

# Sušenje transformatora strujama niskih frekvencija

---

**Hegedušić, Karlo**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:929460>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-23**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Karlo Hegedušić**

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Mario Hrgetić, dipl. ing.

Student:

Karlo Hegedušić

Zagreb, 2024.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Na ovom mjestu želim izraziti svoju iskrenu zahvalnost svima koji su na bilo koji način doprinijeli nastanku ovog diplomskog rada i pružili mi podršku tijekom studija.

Prije svega, zahvaljujem svojoj obitelji na bezuvjetnoj ljubavi, razumijevanju i neiscrpnj podršci tijekom svih ovih godina. Vaša vjera u mene bila je moj glavni oslonac i motivacija.

Posebnu zahvalu upućujem svojoj djevojci, koja je uvijek bila uz mene, pružajući mi podršku i poticaj, čak i u najtežim trenucima. Tvoja strpljivost, razumijevanje i vjera u moj uspjeh neizmjereno mi znače.

Veliko hvala mom mentoru na stručnom vodstvu, korisnim savjetima i spremnosti da podijeli svoje znanje. Vaša profesionalnost i posvećenost znatno su doprinijele kvaliteti ovog rada.

Na kraju, zahvaljujem tvrtki Radošević d.o.o., koja mi je velikodušno osigurala sredstva i materijale potrebne za izvođenje praktičnog dijela istraživanja. Vaša podrška omogućila mi je da realiziram ovaj rad i steknem dragocjeno iskustvo koje ću nositi sa sobom u budućnosti.

Hvala svima što ste bili dio mog puta do ovog važnog postignuća.

Karlo Hegedušić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Karlo Hegedušić** JMBAG: 0035209773

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Sušenje transformatora strujama niskih frekvencija**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Drying of transformers with low frequency currents**

Opis zadatka:

Proizvodnja transformatora je kompleksan i tehnološki zahtjevan proces. Jedan od ključnih procesa u postupku proizvodnje je sušenje transformatora. Svrha ovog postupka je izdvajanje vlage iz izolacije transformatorskog namota kako bi se osigurao njegov nominalni životni vijek. Pored klasičnih metoda, u zadnjih dvadesetak godina sve češće se koristi metoda sušenja primjenom struja niskih frekvencija.

U sklopu rada je potrebno:

- Dati pregled različitih tehnoloških metoda sušenja transformatora i opisati opremu koja se koristi u postrojenjima za sušenje.
- Detaljnije opisati koncept sušenja transformatora zasnovan na primjeni struja niskih frekvencija i naglasiti prednosti primjene ove metode.
- Osmisliti sustav za sušenje transformatora primjenom struja niskih frekvencija i specificirati potrebne komponente i opremu.
- Analizirati utjecaj angažirane električne snage, frekvencije struje sušenja, temperaturnih profila, okolišnih uvjeta, broja iteracija te drugih utjecajnih parametara na kvalitetu i učinkovitost procesa sušenja.
- Temeljem dostupnih mjerenja za konstantnu, nominalnu frekvenciju struje sušenja analizirati performanse sustava te navesti njegove prednosti u odnosu na konvencionalne metode i eventualne daljnje mogućnosti unaprjeđenja.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan: Datum predaje rada: Predviđeni datumi obrane:  
26. rujna 2024. 28. studeni 2024. 5., 6. i 9. prosinca 2024.

Zadatak zadao: Predsjednik Povjerenstva:  
Izv. prof. dr. sc. Mario Hrgetić Prof. dr. sc. Ivica Garašić

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	IV
POPIS TABLICA .....	VI
POPIS OZNAKA .....	VII
SAŽETAK .....	VIII
SUMMARY .....	IX
1. UVOD .....	1
2. IZOLACIJA .....	3
2.1. Uljna izolacija .....	3
2.2. Čvrsta izolacija .....	4
2.3. Starenje izolacije transformatora .....	4
2.3.1. Starenje tekuće izolacije .....	6
2.3.1.1. Utjecaj kisika .....	7
2.3.1.2. Utjecaj temperature .....	8
2.3.1.3. Utjecaj vlage .....	9
2.3.1.4. Utjecaj metala .....	10
2.3.1.5. Utjecaj inhibitora .....	10
2.3.2. Proces starenja čvrste izolacije .....	12
2.3.3. Kemijski indikatori starenja transformatora .....	15
2.3.3.1. Kiselost .....	15
2.3.3.2. Vlaga .....	17
2.3.3.3. Furanski spojevi .....	18
2.3.3.4. Metanol .....	19
2.3.4. Fizički i mehanički indikatori starenja transformatora .....	21

---

2.3.4.1. Boja i izgled ulja .....	21
2.3.4.2. Stupanj polimerizacije papira (DP).....	21
2.3.4.3. Vlačna čvrstoća papira (TS).....	21
3. ISPITIVANJE TRANSFORMATORA .....	23
3.1. Rutinska ispitivanja prema IEC 60076 standardu .....	23
3.2. Prošireni opseg dijagnostike.....	25
3.3. Specijalne dijagnostičke metode .....	25
4. METODE SUŠENJA IZOLACIJE .....	26
4.1. Sušenje vrućim zrakom .....	29
4.2. Sušenje vrućim uljem (HO).....	29
4.3. Sušenje uljnom parom (HOS) .....	31
4.4. Sušenje strujama niske frekvencije (LFH).....	32
4.5. Analiza simulacije sušenja .....	34
5. LFH POSTUPAK SUŠENJA TRANSFORMATORA.....	37
5.1. Opis procesa .....	37
5.2. Tehničke karakteristike .....	37
5.2.1. Dijelovi postrojenja .....	37
5.2.2. Tehničke karakteristike postrojenja.....	44
5.2.3. Tehnički podaci sustava za ulje .....	46
5.3. Shema postrojenja .....	46
5.4. Priprema za sušenje.....	47
5.5. Unos parametara.....	49
5.5.1. Podaci za sušenje .....	49
5.5.2. Unos procesnih parametara .....	50
5.6. Faza mjerenja .....	55

---

5.7. Faza zagrijavanja.....	57
5.8. Faza finog vakuumiranja.....	58
5.9. Faza punjenja ulja pod vakuumom.....	58
5.10. Upuštanje zraka.....	59
6. ANALIZA PERFORMANSI SUSTAVA.....	60
6.1. Karakteristike transformatora.....	60
6.2. Konvencionalna metoda sušenja.....	61
6.2.1. Sušenje pod vakuumom.....	61
6.2.2. Sušenje cirkulacijom vrućeg ulja.....	61
6.3. Sušenje visokim vakuumom, cirkulacijom vrućeg ulja i LFH metodom.....	63
6.3.1. Sušenje pod vakuumom.....	63
6.3.2. Sušenje cirkulacijom vrućeg ulja.....	64
6.4. Sušenje niskim vakuumom, cirkulacijom vrućeg ulja i LFH metodom.....	65
6.4.1. Sušenje pod niskim vakuumom.....	65
6.4.2. Sušenje cirkulacijom vrućeg ulja.....	66
7. EKSPERIMENTALNI REZULTATI.....	68
7.1. Rezultati konvencionalne metode sušenja.....	69
7.2. Rezultati sušenja visokim vakuumom, cirkulacijom vrućeg ulja i LFH metodom.....	69
7.3. Rezultati sušenja niskim vakuumom, cirkulacijom vrućeg ulja i LFH metodom.....	70
7.4. Usporedba rezultata.....	72
8. ZAKLJUČAK.....	74
9. LITERATURA.....	76



**POPIS SLIKA**

Slika 1. Prikaz građe transformatora .....	2
Slika 2. Polimer celuloze [3] .....	4
Slika 3. Faktori koji utječu na starenje uljno-papirnog sustava [5].....	5
Slika 4. Mehanizam oksidacije ugljikovodika u mineralnom ulju [6] .....	6
Slika 5. Kiselost (vrijednost neutralizacije) kao funkcija starosti za transformatore s otvorenim (OPEN) i zatvorenim (CLOSED) sustavom [7] .....	8
Slika 6. Kiselost ulja za različite razine početne vlage u papiru pri 130 °C [8].....	10
Slika 7. Trend porasta kiselosti za inhibirana ulja [9].....	11
Slika 8. Trend porasta kiselosti za neinhibirana ulja [9] .....	12
Slika 9. Ovisnost vlačne čvrstoće o DP za Munksjø kraft papir [8] .....	13
Slika 10. Učinak različitih kiselina u ulju na starenje papira u mokrim uvjetima na 130 °C [12] .....	14
Slika 11. Tipičan trend kiselosti u odnosu na starost transformatora [13].....	16
Slika 12. Odnos između TI i LMA u papiru tijekom starenja [14] .....	17
Slika 13. Vlaga u ulju u odnosu na starost transformatora [15].....	18
Slika 14. Furanski spojevi nastali kao proizvodi starenja papira [16] .....	19
Slika 15. Odnos između (lijevo) metanola i cijepanja lanaca (NS) i (desno) furanovih spojeva i cijepanja lanaca (NS) [17].....	20
Slika 16. Odnos između vlačnog indeksa (TI) i starosti [18].....	22
Slika 17. Koeficijent difuzije vlage u papiru kao funkcija temperature i koncentracije vlage (vrijednosti su u m <sup>2</sup> /s).....	27
Slika 18. Oommen dijagram.....	30
Slika 19. Konceptualni prikaz LFH postrojenja.....	33
Slika 20. Cirkulacija vrućeg ulja na 60 °C, LFH na 80, 95 i 110 °C .....	35

---

Slika 21. Osnovi dijelovi LFH postrojenja.....	38
Slika 22. Dijelovi frekvencijskog pretvarača .....	40
Slika 23. Frekvencijski pretvarač proizvođača HIGHVOLT [HV] .....	41
Slika 24. Priključci transformatora unutar vakuumske komore.....	42
Slika 25. Pultovi za ispitne kablove .....	43
Slika 26. Shema LFH postrojenja .....	47
Slika 27. LFH postrojenje s priključenim transformatorima.....	48
Slika 28. Podaci za sušenje .....	50
Slika 29. Procesni parametri sušenja.....	52
Slika 30. Parametri pretvarača i kontrola temperature .....	52
Slika 31. Generalni parametri.....	53
Slika 32. Dijagram procesa .....	55
Slika 33. Uređaj za obradu ulja VOP030 Micafluid .....	58
Slika 34. Pozicije sonde za mjerenje temperature .....	61
Slika 35. Razvoj temperature tijekom prvog postupka sušenja .....	62
Slika 36. Razvoj temperature tijekom drugog postupka sušenja .....	63
Slika 37. Primjenjena struja tijekom drugog postupka sušenja.....	64
Slika 38. Razvoj temperature tijekom trećeg postupka sušenja .....	66
Slika 39. Primjenjena struja tijekom trećeg postupka sušenja .....	67
Slika 40. Ravnotežna vlaga .....	72

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Rezultati simulacije.....	36
Tablica 2. Osnovi dijelovi LFH postrojenja .....	38
Tablica 3. Tehničke karakteristike postrojenja .....	44
Tablica 4. Tehnički podaci sustava za ulje .....	46
Tablica 5. Osnovni procesni parametri sušenja .....	51
Tablica 6. Rezultati konvencionalne metode sušenja .....	68
Tablica 7. Rezultati sušenja visokim vakuumom .....	68
Tablica 8. Rezultati sušenja niskim vakuumom .....	68
Tablica 9. Sažetak rezultata .....	73

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$A$	-	preeksponecijalni faktor, koji predstavlja učestalost sudara i orijentaciju molekula reaktanata
$C$	-	koncentracija vlage
$Ce_{quil}$	-	ravnotežna vlažnost
$C_p$	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	specifični toplinski kapacitet ulja
$D(C,T)$	$m^2 \cdot s^{-1}$	koeficijent difuzije vlage u čvrstoj izolaciji
$D_0$	-	referentni koeficijent
$E_a$	$J \cdot mol^{-1}$	aktivacijska energija
$k$	-	konstanta brzine reakcije.
$Le$	-	Lewisov broj
$R$	$J \cdot mol^{-1} K^{-1}$	univerzalna plinska konstanta
$Sc$	-	Schmidtov broj
$T$	K	temperatura
$\nu$	$m^2 \cdot s^{-1}$	kinematička viskoznost
$\alpha$	$m^2 \cdot s^{-1}$	toplinska difuzivnost
$\mu$	Pa·s	dinamička viskoznost
$\rho$	$kg \cdot m^{-3}$	gustoća
$K_w$	-	koeficijent prijenosa mase isparavanjem
$R$	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$	otpor namota
$p_v$	Pa	parcijalni tlak vlage

## **SAŽETAK**

Diplomski rad bavi se istraživanjem metoda sušenja transformatora s ciljem smanjenja vlage u čvrstoj izolaciji, čime se osigurava dugovječnost i pouzdanost uređaja. Poseban naglasak stavljen je na usporedbu konvencionalnih metoda sušenja s primjenom struja niske frekvencije (LFH). U sklopu rada analizirani su utjecajni parametri kao što su temperatura, razina vakuuma i vrijeme trajanja procesa sušenja. Korištene su različite metode sušenja, uključujući sušenje visokim i niskim vakuumom te cirkulacijom vrućeg ulja. Provedena je simulacijska analiza i eksperimentalni testovi na stvarnom transformatoru. Proces sušenja detaljno je promatran kroz učinke na izolaciju izrađenu od papira i prešanog kartona, a razvijeni modeli koriste se za predviđanje raspodjele vlage i temperature tijekom procesa. Osim toga, razmatrane su specifičnosti primjene LFH metode i njene mogućnosti u postizanju ravnomjernog zagrijavanja izolacije. Rad obuhvaća pregled relevantne literature, opis korištenih metoda i detaljan prikaz eksperimentalnog postupka, uključujući implementaciju senzorskih sustava za praćenje temperature. Time se postavlja osnova za daljnja istraživanja i optimizaciju procesa sušenja transformatora.

**SUMMARY**

This thesis explores transformer drying methods aimed at reducing moisture in solid insulation, thereby ensuring the longevity and reliability of the equipment. Special focus is placed on comparing conventional drying methods with the application of low-frequency heating (LFH). The study analyzes influential parameters such as temperature, vacuum level, and drying process duration. Various drying methods were employed, including drying under high and low vacuum conditions and hot oil circulation. A simulation analysis and experimental tests were conducted on the real transformer. The drying process was closely examined for its effects on insulation made of paper and pressboard, with developed models used to predict moisture and temperature distribution during the process. Additionally, the specific characteristics of the LFH method and its potential for achieving uniform insulation heating were considered. The thesis includes a review of relevant literature, a description of the methods used, and a detailed presentation of the experimental procedure, including the implementation of sensor systems for monitoring temperature. This establishes a foundation for further research and optimization of transformer drying processes.

## 1. UVOD

Energetski transformatori su jedan od najskupljih elemenata u elektroenergetskom sustavu. Njihova pouzdanost je ključna za odgovarajuće funkcioniranje sustava. Neočekivani kvarovi transformatora mogu dovesti do prekida opskrbe i/ili uzrokovati značajnu štetu na elektroenergetskim postajama. Većina transformatora u upotrebi danas su uronjeni u ulje, s celulozom kao čvrstom izolacijom. Ulje, osim što služi kao sredstvo za hlađenje, također djeluje kao električna izolacija.

Veliki postotak kvarova energetskih transformatora uzrokovan je degradacijom njihove celulozne izolacije. Vlaga je jedan od glavnih čimbenika u procesu starenja papira jer djeluje kao katalizator i nusproizvod tih procesa. Procjena je da transformator s razinom vlage od 4% stari za deset godina jednako koliko drugi transformator s udjelom vlage od 2% ostari za dvadeset godina [1]. Stoga je vrlo poželjno da sadržaj vlage u izolaciji transformatora ostane unutar kontroliranih razina kako bi se produljio vijek trajanja transformatora. Nakon proizvodnje transformatora, uvijek ostaje određena količina zaostale vlage u izolaciji. Razina vlage u novom transformatoru obično je oko 0,5% u težini. Kako transformator stari, sadržaj vode se povećava zbog vode koja nastaje tijekom reakcija razgradnje u izolacijskom papiru. Na kraju svog vijeka trajanja, transformatori mogu doseći razine vlage od oko 5 – 6% u težini [1].

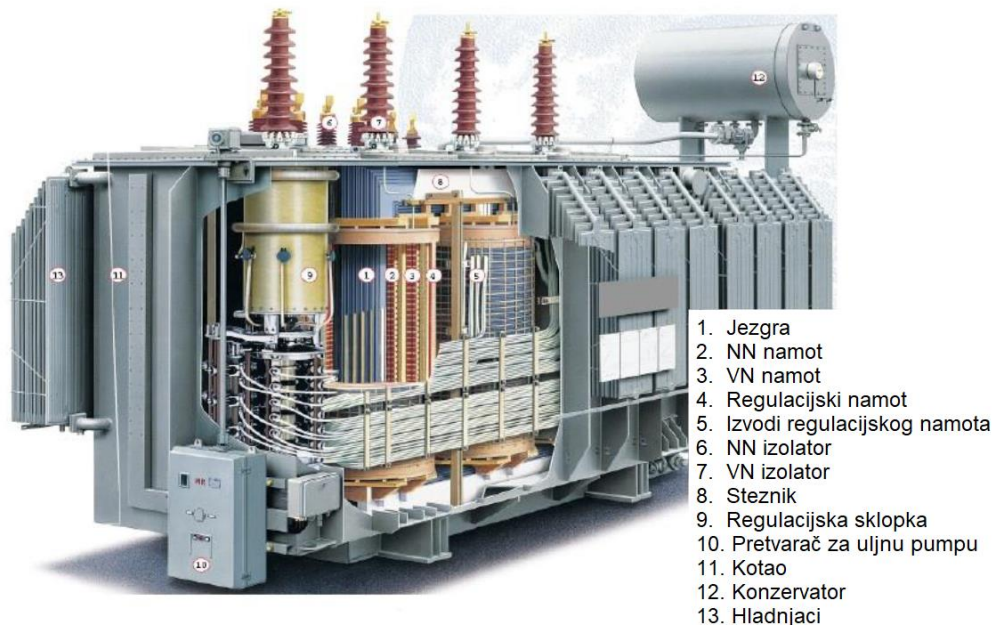
Međutim, drugi čimbenici mogu dovesti do visokih razina vlage čak i u transformatorima koji nisu tako stari: ulazak vode kroz sušionik sa silikagelom (osobito nakon isključenja transformatora) ili kroz curenje u spremniku, ulazak vlage tijekom popravaka na terenu ili prilikom premještanja transformatora između trafostanica (kada se premještanje vrši bez ulja u spremniku).

Sušenje transformatora postaje uobičajena praksa u elektroprivredama jer je trošak ovog procesa znatno niži od troška skraćenog vijeka trajanja zbog visokog udjela vlage. To je osobito važno u slučaju transformatora velikih snaga koji imaju visoku nabavnu cijenu.

Iako sušenje transformatora nije nova praksa, još uvijek postoje određeni problemi povezani s metodama koje se trenutno koriste:

- kako bi se izvukla vlaga iz transformatora radi smanjenja brzine degradacije ulja, ulje se mora zagrijati na visoke temperature i/ili se tlak u transformatoru mora značajno smanjiti;
- vrijeme potrebno za sušenje transformatora je dugo pa su potrebni dugotrajni ispadi iz pogona kako bi se procesi dovršili; kod strateških jedinica, takvi dugi ispadi nisu uvijek mogući;
- ispravno sušenje ulja transformatora često se postiže, ali velika količina vode obično ostaje u hladnoj i debeloj celuloznoj izolaciji te se pojavljuje nakon nekoliko mjeseci; u tom slučaju, učinkovitost tretmana sušenja, koji je vrlo skup, bila bi ograničena;
- učinkovitost procesa sušenja uvelike ovisi o raspodjeli temperature; ako raspodjela temperature nije homogena, neki dijelovi čvrste izolacije ostat će vlažni, a voda će se osloboditi nakon što se transformator stavi u pogon, ponovno navlažujući suhe dijelove.

Prema IEEE normi 62-1995, transformator s udjelom vlage manjim od 2% smatra se suhim; kada je udio između 2% i 4%, smatra se vlažnim, a iznad 4,5%, smatra se prekomjerno vlažnim [2].



**Slika 1. Prikaz građe transformatora**



## 2. IZOLACIJA

Vlaga unutar transformatora raspoređena je između čvrste izolacije (kraft papir, prešpan, drvo) i ulja. Ta raspodjela nije homogena. Celulozna izolacija je vrlo hidrofilna i sadrži većinu vlage u transformatoru, dok je ulje vrlo hidrofobno. Osim toga, raspodjela vlage unutar transformatora ovisi i o temperaturi. Ako se temperatura transformatora poveća, dio vlage migrira iz papira u ulje dok ne postigne novu točku ravnoteže i obrnuto. Ovi dinamički procesi regulirani su vrlo dugim vremenskim konstantama, također ovisnim o temperaturi (npr. ravnoteža vlage na 20 °C traje nekoliko tjedana, dok na 80 °C traje samo nekoliko sati), te su mnogo duže od termalnih konstanti [4].

### 2.1. Uljna izolacija

Ulje u transformatoru koristi se primarno za osiguravanje dielektrične čvrstoće transformatora. Osim toga, ulje također djeluje kao rashladno sredstvo i kao nositelj informacija, što se može koristiti u dijagnostici stanja transformatora.

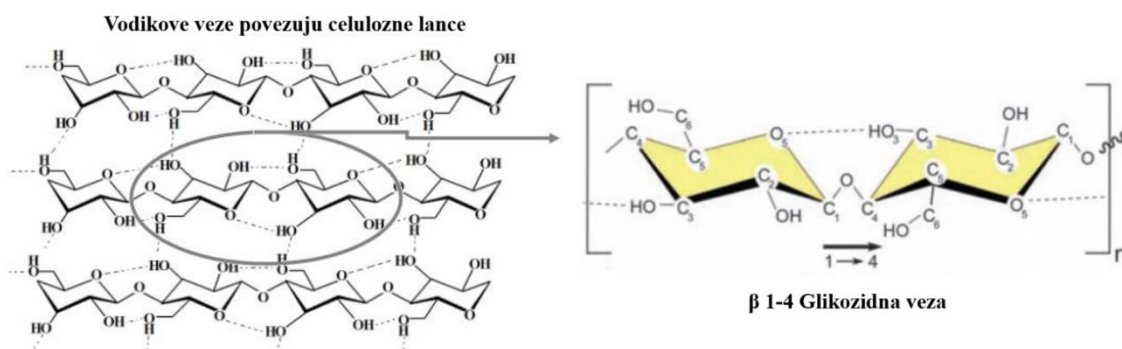
Ovaj rad usredotočen je na mineralna ulja, koja se u transformatorima intenzivno koriste već više od jednog stoljeća. Mineralna ulja sastoje se od rafiniranih ulja na bazi ugljikovodika s dodacima za poboljšanje svojstava. Primjer takvog dodatka je inhibitor koji se dodaje kako bi se ograničio utjecaj oksidacije, kemijskog procesa koji se javlja kada tvar dođe u kontakt s kisikom ili nekom drugom oksidacijskom tvari. Oksidacija ulja u transformatorima značajno utječe na životni vijek transformatora jer degradira svojstva ulja i općenito izolacijskog sustava tako što uzrokuje stvaranje nusprodukata poput kiselina, peroksida i mulja koji negativno djeluju na performanse transformatora smanjujući mu dielektričnu čvrstoću, učinkovitost hlađenja, itd.

Sirova nafta je mješavina brojnih ugljikovodičnih spojeva, uz manje količine spojeva poput sumpora, kisika, dušika, željeza itd. Mineralno ulje je nusproizvod destilacije sirove nafte i može se klasificirati u tri tipa: parafinska, naftenska i aromatska ulja. Od ovih, naftenska ulja se češće koriste zbog različitih čimbenika, poput dostupnosti, niže točke zgušnjavanja i veće topljivosti mulja.

## 2.2. Čvrsta izolacija

Čvrsta izolacija osim izolacije, osigurava i mehaničku stabilnost namota, koji su tijekom rada izloženi elektromagnetnim silama. Kraft papir, koji je glavni izolator omotan oko vodiča, sastoji se od celuloze, hemiceluloze i nešto zaostalog tiolignina, ostataka iz procesa proizvodnje papira.

Celuloza se sastoji od  $\beta$ -D-glukopiranozil jedinica koje se javljaju u obliku linearnih polimernih lanaca [Slika 2.]. Broj tih lanaca prikazuje se stupnjem polimerizacije (DP).



