

**STATISTIČKA ANALIZA REZULTATA BAZE PODATAKA INSTITUTA „NIKOLA TESLA“ U CILJU REVIZIJE POSTOJEĆIH GRANIČNIH VREDNOSTI STANDARDA IEC 60422 I UVIDA I PROCENE STANJA I KVALITETA ULJA RAZLIČITIH KATEGORIJA OPREME****STATISTICAL ANALYSIS OF NIKOLA TESLA INSTITUTE DATABASE RESULTS IN PURPOSE OF REVISING EXISTING LIMIT VALUES WITHIN IEC 60422 STANDARD AND INSIGHT AND ASSESSMENT OF OILS CONDITION AND QUALITY FOR DIFFERENT EQUIPMENT CATEGORIES**

Ksenija DRAKIĆ, Elektrotehnički Institut „Nikola Tesla“, Srbija  
Jelena JANKOVIĆ, Elektrotehnički Institut „Nikola Tesla“, Srbija  
Draginja MIHAJLOVIĆ, Elektrotehnički Institut „Nikola Tesla“, Srbija  
Valentina VASOVIĆ, Elektrotehnički Institut „Nikola Tesla“, Srbija  
Jelena LUKIĆ, Elektrotehnički Institut „Nikola Tesla“, Srbija

**KRATAK SADRŽAJ**

Praćenje stanja i održavanje kvaliteta mineralnih izolacionih ulja u električnoj opremi koja se koristi u proizvodnji, prenosu i distribuciji električne energije je od suštinskog značaja za pouzdan rad električne opreme punjene uljem. Laboratorija za ispitivanje izolacionih ulja i papira ima višedecenijsku praksu u ispitivanju parametara ostarelosti ulja, odnosno fizičkih, hemijskih i električnih karakteristika ulja. Za procenu stanja i kvaliteta ulja u pogonu postoji više tehničkih brošura, domaćih i međunarodnih standarda. Za potrebe izrade nove verzije IEC 60422 standarda, koji će predstavljati vodič za korisnike i laboratorije, na čijim se graničnim vrednostima zasniva tumačenje kvaliteta ulja, izvršena je statistička analiza rezultata merenja iz jedinstvene baze podataka instituta Nikola Tesla. Analizirano je oko 50.000 rezultata osnovnih parametara starenja ulja: sadržaja vode rastvorene u ulju, dielektrične čvrstoće ulja, sadržaja kiselina, međupovršinskog napona i faktora dielektričnih gubitaka ulja, a obuhvaćena je oprema kategorije 0, A, B i C. U radu je prikazana procentualna zastupljenost zadovoljavajućih vrednosti izmerenih veličina u odnosu na ukupan broj merenja, za svaku od navedenih osobina, u odnosu na standardnu graničnu vrednost (ocena A) sa 90% nivoom pouzdanosti. Radi preciznije analize, izvršeno je i utvrđivanje procentualne zastupljenosti ocena kvaliteta A, B i C navedenih osobina takođe za 90% nivo pouzdanosti. Statističkom analizom rezultata utvrđen je visok procentualni udeo ulja sa ocenom A svih ispitanih karakteristika ulja navedenih kategorija opreme, što ukazuje na zadovoljavajući nivo stanja opreme. Najveći doprinos statistici ima oprema kategorije B i C zbog najvećeg broja merenja, odnosno količine opreme koja je u periodičnom laboratorijskom nadzoru. Značaj statističke obrade podataka laboratorija koje učestvuju u reviziji postojećeg standarda je postavljanje realnih graničnih vrednosti koje korisnicima pružaju mogućnost informacija i donošenje odluka po pitanju adekvatnog održavanja opreme. Ključne reči: transformatorsko ulje, granične vrednosti, karakteristike ulja, statistička analiza

**ABSTRACT**

Condition monitoring and quality maintenance of mineral insulating oils in electrical equipment that is used in the production, transmission and distribution of electricity is essential for the reliable operation of oil-filled electrical equipment. Laboratory of Nikola Tesla institute has decades of practice in testing oil aging parameters that is physical, chemical and electrical characteristics of oils. There are several technical brochures, domestic and international standards for assessing the condition and quality of oil in the operating condition. For the purpose of developing a new version of the IEC 60422 standard, which will be a guide for users and laboratories, on whose limit values the interpretation of oil quality is based, statistical analysis of measurement results from the unique database of the Nikola Tesla Institute was performed. About 50,000 results of basic oil aging parameters were analyzed: water content dissolved in oil, oil dielectric strength, acid content, interfacial tension and dielectric dissipation factors and equipment of categories 0, A, B and C is included. The paper presents the percentage of satisfactory values of

measured values in relation to the total number of measurements, for each of these properties, in relation to the standard limit value (grade A) with 90% confidence level. For the purpose of more precise analysis, the percentage of quality marks A, B and C of the mentioned characteristics was determined also for 90% level of reliability. Statistical analysis of the results showed a high percentage of oil with a grade of A of all tested oil characteristics of the above categories of equipment, which indicates a satisfactory level of equipment condition. Equipment category B and C have the greatest contribution to statistics due to the largest number of measurements and the amount of equipment that is in periodic laboratory monitoring. The importance of statistical data processing of laboratories that participate in the revision of the existing standard is putting up real limit values, which provides users the possibility of information and decision-making on the issue of adequate maintenance of equipment.

