

Starenje transformatorske izolacije

Fiolić, Tamara

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:149:752672>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Tamara Fiolić

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, rujan 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Tamara Fiolić

STARENJE TRANSFORMATORSKE IZOLACIJE

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada: doc. dr. sc. Domagoj Vrsaljko, FKIT

Članovi ispitnog povjerenstva: doc. dr. sc. Domagoj Vrsaljko, FKIT

dr. sc. Zrinka Buhin Šturlić, FKIT

dr. sc. Vesna Očelić Bulatović, FKIT

Zagreb, rujan 2017.

Starenje transformatorske izolacije

SAŽETAK

Transformatori se prema izvedbi dijele na uljne i suhe transformatore. U ovome radu opisani su uljni transformatori kod kojih su namoti međusobno i prema ostalim vodljivim dijelovima izolirani čvrstom izolacijom i uljem. Ulja koja se koriste kao izolacijske tekućine mogu biti esterska i mineralna ulja. Sintetsko estersko ulje je biorazgradljivo i ima veću toplinsku postojanost u usporedbi s mineralnim transformatorskim uljem, a mineralno ulje ima veću oksidacijsku stabilnost u usporedbi s esterskim uljem. Čvrsta izolacija transformatora je celulozni papir načinjen od visoko kvalitetnih pamučnih vlakana. Djelovanjem različitih čimbenika dolazi do degradacije celuloze te do oksidacije ulja pri čemu dolazi do starenja glavne izolacije uljnog transformatora i na temelju toga se provode ispitivanja pri kojima se utvrđuje starost izolacije prije nego li dođe do kvara transformatora. Ispitivanja vezana uz stanje izolacije provode se prema normama. Karakteristična ispitivanja transformatorskog ulja i papira su: kromatografska analiza plinova (DGA), fizikalno-kemijska ispitivanja ulja, ukupni sadržaj plinova u ulju, analiza sadržaja furana (HPLC), stupanj polimerizacije papira, prekidna čvrstoća papira i mjerenje sadržaja vlage u ulju i papiru. Osim karakterističnih ispitivanja transformatorskog ulja i papira, provode se i ispitivanja ulja i papira s ostalim izolacijskim materijalima, a neka od njih su: kiselost ulja, međupovršinska napetost između ulja i vode, faktor dielektričkih gubitaka i otpor ulja, nastajanje plinova iz gumenih materijala. Također, postoje metode ispitivanja izolacijskog sustava istosmjernim i izmjeničnim naponom, te mjerenjem temperature najtoplije točke namota.

Ključne riječi: transformator, estersko ulje, mineralno ulje, celulozni papir, izolacija transformatora

Ageing of transformer insulation

SUMMARY

The transformers can be divided into oil and dry transformers. In this paper are described oil transformers in which the windings are interconnected with other conductive parts by isolation and oil. The oils used as insulating liquids can be esters and mineral oils. Synthetic ester oils are biodegradable and have higher thermal stability compared to mineral transformer oils, and mineral oil has a higher oxidative stability compared to ester oil. Solid insulation of the transformer is cellulose paper made from high quality cotton fibers. By the action of various factors cellulose degradation and oil oxidation result in the aging of the main insulation of the oil transformer, and on this basis tests are carried out to determine the age of insulation before the transformer fails. Insulation-related tests are conducted according to standards. Characteristic tests of transformer oil and paper are: dissolved gas analysis (DGA), physico-chemical analysis of oil, total oil content in oil, high-performance liquid chromatography (HPLC), degree of polymerization of paper, tensile strength of paper and measurement of moisture content in oil and paper. In addition to the typical testing of transformer oil and paper, oil and paper testing with other insulating materials are also carried out, some of which are: oil acidity, surface tension between oil and water, dielectric loss factor and oil resistance, formation of rubber gases. Also, there are methods for testing the insulation system by DC and alternating voltage and by measuring the warmest temperature of the winding point.

Keywords: transformer, ester oil, mineral oil, cellulose paper, transformer insulation

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. OPĆI DIO.....	2
2.1 TRANSFORMATOR	2
2.2 IZOLACIJSKI SUSTAV TRANSFORMATORA	5
2.3 IZOLACIJSKO ULJE	6
2.3.1 MINERALNO ULJE	7
2.3.1.1 SVOJSTVA MINERALNOG ULJA	7
2.3.1.2 MIJEŠANJE MINERALNIH ULJA	9
2.3.1.3 ISPITIVANJA MINERALNIH ULJA	9
2.3.1.4 PLINOVI U ULJU	10
2.3.2 ESTERSKO ULJE.....	12
2.3.3 SVOJSTVA TRANSFORMATORSKOG ULJA	12
2.4 IZOLACIJSKI PAPIR	13
2.4.1 PAPIR I TRAJNOST.....	13
2.4.1.1 PROIZVODNJA TRANSFORMATORSKOG PAPIRA	13
2.4.1.2 DEGRADACIJA PAPIRA.....	13
2.4.2 MEHANIČKA SVOJSTVA PAPIRA.....	15
3. PREGLEDNI DIO.....	15
3.1 ISPITIVANJE I STUPNJEVI IZOLACIJE	15
3.2 ANALIZA PLINOVA OTOPLJENIH U ULJU I ISPITIVANJE IZOLACIJSKOG ULJA	17
3.3 STARENJE TRANSFORMATORSKOG ULJA I PAPIRA, ANALIZE ULJA I PAPIRA	23
3.4 STARENJE OSTALIH IZOLACIJSKIH MATERIJALA, ANALIZE OSTALIH IZOLACIJSKIH MATERIJALA.....	31
3.5 ISPITIVANJE IZOLACIJSKOG SUSTAVA TRANSFORMATORA ISTOSMJERNIM NAPONOM	38
3.6 ISPITIVANJE IZOLACIJSKOG SUSTAVA TRANSFORMATORA IZMJENIČNIM NAPONOM MJERENJEM KAPACITETA I FAKTORA DIELEKTRIČNIH GUBITAKA.....	41
3.7 MJERENJE TEMPERATURE NAJTOPLIJE TOČKE NAMOTA	44
4. ZAKLJUČAK	46
5. LITERATURA.....	47
6. ŽIVOTOPIS	49

1. UVOD

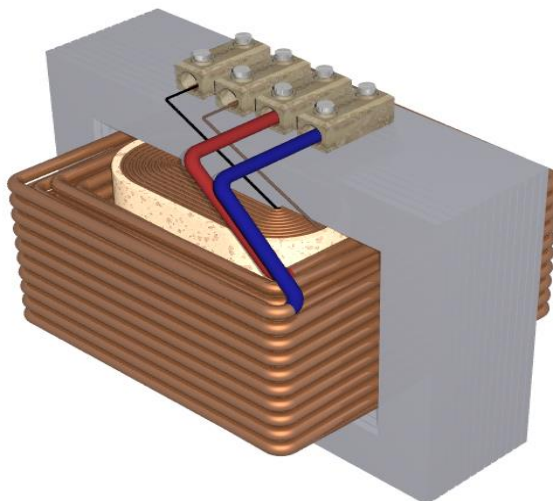
Transformatori su statički elektromagnetski uređaji koji se mogu koristiti za sniženje ili za povišenje napona. Najznačajnija primjena transformatora je u elektroenergetskom sustavu kod prijenosa i razdiobe električne energije gdje se napon, u većini slučajeva, mora nekoliko puta transformirati.

Životni vijek energetskog transformatora ovisi o vijeku trajanja izolacije tj. o promjenama svojstava izolacijskih materijala s vremenom. Sustav izolacije se sastoji od celuloznog papira koji čini čvrstu izolaciju te od mineralnog ili sintetskog ulja koje čini tekuću izolaciju. Izolacijsko ulje mora biti kompatibilno s drugim materijalima transformatora, mora biti male viskoznosti jer služi kao rashladni medij i funkcija mu je prijenos topline odnosno hlađenje te mora imati određenu oksidacijsku stabilnost kako bi se primjenjivalo na visokim temperaturama. Do degradacije, i celuloznog papira i ulja, dolazi uslijed djelovanja elektromagnetskog polja, povišenih temperatura i katalitičkog utjecaja metala. Dugotrajnim procesima degradacije transformatorske izolacije dolazi do starenje transformatora te se zbog toga starenje izolacije ispituje različitim metodama.

2. OPĆI DIO

2.1 TRANSFORMATOR

Transformator je statički elektromagnetski uređaj u kojem se električna energija iz jednog ili više izmjeničnih krugova, koji napajaju primarne namote transformatora, prenosi u jedan ili više izmjeničnih krugova napajanih iz sekundarnih namota transformatora, s izmijenjenim iznosima struja i napona i nepromijenjenom frekvencijom [1] (slika 1.) [2].



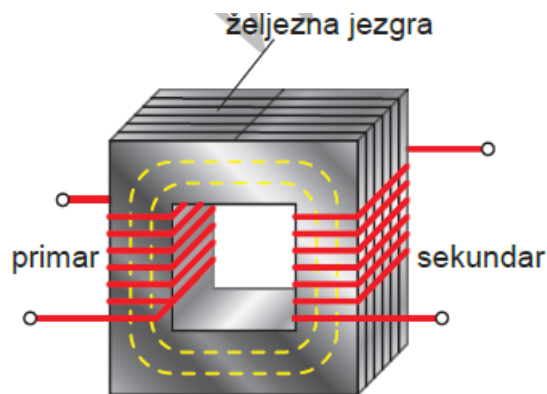
Slika 1. Izgled transformatora

Transformatori (slika 2.) [2] služe da se električna energija prije prijenosa transformira s nižeg na viši napon, a nakon prijenosa, ponovo na niži napon. Izlazni napon električnih generatora iznosi između 20 kV i 30 kV, a generatorski se napon najčešće transformira na prijenosni napon od 400 kV. Električnu energiju iz visokonaponskog dalekovoda je potrebno dovesti na nižu naponsku razinu kako bi bila pristupačna korisniku. U transformatorskim stanicama se napon od 400 kV transformira na 110 kV odnosno 120 kV te se dalekovodima tog napona napaja područje od 100 km odnosno 200 km. Nakon toga, napon se ponovno transformira, obično na 30 kV, te se dovodi kabelom do središnje transformatorske stanice, gdje ga je opet potrebno sniziti na 10 ili 20 kV i razvesti kabelima do transformatorskih stanica u naseljima, iz kojih još jednom transformira te se nakon toga široka potrošnja napaja naponom 400 V, odnosno 230 V [1].



Slika 2. Transformator

Glavni dijelovi energetskih transformatora su željezna jezgra te primarni i sekundarni namot (primar i sekundar). Uloga jezgre je da omogući stvaranje magnetskog kruga i ostvari potrebnu magnetsku indukciju za prijenos energije s primarnog namota na sekundarni, uz što manje gubitaka. Najčešće je izrađena od željeznih limova, dok su vodiči od kojih se izrađuju namoti najčešće od bakra. Namoti su izvedeni na način da postoji dobra izolacija između namota i željezne jezgre, između namota primara i sekundara te između zavoja pojedinog namota. Na primarni namot se priključuje izvor izmjeničnog napona vrijednosti U_1 koji kroz njega tjera izmjeničnu struju I_1 , a struja stvara promjenjivi magnetski tok φ . Namoti primara i sekundara su na istoj željeznoj jezgri, stoga isti promjenjivi magnetski tok φ u namotu primara inducira napon samoindukcije $e_{1,S}$ efektivne vrijednosti E_1 , a u sekundaru napon međuindukcije $e_{2,M}$ efektivne vrijednosti E_2 (slika 3) [3].



Slika 3. Glavni dijelovi transformatora sa željeznom jezgrom

Transformatori se mogu razvrstati prema više kriterija [4], pa se zato prema snazi, transformatori dijele na:

- Male-ispod 50 kVA
- Srednje-50 kVA do 1600 kVA
- Velike-od 2000 kVA pa do najvećih do sada izgrađenih transformatora

Ovisno o području primjene, transformatori se dijele na:

- Energetske ili transformatore snage-upotrebljavaju se pri prijenosu i razdiobi električne energije
- Regulatorni-regulacija napona pod opterećenjem u distributivnim mrežama
- Autotransformatori-transformacija napona u uskim granicama
- Mjerni-priključivanje mjernih instrumenata, aparata i releja kod visokih napona i visokih struja
- Laboratorijski-ispitivanje strojeva, aparata, dielektrične čvrstoće različitih izolacijskih materijala
- Specijalni-za električne peći i elektrolučno zavarivanje

Prema izvedbi, transformatori se dijele:

- Uljni-namoti su međusobno i prema ostalim vodljivim dijelovima izolirani čvrstom izolacijom i uljem
- Suhi-namoti su međusobno i prema ostalim vodljivim dijelovima izolirani čvrstom i plinovitom (najčešće zrak) izolacijom

Prema broju namota razlikujemo:

- Dvonamotni transformatori
- Višenamotni transformatori (obično tronamotni)

Prema broju faza transformatori mogu biti:

- Jednofazni
- Višefazni (najčešće trofazni)

2.2 IZOLACIJSKI SUSTAV TRANSFORMATORA

Sigurnost rada i životni vijek energetskih transformatora u najvećoj mjeri ovisi o stanju njegovog izolacijskog sustava. Životni vijek transformatora je gotovo jednak životnom vijeku njegovog izolacijskog sustava koji se najčešće sastoji od transformatorskog ulja kao tekuće izolacije i tzv. trafo-papira kao čvrste izolacije. Transformatorsko ulje čini oko 80 % dielektrične čvrstoće transformatora odnosno pokazuje izdržljivost dielektrika na povećanje jakosti električnog polja uslijed zagrijavanja ili kemijskih promjena izazvanih električnim poljem pri čemu dolazi do električnog proboja. Zbog propadanja izolacijskog sustava, dolazi do oko 85 % kvarova energetskih transformatora. Transformatorsko ulje je dobar izolacijski materijal, kada se impregnira u papir, uvećava njegovu dielektričnu čvrstoću (graničnu jakost električnog polja kod koje dolazi do proboja izolatora te se on tada više ne ponaša kao izolator). Ulje je male viskoznosti te lako prodire u čvrstu izolaciju i prenosi toplinu s jezgre prema hladnjacima te na taj način služi kao rashladno sredstvo. Također, ulje ima visoku oksidacijsku stabilnost te se može primjenjivati na visokim temperaturama. Izolacija transformatora je izložena djelovanju elektromagnetskog polja, katalitičkom utjecaju metala te djelovanju povišenih temperatura što su i osnovni uzroci početne degradacije. Pri degradaciji dolazi do nastajanja produkata starenja koji ubrzavaju te procese, a nakon nekog vremena postaju dominantni faktori degradacije [5].

Transformatorsko ulje pod utjecajem faktora degradacije oksidira i stvara molekule radikala tj. pojedine molekule ulja gube po jedan atom vodika. Nakon toga, stvoreni radikali nastavljaju proces oksidacije s peroksidima, koji s nestabilnim atomima kisika stvaraju aktivan oksidant. Proces se nastavlja stvarajući nove radikale, peroksidi i okside, a sve te nastale molekule su polarne, viših razina oksida, te se zato javljaju kiseline koje sudjeluju u nastajanju taloga. Sva izolacijska ulja sadrže antioksidante, a mogu se i dodatno inhibirati. Mogu im se dodati inhibitori, fenoli, koji blokiraju radikale, dok prirodni inhibitori tj. antioksidanti razgrađuju peroksidi. Kiseline nastale procesom oksidacije talože se kao kiseli talog na izolaciji, bočnim zidovima kotla, u ventilacijskim otvorima itd. Do bržeg stvaranja taloga dolazi u preopterećenim ili neispravnim transformatorima. Talog povećava viskoznost ulja, a time smanjuje sposobnost odvođenja topline. U električnom polju talog može izazvati parcijalna pražnjenja i proboj. Nagrizanjem laka i celuloznih materijala, talog prouzrokuje propadanje izolacije [5].

Čvrsta izolacija transformatora je celuloza koja se sastoji od polimeriziranih lanaca glukoze. Visoka temperatura prekida kemijske veze u polimeru, na mjestu najslabije točke čime dolazi do trajne degradacije izolacije [5].