Slika 2. Polimer celuloze [3]

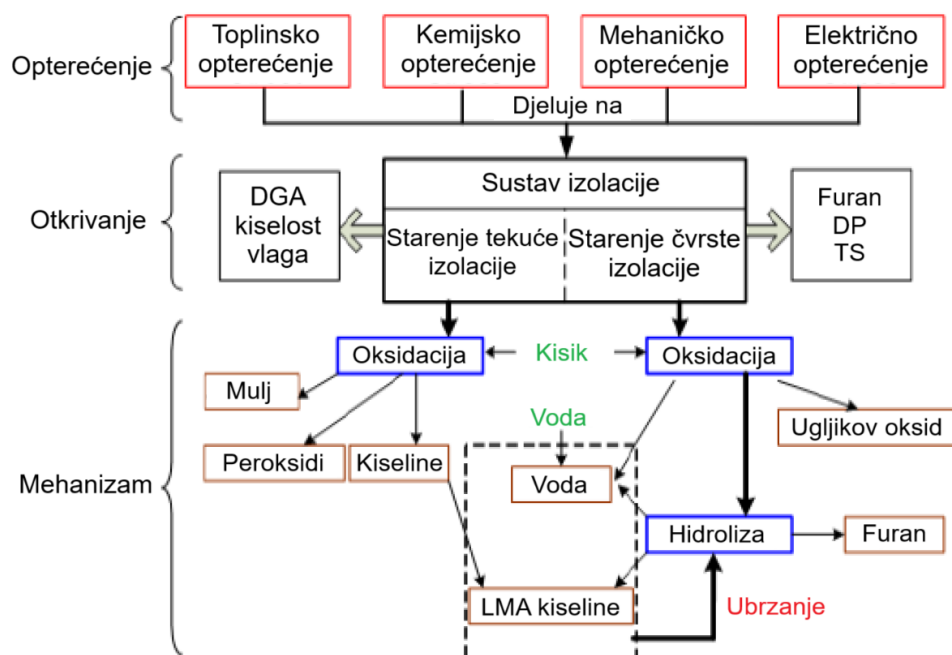
Celuloza se može predstaviti kao  $[C_5H_{10}O_5]_n$ , zanemarujući dodatne atome u završnoj grupi. Ovdje  $n$  predstavlja DP. Viša vrijednost DP-a ukazuje na veću mehaničku čvrstoću papira. Kvaliteta i čvrstoća proizvedenog papira uvelike variraju među proizvođačima koji koriste različite tehnologije i procese proizvodnje. Celuloza ispunjava dvostruku funkciju: pruža izolaciju namotima i istovremeno pruža mehaničku potporu, štiteći ih od fizičkih oštećenja.

## 2.3. Starenje izolacije transformatora

Poželjno je da izolacija u transformatoru traje jednako dugo kao i sam transformator. Kako ulje i papir stare, stvaraju se produkti degradacije. Osim toga, prisutnost bakra i drugih metalnih elemenata u transformatoru može utjecati na brzinu starenja izolacije.

Prema IEEE vodiču za opterećenje transformatora uronjenih u mineralno ulje [4], predloženo je da se definicija kraja životnog vijeka transformatora temelji na mjerljivim mehaničkim, dielektričnim i kemijskim karakteristikama.

Iako je starenje općenit pojam koji se odnosi i na uljnu i na krutu izolaciju transformatora, starenje krute izolacije ima znatno veći utjecaj na životni vijek transformatora. To proizlazi iz činjenice da se ulje može povremeno pročistiti ili regenerirati pa čak i zamijeniti kada je potrebno, dok papir i ostali kruti izolacijski dijelovi čine trajni, nezamjenjivi dio transformatora. Stoga bi njihova degradacija imala mnogo veći i nepovratan utjecaj na vijek trajanja transformatora. Starenje ulja i papira u transformatoru složen je ciklički fenomen, sažet u [Slika 3.].



**Slika 3. Faktori koji utječu na starenje uljno-papirnog sustava [5]**

Višestruki čimbenici, uključujući toplinska, kemijska, mehanička i električna opterećenja, utječu na starenje papira i ulja. Već je utvrđeno da je primarni uzrok starenja uljne izolacije oksidacija, dok su za papir glavni mehanizmi starenja hidroliza i oksidacija. Nusprodukti oksidacije uključuju vodu i kiseline karboksilnog i karbonilnog tipa, od kojih su potonje klasificirane kao kiseline niske molekularne mase (LMA) i visoke molekularne mase (HMA). Voda, koja je također glavni nusprodukt oksidacijskog procesa, pomaže u disocijaciji LMA povećanjem sadržaja  $H^+$  iona u sustavu, čime pokreće hidrolizu papira. Hidroliza je samokatalitička reakcija koja dovodi do daljnje proizvodnje kiseline, vode i furana. S druge



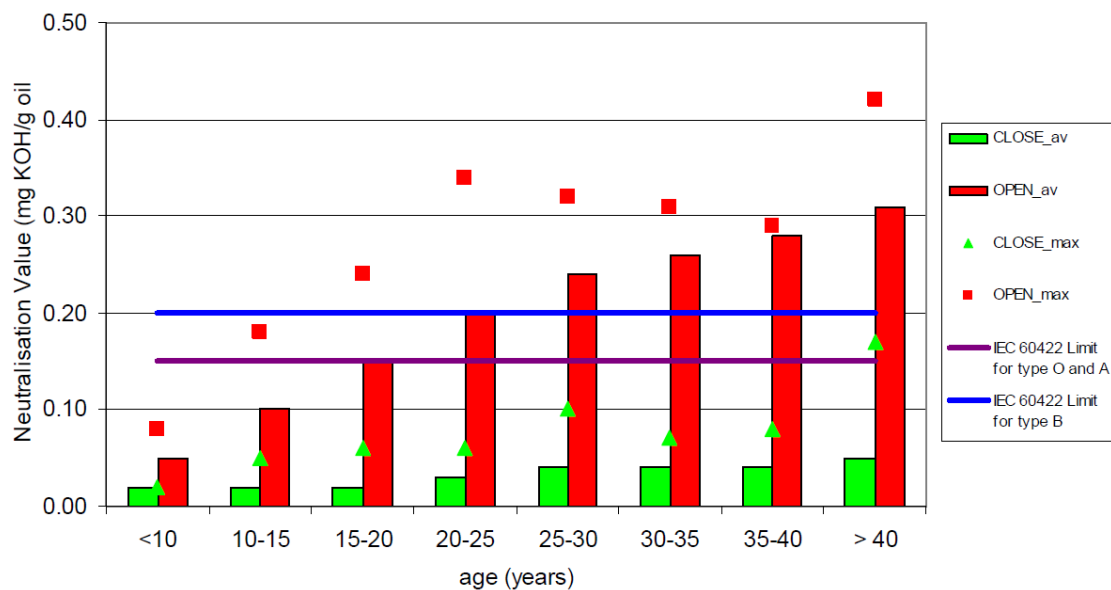
Sintetički fenolni "hvatači" radikala mogu se koristiti za usporavanje stope oksidacije. Ovaj se proces naziva inhibicija, a ulja s dodanim inhibitorima nazivaju se inhibirana ulja. Ako se ti "hvatači" radikala ne koriste, ulje se smatra neinhibiranim. Međutim, spojevi poput tiofena i organskih sulfida, prisutni u ulju nakon procesa rafiniranja, daju prirodna svojstva inhibicije oksidacije neinhibiranim uljima. Dok kod neinhibiranih ulja oksidacija počinje odmah, kod inhibiranih ulja oksidacija je mnogo sporija dok se inhibitori ne potroše. Nakon toga, oksidacija se odvija mnogo brže.

Starenje ulja prvenstveno je pod utjecajem kisika, vode/vlage, temperature, prisutnosti metala i sadržaja inhibitora.

#### *2.3.1.1. Utjecaj kisika*

Količina kisika koja može utjecati na proces oksidacije ulja u transformatoru izravno ovisi o dizajnu transformatora. Velika većina transformatora je dizajnirana s mogućnošću slobodnog disanja. Hermetički zatvoren sustav primjenjiv je samo za manje transformatore, poput distribucijskih transformatora. Veći transformatori, s iznimkom onih s dizajniranim dušičnim brtvljenjem, u velikoj mjeri su izloženi zraku. Stoga će dio kisika stalno biti otopljen u ulju.

Vrijednost kiselosti ulja kao funkcija starosti za različite otvorene i hermetički zatvorene transformatore prikazana je na [Slika 5.]. Uočava se da je apsolutna vrijednost kiselosti kod otvorenih transformatora znatno viša nego kod zatvorenih transformatora iste starosti. Iz [Slika 5.] jasno je da kiselost ulja kod otvorenih transformatora raste bržom stopom u usporedbi s hermetički zatvorenim transformatorima.



**Slika 5. Kiselost (vrijednost neutralizacije) kao funkcija starosti za transformatore s otvorenim (OPEN) i zatvorenim (CLOSED) sustavom [7]**

Tip O - Transformatori/reaktori nazivnog napona od 400 kV i više.

Tip A - Transformatori/reaktori nazivnog napona iznad 170 kV i ispod 400 kV. Također, transformatori snage bilo kojeg nazivnog napona gdje je kontinuitet opskrbe od vitalnog značaja, kao i slična oprema za posebne primjene koja radi pod teškim uvjetima.

Tip B - Transformatori/reaktori nazivnog napona iznad 72,5 kV i do 170 kV (osim onih u kategoriji A).

### 2.3.1.2. Utjecaj temperature

Osim kisika, oksidativna degradacija ulja uvelike ovisi o temperaturi, budući da je svaka reakcija termički ovisna o Arrheniusovom zakonu, danog jednadžbom koja opisuje odnos između brzine reakcije, aktivacijske energije i temperature [7].

$$k = Ae^{\frac{-E_a}{RT}}, \quad (1)$$

gdje su:

$k$  - konstanta brzine reakcije.

$A$  - preeksponencijalni faktor, koji predstavlja učestalost sudara i orijentaciju molekula reaktanata.

$E_a$  - aktivacijska energija ( $\frac{J}{mol}$ )

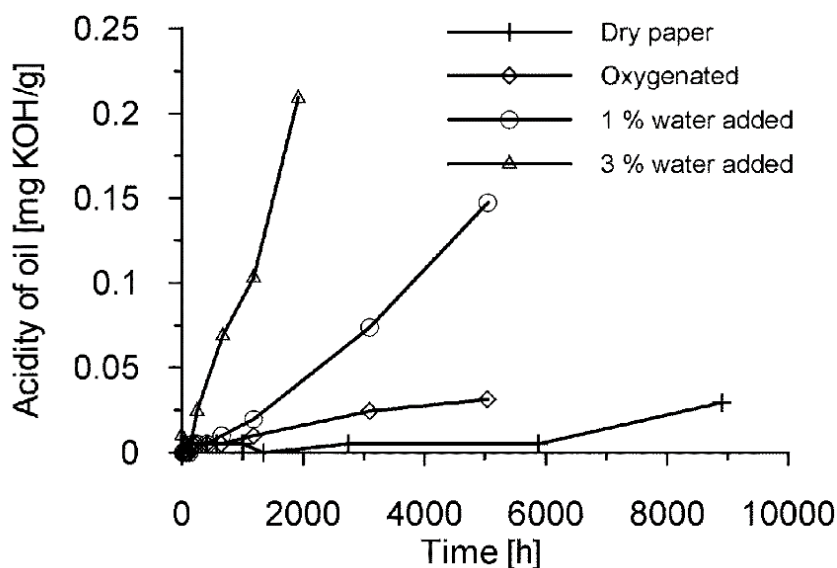
$R$  - univerzalna plinska konstanta (približno  $8,314 \frac{J}{molK}$ ).

$T$  - apsolutna temperatura (K).

Više temperature rezultiraju ubrzanjem procesa oksidacije, kao i pružanjem više aktivacijske energije za proces starenja. Kao i kod većine kemijskih reakcija, brzina oksidacije (mjereno kao brzina apsorpcije kisika) otprilike se udvostručuje kada temperatura poraste za 7 °C - 10 °C.

### 2.3.1.3. Utjecaj vlage

Brzina starenja ulja povećava se kada je početni sadržaj vlage u papiru veći, što je praćeno naknadnim smanjenjem dielektričnih svojstava ulja. To je prikazano na [Slika 6.] gdje je vidljivo povećanje kiselosti ulja za različite početne sadržaje vode u papiru.



**Slika 6. Kiselost ulja za različite razine početne vlage u papiru pri 130 °C [8]**

Iz [Slika 6.] može se zaključiti da kiselost ulja raste brže kako se povećava sadržaj vlage u sustavu. Oksidacija ulja ne samo da stvara više nusprodukata starenja, već također potiče emulgiranje vode, čime se povećava topljivost vode. To može utjecati na dielektrična svojstva i negativno djelovati na starenje ulja.

#### 2.3.1.4. Utjecaj metala

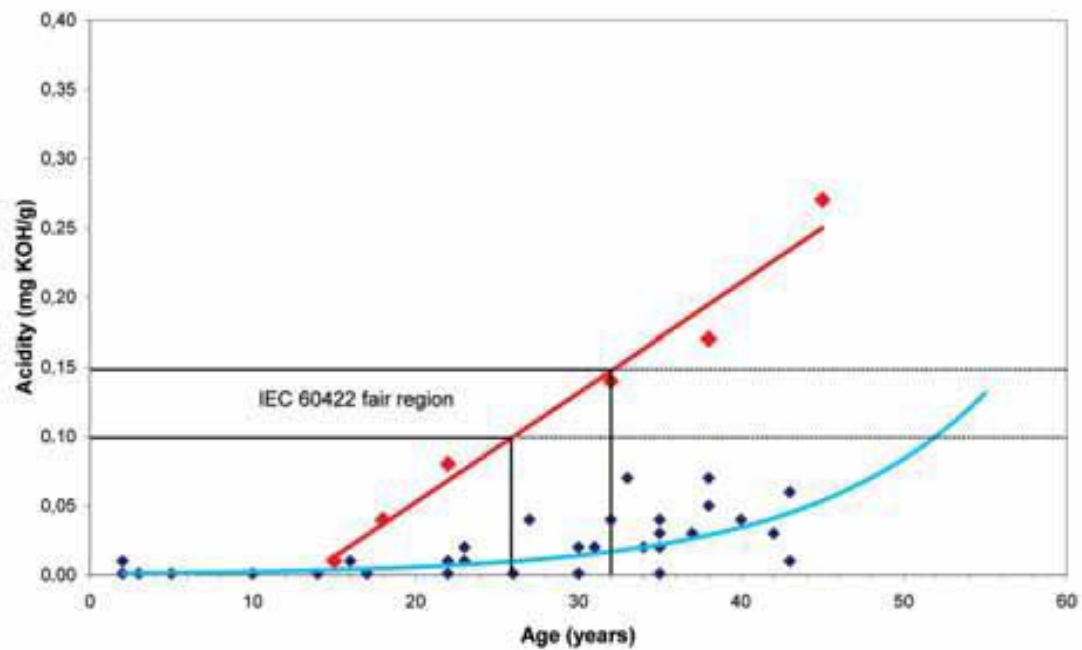
Metalnih dijelovi transformatora mogu imati katalitički učinak na proces starenja ulja. Proizvodi oksidacije ulja, poput vode i peroksida, utječu na koroziju metalnih dijelova transformatora, poput bakra i željeza. Korozija ovih metala može zatim dovesti do daljnje oksidacije ulja, što posljedično uzrokuje povećanu koroziju. Ovaj ciklus degradacije može se kontrolirati dodavanjem pasivatora metala, za koje je također dokazano da poboljšavaju oksidacijsku stabilnost neinhibiranih ulja.

#### 2.3.1.5. Utjecaj inhibitora

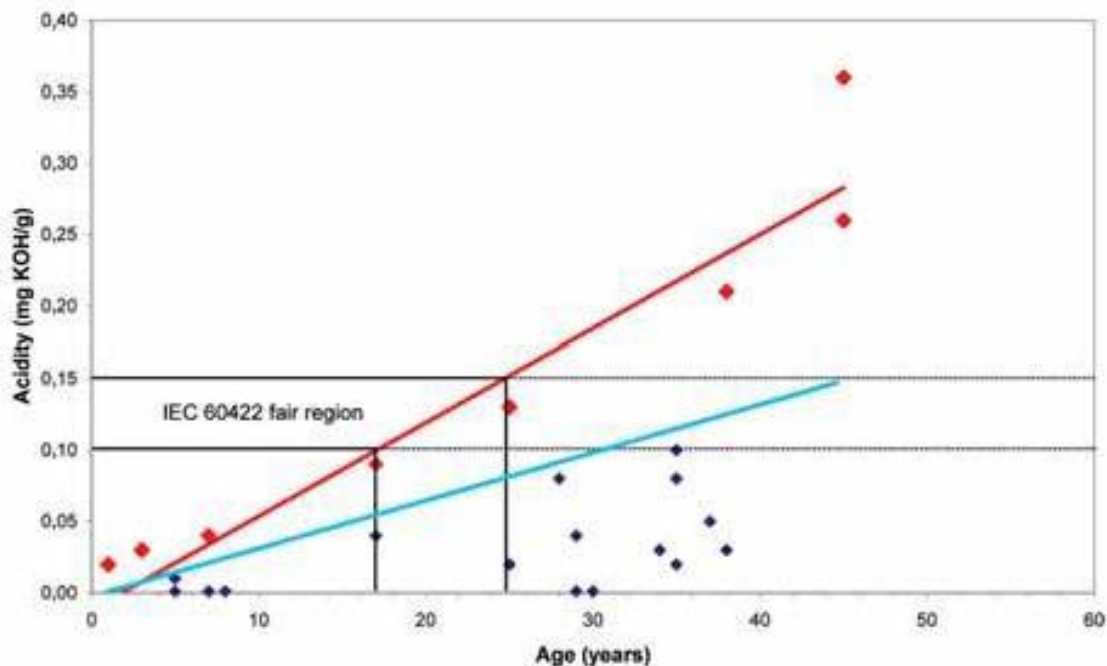
Inhibicija mineralnog ulja uključuje dodavanje određenih antioksidansa koji se bore protiv oksidacijskih nusproizvoda u sustavu i usporavaju proces starenja. Uobičajeni inhibitor koji se već dugo koristi u transformatorima je diterijarni-butil-para-krezol.



Činjenica je da inhibitori samo usporavaju, ali ne zaustavljaju potpuno oksidaciju mineralnog ulja. Provedena su istraživanja o mogućem produljenju vijeka trajanja postignutom uporabom inhibitora. Statistički prikaz porasta kiselosti s godinama za inhibirani i neinhibirani transformator prikazan je na [Slika 7.] i [Slika 8.]. Ova istraživanja proveo je Nynas [9], ispitivanjem ukupno 164 transformatora, mješavine onih s inhibiranim i neinhibiranim uljem.



Slika 7. Trend porasta kiselosti za inhibirana ulja [9]



Slika 8. Trend porasta kiselosti za neinhibirana ulja [9]

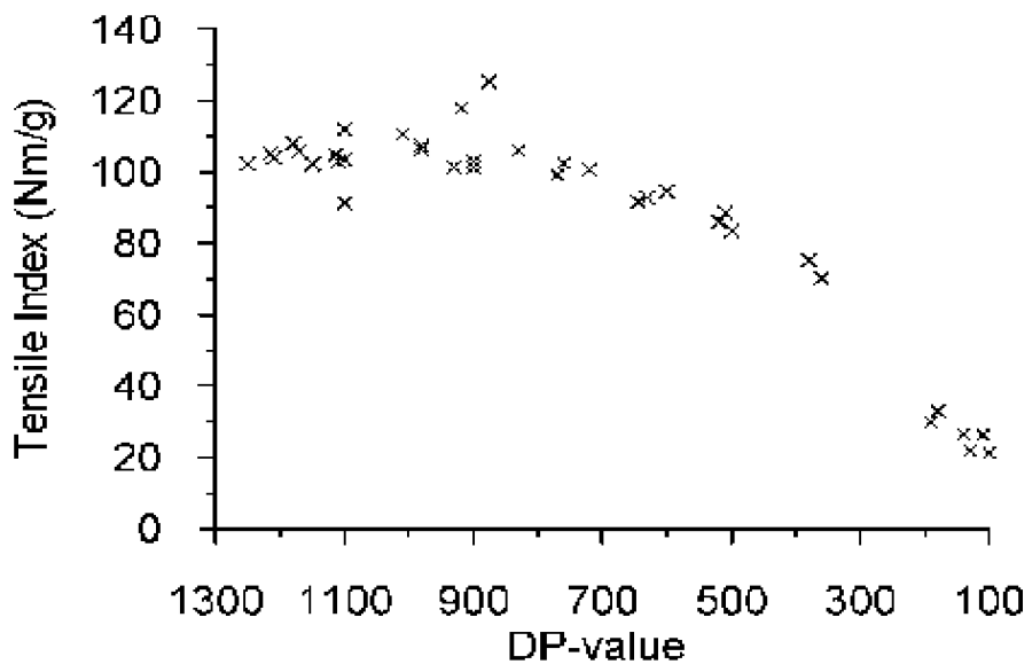
Crvena linija [Slika 7.] i [Slika 8.] prikazuju linearnu regresiju koja predstavlja najgori mogući scenarij, dok plave linije predstavljaju najvjerniji prikaz svih podataka. Nadalje, primjećuje se da je najgori mogući scenarij za inhibirano ulje prikazan tek od trenutka ubrzanog starenja. Može se uočiti da starenje neinhibiranih ulja nastupa stalnim tempom, dok kod inhibiranih ulja stopa starenja započinje sporo sve dok se aditivi inhibitora potpuno ne potroše. Nakon te točke počinje oksidacija i starenje se odvija znatno brže.

### 2.3.2. Proces starenja čvrste izolacije

Starenje izolacije papira u namotima je nepovratno i smatra se jednim od procesa koji ograničavaju vijek trajanja transformatora. Kada papir stari, smanjuju se njegova mehanička svojstva poput vlačne, lomne i savojne čvrstoće. Pravilo je da brzina promjene mehaničkih svojstava ubrzava s porastom temperature te se udvostručuje ili prepolavlja svakih 6-8 stupnjeva Celzijusa [10].

Smanjenje mehaničke čvrstoće posljedica je prekida lanaca celuloznih molekula, koje u prosjeku imaju duljinu lanca od 1000-1200 polisaharidnih prstena u nizu – što se označava kao stupanj polimerizacije (DP) – kada je papir u transformatoru nov. Vlačna čvrstoća ovisi o DP-

u, što je prikazano na [Slika 9.] Konvencionalno, DP vrijednost od 200 koristi se kao kriterij za kraj vijeka trajanja papira.



Slika 9. Ovisnost vlačne čvrstoće o DP za Munksjø kraft papir [8]

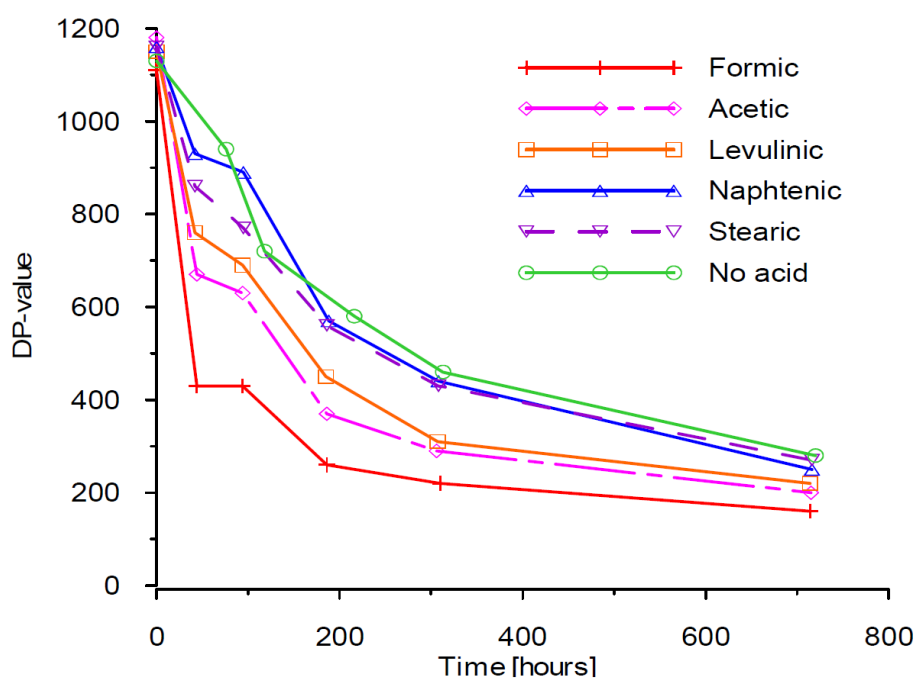
Starenje celuloze može se podijeliti na dva procesa: oksidaciju i hidrolizu. Za oba procesa brzina starenja raste s temperaturom. Postoje pokazatelji da je temperaturna ovisnost različita za ta dva procesa, pri čemu oksidacija dominira na nižim, a hidroliza na višim temperaturama.

Prvi mehanizam starenja papira je oksidacija. Oksidacijski agens u ovom okruženju je kisik iz zraka. Krajnji produkti oksidacije su isti kao kod izgaranja, tj. voda i ugljični dioksid. Međutim, mehanizam oksidacije na niskim temperaturama značajno se razlikuje od izgaranja. Kisikova koncentracija je važan parametar za određivanje brzine oksidacije. Ipak, većina eksperimenata pokazuje da brzina starenja nije snažno pod utjecajem sadržaja kisika, pa se ukupna brzina degradacije neće više nego udvostručiti kada je prisutan kisik u odnosu na njegovu potpunu odsutnost.

