

# Uticaj termičkog starenja na dielektričnu čvrstoću impregniranog izolacionog papira

Miloš Anđelković, Dragan Đorđević, Ana Janković

Elektrotehnički fakultet  
Elektrotehnički institut "Nikola Tesla"  
Univerzitet u Beogradu  
Beograd, Srbija  
[milos.andjelkovic@ieent.org](mailto:milos.andjelkovic@ieent.org)  
[dragan.djordjevic@ieent.org](mailto:dragan.djordjevic@ieent.org)  
[ana.m.jankovic@ieent.org](mailto:ana.m.jankovic@ieent.org)

**Sadržaj**—Cilj rada je poređenje dielektrične čvrstoće izolacionog papira impregniranog standardnim mineralnim uljem i izolacionog papira impregniranog uljem na bazi estra, kao i proceniti uticaj termičkog starenja na dielektričnu čvrstoću impregnirane celuloze. Prikazani su rezultati visokonaponskih impulsnih merenja kao i merenja na industrijskoj učestanosti. Merenja su vršena pre i posle intenzivnog i kontrolisanog procesa termičkog starenja. Izvršeno je poređenje rezultata za mineralna i ulja na bazi estra pre i posle procesa termičkog starenja.

**Ključne reči**—visokonaponska ispitivanja; termičko starenje; tečni i čvrsti dielektrici;

## I. 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 ulja na bazi estra, kao potencijalne alternative mineralnom ulju, stimuliše istraživanja dielektričnih osobina ovih ulja.

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 [1]. Dielektrična čvrstoća je najvažniji parametar u izboru datog tečnog, čvrstog ili kombinacije ova dva dielektrika za datu primenu [2].

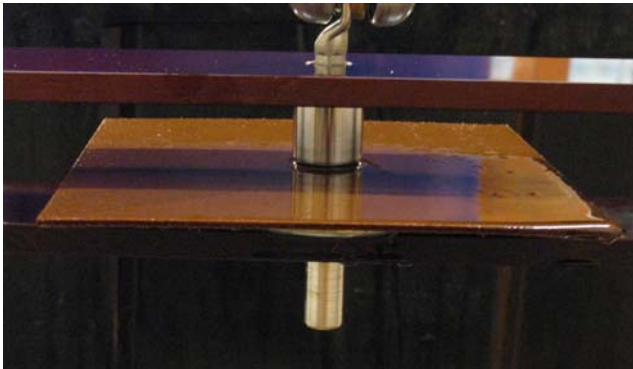
Imajući u obzir gore navedeno, očigledno je da je potrebno što bolje poznavati dielektričnu čvrstoću ulja kao i čvrstih dielektrika impregniranih uljem. Za vreme eksploatacije, ulje u transformatoru je podvrgnuto zagrevanju na visokim temperaturama, a samim tim prolazi postepeno proces starenja. Vremenom koncentracija vlage unutar ulja raste a ulje postaje tamnije zbog formiranja kiselina i smola. To je razlog zašto je veoma važno poznavati dielektričnu čvrstoću kombinacije tečnih i čvrstih dielektrika (najčešće celuloza impregnirana uljem) ne samo u svežem stanju, već i nakon intenzivnog procesa starenja.

Testiran je izolacioni papir impregniran mineralnim Lyra X uljem i FR3 uljem na bazi estra pre i posle termičkog starenja. Vršena su visokonaponska merenja na 50 Hz kao i merenja udarnih prenapona. Estimacija srednjih ( $U_{50\%(AC/LI)}$ ) i minimalnih ( $U_{1\%(AC/LI)}$ ) preskočnih vrednosti napona izvršena je primenom normalne (Gausove) raspodele.