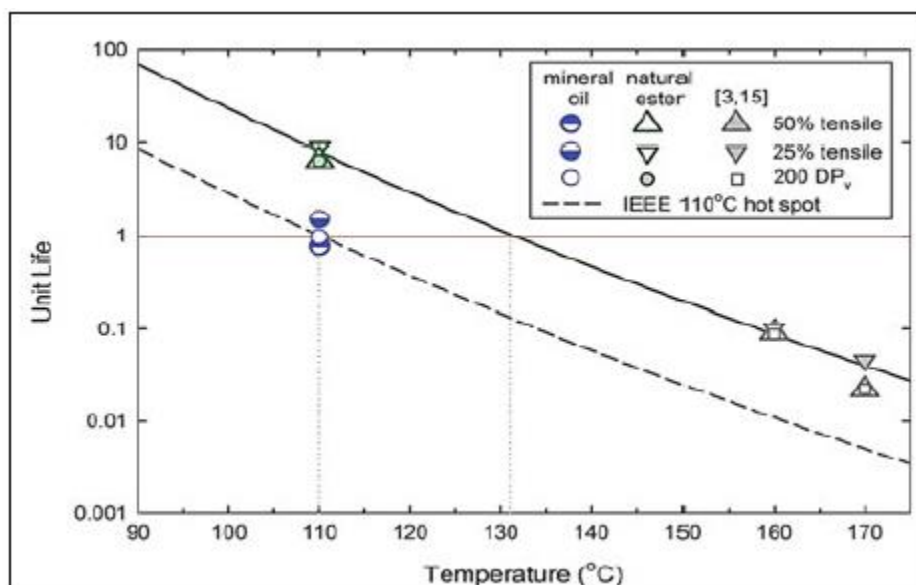
Produkti starenja ulja ubrzavaju proces degradacije celuloze, a proces degradacije celuloze ubrzava starenje transformatorskog ulja [5].

2.3 IZOLACIJSKO ULJE

Transformatorsko ulje ima izolacijska svojstva i služi kao rashladni medij pa se prema tome postavljaju određeni zahtjevi vezani uz ulje [6]:

- U hladnom stanju mora biti male viskoznosti kako bi moglo strujati aktivnim dijelom transformatora.
- Ne smije sadržavati vlagu jer mu ona smanjuje probojnu čvrstoću.
- Ne smije sadržavati nikakve čvrste materijale jer mu oni smanjuju izolacijska svojstva.
- Ne smije sadržavati kiseline i sumpor jer nagrizzaju i razaraju izolaciju.
- Mora imati visoku temperaturu zapaljenja.
- Mora biti sposobno za primjenu kod niskih temperatura.
- Probojna čvrstoća novog ulja mora iznositi najmanje 80 kV / 2,5 mm, a kod transformatora u pogonu mora imati barem 40 kV / 2,5 mm (30 kV / 2,5 mm je granična vrijednost).

Ulja predstavljaju glavnu izolacijsku komponentu energetskih transformatora. Upotrebljavaju se mineralna i sintetska ulja (slika 4.). Mineralno ulje se najčešće koristilo kao izolatorska tekućina, ali su se zbog povećane ekološke sigurnosti, učinkovitosti i ekonomičnosti počela koristiti druga ulja za upotrebu kao izolacijske tekućine, a to su biljna ulja i esteri [7].



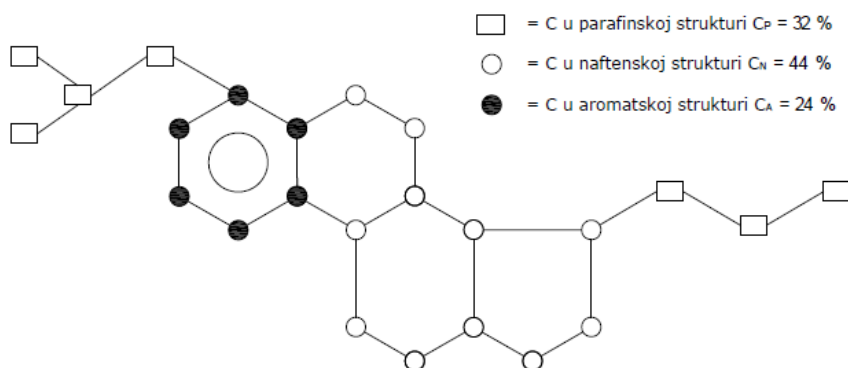
Slika 4. Usporedba životnog vijeka transformatora s mineralnim uljem i prirodnim esterom

2.3.1 MINERALNO ULJE

Mineralna ulja su se počela upotrebljavati kao električki izolatori kasnije u 19. stoljeću. Gotovo svi transformatori u sustavima isporuke električne energije širom svijeta, ispunjeni su nekom vrstom ove tekućine. [8]

2.3.1.1 SVOJSTVA MINERALNOG ULJA

Mineralno transformatorsko ulje dobiva se iz produkata prerade nafte, smjesa je različitih tekućih ugljikovodika koji su sastavljeni od dva kemijska elementa, ugljika i vodika, spojena u velik broj različitih molekula koje se dijele na tri grupe: parafinske, naftenske i aromatske spojeve (slika 5.) [10]. Osnovni sastav je naftensko-parafinski, dok su aromatske molekule prisutne u maloj količini, ali su vrlo značajne za reaktivnost prema drugim materijalima i za toplinsku otpornost ulja. Materijali koji se djelomično ili potpuno otapaju u izolacijskoj tekućini utječu na električna svojstva i na brzinu degradacije [9].



Slika 5. Molekula transformatorskog ulja

Svojstva ulja koja proizlaze iz kemijskog sastava, a značajna su za njegovo ponašanje prema materijalima su slijedeća [9]:

- moć otapanja
- pritisak para
- zapaljivost
- međupovršinska napetost
- prisutnost krutih čestica

Moć otapanja je posljedica privlačnih sila između molekula i ovisi o polaritetu molekula. Tekući ugljikovodici međusobno se miješaju u svim omjerima jer se privlačne sile između molekula različitih ugljikovodika malo razlikuju od sila između molekula istog tipa. Na niskim temperaturama, pri kojima su određeni ugljikovodici kruti (voskovi), postoji privlačnost između sličnih molekula te dolazi do okrupnjavanja molekula i izdvajanja taloga. Privlačne sile su najslabije između parafinskih ugljikovodika, a između aromatskih ugljikovodika jače su nego kod naftenskih. Uklanjanje aromata iz ulja postiže se svojstvom otapanja koje imaju aromati uz pomoć polarnijih otapala [9].

Niža viskoznost ukazuje na sadržaj lakših i hlapivijih ugljikovodika, koji imaju niže plamište i veći pritisak para. Gustoća parafina je manja od gustoće aromata. Granična površinska napetost nije mjera topivosti, ali je njena vrijednost povezana uz prisutnost polarnih spojeva bliskih vodi, a to ukazuje na veću topivost ulja. Krute čestice u ulju mogu biti iz različitih izvora, a njihova prisutnost uzrokuje stvaranje električnog naboja i vodljivih mostova, polarizaciju pojedinih molekula ulja i stvaranje taloga [9].

Materijali koji se nalaze u ulju imaju određena kemijska svojstva i strukturu koja je različita od ulja i na temelju toga mogu biti, ali i ne moraju biti kompatibilni s uljem. Reakcije se najčešće odvijaju na graničnim tj. dodirnim površinama, gdje je narušena homogenost materijala, a molekule izložene dodatnom djelovanju primjesa koje potiču reakcije, kao što su: kisik, voda, kiseline, lužine [9].

Produkti kemijskih reakcija između molekula mogu biti plinoviti, kruti i tekući. Fizikalno-kemijskim metodama otkrivaju se tekući produkti koji su topivi u ulju. Kruti se određuju količinski, a plinoviti se određuju kromatografskom analizom plinova iz ulja. Međutim, prema testovima kojima se ispituju uljostalnost i kompatibilnost nije predviđeno određivanje plinova. Plinovi nastali reakcijama između površine materijala i ulja mogu se otkriti kromatografskom analizom u uzorcima ulja iz transformatora u pogonu, ali njihovo porijeklo često ostaje nejasno i otežava analizu plinova [9].

2.3.1.2 MIJEŠANJE MINERALNIH ULJA

U praksi je često pitanje kompatibilnosti mineralnih ulja odnosno mogućnost miješanja novih ulja različitih proizvođača i kvalitete, starih ulja nepoznatog porijekla s novim uljima, bilo da se radi o zamjeni starih ulja novima, nadolijevanju ili miješanju novog s ostacima starog ulja.

Ulja koja su iste klase i ne sadrže aditive, mogu se dolijevati starom ulju, ali ako se dodaju u manjim iznosima, do oko 5 %. Za nova ulja različitog tipa i porijekla potrebno je ispitati kompatibilnost. Kada se veća količina novog ulja dodaje jako degradiranom ulju, dolazi do pojave izdvajanja taloga. Prije primjene svake nove vrste ulja, pored kvalifikacijskih ispitivanja, potrebno je provesti i dodatna ispitivanja kao što su ispitivanja oksidacijske stabilnosti i kompatibilnosti s uljima iz pogona. Bitno je ispitati kompatibilnost ulja koja sadrže različite aditive [9].

2.3.1.3 ISPITIVANJA MINERALNIH ULJA

Ispitivanja kompatibilnosti mineralnih ulja i sintetskog alkil-benzena provode se zbog mogućnosti zamjene mineralnih ulja sa sintetskim materijalima, koji bi bili ekološki prihvatljiviji i boljih svojstava za specifičnu primjenu kao npr. provodne izolatore i kabele. U praksi je moguće da tekući dielektrik iz provodnog izolatora dospije u transformatorsko ulje pa je zato važna kompatibilnost mineralnog ulja s alkil-benzenom. Rezultati ispitivanja su pokazali kompatibilnost alkil-benzena s mineralnim uljem u svim omjerima, kako u dostavnom stanju tako i u dugotrajnim testovima oksidacijske stabilnosti [9].

Postupci ispitivanja transformatorskog ulja provode se prema normi ASTM 3455 koja se odnosi na ispitivanje kompatibilnosti konstrukcijskih materijala s izolacijskim mineralnim uljem [9].

Ispitivanja kompatibilnosti novog mineralnog ulja s različitim izolacijskim tekućinama provedena su u volumnom omjeru 90:10, sa sljedećim tekućinama [9]:

- sintetski ester,
- silikonsko ulje,
- kerozin,
- staro mineralno ulje,
- trikloretilen.

Rezultati ispitivanja pokazuju da je kerozin kompatibilan s mineralnim uljem, dok miješanjem silikonskog ulja s mineralnim uljem, dolazi do pjenjenja. Štetno je nekontrolirano onečišćenje mineralnog izolacijskog ulja te je udio od 10 % značajan za kontaminaciju [9].

Ispitivanje kompatibilnosti mineralnog ulja i ulja za privremenu zaštitu metala od korozije. Ulje za zaštitu metala od korozije je selektivno rafinirano mineralno ulje s dodacima, kao što su inhibitori korozije, oksidacije i dodaci za istiskivanje vode. Provedeno je ispitivanje standardnog transformatorskog ulja i smjese zaštitnog ulja. Rezultati su pokazali da ulje za zaštitu metala, već u maloj količini, utječe na transformatorsko ulje [9].

2.3.1.4 PLINOVI U ULJU

Kromatografska analiza plinova iz ulja važna je dijagnostička metoda za detekciju stanja izolacijskog sustava transformatora u pogonu. U praksi, rezultati ispitivanja odstupaju od tipskih grešaka, kao npr. odstupanje pojedinačnih plinova, koji spadaju u produkte degradacije, a nalaze se kod transformatora pod naponom. Problem se javlja kod mjernih transformatora kod kojih je udio materijala u odnosu na ulje veći nego kod energetskih transformatora [9].

Ispitivanja u laboratorijskim uvjetima provode se prema normi ASTM 3455, a cilj ispitivanja je kvantifikacija utjecaja uljostalnih materijala na razvijanje plinova. Ispitivanja su provedena s uljostalnom gumenom brtvom, elektroizolacijskom navlakom i pocinčanim limom [9].

Uzorak brtve je stavljen u ulje, bez pristupa zraka, na temperaturi 100 °C u vremenu od 164 sati. Ispituje se ukupni sadržaj plina, koncentracija plinova otopljenih u ulju, sadržaj vode i granična površinska napetost (tablica 1.) [9].

Tablica 1. Rezultati ispitivanja reakcije uljostalne gumene brtve i ulja

Karakteristika	Rezultati mjerenja
Ukupno plina, $\mu\text{L} / \text{L}$	50,7
Vodik, H_2 , $\mu\text{L} / \text{L}$	1175
Metan, etan, etilen, acetilen, $\mu\text{L} / \text{L}$	< 0,1
CO, $\mu\text{L} / \text{L}$	96
CO ₂ , $\mu\text{L} / \text{L}$	2196
Sadržaj vode, mg / kg	87
Granična površinska napetost, mN / m	34

Izraženi su visoki sadržaji vodika i sadržaja vode što pokazuje da je došlo do nepoželjne reakcije [9].

Ispitivanja uljostalnih elektroizolacijskih navlaka provedena su kod viših temperatura (120 °C i 150 °C), kojima se pokušala istražiti temperatura promjene materijala, deklariranog za 155 °C. Kod 150 °C dolazi do izraženog izdvajanja CO₂, materijal potamni i postaje krt [9].

U zadnjoj grupi ispitivanja pocinčani lim bio je izložen djelovanju ulja, bez prisutnosti zraka, pri sobnoj temperaturi u razdoblju od 7 do 180 dana. U tablici je za usporedbu korišten čisti cink (tablica 2.) [9].

Tablica 2. Rezultati analize plinova nastalih reakcijom na pocinčanoj površini

VRSTA PLINA	Koncentracija plina, $\mu\text{L} / \text{L}$			
	nakon 7 dana	nakon 14 dana	nakon 28 dana	nakon 180 dana
Vodik, H_2	19	41	41	651
Ugljikovodici	< 0,1	< 0,1	< 1	< 1
CO	< 1	< 1	3	7
CO ₂	405	427	302	354

Rezultati ukazuju da se s vremenom razvijaju značajnije količine vodika, koje se mogu očekivati i u uljnim transformatorima u kojima su čelične površine pocinčane [9].

2.3.2 ESTERSKO ULJE

Prirodni esteri se proizvode iz biljnih ulja, a biljna ulja se dobivaju iz biljnih usjeva. Prednost prirodnih estera je biorazgradivost, a nedostatak je manja oksidacijska stabilnost u odnosu na druge izolacijske tekućine. Biorazgradivost ili biološka razgradnja je kemijski proces pri kojem se materijal razgradi uz pomoć bakterija ili drugih bioloških elemenata. Prirodni esteri za električne primjene, najčešće se proizvode iz soje, uljane repice i suncokretova ulja. [7]

Sintetsko estersko ulje MIDEL® 7131 je transformatorsko ulje dobiveno kemijskom sintezom. Karakteriziraju ga: manji utjecaj na okoliš (nije štetan za vodeni svijet), biorazgradivost, veća toplinska postojanost u usporedbi s mineralnim transformatorskim uljima, manji afinitet na vlagu te produljenje radnog vijeka transformatora. Osnovne karakteristike poliesterskog transformatorskog ulja su opisane u tablici (tablica 3.). [11]

Tablica 3. Osnovne karakteristike poliesterskog transformatorskog ulja MIDEL® 7131

Svojstvo	Maksimalna vrijednost	Tipična vrijednost
Kinematička viskoznost (40 °C), mm ² s ⁻¹	35	28
Kinematička viskoznost (-20 °C), mm ² s ⁻¹	3000	1400
Sadržaj vode, mg kg ⁻¹	1200	50
Gustoća (20 °C), g mL ⁻¹	1,000	0,970
DDF (90 °C)	0,030	<0,008
Točka tečenja, °C	-45	-60
	Minimalna vrijednost	
Točka paljenja, °C	250	260
BDV, kV, nakon obrade	45	>75

2.3.3 SVOJSTVA TRANSFORMATORSKOG ULJA

Transformatorsko ulje mora zadovoljavati određene standarde za fizikalna, kemijska, toplinska i električna svojstva kako bi se moglo koristiti u predviđene svrhe [11].

Važna svojstva transformatorskog ulja su [11]:

- Električna svojstva: visok probojni napon i električna otpornost, niski faktor dielektričnih gubitaka

- b) Toplinska svojstva: zadovoljavajuća toplinska vodljivost
- c) Fizikalna svojstva: visoka točka paljenja, niska točka tečenja, kinematička viskoznost
- d) Kemijska svojstva: kiselost (neutralno), ne smije biti sklono pjenjenju, veoma mala ili nikakva količina vode.

