na velikom broju transformatora, te je moguće pristupiti planiranju održavanja, koristeći kriterij reverzibilne komponente indeksa pouzdanosti, i zamjene onih transformatora koji su u najgorem stanju s obzirom na ostale što se može odrediti na temelju ireverzibilne komponente indeksa pouzdanosti. Shema provedbe modela pouzdanosti podrazumijeva reviziju stanja nakon provedbe dodatnih ispitivanja, popravaka na vanjskoj opremi uređaja, zamjeni ulja, odnosno svim radnjama koje utječu na reverzibilnu komponentu indeksa pouzdanosti. S obzirom na uvođenje reverzibilne komponente indeksa pouzdanosti u model prirodno je uključiti reviziju indeksa pouzdanosti. Tema postupka revizije indeksa pouzdanosti biti će tema naknadnih radova.



Dijagram 2. Shema provedbe modela pouzdanosti

6. ZAKLJUČAK

Modeliranje indeksa pouzdanosti složen je postupak, a u ovom radu predstavljena je osnova koja se može po potrebi nadograđivati. Kriteriji za ocjenu stanja ovise o potrebama i iskustvima operatera sustava. Zbog toga indeks pouzdanosti treba biti modularan da zadovolji različite kriterije. Pri odlučivanju o kriterijima treba posebno obratiti pažnju na njihovo fizikalno značenje i pravilno ih tumačiti. Za razliku od većine dosada predstavljenih modela pouzdanosti energetskih transformatora uveden je dvokomponentni indeks pouzdanosti koji podrazumijeva podjelu na reverzibilnu i ireverzibilnu komponentu. Time se omogućuje lakše odlučivanje s obzirom na održavanje i planiranje nabavke novih transformatora što je u klasičnim indeksima pouzdanosti vrlo teško ili nemoguće razlučiti.

7. LITERATURA

- [1] CIGRE WG A2.37 "Transformer Reliability Survey" Brochure 642, 2015.
- [2] A. Mikulecky, S. Gazivoda, S. Sobota "Koncept održavanja energetskih transformatora - priručnik", Končar - Institut za elektrotehniku, Zagreb, 2010.
- [3] L.Lundgaard, W.Hansen, "Ageing of oil impregnated paper in power transformers", IEEE, 2002.
- [4] CIGRE TF D1.01.10 "Ageing of cellulose in mineral-oil insulated transformers" Brochure 323, 2007.
- [5] Alexei Babizki, Marc Foata, Karlheinz Lindl, "Practical approach for fleet management of transformers considering different stakeholders' perspectives", 4th International Colloquium "Transformer research and asset management", 2017.