## II. MERNI POSTAVKA I EKSPERIMENTALNA PROCEDURA

### A. Opis procesa impregnacije i termičkog starenja

Merenja preskočnih napona su vršena na izolacionom papiru dimenzija 170x170 mm i debljine 2 mm proizvođača Pucaro (Sl. 1). Pre testiranja izolacioni papir je impregniran sledećom procedurom. Željeni broj uzoraka izolacionog papira postavljen je u metalnu posudu i ostavljen u vakumskoj komori dva sata na temperaturi od 110 °C i atmosferskom pritisku, radi inicijalnog sušenja. Nakon dva sata pritisak u komori je smanjen na 1 milibar, dok temperatura nije menjana, i uzorci papira su ostavljeni još dvanaest sati unutar komore. Posle ove procedure, željeno ulje (Lyra X ili FR3) zagrejano na 80 °C je sipano u metalnu posudu sa osušenim uzorcima izolacionog papira (metalna posuda se i dalje nalazila unutar vakuumske komore pod pritiskom od 1 milibar i temperaturi od 110 °C i ulje je sipano kroz specijalni otvor). Naredni sat vremena temperatura i pritisak unutar komore nisu menjani, da bi se nakon toga pritisak unutar komore podigao na atmosferski a temperatura održavala na 110 °C jos dvanaest sati. Najzad nakon ove procedure komora je otvorena i uzorci papira i ulje su ostavljeni da se ohlade i dostignu sobnu temperaturu. Nakon toga određeni broj uzoraka je testiran. Drugi set uzoraka je podvrgnut procesu termičkog starenja na sledeći način. Impregnirani uzorci izolacionog papira su postavljeni u metalne posude kapaciteta pet litara. Na dnu svake posude postavljene su bakarne ploče ukupne težine tri kilograma kako bi se intenzivirao proces starenja. U posudu je sipano pet litara svežeg ulja (mineralno Lyra X ili FR3 na bazi estra). Ove posude su vakuumski zatvorene i ostavljene 60 dana unutar grejne komore na 140 °C. Nakon ovog perioda komora je ugašena i ulje i izolacioni papir su ostavljeni da se ohlade na sobnu temperaturu. Nakon hlađenja uzorci su testirani.



Slika 1. Impregniran izolacioni papir montiran između test elektroda

### B. Merna postavka i procedura kod merenja probojnih napona industrijske učestanosti

Merenja probojnih napona industrijske frekvencije su vršena shodno standardu IEC 60243-1. Metoda podrazumeva dve nejednake elektrode ([3]-[4]), čije su dimenzije definisane standardom, između kojih se nalazi test uzorak (Sl. 1). Ova konfiguracija se postavlja unutar plastičnog bureta kapaciteta 230 l koje je ispunjeno svežim uljem za vreme testiranja. Donja elektroda je uzemljena dok se gornja preko zaštitnog otpornika povezuje na ispitni transformator industrijske učestanosti (50 Hz). Napon je počev od 35 kV (oko 70% očekivane probojne vrednosti) podizan u koracima od 3 kV (oko 5% očekivane probojne vrednosti) do proboja. Na svakom koraku napon je održavan konstantnim jedan minut. Nakon proboja test uzorak je zamenjen. Izvršeno je ukupno deset testiranja/proboja za svaki tip ulja.

### C. Merna postavka i procedura kod merenja udarnih probojnih napona

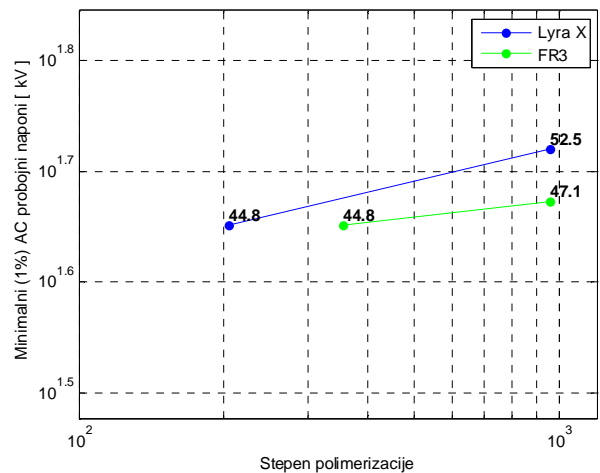
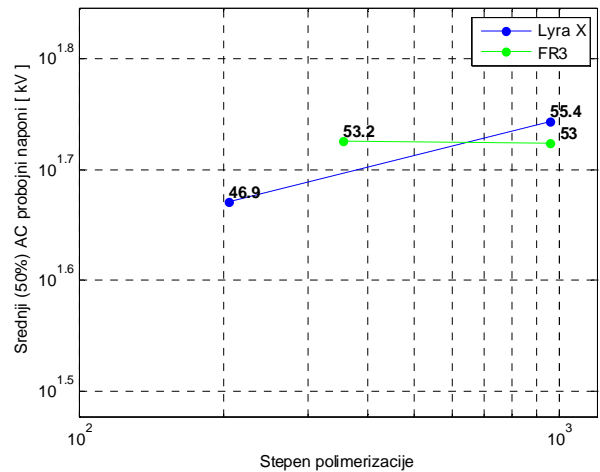
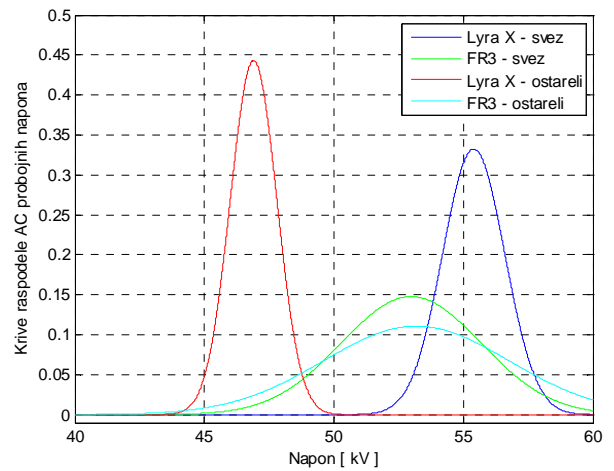
Merenja udarnih probojnih napona su vršena shodno standardu IEC 60243-3. Merenja su vršena pomoću iste konfiguracije kao za naizmenična merenja. Elektrode između kojih se nalazio test uzorak, postavljene unutar plastičnog bureta su povezane na udarni generator. Počevši od 100 kV napon je podizan u koracima od 5 kV do proboja. Na svakom koraku izvršena su tri negativna impulsna udara. Nakon proboja test uzorak je zamenjen. Izvršeno je ukupno deset testiranja/proboja za svaki tip ulja.

