

## Eksperimentalna ispitivanja mineralnih izolacionih ulja i ulja na bazi estra na niskim temperaturama

Miloš Anđelković<sup>1</sup>, Dragan Đorđević<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Univerzitet u Beogradu, Koste Glavinića 8a  
11000 Beograd, Srbija  
[milos.andjelkovic@ieent.org](mailto:milos.andjelkovic@ieent.org)

**Kratak sadržaj:** Cilj ovog rada je poređenje dielektrične čvrstoće standardnih mineralnih izolacionih ulja sa dielektričnom čvrstoćom alternativnih ulja na bazi estra. Upotreba prirodnog i sintetičkog estra u različitoj visokonaponskoj opremi je povećana tokom poslednjih godina. Većina parametara relevantnih za izolaciju i hlađenje visokonaponske opreme se izučavaju na sobnoj ili normalnim radnim temperaturama. Međutim, ova oprema mora da zadrži svoju funkcionalnost u širokom opsegu temperatura. Za regione sa hladnom klimom važno je ponašanje na niskim temperaturama. Cilj ovog rada je bio da se utvrdi izolaciona sposobnost mineralnih i ulja na bazi estara u homogenom električnom polju na niskim temperaturama, pri različitom procentu vlage unutar ulja. Testirana su ulja sa procentima vlage između 5% i 25%. Testirano izolaciono ulje na bazi estra ima dobru dielektričnu čvrstoću na sobnoj temperaturi koja je istog reda veličine kao i dielektrična moć mineralnih ulja. Na niskim temperaturama (-25 °C), kada je u stanju sličnom gelu, izolaciona snaga ulja na bazi estra je i dalje vrlo visoka, čak veća nego na sobnoj temperaturi. Međutim, na temperaturi od -35 °C, na kojoj se ulje na bazi estra zaledi, dolazi do znatnog pada njegove dielektrične čvrstoće. Dielektrična čvrstoća testiranog ulja na bazi estra na niskim temperaturama ne zavisi od koncentracije vlage.

**Ključne reči:** izolacija transformatora, mineralna ulja, estarska ulja, ponašanje na niskim temperaturama

### 1. Uvod

Tečni dielektrici se uglavnom koriste u visokonaponskim kablovima i kondenzatorima, transformatorima, prekidačima itd. Tečni dielektrici, takođe, deluju kao agensi za prenos toplote u transformatorima i kao agensi za

gašenje luka u prekidačima. Mineralna ulja (transformatorsko ulje) su najčešće korišćeni tečni dielektrici. U novije vreme, povećano interesovanje za uljima na bazi estra, kao potencijalne alternative mineralnom ulju, stimuliše istraživanja dielektričnih osobina ovih ulja. Dielektrična čvrstoća je najvažniji parametar u izboru datog tečnog dielektrika za datu primenu. Dielektrična čvrstoća ulja najviše zavisi od koncentracije vlage unutar njega. U praktičnim uslovima dielektrična čvrstoća zavisi i od materijala elektroda, temperature, vrste primenjenog napona, koncentracija gasova unutar dielektrika, prisustva mehaničkih nečistoća itd.

Kombinacija ulja i čvrste izolacije se najviše i najčešće koristi u transformatorima. Ovi izolatori su jeftiniji nego većina drugih izolacionih materijala, a u međusobnoj kombinaciji daju znatno veću dielektričnu čvrstoću nego pojedinačno. Bitno je da raspodela polja između namotaja transformatora, a samim tim i električno polje kome su izloženi dielektrici, bude što homogenija. Ovo se postiže dobrim dizajnom namotaja. U transformatorima punjenim uljem, kao tečnim dielektrikom, zbog visoke dielektrične konstante čvrste izolacije, do najvećeg električnog stresa dolazi u ulju. Pored toga, probojni napon ulja je generalno mnogo niži nego u čvrstim dielektrcima.