Key words: transformer oil, limit values, oil characteristics, statistical analysis

[ksenija.drakic@ieent.org](mailto:ksenija.drakic@ieent.org), [jelena.jankovic@ieent.org](mailto:jelena.jankovic@ieent.org), [valentina.vasovic@ieent.org](mailto:valentina.vasovic@ieent.org), [draginja.mihajlovic@ieent.org](mailto:draginja.mihajlovic@ieent.org), [jelena.lukic@ieent.org](mailto:jelena.lukic@ieent.org)

## 1. UVOD

U sistemima za proizvodnju, distribuciju i prenos električne energije, od suštinskog je značaja da ključna oprema, kao što su transformatori, pravilno funkcionišu dugi niz godina, jer pouzdan elektroenergetski sistem u svakoj državi direktno doprinosi kvalitetu života ljudi. Mnogi transformatori širom sveta, a i kod nas približavaju se kraju svog teorijskog životnog veka, te je upravljanje ostarelom populacijom energetskih transformatora postalo jedan od najkritičnijih problema sa kojima se suočavaju vlasnici opreme. U poslednjih 10 godina istraživane su nove metode za procenu stanja papirno-uljne izolacije i životnog veka transformatora. Osim toga, intenzivno se radi na poboljšanju efikasnosti transformatora uvođenjem novih materijala i dizajna opreme. Takođe, uvođenje indikatora starenja transformatora (indeksa zdravlja) predmet je velikog broja istraživanja, jer upravljanje elektroenergetskom opremom ima veliki tehn-ekonomski značaj [1]. Mineralno ulje predstavlja bitan deo izolacionog sistema transformatora, čije stanje i kvalitet utiču na ispravnost i raspoloživost same opreme. Obzirom da se fizičke, hemijske i električne osobine ulja tokom eksploatacije menjaju, ono predstavlja dobar dijagnostički alat za procenu budućeg veka eksploatacije ulja i životnog veka čvrste izolacije. Paralelno sa razvojem i upotrebom novih materijala i metodologija, došlo je do revizija postojećih standarda elektrotehničke komisije. Eksperti zaposleni u Laboratoriji za ispitivanje izolacionih ulja i papira tumače rezultate ispitivanja karakteristika ulja prema internom standard IS EPS [2] i propisanim kriterijumima međunarodnog standarda IEC 60422 koji predstavlja uputstvo za nadzor i održavanje kvaliteta izolacionog ulja u električnoj opremi. Aktuelno izdanje standarda iz 2013 godine je u fazi revizije, a institut Nikola Tesla, kao aktivni član radne grupe IEC TC10, dao je doprinos u izradi novih i reviziji postojećih poglavlja, kriterijuma i graničnih vrednosti pojedinih parametara, oslanjajući se na bogatu bazu podataka (50.000 rezultata) [3].

## 2. DEGRADACIJA PAPIRNO ULJNOG DIELEKTRIKA

Stanje izolacionog sistema transformatora se tokom eksploatacije pogoršava, odnosno izolacija stari. Primarni mehanizam starenja uljnog dela izolacionog sistema je oksidacija. Prva faza oksidacije je napad kiseonika na molekule ugljovodonika pri čemu se formiraju peroksidi koji disociraju i formiraju slobodne radikale, koji mogu delovati kao inicijatori za lančane reakcije koje uključuju slobodne radikale i ugljovodonike. Reakcije propagacije mogu dalje da se ponavljaju tokom određenog broja ciklusa za svaki slobodni radikal ugljovodonika dobijen reakcijom inicijacije. Ove reakcije će na kraju povećati koncentraciju kiselosti, vlage i drugih polarnih jedinjenja kao što su hidroperoksidi i alkoholi. Degradacija čvrstog dela izolacije počinje oksidacijom, ali pri normalnim radnim temperaturama, dominira hidroliza. Generalno, kiseline i vlaga nastale oksidacijom papira i ulja će inicirati hidrolizu koja dalje povećava koncentraciju kiselina i vode. Proces hidrolize se praktično samoubrzava pri čemu se pored vode i kiselina, proizvode oksidi ugljenika i furani [4]. Dakle starenjem oba dielektrika nastaju produkti koji predstavljaju merljive parametre/markere ostarelosti. Transformatorsko ulje se dominantno koristi kao direktni ili indirektni medijum za procenu ostarelosti izolacije transformatora. Međunarodni standard IEC 60422 „Nadzor i održavanje kvaliteta izolacionog ulja u električnoj opremi“ daje preporučene vrednosti opsega parametara koje treba uporediti sa rezultatima ispitivanja za tumačenje dobrih, zadovoljavajućih i loših rezultata, ocene A, B i C.

