

Utjecaj vlage na svojstva izolacije transformatora

Gajski, Matija

Professional thesis / Završni specijalistički

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:168:996578>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-06-26**



Repository / Repozitorij:

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Matija Gajski

UTJECAJ VLAGE NA SVOJSTVA IZOLACIJE TRANSFORMATORA

SPECIJALISTIČKI RAD

Zagreb, 2023.

UNIVERSITY OF ZAGREB FACULTY OF ELECTRICAL
ENGINEERING AND COMPUTING

Matija Gajski

**MOISTURE INFLUENCE ON THE
PROPERTIES OF TRANSFORMER
INSULATION**

SPECIALIST THESIS

Zagreb, 2023.

Završni specijalistički rad izrađen je na Sveučilištu u Zagrebu na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u sklopu poslijediplomskog specijalističkog studija Transformatori.

Mentor: prof. dr. sc. Željko Štih

Specijalistički rad ima: ___ stranica

Povjerenstvo za ocjenu u sastavu:

1. nasl. izv. prof. dr. sc. Žarko Janić - predsjednik
2. nasl. doc. dr. sc. Tomislav Župan - član
3. prof. dr. sc. Željko Štih – mentor

Povjerenstvo za branu u sastavu:

1. nasl. izv. prof. dr. sc. Žarko Janić - predsjednik
2. nasl. doc. dr. sc. Tomislav Župan - član
3. prof. dr. sc. Željko Štih – mentor

Datum obrane: 21. veljače 2023.

Sadržaj:

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Uvod..... | 1 |
| 2 | Izolacijski materijali..... | 2 |
| 3 | Papir..... | 3 |
| 4 | Anizotropija papira..... | 6 |
| 5 | Utjecaj vlage..... | 10 |
| 5.1 | Brzina apsorpiranja vlage..... | 12 |
| 5.2 | Mehanizam apsorpiranja vlage..... | 14 |
| 5.3 | Utjecaj vlage na električnu čvrstoću izolacije..... | 16 |
| 6 | Zaštita jezgri statičkih prstenova od vlage – case study..... | 17 |
| 7 | Fenomen bijelih linija – case study..... | 20 |
| 7.1 | Kontrola procesa izrade osnovne ploče..... | 21 |
| 7.2 | Hipoteza delaminacije..... | 21 |
| 7.3 | Objašnjenje fizikalnih pojava..... | 22 |
| 7.4 | Testiranje laminiranog materijala..... | 23 |
| 7.4.1 | Test utjecaja pakiranja na pojavu delaminacije..... | 23 |
| 7.4.2 | Test malih laminiranih blokova i greda bez rupa za sušenje..... | 24 |
| 7.4.3 | Test na laminiranim blokovima sa rupama za sušenje..... | 24 |
| 7.4.4 | Test mehaničke čvrstoće..... | 25 |
| 7.5 | Rezultati..... | 25 |
| 7.5.1 | Utjecaj pakiranja na pojavu delaminacija..... | 25 |
| 7.5.2 | Test blokova i greda bez rupa za sušenje..... | 26 |
| 7.5.3 | Test na blokovima s rupama za sušenje..... | 29 |
| 7.5.4 | Test mehaničke čvrstoće..... | 30 |
| 7.6 | Zaključak testova..... | 31 |
| 8 | Zaključak..... | 32 |
| 9 | Literatura..... | 33 |

1 Uvod

Moderan život je nezamisliv bez upotrebe električne energije. Trenutni način života u velikoj je mjeri ovisan o pouzdanom i uvijek dostupnom izvoru električne energije. Ubrzani razvoj čovječanstva možemo zahvaliti upravo električnoj energiji. Elektroenergetski sustav je najrasprostranjeniji i najutjecajniji tehnički sustav na svijetu. Prekid opskrbe električnom energijom u gradovima ili područjima s velikom populacijom može dovesti do nezgodnih, pa čak i izvanrednih kritičnih situacija. Bez električne energije stao bi život kakvog danas poznajemo.

Elektroenergetski sustav obuhvaća proizvodnju, prijenos, distribuciju i potrošnju električne energije. Zajedno sa generatorima i rasklopnim postrojenjima, transformatori su jedni od glavnih elektroenergetskih komponenti u elektroenergetskim sustavima. Zbog te činjenice se kod njih zahtjeva visoka pouzdanost, te se kod njihove gradnje i uporabe primjenjuju najstroži kriteriji. Stalni zahtjevi za povećavanjem snage transformatora sukladno povećavaju zahtjeve za kvalitetom izrade te zahtjeve za korištenje kvalitetnih materijala. A sve u cilju sprječavanja nastanka kvarova na transformatorima. Kvarovi na transformatoru sami po sebi uzrokuju značajne troškove popravka, no troškovi koji mogu nastati zbog gubitka vremena u kojem je transformator izvan pogona mogu biti nemjerljivo veći od cijene samog transformatora. Ako pak situaciju kvara sagledamo s niže razine te usporedimo vrijednost komponente transformatora koja može potencijalno prouzročiti kvar i nastale gubitke zbog kvara transformatora, primijetiti ćemo još veću razliku u vrijednostima. Lako možemo zaključiti da izrada komponenti i materijali od kojih se one izrađuju moraju biti najviše kvalitete, a sve kako bi se u konačnici kvarovi na transformatoru sveli na minimum.

Izolacijski materijali i izolacijske komponente su sastavni dio svakog energetskeg transformatora, te su jedan od kritičnijih sustava transformatora. Promatrajući iz ekonomskog aspekta i aspekta cijene transformatora, komponente sustava izolacije zauzimaju manji udio u ukupnoj cijeni transformatora, te imaju značajno nižu vrijednost naspram komponenti ostalih sustava. Iz tog razloga izolacijske komponente se doživljavaju kao manje rizičan faktor. No imajući na umu da je izolacijski materijal osjetljiv na atmosferske uvjete, te da je podložan starenju, može se lako dogoditi da baš taj materijal stvori probleme u izgradnji ili eksploataciji energetskeg transformatora.

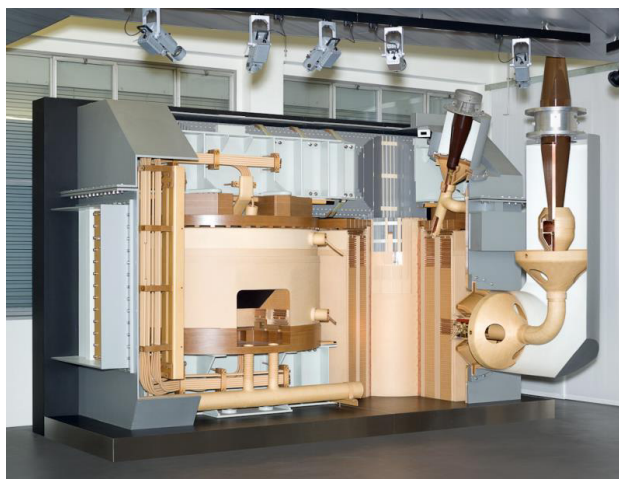
Iz tog razloga u ovom radu je obrađena tema o utjecaju vlage na električna i mehanička svojstva izolacije, te na životni vijek izolacije. Uz to dan je pregled odabranih problema koji se javljaju zbog vlage prilikom proizvodnje izolacijskih komponenti koje se koriste u energetskim transformatorima. Također prikazane su određene analize problema koji se javljaju kod izrade izolacijskih komponenti.

2 Izolacijski materijali

Osnovna funkcija sustava izolacije u transformatoru je sprječavanje pojave električnog proboja između vodljivih dijelova transformatora koji se nalaze na različitom naponu. Materijali izolacijskog sustava transformatora mogu biti tekući ili kruti. Tekuće materijale čine mineralna ulja, te sintetski i prirodni esteri. Treba napomenuti da osim funkcije izolacije tekuća izolacija ima i funkciju hlađenja transformatora. Krute materijale čine papir, prešani papir i lak. Zrak također može imati funkcije izolacije i hlađenja transformatora, takav sustav izolacije se koristi u relativno jednostavnijim suhim transformatorima koji nemaju kotla. Izbor vrste izolacije vrši se ovisno o naponu transformatora. Kod manjih napona dovoljna je samo papirna izolacija ili lak između vodljivih površina, dok je kod visokih napona potreban složeniji izolacijski sustav kojim se postiže dovoljan razmak između vodljivih dijelova. Takav izolacijski sustav se može sastojati od niza barijera, cilindara, kapa, papira, umetaka, ulja i ostalih izolacijskih komponenti.

U osnovi izolacija transformatora može se podijeliti na:

- Unutarnju izolaciju
- Izolaciju jezgre
- Vanjsku izolaciju



Slika 1 Model transformatora [8]

Izolacija energetskog transformatora također treba zadovoljavati mehanička i rashladna svojstva. Mehanička svojstva se osiguravaju primjenom barijera koje su izrađene od tvrdog izolacijskog papira ili ploča. Rashladni proces energetskog transformatora osigurava se cirkulacijom ulja kroz namote, ulje preuzima toplinu s namota i preko rashladnog sustava toplinu predaje okolini.

3 Papir

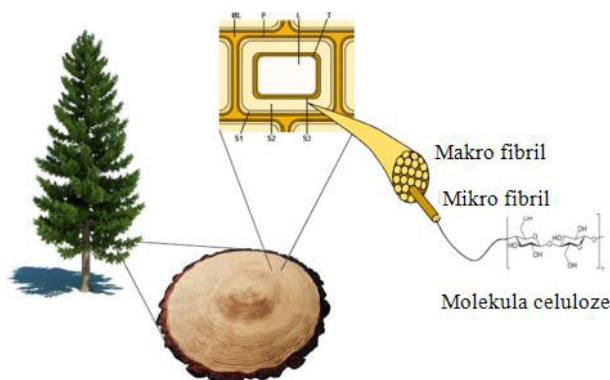
Papir je tanki materijal koji nastaje prešanjem vlakana celulozne pulpe koja se dobiva od drveta ili trave. Papir općenito možemo klasificirati u tri osnovne kategorije:

- Papir ($7 \text{ g/m}^2 - 225 \text{ g/m}^2$)
- Karton ($150 \text{ g/m}^2 - 600 \text{ g/m}^2$)
- Prešana ploča ($\geq 225 \text{ g/m}^2$)

Gustoća papira kreće se od $0,25 \text{ g/cm}^3$ za papir u listovima, do $1,5 \text{ g/cm}^3$ za neke posebne tehničke papire. U svijetu postoji oko 3000 vrsta papira, a mogu se podijeliti na četiri grupe:

- Grafički papir
- Papir za pakiranje
- Higijenski papir
- Tehnički papir

Osnovni materijal za dobivanje papira je drvena pulpa. Pulpa je celulozni materijal (vlakna) koji nastaje mehaničkom ili kemijskom redukcijom drva. Udio celuloznih vlakana u drvu iznosi 40% do 50%, te je drvo jedan od glavnih izvora celuloznih vlakana. Vlakna se također mogu dobiti od trave, slame, konoplje, lana, pamuka itd. Također u proizvodnji papira danas koriste i sintetička vlakna ili mješavine sintetičkih i prirodnih vlakana.