Imajući u obzir gore navedeno, očigledno je da je potrebno što bolje poznavati dielektričnu čvrstoću tečnih dielektrika u homogenom električnom polju. Novi transformatori sadrže ulje sa veoma niskim koncentracijama vlage (u daljem tekstu suvo ulje). Međutim, za vreme eksploatacije, ulje u transformatoru je podvrgnuto zagrevanju na visokim temperaturama od oko 95 °C, a samim tim prolazi postepeno proces starenja. Vremenom koncentracija vlage unutar ulja raste a ulje postaje tamnije zbog formiranja kiselina i smola. To je razlog zašto je veoma važno poznavati dielektričnu čvrstoću, ne samo suvog ulja, nego i ulja sa većim procentom vlage.

Rad se fokusira na ispitivanju izolacionih sposobnosti mineralnih ulja i ulja na bazi estra u homogenom električnom polju. Testirano je FR3 ulje na bazi prirodnog estra. Istovremeno, mineralno ulje Lyra X je takođe testirano radi dobijanja referentnih rezultata. Merenja su izvedena na -35 °C. Ispitivana su dva različita stanja ovih ulja: suvo ulje (5% relativna vlažnost) i ulje sa 25% vlage. Cilj je utvrditi kritičnu temperaturu prilikom koje dolazi do naglog smanjenja dielektrične čvrstoće ulja. Ova merenja takođe treba da pokažu da li vlaga ima uticaj na dielektričnu čvrstoću ulja na niskim temperaturama. Merenja su ponovljena na -25 °C jer je utvrđeno da je izolaciona moć testiranog prirodnog estra dosta niska na temperaturi ispod tačke mržnjenja (-35 °C). Na ovoj temperaturi ispitivano je i FR3 ulje sa 15% vlage.

## 2. Merna postavka i eksperimentalna procedura

Merenja su vršena shodno standardu IEC60156/1995-05. Ova metoda uključuje mesingane elektrode u obliku kalote, prečnika 36 mm, međusobnog rastojanja 2.5 mm, za generisanje homogenog električnog polja. Napon se podiže 2 kV/s sve do proboja. Međutim, međusobno rastojanje je smanjeno sa 2.5 mm na 2 mm, jer nije očekivano da u pojedinim uljima dođe do proboja pri rastojanju od 2.5 mm za vrednosti ispod 100 kV. Ova vrednost je maksimalni izlazni napon korišćenog AC 60 Hz testera ulja (Baur DTA 100 E – slika 1). Usled smanjenog rastojanja, do proboja dolazi prilikom svakog testiranja, što čini dobijene rezultate podесnim za statističku evaluaciju.



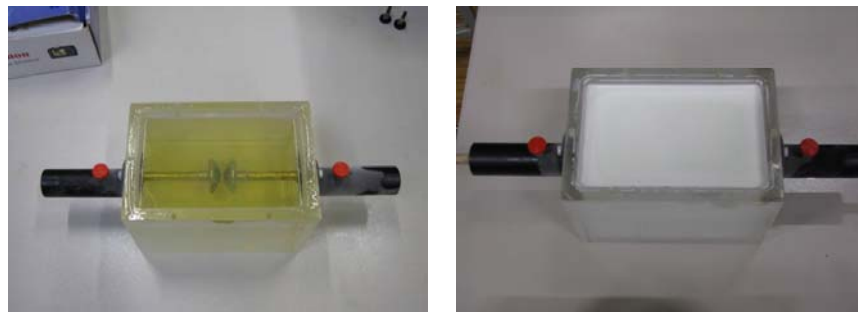
*Slika 1. Baur DTA 100 E tester ulja (levo) i pleksiglas test ćelija (desno)*

Nakon pripreme ulja, sa željenom koncentracijom vlage, isto se sipa u merne ćelije, koje se potom zatvaraju. Korišćene su merne ćelije od pleksiglasa zapremine 1.5 l (slika 1), prvenstveno zbog male potrošnje i jednostavnosti. Ukoliko su merenja vršena na sobnoj temperaturi, merne ćelije se jednostavno postavljaju na tester ulja i zatim se testiraju. Ukoliko su merenja vršena na niskim temperaturama, merne ćelije sa uljem bi najpre bile ostavljene unutar rashladne komore Vötsch VT 7010. Da bi se ulja rashladila na  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  potrebno je da provedu u rashladnoj komori oko deset sati. Radi sigurnosti sva ulja su ostavljena u rashladnoj komori preko 15 časova.

