

PRORAČUN HLAĐENJA TRANSFORMATORA

Jakopović, Karlo

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:175897>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-14**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



SVUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH
TEHNOLOGIJA OSIJEK
Sveučilišni studij

PRORAČUN HLAĐENJA TRANSFORMATORA

Završni rad

Karlo Jakopović

Osijek, 2019.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju

Osijek, 15.09.2019.

Odboru za završne i diplomske ispite

Prijedlog ocjene završnog rada

Ime i prezime studenta:	Karlo Jakopović
Studij, smjer:	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. studenta, godina upisa:	3911, 27.09.2018.
OIB studenta:	23901873568
Mentor:	Izv.prof.dr.sc. Tomislav Barić
Sumentor:	
Sumentor iz tvrtke:	
Naslov završnog rada:	Proračun hlađenja transformatora
Znanstvena grana rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Predložena ocjena završnog rada:	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
Datum prijedloga ocjene mentora:	15.09.2019.
Datum potvrde ocjene Odbora:	25.09.2019.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 16.09.2019.

Ime i prezime studenta:

Karlo Jakopović

Studij:

Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija

Mat. br. studenta, godina upisa:

3911, 27.09.2018.

Ephorus podudaranje [%]:

12%

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Proračun hlađenja transformatora**

izrađen pod vodstvom mentora Izv.prof.dr.sc. Tomislav Barić

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1 OPIS ZADATKA	1
2. PRINCIP RADA TRANSFORMATORA	2
2.1. IDEALNI TRANSFORMATOR.....	3
2.2. REALNI TRANSFORMATOR I NJEGOV MODEL.....	5
2.2.1. Struja magnetiziranja.....	6
2.2.2. Gubici u željezu	8
2.2.3. Gubici u bakru.....	12
3. NAČINI PRIJENOSA TOPLINE	14
3.1. PRIJENOS TOPLINE KONDUKCIJOM.....	14
3.2. PRIJENOS TOPLINE KONVEKCIJOM	17
3.3. PRIJENOS TOPLINE ZRAČENJEM	21
4. MJERENJA U LABORATORIJU	22
4.1 POKUS PRAZNOG HODA TRANSFORMATORA	24
4.2. POKUS KRATKOG SPOJA TRANSFORMATORA	25
4.3. POKUS OPTEREĆENJA TRANSFORMATORA	26
4.3.1 Zagrijavanje transformatora.....	28
4.3.2 Hlađenje transformatora	31
5. ANALIZA MJERNIH REZULTATA	34
5.1 ANALIZA POKUSA PRAZNOG HODA I KRATKOG SPOJA.....	34
5.2 ANALIZA POKUSA OPTEREĆENJA	35
6. ZAKLJUČAK.....	39
LITERATURA.....	40
ŽIVOTOPIS.....	42
SAŽETAK.....	43
PRILOZI.....	44

1. UVOD

Cilj ovog završnog rada je prikazati na koje sve načine dolazi do prijenosa topline prilikom rada transformatora. U početku ćemo se upoznati s osnovnim elementima i principom rada transformatora, a kasnije će biti prikazano i koje sve metode hlađenja se koriste prilikom njegove izgradnje. U konačnici će se sva potrebna mjerenja izvršiti u laboratoriju fakulteta te analizirati dobiveni mjerni rezultati. Hlađenje ima jako bitan utjecaj na sam rad transformatora jer gubici koji su nastali u željeznoj jezgri ili u namotu proizvode određenu količinu topline, stoga je potrebno izraditi kvalitetan sustav odvodnje topline. Transformatori manjih dimenzija, odnosno snaga, se obično hlade pomoću zraka što znači da se na kućištu nalaze takozvana "rebra" jer je sustav odvodnje topline pomoću pumpi (koje služe za cirkulaciju transformatorskog ulja kroz radijatore) preskup i nepotreban.

Konkretno u ovom završnom radu će se laboratorijska mjerenja vršiti na transformatoru jako male snage u suhoj izvedbi tzv. suhi transformator. Suhi transformatori se ne nalaze u metalnom kućištu što samim time znači da se ne nalaze u nikakvom ulju nego se sva proizvedena toplina direktno raspršuje u okolni zrak. Njihova primjena se uglavnom bazira na razne male uređaje i kućanske aparate jer su jeftini i lako ih je za proizvest, dok su vrlo slabo rasprostranjeni u distribuciji električne energije, a u prijenosu električne energije ih uopće nema.

Izvedba željezne jezgre suhih transformatora može biti od EI limova ili toroidalnog oblika.