2.4 IZOLACIJSKI PAPIR

2.4.1 PAPIR I TRAJNOST

2.4.1.1 PROIZVODNJA TRANSFORMATORSKOG PAPIRA

Danas su transformatori gotovo u potpunosti napunjeni uljem, ali kod ranih transformatora, materijali koji su se koristili su azbest, pamuk i prešpan. Uvođenje izolacijskog papira od šelaka, na prijelazu stoljeća, predstavlja veliki korak unaprijed. Kasnije je ustanovljeno da papir impregniran šelakom ne odgovara toplinskom kapacitetu novorazvijenih transformatora napunjenih uljem. 1915. godine izolacijski sustavi transformatora sastoje se od izolacijskih cilindara koji su formirani od fenol-formaldehidne smole impregnirane kraft papirom. Takav izolacijski papir se često spominje pod nazivom „papir od umjetne smole“. Upotrebljavan je u većini transformatora sve do 1960. godine te se još uvijek upotrebljava, obično na mjestima s manjim električnim izbijanjima gdje je važna visoka mehanička čvrstoća [12].

Kraft papir

Kraft papir je gotovo u potpunosti načinjen od nebijeljene drvene pulpe, dobiva se sulfatnim postupkom. Upotrebljava se nebijeljena pulpa zbog toga što bi daljnji agensi za izbjeljivanje mogli uništiti njena električna svojstva [12].

Pamučna celuloza

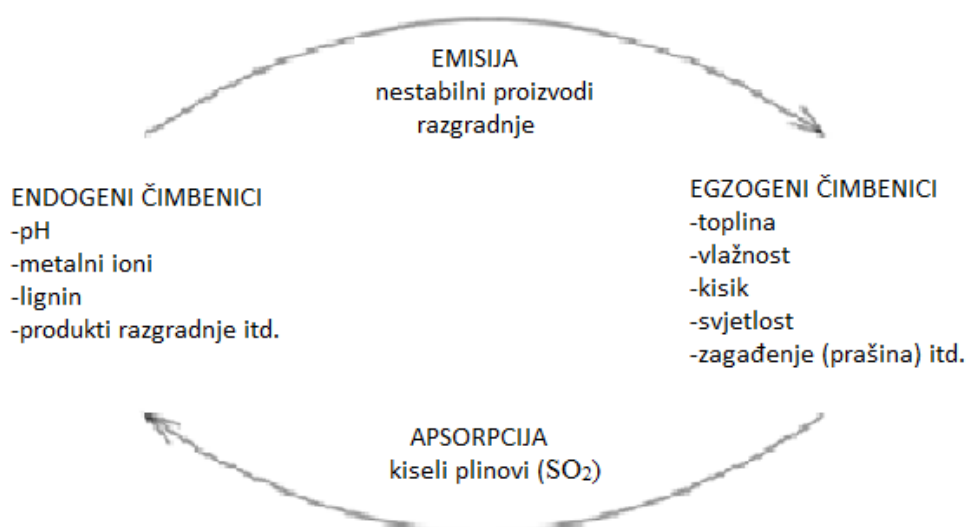
Pamučna vlakna su alternativni izvor vrlo čiste celuloze. Pamuk ima dulja vlakna od vlakana drvene pulpe te lošiju intrinzičnu čvrstoću. Pamučna vlakna su meka te je potrebno uložiti puno posla u faze drobljenja i rafiniranja kako bi se postigla željena mehanička čvrstoća.

Pamučna vlakna se mogu kombinirati sa kraft pulpom pri čemu se dobiva materijal koji ima svojstvo maksimalne apsorpcije ulja te željena električna i mehanička svojstva [12].

2.4.1.2 DEGRADACIJA PAPIRA

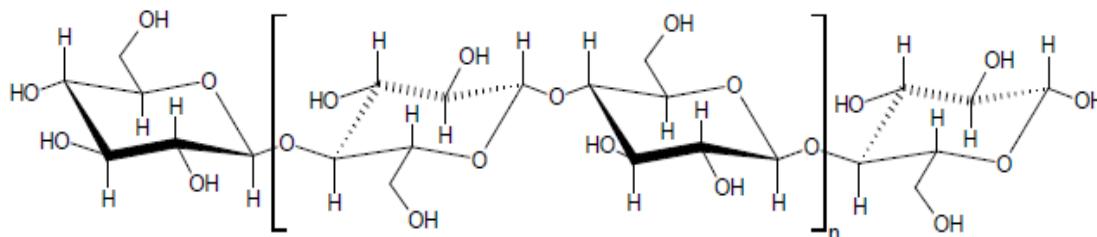
Uzroci degradacije papira mogu biti: biološki, fizički i kemijski. Vrsta i kvaliteta sirovine je ključna za dugovječnost proizvoda: već degradirana reciklirana vlakna će dovesti do manje trajnosti papira od visoko kvalitetnih pamučnih vlakana. Srednja kvaliteta drvenih vlakana

ovisi o vrsti procesa prerade pulpe (papirna masa izgrađena od vlaknatih materijala). Čak iako je načinjena od najkvalitetnijih vlakana, trajnost celuloze će ovisiti o njoj kiselosti odnosno alkalnosti. Ako je papir neutralan do umjereno alkaln, njegov životni vijek se bitno povećava. Dok je pH bez sumnje ključan, postoji niz drugih parametara koji utječu na izdržljivost papira. Možemo ih grubo podijeliti u endogene i egzogene tj. one uvedene tijekom proizvodnje ili formirane u materijalu tijekom starenja, i one koji utječu na proces ili kao parametri okoliša ili taloženjem ili apsorpcijom (slika 6.) [13].



Slika 6. Pojednostavljena shema čimbenika koji utječu na stabilnost papira

Celuloza je glavna strukturna komponenta papira. Degradacija papira uzrokuje degradaciju mehaničkih svojstava, koja su relevantna korisniku. Ostale komponente papira također utječu na njegovu stabilnost, ali najveći utjecaj ima prirodni polimer lignin. Budući da je celuloza makromolekula (slika 7.), mnogi aspekti degradacije celuloze su zajednički kao i kod degradacije ostalih polimera. Metode istraživanja su identične, a tako i neki od mehanizama razgradnje [13].



Slika 7. Makromolekula celuloze

2.4.2 MEHANIČKA SVOJSTVA PAPIRA

Uobičajena upotreba papira uključuje njegovo rukovanje, a zadržavanje mehaničkih svojstava treba biti glavni fokus studija stabilnosti. Mehanička svojstva papira regulirana su njegovom glavnom komponentom, celulozom. Makromolekule celuloze su raspoređene u elementarne fibrile, a fibrili su raspoređeni u mikro i makrofibrile. Makrofibrili tvore stanične zidove od kojih je izgrađena pulpa. Mehanička svojstva vlakana i mehanička svojstva formiranog lista ovise o: duljini lanca makromolekule celuloze te o intramolekularnim i intrafibrilnim vezama. Studija je pokazala da je uzrok gubitka čvrstoće papira pretežno gubitak čvrstoće vlakana, a ne gubitak čvrstoće veze. Za određivanje mehaničkih svojstava potrebni su veliki uzorci, a pošto mjerenja pokazuju izrazito raspršenje podataka, potrebno je mnogo ponavljanja [13].

3. PREGLEDNI DIO

3.1 ISPITIVANJE I STUPNJEVI IZOLACIJE

Ispitivanje transformatora obavlja proizvođač, pri temperaturi okoline između 10 i 40 °C. Ispitivanja se dijele na:

- a) Komadna – pojedinačno se obavljaju na svakom transformatoru, a to su: mjerenje otpora namota, omjera transformacije i grupe spoja, gubitaka i struje praznog hoda, gubitaka zbog tereta, napona i impedancije kratkog spoja, ispitivanje stranim i induciranim naponom, sklopnim udarnim naponom, punim atmosferskim udarnim naponom, mjerenje parcijalnih izbijanja.
- b) Ispitivanja tipa – rade se na jednom transformatoru kao predstavniku više jednakih ili sličnih transformatora, a to su: mjerenje zagrijanja i ispitivanje atmosferskim udarnim naponom.
- c) Specijalna – posebno se dogovaraju između kupca i proizvođača, a to su: mjerenje parcijalnih izbijanja kod suhih transformatora, ispitivanje otpornosti na kratki spoj, mjerenje nulte impedancije kod trofaznih jedinica, mjerenje razine buke, mjerenje potrošnje uljnih pumpi i ventilatora [14].

Otpori namota, napon kratkog spoja i gubitci zbog tereta preračunavaju se na referentnu temperaturu, za uljne transformatore to je 75 °C [14].

Za starenje izolacije i životnu dob transformatora mjerodavna je temperatura najtoplijeg mjesta u namotu (*hot-spot*). Kako je „*hot-spot*“ teško izmjeriti, kontrolira se srednje zagrijanje

namota, a „*hot-spot*“ se indirektno provjerava računski. Normalno starenje izolacije uljnog transformatora je pri temperaturi od 98 °C, a to odgovara zagrijanju najtoplijeg mjesta u namotu pri temperaturi okoline 20 °C. Svakim povišenjem temperature za 6 K skraćuje se vijek izolacije za polovicu [14].

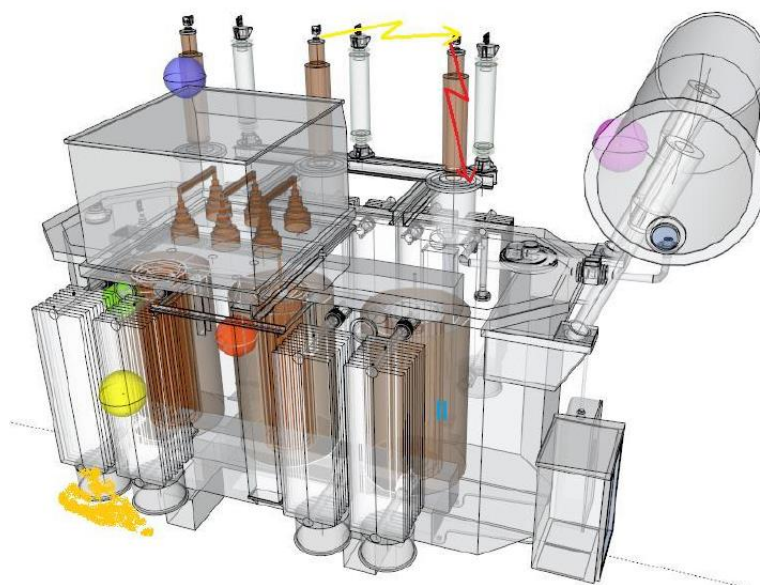
U pogonu su transformatori najčešće opterećeni manjim opterećenjem od nazivnoga, a samo ponekad su preopterećeni. Zbog toga se intenzivnije trošenje vijeka trajanja u fazama preopterećenja kompenzira manjim trošenjem u vrijeme kada je transformator manje opterećen [14].

Izolacija transformatora ima funkcije [14]:

- a) Štiti transformator od vanjskih smetnji, struja kratkog napona, preopterećenja i prenapona;
- b) Štiti mrežu od kvarova unutar transformatora;
- c) Prati rad transformatora kako bi se na vrijeme mogla signalizirati pojava kvara te spriječiti njegovo proširenje i šteta.

Kvarovi na transformatoru (slika 8.) mogu se općenito podijeliti na [15]:

- a) Kratke spojeve namotaja ili izvoda iz transformatora prema uzemljenim dijelovima - jednofazni kratki spojevi (crvena boja);
- b) Međuzavojne kratke spojeve namotaja iste faze (plava boja);
- c) Kratke spojeve između namotaja pojedinih faza u transformatoru ili na izvodima iz transformatora (žuta boja);
- a) Oštećenja jezgre i kotla transformatora (istjecanje ulja - narančasto).



Slika 8. 3D prikaz transformatora kreiran u programu *Google SketchUp*

3.2 ANALIZA PLINOVA OTOPLJENIH U ULJU I ISPITIVANJE IZOLACIJSKOG ULJA

Razgradnja izolacijskih materijala odvija se pri pogonu transformatora na dva načina [15]:

- a) postepeno – kod normalnog starenja u unaprijed predviđenim pogonskim uvjetima
- b) naglo – u slučaju nepredviđenih, povećanih toplinskih i električkih napreznja

U toku pogona u transformatoru se javljaju plinovi koji su više ili manje topljivi u ulju. Kromatografskom analizom, utvrđuje se postojanje i količina plinova otopljenih u ulju [15].

Količina plinova otopljenih u transformatorskom ulju, u sustavu nadgledanja transformatora, mjeri se korištenjem više različitih mjernih senzora od kojih svaki može mjeriti količinu određenih plinova. Mjerenje se provodi periodičkim uzimanjem uzoraka ulja iz transformatora (tipično jednom godišnje), te se u laboratorijskim uvjetima kromatografskom analizom utvrđuju koncentracije plinova otopljenih u ulju (najčešće: vodik, ugljikov monoksid, ugljikov dioksid, etilen, etan, metan, acetilen i kisik). [15]

Ulje u transformatoru je u kontaktu sa svim komponentama unutrašnjosti transformatora (namoti, jezgra, izvodi namota, steznici, jezgre itd.) pa će pri kvaru bilo koje od tih komponenata, doći do degradacije ulja i pojave plinova (tablica 4.). Analizom plinova otopljenih u ulju registrira se postojanje i trend prekomjernih električkih i/ili toplinskih napreznja u ulju [15].

Tablica 4. Vrste kvarova koji izazivaju određene plinove

Vrsta kvara	Kemijski simbol	Plin
Korona	H ₂	vodik
proboj celulozne izolacije	CO ₂	ugljikov dioksid
proboj celulozne izolacije	CO	ugljikov monoksid
proboj uljane izolacije na niskim temperaturama	CH ₄	metan
proboj uljane izolacije na niskim temperaturama	C ₂ H ₆	etan
lučno pražnjenje	C ₂ H ₂	aceten
proboj uljane izolacije na visokim temperaturama	C ₂ H ₄	etilen

Plinovi koje je moguće detektirati u izolacijskom ulju su [15]:

- a) O₂, N₂, CO₂ – posljedica su kontakta sa zrakom iz atmosfere
- b) H₂, CH₄, C₂H₄, C₂H₆, C₂H₂ - posljedica degradacije ulja
- c) CO, CO₂ – posljedica su degradacije papira

Kromatografska analiza plinova je dijagnostička metoda koja otkriva povećana električna i toplinska naprezanja u izolacijskom sustavu uljnih transformatora i najbolja je smjernica za primjenu drugih dijagnostičkih metoda kojima se mogu objasniti povećana naprezanja. Pomoću kromatografske analize plinova nije moguće otkrivanje lokacije kvara. Metoda se može primijeniti bez obzira da li je transformator u pogonu ili ne, u povremenoj primjeni (laboratorijsko ispitivanje) ili kontinuirano tijekom pogona [15].

Postupak i oprema za uzimanje uzoraka određeni su normom. Uzorak ulja (slika 9.) se najčešće uzima iz donje razine kotla. Uzimanje je moguće i tijekom pogona transformatora. Transformator može imati više uljnih sustava (ulje aktivnog dijela, teretnog dijela regulacijske preklopke i provodnih izolatora) od kojih neki mogu biti više ili manje povezani u smislu razmjene plinova i ulja [15].



Slika 9. Staro i novo transformatorsko ulje

Kromatografska analiza plinova je primarna preventivna dijagnostička metoda za sve vrste uljnih transformatora, omogućava otkrivanje različitih pojava i slučajeva grešaka transformatora pomoću analize otopljenih plinova. Učinkovitost metode, kod transformatora u pogonu, temelji se na redovitom određivanju koncentracije plinova otopljenih u ulju te praćenju promjena koncentracija s vremenom [16].

Brzina razvijanja plinova se izračunava pomoću podatka o ukupnoj količini ulja u transformatoru. Tablica 5. prikazuje normalne brzine razvijanja plinova prihvaćene u normi IEC 60599/99 [16].

Tablica 5. Normalna brzina razvijanja plinova u energetsom transformatoru

VRSTA PLINA	BRZINA RAZVIJANJA PLINA, mL/ dan
Vodik	< 5
Metan	< 2
Etan	< 2
Etilen	< 2
Acetilen	< 0,1
Ugljikov monoksid	< 50
Ugljikov dioksid	< 200

Toplinske greške koje nastaju uslijed povećanih toplinskih napreznja izolacijskog sustava ulje – papir, najčešći su tip grešaka koje se dijagnosticiraju DGA analizom. Ukoliko nema znakova razgradnje papirne izolacije te je sporo razvijanje plinova, transformator može ostati u pogonu. Dugotrajno razvijanje plinova može dovesti do pojave izbijanja velike energije, električnog luka u ulju i/ ili papiru, karbonizaciju i razaranje papira što rezultira ispadanjem takvog transformatora iz pogona [17].

Metoda interpretacije rezultata DGA analize temelji se na više različitih metoda prema normi IEC 60599:2005. Definirani su omjeri karakterističnih plinova, brzine porasta plinova te normalne vrijednosti plinova. Normalne vrijednosti plinova su orijentacijske te ih svaki proizvođač odnosno korisnik sam definira na temelju vlastite baze podataka [17].