Poželjno je napomenuti i agregatna stanja u kome se nalaze testirana ulja na određenim temperaturama. Na temperaturi od  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ , odnosno  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , viskoznost Lyra X ulja raste, ali je ulje i dalje u izrazito tečnom stanju (slika 2 i slika 3). Na temperaturi od  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  FR3 ulje je u potpunosti zaleđeno, dok je na  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  u čvrstom agregatnom stanju (slika 2 i slika 3).



Slika 2. Merna ćelija sa Lyra X uljem (levo) i FR3 uljem (desno) na temperaturi od  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$



Slika 3. Merna ćelija sa Lyra X uljem (levo) i FR3 uljem (desno) na temperaturi od  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 3. Rezultati merenja

Vrednosti srednjeg preskočnog napona u ulju (tj. dielektrične čvrstoće  $a$  u daljem tekstu MBDV) i standardne devijacije napona (STDV) dobijene su pomoću narednih formula.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \quad (1)$$

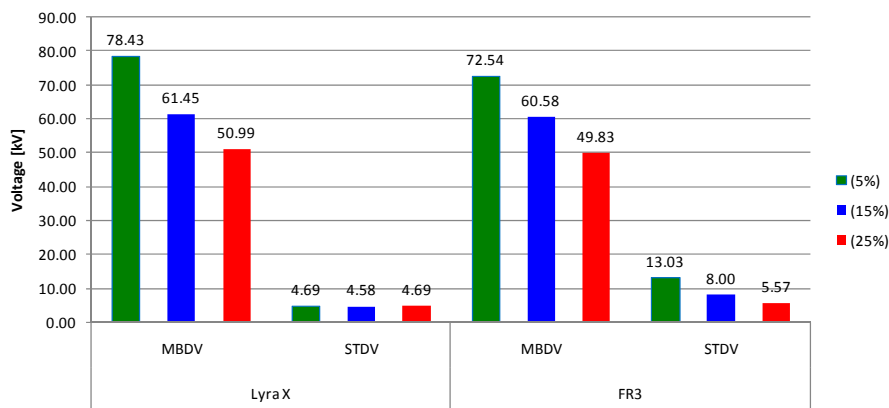
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (X_i - \bar{X})^2}, \quad (2)$$

gde je:

- n - broj uzoraka,
- $X_i$  – vrednost i-tog uzorka,
- $\bar{X}$  – srednja vrednost (MBDV),
- $\sigma$  – standardna devijacija (STDV).

### 3.1. Rezultati merenja na sobnoj temperaturi

Cilj ovog rada je utvrditi izolacionu sposobnost ulja na bazi estra i mineralnog ulja u homogenom električnom polju, na niskim temperaturama i pri različitom procentu vlage unutar ulja. Kako bi se dobile referentne vrednosti merenja je potrebno najpre izvršiti na sobnoj temperaturi (oko 25 °C). Rezultati, na sobnoj temperaturi, su dobijeni testiranjem jednog uzorka deset puta sa pauzom od dva minuta između proboja. Rezultati za FR3 ulje sa 15% vlage su dobijeni pomoću dva uzorka testirana po deset puta (zbog velike devijacija izvršeno je dodatnih deset merenja). Srednje vrednosti preskočnih napona (MBDV) i standardne devijacije (STDV) prikazane su na slici 4.



Slika 4. Proračunate srednje vrednosti preskočnih napona na sobnoj temperaturi

Vrednosti u zagradama predstavljaju relativnu vlažnost posmatranih ulja. Napomenućemo da ova ulja imaju različite vrednosti granice zasićenja vodom. Ulja na bazi estra imaju (za istu relativnu koncentraciju vlage u odnosu na granicu zasićenja vodom) mnogo više vode unutar sebe u odnosu na mineralna ulja.