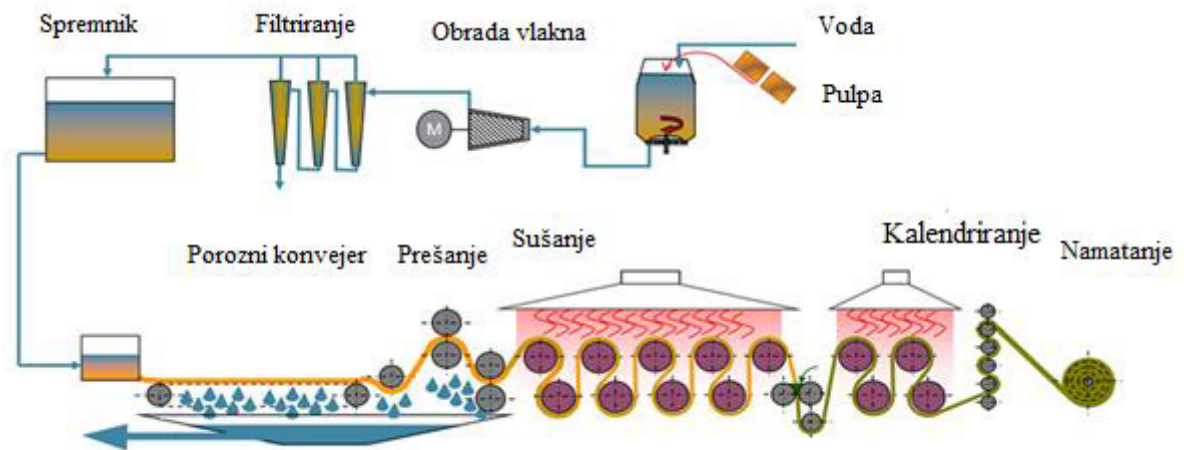
Slika 2 Celulozna vlakna [7]

Povijest proizvodnje papira započinje 105. godine u drevnoj Kini, te je od tada proces proizvodnje papira prošao kroz tri razvojne faze. Treća moderna faza započinje 1799. godine izumom stroja za automatiziranu proizvodnju papira. Princip rada stroja koji je koristio sito, razvio je Henry Fourdrinier, taj princip proizvodnje je danas još uvijek široko u upotrebi.



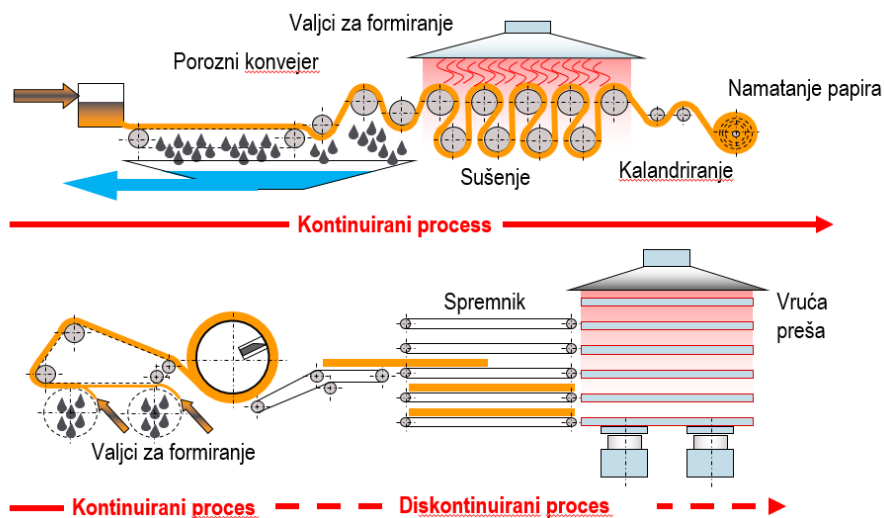
Slika 3 Model prvog stroja za izradu papira [7]

Moderno postrojenje za proizvodnju papira podijeljeno je u nekoliko procesnih koraka, ti procesi djelomično odgovaraju procesima proizvodnje kod ručne izrade papira. Pulpa se miješa u vodi s drugim aditivima kako bi se dobila vodena mješavina razrijeđene pulpe. Udio pulpe u početnoj mješavini iznosi oko 2%. Nakon miješanja pulpe u vodi, mješavina prolazi kroz proces rafiniranja. To je proces mehaničke obrade koji povećava površina vlakna (vlakna se „melju“), time vlakna dobivaju bolja vezivna svojstva, te se u konačnici dobivaju bolja mehanička svojstva papira. Nakon rafiniranja mješavina prolazi kroz proces filtracije, gdje se uklanjaju sve nečistoće iz pulpe. Pročišćena mješavina pulpe se zatim raspodjeljuje na pokretno kontinuirano sito. U tom procesu se voda izvlači iz mješavine (gravitacijom ili pod vakuumom) i na situ ostaje mokri sloj papira. Mokri sloj papira zatim prolazi kroz sustav grijanih valjaka gdje se suši. U konačnici se papir mota u velike role. Završni produkt je rola papira koja je često teška i do nekoliko tona. Brzine proizvodnje koje postižu postrojenja za proizvodnju papira iznose do 2200 m/min. Ovaj opisani tehnološki postupak s manjim varijacijama u procesu koristi se za proizvodnju svih vrsta papira, grafički, higijenski, tehnički, itd.



Slika 4 Proces izrade papira [7]

Kod proizvodnje transformatorskog papira (*Transformerboarda*) proizvodni proces je u većoj mjeri jednak procesu proizvodnje običnog papira, jedina razlika je u zadnjoj fazi sušenja papira. Za proces proizvodnje papira možemo reći da je to kontinuirani proces, drugim riječima ovdje se radi o neprekidnom toku materijala kroz postrojenje. Bez ikakvih prekida u proizvodnji između početne faze razrjeđivanja pulpe u vodi i završne faze, namatanja gotovog papira u rolu. Za razliku od procesa proizvodnje papira, proces proizvodnje *transformerboarda* je diskontinuirani proces. Ovdje dolazi do prekida u kontinuitetu toka materijala kod procesa sušenja. Materijal se nakon procesa izvlačenja vode namata na bubanj do određene debljine, te se zatim skida s bunja u obliku ploča. Takvim mokrim pločama se zatim puni spremnik-konvejer, koji nakon svog punjenja transportira ploče u prešu na vruće prešanje. U jednom ciklusu preša se dvadesetak ploča, duljina ciklusa prešanja ovisi o debljini ploče koja se proizvodi.



Slika 5 Proces izrade prešanih ploča [7]

4 Anizotropija papira

Anizotropija (grč. *nejednak*) je svojstvo nekog sredstva da njegova fizikalna svojstva poprimaju različite vrijednosti za različite smjerove. Ovo svojstvo vrijedi i za sve vrste papira, pa tako i za izolacijski papir. Ako uzmemo običan grafički papir (npr. novine) i pokušamo otkinuti dio papira, primijetiti ćemo da je potrebno primijeniti različitu silu pri kidanju papira u različitim smjerovima.

Do te pojave dolazi zbog samog procesa proizvodnje, gdje vlakna celuloze imaju tendenciju da se orijentiraju u smjeru toka proizvodnog procesa. Zbog toga će papir ili prešani papir imati različita mehanička svojstva u smjeru proizvodnje (eng. *Machine direction*, MD) i smjeru okomitom na smjer proizvodnje (engl. *Cross machine direction*, CMD). Vrlo brzi strojevi, kao strojevi za proizvodnju novinskog papira (brzine veće od 1500 m/min) imaju vrlo snažnu orijentaciju vlakana.

Svojstvo anizotropije također bitno utječe na sakupljanje i širenje materijala prilikom sušenja, odnosno upijanja vlage iz zraka.



Slika 6 Praktičan primjer orijentacije vlakna [7]

Najčešće vrste papira koje se koriste u transformatoru su[1]:

- **Običan papir** (eng. *Kraft paper*)
 - najčešće se koristi za izolaciju vodiča i priključaka namota
- **Krep papir** (engl. *Crepe paper*)
 - Elastičniji i savitljiviji od običnog papira
 - Koristi se za izoliranje nepravilnih oblika
 - Primjena: dodatno izoliranje priključaka namota, izoliranje statičkih prstena
- **Nomex** (sintetički aramidni papir)
 - Primjenjuje se kod viših temperatura, više od 220°C, ima puno bolja mehanička svojstva od običnog papira
 - Koristi se kao izolacija za vodiče, te kao slojna izolacija
 - Zbog svoje visoke cijene koristi se rjeđe, te većinom samo u specijalnim transformatorima
- **Nomex prešani papir** (sintetičke aramidne ploče)
 - Visoka mehanička i termička svojstva
 - Koristi se za izradu konstrukcijskih dijelova koji su pod povećanim termičkim opterećenjem (temperature više od 220°C), kao što su cilindri, letvice, podložne pločice, kutnici...
- **Prešani papir** (engl. *Presspaper*)
 - Ima bolja mehanička svojstva u odnosu na običan papir
 - Primjer primjene: slojna izolacija, kanalni umetak, usmjerivači protoka ulja
 - Prema IEC 60641-3-2:2007 definirano je 5 tipova prešanog papira, od čega se najčešće koriste dva tipa:
 - P.2.1 B – prešani papir visoke gustoće (bolja mehanička svojstva)
 - P.2.1 A – mekani prešani papir
- **Papir laminiran epoksidnom smolom** (engl. *Diamond dotted paper - DDP*)
 - Radi se o običnom ili prešanom papiru koji na sebi ima laminirane „dijamantne“ uzorke epoksidne smole koja pokriva 40 % površine papira
 - Prilikom završnog sušenja transformatora epoksidna smola reagira i međusobno veže slojeve papira
 - Primjenjuje se kao slojna izolacija u namotima distribucijskim transformatora
- **Transformatorski papir** (prešpan, engl. *Transformerboard ili pressboard*)
 - Koristi se za izradu konstrukcijskih dijelova namota (letvice, podložne pločice...), dijelova glavne izolacije (cilindri, kape, kutnici...) i ostalih potpornih dijelova

- IEC 60641-3-2:2008 definira 11 tipova transformatorskog papira od čega se najčešće koriste 2 tipa:
 - B.3.1 A – tvrdi transformatorski papir (u praksi se koristi oznaka T4), to je materijal visoke krutosti i visoke mehaničke čvrstoće koje se koristi za izradu mehanički opterećenih dijelova kao što su cilindri, letvice, podložne pločice...
 - B.5.3 – formabilni transformatorski papir (u praksi se koristi oznaka T7), koristi se za izradu geometrijski nepravilnih oblika
- **Laminirani tvrdi transformatorski papir/ploče** (engl. *Laminated transformerboard*)
 - Materijal visoke mehaničke čvrstoće
 - Koristi se za izradu konstrukcijskih dijelova na koja djeluju visoka mehanička opterećenja, npr. tlačne ploče, ležišta namota...
- **Kalandrirani papir**
 - ugušnjeni kraft papir koji ima bolje naponska svojstva na udarnom naponu
- **Termostabilni papir** (engl. *Thermal upgraded paper - TUP*)
 - Nitrirani kraft papir kojem su poboljšana termička svojstva, moguće su i kombinacije, npr kalandirarni TUP ili krep TUP
- **Mikrokrep papir**
 - Vrsta papira koja objedinjava dobra svojstva kalendriranog, termostabilnog i krep papira

Raspon debljina papira:

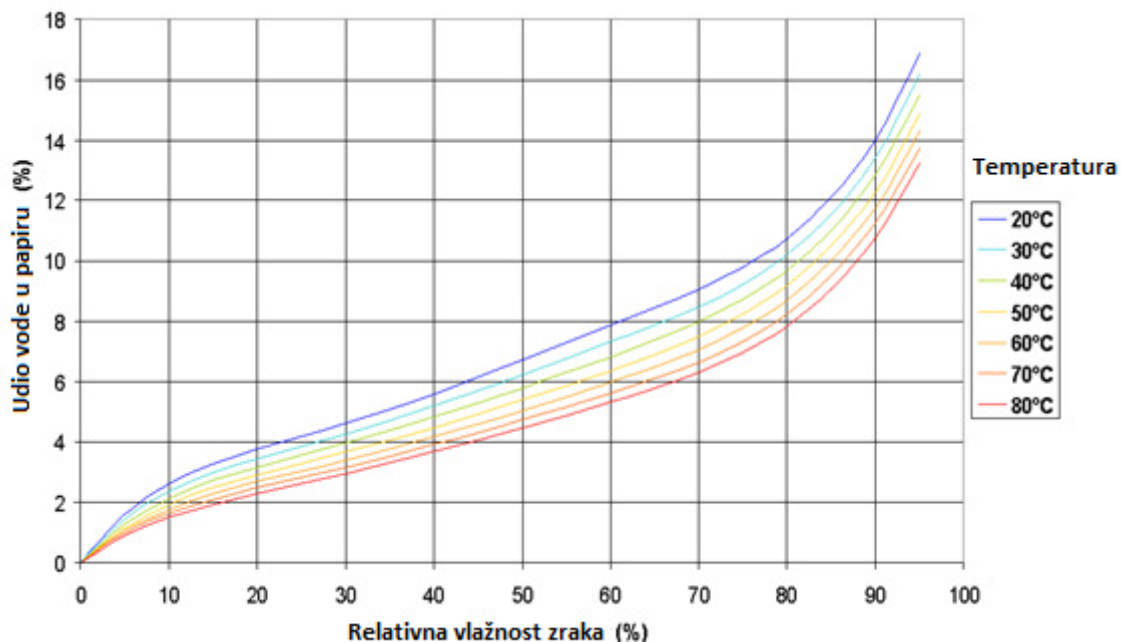
- Običan papir 0,015 – 0,25 mm
- Nomex papir 0,05 – 0,75 mm
- Nomex prešani papir (T994) 1 – 8 mm
- Tvrdi transformatorski papir (T4) 1-8 mm
- Formalablinski transformatorski papir (T7) 1-6 mm
- Laminirani tvrdi transformatorski papir (T4 laminated) 9 - 200 mm