Drugi glavni mehanizam starenja papira je hidroliza. Značaj sadržaja vode je ključan jer vlažnost od 3-4% može povećati brzinu degradacije papira 10 puta ili više u odnosu na suh papir. To naglašava važnost procjene vlage i temperature. Novije teorije o hidrolizi sugeriraju da je taj proces kataliziran kiselinama; H<sup>+</sup> ioni iz karboksilnih kiselina disociranih u vodi

kataliziraju rezanje lanaca celuloze [11]. Budući da i hidroliza i oksidacija proizvode karboksilne kiseline i vodu, to hidrolizu čini samoubrzavajućim procesom.

Važno je napomenuti da kiseline proizvedene starenjem papira uglavnom predstavljaju nižemolekularne, hidrofilne kiseline poput mravlje, octene i levulinske kiseline, dok oksidacija ulja proizvodi većinom veće, hidrofobne kiseline poput stearinske i naftenske kiseline. Utjecaj različitih kiselina na starenje pokazuje eksperiment u kojem je pet različitih kiselina dodano u ulje do neutralizacijske vrijednosti od oko 0,4 mg KOH/g.



**Slika 10. Učinak različitih kiselina u ulju na starenje papira u mokrim uvjetima na 130 °C [12]**

Kao što se može vidjeti iz [Slika 10.], visokomolekulske kiseline ne ubrzavaju starenje, dok se kod drugih njihov utjecaj povećava s opadanjem molekulske težine. Razlog različitom utjecaju na brzinu starenja uglavnom leži u hidrofilnoj prirodi kiselina niže molekulske težine: one s nižom molekulkom težinom bolje se otapaju u papiru nego stearinska i octena kiselina.

Važnost ovih saznanja za održavanje je značajna. Supstance koje ubrzavaju starenje – voda i kiseline niske molekulske težine, bolje će se otapati u papiru nego u ulju. Stoga je uklanjanje ovih supstanci iz celuloze ono čemu bi održavanje trebalo težiti. Regeneracija ulja zasigurno će ukloniti neke od njih, ali će druge metode biti učinkovitije.

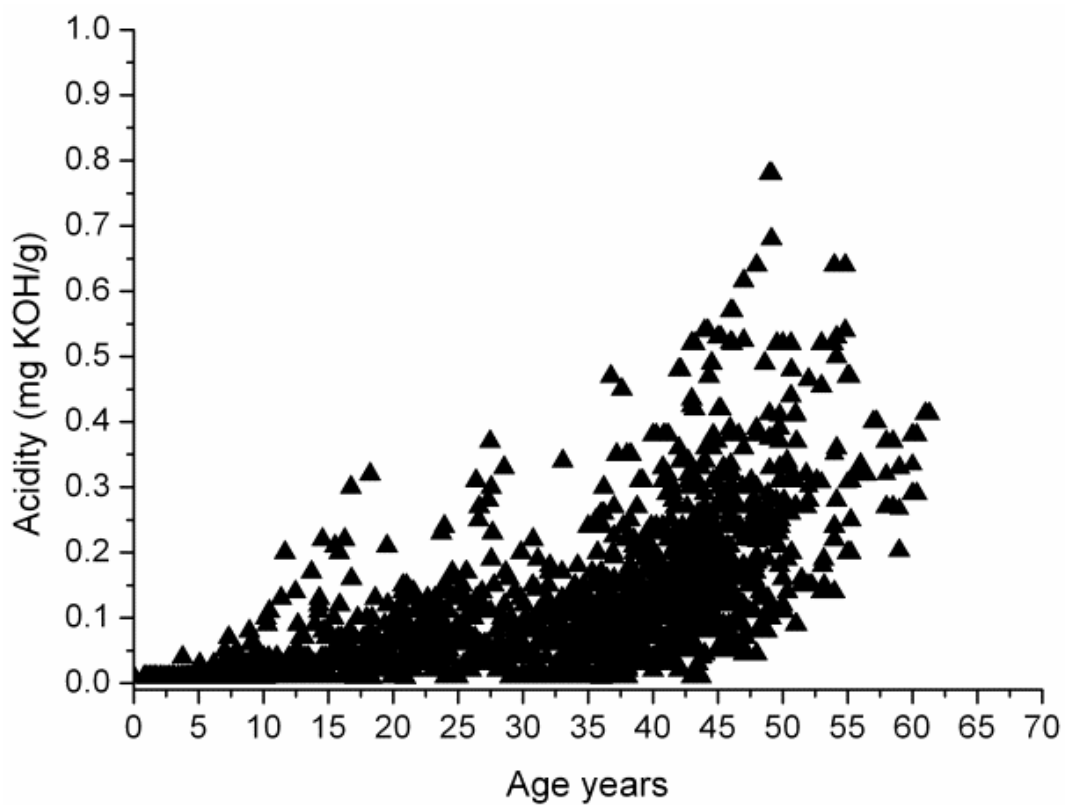
### 2.3.3. *Kemijski indikatori starenja transformatora*

Starenje utječe i na uljnu i na papirnu izolaciju u transformatoru. Učinci starenja mogu se očitovati kao kemijski nusprodukti ili mogu utjecati na osnovne električne i fizičke parametre izolacije. IEC 60422 i IEC 60554 standardi pružaju referentne točke za pomoć u procjeni stanja transformatora kroz ispitivanje svojstava ulja i papira. Uobičajeni kemijski pokazatelji starenja uključuju kiselost, sadržaj vode/vlage i furan. Uobičajeni fizički pokazatelji starenja uključuju boju ulja i DP (stupanj polimerizacije) papira. Vlačna čvrstoća je mehaničko svojstvo papira koje se također koristi za određivanje njegovog stanja.

#### 2.3.3.1. *Kiselost*

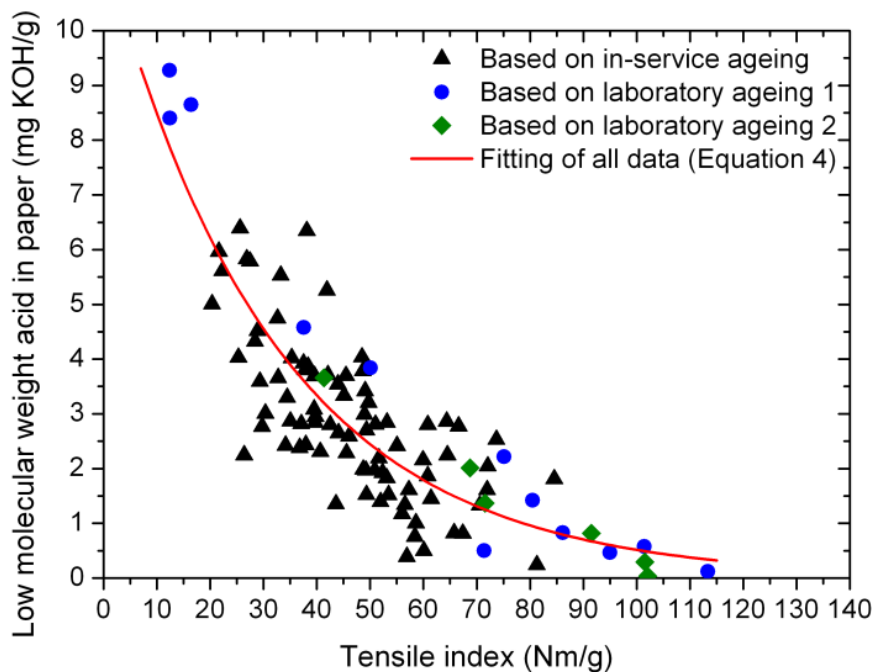
Kiselost je uobičajeni pokazatelj starenja i za ulje i za papir. Utvrđeno je da su kiseline glavni nusprodukt starenja i ulja i papira, a klasificiraju se kao LMA (niskomolekularne kiseline) i HMA (visokomolekularne kiseline). Također je utvrđeno da LMA uglavnom potječu od starenja papira, dok HMA primarno nastaju starenjem ulja. Većina LMA ostaje u papiru, dok većina HMA ostaje u ulju.

Kiselost ulja može se mjeriti prema normi IEC 62021, gdje se koristi pojam "neutralizacijski broj" (NN) ili "ukupni broj kiselosti" (TAN) kao mjerni parametar putem potenciometrijske titracije. TAN ili NN definira se kao količina kalijevog hidroksida (KOH) u mg potrebna za neutralizaciju sadržaja kiseline u 1 gramu uzorka ulja. Tipičan trend kiselosti ulja s godinama transformatora prikazan je na [Slika 11.].



**Slika 11. Tipičan trend kiselosti u odnosu na starost transformatora [13]**

Odnos između indeksa čvrstoće TI i LMA kiselina u papiru na temelju podataka prikupljenih iz stvarnih transformatora u radu te laboratorijskih eksperimenata starenja, prikazani su na [Slika 11.].

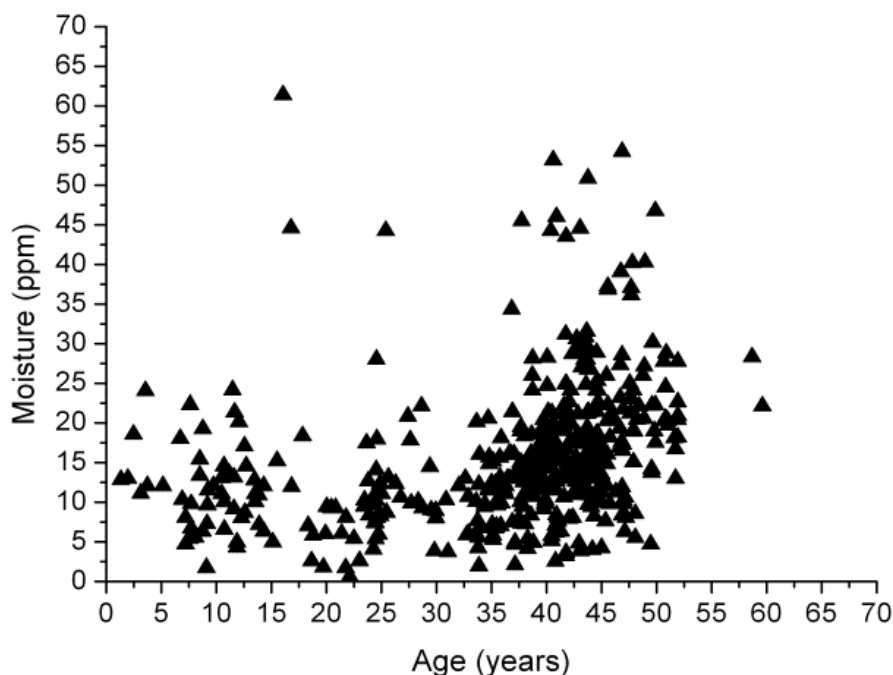


Slika 12. Odnos između TI i LMA u papiru tijekom starenja [14]

Iz [Slika 12.] možemo zaključiti da postoji opći odnos između LMA u papiru, neovisan o uvjetima starenja. Zbog karaktera samoubrzavajućeg procesa starenja, taj se odnos između TI i razvoja LMA prikazuje kao eksponencijalna krivulja.

### 2.3.3.2. Vlaga

Oksidativna degradacija ulja i hidroliza papira oba proizvode vodu. Stoga se mjerenje vlage može koristiti kao pokazatelj starenja, pod uvjetom da je unos vlage iz vanjskog okruženja u sustav pod kontrolom, odnosno da nema mehaničkih oštećenja i korozije na transformatoru te da su sušionik zraka kod otvorenih transformatora i brtve u ispravnom stanju. IEC 60814 pruža metodologiju za mjerenje sadržaja vode u ulju, koja se temelji na kulometrijskoj Karl Fischer (KF) titraciji. Statistički prikaz sadržaja vlage u ulju s obzirom na starost transformatora prikazan je na [Slika 13.].



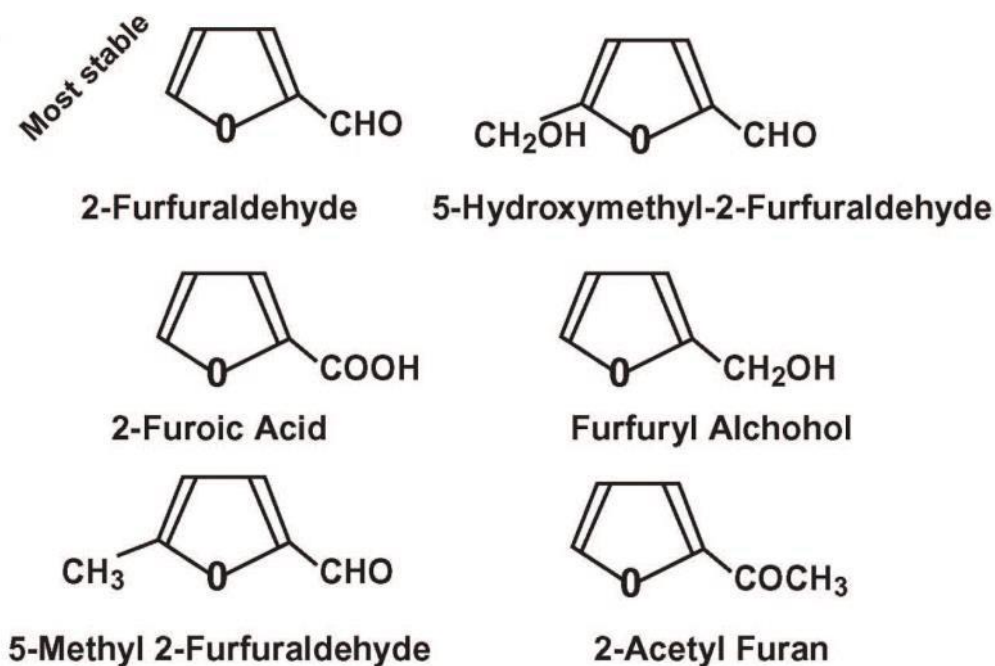
**Slika 13. Vlaga u ulju u odnosu na starost transformatora [15]**

Prisustvo visoke razine vode štetno je za integritet sustava jer smanjuje dielektričnu i mehaničku čvrstoću izolacijskog sustava, a također ubrzava starenje čvrste izolacije. Starenje ulja također dovodi do povećanja razine zasićenosti ulja, odnosno njegove sposobnosti da zadrži vodu, što može dodatno potaknuti proces starenja. Stoga, viša razina zasićenosti ulja također može ukazivati na napredniju fazu starenja.

#### 2.3.3.3. Furanski spojevi

Furanski spojevi nastaju kao rezultat cijepanja lanaca celuloze putem pirolize ili hidrolize/oksidacije. Kao jedan od primarnih proizvoda starenja papira, sadržaj furanskih spojeva može se pratiti kroz ulje. Na [Slika 14.] prikazani su glavni furanski spojevi koji nastaju pri starenju papira: 2-furaldehid (2FAL), 5-hidroksimetil-2-furaldehid (5HMF), 2-furojeva kiselina (2F), furfuralni alkohol (2FA), 5-metil-2-furaldehid (5MF) i 2-acetil furan (2AF). ASTM D5837 je standardna mjerna metoda za mjerenje furanskih spojeva pomoću visoko-účinkovite tekućinske kromatografije (HPLC).

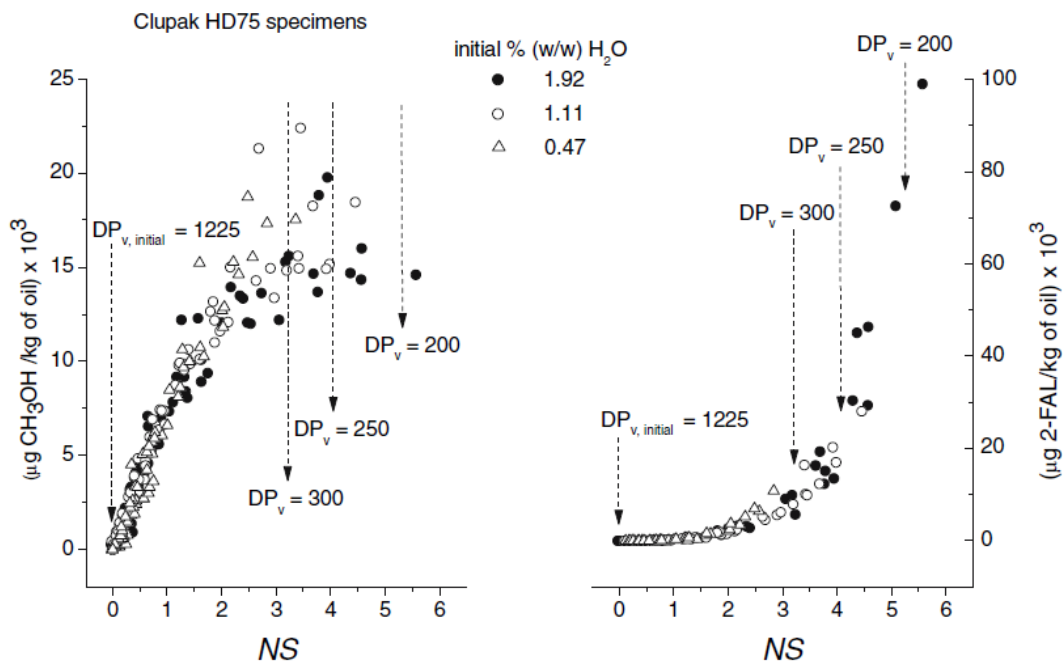




Slika 14. Furanski spojevi nastali kao proizvodi starenja papira [16]

#### 2.3.3.4. Metanol

Metanol je nedavno identificiran kao alternativni pokazatelj starenja papira. Proizvodnja metanola dokazana je kroz pokuse starenja provedene na temperaturama u rasponu od 60 °C do 130 °C, uz kontrolu početnog sadržaja vode u papiru na 0,47%, 1,11% i 1,92% u težini [17]. Uočen je gotovo linearan odnos između proizvodnje metanola i cijepanja lanaca, što je prikazano na [Slika 15.].



**Slika 15. Odnos između (lijevo) metanola i cijepanja lanaca (NS) i (desno) furanovih spojeva i cijepanja lanaca (NS) [17]**

Iz [Slika 15.] jasno je da su mjerenja metanola osjetljivija u usporedbi s analizom furanovih spojeva kada se radi o indicaciji ranog starenja papira. Furanovi spojevi pokazuju spor porast do DP vrijednosti od 400 (broj cijepanja lanaca NS = 2), a zatim eksponencijalno rastu do DP od 200. To ukazuje na to da su mjerenja 2FAL manje osjetljiva u rasponu DP od 1200 do 400, dok metanol pokazuje linearni porast do DP vrijednosti od 400. Tako se može ustvrditi da je metanol učinkoviti indikator ranog starenja u usporedbi s 2FAL.

### **2.3.4. Fizički i mehanički indikatori starenja transformatora**

Fizički i mehanički indikatori starenja transformatora uključuju gubitak fleksibilnosti papirne izolacije, pojavu pukotina ili raslojavanja u izolacijskom materijalu, degradaciju čvrstoće izolacije uslijed apsorpcije vlage i topline te promjene viskoznosti ili boje izolacijskog ulja. Neki od mjerljivih indikatora opisani su u ovom poglavlju.

#### *2.3.4.1. Boja i izgled ulja*

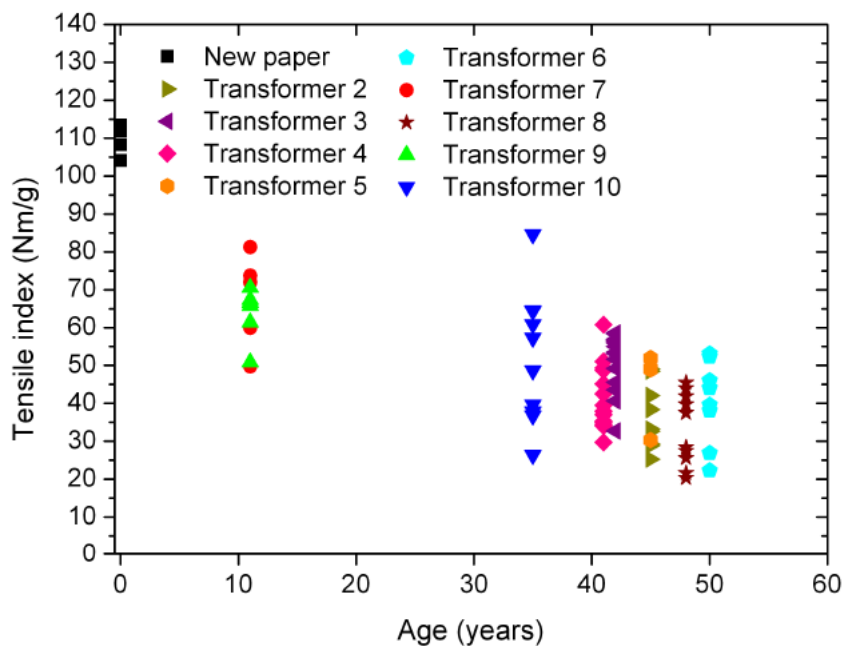
Boja i izgled mogu pružiti brz način za usporedbu uzoraka ulja, iako nisu kritični indikatori starenja. Oksidacija ulja generira hidroperokside koji naknadno uzrokuju tamnjenje boje ulja. Osim toga, drugi kontaminanti i proizvodi razgradnje također mogu utjecati na boju i izgled ulja. Boja ulja može se numerički izraziti od 0,5 do 8,0 prema ISO 2049. Visok broj boje (koji označava tamnije ulje) može ukazivati na viši stupanj razgradnje. Što se tiče izgleda, mutno ulje može biti indikativno za prisutnost vlakana, ugljika, prljavštine, slobodne vode, mulja ili drugih kontaminanata. Za transformatore u radu, inhibirana ulja obično imaju svjetliju boju u usporedbi s nehibiranim uljima iste starosti i uzorka opterećenja.

#### *2.3.4.2. Stupanj polimerizacije papira (DP)*

DP se definira kao broj veza u dugom polimernom lancu celuloze. Točnije, radi se o broju anhidro- $\beta$ -glukoznih monomernih jedinica u polimernom lancu celuloze. DP novog transformatorskog papira nakon postupaka obrade celuloze obično je oko 1000. DP papira može se mjeriti pomoću Ubbelohdeov-og viskozimetra prema IEC 60450.

#### *2.3.4.3. Vlačna čvrstoća papira (TS)*

Vlačna čvrstoća je mehaničko svojstvo papira koja pokazuje toleranciju papira na primijenjenu fizičku silu do trenutka kada dođe do loma. Zadržana vlačna čvrstoća široko se koristi za procjenu stanja papira, a može se pretvoriti u vlačni indeks (TI) dijeljenjem tenzijske čvrstoće (TS) s gramaturom papira ( $\text{g/m}^2$ ). Pokazalo se da TI papira opada s godinama, kao što je prikazano na [Slika 16.] BS 1924 daje standard za mjerenje TI papira.



Slika 16. Odnos između vlačnog indeksa (TI) i starosti [18]

Zbog savijene geometrije papira u namotu transformatora, DP se smatra prikladnijim parametrom za opisivanje svojstava papira. Također je uspostavljen odnos između DP-a i Tenzijskog indeksa (TI), kao što je prikazano na [Slika 9.].

### 3. ISPITIVANJE TRANSFORMATORA

Dijagnostika transformatora ima ključnu ulogu u sprječavanju kvarova i prekida napajanja korisnika. Omogućava planiranje održavanja i pravovremenu zamjenu transformatora, što smanjuje operativne troškove. U praksi se koriste razne dijagnostičke metode za procjenu stanja svih važnih dijelova transformatora, poput izolacije, namota, jezgre, vodiča i regulacijske sklopke. Električne dijagnostičke metode se primjenjuju na lokaciji transformatora, dok se u fizikalno-kemijskom laboratoriju analiziraju uzorci ulja i papira. Opseg dijagnostike ovisi o važnosti, snazi i starosti transformatora u mreži.

Dijagnostičke metode za utvrđivanje stanja transformatora su brojne, a primjena svih na svakom transformatoru bila bi neisplativa i dugotrajna. Zbog toga su dijagnostičke metode podijeljene u nekoliko razina primjene:

- Rutinska ispitivanja prema IEC 60076 standardu
- Prošireni opseg dijagnostike
- Specijalne dijagnostičke metode

Ovakva podjela pojednostavljuje primjenu dijagnostike. Standardni opseg se primjenjuje na sve transformatore, prošireni pri prvom puštanju u pogon ili procjeni vijeka trajanja, a specijalne metode koriste se za analizu kvara ili specifične potrebe. Ovaj pristup je fleksibilan, omogućujući povećanje standardnog opsega s napretkom dijagnostičkih tehnika.

Ovakav pristup dijagnostici energetskih transformatora pokazao se ekonomičnim i učinkovitim. Ispravni transformatori su pod redovitim nadzorom uz minimalne troškove i bez dugotrajnog isključenja. Ako se stanje pogorša ili dođe do kvara, primjenjuje se viša razina dijagnostike koja opravdava trošak smanjenjem rizika i troškova popravaka.

#### 3.1. Rutinska ispitivanja prema IEC 60076 standardu

Standardni opseg dijagnostičkih ispitivanja primjenjuje se u redovitim vremenskim intervalima tijekom vijeka pouzdanog pogona transformatora. Zadaća takvih ispitivanja je pratiti promjene stanja transformatora od njegova puštanja u pogon do trenutka ispitivanja. Ovim opsegom

ispitivanja kontrolira se izolacijski sustav transformatora, provodnici, izolacija jezgre, te spojevi i geometrija namota.