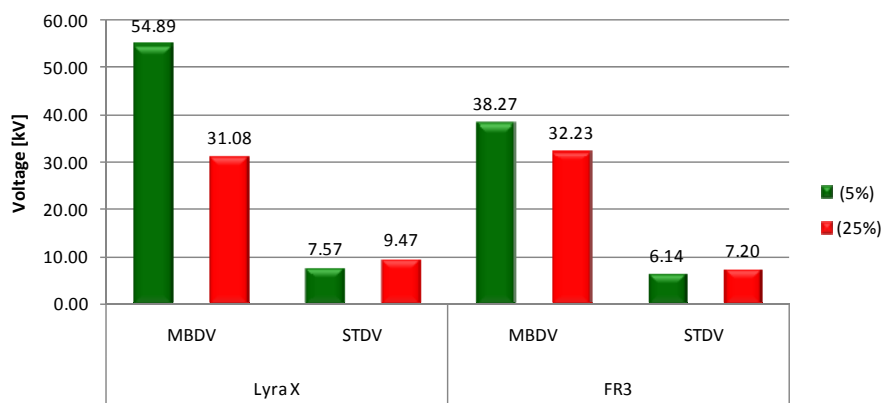
Srednja vrednost preskočnog napona FR3 ulja na sobnoj temperaturi je istog reda veličine kao i preskočna vrednost mineralnog ulja, za sva tri stanja (razlika iznosi svega par procenata). Takođe MBDV ovih ulja se smanjuje sa

povećanjem koncentracije vlage unutar ulja. Ovaj pad dielektrične čvrstoće je očekivan.

### 3.2. Rezultati merenja na -35 °C i -25 °C

Kako je FR3 ulje potpuno zaleđeno na temperaturi od -35 °C, jedan uzorak ulja se koristi samo prilikom jednog testiranja. Vrednosti preskočnih napona nakon prvog testiranja su isuviše niska da bi se uzele za proračun. Za dobijanje deset zadovoljavajućih vrednosti preskočnog napona korišćeno je deset potpuno različitih uzoraka FR3 ulja testiranih samo jedanput. Sa druge strane, jedan uzorak Lyra X ulja je testiran pet puta, pa su tako za evaluaciju podataka korišćena dva uzorka. Svaki uzorak je testiran po pet puta i tako su dobijene deset vrednosti preskočnih napona. Ovo je bilo opravdano jer su vrednosti prvog i petog preskočnog napona, na -35 °C, u ovom ulju približno iste vrednosti.

Srednje vrednosti preskočnih napona (MBDV) kao i standardna devijacija (STDV) za testirana ulja u različitim stanjima na -35 °C date su na slici 5.



Slika 5. Proračunate srednje vrednosti preskočnih napona na -35 °C za ulja sa različitim koncentracijama vlage

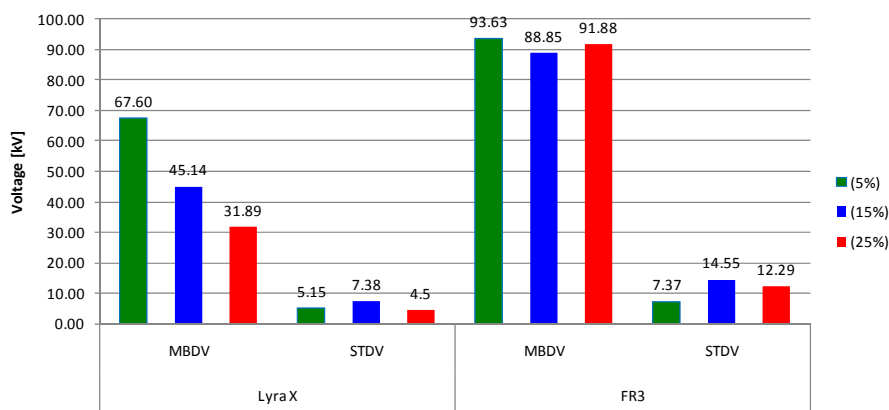
Na ovoj temperaturi (-35 °C) dielektrična moć suvog FR3 ulja je oko 30% niža u poređenju sa dielektričnom čvrstoćom suvog Lyra X ulja. Dielektrična čvrstoća zaleđenog FR3 ulja se ne razlikuje mnogo između dva ispitivana stanja (MBDV FR3 ulja sa 5% vlage je svega 18.7% viša nego MBDV FR3 ulja sa 25% vlage). Povećanje koncentracije vlage unutar ulja ima značajan uticaj na Lyra X ulje. Dielektrična čvrstoća Lyra X ulja se smanjila za 45% pri povećanju relativne vlažnosti.