Tablica 1 Karakteristike papira koji se koristi kao izolacijski materijal u transformatorima [1]

| Materijal | | Toplinska klasa, °C | Gustoća, kg/m ³ | |
|----------------------------|----------------|---------------------|----------------------------|--------------------|
| | | | raspon | Srednja vrijednost |
| Kraft papir, kraft paper | Obični | 105 | 750 - 850 | 800 |
| | Termostabilni | 120 | 750 - 850 | 800 |
| | Kalandrirani | 105 | 950 – 1050 | 1000 |
| Krep papir, crepe paper | | 105 | 750 – 850 | 800 |
| Prešani papir, press paper | Velike gustoće | 105 | 1200 – 1300 | 1250 |
| | Mekani | 105 | 1000 – 1200 | 1100 |
| Prešpan, transformerboard | Tvrđi | 105 | 1150 – 1250 | 1200 |
| | Formabilni | 105 | 910 – 990 | 950 |
| Nomex | | 220 | 720 - 1100 | 910 |

5 Utjecaj vlage

Većina električnih izolacijskih materijala za velike energetske transformatore u obliku formabilnih dijelova, papira, ploča ili laminiranih ploča se sastoji uglavnom od celuloze s izrazitim higroskopskim svojstvima. Higroskopsnost je svojstvo čvrstih ili tekućih tvari da upijaju ili zadržavaju vodu iz okoline. Zbog higroskopske prirode celuloze, relativni sadržaj vode u papiru može doseći nekoliko postotaka, ovisno o vlažnosti zraka i duljini vremena kojem je izolacija izložena tijekom svoje prerade ili prilikom sklapanja transformatora. Sadržaj vlage unutar izolacije nastoji u različitim procesnim fazama i fazama uporabe uspostaviti određenu ravnotežu s vlagom okoline, kako u zraku tako i u izolacijskom ulju.

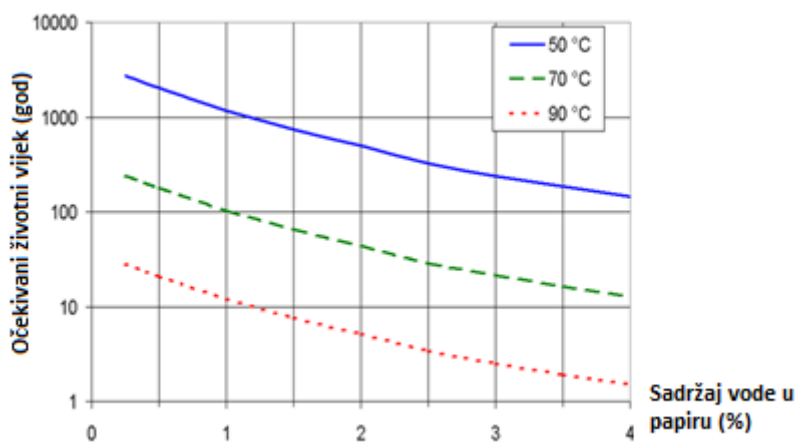


Slika 7 Udio vlage u izolaciji [7]

Takav povišeni sadržaj vode štetno utječe na dielektričnu čvrstoću papirne izolacije kao i na proces starenja izolacijskog sustava. Jedan od načina sprječavanja upijanja vlage iz zraka je uljna impregnacija materijala. No prije impregnacije uljem, obavezno je dobro sušenje izolacije. U pravilu sadržaj vode u izolaciji mora biti manji od 0,5%, veći postotak može uzrokovati već spomenuto ubrzano starenje, smanjenu dielektričnu čvrstoću, promjenu dimenzija, parcijalna izbijanja, povećanje sile stezanja u namotima.

Voda ima ubrzavajući učinak na brzinu starenja celuloze. Stoga, kada se postigne suho stanje izolacijskog materijala, ono se mora nastaviti održavati što je više moguće tijekom proizvodnje transformatora i rada transformatora.

Na sljedećem dijagramu jasno se može uočiti razlika u starenju izolacije s obzirom na udio vlage u materijalu i radnoj temperaturi transformatora. Udio vlage u izolaciji i visina temperature kojoj je izolacija izložena su dva najbitnija parametra koji određuju životni vijek izolacije, a samim time i životni vijek transformatora. Životni vijek izolacije koja u sebi ima sadržaj vlage manji od 0,5%, a koja je izložena radnoj temperaturi transformatora od 90°C iznosi 40 godina. Ako bi u isti transformator ugradili izolaciju sa udjelom vlage od 1% (povećanje za samo 0,5%), tada bi životni vijek iznosio 10 godina. Možemo dakle primijetiti drastični pad životno vijeka sustava izolacije s obzirom na malo povećanje udjela vlage u izolacijskom materijalu. Gledano s ekonomskog aspekta, životni vijek transformatora je jedan od najbitnijih parametara za distributere električne energije, jer u konačnici češća potreba za zamjenom transformatora direktno utječe na cijenu proizvodnje i distribucije električne energije.



Slika 8 Utjecaj vlage na životni vijek izolacije [2]

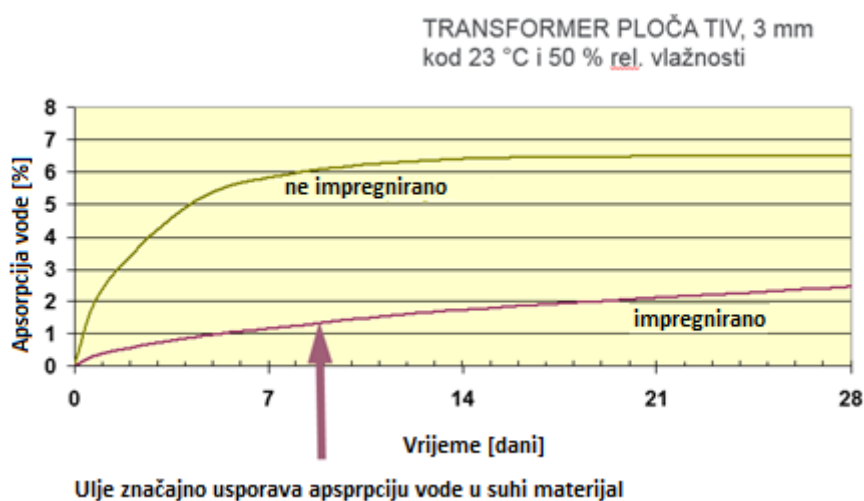
Uljna stabilizacija dijelova znači „*površinska impregnacija*“ vanjskih slojeva celuloze. Uljnom stabilizacijom se ispunjavaju vanjske pore izolacijskog materijala transformatorskim uljem. Taj postupak otežava migraciju vlage iz zraka u materijal kroz pore izolacijskog materijala. Treba imati na umu da se tim postupkom ne sprječava proces upijanja vlage, nego se samo usporava taj proces. Dijelovi stabilizirani uljem mogu se skladištiti dulje u normalnim sobnim uvjetima od ne stabiliziranih dijelova, te zadržati tolerancije dimenzija.

Uljem stabilizirani izolacijski dijelovi svakako sporije upijaju vlagu iz zraka, ali s druge strane sušenje ovih dijelova je također otežano zbog manje propusnosti vodene pare kroz pore koje su ispunjene uljem. To znači da je sušenje dijelova stabiliziranih uljem relativno otežano. Stoga takve dijelove uvijek treba prekriti plastičnom folijom gdje je to moguće, na primjer

tijekom privremenog rada na dijelovima ili skladištenja istih, kako bi se smanjila apsorpcija vlage.

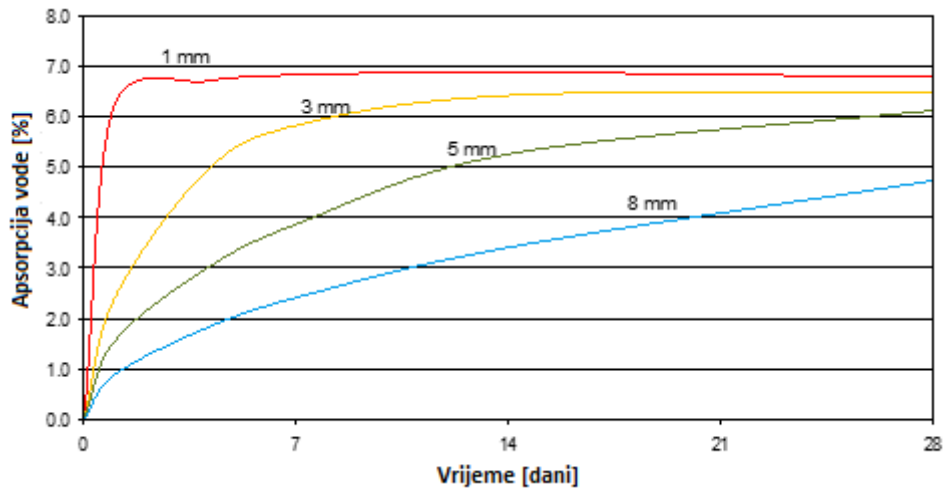
5.1 Brzina apsorpiranja vlage

Sljedeći dijagram prikazuje usporedbu brzine migracije vlage u impregnirani materijal s ne impregniranim materijalom za prešpan poprečne debljine 3 mm. Impregnacija značajno pomaže kod usporavanja prodiranja vlage u materijal, vlaga u ne impregniranom materijalu već nakon desetak dana dolazi u ravnotežu sa vlagom atmosfere u kojoj je materijal izložen. Kod impregniranog materijala proces prodiranja vlage je sporiji i da bi materijal upio istu količinu vlage kao ne impregnirani materijal potreban je vremenski period od nekoliko tjedana.