## III. REZULTATI MERENJA

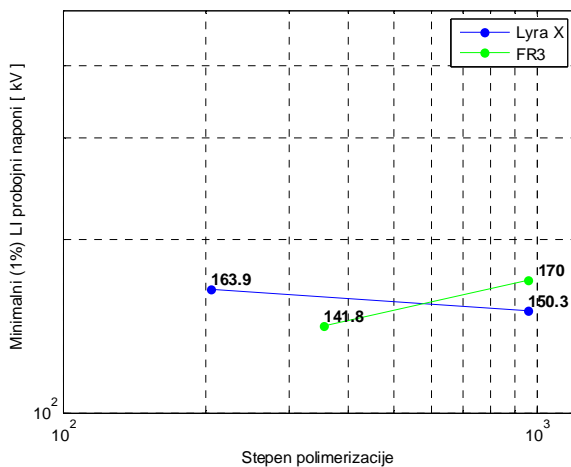
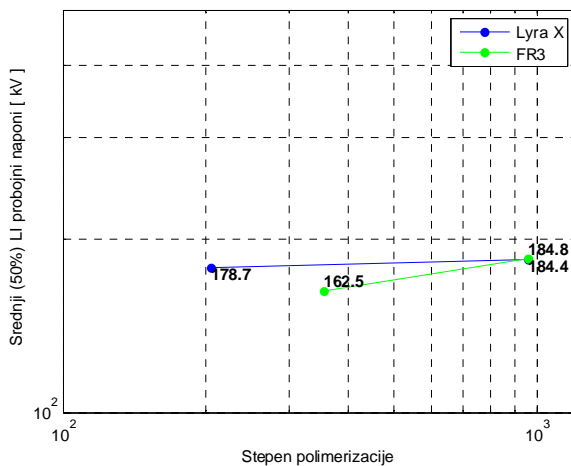
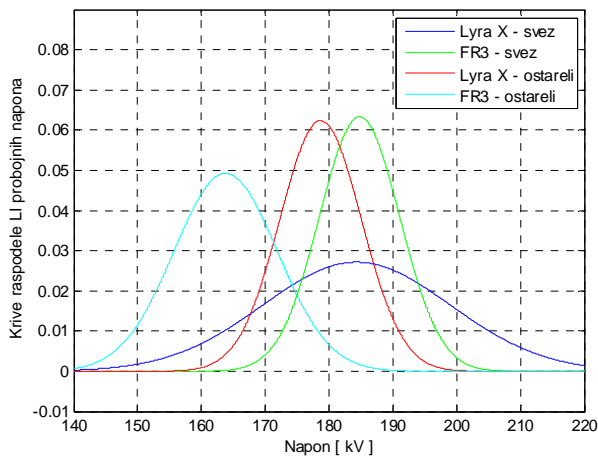
### A. Rezultati kontrolnih merenja