Dielektrična čvrstoća FR3 ulja, na temperaturi ispod temperature mržnjenja (-35 °C), značajno opada u odnosu na njenu dielektričnu čvrstoću

na sobnoj temperaturi. Merenja su zato ponovljena na -25 °C. Na ovoj temperaturi ispitivana su i ulja sa 15% vlage.

FR3 ulje se na ovoj temperaturi nalazi u vrlo gustom agregatnom stanju (slično gelu). Zato se, kao i na -35 °C, jedna test ćelija koristila samo prilikom jednog testiranja. Tako je da bi se dobilo deset zadovoljavajućih vrednosti preskočnog napona korišćeno deset potpuno različitih uzoraka FR3 ulja testiranih samo jedanput. Sa druge strane, jedan uzorak Lyra X ulja je testiran tri puta, pa su tako za evaluaciju podataka korišćena četiri uzorka. Svaki uzorak je testiran po tri puta i tako je dobijeno dvanaest vrednosti preskočnih napona. Ovo je bilo opravdano jer su vrednosti prvog i trećeg preskočnog napona, na -25 °C, u ovom ulju približno iste vrednosti.

Srednje vrednosti preskočnih napona (MBDV) kao i standardna devijacija (STDV) za testirana ulja u različitim stanjima na -25 °C date su na slici 6.



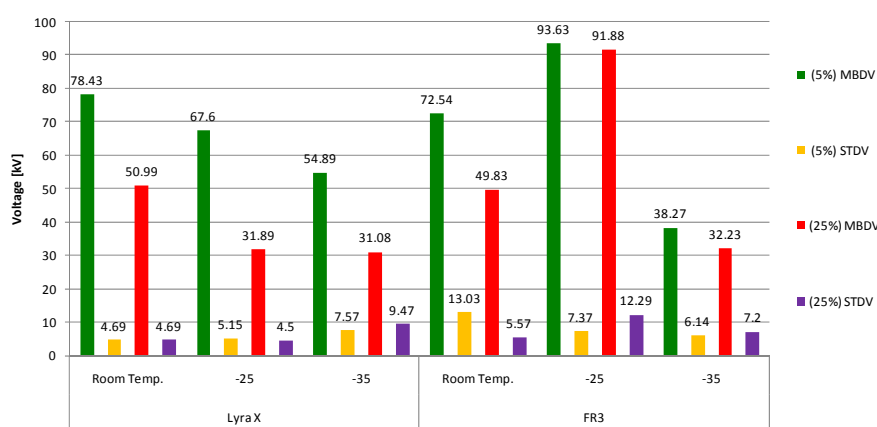
Slika 6. Proračunate srednje vrednosti preskočnih napona na -25 °C za ulja sa različitim koncentracijama vlage