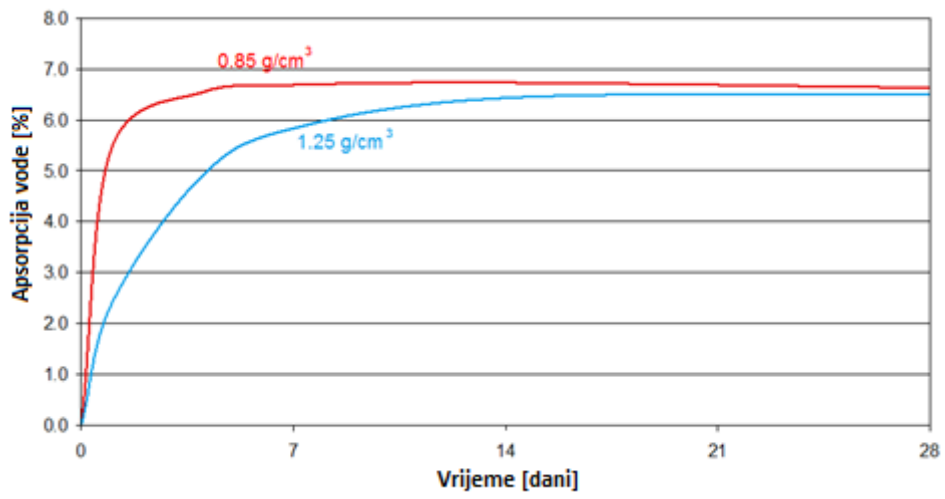


Slika 9 Brzina apsorpiranja vlage

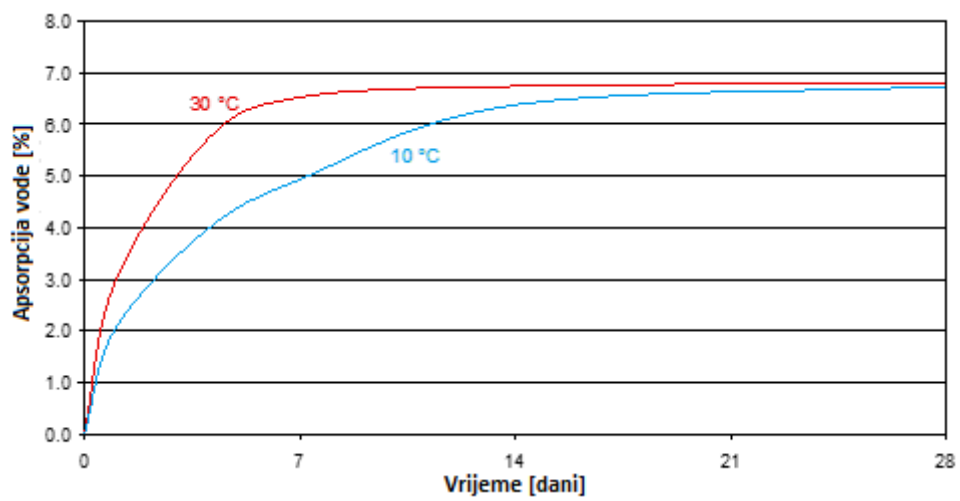
Brzina apsorpiranja vlage također ovisi o debljini samog materijala. Vlaga u tanjim materijalima će puno prije postići ravnotežu s okolnom atmosferom nego u materijalu s debljim poprečnim presjekom. Također jedan od parametara koji utječe na brzinu apsorpiranja vlage je gustoća materijala. Mekši materijali s manjom gustoćom, npr. kape, kutnici, formablina dijelovi, će imati veću sklonost apsorpciji vlage nego prešpan. Temperatura okolne atmosfere u kojoj je izolacijski materijal izložen također je jedan od parametara koji utječe na brzinu apsorpcije vlage, isti materijal će brže postići apsorpirati vlagu na višim temperaturama nego na nižim temperaturama.



Slika 10 Brzina apsorpiranja vlage ovisno o debljini materijala, TIV ploča [4]



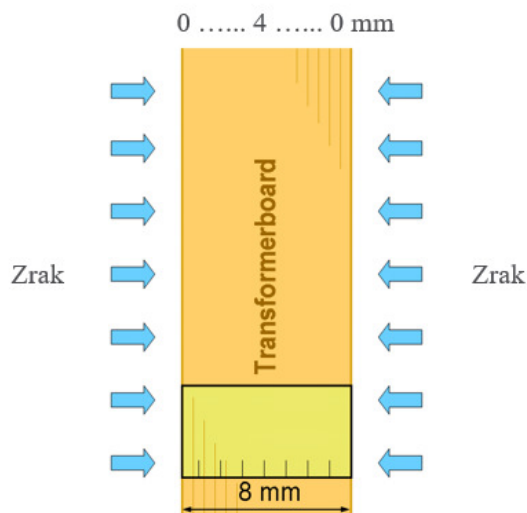
Slika 11 Brzina apsorpiranja vlage ovisno o gustoći materijala, prešane ploče



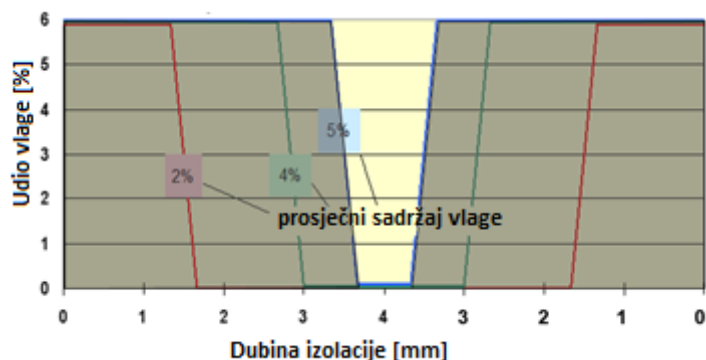
Slika 12 Brzina apsorpiranja vlage ovisno o atmosferskoj temperaturi, TIV ploča

5.2 Mehanizam apsorpiranja vlage

Materijal izložen atmosferskim uvjetima postepeno apsorpira vlagu iz zraka. Vлага u izolacijski materijal ulazi kroz njegove površinske pore i migrira prema unutrašnjosti materijala, kako je prikazano u nastavku. Brzina upijanja i udio vlage u materijalu je opisan u prethodnom poglavlju. Prilikom prodiranja vlage u materijal, ona prvo „zasićuje“ rubne slojeve materijala dok oni ne postignu ravnotežu s vlagom u okolnom zraku. Prema tome materijal debljine 8 mm može imati na svojim rubnim slojevima udio vlage od 6%, a unutrašnjost materijala može biti suha. U tom slučaju prosječni udio vlage u materijalu je znatno manji. Ovu činjenicu treba imati na umu ukoliko se za određivanje materijala koriste mjerni uređaji sa sondama za mjerenje vlage. U tome slučaju bi mjerenja bila netočna jer se mjerenja mogu izvršiti samo na površini materijala. Ispravnije bi bilo primijeniti gravimetrijsku metodu određivanja vlage na uzorku materijala, tj. mjeriti težinu materijala i usporediti ju s teoretskom težinom suhog materijala. Ta metoda daje realniju sliku, o udjelu vlage u izolacijskom materijalu. Točan udio vlage u materijalu je izrazito važan podatak kod proizvodnje izolacijskih komponenti koje čije dimenzije moraju poštovati određene tolerancije. Primjeri takvih komponenti su: cilindri, podložne pločice, kompresijski i metalizirani prsteni.



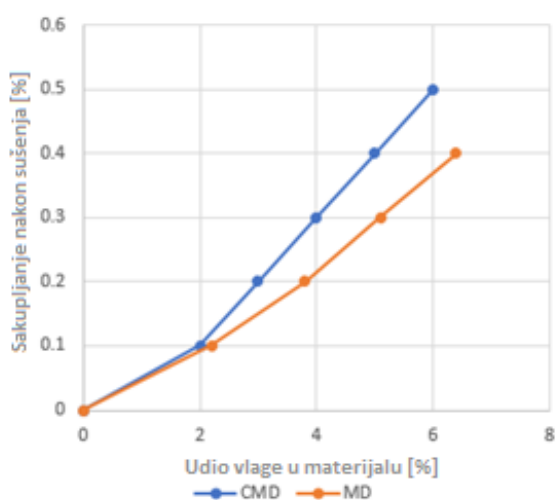
Slika 13 Prodiranje vlage u materijal, TIV ploča



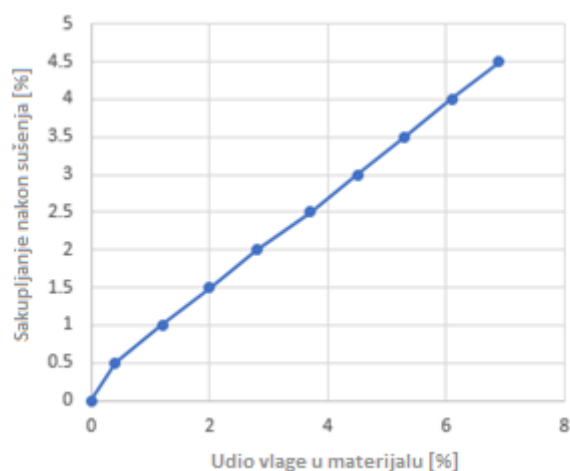
Slika 14 Zasićenje slojeva materijala vlagom, TIV ploča

Izmjena vlage između izolacijskog materijala i okoline uvijek je popraćena širenjem ili skupljanjem materijala, što može dovesti do ne samo promjene dimenzija materijala nego i do naprezanja u materijalu. Većina spomenutih komponenti tokom procesa izrade prolazi kroz fazu sušenja. Iz toga razloga se te komponente proizvode s određenim dodacima za sušenje. Da bi se odredio točan dodatak za sušenje, potrebno je poznavati točan udio vlage u materijalu, kako bi nakon procesa sušenja komponente bile u zadanim tolerancijama.

Slijedeći dijagrami prikazuju odnos između udjela vlage u materijalu i postotka sakupljanja materijala uslijed sušenja. U rasponu sadržaja vlage u materijalu od 4 % do 7% postoji linearna veza sa skupljanjem materijala u smjeru proizvodnje materijala (MD), u poprečnom smjeru proizvodnje materijala (CMD) i u debljini materijala, kao što je prikazano na dijagramu u nastavku. Postotak sakupljanja materijala nije jednak u svim smjerovima, razlog tome je anizotropija materijala. Do te pojave dolazi uslijed procesa proizvodnje izolacijskog materijala, kao što je opisano u prethodnom poglavlju.



Slika 15 Sakupljanje materijala u duljini i širini, TIV ploča

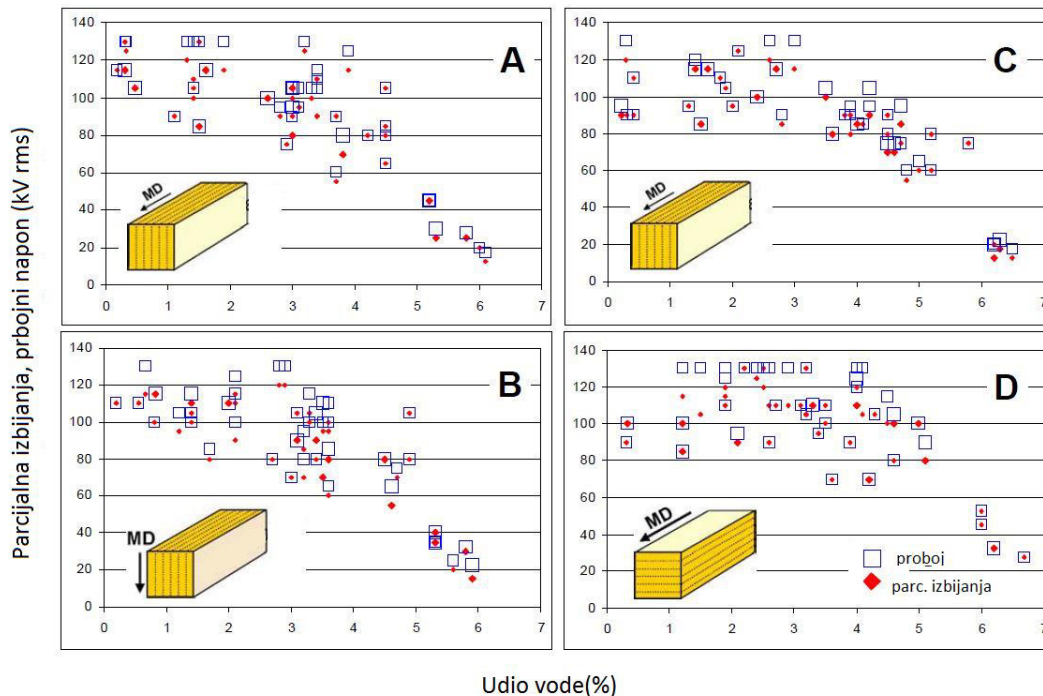


Slika 16 Sakupljanje materijala u debljini, TIV ploča

5.3 Utjecaj vlage na električnu čvrstoću izolacije

Celulozna izolacija predstavlja daleko najučinkovitiju i ekonomičniju vrstu izolacije energetskih transformatora hlađenih uljem, unatoč nekim nedostacima koji se ne mogu zanemariti. Jedan od tih razloga je starenje materijala, drugi je dobro poznata činjenica da dielektrična čvrstoća sustava izolacijskog sustava ovisi o udjelu vode u materijalu. U nastavku je prikazan učinak variranja sadržaja vode u izolacijskom materijalu na dielektričnu čvrstoću TIV transformerboarda. Dijagrami prikazuju napone parcijalnih izbijanja i napone proboja materijala. Mjerenja su napravljena na uzorcima TIV materijala (dim. 7x7x21mm) u različitim orijentacijskim konfiguracijama.