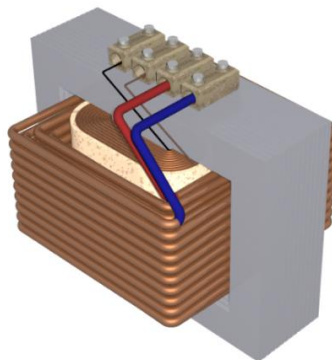
1.1 Opis zadatka

U završnom radu potrebno je izložiti fizikalne osnove i teoriju rada transformatora. Prikazati i opisati ekvivalentne električne i toplinske sheme transformatora. Opisati metode hlađenja transformatora. Izložiti osnove teorije prijenosa topline kondukcijom, konvekcijom i zračenjem. U dogovoru s mentorom/sumentorom odabrati primjer ili više njih za analizu. Rezultate prema mogućnosti provjeriti analitičkim izrazima ili drugim metodama. Izlaganje je potrebno poduprijeti izračunima, grafičkim prikazima, shemama i prema mogućnosti mjerenjima.

2. PRINCIP RADA TRANSFORMATORA

Većina transformatora, izuzev rotacijskih transformatora su statičke elektrotehničke komponente koje transformiraju električnu energiju jednog izmjeničnog napona i izmjenične struje u električnu energiju drugog napona i druge struje, pri tome frekvencija ostaje nepromijenjena [2]. Rad transformatora se temelji na zakonu elektromagnetske indukcije.

Uvodna razmatranja na temu transformatora najlakše je provesti na primjeru jednofaznog transformatora koji je prikazan na slici 2.1. Konstrukcija jednofaznog transformatora nije pretjerano komplicirana, može biti izvedena od željezne jezgre načinjene od tankih limova koji su međusobno izolirani i dva međusobno odvojena namota (primar i sekundar). Rad transformatora temeljen je na međuinaktivnoj vezi primara i sekundara koja mora biti što kvalitetnije izvedena kako bi se energija što kvalitetnije prenijela, a to se najčešće dobiva tako da se primarni i sekundarni namot stave jedan preko drugoga.



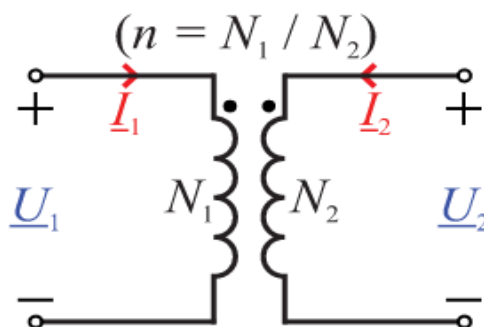
Slika 2.1 Jednofazni transformator. Slika preuzeta s [15]

Frekvencija u radu transformatora nam kaže koliko će puta magnetski tok u jednoj sekundi ići od primara do sekundara i obratno. Konkretno u Europi je frekvencija 50 Hz, što znači 50 puta u jednom smjeru i 50 puta u suprotnom smjeru, isto kao i električna struja.

2.1. Idealni transformator

Najjednostavniji model transformatora, a ujedno i za neke primjene zadovoljavajući, je model kojega nazivamo idealni transformator. Idealni transformator je model kojim se predstavlja idealizirani transformator. Pod time se podrazumijeva da u njemu nema nikakvih gubitaka, a samo fizikalno načelo na kojemu se zasniva njegov rad nije uključeno u model. Navedeno se može uključiti i model proširivanjem modela u smislu dodavanja odgovarajućih induktiviteta (induktiviteta magnetiziranja).

Modelom idealnog transformatora (Slika 2.2) predstavlja se idealizirani stroj kod kojega nema nikakvih gubitaka kao što su gubici u željezu ili gubici u bakru (namotu) također je i permeabilnost same jezgre konstantnog iznosa. Još jedna bitna svojstva idealnog transformatora su i ta da može prenijeti struje, napone i snage neograničenih iznosa. Primarni i sekundarni namot se kod transformatora označavaju s indeksima 1 i 2, gdje je indeks 1 za primarni, a indeks 2 za sekundarni namot.



Slika 2.2 Nadomjesna shema modela idealnog transformatora. Preuzeto s [16]

Da bi bila moguća transformacija napona s jedne naponske razine na drugu potrebno je imati različiti broj namota na primarnoj i sekundarnoj strani.

Do strujno naponskih prilika na priključcima idealnog transformatora može se doći na način da se napon i struja stvarnog transformatora kod kojega su zanemareni gubici opišu teorijom polja i valova te usporede s izrazima teorije strujnih krugova. Navedeno je prikazano u tekstu ispod. Na primarni namot se priključuje izvor izmjeničnog sinusnog napona efektivne vrijednosti U_1 koji

kroz njega tjera izmjeničnu sinusnu struju I_1 , a ona stvara promjenjivi magnetski tok Φ [3]. Sinusni oblik napona rezultira sinusnim magnetskim tokom Φ [3].