Vrednosti dielektrične čvrstoće i standardne devijacije FR3 ulja, za sva stanja, nisu potpuno tačna. Neki uzorci FR3 ulja su izdržali maksimalni izlazni napon korišćenog Baur DTA 100 E testera. Ako do preskoka nije došlo nakon prvog pokušaja, ovi uzorci su testirani bez pauza još najmanje pet puta. Do preskoka je došlo samo u jednom slučaju. Neki od ovih uzoraka su zatim povezani na AC test transformator maksimalnog izlaznog napona od 400 kV. Svi testirani uzorci su ponovo izdržali napone veće od 100 kV. Kada do preskoka nije došlo, vrednost 100 kV je uzeta za proračun. Ovo znači da su MBDV i STDV FR3 ulja zapravo viši. Bez obzira na ovo zaključak je jasan. Na -25 °C FR3 ulje ima vrlo visoku dielektričnu moć, čak veću nego na sobnoj temperaturi. Koncentracija vlage ne utiče na njegovu dielektričnu čvrstoću. Varijacije MBDV među različitim stanjima su najverovatnije posledica statističke greške. Sa druge strane vrednost MBDV Lyra X ulja je niža na -25 °C nego na sobnoj temperaturi, za sva tri stanja. Na -25 °C vrednosti dielektrične čvrstoće Lyra X ulja sa 10, 15 i 25% vlage su redukovane redom za 13, 26 i 37 procenata, u poređenju sa vrednostima MBDV za ista stanja na

sobnoj temperaturi. Na temperaturi od -25 °C vrednosti standardnih devijacija Lyra X ulja, za sva tri ispitivana stanja, su niža od vrednosti standardnih devijacija FR3 ulja. Ovo je očekivano jer su i vrednosti preskočnih napona u FR3 ulju viša pa se za njih očekuje veća devijacija.

### 3.3. Diskusija rezultata na različitim temperaturama

Grafičko poređenje mernih rezultata na različitim temperaturama je prikazano na slici 7.



Slika 7. Proračunate srednje vrednosti preskočnih napona na različitim temperaturama

Prikazani su samo rezultati ulja sa 10% i 25% vlage, budući da su ova dva stanja ispitivana na svim temperaturama. Može se primetiti da sa padom temperature vrednosti MBDV Lyra X ulja takođe opadaju. Ovo važi za oba ispitivana stanja. Lyra X ulje sa 25% vlage ima približno istu dielektričnu čvrstoću na -25 °C i -35 °C. Sa druge strane FR3 ulje, u oba ispitivana stanja, na -25 °C ima vrlo visoku izolacionu sposobnost, čak veću nego na sobnoj temperaturi (oko 22% veću nego suvo FR3 ulje na sobnoj temperaturi). Na -25 °C temperaturi FR3 ulje se nalazi u vrlo gustom agregatnom stanju. Na -35 °C FR3 postaje potpuno zaleđeno i tada njegova dielektrična moć drastično opada (oko 49% u odnosu na suvo FR3 ulje na sobnoj temperaturi). Koncentracija vlage unutar ulje nema uticaja na dielektričnu čvrstoću FR3 ulja na -25 °C i -35 °C.



## 4. Zaključak

Izolaciona ulja na bazi estra imaju dobru dielektričnu čvrstoću na sobnoj temperaturi koja je istog reda veličine kao i dielektrična moć mineralnih ulja. Štaviše ulja na bazi estra su ekološka i imaju, u odnosu na mineralna ulja, znatno višu tačku paljenja. Na sobnoj temperaturi, probojni naponi ispitivanog ulja pokazuju dobro poznatu ponašanje i opadaju sa povećanjem relativne vlažnosti ulja.

Envirotemp FR3 ulje se ponaša drugačije na niskim temperaturama od mineralnog ulja. Ovo njegova osobina je važna tokom dužeg izlaganja niskim temperaturama, u visokonaponskoj opremi van pogona. Zbog niske tačke mržnjenja FR3 ulje postaje potpuno zaleđeno na  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  dok se na  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  nalazi u stanju sličnom gelu. Kada je u stanju sličnom gelu izolaciona snaga ovog ulja je i dalje vrlo visoka, čak veća nego na sobnoj temperaturi. Međutim, kada se FR3 ulje zaledi ( $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) njegova dielektrična čvrstoća znatno opada. Na niskim temperaturama dielektrična čvrstoća mineralnog Lyra X ulja je i dalje veoma zavisna od vlage. Međutim, dielektrična čvrstoća FR3 ulja na niskim temperaturama, kada ulje menja agregatno stanje, ne zavisi od koncentracije vlage. Testirana su ulja sa procentima vlage između 5% i 25%. Van ovog opsega vlage rezultati i ponašanje ovih ulja mogu biti drugačija.