## 2.2. Parametri ostarelosti transformatorskog ulja

U cilju ispunjavanja osnovne uloge u transformatoru, a to je izolovanje delova pod naponom, ulje mora da ima visoku dielektričnu čvrstoću, mali faktor dielektričnih gubitaka i visoku specifičnu električnu otpornost. Ulje, takođe mora biti suvo, sa malim sadržajem vode, koja nastaje i u toku eksploatacije transformatora kao jedan od produkata starenja papirne izolacije. To znači da su uslov za dugogodišnju upotrebu ulja dobre karakteristike ulja i visoka otpornost ulja na oksidaciju (starenje tokom eksploatacije). Da bi ulje zadovoljilo drugu osnovnu ulogu, da vrši hlađenje izolacionog sistema transformatora, ono mora da ima dobre fizičke karakteristike kao što su viskoznost, gustina, tačka stinjanja i dr. Ovi parametri se generalno mogu grupisati u električne, hemijske i fizičke karakteristike, a ispitivanja su prema značaju podeljena u rutinska, komplementarna i specijalna. Kako se navodi u standardu IEC 60422, nije moguće dati generalno pravilo vezano za optimalnu frekvenciju ispitivanja transformatorskih ulja koja su u pogonu, ali ona svakako zavisi od tipa, funkcije, napona, snage, konstrukcije i opterećenja opreme, kao i od rezultata prethodnih ispitivanja [5]. Tokom eksploatacije ne menjaju se sve karakteristike ulja značajno istom dinamikom. Na primer viskoznost, boja, tačka paljenja i gustina ne menjaju se značajno u odnosu na tgδ, dielektričnu čvrstoću, međupovršinski napon, sadržaj kiselina [6]. Frekvencija ispitivanja karakteristika ulja, koju preporučuje Specijalizovana Laboratorija za ispitivanje izolacionih ulja i papira instituta Nikola Tesla je na 4 godine, ukoliko su parametri ostarelosti zadovoljavajući (A ocena kvaliteta).

Rutinski testovi koji su analizirani u predmetnom radu su: probojnost (dielektrična čvrstoća), sadržaj vode, kiselost (neutralizacioni broj), faktor dielektričnih gubitaka ulja(tgδ) i kao komplementarno ispitivanje: međupovršinski napon.

## 2.3. Dielektrična čvrstoća ulja

Probojni napon ili dielektrična čvrstoća ulja je mera sposobnosti ulja da izdrži električni udar. Suvo i čisto ulje ima visoku dielektričnu čvrstoću, dok snižena dielektrična čvrstoća ulja ukazuje na prisustvo nečistoća u ulju i slobodne vode. Dielektrična čvrstoća ulja je u velikoj meri zavisna od temperature i reprezentativni rezultati se mogu dobiti samo kada je transformator u pogonu. Za transformatore van pogona preporuka je da se merenja izvrše nakon ulaska u pogon, odnosno postizanja uravnoteženih operativnih uslova. Ostarela ulja imaju tendenciju da dobro rastvaraju vodu, što može dovesti do visokih vrednosti dielektrične čvrstoće kod ovlaženih ulja. Starenje ulja dovodi do povećanja sadržaja kiselina, usled čega dolazi do povećanja polarnosti ulja. Povećana polarnost ulja pogoduje boljem rastvaranju vode (kao polarnog molekula) u ulju (slično se u sličnom rastvara) pa je i vrednost dielektrične čvrstoće bolja, uprkos visokom sadržaju vode.

## 2.4. Sadržaj vode

Voda u ulju može da potiče iz atmosfere, iz izolacionog papira u kome je skladišten većinski udeo ukupne vode u transformatoru i da nastane degradacijom papira. Ona može biti prisutna u formi rastvorene, hemijski vezane, emulgovane i slobodne vode. Kada ulje ima visok sadržaj vode koji prelazi graničnu rastvorljivost na datoj temperaturi dolazi do stvaranja emulgovane i slobodne vode izdvojene iz ulja (donji sloj vode, voda je teža od ulja). Nova ulja imaju manji kapacitet da rastvore vodu, posebno na niskim temperaturama, reda veličine do 20-30 mg/kg, za razliku od pogonski ostarelih ulja koja mogu da rastvore i do 100 mg/kg, jer sadrže veću količinu polarnih produkata oksidacije ulja (karbonilna jedinjenja, kiseline, polikondenzovani aromati,...itd.). Kod ulja iz pogona takođe je definisan zahtevani granični sadržaj vode prema naponskom nivou transformatora, ali je u ovom slučaju dodatni važan parametar za razmatranje i temperatura ulja, jer se voda raspodeljuje između ulja i papirne izolacije. Prilikom tumačenja rezultata ispitivanja uzima se apsolutna izmerena vrednost na datoj temperaturi ulja, dok se za visoke radne temperature može primeniti i temperaturna korekcija.

## 2.5. Sadržaj kiselina – neutralizacioni broj

Kiselinski, odnosno neutralizacioni broj (Nb, mgKOH/gulja) predstavlja sadržaj kiselih produkata u ulju i izražava se kao masa kalijum-hidroksida izražena u miligramima, potrebna za neutralizaciju kiselina u jednom gramu ulja. Kiseline nastaju kao produkti oksidacije ulja tokom eksploatacije pod uticajem kiseonika i povišene temperature. Zajedno sa vodom i čvrstim česticama mogu da utiču na električne i druge karakteristike ulja, degradaciju celulozne izolacije i koroziju metalnih delova transformatora. Porast sadržaja kiselina, odnosno kiselinskog broja, u ulju iz pogona je pouzdan indikator ubrzanog starenja ulja. Određivanje kiselosti izolacionog ulja je veoma značajno, jer se

kondenzacijom organskih kiselina stvara organski mulj i talog u ulju i ima štetan uticaj na čvrstu izolaciju. Sadržaj kiselina u ulju se koristi kao jedan od parametara za određivanje optimalnog perioda za zamenu ili regeneraciju ulja.