Osim visokonaponskih merenja vršena su i kontrolna merenja kvaliteta ulja i izolacionog papira na početku i kraju procesa termičkog starenja. Kiselost (TAN-Total Acid Number) svežeg mineralnog Lyra X ulja je iznosila 0.11 mg dok je kiselost istog ulja nakon procesa termičkog starenja, koji je trajao 60 dana na 140 °C, porasla na 0.35 mg. Kiselost estra FR3 je porasla posle procesa termičkog starenja sa 0.5 mg na 4 mg. Vrednost  $\tan\delta$  mineralnog ulja je porasla sa 0.006 na 3.2 dok je  $\tan\delta$  ulja na bazi estra porasla sa 0.06 na 3.8 nakon procesa termičkog starenja. Stepen polimerizacije (DP-Degree of polymerization) svežeg izolacionog papira impregniranog sa Lyra X i FR3 uljem je iznosio oko 960 za oba ulja. Nakon

termičkog starenja DP vrednost za papir impregniran Lyra X (FR3) uljem iznosi oko 205 (355). Iskustva pokazuju da izolacioni papir unutar energetskih transformatora angažovanih oko 20 godina ima vrednost stepena polimerizacije ispod 350.



Slika 2. Krive raspodele i srednje i minimalne (AC) vrednosti preskočnih napona izolacionog papira impregniranog mineralnim Lyra X i FR3 ester uljem, pre i posle procesa termičkog starenja, dobijene normalnom (Gausovom) raspodelom



Slika 3. Krive raspodele i srednje i minimalne (LI) vrednosti preskočnih napona izolacionog papira impregniranog mineralnim Lyra X i FR3 ester uljem, pre i posle procesa termičkog starenja, dobijene normalnom (Gausovom) raspodelom

### B. Rezultati merenja na industrijskoj učestanosti

Urađeno je ukupno četrdeset proboja na 50 Hz (AC-Alternating current). Deset na svežem izolacionom papiru

impregniranim mineralnim i još deset na svežem izolacionom papiru impregniranim ester uljem. Još deset proboja je izvršeno na termički ostarelom izolacionom papiru impregniranim mineralnim odnosno ester uljem. Ovi podaci su korišćeni radi evaluacije parametara normalne (Gausove) raspodele (srednja vrednost  $\mu$  i standardna devijacija  $\sigma$ ). Podaci su uklopljeni u ovu raspodelu sa pouzdanošću od 95%. Nakon proračuna parametara raspodele moguće je utvrditi minimalne ili 1% vrednosti probojnih napona (naponi pri kojima postoji verovatnoća od 1% da dođe do proboja) koje se koriste prilikom dizajna izolacije transformatora [5].

Na Sl.2 prikazane su krive normalne raspodele kao i vrednosti srednjih i minimalnih preskočnih napona industrijske učestanosti izolacionog papira, pre i posle procesa termičkog starenja, impregniranog mineralnim i ester uljem, dobijenih normalnom raspodelom. Rezultati su prikazani da duploj logaritamskoj skali. Na x osi su prikazane vrednosti stepena polimerizacije a na y osi vrednosti procenjenih probojnih napona.

Posmatrajući dobijene rezultate može se zaključiti da svež izolacioni papir impregniran mineralnim uljem ima najveću dielektričnu čvrstoću. Svež izolacioni papir impregniran FR3 uljem na bazi estra ima 4.3% niži srednji odnosno 10.3% niži minimalni probojni napon u odnosu na svež papir impregniran Lyra X uljem. Sveži test uzorci impregnirani mineralnim uljem imaju i manju devijaciju probojnih napona u odnosu na sveže test uzorke impregnirane ester uljem što prouzrokuje veću 1% probojnu vrednost napona. Proces termičkog starenja ima značajan uticaj na uzorke impregnirane mineralnim uljem dok na uzorke impregnirane ester uljem ima vrlo mali uticaj. Tako se poređenjem srednjih (minimalnih) vrednosti probojnih napona uzoraka impregniranim Lyra X uljem dolazi do zaključka da je dielektrična čvrstoća nakon termičkog starenja opala za 15.3% (14.7%). Za ester ulje taj pad dielektrične čvrstoće je znatno manji. Srednja vrednost probojnog napona opada za 2.4% a minimalna za 4.9%. Treba napomenuti da su na test uzorcima na strani visokonaponske elektrode uočljivi tragovi parcijalnog pražnjenja. Sa strane uzemljene elektrode vidljiv je samo jedan trag/tačka gde je došlo do proboja.