Standardni opseg dijagnostičkih ispitivanja provodi se u redovitim vremenskim intervalima tijekom radnog vijeka transformatora kako bi se pratilo njegovo stanje od trenutka puštanja u pogon pa sve do vremena ispitivanja. Ovim ispitivanjima nadziru se izolacijski sustav transformatora, vodiči, izolacija jezgre te spojevi i geometrija namota. Učestalost provođenja ovih ispitivanja ovisi o sljedećim čimbenicima:

- Važnost i naponski rang transformatora (češće se ispituju transformatori većih kapaciteta ili oni bez zamjenskih jedinica, za razliku od manje opterećenih jedinica, kao što su paralelno povezani transformatori).
- Starost transformatora (stariji transformatori zahtijevaju češća ispitivanja zbog povećane mogućnosti odstupanja i kvarova u usporedbi s novijim uređajima).
- Interni propisi za održavanje.

Standardni opseg električnih dijagnostičkih ispitivanja za transformatore s uljno-papirnom izolacijom uključuje sljedeće metode:

- Mjerenje prijenosnog omjera,
- Kontrola grupe spoja,
- Mjerenje radnog otpora visokonaponskog namota,
- Mjerenje radnog otpora niskonaponskog namota,
- Mjerenje otpora rotacije namota,
- Mjerenje struje i gubitaka praznog hoda,
- Mjerenje struje i gubitaka u kratkom spoju
- Ispitivanje induciranim naponom
- Ispitivanje stranim naponom

### 3.2. Prošireni opseg dijagnostike

Prošireni opseg dijagnostičkih metoda primjenjuje se pri prvom puštanju u pogon i tijekom eksploatacije transformatora, osobito za transformatore od veće važnosti, s ciljem procjene preostalog vijeka trajanja. Ove metode mogu se primijeniti i na bilo koji drugi transformator u sklopu posebnih istraživanja ili pri utvrđivanju uzroka kvara. Prošireni opseg dijagnostičkih ispitivanja pri puštanju u pogon uključuje sljedeće metode:

- Mjerenje kapaciteta i faktora dielektričnih gubitaka namota i izolacije provodnika,
- Mjerenje rasipnog induktiviteta,
- Mjerenje struje magnetiziranja,
- Mjerenje ovlaženosti izolacijskog sustava metodom obnovljenog napona (RVM),
- Ispitivanje dielektrične čvrstoće transformatorskog ulja,
- Određivanje stupnja polimerizacije papira,
- Kromatografska analiza ulja,

### 3.3. Specijalne dijagnostičke metode

Specijalne dijagnostičke metode predstavljaju najvišu razinu dijagnostike te, osim korištenja skupe dijagnostičke opreme, zahtijevaju i stručno obučene eksperte za pravilno izvođenje mjerenja i interpretaciju rezultata. Stoga se ove metode uglavnom primjenjuju na većim distribucijskim jedinicama ili za analizu kvarova transformatora. Neke od specijalnih metoda uključuju ispitivanje ultrazvučne aktivnosti transformatora i ispitivanje strujne ovisnosti djelatnih otpora regulacijskog transformatora.

## 4. METODE SUŠENJA IZOLACIJE

Sušenje ulja transformatora relativno je jednostavno. Ulje se ispušta iz spremnika transformatora i podvrgava procesu obnavljanja, a ako je degradirano, može se čak zamijeniti novim uljem. Nasuprot tome, sušenje čvrste izolacije nije tako jednostavno. Kako bi se uklonila voda iz čvrste izolacije, potrebno je prisiliti migraciju vode pomoću gradijenata temperature, tlaka ili relativne vlažnosti.

Čvrsta izolacija transformatora podijeljena je na tanku i debelu izolaciju. Tanka izolacija sastoji se od nekoliko slojeva kraft papira koji prekrivaju vodiče namota transformatora. Debela izolacija sastoji se od barijera od prešpan kartona smještenih između namota ili između namota i uzemljenih elemenata te odstoynika postavljenih između diskova namota. Kao što će kasnije biti objašnjeno, pravilno sušenje debele izolacije vrlo je teško i jedan je od ključnih aspekata sušenja transformatora.

Tijekom procesa sušenja, sadržaj vlage u papiru difundira prema površini papira koja je u kontaktu s uljem, gdje ga ulje apsorbira. Ovaj proces difuzije može se modelirati pomoću Fickovog zakona.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D(C, T) \times \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (2)$$

gdje su:

$D(C, T)$  - koeficijent difuzije vlage u čvrstoj izolaciji,

$C$  - koncentracija vlage,

$T$  - temperatura.

Godine 1974., Guidi i Fullerton su u svom radu [19] predložili empirijski izraz za koeficijent difuzije Kraft papira impregniranog uljem.



$$D(C, T) = D_0 \times \exp \left[ kC + E_a \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right], \quad (3)$$

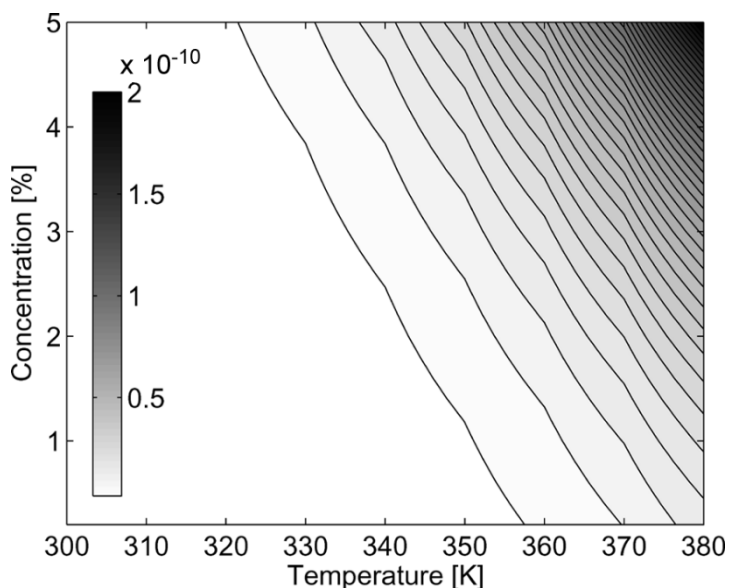
gdje su:

$D_0 = 6,44 \times 10^{-14} \frac{m^2}{s}$  - referentni koeficijent,

$k = 0,5$  - eksperimentalna konstanta,

$E_a = 7700 K$  - energija aktivacije,

$T_0 = 298 K$  - referentna temperatura.



**Slika 17. Koeficijent difuzije vlage u papiru kao funkcija temperature i koncentracije vlage (vrijednosti su u  $m^2/s$ )**

Jednadžba (3) prikazana je na [Slika 17.] za širok raspon koncentracija vlage i temperatura. Slika 17. pokazuje kako se koeficijent difuzije povećava s temperaturom i koncentracijom. Na početku procesa sušenja (pri visokim temperaturama i visokim koncentracijama vlage), koeficijent difuzije je reda veličine  $\sim 10^{-10} \frac{m^2}{s}$ .

Kako bi se modelirali procesi sušenja, potrebno je postaviti nekoliko pretpostavki:

- Difuzija vlage je vrlo spor proces, budući da voda mora prolaziti kroz čvrstu izolaciju dok ne dosegne površinu na kojoj je ulje apsorbira. Procesi prijenosa mase odvijaju se znatno sporije od procesa prijenosa topline i fluidne dinamike koji se odvijaju u transformatoru. Drugim riječima, Schmidtovi i Lewisovi brojevi u ulju su:

$$Sc_{oil} = \frac{v_{oil}}{D_{oil}} = \frac{\mu_{oil}}{\rho_{oil}D_{oil}} \gg 1, \quad (4)$$

$$Le_{oil} = \frac{\alpha_{oil}}{D_{oil}} = \frac{k_{oil}}{\rho_{oil}Cp_{oil}D_{oil}} \gg 1, \quad (5)$$

gdje su:

$v$  - kinematička viskoznost,

$\mu$  - dinamička viskoznost,

$\rho$  - gustoća ulja,

$\alpha$  - toplinska difuzivnost,

$Cp$  - specifični toplinski kapacitet ulja.

Također, ekvivalentni Lewisov broj u prešpanu je:

$$Le_{presb} = \frac{\alpha_{presb}}{D_{presb}} = \frac{k_{presb}}{\rho_{presb}Cp_{presb}D_{presb}} \gg 1 \quad (6)$$

uzimajući sada u obzir svojstva prešanog kartona.

Stoga se temperatura u cijelom transformatoru (izolacija i ulje) i polje brzine ulja mogu smatrati stabilnima tijekom prolazne difuzije vlage unutar izolacije.

- Visina aktivnog dijela transformatora obično iznosi više od jednog metra, dok je debljina izolacije u stvarnom transformatoru (čak i kod deblje izolacije) samo nekoliko milimetara. Iz toga proizlazi da su gradijenti koncentracije u poprečnom smjeru znatno veći od onih u uzdužnom smjeru ( $\frac{\Delta C}{e} \gg \frac{\Delta C}{h}$ ) i stoga se difuzija u uzdužnom smjeru može zanemariti. Problem će se, dakle, analizirati pomoću jednodimenzionalnih (1-D) modela koji predstavljaju presjeke izolacije. Dvodimenzionalne (2-D) simulacije samo povećavaju troškove računanja bez poboljšanja konačnih rezultata.

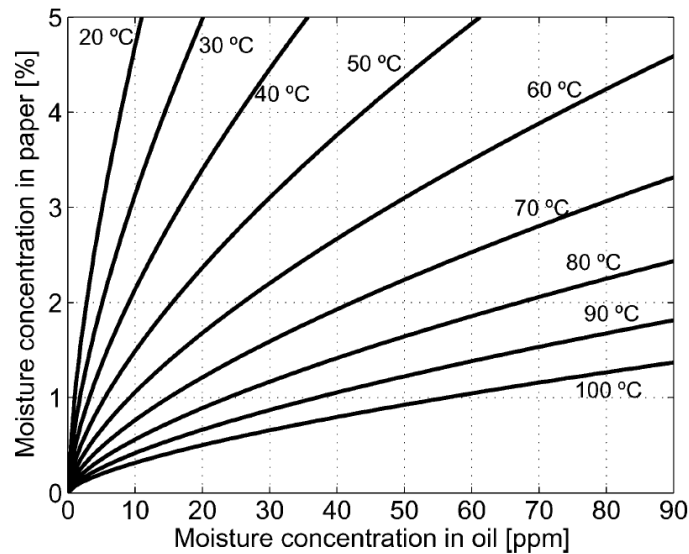
Na kraju, potrebno je definirati način na koji ulje apsorbira vlagu s površine papira. Rubni uvjet za rješavanje jednadžbe (2) razlikuje se ovisno o primijenjenoj metodi sušenja. Za sušenje transformatora mogu se koristiti različite metode. Glavne metode opisane su u nastavku.

#### 4.1. Sušenje vrućim zrakom

Nakon što se ulje ispusti iz spremnika transformatora, kroz aktivni dio transformatora prisiljava se strujanje vrućeg, suhog zraka. Zrak dolazi u kontakt s čvrstom izolacijom transformatora, izvlačeći dio vlage. Vlažni zrak se evakuira iz transformatora i hladi kako bi se kondenzirana voda izvukla iz transformatora. Zatim se zrak ponovno zagrijava i proces se ponavlja.

#### 4.2. Sušenje vrućim uljem (HO)

Ova metoda je slična prethodnoj, ali u ovom slučaju cirkulira vruće ulje umjesto zraka. Ulje transformatora ispušta se iz spremnika i obrađuje. Suho i degazirano ulje zagrijava se i prisiljava na cirkulaciju kroz aktivni dio transformatora. Kontakt između papira i vrućeg ulja uzrokuje migraciju vode iz papira u ulje, čime se smanjuje sadržaj vode u papiru. Zatim se ulje recirkulira kroz hladnu zamku gdje se apsorbirana voda kondenzira i proces se ponavlja sve dok papir transformatora ne bude dovoljno suh.



Slika 18. Oommen dijagram

U slučaju sušenja s vrućim uljem (HO), apsorpcija vode na površini ponaša se kao konvektivni proces. Izmjena vode na dodirnoj površini papir-ulje znatno je brža od procesa difuzije vlage unutar čvrste izolacije. Stoga se ravnotežna koncentracija postiže vrlo brzo na površini i ta se ravnotežna koncentracija može smatrati rubnim uvjetom za rješavanje sporije prijelazne difuzije unutar izolacije. Ravnotežna vlažnost može se dobiti iz Oommenovih dijagrama prikazanih na [Slika 18.], koji su prilagođeni odgovarajućoj jednadžbi.

$$C_{equil} = 2,173 \times 10^{-7} \times p_v^{0,6685} \times \exp\left(\frac{4725,6}{T}\right) \quad (7)$$

gdje je  $p_v$  parcijalni tlak vlage koji se može izračunati iz relativne vlažnosti ulja  $HR$

$$p_v = HR \times p_{v,sat} = \frac{ppm}{ppm_{sat}} \times p_{v,sat} \quad (8)$$

gdje su:

$ppm$  - koncentracija vlage u ulju izražena u dijelovima na milijun,

$ppm_{sat}$  - koncentracija vlage u uvjetima zasićenja,

$p_{v,sat}$  - parcijalni tlak u uvjetima zasićenja.

Parcijalni tlak zasićene vode dobiven je prema korelaciji koju je predložio Foss u [20], a koncentracija vlage može se dobiti iz sljedećeg izraza:

$$\log(ppm_{sat}) = A - \frac{B}{T} \quad (9)$$

gdje su  $A$  i  $B$  konstante prilagođene eksperimentalnim podacima [21]. U ovom radu korištene su vrijednosti  $A = 7,09$  i  $B = 1567$ .

### 4.3. Sušenje uljnom parom (HOS)

Kada je razina ulja spuštена do donjeg jarma, u transformatoru se stvara vakuum na razini između 0,6 i 0,8 mmHg. Zatim se ulje injektira s vrha spremnika u obliku prskanja kako bi se površina namota obložila. Vlažno ulje se uklanja s dna spremnika, suši i ponovno injektira u transformator dok se izolacija transformatora pravilno ne osuši. Na kraju se spremnik puni transformatorskim uljem pod vakuumom.

Kod HOS sušenja, vakuum se primjenjuje na spremnik transformatora. U tim uvjetima voda isparava s površine čvrste izolacije, apsorbirajući odgovarajuću latentnu toplinu. Brzina isparavanja na površini može se modelirati sljedećim izrazom:

$$K_w(C_s - C_{equil}) = D(C, T) \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_s \quad (10)$$

gdje su:

$C_s$  - koncentracija vlage na površini,

$C_{equil}$  - koncentracija u ravnoteži [dobivena iz jednadžbe (7)],

$K_w$  - koeficijent prijenosa mase isparavanjem

$$K_w = 2,86 \times 10^{-5} C_s \quad (10)$$

Koncentracija vode u ravnoteži je minimalna koncentracija vode koja se može postići u izolaciji i ovisi o parcijalnom tlaku vode i temperaturi. Parcijalni tlak ulja u uvjetima vakuuma je zanemariv, a parcijalni tlak vode može se približno smatrati jednakim tlaku vakuuma.

$$p_v = p_{vacuum} \quad (11)$$

Važno je napomenuti da minimalni sadržaj vode koji se može postići u izolaciji ovisi o razini vakuuma koja se može postići. Stoga je ta varijabla ključan čimbenik u učinkovitosti procesa sušenja.

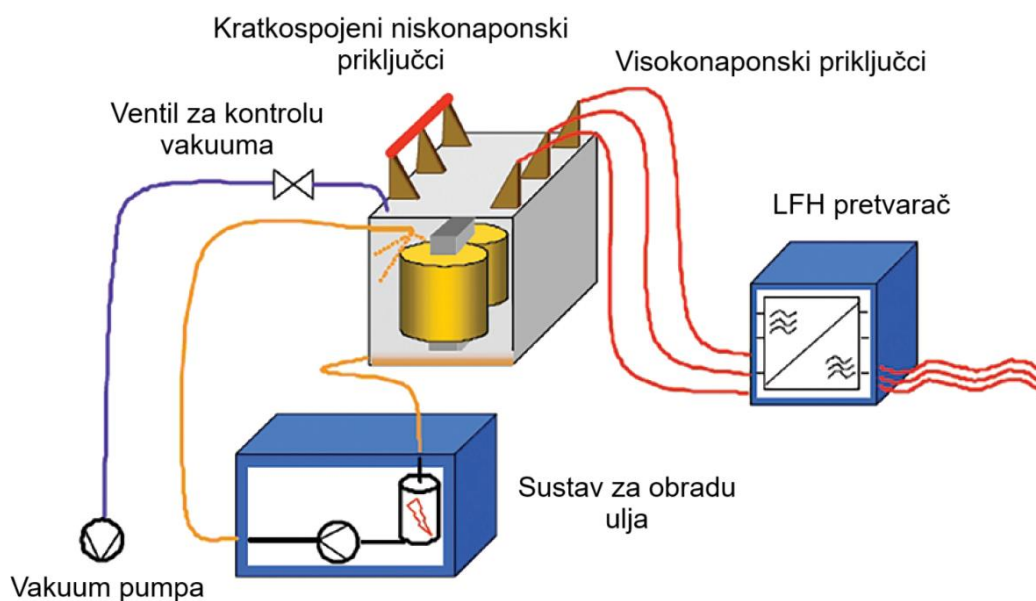
#### 4.4. Sušenje strujama niske frekvencije (LFH)

Koncept korištenja izmjenične struje za sušenje izolacijskih materijala transformatora nije nov. Godine 1963. inženjeri kompanije Westinghouse u tvornici u Sharoni, Pennsylvania, razvili su prijedlog koji je opisan kao "novi postupak za sušenje celulozne izolacije u uljem ispunjenim distribucijskim transformatorima korištenjem unutarnje topline i vakuuma". Tijekom sljedećih godina napravljeni su i drugi pokušaji primjene takvog sustava na transformatorima velikih snaga, no nisu bili uspješni zbog problema povezanih s nadzorom temperature i dugim ciklusima grijanja, osobito kada je u pitanju bila teška i debela izolacija. Ti problemi se ne javljaju ili se javljaju samo u minimalnom opsegu kod transformatora malih snaga jer imaju tanke izolacijske sustave u usporedbi s transformatorima velikih snaga. Godine 1982. inženjeri u EB National Industry u Norveškoj razvili su prethodnika sustava koji je trenutno instaliran u South Bostonu, koristeći napajanje od 20 i 50 Hz. Godine 1988. Micafil je preuzeo cijelu tehnologiju niskofrekventnog grijanja od ABB National Industry. (Godine 1988. i EB National Industry i Micafil bile su ABB kompanije).

Ova metoda uključuje zagrijavanje aktivnog dijela transformatora korištenjem topline koja se stvara u namotima kada se oni napajaju strujom (obično u rasponu od 20% do 50% nazivnog strujnog opterećenja). Za napajanje namota koristi se niskofrekventni napon u rasponu od 1 do 0,005 Hz.

Primjena niskofrekventne struje donosi dvostruku prednost. Prvo, pri niskoj frekvenciji, impedancija kratkog spoja je manja, pa je potreban napon za postizanje željene vrijednosti struje dovoljno nizak da ukloni rizik od električnog izboja, čak i ako je napon primijenjen bez ulja u spremniku transformatora. Nadalje, pri ovim frekvencijama, vrtložni gubici u namotima su zanemarivi, pa je temperatura kroz namot ujednačena.

Ova metoda omogućuje zagrijavanje izolacije do 110 °C bez opasnosti od oštećenja. Kontrola temperature može se provesti kontinuiranim praćenjem otpora namota.



**Slika 19. Konceptualni prikaz LFH postrojenja**

LFH se može kombinirati s drugim klasičnim metodama sušenja. Kao na primjer kombinacija LFH s cirkulacijom vrućeg ulja i s prskanjem vrućeg ulja (HOS). U slučaju HO plus LFH, prvo se provodi cirkulacija ulja s LFH. Zatim se ulje ispusti, a primjenjuju se ciklusi niskog vakuuma s LFH naizmjenično s ciklusima visokog vakuuma. Primjena LFH pod visokim vakuumom se ne preporučuje jer je probojni napon znatno niži pod visokim vakuumom nego pri atmosferskom tlaku, prema Paschenovom zakonu.

U slučaju HOS plus LFH, prva faza cirkulacije vrućeg ulja zamjenjuje se prskanjem aktivnog dijela transformatora vrućim uljem pod vakuumom. Svrha početne faze u oba slučaja je zagrijavanje dijelova izolacije koji nisu u izravnom kontaktu s namotima.

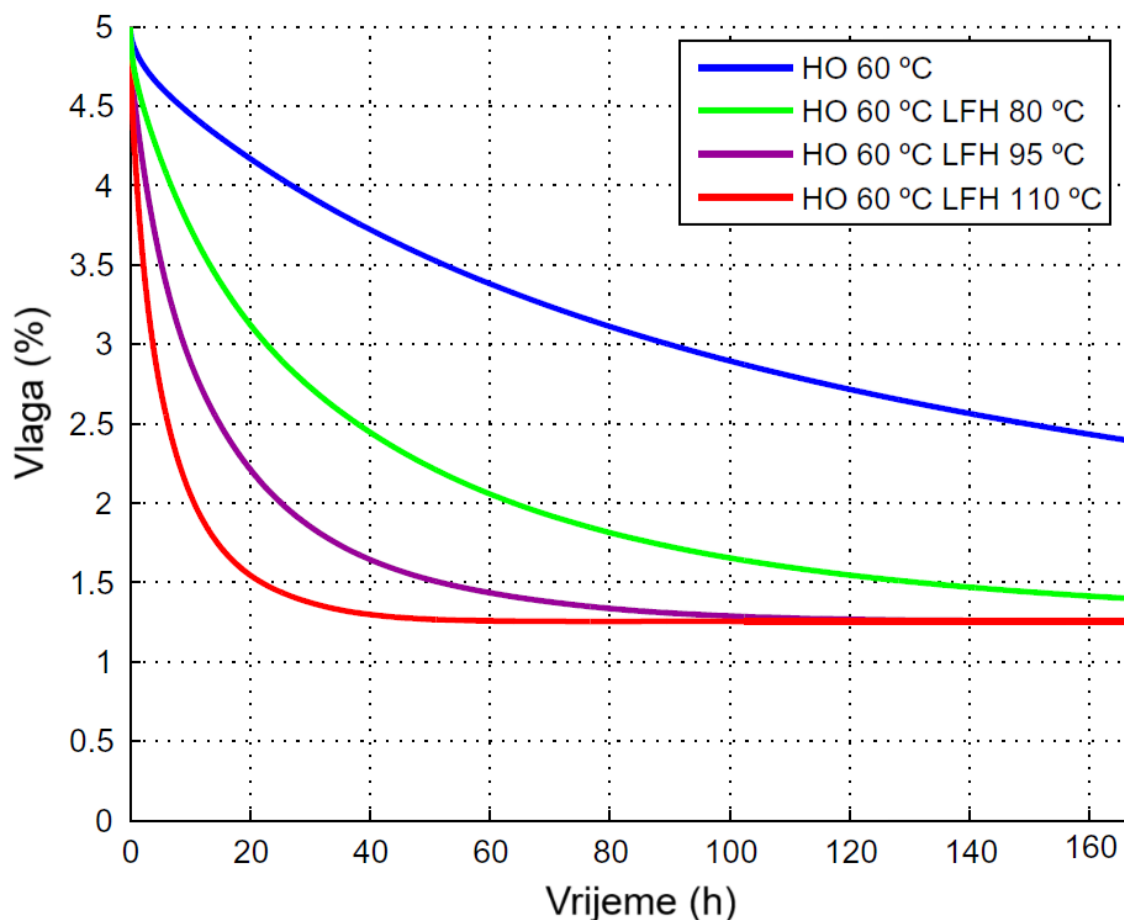
Druga slična procedura predložena je od strane Figueroe i Kalickog u radu [22]. U ovom slučaju, LFH se primjenjuje istovremeno s HOS tijekom ciklusa niskog vakuuma.

#### **4.5. Analiza simulacije sušenja**

Izvršene su simulacije kako bi se usporedilo sušenje metodom niskofrekventnog zagrijavanja (LFH) s konvencionalnim sušenjem vrućim uljem (HO). U oba slučaja program za proračun konačnih elemenata (Comsol Multiphysics v. 3.2) korišten je za rješavanje jednadžbe difuzije. Istražen je napredak postignut kada se LFH kombinira s cirkulacijom ulja. Simulacije su provedene uzimajući u obzir papir debljine 5 mm s inicijalnim sadržajem vlage od 5%. Simulirano vrijeme sušenja bilo je 1 tjedan. Simuliran je proces sušenja uz cirkulaciju ulja na temperaturama od 60°C, s primjenom i bez primjene LFH. Razmatrane su LFH temperature od 80, 95 i 110 °C za analiziranu temperaturu ulja.