Mineralno transformatorsko ulje sastoji se od različitih molekula ugljikovodika koji se razgrađuju prilikom povećanih toplinskih napreznja te nastaju plinovi: vodik, metan, etan, etilen, acetilen. Nastali plinovi se u većini slučajeva otope u ulju ili se izdvajaju iz ulja kao slobodni plin. U manjim količinama nastaju ugljikov monoksid i ugljikov dioksid, a mogu nastati i krute čestice ugljika. Kruta celulozna izolacija sastoji se od polimernih molekula koje su građene od glukoze. Molekulske veze u celulozi su toplinski nestabilnije u odnosu na kemijske veze ugljikovodika ulja te se razgrađuju pri nižim temperaturama. Raspadom nastaju ugljikov dioksid i ugljikov monoksid, voda, spojevi furana i neznatne količine ugljikovodika. Prema normi IEC 60599 pretpostavljeni početni kvar u transformatoru dijagnosticira se na temelju omjera plinova vodika i ugljikovodika. Plinovi CO i CO₂ su pokazatelji stanja papirne izolacije. Temeljem omjera plinova dijagnosticiraju se uzroci degradacije izolacije koji su podijeljeni na šest tipičnih grešaka: parcijalna izbijanja (PD), izbijanja male (D1) i velike energije (D2), te toplinske greške uslijed općeg ili lokalnog pregrijavanja u ulju i /ili papiru (T1, T2 i T3) [17].

Toplinske greške se dijele na[17]:

- Toplinske greške, lokalno ili opće pregrijavanje u ulju i papiru, do 300 °C (T1), kad je papir smeđkast;
- Toplinska greška, u ulju i papiru, iznad 300 °C (T2), kad je papir karboniziran;
- Toplinska greška kod temperatura iznad 700 °C (T3), kada još nije izražena karbonizacija ulja; kod promjene boje metala pri 800 °C, a taljenje metala nastaje iznad 1000 °C.

Izračunavanje omjera plinova se primjenjuje ako je koncentracija najmanje jednog plina iznad normalnih vrijednosti i iznad normalne brzine porasta koncentracija. Za interpretaciju se

koriste omjeri plinova: C_2H_2/C_2H_4 i C_2H_4/C_2H_6 , a omjer CO_2/CO služi kao pomoćni, za ocjenu degradacije celuloze. Ukoliko se tijekom praćenja promijene omjeri plinova u odnosu na prethodne analize, znači da je došlo do novog oštećenja uz postojeće ili je došlo do promjene brzine starenja [17].

Tipične vrijednosti koncentracija plinova izračunate su na razini 90 %-tne statističke vjerojatnosti te se sa 90 %-tnom sigurnosti može ocijeniti stanje kao normalno. Koriste se kada nema nikakvog drugog iskustva i prethodnih ispitivanja. Tablica 6. prikazuje tipične vrijednosti plinova prema normi IEC 60599. Prikaz su najnižih i najviših 90 %-tnih vrijednosti izračunatih od strane 25 organizacija, a statistička obrada obuhvaća 20 000 transformatora. Pod alarmnim vrijednostima plinova podrazumijevaju se vrijednosti koje su više od tipičnih vrijednosti, a niže od vrijednosti plinova kod kojih je visoka vjerojatnost kvara [17].

Tablica 6. Raspon 90 %-tnih tipičnih vrijednosti plinova u energetskim transformatorima u $\mu L/L$ (ppm), danih u normi IEC60599

	Svi transformatori	Bez utjecaja plinova iz sklopke	Utjecaj plinova iz sklopke
C_2H_2		2-20	60-280
H_2	50-150		
CH_4	30-130		
C_2H_4	60-280		
C_2H_6	20-90		
CO	400-600		
CO_2	3800-14000		

Preporuka je da svaki proizvođač transformatora izračuna svoje tipične vrijednosti. Tablica 7. prikazuje 90 %-tne tipične vrijednosti za 900 energetskih transformatora instaliranih u Hrvatskoj, a dobivene na temelju statističke obrade podataka 6256 analiza [17].

Tablica 7. Tipične vrijednosti plinova za energetske transformatore instalirane u Hrvatskoj, $\mu\text{L/L}$ (ppm)

	Svi transformatori	Bez utjecaja plinova iz sklopke	Utjecaj plinova iz sklopke
C ₂ H ₂	100	10	130
H ₂	130	100	150
CH ₄	66	70	60
C ₂ H ₄	88	80	90
C ₂ H ₆	56	60	40
CO	690	760	600
CO ₂	5800	6430	5500

Ispitivanja izolacijskog ulja

Ispitivanje izolacijskog ulja se provjerava ispitivanjem dielektrične čvrstoće uzoraka ulja iz transformatora (tablica 8.). Kod distributivnih transformatora se vrši jednom godišnje. Uzimanje uzoraka izolacijskog ulja se provodi tako da se putem posebne cijevi ili čepa za tu svrhu, prvo ispusti oko 5 litara ulja pa se nakon toga pod istim mlazom ulja ispere čista i suha boca od 1 litra. Nadalje se ta boca napuni uljem, ali bez upotrebe čepa. Napunjena boca se začepi čistim čepom i na nju se pričvrsti natpis s podacima o transformatoru i datumu vađenja. Takav uzorak ulja se upućuje na ispitivanje. Ispitivanje dielektrične čvrstoće ulja se vrši specijalnim uređajem, a rezultati ispitivanja se unose u ispitni list. Dielektrična čvrstoća izolacijskog ulja energetskih transformatora zadovoljava ako vrijednosti koje su dobivene ispitivanjem nisu manje od 200 kV/cm [18].

Tablica 8. Minimalne vrijednosti dielektrične čvrstoće ulja za distributivne transformatore

Stanje transformatora	Dielektrična čvrstoća ulja (kV/cm)
Nov, prije prvog stavljanja pod napon	220
Popravljen ili prepravljen, prije stavljanja pod napon	200
Nakon radioničkog održavanja	200
U eksploataciji	80

3.3 STARENJE TRANSFORMATORSKOG ULJA I PAPIRA, ANALIZE ULJA I PAPIRA

Gotovo polovica energetskih transformatora u hrvatskom elektroenergetskom sustavu starija je od 20 godina, te se postavlja pitanje treba li ih zamjenjivati novima ili obnavljati. Za ocjenu opravdanosti obnove transformatora, potrebno je poznavati stanje i preostali vijek trajanja izolacijskog sustava. Ocjena se donosi temeljem niza ispitivanja. Posljednjih desetak godina počele su se primjenjivati nove metode za ocjenu stanja i ostarjelosti izolacijskog sustava transformatora. Započeta su istraživanja starenja izolacijskog sustava na modelima koji obuhvaćaju primjenu svih dostupnih dijagnostičkih metoda u kontroliranim uvjetima, te se na temelju toga predlaže metodologija praćenja transformatora u pogonu. Modeli su koncipirani tako da što bolje reprezentiraju izolacijski sustav energetskih transformatora u pogledu vrste materijala (ulje i papir) i njihovih međusobnih omjera, otopljenog kisika, sadržaja vlage, itd. Tablica 9. prikazuje dijagnostičke metode provedene prema određenim normama pomoću kojih je istraživano starenje izolacijskog sustava transformatora [19].

Tablica 9. Dijagnostičke metode, pripadajuće norme, ispitne metode i broj pojedinačnih mjerenja tijekom istraživanja

Dijagnostička metoda	Norma/ Ispitna metoda	Broj mjerenja
Mjerenje prekidne čvrstoće papira	Prilagođeno uzorcima	48
Mjerenje stupnja polimerizacije papira (DP)	IEC 450	50
Fizikalno-kemijska analiza ulja	IEC, ISO	20
Infracrvena spektrofotometrija (IR)	Spektrofotometar	15
Kromatografska analiza plinova iz ulja (DGA)	IEC 567	18
Visokoučinska tekućinska kromatografija furana iz ulja (HPLC)	IEC 1198	12
Mjerenje sadržaja vlage u papiru	IEC 733	22
Mjerenje sadržaja vlage u ulju	IEC 733	16
Mjerenje otpora izolacije (Riz)	U-I metoda, RVM	347
Mjerenje faktora dielektričnih gubitaka ($\tan\delta$)	Mosna metoda	211
Mjerenje polarizacijskog spektra izolacije metodom povratnog napona (RVM)	Interne upute za RVM metodu	130

Izvedba modela omogućava primjenu svih navedenih dijagnostičkih metoda u istim uvjetima, što je temeljna razlika prema sličnim istraživanjima u svijetu u kojima se modeli prilagođavaju pojedinim dijagnostičkim metodama. Modeli su relativno složeni, to su jednofazni transformatori bez jezgre, posebno izgrađeni i prilagođeni, ukupne mase aktivnih komponenti preko 100 kg. Materijali korišteni u modelima su uobičajeni materijali koji se koriste u proizvodnji transformatora (mineralno inhibirano ulje, papir, bakar, itd.) [19].

OPIS ISTRAŽIVANJA

Istraživanje starenja provedeno je na dva modela (M1 i M2). M1 odgovara transformatoru s otvorenim sustavom disanja, dok M2 odgovara transformatoru sa zatvorenim sustavom disanja [19].

Starenje modela je provedeno u četiri ciklusa [19]:

1. Forsiranog zagrijavanja modela na temperaturu starenja 120 °C
2. Starenja modela na temperaturi 120 °C u odgovarajućem trajanju. Grijanje se obavljalo strujom kroz namote. Tijekom starenja modela M1, upuhivan je suhi zrak u količini od 2L/h. Količina zraka je procijenjena prema prosječnom disanju transformatora u pogonu zbog promjena temperature okoliša i opterećenja, a količina je također usklađena s masom modela.
3. Prisilnog hlađenja modela na temperaturu 25 °C pomoću vodenog hladnjaka.
4. Mjerenja i uzimanja uzoraka ulja i papira na temperaturi 25 °C.

Razlike srednjih temperatura između modela tijekom starenja i mjerenja nisu bile veće od 0,5 K, a regulacijski sustav temperature modela održavao je temperature modela unutar 120 ± 1 °C. Kako bi se osigurala ponovljivost i usporedivost rezultata mjerenja između dvaju modela, te između pojedinačnih mjerenja jednog modela, vodilo se računa o postupku i redosljedu mjerenja, vremenskim razmacima između mjerenja te korištenju istih instrumenata. Sva mjerenja proveli su isti ispitivači. Uzorci ulja i papira uzeti su na isti način i nakon približno istog vremena od prestanka starenja. Provedeno je 6 ciklusa starenja u ukupnom trajanju od 2274 h, na temperaturi od 120 °C (tablica 10.) [19].

Tablica 10. Pojedinačno i kumulativno trajanje pojedinih ciklusa starenja u satima

Oznaka ciklusa starenja	Pojedinačno trajanje	Kumulativno trajanje
C1	114	114
C2	115	229
C3	235	464
C4	620	1084
C5/1	499	1583
C5/2	691	2274

Ispitivanja su provedena prije početka starenja (C0) te nakon svakog ciklusa starenja (C1-C5/2). Oznake ciklusa starenja C1, C2, C3, C4, C5/1 i C5/2 označavaju starenje modela na temperaturi 120 °C u trajanju od 114 h, 115 h, 235 h, 620 h, 499 h i 691 h. Napravljena su i ispitivanja ulja i papira u dostavnom stanju (DS) [19].

ANALIZE I REZULTATI ISPITIVANJA

Istraživanje je prekinuto kada je ulje u M1 doseglo visok stupanj ostarjelosti odnosno kada se, prema kriterijima, više ne upotrebljiva u praksi [19].

Kvantifikacija sustava disanja s obzirom na brzinu starenja izolacije

Rezultati karakterističnih dijagnostičkih metoda na početku i kraju istraživanja (C5/2) za M1 (otvoreni sustav disanja) i M2 (zatvoreni sustav disanja) prikazani su u tablici 11 [19].

Tablica 11. Sažeti rezultati karakterističnih veličina mjerodavnih za ostarjelost ulja i papira

Dijagnostička metoda	Početno stanje	Model M1 nakon C5/2	Model M2 nakon C5/2
Stupanj polimerizacije papira (DP)	900-1200	258	570
Prekidna čvrstoća papira, %	100	lomljiv	~40
Boja ulja	0,5	4,5-6	0,5-1,5
Granična površinska napetost ulja, mN/m	38-39	24	37

Potrošeni dio vijeka trajanja papira na kraju istraživanja (C5/2) iznosi za M1 5/6, a za M2 2/6 vijeka trajanja. U račun se uzima da je vijek trajanja papira istekao kada njegov stupanj

polimerizacije padne na 200. Papir u modelu s otvorenim sustavom disanja (M1) stario je 2.5 puta brže nego u modelu sa zatvorenim sustavom disanja (M2). Ulje u M1 je na kraju svog vijeka trajanja, dok ulje u M2 prema svojstvima praktički odgovara stanju novog ulja [19].

Komentari rezultata mjerenja pojedinih dijagnostičkih metoda

I. Ispitivanja ulja

a) Fizikalno-kemijska ispitivanja ulja

Provedena su ispitivanja svojstava ulja koja se mijenjaju s promjenom kemijske strukture ulja te upućuju na prisutnost kiselih, polarnih produkata kemijske degradacije ulja [19].

Usporedbom rezultata ispitivanja ulja iz oba modela može se zaključiti da postoje neznatne razlike do kraja ciklusa starenja (C4), nakon kojega se kod modela M1 pojavljuju produkti degradacije ulja [19].

b) Ukupni sadržaj plinova u ulju

Mjerenje je provedeno kao dio kromatografske analize, predstavlja mjeru za ukupnu napljinjenost ulja. Početni rezultat kod modela M1 iznosi 80.4 mL/L ulja te odgovara ravnotežnom stanju ulja i atmosferskog zraka što je tipična vrijednost za transformatore s otvorenim sustavom disanja. Kod modela M2 ukupni sadržaj plinova iznosi 9.8 mL/L ulja te odgovara dobro otplinjenom sustavu ulje-papir. Tijekom eksperimenta razvijanje plinovitih produkata degradacije, dodatno prozračivanje M1 i postupak uzimanja uzoraka papira uvjetovali su porast ukupnog sadržaja plinova, kod M1 do zasićenja, a kod M2 na razinu otvorenog sustava [19].

c) Kromatografska analiza plinova (DGA)

Najizraženije promjene rezultata kromatografske analize kod oba modela su u sadržajima plinova: O₂, CO i CO₂. Od početnog stanja s normalnim odnosom kisika i dušika, kod M1 se sastav plinova mijenja uz intenzivno razvijanje plinovitih produkata degradacije celuloze. M2 pokazuje postepen porast ukupnog sadržaja plinova, nakon C5/2 koncentracija CO₂ se približno izjednačuje s M1, dok CO kontinuirano raste i doseže veću vrijednost od M1. Sadržaj ugljikovodika polagano raste u oba slučaja, ali je viših iznosa kod M2 [19].

Interpretacijom rezultata kromatografske analize prema pravilima u IEC 599, analize M1 odgovaraju srednjetermperaturnom toplinskom naprezanju sustava ulje-papir, dok kod M2

analize odgovaraju normalnom starenju do niskotemperaturnom toplinskom naprezanju. U oba modela degradacija celuloze je abnormalna u odnosu na transformatore u pogonu [19].

d) Analiza sadržaja furana (HPLC)

Prema normi IEC 1198 provedena su ispitivanja 5 spojeva furana iz ulja karakterističnih za degradaciju celuloze, a to su: 5HMF, 2FOL, 2FAL, 5ACF I 5MEF.

Kod M1 i M2 izraženo je razvijanje 2-furfurala (2FAL) koji nakon C5/2 u M1 postiže 21,5 mg/kg, a u M2 0,7 mg/kg, dok su ostali furani zanemarivo niski. Kod M1 porast 2FAL nakon C4 približno odgovara sadržaju 2FAL u M2 nakon C5/2 (tablica 12.) [19].