## 2.6. Faktor dielektričnih gubitaka

Faktor dielektričnih gubitaka ( $\tan \delta$ ) nekog izolacionog materijala je tangens ugla gubitaka ( $\delta$ ). Ugao gubitaka je ugao za koji fazno pomeranje između priključenog napona i rezultujuće struje odstupa od  $\pi/2$  radijana, kada se dielektrik kondenzatora sastoji isključivo od izolacionog materijala. Vrednost faktora dielektričnih gubitaka veoma zavisi od prisustva primesa koje mogu prodrati u ulje spolja i/ili nastati u samom ulju. Povećana vrednost  $\tan \delta$  ukazuje na kontaminaciju ulja vlagom, česticama, koloidima ili rastvornim polarnim jedinjenjima i na eventualno nizak stepen rafinacije ulja.

## 2.7. Međupovršinski napon

Međupovršinski napon predstavlja pokazatelj stepena rafinacije, eventualne kontaminacije ulja česticama i/ili nekim polarnim u ulju rastvornim kontaminantima i obzirom da zavisi od prisustva polarnih jedinjenja, daje mogućnost otkrivanja malih koncentracija rastvorljivih polarnih jedinjenja kod novih ulja i proizvoda oksidacije ulja iz pogona. Vrednost površinskog napona transformatorskog ulja menja se sa njegovim starenjem, odnosno sa promenom izolacionih karakteristika. Međutim u ulju se, u toku oksidativne degradacije, formiraju jedinjenja koja su u osnovi hidrofilna – (karbonilna jedinjenja i karboksilne kiseline). Prisustvo hidrofilnih jedinjenja ugrožava hemijske (kiseline), električne (dielektrična čvrstoća) i fizičke (međupovršinski napon) osobine ulja. Što je veći sadržaj hidrofilnih jedinjenja, niža je vrednost međupovršinskog napona. Visina međupovršinskog napona je inverzno povezana sa koncentracijom hidrofilnih produkata degradacije ulja. Pošto su hidrofilna jedinjenja vrlo često visoko polarna i slabo rastvorna u nepolarnom ulju, moguće je izdvajanje taloga [7]. U početnoj fazi starenja ulja karakteristične su nagle promene vrednosti međupovršinskog napona naročito kod neinhibiranih ulja, međutim kasnije kada ulje uđe u fazu umerenog starenja vrednost međupovršinskog napona opada značajno sporije.

## 3. STATISTIČKA ANALIZA REZULTATA BAZE PODATAKA

Zadatak laboratorija učesnica radne grupe u reviziji standarda IEC60422, bio je da za navedene osobine ulja energetskih transformatora (parametre ostarelosti) analizira 90% tipičnih vrednosti za kategorije opreme O i A (400kV i 220kV), B (110kV) i C (35kV). Cilj ovog istraživanja je uvid u realne rezultate koje se dobijaju analizom ulja na transformatorima u pogonu, njihovo uklapanje u postojeće granične vrednosti standarda i eventualno razmatranje o korigovanju graničnih vrednosti. Metodologija analize rađena je po principu sortiranja izmerenih vrednosti od dobrih, tj. zadovoljavajućih do nezadovoljavajućih vrednosti. Poslednja vrednost u prvih 90% rezultata merenja predstavlja vrednost koja se poredi sa graničnom vrednošću koju propisuje standard za svaku osobinu posebno.

### 3.1. Analiza rezultata kategorije opreme O i A (400kV i 220kV)

U tabeli 1 prikazan je obim ispitivanja navedenih karakteristika najviših naponskih nivoa, 400kV i 220kV, odnosno kategorija opreme „O“ i „A“ čije će preporučene granične vrednosti u novom revidiranom standardu biti objedinjene u kategoriji opreme A. Broj merenja je prilično ujednačen za većinu ispitivanja osim sadržaja vode, jer je navedeno ispitivanje uvedeno nekoliko godina kasnije. Raspon vrednosti sadržaja vode varira od 1 mg/kg do 50 mg/kg jer su u statistici zastupljena merenja transformatora sa početka eksploatacionog perioda, kao i transformatori sa višedecenijskim radnim vekom. Granična vrednost sadržaja vode za 90% merenja iznosi 15 mg/kg, što je na samoj granici dozvoljene vrednosti za ocenu A, prema IEC 60422 standardu. Vrednost dielektrične čvrstoće nešto je niža od IEC standardnom definisane granične vrednosti i iznosi 230 kV/cm za 90% merenja, međutim srednja vrednost (256 kV/cm) i procentualni udeo merenja sa ocenom A je visok (80%) i ukazuje na generalno dobro stanje ulja u opremi po pitanju navedene osobine. Kiselinški broj i faktor dielektričnih gubitaka za 90% merenja imaju zadovoljavajuće vrednosti prema granicama IEC standarda što je posledica visokog udela merenja sa ocenom A (preko 90%). Međupovršinski napon, kao komplementarno ispitivanje, redovno se ispituje tokom periodične kontrole ulja u laboratoriji Instituta. Kako su kod nas uglavnom zastupljena inhibirana ulja može se reći da su rezultati ovog ispitivanja kod 90% merenja ispod propisane IEC vrednosti od 28 mN/m za inhibirana ulja. Ipak 84% merenja ima ocenu A za navedenu osobinu jer je kod većine datih ocena tumačenje vršeno prema internom standardu EPS-a [2], gde je propisana granična vrednost za ocenu A  $>25\text{mN/m}$ . U laboratoriji za ispitivanje izolacionih ulja i papira