Na [Slika 20.] može se uočiti napredak procesa sušenja kada se uzima u obzir cirkulacija HO na 60 °C (bez LFH) i kada se primjenjuje LFH na 80, 95 i 110 °C s istom temperaturom ulja.





**Slika 20.** Cirkulacija vrućeg ulja na 60 °C, LFH na 80, 95 i 110 °C

Kada se suši s vrućim uljem (HO) i bez niskofrekventnog zagrijavanja (LFH), nagib krivulje je glađi, a time je proces sušenja vrlo spor. To se događa zato što je na temperaturi od 60 °C koeficijent difuzije vode u izolaciji nizak, pa je kretanje vode unutar papira sporo. Prema simulacijama, konačna vlažnost postignuta u ovom slučaju iznosi 2,4% nakon tjedan dana sušenja. Također je izračunato da je potrebno vrijeme da se postigne vlažnost ispod 2% (granična vlažnost koju IEEE norma 62-1995 utvrđuje za suhu izolaciju) od 255 sati [Tablica 1.]. Ako se primijeni LFH, postiže se mnogo brže sušenje. Vrijeme potrebno za postizanje razine vlažnosti ispod 2% [Tablica 1.] se smanjuje kako temperatura izolacije raste, a postignuto je 64,5 sati za LFH na 80 °C, 25,5 sati za LFH na 95 °C i 10,7 sati za LFH na 110 °C. Ako se sušenje s LFH provodi tijekom jednog tjedna, konačne vlažnosti su 1,2%, 1,3% i 1,4% kako se temperatura LFH smanjuje za različite proučavane slučajeve [Tablica 1.]. Svi analizirani slučajevi za koje je primijenjen LFH su gotovo u stabilnom stanju nakon tjedan

dana sušenja. Usporedba različitih slučajeva je zanimljiva jer pokazuje da sušenje na niskoj temperaturi ulja s LFH može biti jednako učinkovito kao sušenje na višim temperaturama ulja bez LFH. To je također zabilježeno eksperimentalno i bit će objašnjeno kasnije.

**Tablica 1. Rezultati simulacije**

$T_{HO}$ (°C)	$T_{LFH}$ (°C)	$C_{fin}$ (%)	Vrijeme do 2% (h)
60	–	2.4	255
60	80	1.4	64.5
60	95	1.3	25.5
60	110	1.2	10.7
80	–	1.3	50.4
80	95	0.8	19.9
80	110	0.7	8.4

## 5. LFH POSTUPAK SUŠENJA TRANSFORMATORA

Pri niskim frekvencijama otporna komponenta transformatora gotovo je jednaka impedanciji jer je reaktivna komponenta zanemariva. Potrebni napon za protok nazivnog strujnog opterećenja kroz namote iznosi  $1/60$  impedancijskog napona, a potrebna snaga za zagrijavanje namota također je smanjena. Štoviše, upotrebom napajanja niske frekvencije, napon se može održavati dovoljno niskim da se tijekom faze finog vakuuma namoti mogu zagrijavati pomoću struje niske frekvencije dok se istovremeno uspostavlja vakuum u spremniku transformatora, čime se izbjegava probijanje izolacije. Za učinkovito uklanjanje vlage iz unutrašnjosti namota potrebni su visoka temperatura ( $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) i niski vakuum ( $0,2$  milibara). Kako se vlaga uklanja, temperatura opada, pa primjenom struje niske frekvencije tijekom faze finog vakuuma temperatura u namotima može se održavati na  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Uklanjanjem zraka i vlage, vakuum stvara optimalne uvjete za učinkovito uklanjanje preostale vlage iz pora i kapilara unutar izolacije.

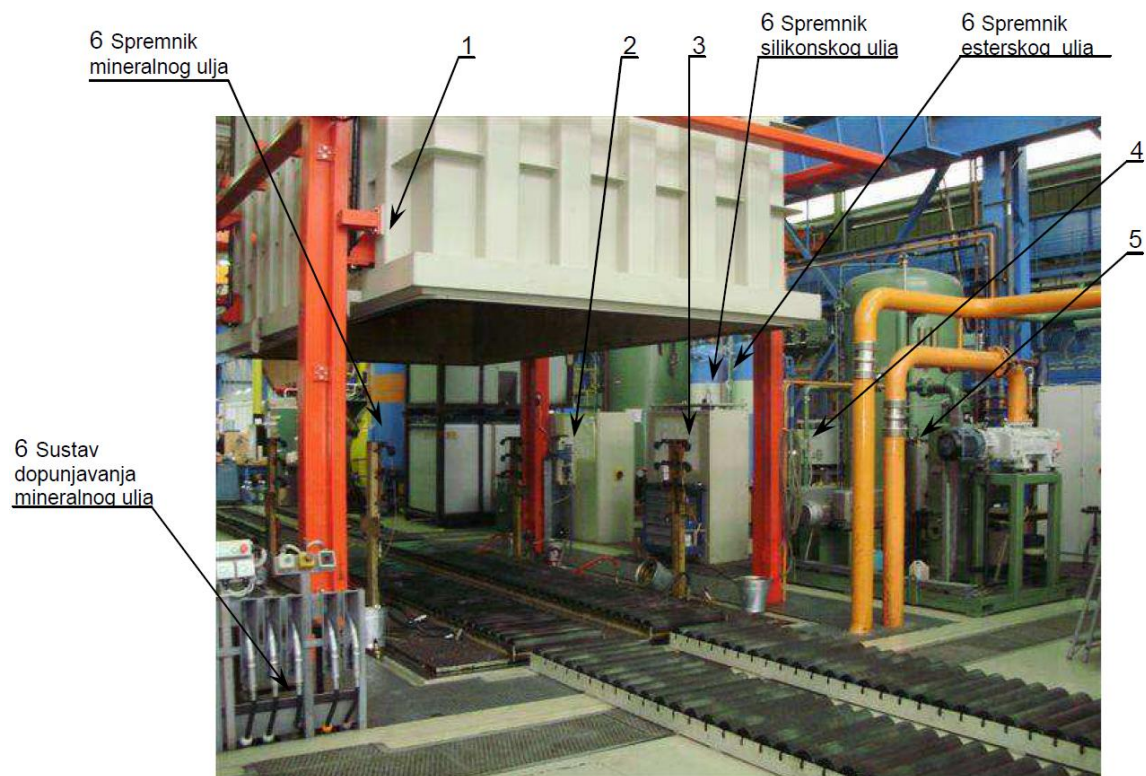
### 5.1. Opis procesa

LFH sušenje integrirani je proces koji se sastoji od sušenja, vakuumiranja i punjenja ulja pod vakuumom u jednom ciklusu pri čemu se unutrašnjost komore cijelo vrijeme vakuumira. Strujama niske frekvencije zagrijavaju se namoti u kombinaciji s upuhivanjem vrućeg zraka. Frekvencija se kreće u rasponu od  $1\text{ Hz}$  do  $0,005\text{ Hz}$  ovisno o fazi procesa. HV namoti priključeni su na izvor napajanja dok su LV namoti kratko spojeni. Proces sušenja je mikroprocesorski nadziran i upravljani, a moguće ga je voditi automatski ili ručno.

### 5.2. Tehničke karakteristike

#### 5.2.1. Dijelovi postrojenja

Osnovni dijelovi LFH postrojenja za sušenje distributivnih transformatora raspona snage od  $250\text{ kVA}$  do  $2500\text{ kVA}$  prikazani su na [Slika 21.].



Slika 21. Osnovi dijelovi LFH postrojenja

Tablica 2. Osnovi dijelovi LFH postrojenja

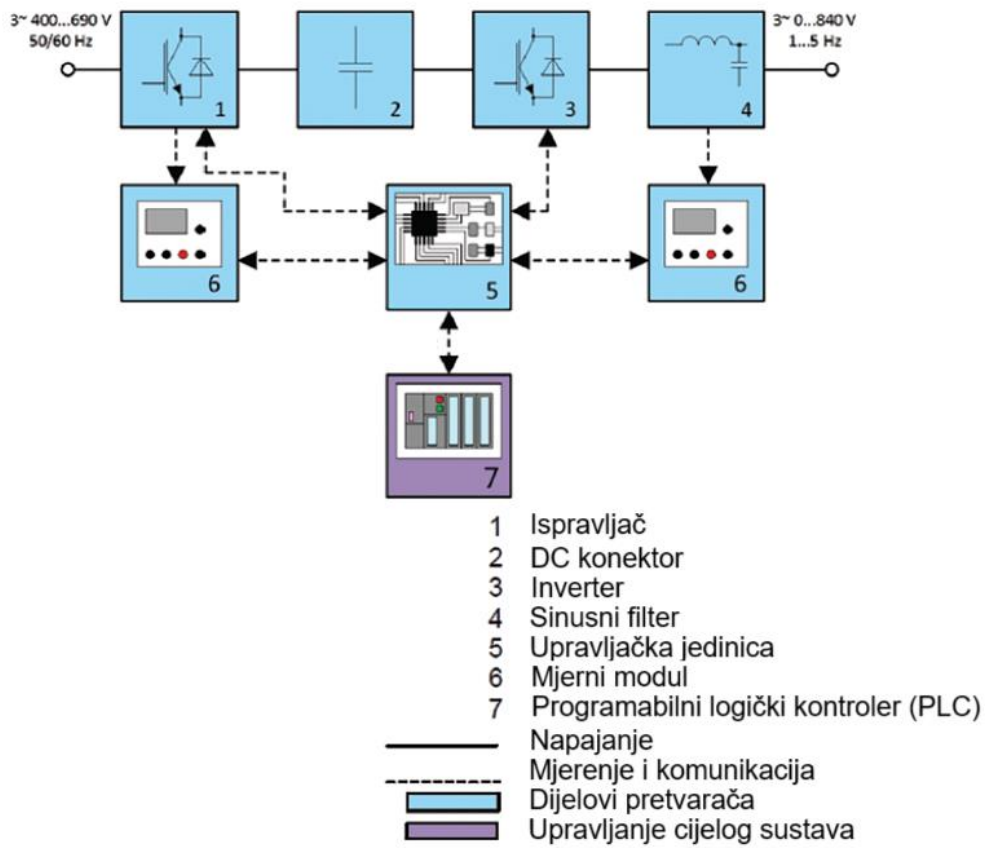
BROJ	NAZIV
1	Vakuumska komora
2	Mikroprocesorski upravljački kontrolni sustav
3	Pretvarač frekvencije
4	Rashladni sustav (izmjenjivač topline)
5	Vakuusko postrojenje
6	Sustav za punjenje, povlačenje i dopunjavanje ulja sa spremnicima ulja te pripadnim uljovodima

Vakuumska komora sastoji se od metalne konstrukcije koja se otvara pomoću elektromotora. Unutar konstrukcije nalazi se osam stanica opremljenih ispitivačkim kabelima, koji se povezuju na transformatore. Nakon spajanja kabela, upravljački sustav zatvara komoru i započinje proces sušenja izolacije. Rad sustava nadzire PLC uređaj Siemens S7-1200, dok se potrebna struja za sušenje generira pomoću pretvarača tvrtke HIGHVOLT.

Sustav koristi četiri pretvarača za napajanje, koji generiraju struju frekvencije između 1 i 0,005 Hz željene amplitude, pogodnu za sušenje transformatora. Svaki pretvarač ima zasebno napajanje te je svaka faza zaštićena prekidačem koji može prekinuti struju tijekom normalnog rada. Na izlazu pretvarača generira se niskofrekventna struja s minimalnim naponom, koja se prenosi preko ispitivačkih kabela.

Pretvarači su sastavljeni od standardnih komponenti: ispravljača, istosmjernog međukruga, izmjenjivača, filtera, upravljačke jedinice i mjernog modula [Slika 22.]. Posebnost sustava čini aktivni filter koji uklanja visokofrekventne komponente struje i napona kako bi izlazni signal imao što manja harmonička izobličenja. Ispravljač i izmjenjivač sadrže IGBT module s temperaturnim sensorima, prenaponskom zaštitom i zaštitom od kratkog spoja. Mjerni modul prati ulazne napone i izlaznu frekvenciju, dok upravljački modul upravlja svim dijelovima pretvarača, uključujući aktivni filter, hlađenje IGBT modula, te komunicira s PLC uređajem.

Parametri pretvarača konfiguriraju se putem datoteke SETTINGS.TXT pohranjene na SD kartici. Tijekom procesa sušenja, upravljački modul kontinuirano izračunava trenutnu vrijednost otpora svakog namota, što omogućuje optimalan tijek sušenja.



Slika 22. Dijelovi frekventijskog pretvarača



**Slika 23. Frekvencijski pretvarač proizvođača HIGHVOLT [HV]**

Ispitni kabeli služe za dovod potrebnog ispitnog napona i struje na transformatore. Ispitna struja ima efektivnu vrijednost od približno 200 A, pa je nužno koristiti kabele s odgovarajućim presjekom od 70 mm<sup>2</sup>. Završeci ispitnih kabela opremljeni su kukama koje se pričvršćuju na visokonaponske izvode transformatora.



**Slika 24. Priključci transformatora unutar vakuumske komore**

Kada transformatori nisu u ispitnom procesu, završeci kablova odlažu se na pripremljene panele [Slika 25.].





**Slika 25. Pultovi za ispitne kablove**

Nakon završetka sušenja izolacije, transformatori se pune uljem pod vakuumom unutar vakuumske komore. Sustav uključuje spremnike s uljem koji su povezani s pumpama za punjenje transformatora. Transformatori se automatski pune uljem nakon postizanja finog vakuuma, a proces traje dok sonda smještena na vrhu otvora za uljevanje ulja ne detektira prisutnost ulja. Tijekom cijelog postupka punjenja komora ostaje pod vakuumom.

Cijeli proces upravlja se putem PLC sustava Siemens S7-1200 i reguliranih pretvarača tvrtke HIGH VOLT. Siemens PLC 1200 predstavlja industrijski sustav upravljanja s analognim i digitalnim ulazima i izlazima. Svi procesi su vizualno prikazani i nadziru se putem HMI (engl. Human-Machine Interface) modula. Očitavanje temperature provodi se pomoću Pt100 senzora, dok se status preopterećenja motora prati putem mirnih (NC) i radnih (NO) kontakata motornih

zaštitnih sklopki. Upravljanje procesima osigurano je putem elektromagnetskih ventila i kontakata, dok se motori upravljaju putem elektromagnetskih ventila, frekvencijskih pretvarača ili specijaliziranih elektroničkih sklopova, ovisno o njihovoj funkciji. Motori u postrojenju pogone ventilator, vrata za podizanje i spuštanje komore te pumpe za cirkulaciju ulja, vakuumske predpumpe i pumpu za fini vakuum.

### 5.2.2. Tehničke karakteristike postrojenja

Tehničke karakteristike postrojenja i vakuumske komore navedene su u [Tablica 3.].

**Tablica 3. Tehničke karakteristike postrojenja**

Glavni dijelovi	Tehnički podaci	
Vakuumska komora	Korisne dimenzije	6000 x 3000 x 3000 mm
	Volumen vakuumske komore	54 m <sup>3</sup>
Frekvencijski pretvarač, HIGHVOLT LFH 200	Snaga	50 kW
	Min struja na izlazu	1 A
	Max izlazna struja	200 A
	Min izlazni napon	8 V
	Max izlazni napon	800 V
	Frekvencija (ulaz)	50 Hz
	Frekvencija izlazna	0,005 - 1 Hz
Priključni napon	3 x 400 V	

	Radna temperatura okoline	-10 do 35 °C
Vakuumsko postrojenje	Efektivna brzina ispušavanja (kod 0,3 mbar)	2500 m <sup>3</sup> /h
Kondenzator	Rashladna površina	3 m <sup>2</sup>
	Spremnik kondenzata	100 l
	Hlađenje vodom	Da
Vakumska predpumpa (pumpa za grubi vakuum)  Napomena: dvije vakuumske predpumpe	Efektivna brzina ispušavanja	300 m <sup>3</sup> /h
	Brzina pumpe	1450 o/min
	Snaga motora	5,5 kW
Roots pumpa (pumpa za fini vakuum)	Efektivna brzina ispušavanja	2880 m <sup>3</sup> /h
	Brzina pumpe	3000 o/min
	Snaga motora (3x400V)	7,5 kW
Grijač zraka	Snaga	6 kW
	Max radna temperatura	110 °C
Izlazni kondenzator	Rashladna površina	1 m <sup>2</sup>
	Spremnik kondenzata	25 l
	Hlađenje vodom	0,05 m <sup>3</sup> /h

### 5.2.3. Tehnički podaci sustava za ulje

Glavni dijelovi sustava za ulje s tehničkim podacima navedeni su u [Tablica 4.].

**Tablica 4. Tehnički podaci sustava za ulje**

Glavni dijelovi	Tehnički podaci	
Spremnik mineralnog neinhibiranog ulja	Volumen	4 m <sup>3</sup>
Spremnik mineralnog inhibiranog ulja	Volumen	4 m <sup>3</sup>
Vijčasta pumpa	Max protok	5 l/min
	Temperatura radnog medija	-10 do 150 °C
	Maksimalan tlak	70 bar
Pumpa otpadnog ulja	Protok	5 m <sup>3</sup> /h
	Broj okretaja	2850 o/min
	Snaga pumpe	0,55 kW

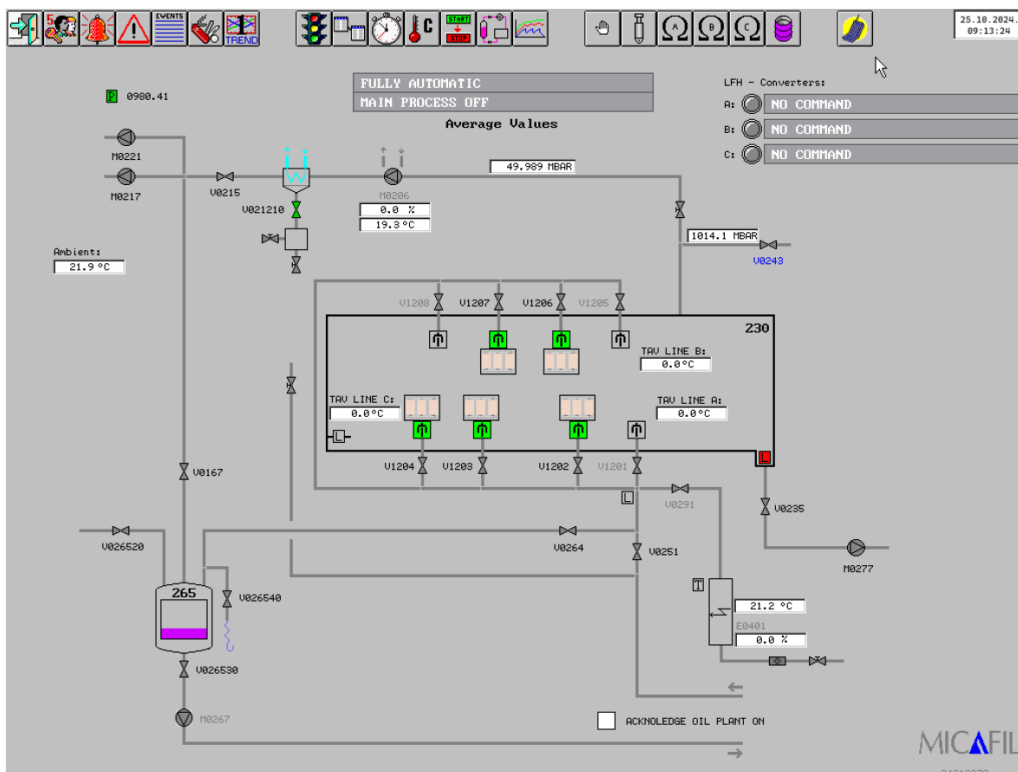
### 5.3. Shema postrojenja

Na [Slika 26.] nalazi se vizualizacija upravljačkog sustava za sušenje transformatora, razvijena unutar ABB Micafil programa. Ovaj sustav prikazuje dijelove i parametre procesa sušenja, kao i trenutne operativne statuse. Na vrhu slike naznačeno je da je sustav u automatskom režimu rada, ali glavni proces trenutačno nije aktivan, što označava poruka "FULLY AUTOMATIC, MAIN PROCESS OFF".

Lijevo je vidljiv tlak u vakuumskoj komori, prikazan kao 49.989 mbar, dok se na desnoj strani nalazi prikaz atmosferskog tlaka od 1014.1 mbar. Temperatura okoline, koja se često koristi

kao referenca, iznosi  $21.9^{\circ}\text{C}$ . Ovi podaci služe za praćenje uvjeta unutar sustava i izvan njega tijekom procesa.

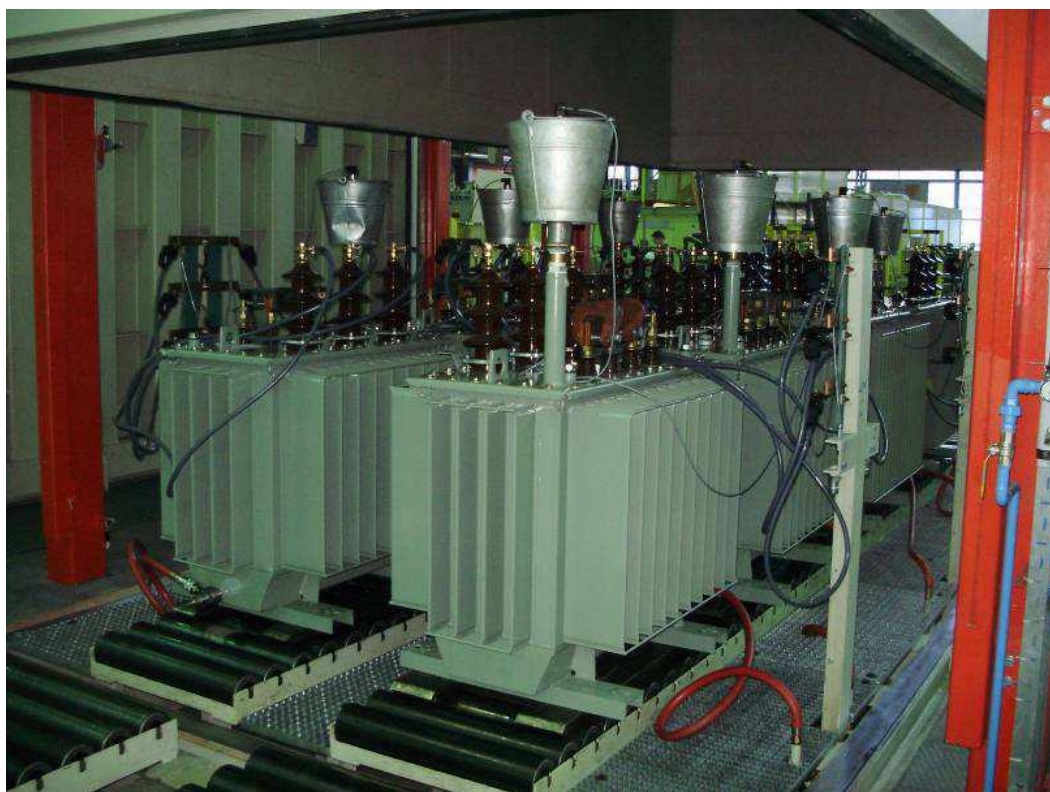
U sredini dijagrama nalaze se linije za grijanje označene kao "TAU LINE A", "B" i "C", koje su trenutno postavljene na  $0.0^{\circ}\text{C}$ , što znači da grijanje nije aktivno. LFH sustavi također nisu uključeni, što je označeno porukom "NO COMMAND" u gornjem desnom kutu. Na dijagramu su vidljivi i različiti ventili, pumpe te spremnik ulja s internom oznakom "265", što ukazuje na spremnik s mineralnim uljem.



Slika 26. Shema LFH postrojenja

#### 5.4. Priprema za sušenje

Transformatori se postavljaju na transportne vodilice pri čemu treba obratiti pozornost na pristupačnost priključaka za punjenje ulja, zatim ugurati transformatore u komoru te izvesti sva potrebna spajanja: spajanje elastičnih uljnih crijeva, električnih priključaka na HV provodnike i postavljanje nadzornika nivoa ulja na preljevnu posudu [Slika 27.].



**Slika 27. LFH postrojenje s priključenim transformatorima**

Potrebno je provjeriti položaj preklopki na svim transformatorima koji se suše. Preklopke moraju biti postavljene u položaju koji je naveden u podacima za sušenje. Preklopke u transformatorima služe za podešavanje napona transformatora tijekom rada ili prije uključivanja, ovisno o potrebama sustava. Njihova glavna funkcija je omogućiti održavanje stabilnog izlaznog napona unatoč promjenama u opterećenju ili ulaznom naponu.

Po završenom spajanju svih potrebnih priključaka izvršiti vizualnu kontrolu rasporeda transformatora i unutrašnjosti komore. Nakon postavljanja transformatora u komoru, provjeriti sva izvedena spajanja transformatora i postrojenja.

## 5.5. Unos parametara

### 5.5.1. Podaci za sušenje

Na [Slika 28.] je prikazan detaljan prikaz parametara za podešavanje i nadzor sustava. Sustav je podijeljen na tri linije, označene kao LINE A, LINE B i LINE C, koje omogućuju odvojeno upravljanje svakim transformatorom ili sekcijom sustava.