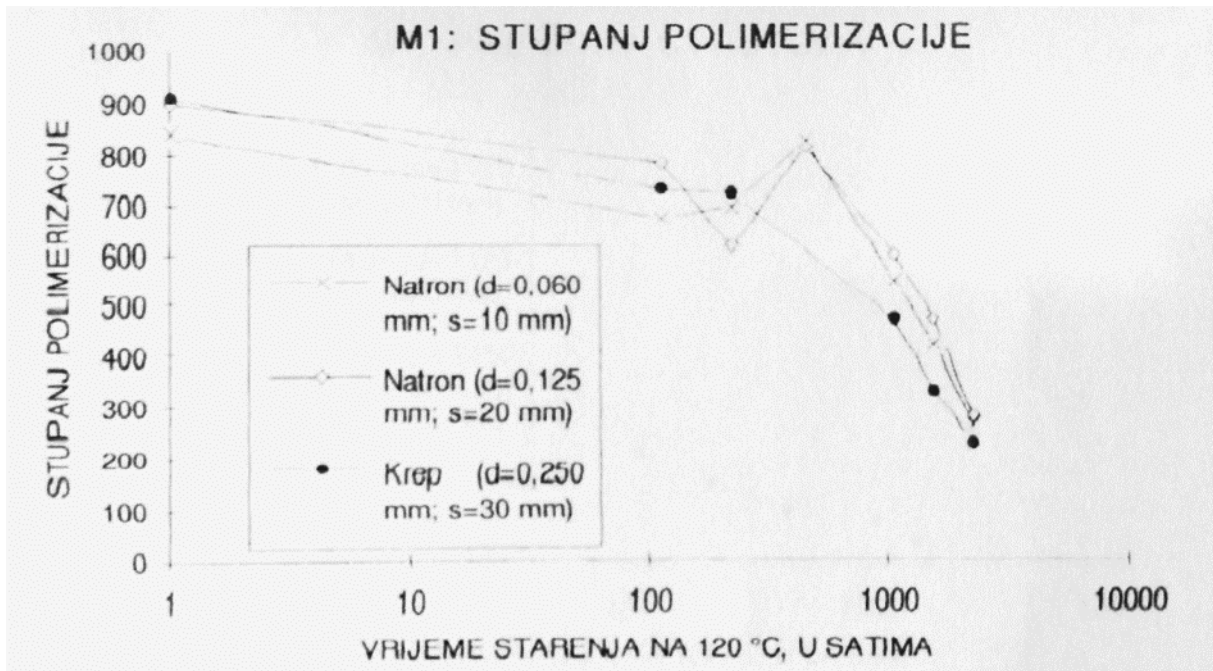
Tablica 12. Rezultati analize sadržaja furana

Ciklus	Sadržaj furana, M1/M2, mg/kg				
	5HMF	2FOL	2FAL	5ACF	5MEF
C1	0,00/0,00	0,04/0,03	0,05/0,03	0,00/0,00	0,00/0,00
C2	0,00/0,00	0,00/0,03	0,13/0,19	0,00/0,00	0,00/0,01
C3	0,00/0,00	0,00/0,05	0,20/0,12	0,00/0,00	0,01/0,01
C4	0,00/0,00	0,00/0,06	0,74/0,40	0,00/0,00	0,02/0,01
C5/1	0,01/0,01	0,00/0,00	3,96/0,02	0,02/0,00	0,00/0,00
C5/2	1,01/0,04	0,00/0,00	21,5/0,70	0,18/0,00	0,00/0,00

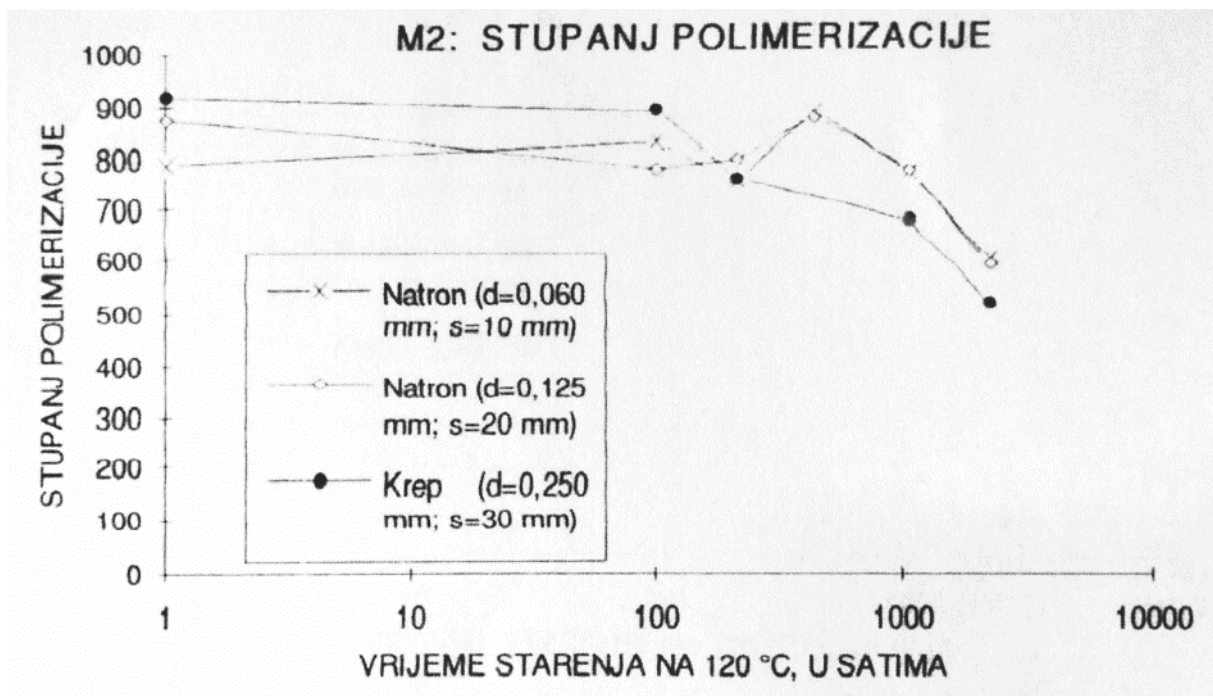
II. Ispitivanja stupnja polimerizacije papira i prekidne čvrstoće papira

Izražena promjena stupnja polimerizacije papira (DP) kod M1 nastaje nakon C4 kada se primjećuje pad prekidne čvrstoće papira na približno 50 % početne vrijednosti. Nakon C5/2, stupanj polimerizacije iznosi 258 dok se prekidna čvrstoća nije mogla mjeriti. Papir je postao krt i lako lomljiv, te je pucao na mjestima pregiba. Za M2 rezultati ispitivanja stupnja polimerizacije i prekidne čvrstoće nakon C5/2 približno odgovaraju rezultatima kod M1 nakon C4 [19].

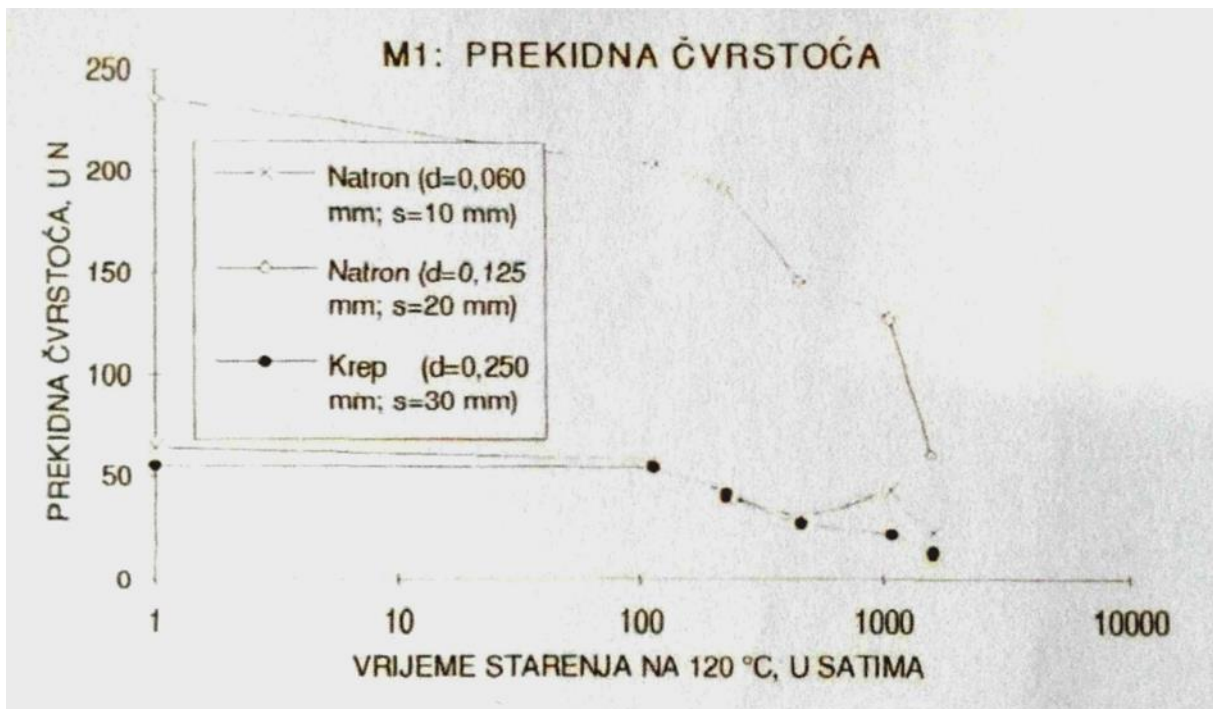
Rezultati ispitivanja stupnja polimerizacije i prekidne čvrstoće papira za M1 i M2 su prikazani na slikama 9 do 11 [19].



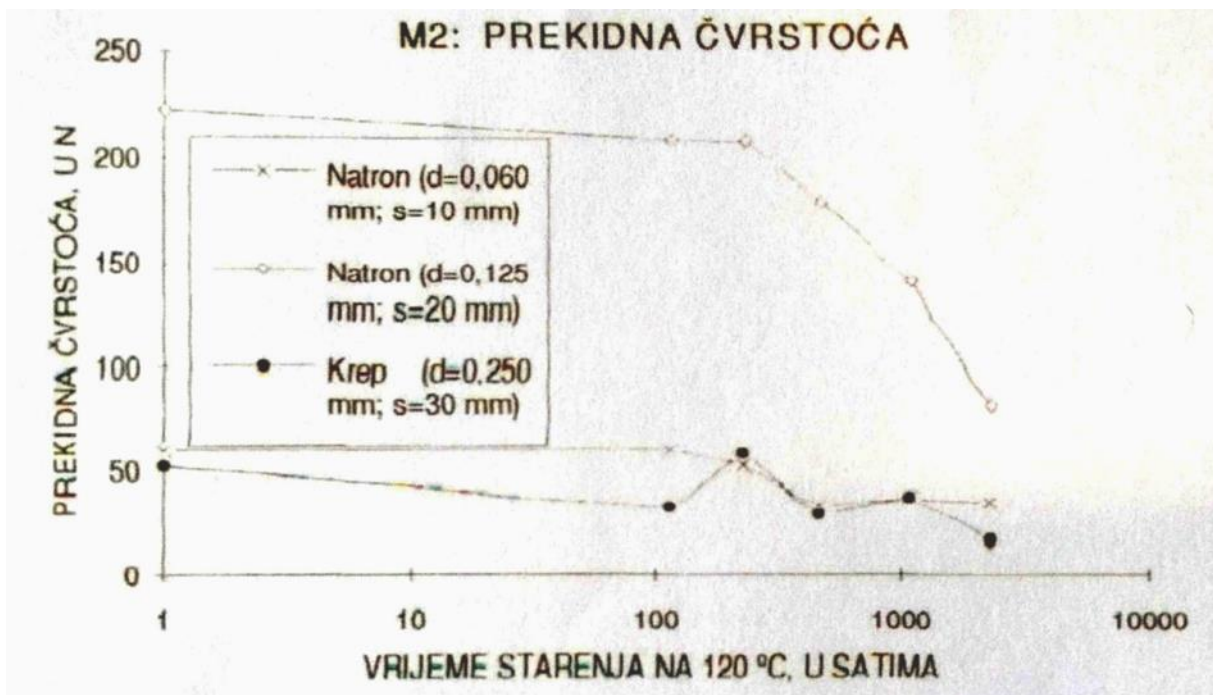
Slika 9. Rezultati ispitivanja stupnja polimerizacije papira (DP) tijekom starenja modela s otvorenim sustavom disanja (M1) [19]



Slika 10. Rezultati ispitivanja stupnja polimerizacije papira (DP) tijekom starenja modela sa zatvorenim sustavom disanja (M2) [19]



Slika 11. Rezultati ispitivanja prekidne čvrstoće papira tijekom starenja modela s otvorenim sustavom disanja (M1) [19]



Slika 12. Rezultati ispitivanja prekidne čvrstoće papira tijekom starenja modela sa zatvorenim sustavom disanja (M2) [19]

III. Mjerenje sadržaja vlage u ulju i papiru

Tablica 13. prikazuje rezultate mjerenja sadržaja vlage u papiru RVM i Karl-Fischer metodom (KF, P) te sadržaja vlage u ulju Karl-Fischer metodom (KF, U) [19].

Tablica 13. Rezultati mjerenja sadržaja vlage u papiru i ulju

Ciklus	M1			M2		
	KF, P	RVM	KF, U	KF, P	RVM	KF, U
	% mase	% mase	mg/kg	% mase	% mase	mg/kg
C0	0,66	<0,5	4,1	1,2	<0,5	3,8
C1	-	1,4	5,3	-	0,8	4,2
C2	0,75	1,4	5	0,51	0,8	7,5
C3	0,94	1,2	2,5	0,14	0,8	5,5
C4	0,45	1,6	4,5	0,13	1,2	3,6
C5/1	0,49	1,2	3,9	0,95	1,2	4,2
C5/2	1,12	1,8	11	-	1,2	5,8

Sadržaj vlage u papiru mjeren Karl-Fischer metodom predstavlja srednju vrijednost 2 mjerenja, a sadržaj vlage RVM metodom je dobiven pomoću baždarnih krivulja i srednje vrijednosti polarizacijskih karakteristika barem 3 mjerenja [19].

Sadržaj vlage u ulju podjednak je u oba modela kroz cijeli tijek starenja i iznosi oko 5 mg/kg, osim kod M1 nakon C5/2 kada iznosi 11 mg/kg. Vrijednosti se mogu ocijeniti kao niske [19].

Rezultati mjerenja ovlaženosti papira se razlikuju kod obje metode, te su prisutna variranja rezultata [19].

3.4 STARENJE OSTALIH IZOLACIJSKIH MATERIJALA, ANALIZE OSTALIH IZOLACIJSKIH MATERIJALA

Različiti materijali se koriste za izolaciju i izgradnju u proizvodnji transformatora punjenih uljem. Najčešće se kao čvrsta izolacija upotrebljava celulozni papir, te kao tekući izolacijski materijal mineralno ulje. Dokazano je da su ovi izolacijski materijali dobri električni izolatori jer imaju poželjna fizička i kemijska svojstva. Celulozni papir i mineralno ulje su međusobno kompatibilni materijali, a to je potvrđeno činjenicom da ne mijenjaju kemijska i fizička svojstva kada su u kontaktu [20].

Unatoč ovih glavnih izolacijskih materijala u transformatoru, postoje i različiti organski i anorganski materijali (gume, smole, adhezivi, boje, silikonski materijali, itd.) koji se koriste za izolaciju ili druge namjene. Takvi materijali su u dodiru sa transformatorskim uljem i njihova svojstva moraju zadovoljiti dodatne tehničke uvjete kao što je dobra otpornost materijala na transformatorsko ulje bez utjecaja materijala na svojstva ulja. Ne postoji metoda ispitivanja kompatibilnosti za sustav kruti materijal-mineralno transformatorsko ulje standardizirana prema međunarodnim standardima. Postoje neke nacionalne norme (ASTM D 3455) ili lokalni tehnički zahtjevi i unutarnje laboratorijske metode [20].

Kompatibilnost materijala može se definirati kao maksimalna tolerantna interakcija između materijala i ulja u pažljivo odabranim ispitnim uvjetima. Ispitni uvjeti se moraju odabrati na temelju stvarnih uvjeta rada transformatora, ali također biti ubrzani dovoljno da se smanji trajanje transformatora do razumnog razdoblja laboratorijskog ispitivanja [20].

Interakcija između transformatorskog ulja i krutog materijala općenito rezultira [20]:

- apsorpcijom ulja u materijal
- ekstrakcijom topljivih sastojaka materijala u ulje (u nekim slučajevima)
- kemijskom reakcijom između ulja i materijala

Ekstrakcija topljivih sastojaka krutog materijala uzrokuje [20]:

- fizičke i kemijske promjene svojstava ulja (boja, međupovršinska napetost i kiselost)
- promjene u dielektričnim svojstvima ulja ako je topljivi sastojak polaran ($\tan \delta$, otpor)

Veličina promjena u električnim svojstvima izolacijskog ulja važna je pri određivanju kontaminacije ulja testnim materijalom [20].

Promjene fizičkih svojstava testnog materijala, kao što su promjena tvrdoće, bubrenje i obezbojenje, dokazuju da je ulje utjecalo na testni materijal [20].