### C. Rezultati merenja udarnih probojnih napona

Urađeno je ukupno četrdeset udarnih proboja (LI-Lighting impulse). Deset na svežem izolacionom papiru impregniranim mineralnim i još deset na svežem izolacionom papiru impregniranim ester uljem. Još deset proboja je izvršeno na termički ostarelom izolacionom papiru impregniranim mineralnim odnosno ester uljem. Ovi podaci su korišćeni radi evaluacije parametara normalne (Gausove) raspodele (srednja vrednost  $\mu$  i standardna devijacija  $\sigma$ ). Podaci su uklopljeni u ovu raspodelu sa pouzdanošću od 96%. Nakon proračuna parametara raspodele moguće je utvrditi minimalne ili 1% vrednosti probojnih napona (naponi pri kojima postoji verovatnoća od 1% da dođe do proboja) koje se koriste prilikom dizajna izolacije transformatora.

Na Sl.3 prikazane su krive normalne raspodele kao i vrednosti srednjih i minimalnih preskočnih udarnih napona izolacionog papira, pre i posle procesa termičkog starenja, impregniranog mineralnim i ester uljem, dobijene normalnom

raspodelom. Rezultati su prikazani da duploj logaritamskoj skali. Na x osi prikazane vrednosti stepena polimerizacije a na y osi vrednosti procenjenih probojnih napona.

Analizirajući dobijene rezultate zaključujemo da svež izolacioni papir impregniran mineralnim i ester uljem ima približno istu dielektričnu čvrstoću. Međutim devijacija vrednosti udarnih probojnih napona je veća za uzorke impregnirane mineralnim nego ester uljem. Zato je minimalna vrednost udarnog probojnog napona za uzorke impregnirane ester uljem 11.5% viša od iste vrednosti za uzorke impregnirane mineralnim uljem. Nakon termičkog starenja srednja vrednost udarnih probojnih napona uzoraka impregniranih Lyra X uljem je opala sa 184.4 kV na 178.7 kV (pad od 3.1%). Ista vrednost za FR3 ulje je opala sa 184.8 kV na 163.8 kV (pad od 11.4%). Analizirajući minimalne udarne probojne napone uzoraka impregniranih mineralnim uljem dolazimo do zaključka da termičko starenje nije imalo uticaja na dielektričnu čvrstoću. Minimalna vrednost udarnog probojnog napona nakon termičkog starenja (163.9 kV) je šta više veća nego kod svežih test primeraka (150.3 kV). Ovo je posledica manje devijacije vrednosti probojnih napona kod termički ostarelih uzoraka. Minimalna vrednost probojnih napona uzoraka impregniranih FR3 uljem je opala sa 170 kV na 144.8 kV nakon termičkog starenja. Ovo predstavlja pad dielektrične čvrstoće od skoro 15% što nije zanemarljiva vrednost. Takođe, tragovi proboja se kod ovog tipa testiranja znatno razlikuju nego kod testiranja na 50 Hz. Uočljiva je samo jedna tačka gde je došlo do proboja sa obe strane izolacionog papira.

#### IV. ZAKLJUČAK

Dielektrična čvrstoća izolacionih materijala je stohastične prirode i njena adekvatna procena predstavlja veliki izazov u procesu projektovanja izolacije transformatora. Izdrživi napon izolacije proračunava se sa velikim faktorom sigurnosti i predstavlja statističku varijablu koja korespondira niskoj verovatnoći proboja. Mogu se koristiti mnogobrojni statistički modeli za procenu vrednosti napona pri kojima postoji vrlo mala verovatnoća proboja izolacije. U ovom zaključku vrednost napona pri kome postoji 1% verovatnoće proboja ( $U_{1\%}$ ), dobijena normalnom raspodelom, će biti usvojena kao minimalna (izdrživa) vrednost dielektrične čvrstoće impregniranog izolacionog papira. Ova vrednost biće korišćena za poređenje rezultata proboja izolacije impregnirane različitim tipovima ulja i za procenu uticaja termičkog starenja na dielektričnu čvrstoću.