instituta Nikola Tesla, granična vrednost međupovršinskog napona ( $>25\text{mN/m}$ ), za kategorije opreme 400 i 220 kV, se tokom više od 40 godina ispitivanja pokazala kao dobra praksa, te je stavljena kao granična za ocenu A, u okviru Internog standarda EPS-a. Iz navedene analize može se zaključiti da veliki broj transformatora (80-96%) ima zadovoljavajuće karakteristike ulja, koje odgovaraju oceni A kvaliteta ulja, prema IEC 60422 standardu.

**Tabela 1.** Obim ispitivanja i ocene parametara ostarelosti ulja opreme naponskog nivoa 400 i 220 kV.

Osobine naponskog nivoa 400 i 220 kV	Broj merenja	Min vrednost	Max vrednost	Srednja vrednost	Granična vrednost za 90% merenja	Ocena A, %	Ocena B, %	Ocena C, %
Sadržaj vode, (mg/kg)	479	1	50	8,3	15	88	7	5
Probojnost (kV/cm)	1674	118	300	256	230	80	17	3
Kiselinski broj (mgKOH/g)	1752	<0,01	0,38	0,03	0,09	91	6	3
Faktor dielektričnih gubitaka tgδ (%)	1712	0	255	19,5	54	96	3	1
Međupovršinski napon (mN/m)	1675	12	49	33	23	84	12	4

U cilju detaljnijeg pregleda stanja ulja u opremi najviših naponskih nivoa (400 i 220 kV), izvršena je uporedna analiza 90% graničnih vrednosti karakteristika ulja sa ocenom A, B i C sa vrednostima definisanim u IEC 60422 standardu. (Tabela 2).

**Tabela 2.** Granična vrednost za 90% merenja pojedinačnih ocena opreme „A“ i granice IEC 60422 za ocene A, B i C

Osobine naponskog nivoa 400 i 220 kV	Ocena A		Ocena B		Ocena C	
	Granična vrednost (90%)	IEC 60422	Granična vrednost (90%)	IEC 60422	Granična vrednost (90%)	IEC 60422
Sadržaj vode, (mg/kg)	14	< 15	19	15 - 20	40	> 20
Probojnost (kV/cm)	245	> 240	212	200 - 240	147	< 200
Kiselinski broj mgKOH/g)	0,05	< 0,1	0,15	0,10 - 0,15	0,25	> 0,15
Faktor dielektričnih gubitaka tgδ (%)	40	< 100	197	100 - 200	240	> 200
Međupovršinski napon (mN/m)	28	>28	20	20 - 25	15	< 20

Na osnovu analiziranih rezultata zaključuje se da je stanje ulja u opreminajviše kategorije (400 i 220 kV) prema datim IEC 60422 kriterijumima zadovoljavajuće i u dobrom pogonskom stanju.

### 3.2. Analiza rezultata kategorije opreme B (110kV)

U tabeli 3 prikazan je obim ispitivanja navedenih karakteristika naponskog nivoa, 110kV, kategorije opreme „B“. Broj merenja je kao i kod prethodne kategorije ujednačen osim merenja sadržaja vode. Maksimalne vrednosti sadržaja vode značajno odstupaju od srednje vrednosti svih merenja, što je najverovatnije bila posledica neadekvatnog uzorkovanja ili značajne ostarelosti izolacije sa izdvajanjem slobodne vode na dnu suda. Granična vrednost za 90% svih merenja sadržaja vode prelazi IEC 60422 granicu za ocenu A ( $<20\text{mg/kg}$ ), ali je procentualna zastupljenost merenja sa ocenom A visoka i iznosi 89%. Probojnost ulja je takođe ispod standardom propisane vrednosti za ocenu A, ali je srednja vrednost svih merenja i zastupljenost ocene A visoka (92 %). Kiselinski broj za 90% svih merenja je takođe iznad granice (iznad  $0,10\text{ mgKOH/g}$ ) i ukazuje na ostarelost ulja. Maksimalna vrednost

značajno odstupa od srednje vrednosti svih merenja, što je posledica malog broja merenja značajno ostarelih ulja koja su ocenjena ocenom C. Ipak, srednja vrednost i zastupljenost merenja sa ocenom A je visoka i zadovoljavajuća (83 %). Faktor dielektričnih gubitaka ( $tg\delta$ ) takođe ima veliko odstupanje srednje vrednosti od maksimalne, ali je granična vrednost za 90% svih merenja ispod granične (ispod 100%). Takođe, zastupljenost merenja sa ocenom A je visoka i zadovoljavajuća (93 %). Srednja vrednost međupovršinskog napona je visoka, ali je granična vrednost za 90% svih merenja ispod IEC 60422 granice (28mN/m) i granice definisane internim standardom EPS-a (20mN/m). Iako je u pogledu ove osobine procentualni udeo ocene A (71%) najmanje zastupljen kod populacije 110kV, ipak se zaključuje da je stanje ulja zadovoljavajuće.