S lijeve strane prikazani su osnovni tehnički podaci vezani za transformator i uvjete sušenja. Ti podaci uključuju težinu izolacije, kapacitet transformatora, napon visokonaponskog (HV) i niskonaponskog (LV) namota, gubitke u bakru tijekom kratkog spoja, relativnu otpornost tijekom kratkog spoja, maksimalnu struju za grijanje, te vrstu materijala namota i ulja koje se koristi u transformatoru. Također se definira način spajanja namota (npr. delta ili zvijezda spoj), broj faza i količina ulja po transformatoru.

Isti se tipovi transformatora na izlaz frekvencijskog pretvarača spajaju paralelno (linije A, B i C). Transformatori spojeni na zajednički frekvencijski pretvarač mogu se napajati samo s jednom strujom sušenja istovremeno. Za uspješan postupak sušenja, transformatori napajani strujom istog pretvarača, moraju biti istih specifikacija i konstrukcije. Postrojenje sadrži 4 pretvarača koji omogućuju istovremeno napajanje strujom do 4 različita tipa transformatora. Središnji dio slike prikazuje status za svaku od triju linija (A, B, C). Za svaku liniju navedeni su ključni parametri poput nazivnog kapaciteta transformatora, napona, trenutnih gubitaka u bakru (5,93 kW), te vrijednosti struje za grijanje, koja iznosi 24.0 A. Također je jasno naznačen materijal namota (bakar) i tip spajanja. Vidljivo je da su svi sustavi spremni za rad, a operater može dodatno potvrditi ili prilagoditi postavke za svaku liniju.

Donji lijevi dio prikazuje trenutnu okolišnu temperaturu, koja je postavljena kao referenca (23,8°C). Prikazuje se i status grijanja visokog napona (HU Heating), koje je uključeno, dok sustav bilježi trajanje mjerenja i stabilizacije grijanja. Postavke također uključuju broj koraka grijanja i njihov intenzitet. Na dnu ekrana nalazi se opcija za potvrdu unosa podataka kako bi se započeo proces. Na prikazanoj slici, sučelje omogućuje korištenje prozorčića za uključivanje određenih parametara (kao što je aktivacija funkcija ili odabir opcija), ali također postoji mogućnost ručne izmjene vrijednosti u određenim poljima. Na primjer, vrijednosti poput okolišne temperature, struje za grijanje, trajanja grijanja ili broj koraka grijanja mogu se direktno unijeti ili prilagoditi unutar određenih tekstualnih polja.

**0230**

Order No.:	
Fabr. No.:	
Customer No.:	
Insulation Weight	
Transformer Capacity	630.0 kVA
Transformer Voltage HV / LV	21.0kV 420.0U
CU Losses of Short circuit test	<input checked="" type="checkbox"/> 5.93kW
Rel.ohm Short circuit Voltage	<input type="checkbox"/> 0.9 %
Max.drying Current for HU Heating	24.0 A
Max.drying Current for HU Heating	24.0 A
Winding Material Windings HV / LV	Copper Copper
Connection of Transformer HV / LV	Delta Star/Zigzag
Number of phases	AC3 R - S - T
Nominal Current connected winding	17.3 A
Amount of Oil per Transformer	360.0 L

Ambient Temp. as Reference: 23.8 °C

HU Heating ON:

HU Measurements and Heating in H:

HU Heating in Stabilization:

Converter connected to LV Windings:

Number of Heating steps in H and LV: 1 #

LINE C	LINE B	LINE A
CT 7246_1	CT 7246_1	CT 7246_1
799 799	799 764	799 762
630-24 XL1	630-24 XL1	630-24 XL1
0.3 T	0.3 T	0.3 T
630.0 kVA	630.0 kVA	630.0 kVA
21.0kV 420.0U	21.0kV 420.0U	21.0kV 420.0U
<input checked="" type="checkbox"/> 5.93kW	<input checked="" type="checkbox"/> 5.93kW	<input checked="" type="checkbox"/> 5.93kW
<input type="checkbox"/> 0.9 %	<input type="checkbox"/> 0.9 %	<input type="checkbox"/> 0.9 %
24.0 A	24.0 A	24.0 A
24.0 A	24.0 A	24.0 A
Copper Copper	Copper Copper	Copper Copper
Delta Star/Zigzag	Delta Star/Zigzag	Delta Star/Zigzag
AC3 R - S - T	AC3 R - S - T	AC3 R - S - T
17.3 A	17.3 A	17.3 A
360.0 L	360.0 L	360.0 L
U1204 U1203	U1208 U1207 U1206 U1205	U1202 U1201
<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>	1 <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1 # 1 #		

CONFIRM ENTRIES FOR START PROCESS

MICAFIL

Slika 28. Podaci za sušenje

### 5.5.2. Unos procesnih parametara

Procesni parametri LFH1 postrojenja prikazani su u [Tablica 5.], [Slika 29.], [Slika 30.] i [Slika 31.]. Nakon unosa parametara i provjere, zatvoriti vakuumsku komoru uz istovremenu vizualnu kontrolu elemenata sustava za zatvaranje.



Tablica 5. Osnovni procesni parametri sušenja

Naziv	Opis
	PARAMETRI PROCESA 230
DTAUHU_X	Dozvoljena razlika temperature, visokog napona prema srednjem naponu
	<b>FAZA „H“ (ZAGRIJAVANJE)</b>
_P010_X	Gornja granica vakuuma u fazi grijanja „H“
_P010S_X	Gornja granica vakuuma u fazi grijanja „H“ (do faze stabilizacije) (vrijedi samo za LFH2 postrojenje)
P011_X	Donja granica vakuuma u fazi grijanja „H“
_P011S_X	Donja granica vakuuma u fazi grijanja „H“ (do faze stabilizacije) (vrijedi samo za LFH2 postrojenje)
_T010_X	Srednja temperatura namota u fazi „H“ (koju treba postići)
_DT010_X	Razlika temperature za početak mjerenja VN/NN u fazi „H“
_Z010_X	Vrijeme održavanja temperature na T010 (stabilizacija)
_Z013_X	Maksimalno vrijeme za postizanje temperature veće od T010
_DT017_X	Razlika temperature za alarm maksimalne temperature u fazi „H“
_T018_X	Gornja granica za regulaciju temperature grijača zraka E0410
_Z019_X	Maksimalno vrijeme za postizanje vakuuma boljeg od P011u fazi „H“
_Z021_X	Trajanje prekida grijanja strujom u fazi „H“
	<b>FAZA „FV“ – (FINI VAKUM)</b>
_T040_X	Srednja temperatura namota koju treba postići u fazi „FV“
_DT040_X	Razlika temperature za početak mjerenja VN/NN u fazi „FV“
_DT047_X	Razlika temperature za alarm maksimalne temperature u fazi „FV“
_Z040_X	Vrijeme održavanja temperature na T040
P040_X	Vakuum za grijanje strujom u fazi „FV“
_P041_X	Finalni vakuum za prijelaz na fazu „F“
_Z043_X	Maksimalno vrijeme za postizanje srednje temp. namota >T040
_Z046_X	Minimalno vrijeme faze „FV“
_Z047_X	Maksimalno vrijeme faze „FV“
_Z048_X	Trajanje prekida grijanja strujom u fazi „FV“
_Z049_X	Minimalno vrijeme za vakuum bolji od P040 u fazi „FV“
	<b>FAZA „F“ (PUNJENJE ULJEM)</b>
P050_X	Maksimalna vrijednost vakuuma za vrijeme punjenja
_S051_X	Brzina punjenja po tr.
_S050_X	Brzina punjenja po tr. (nakon 80% punjenja ulja u tr.)
_Z050_X	Maksimalno vrijeme trajanja faze F (vrijedi samo za LFH2)
_Z051_X	Minimalno vrijeme dok je vakuum na P050 i bolji prije punjenja
_Z053_X	Pauza pred kraj faze punjenja ulja (prelazak u fazu upuštanja zraka ) (vrijedi samo za LFH1)
	<b>FAZA „AE“ (UPUŠTANJE ZRAKA)</b>
_P201_X	Potreban tlak za završetak procesa
_Z060_X	Vrijeme čekanja za otvaranje postrojenja nakon postizanja P201

25.10.2024  
10:45:34

GO TO RECORD 1

NUM	TAGNAME	DESCRIPTION	MIN.VALUE	VALUE	MAX.VALUE	ENG. UNIT
1		PROCESS PARAMETER 230				
2	_DTRHU_X	TOLERATED TEMPERATURE DEVIATION HU TO RU	1.0	5.0	20.0	°C
3		PHASE H (HEAT UP)				
4	_P010_X	HIGH PRESSURE DURING PHASE H	0.0	600.0	900.0	MBAR
5	_P011_X	LOW PRESSURE DURING PHASE H	0.0	200.0	900.0	MBAR
6	_T010_X	AVERAGE WINDING TEMPERATURE STEP 1 IN PHASE H	0.0	105.0	130.0	°C
7	_DT010_X	TEMP. DIFFERENCE TO START MEASURING HU/LU H STEP 1	0.0	5.0	30.0	°C
8	_Z010_X	TEMPERATURE HOLDING TIME AT T010	0.0	1.5	100.0	H
9	_Z013_X	MAX. TIME UNTIL AVERAGE WINDING TEMPERATURE > T010	0.0	2.0	100.0	H
10	_DT017_X	TEMP. DIFFERENCE FOR MAX. TEMPERATURE ALARM H	0.0	15.0	50.0	°C
11	_T018_X	REGULATION TEMPERATURE AIR RENEWAL	0.0	115.0	130.0	°C
12	_Z019_X	MAX. TIME UNTIL PRESSURE < P011_X IN PHASE H	0.0	1.0	3.0	H
13	_Z021_X	DURATION OF HEATING BREAK IN PHASE H	0.00	0.10	10.00	H
14		PHASE FU (FINE VACUUM)				
15	_T040_X	AVERAGE WINDING TEMPERATURE STEP 1 IN PHASE FU	0.0	120.0	130.0	°C
16	_DT040_X	TEMP. DIFFERENCE TO START MEASURING HU/LU FU STEP 1	0.0	2.0	50.0	°C
17	_DT047_X	TEMP. DIFFERENCE FOR MAX. TEMPERATURE ALARM FU	0.0	10.0	50.0	°C
18	_T040_X	TEMPERATURE HOLDING TIME AT T040	0.0	2.0	100.0	H
19	_P040_X	PRESSURE FOR LF HEATING IN FU	20.0	25.0	60.0	MBAR
20	_P041_X	FINAL PRESSURE IN PHASE FU	0.0	0.7	3.0	MBAR
21	_Z043_X	MAX. TIME UNTIL AVERAGE WINDING TEMPERATURE > T040	0.0	1.0	8.0	H
22	_Z046_X	MIN TIME PHASE FU	0.0	2.2	100.0	H
23	_Z047_X	MAX. DURATION OF PHASE FU	0.0	5.0	100.0	H
24	_Z048_X	DURATION OF HEATING BREAK IN PHASE FU	0.00	0.35	10.00	H
25	_Z049_X	MIN. TIME WHILE PRESSURE < P040 IN PHASE FU	0.0	1.0	100.0	H
26		PHASE F (OIL FILLING)				
27	_P050_X	MAX PRESSURE IN PHASE F	0.0	1.0	1050.0	MBAR
28	_S050_X	FILLING SPEED PER TRANSFORMER	0.0	4.0	100.0	L/MIN
29	_S051_X	FILLING SPEED PER TRANSFORMER (AFTER 80% OF OIL QUANT.)	0.0	3.0	100.0	L/MIN
30	_Z051_X	MIN TIME WHILE PRESSURE AT P050 BEFORE FILLING	0.0	0.5	10.0	H
31	_Z053_X	POST EVACUATION TIME IN OIL FILLING (SWITCHOVER TO AERATION)	0.0	0.1	10.0	H
32		PHASE HE (AERATION)				
33	_P201_X	PRESSURE FOR TRANSITION TO PHASE OFF	0.0	90.0	1050.0	MBAR
34	_Z060_X	WAITING TIME FOR SWITCHOVER TO OFF AFTER REACHING P201_X	0.0	0.0	30.0	MIN

230 230 A 230 B 230 C

COMH FIX

MICAFIL

Slika 29. Procesni parametri sušenja

25.10.2024  
11:03:17

GO TO RECORD 95

NUM	TAGNAME	DESCRIPTION	MIN.VALUE	VALUE	MAX.VALUE	ENG. UNIT
95		PROCESS PARAMETER 230 LINE A				
96		TEMPERATURE CONTROL LINE A				
97	_CF_START_RLX	CURRENT FACTOR USED AS A STARTVALUE LINE A	0.1	0.7	2.0	#
98	_CF_MIN_HU_RLX	MIN. CURRENT FACTOR LINE A	0.1	0.4	2.0	#
99	_CF_MIN_HU_RLX	MIN. CURRENT FACTOR FOR HU MODE LINE A	0.1	0.4	2.0	#
40	_CF_MAX_HL_RLX	MAX. CURRENT FACTOR IN HI LINE A	0.1	1.2	2.0	#
41	_CF_MAX_GL_RLX	MAX. CURRENT FACTOR IN FU LINE A	0.1	1.0	2.0	#
42	_CF_MAX_SL_RLX	MAX. CURRENT FACTOR IN STAB. LINE A	0.1	1.0	2.0	#
43	_Z020_RLX	TIME PERIODE FOR CHECKING TEMPERATURE RISE LINE A	2.0	2.0	5.0	MIN
44	_DT_Z020_HL_RLX	TEMPERATURE RISE PER MINUTE HEAT-UP LINE A	0.1	1.5	10.0	°C/MIN
45	_DT_Z020_GL_RLX	TEMPERATURE RISE PER MINUTE STAB. LINE A	0.1	1.5	10.0	°C/MIN
46	_F200_RLX	HEATING FREQUENCY OF OBJECT (HU-HEATING) LINE A	0.50	1.00	2.00	Hz
47	_F201_RLX	SATURATION FREQUENCY OF OBJECT (HU-HEATING) LINE A	0.0001	0.0100	0.1000	Hz
48	_FUOH_RLX	FACTOR UOH (HU_VOLTAGE = RU_VOLTAGE * UOH) LINE A	0.1	0.5	1.0	#
49	_TUOFFFACT_RLX	FACTOR APPLIED FOR ALARM TEMP CHANGE TOO BIG (* DT/MIN)	5.0	15.0	30.0	#

Slika 30. Parametri pretvarača i kontrola temperature

NUM	TAGNAME	DESCRIPTION	MIN. VALUE	VALUE	MAX. VALUE	ENG. UNIT
80		GENERAL PARAMETER				
81		TIMES				
82	_Z265	DRAINAGE TIME TANK 265	0.0	0.1	1.0	H
83	_Z900	DRAINAGE TIME HOSE DRAINAGE INCLUDING PRE-EVACUATION	1.0	2.0	5.0	MIN
84	_Z900E	PRE-EVACUATION TIME HOSE DRAINAGE	0.0	1.0	100.0	MIN
85		PRESSURE				
86	_P200	PRESSURE FOR STARTING ROOTS PUMP	0.0	200.0	1000.0	MBAR
87	_P532	RE-EVAPORATING PRESSURE CONDENSATOR 0212	0.0	2.0	20.0	MBAR
88		TEMPERATURES				
89	_TS10	MAX. AIR INLET TEMPERATURE AIR RENEWAL	0.0	130.0	140.0	°C
90		ELECTRICITY				
91	_DI	MAX. CURRENT DEVIATIONS BETWEEN THE PHASES (->ALARM)	0.0	15.0	1000.0	%
92	_DU	MAX. VOLTAGE DEVIATIONS BETWEEN THE PHASES (->ALARM)	0.0	15.0	1000.0	%
93	_DR	MAX. DEVIATION OF THE RESISTANCES MEASURED IN SEQUENCE (->AL)	0.0	15.0	1000.0	%
94		LINE A				
95	_Z200_A	HEATING BREAK DURATION IF TEMP. HV OR LV EXCEEDED LINE A	0.0	30.0	1000.0	MIN
96	_Z203_A	MAX. HV HEATING TIME LINE A	0.0	0.5	1000.0	H
97	_HUTIMEOUT_A	MAX. TIME FOR ALARM IN HV MEASURING HEATING 1/6 PERIODE (S,	0.0	300.0	1000.0	S
98	_DEHAGTIME_A	DURATION OF DEHAGNETISING ON NOMINAL CURRENT * CF (VALUE < 1	0.0	0.0	600.0	S
99		LINE B				
100	_Z200_B	HEATING BREAK DURATION IF TEMP. HV OR LV EXCEEDED LINE B	0.0	30.0	1000.0	MIN
101	_Z203_B	MAX. HV HEATING TIME LINE B	0.0	0.5	1000.0	H
102	_HUTIMEOUT_B	MAX. TIME FOR ALARM IN HV MEASURING HEATING 1/6 PERIODE (S,	0.0	300.0	1000.0	S
103	_DEHAGTIME_B	DURATION OF DEHAGNETISING ON NOMINAL CURRENT * CF (VALUE < 1	0.0	0.0	600.0	S
104		LINE C				
105	_Z200_C	HEATING BREAK DURATION IF TEMP. HV OR LV EXCEEDED LINE C	0.0	30.0	1000.0	MIN
106	_Z203_C	MAX. HV HEATING TIME LINE C	0.0	0.5	1000.0	H
107	_HUTIMEOUT_C	MAX. TIME FOR ALARM IN HV MEASURING HEATING 1/6 PERIODE (S,	0.0	300.0	1000.0	S
108	_DEHAGTIME_C	DURATION OF DEHAGNETISING ON NOMINAL CURRENT * CF (VALUE < 1	0.0	0.0	600.0	S
109		GSH PARAMETERS				
110	_Z999	TIME BETWEEN GSH-NOTIFICATIONS	0.0	10.0	120.0	MIN

Slika 31. Generalni parametri

Proces sušenja automatski je proces s unaprijed zadanim kriterijima i provodi se u nekoliko faza. Za vrijeme čitavog procesa unutrašnjost vakuumske komore LFH postrojenja se vakumira. Na [Slika 32.] vizualiziran je proces sušenja transformatora, podijeljen u pet glavnih faza: M (mjerjenje), H (zagrijavanje), FV (fino vakuumiranje), F (punjenje ulja pod vakuumom) i E (upuštanje zraka). Dijagram prikazuje parametre koji se nadziru i upravljaju tijekom svakog koraka procesa, uključujući temperaturu, vakuum, faktor struje i frekvenciju.

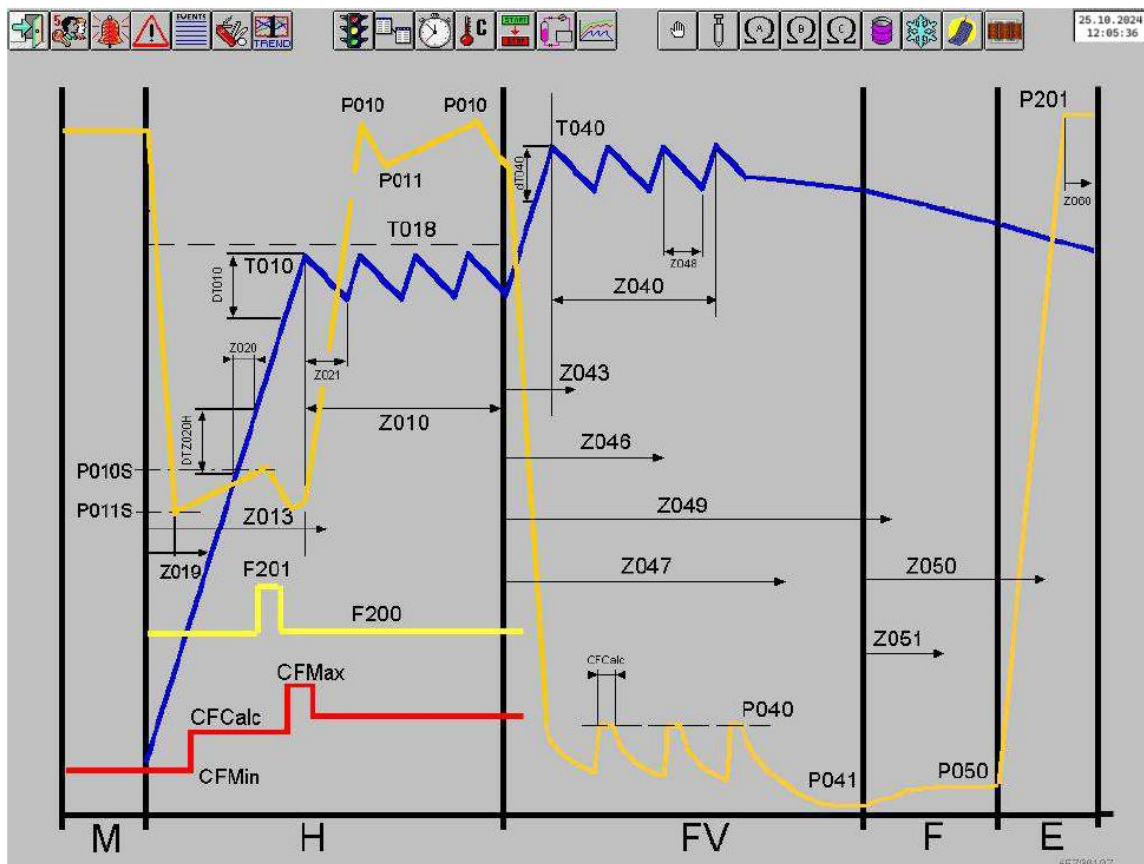
Plava linija predstavlja srednju temperaturu namota transformatora. Tijekom faze H (zagrijavanje), temperatura se značajno povećava zbog prolaska struje kroz namote, što omogućuje isparavanje vlage iz izolacije. U kasnijim fazama, poput FV i F, temperatura se stabilizira ili smanjuje, dok proces prelazi na održavanje vakuuma i pripremu za završetak sušenja.

Tamno žuta linija prikazuje tlak u sustavu, odnosno razinu vakuuma unutar komore. U fazi M tlak je relativno visok jer proces još nije počeo. Tijekom FV faze tlak se progresivno smanjuje kako vakuum raste, čime se osigurava učinkovito uklanjanje vlage i nečistoća iz transformatora.

Svijetlo žuta linija označava frekvenciju sustava, koja prati prilagodbe tijekom procesa. U fazama M i H frekvencija se može mijenjati kako bi se postigli odgovarajući uvjeti grijanja. U kasnijim fazama, poput FV i F, frekvencija se stabilizira jer grijanje više nije aktivno, a fokus se prebacuje na održavanje vakuuma.

Crvena linija na dijagramu predstavlja faktor struje grijanja namota CF, koji definira omjer struje u namotima u odnosu na unaprijed zadane minimalne i maksimalne granice (CFMin i CFMax).

Faktor struje, varira tijekom faze H (zagrijavanje) i koristi se za preciznu regulaciju procesa grijanja namota transformatora. U fazi H, koja je ključna za uklanjanje vlage iz namota, struja kroz namote aktivno prolazi kako bi generirala toplinu i potaknula isparavanje vlage. Nakon faze H, u kasnijim fazama poput FV (Fine Vacuum) i F (Final), faktor struje više nije aktivan jer se fokus prebacuje na održavanje vakuuma i hlađenje.



Legenda:

- tlak (vakuuma)
- srednja temperature namota
- faktor struje
- frekvencija

Slika 32. Dijagram procesa

## 5.6. Faza mjerenja

Nakon upisivanja osnovnih parametara transformatora iz podataka za sušenje te izvedenog spajanja transformatora i spuštanja vakuumske komore može se pokrenuti faza mjerenja.

Na početku procesa mjere se omski otpori namota U-I metodom kako bi se dobile referentne vrijednosti otpora budući se temperatura namota u nastavku procesa određuje iz promjene otpora.

$$R(T) = R_0[1 + \alpha(T - T_0)], \quad (13)$$

gdje su:

$R(T)$  - električni otpor pri temperaturi  $T$ ,

$R_0$  - početni otpor pri referentnoj temperaturi  $T_0$  (obično 20°C),

$\alpha$  - temperaturni koeficijent otpora,

$T$  - temperatura na kojoj želimo izračunati otpor,

$T_0$  - referentna temperatura (obično 20°C).

Temperaturni koeficijent otpora  $\alpha$  izražava koliko se otpor mijenja s promjenom temperature. To je fizička konstanta koja ovisi o vrsti materijala. Koeficijent je pozitivan za većinu metalnih materijala, što znači da se njihov otpor povećava s porastom temperature.