Mineralna izolacijska ulja moraju imati sljedeća svojstva: dobra dielektrična svojstva, dobra kemijska svojstva, kemijska i toplinska stabilnost, visoka brzina prijenosa topline, inertnost, kompatibilnost s drugim materijalima u električnoj opremi [20].

Kako bi se poboljšala svojstva ulja, dodaju se različiti aditivi kao inhibitori oksidacije, metalni pasivatori i depresanti. Fizička i kemijska svojstva transformatorskog ulja kao što su boja i izgled, kiselost, faktor dielektričkih gubitaka, otpornost i međupovršinska napetost određeni su međunarodnim i nacionalnim normama (IEC 60296:2003, IEC 60422) [20].

Nakon definiranja vrste ulja (izolacijske tekućine) moraju se odabrati kompatibilni kruti materijali. Ako postoje sumnje, potrebno je izvršiti ispitivanje kompatibilnosti materijala s uljem. Općenito, pri odabiru materijala za određene primjene, važni su sljedeći koraci [20]:

- Treba odrediti sve moguće uvjete okoline kojima bi se mogao izložiti materijal (temperatura, vlaga, kemikalije).
- Sve materijale koji nisu dovoljno otporni na ove uvjete treba ukloniti. Primjerice, za primjenu koja zahtijeva kontinuirani rad na 155 °C, svi materijali niže toplinske klase trebaju biti eliminirani.
- Treba odabrati samo materijale koji posjeduju potrebna dielektrična i mehanička svojstva s obzirom na opremu, dizajn i radne uvjete.
- Kompatibilnost s drugim spojevima u izolacijskim sustavima je kritični čimbenik i potrebno ga je provesti na materijalima. Izolacijske tekućine ne smiju utjecati na ostala svojstva materijala, ali isto tako materijal ne smije utjecati na fizikalna i kemijska svojstva izolacijske tekućine.

METODE ISPITIVANJA

I. Ispitivanje kompatibilnosti između ulja i krutog materijala

Za ispitivanje kompatibilnosti korišteno je neinhibirano transformatorsko ulje. Ispitivana je kompatibilnost Ramie vlakana, nitrilne butadienske gume (NBR) tri različita proizvođača i laminirana pločica s uljem. Omjer materijal u ulju iznosio je 5 g u 100 mL ulja. Ispitivanja su provedena u pokrivenim staklenim čašama u peći na 100 °C tijekom 72 sata [20].

II. Analiza otopljenih plinova (DGA)

DGA ili *Dissolved gas analysis* je širom svijeta prihvaćena kao dijagnostička metoda za otkrivanje početnih grešaka u transformatorima. Razvijena je tumačenjem rezultata plinske kromatografije (GC) i standardizirana metodom IEC 60599. Međutim, analiza se u praksi često suočava s poteškoćama, posebice kada GC rezultati odstupaju od tipičnog opisa kvara. Na primjer, odstupanje jednog plina u transformatoru s niskim naponom ili transformatoru izvan službe. Problemi se mogu pojaviti i u instrumentalnim transformatorima u kojima je omjer materijala i ulja mnogo veći nego kod energetske transformatora [20].

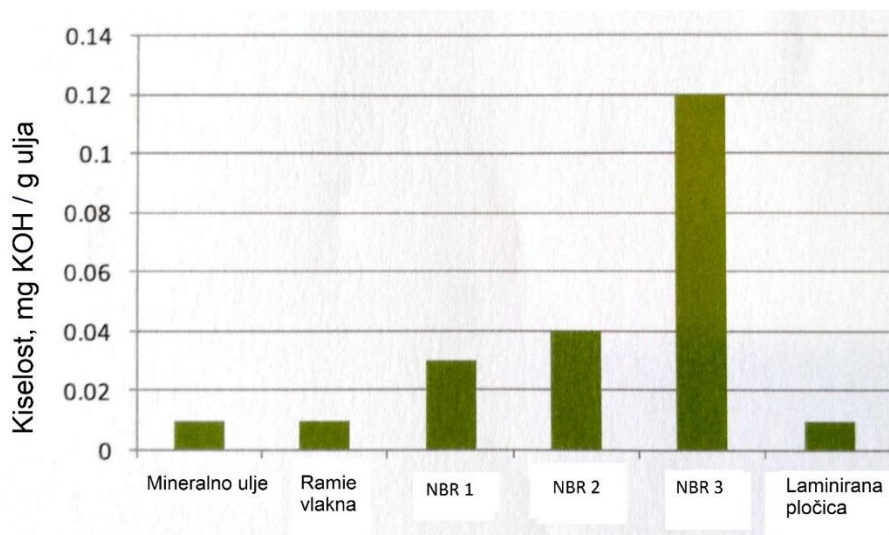
Materijali s najvećim utjecajem na svojstva ulja podvrgnuti su daljnjim ispitivanjima kako bi se utvrdilo imaju li utjecaja na stvaranje plina u transformatorskom ulju. Upotrijebljeno je otplinjeno inhibirano mineralno transformatorsko ulje s ukupnim sadržajem plina < 2 %, a omjer materijala u ulju iznosio je 5 g u 100 mL ulja. Ispitivanja su provedena u plinskim štrcaljkama u pećnici na 100 °C [20].

REZULTATI ISPITIVANJA

Nakon izlaganja povišenoj temperaturi, ispitivana su svojstva ulja kao kiselost, međupovršinska napetost, faktor dielektričkih gubitaka, otpornost i plinovi otopljeni u ulju [20].

Kiselost

Kiselost ulja je mjera kiselih komponenti koje nastaju tijekom oksidacije ulja ili degradacije krutih materijala. Kiselina utječe na dielektrična i druga svojstva ulja i utječe na degradaciju celuloznih materijala. Oni također mogu biti odgovorni za koroziju metalnih dijelova u transformatoru. Mjerenja su provedena prema normi IEC 62021-1, a rezultati su prikazani na slici 13 [20].

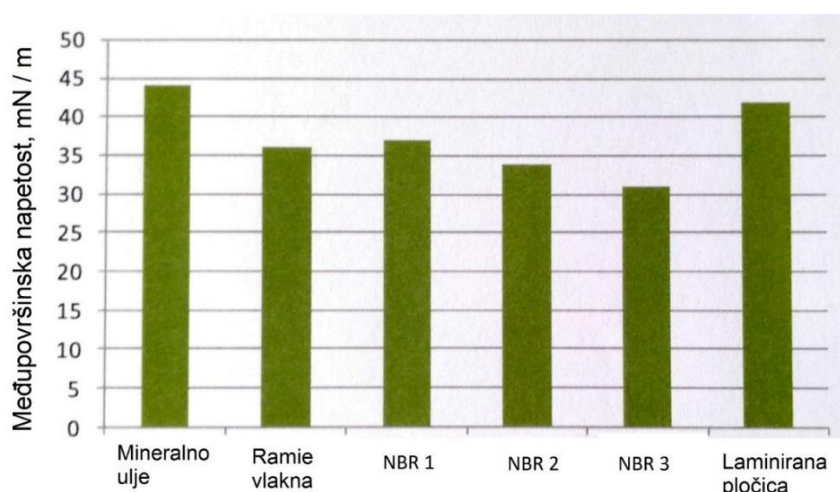


Slika 13. Kiselost ulja nakon ispitivanja kompatibilnosti s različitim čvrstim materijalima [20]

Može se primijetiti da guma (NBR 3) ima najveći utjecaj na kiselinu ulja s neutralizacijskom vrijednošću 0,12 mg KOH / g ulja. Ovo je vrlo visoka količina kiselina proizvedenih u kratkom vremenskom razdoblju (72 sata) pri izlaganju na 100 °C [20].

Međupovršinska napetost

Međupovršinska napetost između ulja i vode omogućuje otkrivanje topljivih polarnih razgradnih produkata. Brzo smanjenje ovog svojstva može ukazivati na probleme kompatibilnosti između ulja i materijala. Mjerenja su provedena prema normi ASTM D971-99a, a rezultati su prikazani na slici 14 [20].

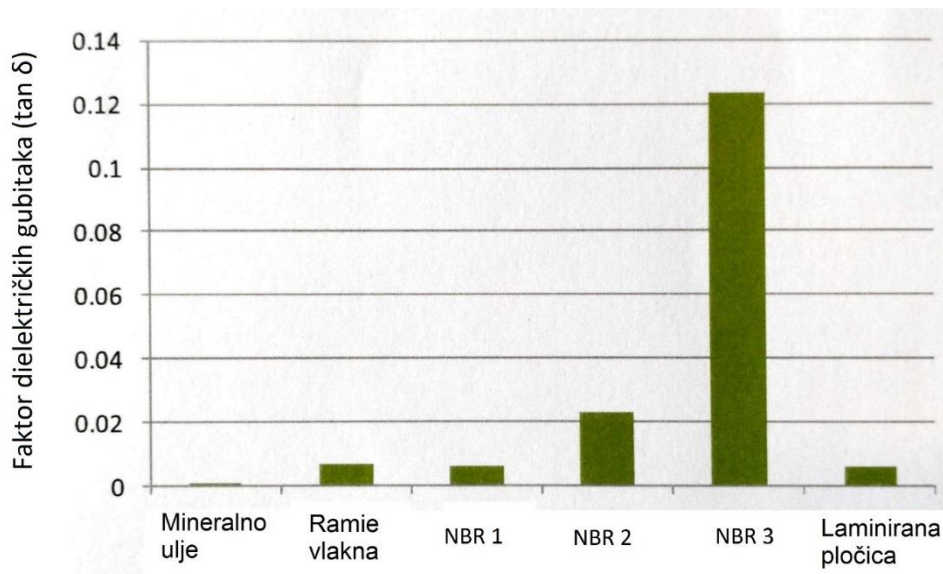


Slika 14. Međupovršinska napetost nakon ispitivanja kompatibilnosti s različitim čvrstim materijalima [20]

Može se primijetiti da se međupovršinska napetost najviše smanjuje za gumu NBR 3, a za laminiranu pločicu manje je smanjena. To znači da guma NBR 3 proizvodi topljive hidrofilne vrste tijekom izlaganja povišenoj temperaturi [20].

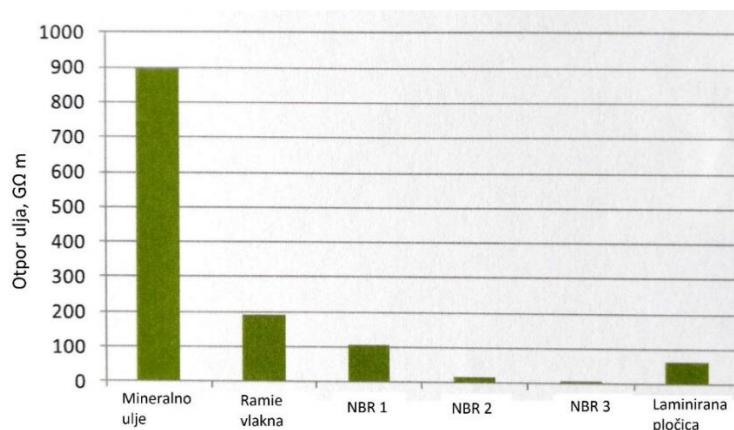
Faktor dielektričkih gubitaka i otpor ulja

Faktor dielektričkih gubitaka ($\tan \delta$) i otpor ulja dva su parametra koja su vrlo osjetljiva na topljive polarne produkte razgradnje ili onečišćenja. Visoke vrijednosti $\tan \delta$ i male vrijednosti otpora utječu na izolacijsku otpornost transformatora. Mjerenja su provedena prema normi IEC 60247, a rezultati su prikazani na slici 15 [20].



Slika 15. Faktor dielektričkih gubitaka ulja nakon ispitivanja kompatibilnosti s različitim čvrstim materijalima [20]

Faktor dielektričkih gubitaka ulja povećava se za gumu NBR 3. Vrijednost je vrlo visoka ($\tan \delta = 0,124$) što znači da testirana guma NBR 3 proizvodi vrlo visoku količinu polarnih kontaminanata u kratkom vremenu. Rezistencija ulja se vrlo brzo smanjuje, posebno kod uzoraka gume (slika 16.). Guma NBR 3 najviše smanjuje otpornost. Ispitivano ulje na početku ispitivanja kompatibilnosti bilo je $> 1000 \text{ G}\Omega \text{ m}$ u 72 sata na $100 \text{ }^\circ\text{C}$ [20].

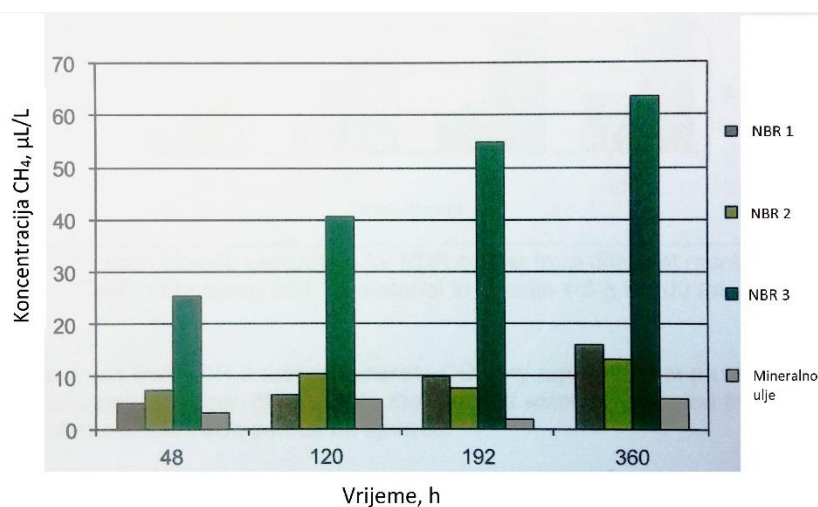


Slika 16. Otpornost ulja nakon ispitivanja kompatibilnosti s različitim čvrstim materijalima [20]

Na slikama 13, 14, 15 i 16 se može vidjeti da gumeni materijali koji se koriste u eksperimentima imaju najveći utjecaj na svojstva ulja, osobito gumeni uzorak broj 3. Nakon ispitivanja kompatibilnosti na gumi broj 3 promatrane su i fizičke promjene gume. Značajne promjene u tvrdoći, volumenu i masi uzorka gume ukazuju na utjecaj ulja na uzorak [20].

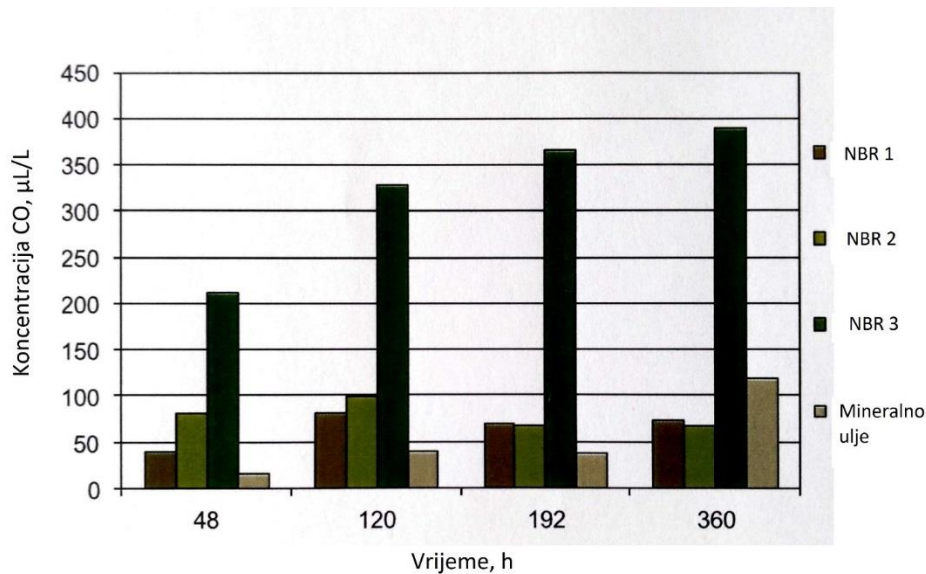
Nastajanje plina iz gumenih materijala

Na slici 17 su prikazani stupnjevi stvaranja metana iz gume. Može se primijetiti da se metan formira iz svih gumenih uzoraka u različitim koncentracijama. Guma broj 3 generira metan u najvećoj mjeri i koncentracija ovog plina u ulju povećala se na 63,8 $\mu\text{L/L}$ (ppm) u kratkom vremenu [20].