Izolacioni papir impregniran mineralnim uljem ima veći minimalni probojni napon industrijske učestanosti  $U_{1\%(AC)}$  nego papir impregniran ester uljem. Razlika nije velika (10.3%) ali je uočljiva. Glavni razlog ovih vrednosti je veća devijacija probojnih napona kod papira impregniranog ester uljem. Termičko starenje ima mali i jedva приметni uticaj na  $U_{1\%(AC)}$  papira impregniranog ester uljem dok je uticaj na papir impregniran mineralnim uljem приметan.

Minimalna vrednost udarnog probojnog napona  $U_{1\%(LI)}$  svežeg papira ima približno jednaku vrednost kada se on impregnira mineralnim ili ester uljem. Nakon termičkog starenja  $U_{1\%(LI)}$  papira impregniranog mineralnim uljem je

porasla što očigledno pokazuje da proces starenja nije imao uticaj na njenu dielektričnu čvrstoću. Sa druge strane,  $U_{1\%(LI)}$  papira impregniranog ester uljem je nakon procesa starenja opala za 15%, što dokazuje da je taj proces uticao na dielektričnu čvrstoću.

Dielektrična konstanta ester ulja je viša i približnija dielektričnoj konstanti čvrste izolacije. Za isti izolacioni sistem, prilikom zamene mineralnog ulja ester uljem, ima se drugačija raspodela električnog polja. Međutim poznato je da ester ulje ima veću devijaciju probojnih napona. Ova njegova osobina najverovatnije redukuje povoljniju raspodelu električnog polja i dovodi do niže  $U_{1\%(AC)}$  sveže impregnirane papirne izolacije. Kod udarnih testiranja rezultati dovode do obrtnog zaključka. Veća devijacija probojnih napona sveže čvrste izolacije impregnirane mineralnim uljem smanjuje njenu  $U_{1\%(LI)}$ . Ovo može biti posledica neizbežne statističke greške usled malog broja uzoraka.

Redukcija dielektrične čvrstoće ( $U_{1\%(AC)}$  i  $U_{1\%(LI)}$ ) impregniranog izolacionog papira nakon termičkog starenja nije preterano velika i verovatno je posledica mehaničke degradacije izolacionog papira [6]. Veći kanali ulja unutar transformatora su uvek razdruženi čvrstom izolacijom na manje kanale što čini izolacioni sistem pouzdanijim i stabilnijim. Tečni izolatori generalno imaju manju dielektričnu čvrstoću od čvrstih. Zbog manje dielektrične konstante električno polje je uvek jače unutar ulja nego čvrste izolacije. Sve ovo dovodi do zaključka da nakon intenzivnog procesa starenja, veća je verovatnoća da do proboja dođe u degradiranom ulju nego u neznatno oslabljenoj čvrstoj izolaciji.

#### ZAHVALNICA

Prvi autor se zahvaljuje institutu za visoki napon i prenos energije u Štutgartu na kome je za vreme stipendije izvršio merenja i uradio master rad.

#### LITERATURA

- [1] 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.
- [2] S.V. Kulkarni and S.A. Khaparde, "Transformer engineering: design and practice," CRC Press (Taylor & Francis Group), 2004.
- [3] Dieter Kind, Kurt Feser, "High voltage test techniques," Newnes, 2001.
- [4] Motukuru S. Naidu, V. Kamaraju, "High voltage engineering", Tata McGraw-Hill Education, 2013.
- [5] D. Martin and Z. D. Wang, "Statistical analysis of the AC breakdown voltages of ester based transformer oils," Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, vol. 15, pp. 1044-1050, 2008.
- [6] R. J. Liao, S. W. Liang, C. X. Sun, L. J. Yang, and H. G. Sun, "A comparative study of thermal aging of transformer insulation paper impregnated in natural ester and in mineral oil," European Transactions on Electrical Power, vol. 20, pp. 518-533, May 2010.

ABSTRACT

The aim of this paper is to compare the dielectric strength of insulation paper impregnated with mineral oil versus ester based oils, as well as evaluate the influence of ageing on the dielectric withstand of cellulose. Results of breakdown strength of paper elements impregnated with mineral and ester oils are presented. The AC and lightning impulse breakdown strength of paper elements is measured before and after thermal aging. For

all measured data a comparison between mineral and ester oils is done.

**THERMAL AGING INFLUENCE ON THE  
DIELECTRIC STRENGTH OF IMPREGNATED  
PAPER**

Miloš Anđelković

Dragan Đorđević

Ana Janković