Mjerenje je izvedeno pomoću standardnih paralelnih elektroda, te su se bilježile vrijednosti parcijalnog izbijanja i vrijednosti napona proboja za svaki uzorak. Kod svih uzoraka, može se primijetiti snažan učinak vlage na dielektrična svojstva pri sadržaju vode $> 2\%$. Vrijednosti dielektrične čvrstoće su se smanjile značajno, sa oko 15 kV/mm za suho stanje materijala na 3 kV/mm za materijal sa sadržajem vode $\geq 6\%$ [3].



Slika 17 Utjecaj vlage na dielektrična svojstva izolacijskog materijala, (MD smjer proizvodnjematerijala) [3]

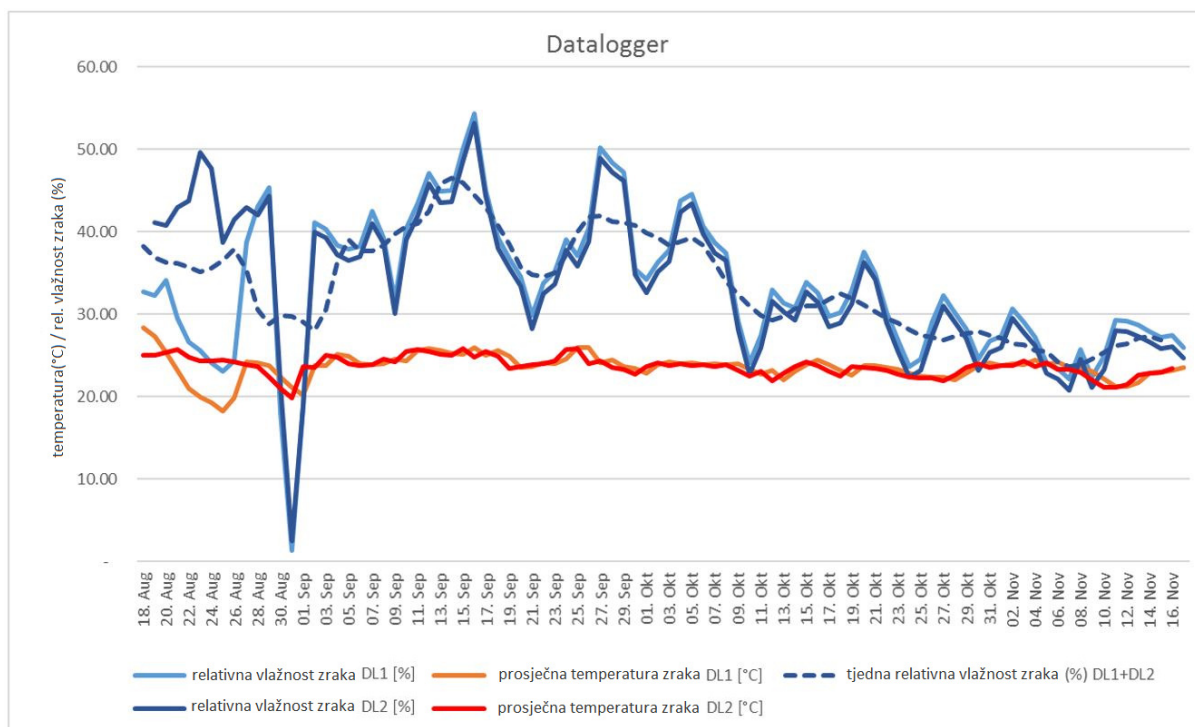
6 Zaštita jezgri statičkih prstenova od vlage – case study

Slučaj kvara na energetskom transformatoru u pokrenuo je istragu o jezgrama statičkih prstena. Proizvođač transformatora je primijetio da su statički prsteni bili izvan zadanih tolerancija. Nakon demontaže prstena došlo se je do zaključka da je uzrok nesukladnosti promjena dimenzija jezgri statičkih prstenova uslijed upijanja vlage. Jezgre su prilikom proizvodnje zadovoljavale i uredno prošle završnu kontrolu. Jezgre prstena su prošle proces sušenja ali nisu bile tretirane impregnacijskim uljem, niti bilo kakvom drugom površinskom zaštitom protiv upijanja vlage. Prsteni su bili pakirani u „stretch“ foliju, prema standardnoj proceduri za pakiranje.

Iz tog razlog osmišljen je test s četiri različito tretirana uzorka prstena u izvornoj veličini prstena koji su bili ugrađeni u transformator na kojem je nastao kvar. Jezgre od uzoraka statičkih prstena su bile tretirane na četiri različita načina:

- Sušenje u vakuumskoj peći, impregnirano uljem,
- Sušenje u peći s cirkulacijom vrućeg zraka, impregnirano uljem,
- Sušenje u peći s cirkulacijom vrućeg zraka, lakirano,
- Sušenje u peći s cirkulacijom vrućeg zraka, bez tretiranja.

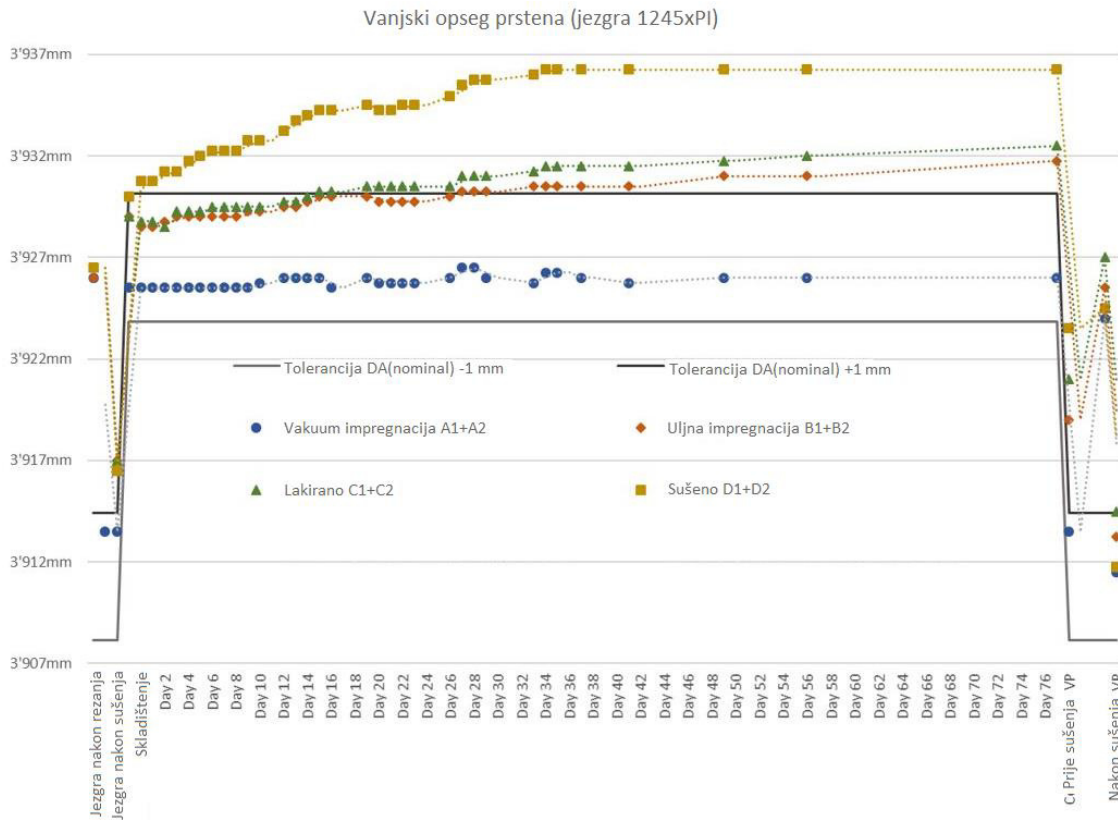
Na svim prstenima je izveden sloj metalizacije i sloj izolacije krep papirom ukupne debljine 2,5 mm. Prsteni su poslani kupcu i izloženi nezaštićeni 11 tjedana u atmosferskim uvjetima proizvodnje. Prsteni su zatim sušeni u parnoj fazi i ponovno mjereni. Paralelno tome mjerila se vlaga i temperatura sa dva „data loggera“ koji su pratili statičke prstene. Snimale su se vrijednosti temperature i vlage za svaki dan koji su prsteni proveli u atmosferskim uvjetima.



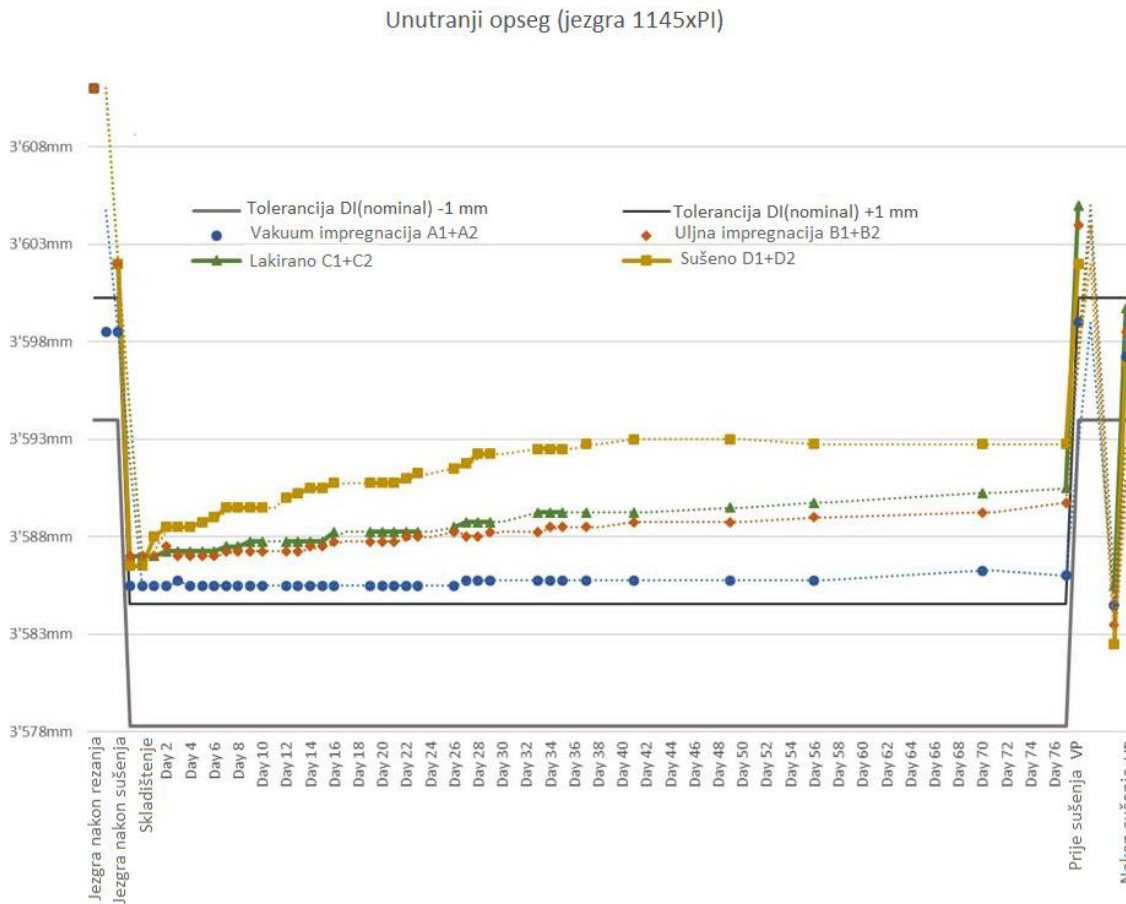
Slika 18 Vrijednosti relativne vlažnosti zraka i temperature za promatrani period

Sljedeći dijagrami prikazuju izmjerene dimenzije prstena u promatranom periodu. Dijagrami prikazuju i polje tolerancije od +/- 1 mm koje se odnosi na promjer prstena. Početne dimenzije svih prstenova bile su više-manje iste. Međutim, već odmah nakon izoliranja prstena krep papirom javljaju se značajne razlike, prsten koji je samo osušen već izlazi izvan tolerancije. Vakuumski osušeni prsteni ne pokazuju gotovo nikakve promjene u dimenzijama tijekom cijelog promatranog vremenskog perioda. Osušeni i tretirani uzorci povećavaju svoj promjer u vremenskom periodu od prvih 5 tjedana, te dalje tada stagniraju. Uzorci prskani uljem i lakirani uzorci kontinuirano rastu, oko 1,9 mm, tj. 0,15% u promjeru. Na kraju procesa, nakon sušenja u parnoj fazi, sva četiri prosjeka su unutar tolerancije. Međutim, lakirana verzija je na rubnoj granici tolerancije.