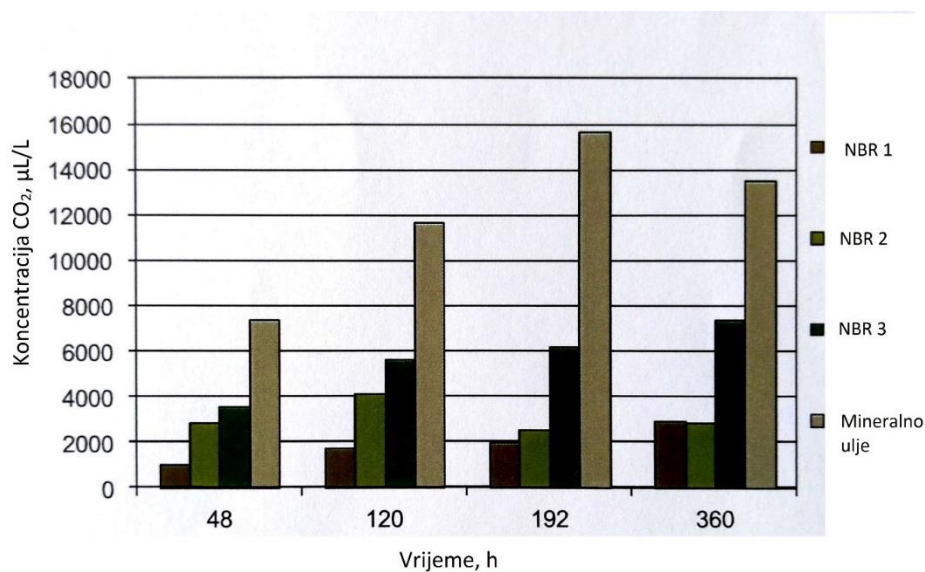


Slika 17. Formiranje metana za NBR gumu različitih proizvođača [20]

Ugljikov monoksid i ugljikov dioksid također nastaju tijekom izlaganja temperaturi. Slike 18 i 19 prikazuju njihove koncentracije [20].



Slika 18. Formiranje ugljikovog monoksida za NBR gumu različitih proizvođača [20]

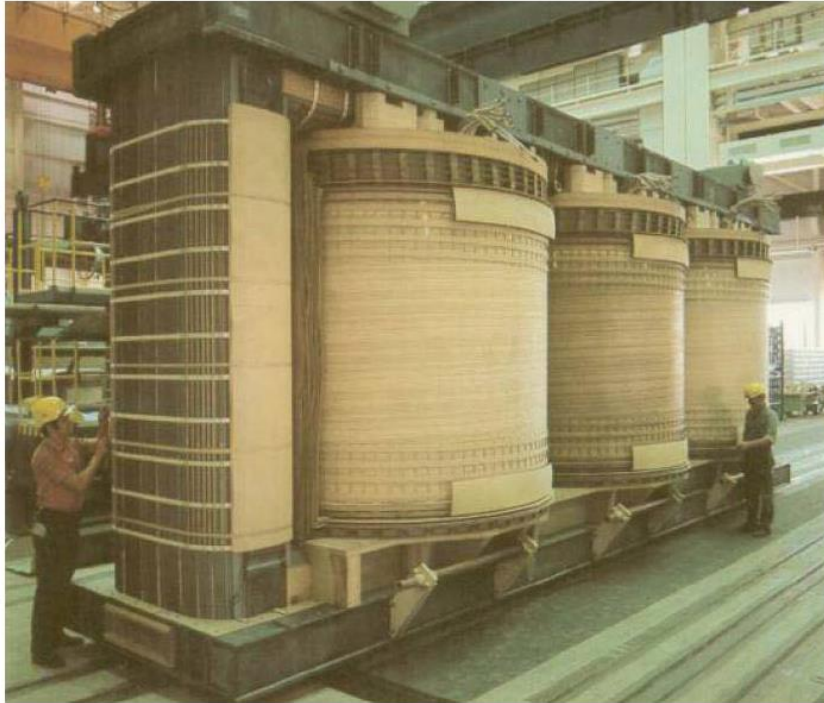


Slika 19. Formiranje ugljikovog dioksida za NBR gumu različitih proizvođača [20]

Može se zamijetiti da NBR 3 guma vrlo brzo stvara CO i puno veću koncentraciju od drugih gumenih uzoraka. CO₂ je najvećim dijelom proizveden od mineralnog ulja, ali doprinos uzoraka gume također se ne može zanemariti [20].

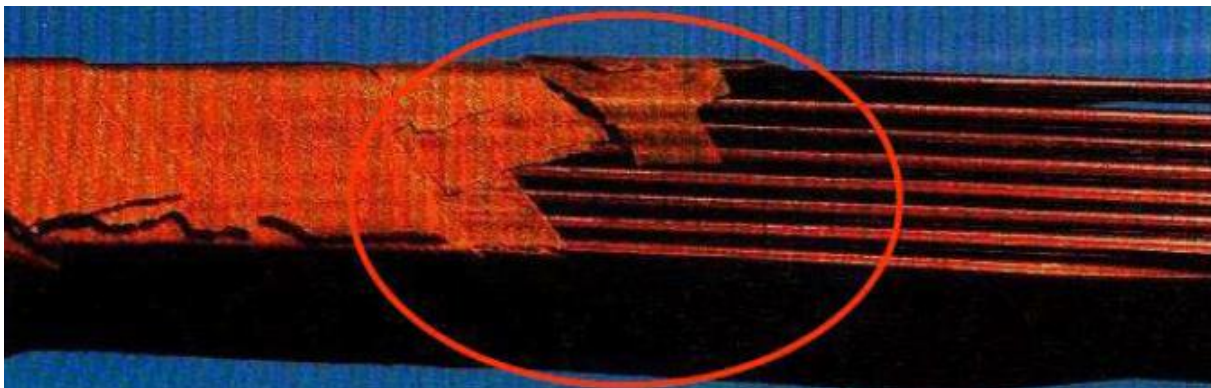
3.5 ISPITIVANJE IZOLACIJSKOG SUSTAVA TRANSFORMATORA ISTOSMJERNIM NAPONOM

Izolacija transformatora sastoji se od izolacijskog ulja i izolacijskog papira (slika 20.) [21].



Slika 20. Papirna izolacija transformatora

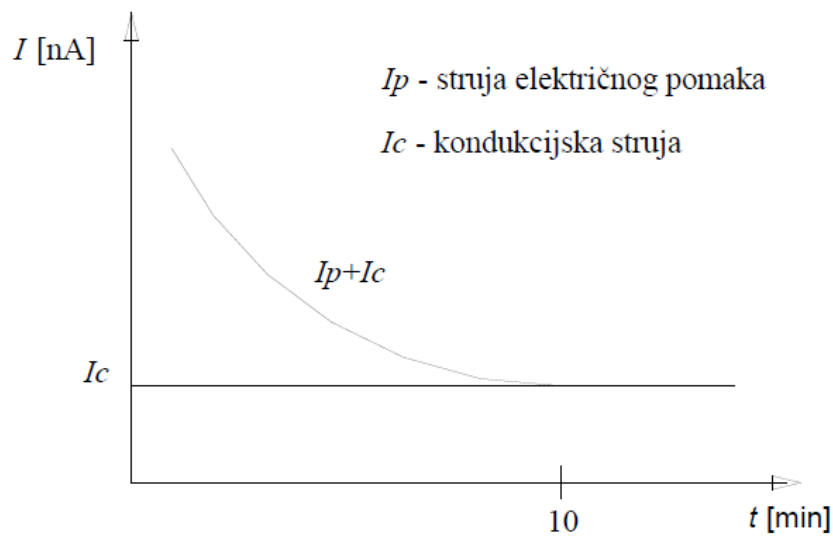
Ulje se može zamijeniti, a papir ostaje dok traje i transformator pa je vijek trajanja transformatora određen vijekom trajanja papira u izolaciji (slika 21.) [21].



Slika 21. Oštećenje papirne izolacije uzrokovano starenjem papira

Molekule koje onečišćuju izolaciju (molekule vode i ostali produkti starenja) pod utjecajem električnog polja se polariziraju te pritom u njima dolazi do akumulacije energije. Ovisno o količini onečišćenja, za odvijanje procesa polarizacije je potrebno određeno vrijeme (vremenska konstanta polarizacije) koje je kraće što je onečišćenje izolacije veće. Vrijednost

otpora izolacije dobije se mjerenjem ukupne struje pri narinutom istosmjernom naponu, koji je poznate vrijednosti, nakon 10 minuta. Rezultati se očitavaju nakon 15 i 60 sekundi ($R_{15''}$, $R_{60''}$). Otpor izolacije koji se očitava u desetoj minuti ($R_{10'}$) ovisi samo o količini vodljivih tvari u izolaciji transformatora i najbolji je pokazatelj stanja izolacije, jer je proces polarizacije skoro završen. Prilikom mjerenja otpora izolacije, u obzir se uzimaju dva važna faktora. Prvi se odnosi na struju koja protječe kroz izolaciju, a drugi ovisi o vremenskom trajanju narinutog ispitnog napona. Ukupna struja jest zbroj dviju različitih struja (slika 22.) [21].



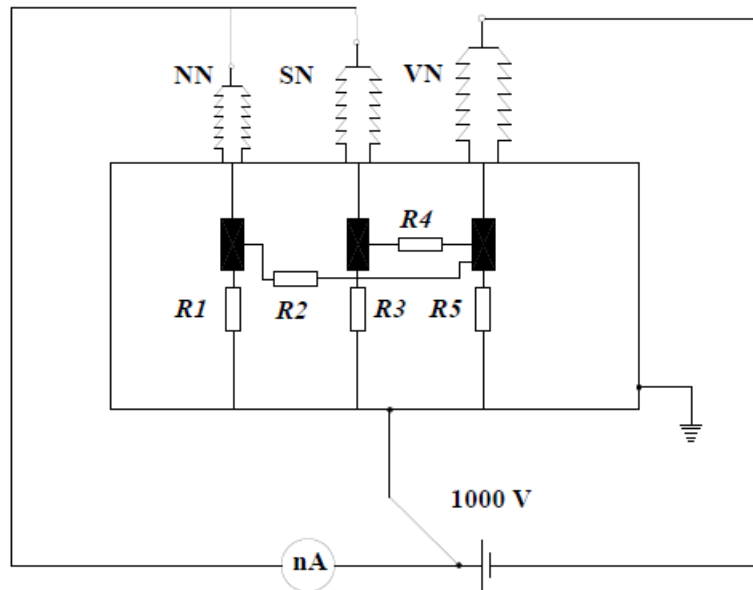
Slika 22. Dijagram tijeka struja

Otpor izolacije određuje se pomoću Ohmovog zakona [21]:

$$R = \frac{U_i}{I} \quad (1)$$

gdje je R otpor izolacije, U_i narinuti napon i I struja kroz mjerni krug [21].

Ispitivanja otpora izolacije transformatora izvode se između pojedinih namota te mase i namota transformatora. Mjerenje otpora izolacije izvodi se U - I metodom upotrebom stabiliziranog izvora, najčešće 1000 V i mjerne opreme (slika 23.) [21].



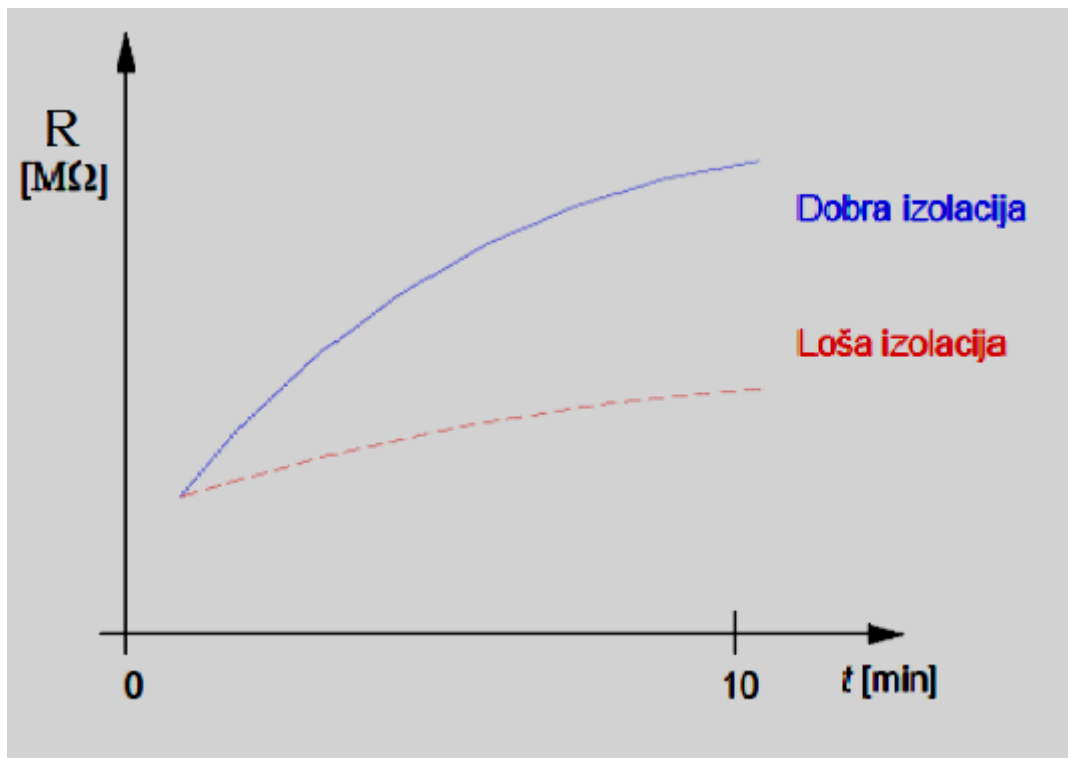
Slika 23. Shema mjerenja otpora izolacije tronamotnog transformatora

Granične vrijednosti otpora izolacije su iskustvene (tablica 14.). Ukoliko vrijednost otpora izolacije padne na dvostruku minimalnu vrijednost potrebno je poduzeti mjere za poboljšanje stanja izolacije (sušenje izolacije). Otpor transformatora ovisi i o temperaturi transformatora [21].

Tablica 14. Granične vrijednosti otpora izolacije

Un [kV]	R _{10'} [MΩ] pri 20 °C	
	VN : SN + NN	VN : M
110	< 1200	<1100
	NN : (SN+ VN)	NN – M
	< 800	< 500

Izolacijski sustav u dobrom stanju ima povećanje otpora izolacije u ovisnosti o vremenu trajanja narinutog napona. Slika 24. prikazuje krivulju otpora dobre i ovlažene izolacije, pri čemu je porast vrijednosti otpora izolacije važniji od apsolutnih iznosa otpora izolacije [21].



Slika 24. Krivulja porasta otpora izolacije

3.6 ISPITIVANJE IZOLACIJSKOG SUSTAVA TRANSFORMATORA IZMJENIČNIM NAPONOM MJERENJEM KAPACITETA I FAKTORA DIELEKTRIČNIH GUBITAKA

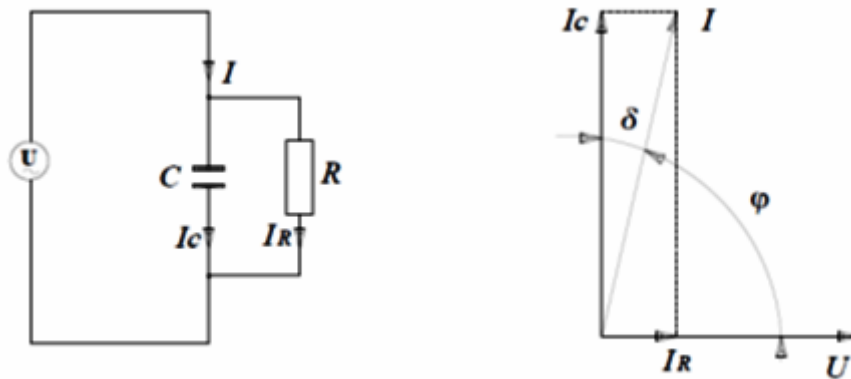
Oprema transformatora je tijekom vremena izložena toplinskom i mehaničkom naprezanju, utjecaju vlage i topline što povećava radnu temperaturu. Povećanje radne temperature ubrzava kemijske reakcije u električnoj izolaciji, a to rezultira pogoršanjem dielektričnih karakteristika. Taj proces dovodi do promjena značajki izolacije, povećava faktor gubitaka i uzrokuje zagrijavanje što ponovno dovodi do povećanja dielektričnih gubitaka [21].

Stanje izolacije s obzirom na vlažnost određuje se pomoću dijagrama koji je dobiven na temelju statističkih podataka. Granični pravac određuje područje suhe od područja vlažne izolacije [21].