Temperaturni koeficijenti za bakar su  $\alpha_{Cu} = 0.00393 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , a za aluminij  $\alpha_{Al} = 0.00429 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

Nakon uspostave ravnotežnog stanja očitaju se napon i struja te izračuna otpor namota. Kod transformatora s regulacijom napona se proračunom određuju otpori namota u svakom položaju regulacije, te razlike između otpora susjednih položaja regulacije koje bi trebale biti gotovo identične na čitavom opsegu regulacije. Rezultati mjerenja otpora namota su temperaturno ovisni, te je radi usporedbe dvaju mjerenja potrebno izmjeriti temperaturu transformatora tijekom mjerenja. Temperature se mjere kontaktnim termometrom na kotlu transformatora. Ukupno se mjeri osam temperatura na većim stranama kotla (po dvije temperature gore i dvije dolje, odnosno metar od poklopca i dna kotla). Radi analize, dobivene rezultate mjerenja treba preračunavati na 20°C (praktično za mjerenja na terenu) ili 75°C (radi usporedbe s tvorničkim mjerenjima) prema (12):

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{k + \vartheta_2}{k + \vartheta_1} \quad (14)$$

gdje su  $R_1$  i  $R_2$  otpori namota pri temperaturama  $\vartheta_1$  i  $\vartheta_2$ , a  $k$  veličina koja za bakar iznosi 235, a za aluminij 225 [1].

## 5.7. Faza zagrijavanja

Namoti se mogu zagrijavati srednjom temperaturom zagrijavanja ili HV zagrijavanjem. Ukoliko se zagrijavaju srednjom temperaturom zagrijavanja, tada se HV i LV namoti zagrijavaju.

Namoti se zagrijavaju strujom niske frekvencije F200 (oko 1 Hz) u kombinaciji s upuhivanjem vrućeg zraka do temperature 105°C. Za vrijeme zagrijavanja u svaki transformator se upuhuje vrući suhi zrak da ne bi došlo do kondenzacije vlage na hladnim dijelovima transformatora i pojave korozije.

Ukoliko se HV zagrijava, tada se samo HV namot grije. To se postiže snižavanjem frekvencije kako bi se uklonila uzbudna struja u LV namotu.

U fazi zagrijavanja cilj je postići ravnomjernu temperaturnu distribuciju u izolaciji unutar određenog vremena Z010 [Slika 32.] (1,5 sati). Namoti se konstantno griju i vakuumiraju do tlaka P011S, a zatim se preko grijača upuhuje vrući suhi zrak dok tlak ne naraste na P010S. Zatim se vakuumira uz konstantno grijanje kako bi se tlak smanjio na P011S. Upuhivanjem suhog vrućeg zraka tlak raste, a vakuumiranje prestaje.

Proces se ponavlja dok se ne postigne temperatura T010 (105°C), a onda će tlak u fazi stabilizacije varirati između P010 i P011. Kada su namoti zagrijani na T010, prestaje zagrijavanje, a nakon što temperatura padne ispod T010 i prođe pauza u grijanju Z021, ponovno počinje zagrijavanje upuhivanjem vrućeg zraka.

Ciklusi se izmjenjuju dok se ne postigne zadano vrijeme stabilizacije Z010.

Cilj faze stabilizacije je ukloniti što je više moguće vlage iz izolacije pri relativno niskoj temperaturi. Kako bi se osigurala bolja kvaliteta sušenja i smanjilo vrijeme sušenja transformator će se vakuumirati određeno vrijeme Z021 bez zagrijavanja.

U slučaju da je HV zagrijavanje izabrano, nekoliko stupnjeva (DT010, obično 5 stupnjeva) prije dostizanja temperature T010 frekvencija pretvarača snižava se s 1 Hz na F201 (obično između 0,01 i 0,005 Hz). Temperatura HV namota i LV namota će se odvojeno izmjeriti. HV namot se nakon toga može posebno zagrijavati, u slučaju da je temperatura HV namota niža od temperature LV namota. HV mjerenje prije dostizanja temperature T10 započinje kada je  $T =$

T010-DT10. Nakon postizanja vremena stabilizacije Z010 i postizanja temperature T010, započet će sljedeća faza.

### 5.8. Faza finog vakuumiranja

Istovremeno se zagrijavaju namoti upuhivanjem vrućeg zraka na prosječnu temperaturu namota T040 (120°C) i snižava tlak u komori. Za vrijeme ove faze preostala vlaga će ispariti iz celulozne izolacije i kondenzirati će se u kondenzatoru vakuumskeg postrojenja. Nakon što se postigne prosječna temperatura namota T040 započinje vrijeme stabilizacije Z040 (2 sata) odnosno treba omogućiti 4 dogrijavanja kako bi se postigla jednolika temperatura u izolaciji. Nakon što se postigne temperatura T040 zagrijavanje će se zaustaviti dok ne prođe vrijeme Z048, a tlak će se smanjivati koliko god je moguće. Zaustavlja se vakumiranje, a upušta se vrući zrak do iznosa P040 (25 mbar) te se nastavlja dogrijavanje namota do temperature T040. Ciklusi se izmjenjuju dok se ne postigne vrijeme Z040. Zatim se vakuumira komora do tlaka P041 (0,7 mbar). Namjena vremena Z040 je postići jednoliku temperaturu u izolaciji. Nakon završetka faze finog vakuuma započet će automatski faza punjenja ulja.

### 5.9. Faza punjenja ulja pod vakuumom

Nakon postizanja finog vakuuma, transformatori se automatski pune mineralnim uljem uređajem za obradu ulja Micafluid VOP030 [Slika 33.]. Vakuumska komora se za vrijeme punjenja cijelo vrijeme vakuumira. Proces punjenja se zaustavlja kad sonda, smještena na vrhu otvora za nadolijevanje ulja, detektira ulje.



Slika 33. Uređaj za obradu ulja VOP030 Micafluid



### **5.10. Upuštanje zraka**

Nakon završetka punjenja ulja otvara se ventil za upuštanje zraka kako bi se izjednačio tlak u komori s atmosferskim tlakom. Nakon toga se otvara vakuumska komora, povlači višak ulja, odspajaju priključci te se transformatori transportiraju do ispitne stanice.

## 6. ANALIZA PERFORMANSI SUSTAVA

Tri različita postupka sušenja ispitana su na eksperimentalnom transformatoru. Sva tri postupka uključivala su početno sušenje pod vakuumom (VD) te drugi period cirkulacije toplog ulja (HO). U drugom i trećem postupku sušenja, LFH je primijenjen na transformator istovremeno s HO i VD. Vakuum u trećem postupku sušenja bio je blag (0,6 bara), kako se ponekad koristi kod transformatora koji ne mogu podnijeti visoki vakuum (1 mbar) u spremnicima.

Između završetka jednog postupka sušenja i početka sljedećeg, transformator je bio izložen zraku osam dana kako bi se navlažio. Prije početka i nakon završetka svakog postupka sušenja, uzeti su uzorci izolacije s više točaka na transformatoru. Uzorci su analizirani u laboratoriju kako bi se odredio njihov sadržaj vlage.

### 6.1. Karakteristike transformatora

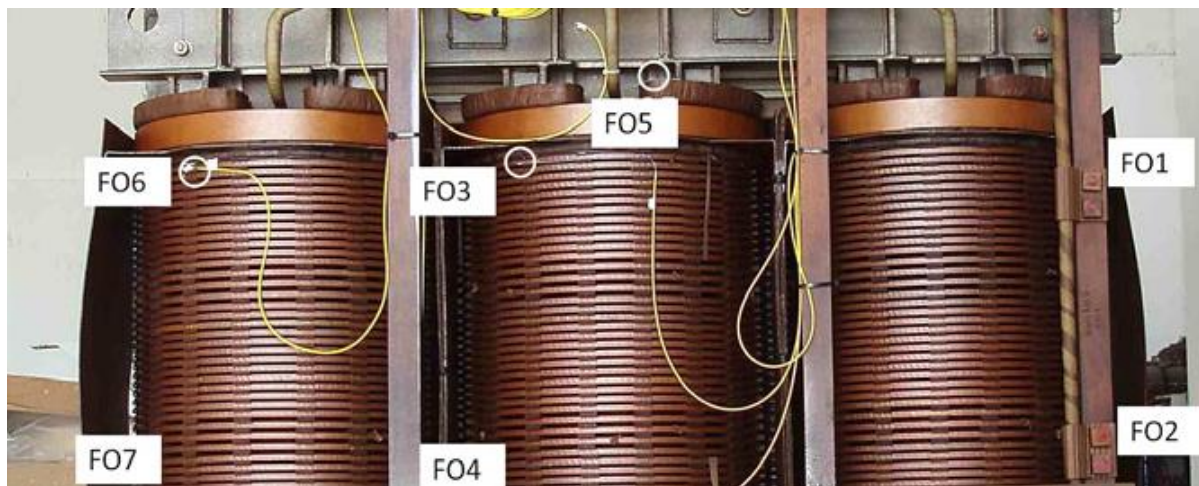
Eksperimentalni transformator bio je stvarna jedinica proizvedena 1967. godine. Transformator je isključen iz pogona zbog starosti i nedovoljne nazivne snage u odnosu na tadašnje potrebe za električnom energijom. Karakteristike transformatora su sljedeće:

- Snaga: 5000 kVA.
- Primarni/sekundarni napon: 45 000/15 000 V.
- Primarna/sekundarna struja: 64,2/192,5 A.

Za bilježenje promjena temperature tijekom procesa sušenja unutar transformatora postavljeno je sedam Pt100 sondi s mjernim rasponom od -70 °C do 200 °C. Pt100 sonde su vrste temperaturnih senzora koji koriste platinasti otpornik za mjerenje temperature. Riječ "Pt" označava platinasti materijal, dok broj "100" označava da je otpor senzora pri 0 °C točno 100 ohma. Ovi senzori se široko koriste u industriji i laboratorijskim uvjetima zbog svoje visoke točnosti, stabilnosti i pouzdanosti.

Princip rada Pt100 sonde temelji se na činjenici da otpor platine raste s porastom temperature. Za precizno mjerenje temperature, Pt100 koristi svoj temperaturni koeficijent otpora, koji je vrlo stabilan, što omogućuje precizna očitavanja čak i pri visokim temperaturama.

Sonde su postavljene u gornjem i donjem dijelu namota, u kontaktu s tankom izolacijom. Jedna sonda (FO5) također je instalirana u kontaktu s pločom od prešpan kartona smještenom na vrhu transformatora, kao što je prikazano na [Slika 34.].



**Slika 34. Pozicije sonde za mjerenje temperature**

## 6.2. Konvencionalna metoda sušenja

### 6.2.1. Sušenje pod vakuumom

Ulje u transformatoru je ispušteno, a visok vakuum je primijenjen u spremniku transformatora tijekom 24 sata. Razina vakuuma održavana je na vrijednosti ispod 1 mbar. Tijekom tog vremena, ulje je izvan transformatora bilo podvrgnuto procesu degaziranja i sušenja. Aktivni dio transformatora nije bio zagrijavan u ovoj fazi postupka, pa je temperatura ostala na razini okolnih vrijednosti (22–25 °C). Temperatura zabilježena tijekom prve faze sušenja prikazana je na [Slika 35.]. Raspodjela temperature bila je vrlo ujednačena kroz cijeli transformator jer su različite sonde zabilježile vrlo slične vrijednosti.

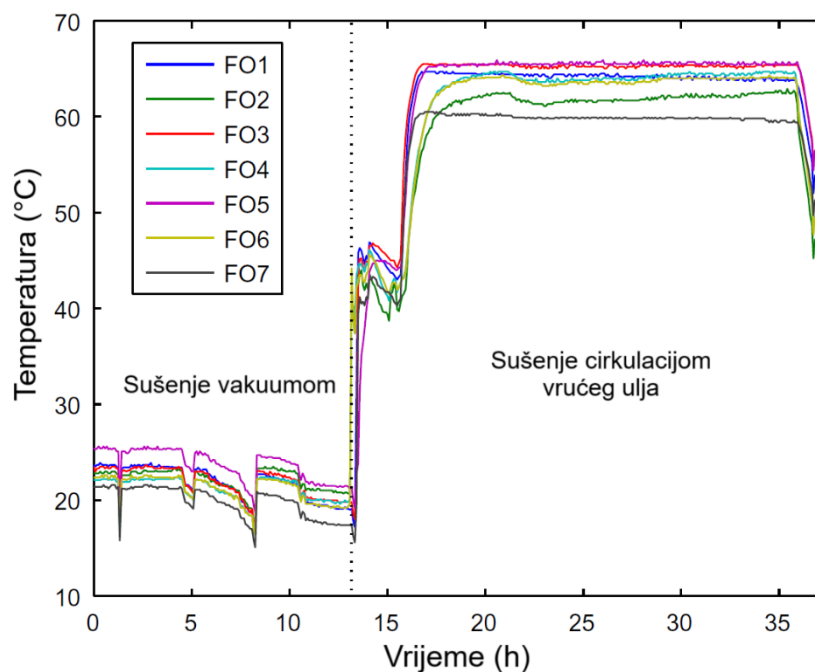
### 6.2.2. Sušenje cirkulacijom vrućeg ulja

Vruće, suho ulje prisilno je kružilo kroz aktivni dio transformatora. Zatim je ponovno cirkuliralo kroz uređaj za tretiranje ulja, gdje je ulje zagrijano, osušeno i degazirano. Na kraju je ponovno vraćeno u spremnik transformatora. Na početku faze, prvih par sati, temperatura ulja je postavljena na 45 °C kako bi se ujednačila temperatura izolacije. Zatim je temperatura ulja na izlazu iz opreme za tretiranje ulja postavljena na 65 °C. Cirkulacija vrućeg ulja trajala

je 24 sata pri protoku od 3000 litara na sat. Temperatura unutar transformatora tijekom tog razdoblja također je bila prilično homogena [Slika 35.].

Prije početka konvencionalnog postupka sušenja, uzeti su uzorci izolacije iz transformatora. Ovi uzorci analizirani su u laboratoriju metodom Karl Fischer titracije [23]. Početni sadržaj vlage bio je približno 7% u papiru i 2% u prešanoj ploči. Rezultati analize vlage u uzorcima prikazani su u [Tablica 6.]. Uzorci su ponovno uzeti na kraju postupka kako bi se odredilo smanjenje vlage postignuto tijekom sušenja.

Također su uzeti uzorci papira s vodiča koji povezuju visokonaponski (HV) namot s izolatorom transformatora u sve tri faze. Debljina izolacije tih vodiča iznosila je 12 mm (što je utvrđeno tijekom rastavljanja transformatora nakon eksperimenata), ali za Karl Fischer test uzeta su samo dva sloja papira.



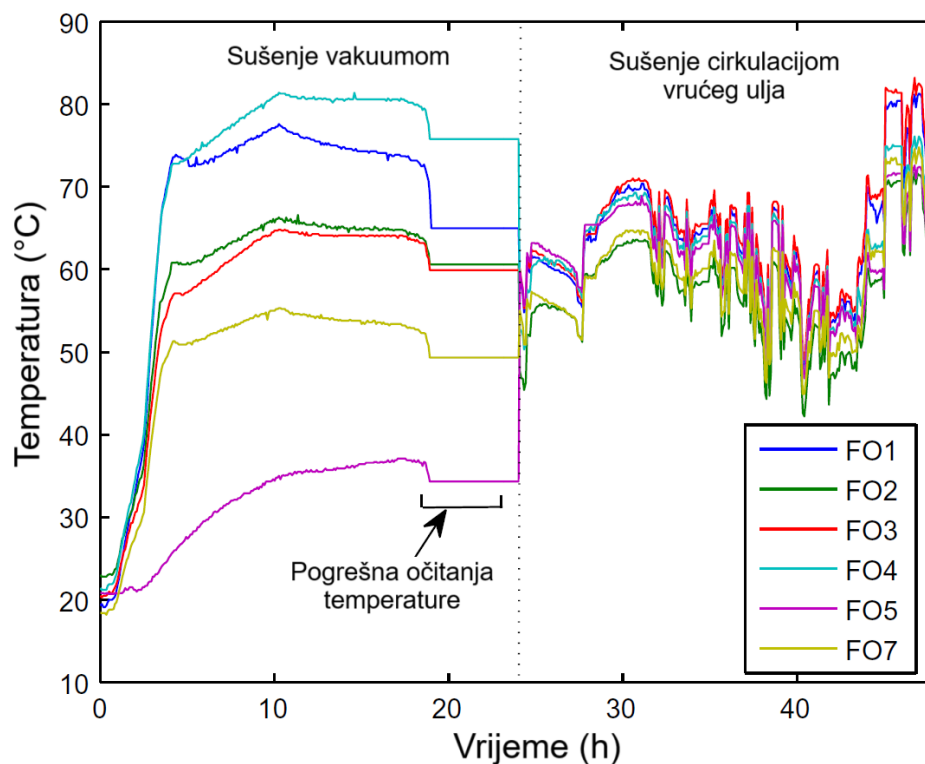
**Slika 35. Razvoj temperature tijekom prvog postupka sušenja**

Razdoblje sušenja vakuumom (VD) trajalo je 24 sata. Međutim, tijekom prvih sati procesa sušenja vakuumom, temperatura nije bila zabilježena.

### 6.3. Sušenje visokim vakuumom, cirkulacijom vrućeg ulja i LFH metodom

Drugi postupak sušenja sastoji se od iste dvije faze, ali je u ovom slučaju LFH grijanje primijenjeno tijekom cijelog procesa sušenja. Za tu svrhu, transformator je napajan sa svoje visokonaponske (HV) strane pomoću frekvencijskog pretvarača koji je transformatoru opskrbljivao promjenjivu struju niske frekvencije. Niskonaponski (LV) namoti ostali su kratko spojeni tijekom primjene LFH kako bi omogućili kruženje struje za zagrijavanje LV namota.

Tijekom ovog procesa sušenja, vrijednost struje ručno je regulirana kako bi se osiguralo da temperatura unutar transformatora ne prelazi 75 °C. Iz sigurnosnih razloga, struja je smanjena tijekom noći. Primijenjena struja i rezultirajuća temperatura tijekom procesa sušenja prikazani su na [Slika 36.] i [Slika 37.]

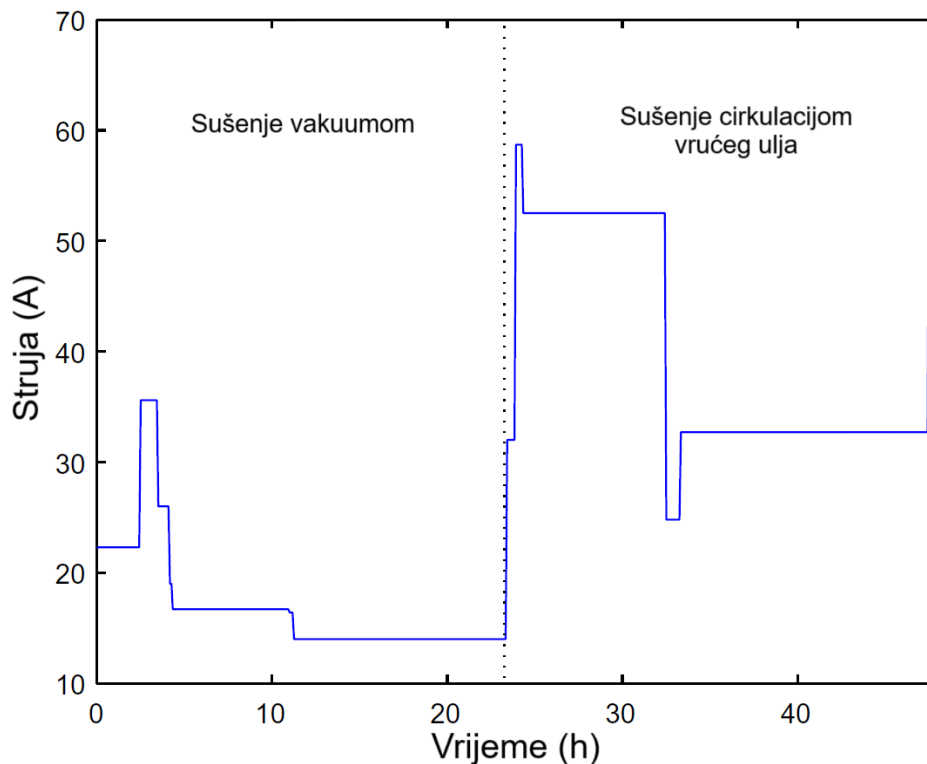


Slika 36. Razvoj temperature tijekom drugog postupka sušenja

#### 6.3.1. Sušenje pod vakuumom

Ulje iz transformatora je ispušteno, a visok vakuum (1 mbar) primijenjen je nad spremnikom tijekom 24 sata. Kada se vakuum primijeni u spremniku, toplina se prenosi samo zračenjem (ne dolazi do provođenja), a prijenos topline na dijelove transformatora koji nisu u izravnom

kontakta s namotima je slab. Iz tog razloga, struja potrebna za postizanje željene temperature (75 °C) bila je vrlo niska. Kao što je prikazano na [Slika 37.], primijenjena struja tijekom ovog razdoblja sušenja nije premašila 20 A.



**Slika 37. Primijenjena struja tijekom drugog postupka sušenja**

Kao što se može vidjeti na [Slika 36.], temperatura je bila posebno nehomogena unutar transformatora tijekom ovog dijela procesa. Temperatura koju je registrirao FO5, koji je bio u kontaktu s komadom izolacije od presvijetle ploče na gornjem dijelu transformatora, nije premašila 35 °C tijekom VD razdoblja. U međuvremenu, temperatura na dnu središnjeg namota bila je približno 80 °C. Nažalost, na kraju VD razdoblja došlo je do kvara u sustavu za prikupljanje podataka, a neki registri temperature su izgubljeni.

Kao i u prethodnom slučaju, tijekom razdoblja sušenja pod vakuumom, ulje je bilo podvrgnuto procesu degazacije i sušenja izvan spremnika transformatora.

### **6.3.2. Sušenje cirkulacijom vrućeg ulja**

Vruće ulje je prisiljeno da teče kroz transformator tijekom 24 sata. Temperatura ulja bila je postavljena na 65 °C na izlazu iz opreme za obradu ulja. Tijekom procesa, transformator je bio

napajan niskofrekventnom strujom. Kao što je prikazano na [Slika 36.], temperatura unutar transformatora bila je mnogo homogenija tijekom ovog razdoblja. Varijacije u temperaturi vidljive na [Slika 36.] uzrokovane su elektromagnetskim smetnjama.

Uzorci izolacije su uzeti prije i nakon procesa sušenja te su analizirani u laboratoriju. Točke uzimanja uzoraka bile su iste kao i u prethodnom slučaju. Kao što je prikazano u [Tablica 7.], početna vlažnost u ovom slučaju bila je približno 9% u papiru i približno 3,5% u ploči od prešpan kartona. Iako je vrijeme izlaganja aktivnog dijela bilo isto u sva tri slučaja, okolišna vlažnost i temperatura tijekom razdoblja izlaganja nisu bile iste, stoga je stupanj impregnacije vlagom koji je postignut bio viši u ovom slučaju.

#### **6.4. Sušenje niskim vakuumom, cirkulacijom vrućeg ulja i LFH metodom**

Prilikom projektiranja procesa sušenja transformatora, potrebno je osigurati da spremnik transformatora može izdržati razinu vakuuma koja će se primijeniti. Sposobnost spremnika da izdrži vakuum obično navodi proizvođač u tehničkoj dokumentaciji transformatora. Međutim, transformator koji je mogao izdržati vakuum kada je proizveden možda više neće moći izdržati ako je došlo do korozije u spremniku. Još jedan uobičajen problem povezan s primjenom vakuuma je prisutnost curenja ili pora u spremniku koja uzrokuje gubitak vakuuma. Iz tih razloga, vakuum bi trebao biti primjenjivan postupno, a posebnu pozornost treba usmjeriti na zvukove koji ukazuju na unutarnju deformaciju ili kolaps spremnika.

U slučaju sušenja transformatora koji ne mogu izdržati visoke razine vakuuma, primjena razdoblja slabog vakuuma u spremniku transformatora može biti dobra opcija za poboljšanje učinkovitosti procesa sušenja. Tako je treći proces sušenja proveden na ispitnom transformatoru uključivao primjenu prve faze slabog vakuuma, nakon koje je uslijedila druga faza cirkulacije vrućeg ulja. LFH je primijenjen zajedno sa obje faze sušenja.