**Tabela 3.** Obim ispitivanja i ocene parametara ostarelosti ulja opreme kategorije „B“.

Osobine naponskog nivoa 110 kV	Ukupno merenja	Min vrednost	Max vrednost	Srednja vrednost	Granična vrednost za 90% merenja	Oцена A, %	Oцена B, %	Oцена C, %
Sadržaj vode, (mg/kg)	1498	1	141	11	21	89	9	2
Probojnost (kV/cm)	5407	100	300	253	211	92	5	3
Kiselinski broj (mgKOH/g)	5520	<0,01	0,58	0,05	0,13	83	14	3
Faktor dielektričnih gubitaka $tg\delta$ (%)	5512	0,2	944	31	76	93	6	1
Međupovršinski napon (mN/m)	5339	9	52	30	19	71	19	10

Uporedna analiza 90% graničnih vrednosti karakteristika ulja sa ocenom A, B i C sa vrednostima definisanim u IEC 60422 standardu prikazana u Tabeli 4, ukazuje da je stanje ulja prema datim kriterijumima u ispitanoj populaciji 110kV transformatora dobro.

**Tabela 4.** Granična vrednost za 90% merenja pojedinačnih ocena opreme kategorije „B“ i granice IEC 60422 za ocene A, B i C

Osobine naponskog nivoa 110 kV	Ocena A		Ocena B		Ocena C	
	Granična vrednost (90%)	IEC 60422	Granična vrednost (90%)	IEC 60422	Granična vrednost (90%)	IEC 60422
Sadržaj vode, (mg/kg)	15	< 20	29	20 - 30	40	> 30
Probojnost (kV/cm)	235	> 200	163	160 - 200	110	< 160
Kiselinski broj (mgKOH/g)	0,07	< 0,10	0,18	0,10 - 0,20	0,35	> 0,20
Faktor dielektričnih gubitaka $tg\delta$ (%)	51	< 100	299	100 - 500	906	> 500
Međupovršinski napon (mN/m)	28	> 28	20	20 - 25	15	< 20

### 3.2. Analiza rezultata kategorije opreme C (35kV)

Vrednosti karakteristika ulja transformatora nominalnog napona 35kV (kategorija C), koju pretežno čine distributivni transformatori prikazane su u Tabeli 5. Broj merenja u okviru navedene populacije transformatora je značajan (19046). Granična vrednost sadržaja vode za 90% merenja prevazilazi IEC 60422 standardom propisanu graničnu vrednost (30 mg/kg). Međutim, srednja vrednost svih merenja i zastupljenost ocene A je zadovoljavajuća (84 %). Probojnost ulja, sadržaj kiselina i faktor dielektričnih gubitaka ( $tg\delta$ ) imaju zadovoljavajuće granične vrednosti za 90% merenja. Srednje vrednosti i procentualni udeo ocena A su visoke, što ukazuje na dobro stanje ulja. Međupovršinski napon ima značajno nižu vrednost od granične vrednosti prema IEC 60422 standardu (28 mN/m) za 90% merenja. Procentualni udeo ocene A za navedenu osobinu, najniži je u populaciji ispitivanih kategorija opreme (61%), ali je srednja vrednost zadovoljavajuća prema IEC 60422 standardu.

**Tabela 5.** Obim ispitivanja i ocene parametara ostarelosti ulja opreme kategorije „C“.

Osobine naponskog nivoa 35 kV	Ukupno merenja	Min vrednost	Max vrednost	Srednja vrednost	Granična vrednost za 90% merenja	Ocena A %	Ocena B %	Ocena C %
Sadržaj vode, (mg/kg)	1587	0	153	19	35	84	9	7
Probojnost (kV/cm)	4265	78	300	237	153	89	8	3
Kiselinski broj (mgKOH/g)	4448	<0,01	0,87	0,07	0,19	84	14	2
Faktor dielektričnih gubitaka tgδ (%)	4412	<5	1081	34	68	95	5	<1
Međupovršinski napon (mN/m)	4334	3	49	27	19	61	27	12

Na osnovu analize graničnih vrednosti za 90% merenja pojedinačnih ocena A, B i C, za svaku osobinu ulja, (Tabela 6) zaključuje se da je stanje ulja zadovoljavajuće, prema IEC 60422 standardu.

**Tabela 6.** Granična vrednost za 90% merenja pojedinačnih ocena opreme kategorije „C“ i granice IEC za ocene A, B i C .