Uspoređujući rezultate možemo zaključiti da je najpouzdanija tehnologija stabilizacije jezgre statičkog prstena vakuumsko sušenje s uljnom impregnacijom materijala. Uzorci prstena koji su prošli spomenuti proces sušenja najviše su zadržali svoje dimenzije unutar zadanih tolerancija kroz cijelo promatrano razdoblje. Ostale metode stabilizacije su također zadovoljavajuće u konačnici, ali one pokazuju veliku osjetljivost na atmosferske uvjete.



Slika 19 Vanjski opseg jezgre statičkog prstena



Slika 20 Unutranji opseg jezgre statičkog prstena

7 Fenomen bijelih linija – case study

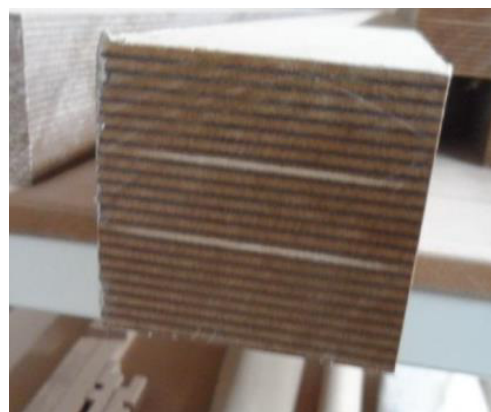
S vremena na vrijeme u laminiranim tvrdim transformatorskim pločama dolazi do pojave tzv. fenomena „bijelih linija“, taj fenomen najčešće se može primijetiti kod izrade tlačnih ploča, prstena ili komponenata debljeg poprečnog presjeka. Ovdje se ne radi o novom i potpuno nepoznatom fenomenu. Također prisutnost pojave bijelih linija u materijalu je učestalija u laminiranim pločama koje su skladištene od nekoliko mjeseci, pa do čak i nekoliko godina

Nekoliko različitih proizvođača transformatora imalo je primjedbu na bijele linije u laminiranim pločama, što je rezultiralo s nekoliko reklamacija, sve reklamacije su imale jednaku vrstu odstupanja.

Proizvođači transformatora su konstatairali da povremeno nakon piljenja ili glodanja debljih laminiranih prešanih ploča, svijetle gotovo bijele linije postaju vidljive u materijalu, te su one paralelne sa susjednim linijama lijepljenja. U većini slučajeva ove linije se ne nalaze na vrhu ili dnu laminirane ploče, već u sredini. Vizualnim pregledom utvrđeno je da su te linije zapravo delaminacija slojeva samog materijala. Dakle ovdje se ne radi o delaminaciji u zoni lijepljenja osnovnih ploča, nego o delaminaciji u osnovnom materijalu (ploči).



Slika 21 Delaminacija jednog sloja



Slika 22 Delaminacija dva sloja

Najizraženija delaminacija je u središtu laminiranog materijala, dok ona nije vidljiva na uzdužnom vanjskom rubu. Međutim, tijekom poprečnog rezanja efekt delaminacije pojavio se po cijeloj duljini ploče. Delaminacija nije nužno bila smještena samo u jednome sloju prešane laminirane ploče već se u nekim slučajevima radilo o dva sloja.

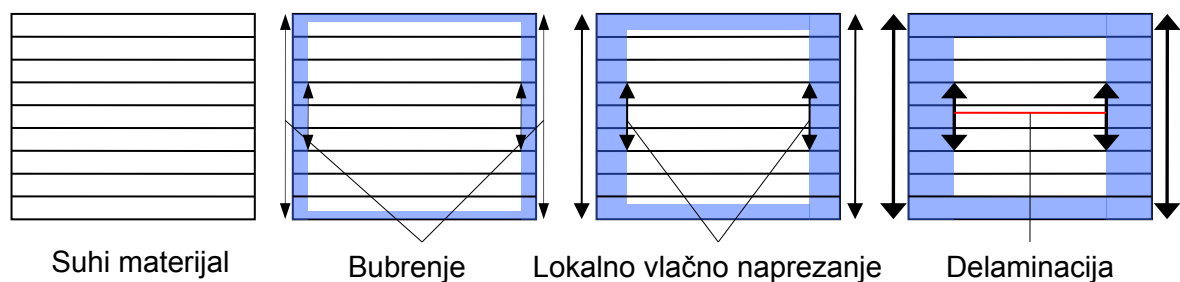
7.1 Kontrola procesa izrade osnovne ploče

Parametri u procesu izrade osnovnog materijala (ploče) mjere i bilježe se automatski tijekom izrade, te periodično laboratorijskim ispitivanjima. Niti jedno mjerenje nije ukazalo na moguće deformacije u materijalu, za reklamirane serije materijala. Uz poliestersko ljepilo dobavljač dostavlja svoj certifikat lijepila, te se dodatno provodi ispitivanje svake serije ljepila u centralnom laboratoriju. Svi su ispitni parametri ljepila bili unutar zadane specifikacije.

Prešane laminirane ploče proizvedene su na standardnoj opremi prema uputama gdje je za svako opterećenje propisan detaljan protokol. Prešana laminirana ploča se izrađuje od osnovnih ploča deblje 3 mm, 3,3 mm i 5 mm koje su međusobno zalijepljene. Evaluacijom protokola nisu primijećene nepravilnosti u proizvodnji. Nema naznaka da su defekti kod prijavljenih nesukladnosti laminiranog materijala rezultat neadekvatne proizvodnje osnovnog pločastog materijala i prešanog laminiranog materijala.

7.2 Hipoteza delaminacije

Do delaminacije ili raslojavanja dolazi kada mehaničko naprezanje nadilazi čvrstoću veze slojeva prešane ploče. Takva naprezanja ne nastaju samo prilikom deformacija poput savijanja ili uvijanja već i utjecajem vlage. Ploča je vrlo higroskopna zbog čega vrlo lako adsorbira vlagu. Upijanjem vlage materijal bubri što potiče mehanička naprezanja koja su u korelaciji sa gradijentom vlage. Ukoliko je veliki nagib gradijenta vlage, inducirana će naprezanja premašiti čvrstoću prijanjanja slojeva materijala i doći će do raslojavanja.



Slika 23 Bubrenje i delaminacija materijala [lab report 10952]

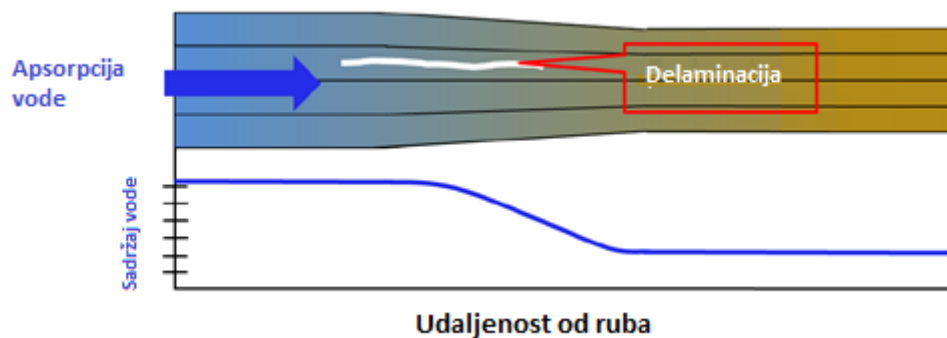
Ukoliko se navedena naprezanja izazvana vlagom preklape sa drugim mehaničkim naprezanjima poput glodanja ili piljenja, raslojavanje se može proširiti zbog učinka zareza.

7.3 Objašnjenje fizikalnih pojava

U slučajevima raslojavanja materijala nakon rezanja, izvor mehaničkog naprezanja je sljedeći:

Prešana ploča je vrlo higroskopan materijal koji lako upija vodu. Treba imati na umu da je ploča lijepljena poliesterskim ljepilom i da je udio vlage pri otpremi oko 3-4 %. Ploča izložena svim klimatskim uvjetima teži postizanju ravnoteže vlažnosti s okolnim zrakom. Brzina migracije vlage u materijal ovisi o klimi (temperatura, vlažnost zraka) i ovisi o vremenu izloženosti materijala. Osim u vrlo suhim uvjetima, vlaga će migrirati izvana prema središtu laminirane ploče. Štoviše, linije ljepila između laminiranih ploča čine barijeru za vlagu, stoga se migracija događa samo paralelno s linijama ljepila.

Apsorpcija vlage uzrokuje bubrenje materijala (izvana prema unutra) i time izaziva mehanička naprezanja unutar materijala, budući da se front vlage kreće izvana prema središtu. Ova mehanička naprezanja koreliraju s gradijentom vlage. Očito, što je veća vlažnost zraka oko lamelirane ploče, to je taj učinak izraženiji. Ako je ovaj gradijent prestrm, inducirana naprezanja će premašiti čvrstoću prijanjanja slojeva materijala (čvrstoću veze između celuloznih vlakana) i doći će do raslojavanja materijala.



Slika 24 Gradijent apsorpcije vlage

Budući da želimo bolje razumjeti taj fenomen, posebno kada se formira bijela linija i koji su dijelovi u pitanju, izvedena je serija testova kako bi se fenomen detaljnije istražio.

7.4 Testiranje laminiranog materijala

Za potrebe testiranja korištene su prešane ploče proizvođača izolacije Weidmann, ploče su laminirane poliesterskim ljepilom. Laminirana ploča je izrezana na komade prema sljedećoj tablici.

Tablica 2 Specifikacija uzoraka

| Količina | «Single board» debljina | Debljina | Širina | Duljina |
|------------|----------------------------|-----------|-----------|-----------|
| <i>Br.</i> | <i>mm</i> | <i>mm</i> | <i>mm</i> | <i>mm</i> |
| 4 | 3 | 25 | 25 | 1000 |
| 4 | 3 | 50 | 25 | 1000 |
| 10 | 3 | 50 | 50 | 1000 |
| 6 | 3.3 | 50 | 50 | 1000 |
| 6 | 5 | 50 | 50 | 1000 |
| 4 | 3 | 50 | 100 | 1000 |
| 20 | 3 | 50 | 200 | 200 |
| 20 | 3 | 50 | 400 | 400 |
| 4 | 3 | 100 | 100 | 1000 |

Uz Weidmann ploču testirana je laminirana ploča drugog proizvođača materijala Enpay. Za pokuse na Enpay materijalu izrezana je greda širine 60 mm i debljine 60 mm iz sredine ploče. Odlučeno je da se greda izvadi iz sredine (najmanje 400 mm od rubova) kako bi se osiguralo da je vrlo malo vlage već apsorbirano u materijal. Osim toga, materijal je dodatno osušen prije ispitivanja kako bi se imali isti preduvjeti za sve testirane uzorke.