##### **6.4.1. Sušenje pod niskim vakuumom**

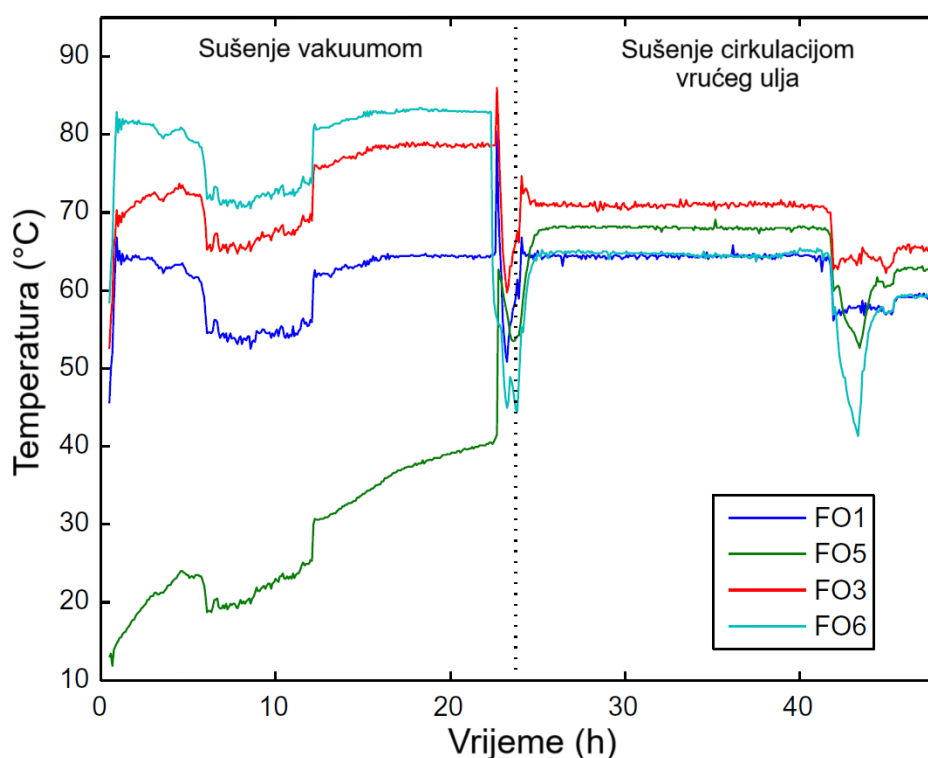
Ulje iz transformatora je ispražnjeno, a u spremniku transformatora primijenjen je slabi vakuum od 0,6 bara tijekom 24 sata. Istovremeno, u HV namotu transformatora umetnut je niskofrekventni strujni (LFH), dok je sekundarni namot bio kratkospojen. Kako bi se izbjegle prekomjerne temperaturne varijacije i time optimizirao proces sušenja, u frekvencijskom pretvaraču programiran je proporcionalno-integralno-derivativni regulator (PID) za kontrolu LFH-a. Temperatura na mjernoj točki FO1, smještene na vrhu jednog namota [Slika 34.], korištena je kao ulazna temperatura za kontrolni sustav. Postavljena je točka podešavanja od

65 °C za kontrolu temperature tijekom cijelog procesa. Ulazna varijabla za regulator bila je temperaturna pogreška, a izlazna varijabla bila je trenutna vrijednost struje potrebna za postizanje zadane temperature.

Na [Slika 38.] prikazana je evolucija temperature tijekom ovog razdoblja. Neke Pt 100 su oštećene tijekom podizanja transformatora, te njihovi podaci nisu bili dostupni tijekom trećeg procesa sušenja. Kao što je prikazano na [Slika 38.], raspodjela temperature bila je prilično nehomogena tijekom razdoblja vakuumske sušenja, pa su tako dijelovi izolacije koji su bili udaljeni od namota ostali hladni. Struja koju isporučuje inverter prikazana je na [Slika 39.].

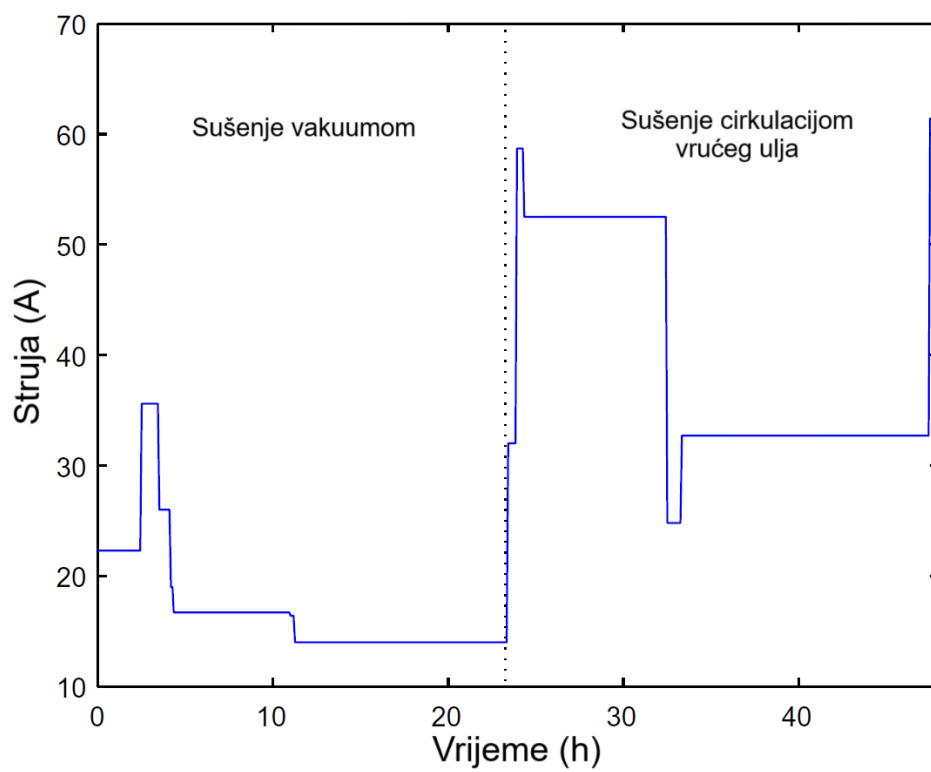
#### 6.4.2. Sušenje cirkulacijom vrućeg ulja

Cirkulacija ulja bila je prisiljena kroz aktivni dio transformatora tijekom 24 sata. Kao i u prethodnim procesima sušenja, temperatura na izlazu opreme za obradu ulja iznosila je 65 °C. Transformator je također bio napajan reguliranom niskofrekventnom strujom [Slika 39.], odabirući postavku temperature od 65 °C u PID regulatoru. Evolucija temperature tijekom ovog razdoblja prikazana je na [Slika 38.].



Slika 38. Razvoj temperature tijekom trećeg postupka sušenja





**Slika 39. Primijenjena struja tijekom trećeg postupka sušenja**

## 7. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Rezultati različitih procesa sušenja opisani su u nastavku. Kao što je prethodno opisano, uzorci papira uzimani su iz transformatora prije i nakon svakog procesa sušenja te su analizirani u laboratoriju metodom Karl Fischer [23]. Uzorci kraft papira uzimani su s tri HV vodiča koji spajaju izolator s HV namotom. Osim toga, uzet je uzorak prešpan kartona sa separatora postavljenog između dva namota. U sva tri procesa sušenja, točke uzimanja uzoraka bile su iste.

**Tablica 6. Rezultati konvencionalne metode sušenja**

	$C_{in}$ (%)	$C_{fin}$ (%)	$\Delta C$ (%)
Izolacija na spoju faze A	7.55	2.20	5.35
Izolacija na spoju faze C	7.25	2.54	4.71
Izolacija na spoju faze B	7.55	2.68	4.87
Separator od prešpan kartona	2.17	1.24	0.93

**Tablica 7. Rezultati sušenja visokim vakuumom**

	$C_{in}$ (%)	$C_{fin}$ (%)	$\Delta C$ (%)
Izolacija na spoju faze A	8.80	4.03	4.77
Izolacija na spoju faze C	9.51	4.78	4.73
Izolacija na spoju faze B	9.54	3.16	6.38
Separator od prešpan kartona	3.44	1.76	1.68

**Tablica 8. Rezultati sušenja niskim vakuumom**

	$C_{in}$ (%)	$C_{fin}$ (%)	$\Delta C$ (%)
Izolacija na spoju faze A	7.62	3.24	4.34
Izolacija na spoju faze C	7.50	3.85	3.65
Izolacija na spoju faze B	6.94	2.21	4.73
Separator od prešpan kartona	2	1.84	0.16

Rezultati tri procesa prikazani su u [Tablica 6.], [Tablica 7.] i [Tablica 8.]. U svim slučajevima prikazani su početni sadržaji vlage prije početka procesa sušenja (tj. nakon završetka razdoblja impregnacije vlagom) i nakon završetka procesa sušenja za tri uzorka papira koji odgovaraju trima fazama transformatora. Budući da je početna vlaga izmjerena na različitim točkama bila različita, ukupno smanjenje vode izračunato je i uključeno u tablice radi usporedbe rezultata. Izmjereni sadržaji vlage uzoraka prešpan kartona također su uključeni u tablice.

### **7.1. Rezultati konvencionalne metode sušenja**

Početni i konačni sadržaji vlage mjereni tijekom konvencionalnog procesa sušenja prikazani su u [Tablica 9.]. Početna vlaga u različitim uzorcima uzetim s izolacije izvoda svih faza bila je nešto viša od 7%. Znato niža vrijednost vlage izmjerena je u uzorku prešpan kartona (2,17%). Osim toga, smanjenje vlage postignuto u separatoru od prešpan kartona tijekom procesa sušenja (0,93%) bilo je mnogo niže nego ono postignuto u papiru (otprilike 5%). S jedne strane, gustoća prešpan kartona je mnogo veća od gustoće papira, a kao posljedica toga, difuzijski koeficijent vode u prešpan kartonu je mnogo niži od koeficijenta u papiru. S druge strane, difuzijski koeficijent ovisi o koncentraciji vlage, a u slučaju prešpan kartona, koncentracija je mnogo niža nego u papiru, što uzrokuje da difuzijski koeficijent bude još niži. Isti učinak može se primijetiti u rezultatima druga dva procesa sušenja, osobito trećeg, kao što je objašnjeno u nastavku.

Protok ulja ulazi u transformator kroz uljni ventil smješten u gornjem dijelu desnog zida kotla, a odvodi se kroz izlazni ventil smješten u donjem dijelu lijevog zida kotla. Stoga je ulje u gornjem desnom dijelu transformatora sušije od onog u lijevom dijelu, a time je smanjenje vlage veće u vodu desne faze transformatora (5,35%) nego u drugim vodovima (4,87% i 4,71%). U ovom procesu sušenja nije primijenjena LFH, a temperatura je bila prilično homogena, pa je razlika između različitih namota transformatora iznosila samo otprilike 2 °C.

### **7.2. Rezultati sušenja visokim vakuumom, cirkulacijom vrućeg ulja i LFH metodom**

Rezultati drugog procesa sušenja (24 h VD na 1 mbar-u s LFH i 24 h HO s LFH) prikazani su u [Tablica 7.]. U ovom slučaju, početni sadržaji vlage mjereni u papiru i prešpan kartonu bili su viši od onih mjenjenih u druga dva procesa sušenja [Tablica 6.] i [Tablica 8.], budući da nije bilo kontrole ovlaživanja, jer impregnacija vlagom ovisi o relativnoj vlažnosti zraka i o sobnoj

temperaturi tijekom razdoblja izlaganja. Tako, s istim vremenom izlaganja, vlaga postignuta u aktivnom dijelu transformatora nije bila ista za svaki pokušaj.

Kada se uspoređuju temperature prvog i drugog procesa sušenja, može se zaključiti da je glavna razlika između ovog procesa i prethodnog u tome što se tijekom sušenja pod vakuumom temperatura značajno povećala upotrebom LFH. LFH je također primijenjena tijekom razdoblja HO, ali u ovom slučaju temperatura je bila bliža onoj iz prethodnog slučaja.

Učinkovitost vakuumske sušenja je vrlo slaba ako temperatura ostane niska tijekom procesa sušenja. Isparavanje vode s površine papira vrlo je brzo pod vakuumom. Međutim, brzina migracije vode unutar čvrste izolacije snažno ovisi o temperaturi jer difuzijski koeficijent eksponencijalno ovisi o njoj. Iz tog razloga, globalno smanjenje vode u VD razdoblju je vrlo slabo ako je temperatura izolacije niska, što se dogodilo u konvencionalnom procesu sušenja.

Nakon ovog procesa sušenja, vodovi središnje faze bili su manje vlažni od drugih vodova nakon procesa. Distribucija temperature tijekom VD razdoblja bila je vrlo nehomogena. Mjerenja temperature na središnjem namotu pokazala su više vrijednosti nego na drugim namotima tijekom VD razdoblja (vidi FO4) [Slika 34.]. Osim toga, tijekom razdoblja HO, temperatura postignuta u središnjem namotu bila je viša (vidi FO3 i FO4 na [Slika 34.]).

Također, potrebno je napomenuti da je smanjenje vode u prešpan kartonu bilo znatno veće u ovom slučaju nego u drugim procesima sušenja. Ova poboljšana učinkovitost uglavnom je rezultat povećanja temperature transformatora tijekom VD razdoblja, što je postignuto primjenom LFH.

### **7.3. Rezultati sušenja niskim vakuumom, cirkulacijom vrućeg ulja i LFH metodom**

Rezultati trećeg procesa sušenja prikazani su u [Tablica 8.] Rezultati ovog procesa sušenja bili su lošiji od onih dobivenih u drugim procesima. Da bi se utvrdio uzrok rezultata, proces sušenja analiziran je iz teorijske perspektive.

Tijekom prvog dijela procesa sušenja, primijenjen je vakuum od 0,6 bara na transformatoru istovremeno s LFH s postavljenom temperaturom od 65 °C. Uvjet vlažnosti u stacionarnom stanju (tj. vlažnost koja bi se postigla ako bi se procesu dopustilo da dosegne stacionarno stanje) koji odgovara ovim uvjetima sušenja može se izračunati korištenjem jednadžbe koju je predložio Fessler [24]:

$$C_e = 2,1731 \times 10^{-7} p_v^{0,6685} e^{\frac{4725,6}{T}} \quad (15)$$

Gdje je T temperatura u K i  $p_v$  je parcijalni tlak vlage (u atm), koji se može izračunati iz relativne vlažnosti zraka (RH) [25].

$$p_v = \frac{p_0 \times RH(\%)}{100} \quad (16)$$

$p_0$  je tlak vodene pare, koji se može izračunati (u mmHg) pomoću empirijskog izraza koji su predložili Keenan i Keyes [26]:

$$\log_{10} \frac{p_0}{p_c} = \frac{-\theta_c}{T + 273,15} \times \frac{a + b \times \theta_c + c \times \theta_c}{1 + d \times \theta_c} \quad (17)$$

gdje su:

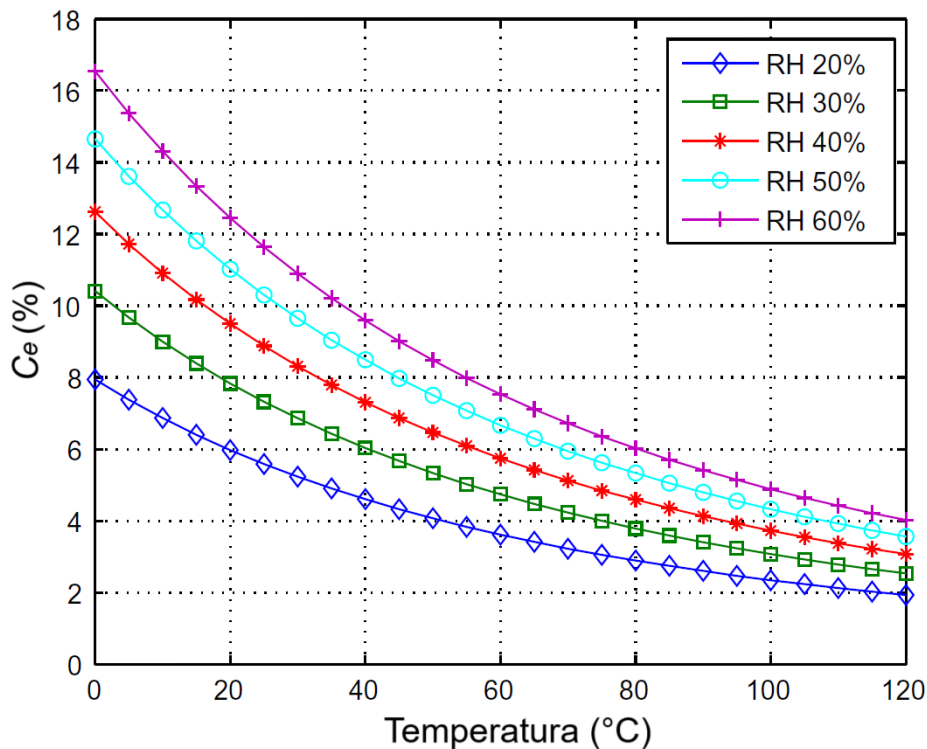
$p_c$  - kritični tlak vode  $1,65807 \times 10^{-5}$  mmHg,

$\theta_c$  - razlika između kritične temperature vode (374,11 K) i temperature pare (T)

Vrijednosti parametara su  $a = 3.2437814$ ,  $b = 5.86826 \times 10^{-3}$ ,  $c = 1,1702379 \times 10^{-8}$  i  $d = 2,1878462 \times 10^{-3}$

Relativna vlažnost zraka nije bila mjerena tijekom eksperimenta, no budući da je proces sušenja proveden na kišni dan, relativna vlažnost je mogla biti oko 60%. Na [Slika 40.] prikazana je ravnotežna vlaga koja bi se postigla u papiru pri različitim uvjetima temperature i relativne vlažnosti zraka. U slučaju sušenja na 65°C s relativnom vlažnošću zraka od 60%, ravnotežna vlaga bi iznosila 7%, a ako bi se razmatrala relativna vlažnost od 40%, ravnotežna vlaga bila bi 5,4%, što sugerira da faza sušenja na blagom vakuumu ne uklanja vodu učinkovito.

Da LFH nije bio primijenjen tijekom sušenja na blagom vakuumu, ravnotežna vlaga bila bi čak i veća od početne vlage, te bi papir nastavio apsorbirati vlagu tijekom tog razdoblja, kao da se aktivni dio transformatora nalazi izvan spremnika.



Slika 40. Ravnotežna vlaga

#### 7.4. Usporedba rezultata

Prosječno smanjenje vlage postignuto u papiru i prešanom kartonu tijekom tri procesa sušenja prikazano je u [Tablica 9.]. Drugi proces sušenja postigao je bolje rezultate od ostalih u smislu sušenja papira. U slučaju prešanog kartona, učinak je bio još izraženiji.

Treći proces pokazao je najlošije rezultate. Kao što je objašnjeno, primjena mekog vakuuma ne čini se dobrom alternativom za sušenje. Rezultati su bili posebno loši u slučaju prešanog kartona. Rezultati ispitivanja pokazuju da se primjenom LFH metode trajanje procesa smanjilo za 30% po transformatoru. Potrošnja energije također se smanjila za 20%.

Tablica 9. Sažetak rezultata

	$\Delta C_{av}$ kraft papir (%)	$\Delta C_{av}$ prešani karton (%)
Kovencionalna metoda	4.97	0.93
Visoki vakuum i LFH	5.29	1.68
Niski vakuum i LFH	4.29	0.16

## 8. ZAKLJUČAK

Tri različita postupka sušenja primijenjena su na stvarni transformator u kontroliranim uvjetima. Tijekom procesa mjerena je raspodjela temperature, a početni i konačni sadržaj vlage u uzorcima papira i prešanog kartona određeni su prije i nakon procesa sušenja. Svi procesi sastojali su se od prve faze vakuumske sušenja i druge faze sušenja vrućim uljem. U prvom procesu sušenja LFH (niskofrekventno grijanje) nije bio primijenjen na transformator. U preostala dva procesa LFH je bio primijenjen. U trećem procesu sušenja analiziran je utjecaj razine vakuuma.

Primjena LFH-a poboljšava učinkovitost procesa sušenja jer može u kraće vrijeme povećati temperaturu izolacije tijekom faze zagrijavanja.

Kada se transformator suši pod vakuumom uz zagrijavanje izolacije LFH-om, može se pojaviti neujednačena raspodjela temperature unutar transformatora. To je posebno važno kod primjene visokog vakuuma. Kada se stvori vakuum u spremniku transformatora, toplina se prenosi isključivo zračenjem, zbog čega pojedini dijelovi transformatora mogu dosegnuti visoke temperature. Kako bi se izbjeglo oštećenje izolacije zbog visokih temperatura, bilo bi korisno koristiti termalni model za procjenu temperature namota.

Prilikom vakuumiranja, LFH najviše zagrijava dijelove koji su bliže namotima. Dijelovi od prešanog kartona, udaljeni od aktivnog dijela transformatora, mogu ostati hladni unatoč primjeni LFH-a. Stoga je korisno izmjenjivati cikluse cirkulacije ulja s LFH-om kako bi se zagrijala cjelokupna izolacija transformatora.

Izolacija transformatora sastoji se od elemenata izrađenih od različitih materijala. Kada je transformator podvrgnut procesu sušenja, svi se elementi ne suše na isti način. Gustoća prešanog kartona je znatno veća od gustoće papira, pa voda unutar njega sporije putuje. Kao rezultat, vrijeme sušenja prešanog kartona značajno je duže nego za sušenje papira. Međutim, zbog te karakteristike, prešani karton upija manje vode kad je izložen istim uvjetima kao i papir, pa je njegov sadržaj vlage općenito niži od sadržaja vlage u papiru. Osim toga, doprinos prešanog kartona dinamici vode tijekom normalnog rada transformatora mali je u usporedbi s doprinosom papira.



Sušenje pod visokim vakuumom učinkovito je ako se temperatura transformatora povisi korištenjem LFH-a ili nekom drugom metodom. Primjena vakuumskih ciklusa na sobnoj temperaturi teško doprinosi smanjenju vode.

Primjena mekog vakuuma nije dobra opcija za sušenje transformatora. Ako temperatura unutar spremnika nije dovoljno visoka ili je relativna vlažnost zraka previsoka, transformator može čak apsorbirati dodatnu vlagu tijekom tog razdoblja.

## 9. LITERATURA

- [1] J. Bosiger, The use of low frequency techniques in the insulation drying process for liquid filled small power transformers, 2001.
- [2] Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatus—Part 1: Oil Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors, IEEE Std. 62-1995, 1995..
- [3] M. Poletto, V. Pistor, A. J. Zattera, Structural characteristics and thermal properties of native cellulose, Cellulose - Fundamental aspects, 2013.
- [4] »IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers,« 2003.
- [5] Q. Liu, Z. Wang, P. Jarman, N. Azis, W. Sampson, R. Heywood, Assessment of ageing conditions through paper tensile strength analysis of scrapped transformers, 2009.
- [6] P. Hodges, Hydraulic fluids, 1996.
- [7] W. G. D1.30, »Oxidation Stability of Insulating Fluids,« 2013.
- [8] L. E. Lundgaard, W. Hansen, D. Linhjell, T. J. Painter, Aging of oil impregnated paper in power transformers, IEEE Transactions on Power, 2004.
- [9] Pahlavanpour, P. Wiklund, Aging oils in aging transformers, 2011.
- [10] V.W.Montsinger, Loading transformers by temperature, Trans AIEE, pp 886-192, 1930.
- [11] L.Lundgaard, W.Hansen, D.Linhjell, T.Painter, Ageing of Oil Impregnated paper in power transformers, IEEE Trans Pow.Del., Vol 19, No.1, pp 230-238., 2002.
- [12] L. Lundgaard, W. Hansen, S. Ingebrigtsen, D. Linhjell, M. Dahlund, Aging of Kraft paper by acid catalyzed hydrolysis, 2005.
- [13] N. Azis, D. Zhou, Z. D. Wang, D. Jones, B. Wells, G. M. Wallwork, Operational condition assessment of in-service distribution transformers, Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 2012 International Conference, 2012.
- [14] K. Oura, R. Hazelwood, R. Frey, Stability of DBPC inhibited oil, 1953.
- [15] N. Azis, D. Zhou, Z. D. Wang, D. Jones, B. Wells, G. M. Wallwork, Operational condition assessment of in-service distribution transformers, Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 2012 International Conference.

- 
- [16] Prevost, T. Oommen T. A., Cellulose insulation in oil-filled power transformers: Part II-maintaining insulation integrity and life, 2006.
- [17] J. Jalbert, R. Gilbert, P. Tétreault, B. Morin, D. Lessard-Déziel, Identification of a chemical indicator of the rupture of 1, 4- $\beta$ -glycosidic bonds of cellulose in an oil-impregnated insulating paper system, *Cellulose*, vol. 14, pp. 295-309, 2007.
- [18] N. Azis, Q. Liu, Z. Wang, Ageing assessment of transformer paper insulation through post mortem analysis, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* vol. 21, pp. 845-853, 2014.
- [19] Fullerton, W. W. Guidi, H. P., Mathematical methods for prediction of moisture take-up and removal in large power transformers, *Proc. IEEE Winter Power Meeting*, 1974.
- [20] Savio, S. D. Foss L., Mathematical and experimental analysis of the field drying of power transformer insulation, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 8, no. 4, pp. 1820–1828, 1993.
- [21] Y., Du; M., Zahn; B. C., Leiseutre; A. V., Mamishev; S. R. Lindgren, Moisture equilibrium in transformer paper-oil systems, *IEEE Elect. Insul. Mag.*, vol. 15, no. 6, pp. 11–20, 1999.
- [22] Figueroa E., Kalicki T., Low frequency heating field dry out of a 750 MVA 500 kV autotransformer., *Electricity today*; January–February, 2009.
- [23] A. Kossakowska, *Titration by Karl Fischer*, 2016.
- [24] F. WA, A refined mathematical model for prediction of bubble evolution in transformers, *IEEE Trans Power Deliv.*, 1989.
- [25] Beer G., Gasparani G., Osimo F., Ross F., Experimental data on the drying-out of insulation samples and test coil for transformers, *CIGRE paper no. 135*, 1966.
- [26] Keenan J.H., Keyes F.G., *Thermodynamic properties of steam*, 1936.