Osobine naponskog nivoa 35kV	Ocena A		Ocena B		Ocena C	
	Granična vrednost (90%)	IEC 60422	Granična vrednost (90%)	IEC 60422	Granična vrednost (90%)	IEC 60422
Sadržaj vode, (mg/kg)	25	<30	40	30 - 40	70	> 40
Probojnost (kV/cm)	200	>160	124	120 - 160	90	< 120
Kiselinski broj (mgKOH/g)	0,1	<0.15	0,26	0.15 - 0.30	0,55	> 0.30
Faktor dielektričnih gubitaka tgδ (%)	54,8	<100	268	100 - 500	1075	> 500
Međupovršinski napon (mN/m)	27	>28	20	20 - 25	16	< 20

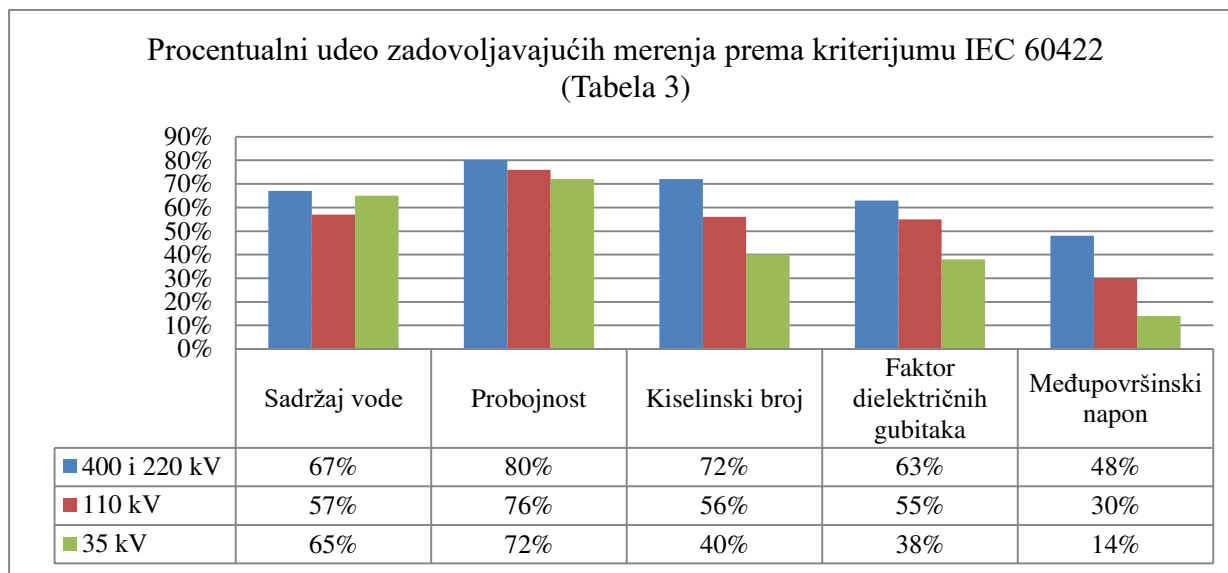
#### 4. IZOLACIONA ULJA U NOVOJ OPREMI

U situaciji kada se nova oprema isporučuje korisniku zajedno sa mineralnim uljem, ili kada se ispitivanje kvaliteta novog ulja vrši nakon nalivanja ulja u transformator, tada su kriterijumi za ispitivanje novog ulja i granične vrednosti u određenoj meri drugačiji u odnosu na ispitivanje novog ulja u stanju isporuke (cistrene, buriči) prema propisanim vrednostima standarda SRPS EN IEC 60296:2021, Fluidi za primene u elektrotehnici – Mineralna izolaciona ulja za električnu opremu [8], jer je ulje bilo u kontaktu sa čvrstom izolacijom i ostalim materijalima u transformatoru. (Tabeli 7 - Izvod iz Tabele 3 standarda IEC60422).

**Tabela 7.** Preporučene granice za mineralna izolaciona ulja nakon nalivanja u novu električnu opremu pre pogona (Izvod iz Tabele 3 standarda IEC60422)

Osobina	Kriterijumi kategorija opreme C (35kV)	Kriterijumi kategorija opreme B (110kV)	Kriterijumi Kategorija opreme A (220 i 400kV)
Sadržaj vode, (mg/kg)	20	<10	<10
Probojnost, (kV/cm)	>220	>240	>240
Kiselinski broj, (mgKOH/g)	Max 0,03	Max 0,03	Max 0,03
Faktor dielektričnih gubitaka tgδ (%)	Max 15	Max 15	Max 10
Međupovršinski napon, (mN/m)	Min. 35	Min. 35	Min. 35

Obzirom da nije postojala mogućnost da se posebno izdvoje takva merenja za statističku analizu, vrednosti osobina ulja koje su analizirane u prethodnom poglavlju iskorišćene su za procenu „uklapanja“ u okvire granica koja važe za nova ulja u novim transformatorima (Grafik 1).



**Grafik 1.** Udeo zadovoljavajućih merenja pogonskih osobina ulja kategorija opreme A, B i C u skladu sa preporučenim vrednostima za ulja u novoj opremi