Faktor dielektričnih gubitaka namota je pokazatelj stanja izolacije sa stanovišta njene ovlaženosti i nečistoće. Izuzetno bitna informacija prilikom interpretacije rezultata mjerenja je promjena vrijednosti faktora dielektričnih gubitaka s vremenom [21].

Transformatori, provodni izolatori, generatori i motori su izrađeni od metala i izolacije te posjeduju kapacitivne odlike. Ukoliko dođe do promjene kapaciteta namota s vremenom, to

može ukazivati na promjenu geometrije namota i izolacijskog sustava. Pri izmjeničnom naponu stalne frekvencije, dielektrik s gubitcima se u smislu kapacitivnosti i gubitaka snage može predstaviti shemom koja se sastoji od idealnog dielektrika bez gubitaka i omskog otpora, a koji je spojen u seriju ili paralelu (slika 25.) [21].



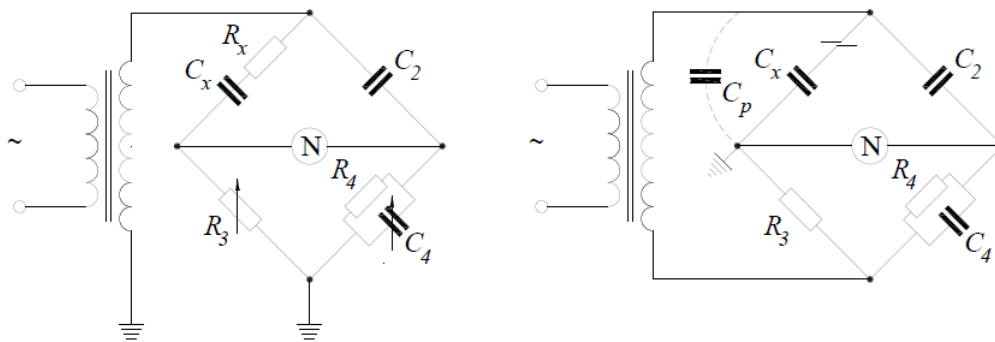
Slika 25. Nadomjesna shema izolacijskog sustava transformatora i fazorski dijagram

Iz fazorskog dijagrama slijedi [21]:

$$\tan \sigma = \frac{I_R}{I_C} = \frac{P}{\omega CR} \quad (2)$$

Gdje je: $\tan \delta$ faktor dielektričnih gubitaka, I_C jalova komponenta struje, I_R djelatna komponenta struje, C idealan kapacitet, R idealan otpornik i ω kružna frekvencija; $\omega=2 \cdot \pi \cdot f$.

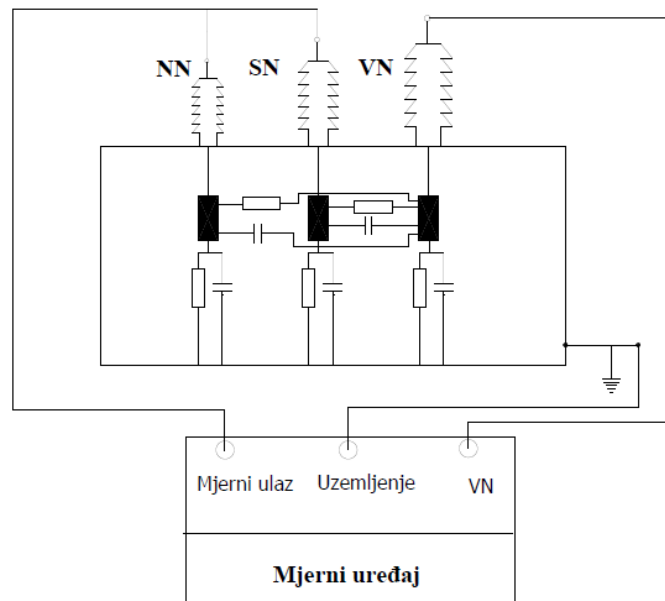
Faktor dielektričnih gubitaka namota $\tan \delta$ ovisan je o otporu, kapacitetu i frekvenciji. Izmjerene vrijednosti daju informacije o općem stanju ispitivanog transformatora. Mjerenja faktora dielektričnih gubitaka izolacijskog sustava i kapaciteta transformatora izvode se mjernim uređajem na principu Scheringovog mosta (slika 26.) [21].



Slika 26. Shema Scheringovog mosta s uzemljenom jednom stezaljkom izvora te neuzemljenim stezaljkama

Sheringonov most se sastoji od zavoja N , otpornika R_3 i R_x , kondenzatora C_2 , C_4 i C_x . C_p označava paraziti kapacitet. C_x označava kapacitet kondenzatora nepoznate vrijednosti.

Mjerni uređaj automatski ugađa kapacitete kondenzatora poznate vrijednosti prema kapacitetu nepoznate vrijednosti C_x . Vrijednosti nepoznatog kapaciteta odnosno faktora dielektričkih gubitaka računaju se prema formulama ovisno radi li se o uzemljenim ili neuzemljenim stezaljkama. Mjerni spojevi koji se koriste prilikom ispitivanja faktora dielektričkih gubitaka isti su kao i u slučaju ispitivanja otpora izolacije (slika 27.) [21].



Slika 27. Shema spajanja uređaja za mjerenje $\tan \delta$ tronamotnog transformatora

Faktor dielektričkih gubitaka je ovisan o temperaturi i zbog toga se preračunava na referentnu temperaturu od $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ [21].

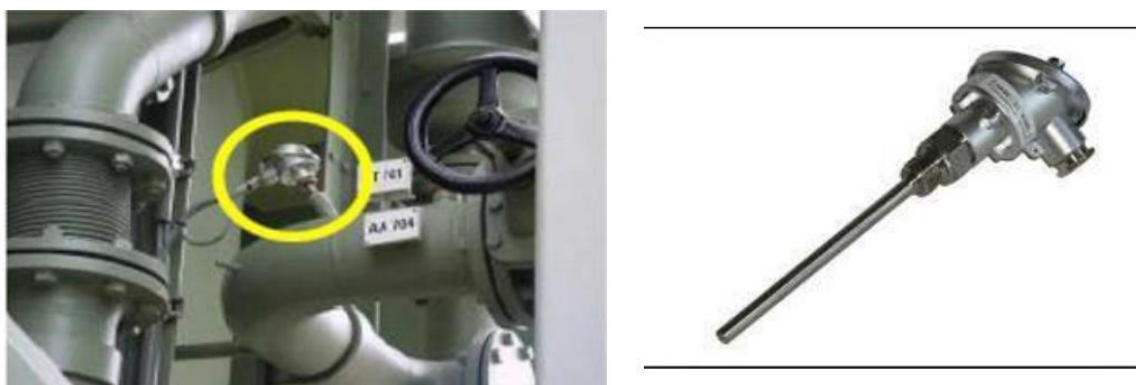
Pomoću graničnih vrijednosti (tablica 15.) može se procijeniti cjelokupno stanje izolacije, ali je metoda nedovoljno osjetljiva na promjene u nekom malom dijelu izolacije, zbog parcijalnih izbijanja, manjih lokalnih pregrijavanja i ovlaženja ili oštećenja izolacije [21].

Tablica 15. Granične vrijednosti faktora dielektričkih gubitaka transformatora

U_n [kV]	$\text{tg}\delta$ [$\times 10^{-3}$]	
110	VN : SN+NN	VN : M
	< 0.02	< 0.02
	NN : SN + VN	NN : M
	< 0.02	< 0.02

3.7 MJERENJE TEMPERATURE NAJTOPLIJE TOČKE NAMOTA

Mjerenjem temperature moguće je procjenjivati stanje izolacije transformatora, procjenjivati učinkovitost rashladnog sustava transformatora, te ustanoviti pojave pregrijavanja u transformatoru. Najbitnija je temperatura najtoplije točke namota. Temperatura najtoplije točke se izravno može mjeriti ugradnjom svjetlovodnih termometara koji mjere temperaturu u jednoj točki ili duž cijelog namota. To je moguće kod novih transformatora, a radi se o relativno skupoj opremi pa se zato češće temperatura najtoplije točke namota procjenjuje temeljem nekog od matematičkih modela. Modeli uzimaju u obzir faktor opterećenja transformatora, temperaturu ulja, te uključenost pumpi i ventilatora. Kao senzori za mjerenje temperatura ulja najčešće se koriste otpornički termometri, Pt-100, oni se ugrađuju na ulazima i izlazima iz hladnjaka te u džepove na kotlu (slika 28.) [15].



Slika 28. Pt-100 sonda

Mjeri se temperatura okoline i temperatura ulja u regulacijskoj sklopki. *Trafo Guard System (TG)* je mikroprocesorski višefunkcionalni uređaj za upravljanje rashladnim sustavom transformatora te za nadgledanje i zaštitu transformatora (slika 29.) [15].



Slika 29. *Trafo Guard System*

TG mjeri temperaturu ulja u najvišem sloju pomoću *Pt-100* koji je postavljen u džep na poklopcu transformatora i struje kroz do tri namota s pomoću strujnih transformatora. Na temelju tih ulaznih podataka *TG* simulira temperature najtoplije točke do tri namota, upravlja rashladnim sustavom, uzbunjuje i isklapa transformator pomoću releja koji se ukopčavaju pri podešenim temperaturama ulja i najtoplije točke namota. *TG* mjeri i nivoe ulja u konzervatoru regulacijske sklopke i konzervatoru transformatora te uzbunjuje pri premaloj i prevelikoj razini ulja u konzervatorima, a računa i potrošeni vijek trajanja izolacije transformatora (slika 30.) [15].



Slika 30. Mjerenje temperatura ulja transformatora 110/10 kV

4. ZAKLJUČAK

Životni vijek transformatora je gotovo jednak životnom vijeku njegovog izolacijskog sustava koji se sastoji od transformatorskog ulja kao tekuće izolacije i celuloznog papira kao čvrste izolacije. Ulje se može zamijeniti, a papir ostaje dok traje i transformator pa je vijek trajanja transformatora određen vijekom trajanja papira u izolaciji.

Povećana toplinska naprezanja ulja i/ili papira uzrok su toplinskih grešaka, najčešćeg odstupanja koje se dijagnosticira DGA analizom kod energetskih transformatora u pogonu. Ako su povećani plinovi acetilen, ugljikov monoksid i dioksid, znači da se radi o toplinskoj grešci visokih temperatura i učešću celuloze. Ako to nije slučaj, transformator može ostati u pogonu.

Analize rezultata provedene na modelima s otvorenim i zatvorenim sustavom disanja ukazuju da su izabrani modeli dobri za istraživanje starenja uljno papirne izolacije. Dobiveni rezultati pokazuju razlike između transformatora s otvorenim i zatvorenim sustavom disanja. Izolacijski sustav modela s otvorenim sustavom disanja stario je 2.5 puta brže od modela sa zatvorenim sustavom disanja, te se može zaključiti da su bolji transformatori s zatvorenim sustavom disanja odnosno kod njih se očekuje duži vijek trajanja.

Za određivanje stupnja ostarjelosti i preostalog vijeka trajanja izolacijskog sustava ulje-papir pogodne su dijagnostičke metode određivanja stupnja polimerizacije papira, fizikalno-kemijska analiza ulja i određivanje sadržaja furana u ulju.

Korelacija između rezultata mjerenja sadržaja vlage u papiru RVM metodom i Karl-Fischer metodom na uzorcima papira postoji, te ju je potrebo daljnje istražiti.

Ispitivanja kompatibilnosti materijala koji se koriste u transformatorima i drugoj električnoj opremi važni su za dobivanje informacija o tome jesu li materijali međusobno kompatibilni u posebnim uvjetima rada. Materijali koji nisu sasvim kompatibilni s mineralnim transformatorskim uljem utječu na smanjenje izolacijskih svojstava ulja i neposredno mogu biti uzrok greške transformatora. Dodatna ispitivanja pomoću sofisticiranih instrumentalnih tehnika (GC, HPLC) omogućuju otkrivanje mogućeg onečišćenja ulja plinovitim ili drugim produktima degradacije materijala.

5. LITERATURA

[1] Poglavlje u knjizi:

Podhorsky, R., Požar, H., Štefanović, D., Tehnička enciklopedija, Zagreb, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 1963. – 1997., 1. – 13 sv.

[2] Korištenje interneta:

<https://hr.wikipedia.org/wiki/Transformator> (pristup 25. travanj 2017.)

[3] Korištenje interneta:

<https://element.hr/artikli/file/2457> (pristup 25. travanj 2017.)

[4] Knjiga:

Pinter, V., Skalicki, B., Elektrotehnika u strojarstvu, Osnove elektroenergetike i električnih strojeva, Zagreb, 1979., str. 111-113.

[5] Korištenje interneta:

<http://www.elind.hr/zivotni-vijek-transformatora> (pristup 25. travanj 2017.)

[6] Časopis:

Pantić, D., Karneluti, J., Radosavljević, R., Obnova sustava uljno-papirne izolacije – Regeneracija transformatorskih ulja, VIMAP d.o.o. Beograd, 12. studeni 2014.

[7] Časopis:

Rycroft, M., features editor, EE Publishers, Transmission and distribution - Vegetable oil as insulating fluid for transformers, April 2014.

[8] Knjiga:

Marcelo M. Hirschler, editor, Electrical Insulating Materials: International Issues, ASTM, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, Printed in Baltimore, MD, March 2000.

[9] Članak:

Čabrajac, S., Puklek, D., Poljak, M., Kompatibilnost materijala u transformatorima punjenim mineralnim uljem, 6. savjetovanje, Cavtat, 9. -13. studenoga 2003., Končar, Zagreb

[10] Magistarski rad:

Tarandek, Ž., Magistarski rad, Utjecaj aluminijskih dijelova na pojavu vodika u mjernom transformatoru, FSB, Zagreb, 2011.

[11] Lovreškov, R., Mršić, I., Rad za Rektorovu nagradu, Optimiranje procesa pripreve nanofluida na osnovi transformatorskog ulja, FKIT, Zagreb, 2015.

[12] Knjiga:

Heathcote J., M., The J & P, Transformer book, Twelfth edition, Great Britain, 1998., str. 60-64.

[13] Knjiga:

Strlič, M., Kolar, J., Ageing and stabilisation of paper, Ljubljana : National and University Library, 2005.

[14] Knjiga:

Jurjević, V., Tehnički priručnik (5. Izdanje), Končar, Zagreb, studeni 1991., str.306., 307., 311.

[15] Završni rad:

Hadžić, A., Završni rad, Integralna zaštita energetskih transformatora u električnim postrojenjima, Elektrotehnički fakultet, Sarajevo, 2014.

[16]] Članak:

Skerlev H., A., Čabrajac, S., Učinkovitost kromatografske analize za detekciju različitih vrsta oštećenja izolacije, 5. savjetovanje, Cavtat, 4. -8. studenoga 2001., Končar, Zagreb

[17] Članak:

Skerlev H., A., Keitoue, S., Jaman, N., Dijagnostika termičkih grešaka energetskih transformatora DGA analizom, 11. savjetovanje, Cavtat, 10. -13. studenoga 2013., Končar, Zagreb

[18] Časopis:

Misic, M., Ispitivanje transformatora, Power transformers, Beograd, siječanj 2005.

[19] Časopis:

Mikulecky, A., Čabrajac, S., Godec, Z., Rezultati istraživanja starenja izolacije transformatora na modelima, 3. savjetovanje, Cavtat, 26. -30. listopada 1997., Končar, Zagreb

[20] Časopis:

Vrsaljko, D., Musulin., B., Haramija, V., Skerlev H., A., Compatibility of solid materials used in transformers with mineral transformer oil, 16 - 18.05.2012.,Hrvatska, Dubrovnik

[21] Knjiga:

Kuzle, I., Dijagnostika u održavanju elemenata elektroenergetskog sustava, FER, Zagreb, 2013., str. 6-15.

6. ŽIVOTOPIS

████████████████████ Osnovnu školu u Desiniću pohađala sam u razdoblju od 2001. do 2009. godine. Nakon završenog osnovnoškolskog obrazovanja, 2009. godine upisala sam srednju školu u Pregradi, smjer farmaceutski tehničar. Godine 2013. položila sam završni ispit te završila srednju školu. Iste godine upisala sam na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije u Zagrebu, studij Kemija i inženjerstvo materijala. U srpnju 2016. godine odradila sam stručnu studentsku praksu u tvornici stakla Vetropack Straža, Hum na Sutli. Od rujna 2016. godine do lipnja 2017. godine, pohađala sam tečaj njemačkog jezika. 23. veljače 2017. godine, prisustvovala sam znanstveno-stručnom skupu „Primjena matematičkog modeliranja i numeričkih simulacija u kemijskoj procesnoj industriji“, održanog u Plivi, Zagreb.