7.4.1 Test utjecaja pakiranja na pojavu delaminacije

Za ovo ispitivanje korištene su grede dimenzija (100 x 100 x 1000) mm. Kako bi se istražio utjecaj pakiranja laminirane ploče na stvaranje delaminacija, ispitane su sljedeće metode pakiranja:

- Materijal nije pakiran
- Nauljeno (ulje se nanosi četkom)
- Vosak (debljina sloja cca. 0,5 mm do 1 mm)
- Omotano „stretch“ folijom (debljina folije: 20 µm, 2 do 3 sloja)
- Omotano PE-folijom (debljina folije: 200 µm)

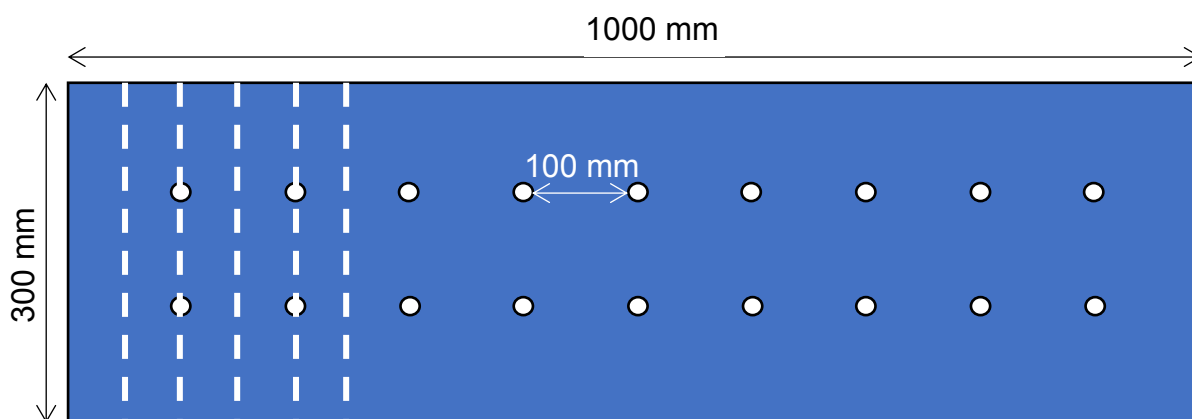
Nakon definiranog vremena uzorci su izrezani, a na rubovima je ispitana prisutnost bijelih linija.

7.4.2 Test malih laminiranih blokova i greda bez rupa za sušenje

Za ispitivanja na malim blokovima i gredama bez rupa za sušenje skladišteni su uzorci bez prethodne obrade/sušenja i uzorci koju su sušeni 4 dana na 105 °C u peći s cirkulacijom zraka, te zatim dodatno 3 dana sušeni u vakuum peći. Kako bi se osiguralo da materijal bude potpuno suh. Svi uzorci su zatim skladišteni u klimatiziranoj prostoriji na 23°C i 50 % relativne vlažnosti zraka i u klimatiziranoj prostoriji na 23°C i 75 % relativne vlažnosti zraka. Nakon definiranog vremena uzorci su izrezani, a na izrezanim rubovima ispitana je prisutnost bijelih linija. Dodatno uz prethodno navedene uvjete vlage, grede (50 × 50 mm) su također pohranjene na 45, 40 i 25 % relativne vlažnosti zraka.

7.4.3 Test na laminiranim blokovima sa rupama za sušenje

Uz prethodno opisana ispitivanja, ispitani su i veći uzorci s otvorima za sušenje. Dimenzije ispitnih uzoraka prikazane su na slici u nastavku. Uzorci su skladišteni na posteljima (kako bi se osigurao pristup zraka s donje strane) u klimatiziranoj prostoriji pri 23°C i 50 % relativne vlažnosti zraka. Promjer rupa za sušenje bio je 10 mm, a debljina lamelirane ploče bila je 100 mm. Isprekidane linije predstavljaju linije rezanja.



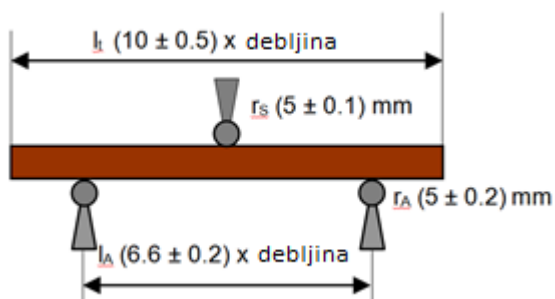
Slika 25 Dimenzije uzoraka s rupama za sušenje

7.4.4 Test mehaničke čvrstoće

Uzorci koji su bili skladišteni i koji su pokazali raslojavanje, te oni koji su bili umotani u plastičnu foliju testirani su na čvrstoću unutarnjeg sloja prema IEC 60763-2 standardu. Za svaku kombinaciju ispitana su tri uzorka.

Tablica 3 Specifikacija uzoraka za testiranje čvrstoće

| Debljina (s) | Širina (w) | Duljina (l) | Razmak oslonaca (l _A) |
|--------------|------------|-------------|-----------------------------------|
| 25 mm | 25 mm | 250 mm | 165 mm |
| 25 mm | 50 mm | 250 mm | 165 mm |
| 50 mm | 50 mm | 500 mm | 330 mm |



Slika 26 Shematski prikaz testiranja



Slika 27 Prikaz testiranja uzorka

7.5 Rezultati

7.5.1 Utjecaj pakiranja na pojavu delaminacija

U nastavku je dan pregled rezultata testa utjecaja pakiranja na pojavu delaminacije. Zelene kvadrati predstavljaju uzorke koji nisu pokazali bijelu liniju nakon rezanja. Crveni kvadrati predstavljaju uzorke na kojima je uočena bijela linija. Uzorci su pohranjeni u klimatiziranoj prostoriji na 23 °C i 50 % relativne vlažnosti zraka.

Tablica 4 Rezultati testa utjecaja pakiranja na pojavu delaminacije

| Dani skladištenja | Ne pakirani | Uljeni | Vosak | «Stretch» folija | PE-folija |
|-------------------|-------------|--------|-------|------------------|-----------|
| 0 d | | | | | |
| 18 d | | | | | |
| 32 d | | | | | |
| 56 d | | | | | |
| 95 d | | | | | |

7.5.2 Test blokova i greda bez rupa za sušenje

Pregled rezultata uzoraka koji nisu sušeni. Zeleni kvadrati predstavljaju uzorke kod kojih nije došlo do pojave bijele linije nakon rezanja. Crveni kvadrati predstavljaju uzorke na kojima je uočena bijela linija. Uzorci su bili pohranjeni u komori na 23 °C i 50 % relativne vlažnosti i u komori na 23 °C i 75 % relativne vlažnosti.

Tablica 5 Rezultati uzoraka bez rupa koji nisu sušeni

| | 23 °C / 50 % r.v. | | | | | | | | | 23 °C / 75 % r.v. |
|-----------------|-------------------|----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|----------------------|
| | Dimenzije | | | | | | | | | |
| Debljina (mm) | 50 | 25 | 50 | 50 | 50 | 100 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| Širina (mm) | 25 | 25 | 50 | 50 | 50 | 100 | 100 | 200 | 400 | 50 |
| Ploča (mm) | 3 | 3 | 3 | 3.3 | 5 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Širina/Debljina | 0.5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 4 | 8 | 1 |
| 0 d | | | | | | | | | | |
| 1 d | | | | | | | | | | |
| 2 d | | | | | | | | | | |
| 3 d | | | | | | | | | | |
| 4 d | | | | | | | | | | |
| 5 d | | | | | | | | | | |
| 10 d | | | | | | | | | | |
| 14 d | | | | | | | | | | |
| 17 d | | | | | | | | | | |
| 21 d | | | | | | | | | | |
| 25 d | | | | | | | | | | |
| 33 d | | | | | | | | | | |
| 42 d | | | | | | | | | | |
| 59 d | | | | | | | | | | |
| 74 d | | | | | | | | | | |
| 84 d | | | | | | | | | | |

Jednaka tablica kao tablica 5, ali u ovom testu uzorci su prethodno sušeni 4 dana na 105 °C u peći sa cirkulacijom zraka i dodatno još 3 dana u vakuum peći, te zatim skladišteni.

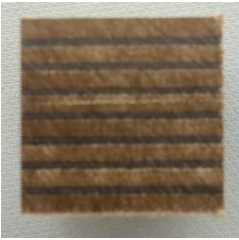




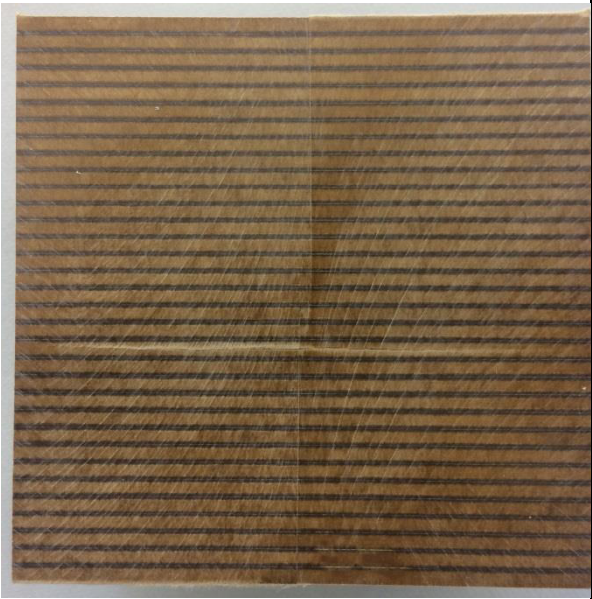



Tablica 6 Rezultati uzoraka bez rupa koji su sušeni

| | 23 °C / 50 % r.v. | | | | 23 °C / 75 % r.v. | | | |
|-----------------|-------------------|-----|----|-------|-------------------|-----|----|-------|
| | Weidmann | | | Enpay | Weidmann | | | Enpay |
| Debljina (mm) | 50 | 50 | 50 | 60 | 50 | 50 | 50 | 60 |
| Širina (mm) | 50 | 50 | 50 | 60 | 50 | 50 | 50 | 60 |
| Ploča (mm) | 3 | 3.3 | 5 | 3 | 3 | 3.3 | 5 | 3 |
| Širina/Debljina | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 d | | | | | | | | |
| 1 d | | | | | | | | |
| 2 d | | | | | | | | |
| 3 d | | | | | | | | |
| 7 d | | | | | | | | |

Tablica 7 Pregled rezultata za različite vrijednosti vlage

| | 23 °C / 25 % | 23 °C / 40 % | 23 °C / 45 % | 23 °C / 50 % | 23 °C / 75 % |
|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Širina (mm) | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| Debljina (mm) | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| Ploča (mm) | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Širin/Debljina | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 d | | | | | |
| 1 d | | | | | |
| 2 d | | | | | |
| 3 d | | | | | |
| 4 d | | | | | |
| 5 d | | | | | |
| 14 d | | | | | |
| 21 d | | | | | |
| 25 d | | | | | |
| 33 d | | | | | |
| 42 d | | | | | |

Tablica 8 Slike reznog ruba uzoraka s bijelim linijama

| | | | | |
|---|---|--|--|---|
|  |  |  |  |  |
| (25 x 25) mm 3 mm | (50 x 25) mm 3 mm | (50 x 50) mm 3 mm | (50 x 50) mm 3.3 mm | (50 x 50) mm 5 mm |
|  | |  | | |
| (100 x 100) mm 3 mm | | (50 x 100) mm 3 mm | | |
|  | |  | | |
| (50 x 200) mm 3 mm | | (50 x 400) mm 3 mm | | |







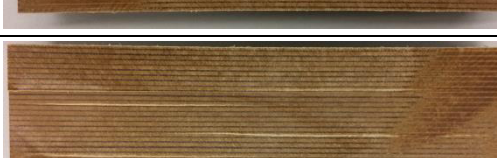

7.5.3 Test na blokovima s rupama za sušenje

Pregled rezultata uzoraka s rupama za sušenje. Zeleni kvadrati predstavljaju uzorke koji nisu pokazali bijelu liniju nakon rezanja. Crveni kvadrati predstavljaju uzorke na kojima je uočena bijela linija. Uzorci su skladišteni u klimatiziranoj prostoriji na 23 °C i 50 % relativne vlažnosti zraka.