Iz navedene analize zaključuje se da su ulja kategorije opreme A i B u visokom procentu zadržala vrednosti koje se definišu na početku radnog veka. Vrednost međupovršinskog napona najniža je u odnosu na ostale parametre ostarelosti i ukazuje da se ova osobina najbrže menja. U slučaju kategorije opreme C pored veoma niskog procentualnog udela vrednosti međupovršinskog napona, primećuje se značajno nizak udeo kiselinškog broja i faktora dielektričnih gubitaka. Nagli pad vrednosti površinskog napona može biti i indikacija izdvajanja taloga iz ulja, slučajne kontaminacije tokom nalivanja ulja ili usled kontaminacije ulja u cisternama koje mogu biti zagađene rastvaračima, benzinom ili aditivima, što je viđeno u praksi. Vrednost međupovršinskog napona može da posluži kao jedan od dodatnih parametara za dijagnostikovanje stepena degradacije papirno/uljne izolacije.[5] Odnos površinskog napona i kiselinškog broja predstavlja oksidacioni indeks OQIN (eng. Oxidation Quality Index) i prema navodima iz literature može da posluži kao dobar parametar za procenu ostarelosti ulja i optimalnog trenutka kada treba vršiti hemijsku regeneraciju ulja [9] Ulja čiji se oksidacioni indeks kreće u opsegu 45-160 smatraju se ostarelim i najverovatnije mogućim kandidatima za regeneraciju. Međutim, da bi efekat regeneracije bio visok, a budući eksploatacioni vek ulja što duži, potrebno je razmatrati mogućnost rgeneracije ulja kada vrednost padne ispod 320.

## 5. ZAKLJUČAK

Povodom revizije postojećeg standarda IEC60422:2013, „Nadzor i održavanje kvaliteta izolacionog ulja u električnoj opremi“ izvršena je statistička analiza rezultata ispitivanja karakteristika ulja jedinstvene Baze podataka instituta Nikola Tesla. Značajan broj merenja nastao je tokom višegodišnjeg praćenja stanja i kvaliteta ulja energetskih transformatora svih oblasti energetskog sistema, od proizvodnje i prenosa do distribucije električne energije. Doprinos u broju analiza svakako najviše daju B i C kategorije opreme, odnosno prenosna i distributivna mreža, zbog najvećeg broja energetskih transformatora koji su u preventivnoj periodičnoj kontroli više od 40 godina. Pravilan rad i funkcija većine transformatora zavisi od stanja tečnog dielektrika, odnosno ulja. Uloga ulja je da spreči unutrašnji kratak spoj, daje dielektrična svojstva, deluje kao rashladno sredstvo za odvođenje toplote kada je transformator pod naponom i služi kao dobar dijagnostički medijum. Zbog navedenog potrebno je vršiti redovnu preventivnu periodičnu kontrolu karakteristika ulja u cilju praćenja parametara ostarelosti i mogućnosti blagovremenog reagovanja u smislu dodatnih akcija kao što su sušenje, filtriranje, regeneracija, zamena ili dekontaminacija ulja. Analizom Baze podataka INT, generalno je utvrđen visok udeo ispitanih osobina ulja sa ocenom A, a posmatranjem 90% tipičnih vrednosti u okviru svake pojedinačne osobine svih naponskih nivoa, utvrđeno je da se vrednosti uglavnom uklapaju u kriterijume standarda IEC60422. Na osnovu obrađenih rezultata odnosno populacije transformatora uočava se da je udeo transformatora sa ocenom A značajan za većinu posmatranih karakteristika. Na dobro održavanje ulja iz pogona ukazuju i zadovoljavajuće uklapanje izmerenih



vrednosti u okviru granica koje važe za nova ulja u novoj opremi, što je takođe definisano standardom IEC60422. Kategorije opreme A i B u visokom procentu zadržale vrednosti koje se definišu za ulja na početku radnog veka. Značajno odstupanje jedino je primećeno kod analize rezultata međupovršinskog napona, što je u vezi sa dinamikom promene ove osobine tokom eksploatacije, pa je potrebno obratiti pažnju na nagle promene, jer mogu biti indikacija izdvajanja taloga ili kontaminacije tokom nalivanja i poslužiti kao dodatni parametar za dijagnostikovanje stepena degradacije papirno/uljne izolacije.

## LITERATURA

- [1] Power Transformer Diagnostics, Monitoring and Design Features, edited by Issouf Fofana, Printed Edition of the Special Issue Published in Energies, Reprint of articles from the Special Issue published online open access journal Energies (ISSN 1996-1073) from 2015 – 2018.
- [2] EPS INTERNI STANDARD, ICS 29.180 EPS IS 26-1, Mart 2014 Ispitivanje izolacionih ulja,
- [3] INT Baza – Baza podataka institute Nikola Tesla a.d. Beograd
- [4] S.J. Tee, Q. Liu, Z.D. Wang<sup>1</sup>, G. Wilson, P. Jarman, R. Hooton, P. Dyer and D. Walker, PRACTICE OF IEC 60422 IN AGEING ASSESSMENT OF IN-SERVICE TRANSFORMERS The 19th International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Czech Republic, August, 23 – 28, 2015
- [5] IEC 60422:2013, Mineral insulating oils – supervision and maintenance
- [6] Life Kaanabara, Hilary I. Inyang, H. Hilger, „Aromatic and aliphatic hydrocarbon balance in electric transformer oils“, Fuel 89, (2010), 3114-3118
- [7] STARENJE TRANSFORMATORSKOG ULJA I OKSIDACIONI INDEKS: PREGLED STANJA ULJA TRANSFORMATORA U SRBIJI, Ksenija Drakić, Marijana Pajić, Valentina Mandić, Jelena Lukić, Cired Srbije 2012 godina.
- [8] SRPS EN IEC 60296:2021, Fluidi za primene u elektrotehnici – Mineralna izolaciona ulja za električnu opremu
- [9] I.A.R. GRAY Transformer Chemistry services, „A Guide To Transformer Oil analysis“