Može se zaključiti da Enverotemt FR3 ulje predstavljaju dobru zamenu za standardna mineralna ulja na određenom temperaturnom opsegu. Međutim, ovi rezultati nisu dovoljni da bi se doneo krajnji zaključak. Naponi pri kojima dolazi do parcijalnih pražnjenja nisu mereni u ovim eksperimentima kao ni izolacione sposobnosti u nehomogenom električnom polju. Mnogi drugi aspekti moraju se uzeti u obzir da bi se doneo konačan zaključak. Ipak stotine transformatora, različite veličine i snage, ispunjeni navedenim uljem se trenutno nalaze u funkciji. Mnogi od njih rade bez ikakvih problema i za sada su se pokazali kao odlična zamena za transformatore ispunjene mineralnim uljima. Drugi, su međutim ukazali na neke od slabosti ulja na bazi estra, kao transformatori koji su ispadali iz pogona tokom hladnog starta. Na niskim temperaturama povećava se viskoznost ovih ulja pa ona mogu izgubiti značajan deo svoje dielektrične čvrstoće, kao i mogućnost odnošenja toplote. Na kraju se može samo zaključiti da će konačni odgovor na pitanje o tome dali nova ekološka ulja predstavljaju adekvatnu zamenu za mineralna proizici iz dugogodišnje eksploatacije transformatora.

## Literatura

- [1] S.V. Kulkarni and S.A. Khaparde, *Transformer Engineering: Design and Practice*, CRC Press (Taylor & Francis Group), 2004.
- [2] Dieter Kind, Kurt Feser, *High Voltage Test Techniques*, Newnes, 2001.

- [3] R.M.D Vecchio, B. Poulin, P.T. Feghali, D.M. Shah, R. Ahuja, *Transformer Design Principles: With Applications to Core-Form Power Transformers*, CRC Press, 2010.
- [4] Motukuru S. Naidu, V. Kamaraju, *High voltage engineering*, Tata McGraw-Hill Education, 2013.
- [5] H. Borsi, "Dielectric behavior of silicone and ester fluids for use in distribution transformers", *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 26.4 (1991): 755-762.
- [6] W. Lampe, "Power transformers and shunt reactors for arctic regions" *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 1.1 (1986): 217-224.
- [7] K. J. Rapp, G. A. Gauger, and J. Luksich. "Behavior of ester dielectric fluids near the pour point." *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1999 Annual Report Conference on*. Vol. 2. IEEE, 1999.

**Abstract:** The aim of this study is to create references to mineral oil and recommendations for design rules for ester oil applications. Interest in the application of natural and synthetic ester-based fluids in different types of high voltage power equipment has increased over the last years. Most of the parameters relevant to insulation and cooling of high voltage equipment are studied at room or normal operating temperatures. Nevertheless, this equipment has to keep its functionality over the range of various uncommon conditions. For regions with cold climates, an important issue is the behaviour at low temperature. The objective of this work was to determine the insulation strength of mineral- and ester-based oil under a homogenous field at low temperatures for different oil states (moisture content between 5 and 25%). At low temperature ( $-25^{\circ}\text{C}$ ), the tested ester-based oil is not solidified but in a very thick aggregate state. At this temperature its insulation strength is still very high, even higher than at room temperature. As soon as the ester-based oil becomes solidified ( $-35^{\circ}\text{C}$ ), its insulation strength drops dramatically. The insulation strength of the tested ester-based oil at a low temperature, when the oil changes its aggregate state, is not dependent on water content.

**Keywords:** transformer oils, ester oils, mineral oils, low temperature behavior

## **Experimental Investigations of Mineral and Ester-based Oils at Low Temperature**

Rad primljen u uredništvo 26.09.2014. godine  
 Rad prihvaćen 17.10.2014. godine