Tablica 9 Rezultati materijala s rupama za sušenje

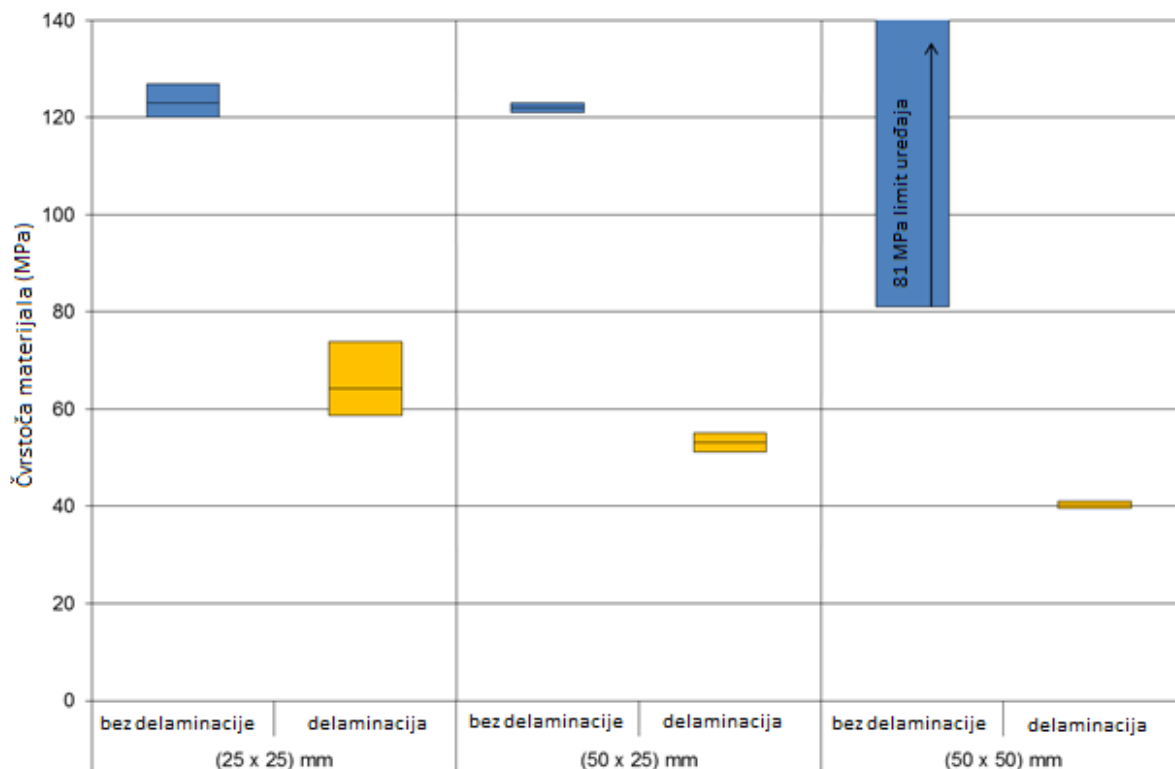
| Dani skladištenja | Između rupe | Kroz rupu |
|-------------------|-------------|-----------|
| 0 d | | |
| 3 d | | |
| 7 d | | |
| 10 d | | |
| 14 d | | |
| 24 d | | |

Tablica 10 Slike reznog ruba uzoraka s bijelim linijama

| Dani skladištenja | Rez između rupa za sušenje | Rez kroz rupu za sušenje |
|-------------------|---|--|
| 10 d |  |  |
| 14 d |  |  |
| 24 d |  |  |
| 54 d |  |  |

7.5.4 Test mehaničke čvrstoće

Pregled rezultata testa mehaničke čvrstoće materijala. Plava polja označavaju uzorke koji nisu delaminirani, žuta polja označavaju uzorke na kojima je uočena bijela linija, tj. koju imaju tragove delaminacije. U usporedbi s neoštećenim uzorcima, delaminirani uzorci gube više od 50 % svoje mehaničke čvrstoće.

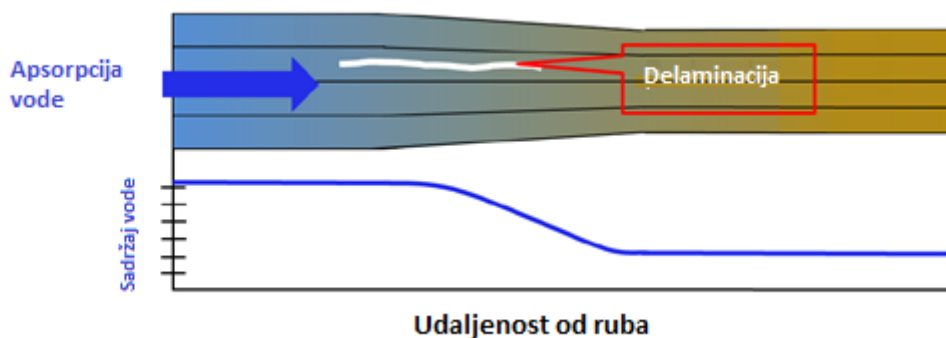


Slika 28 Rezultati testa mehaničke čvrstoće materijala

Rezultati mehaničkih ispitivanja na raslojenim i nerasklojenim uzorcima. Nije bilo moguće ispitati nerasklojene uzorke debljine 50 mm, budući da je dostignut limit stroja za ispitivanje.

7.6 Zaključak testova

Preduvjet za stvaranje bijelih linija u laminiranoj ploči je relativno strm gradijent vlage između površine ploče i materijala koji je uz nju. Ovaj gradijent vlage dovodi do bubrenja vanjskih područja laminirane ploče, što dovodi do napetosti i naknadno raslojavanja na unutarnjoj strani ploče. Uzorci izloženi relativnoj vlazi od 45 % i nižoj ne pokazuju bijele linije nakon 42 dana skladištenja.



Slika 29 Prikaz apsorebcije vlage u laminiranu ploču

Zaštita materijala od vlage pakiranjem smanjuje strmost nagiba gradijenta vlage, to je uzrokovano manjom apsorpcijom vlage po vremenu, tj. otežanom migracijom vode u ploču. Valjane metode zaštite su: pakiranje u plastičnu foliju (što je folija deblja to je utjecaj zaštite veći) ili mazanje voskom reznih rubova. Uljna impregnacija smanjuje difuziju vode u ploču, ali ne smanjuje vrijeme upijanja vode na površini ploče. Stoga uljna impregnacija ne štiti laminiranu ploču od stvaranja bijelih linija, tj. raslojavanja.

Fenomen bijele linije nije ograničen samo na Weidmann laminirane prešane ploče. Laminirane ploče proizvođača Enpay pokazuju isti efekt, te se može pretpostaviti da se ta raslojavanja javljaju na svim laminiranim pločama bez obzira na proizvođača.

Vrijeme do pojave raslojavanja jako ovisi o dimenzijama laminirane ploče. Omjer između širine i debljine ploče definira koliko brzo dolazi do raslojavanja, što je manji omjer to brže dolazi do raslojavanja. To je također primijećeno u svakodnevnom radu, debele i uske grede su češće pogođene nego veći komadi laminirane ploče. Čini se da je laminirana ploča izrađena od osnovne ploče debljine 3 mm otpornija na pojavu bijele linije nego laminirana ploča izrađena od osnovnih ploča debljine 5 mm. Međutim, grede (50 x 50) mm pokazuju raslojavanja unutar 4 dana kada leže nezaštićene u normalnim uvjetima, bez obzira na osnovni materijal.

Okolni atmosferski uvjeti imaju veliki utjecaj na vrijeme stvaranja delaminacija. Kad se relativna vlažnost poveća na 75 %, bijele se linije mogu uočiti čak i nakon skladištenja preko noći. Ispitivanja na uzorku sličnom prstenu za prešanje (uzorci s rupama za sušenje) pokazala su da se bijele linije stvaraju između 7 i 10 dana skladištenja. Ovisno o uvjetima skladištenja i izloženosti materijala atmosferi, vrijeme će biti duže ili kraće.

U usporedbi s neoštećenim uzorcima, delaminirani uzorci gube više od 50 % svoje mehaničke čvrstoće. Na pojedinim ispitivanim uzorcima mehanička čvrstoća smanjena je za gotovo 60 %. Takav materijal se više ne može koristiti za montažu transformatora.

8 Zaključak

Prilikom procesa proizvodnje transformatora izolacijski materijal prolazi kroz razne faze, npr. skladištenje sirovog materijala, izrada izolacijske komponente, skladištenje komponente (ili sirovog materijala), transport, te montaža i ugradanja u transformator. Da bi se osigurala visoka kvaliteta izolacijskog materijala potreba je zaštititi materijal od utjecaja vlage iz okolne atmosfere. U radu je prikazano kako metode impregnacije utječu na ponašanje izolacijskog materijala, te možemo zaključiti da metoda impregnacije pod vakuumom daje najbolje rezultate. Tj. dimenzije i svojstva vakuumski impregniranog materijala ponašaju najstabilnije u uvjetima gdje je materijal izložen vlazi.

Na kraju se može samo ponoviti ono što je već konstatirano ranije. Prilikom rukovanja izolacijskim materijalom ključna je zaštita od vlage:

- Po primitku materijala provjeriti je li pakiranje (još uvijek) u besprijekornom stanju, te da nije došlo do oštećenja, npr. u prijevozu (carinski pregled itd.).
- Ne otvarati pakiranje do upotrebe.
- Nakon otvaranja uvijek zaštitite neiskorišteni materijal u skladištu plastičnom folijom dobro omotanom i zalijepljenom oko prešane laminirane ploče.
- Uzimati u obzir apsorpciju vlage u tvornici – pokušati zadržati vrijeme izlaganja materijala što je moguće kraćim.

9 Literatura

- [1] D. Žarko, B. Čučić, Transformatori u teoriji i praksi, Graphis, Zagreb 2021.
- [2] Ch. Krause, F. Fehlmann, Building and Operating Short-Circuit Resistant Power Transformers, EGAT's Bang Pakong Training Center; Chachoengsao, Thailand; August 6 -7, 2007
- [3] Ch. Krause, P. Brupbacher, A. Fehlmann, B. Heinrich, Moisture Effects on the Electric Strength of Oil/Pressboard Insulation used in Power Transformers, IEEE International Conference on Dielectric Liquids, Coimbra, Portugal, June 26 - July 1, 2005
- [4] HP. Gasser, Ch. Krause, T. Prevost, Water Absorption of Cellulosic Insulating Materials used in Power Transformers, 2007 International Conference on Solid Dielectrics, Winchester, UK, July 8-13, 2007
- [5] H.P.Moser, Transformerboard, Scientia Electrica 1979.
- [6] H.P. Moser, V. Dahinden, Transformerboard II, Rapperswil 1987.
- [7] M.Sutter, Weidmann internal education presentation
- [8] Weidmann exhibiton room, Rapperswil, CH
- [9] Transformerboard III, Weidmann, Rapperswil 2022

Životopis

Matija Gajski je svoje srednjoškolsko obrazovanje stekao je u prvoj tehničkoj školi „TESLA“ u Zagrebu. Nakon položenog prijemnog ispita 2006. godine upisao je preddiplomski studij strojarstva na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Završni rad preddiplomskog studija „Višeagentno programiranje robota“ pod mentorstvom profesora dr. sc. Bojana Jerbić obranio je 2011. godine. Studij nastavlja na istoimenom fakultetu te 2013. godine brani diplomski rad „Konstruiranje kalupa za injekcijsko prešanje dječje igračke“ pod mentorstvom profesora dr. sc. Damira Godec. Svoj profesionalni razvoj počinje zapošljavanjem u tvrtci „Experterm d.o.o.“ na energetskom certificiranju zgrada i projektiranju strojarskih instalacija. Profesionalni razvoj nastavlja u tvrtci „Metalobrada d.o.o.“ gdje je radio kao tehnolog u proizvodnji strojnih dijelova i konstrukcija. 2016. godine zapošljava se u tvrtci „Weidmann IZO-PROD d.o.o.“ gdje danas radi kao rukovoditelj tehničkog ureda.

Biography

Matija Gajski finished his high school education at the „First Technical School TESLA“ in Zagreb. After passing the application exam in 2006, he enrolled in undergraduate studies in mechanical engineering at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture at the University of Zagreb. He defended his final thesis of the undergraduate study "Multi-agent robot programming" under the mentorship of professor Ph.D. Bojan Jerbić in 2011. He continued his studies at the same faculty and in 2013 he graduated on thesis "Construction of a mold for injection molding of a children's toy" under the mentorship of professor Ph.D. Damir Godec. His professional development started with employment at the company "Experterm d.o.o." where he worked on energy certification of buildings and designing mechanical installations. He continued to upgrade his professional development in the company Metalobrada d.o.o., where he worked as a technologist in the production of machine parts and steel structures. In 2016, he joined the company "Weidmann IZO-PROD d.o.o.", where he currently works as the head of the technical office.