Promjenjivi magnetski tok Φ koji se nalazi u primarnom namotu će inducirati napon samoindukcije e_{1S} s efektivnom vrijednosti E_1 , dok će se u sekundaru inducirati napon međuindukcije e_{2M} s efektivnom vrijednosti E_2 .

$$e_{1S} = N_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (2-1)$$

$$e_{2M} = N_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (2-2)$$

Što znači da možemo reći da su napon samoindukcije i efektivna vrijednost napon primara isti, isto vrijedi i za sekundar gdje je napon međuindukcije jednak efektivnoj vrijednosti napona sekundara.

$$E_1 = U_1 \quad (2-3)$$

$$E_2 = U_2 \quad (2-4)$$

Efektivna vrijednost napona E_1 i E_2 se računaju prema formulama:

$$E_1 = 4.44 N_1 f \Phi_m \quad (2-5)$$

$$E_2 = 4.44 N_2 f \Phi_m \quad (2-6)$$

Kada ih stavimo u omjer, dobijemo:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2-7)$$

Što se tiče omjera struja primara i sekundara, njih ćemo dobiti iz činjenice da je snaga na primaru i sekundaru kod idealnog transformatora ista. Što znači:

$$P_1 = P_2 \quad (2-8)$$

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 \quad (2-9)$$

Iz toga slijedi:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (2-10)$$

Prema slici 2.2 i smjeru struje sekundara, omjer struja primara i sekundara će biti negativan zbog zakona međuinukcije, pa vrijedi:

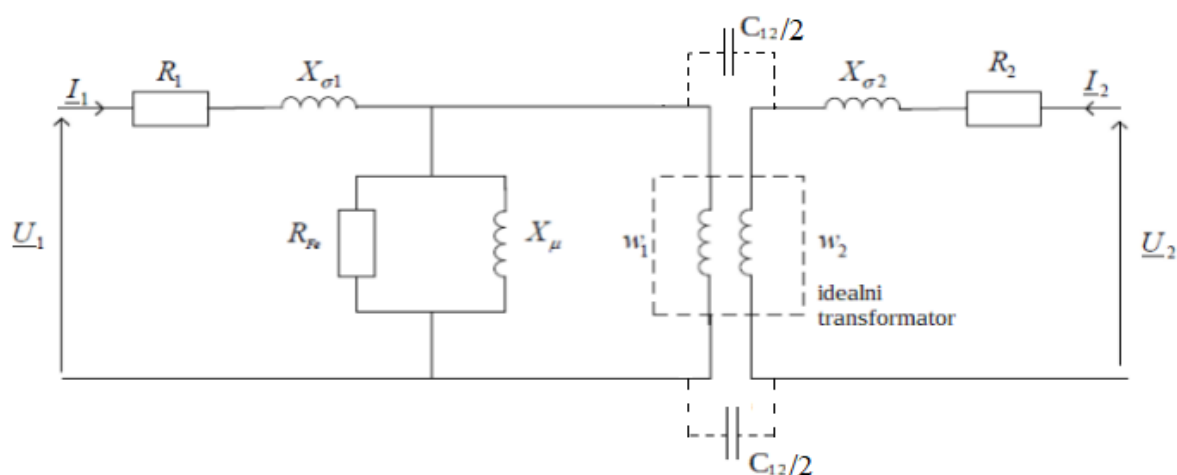
$$\frac{\bar{U}_1}{\bar{U}_2} = \frac{-\bar{I}_2}{\bar{I}_1} \quad (2-11)$$

Iz svih ovih formula možemo zaključiti da ako na primaru imamo veći broj zavoja nego na sekundaru tada će na primaru biti i veći napon, a za struju vrijedi suprotno, tamo di je veći broj zavoja struja će biti manja.

2.2. Realni transformator i njegov model

U početku su bile rečene karakteristike za model idealnog transformatora u svrhu lakšeg razumijevanja modela realnog transformatora, kod kojega princip rada nije ni približno isti kao kod modela idealnog.

Kod model realnog transformatora (Slika 2.3) moramo u obzir uzeti: struju magnetiziranja, gubitke u željezu i gubitke u bakru jer se radi njih mora dimenzionirati hlađenje transformatora.



Slika 2.3 Nadomjesna shema modela realnog transformatora. Preuzeto s [4] i uređeno

U shemi prikazanoj na slici 2.3. značenja simbola uz elemente mreža su:

- R_1 - otpori kojima se modeliraju toplinski gubici nastali u bakru primarnog namota
- R_2 - otpori kojima se modeliraju toplinski gubici nastali u bakru sekundarnog namota
- $X_{\sigma 1}$ - rasipna induktivna reaktancija primarnog namota kojim se modelira magnetsko polje nastalo zbog struje koja potječe primarnim namotom, a koje nije obuhvaćeno zavojima sekundara
- $X_{\sigma 2}$ - rasipna induktivna reaktancija sekundarnog namota kojim se modelira magnetsko polje nastalo zbog struje koja potječe sekundarnim namotom, a koje nije obuhvaćeno zavojima primara
- R_{fe} - otpor kojim se modeliraju gubici nastali u željeznoj jezgri
- X_{μ} - induktivna reaktancija kojom se modelira magnetsko polje koje magnetski veže primar i sekundar
- w_1 - broj zavoja primarnog namota
- w_2 - broj zavoja sekundarnog namota
- C_{12} - kapacitet između primarnog i sekundarnog namota kojim se modelira električno polje nastalo uslijed razlike potencijala između vodiča primarnog i sekundarnog namota

2.2.1. Struja magnetiziranja

Za uzbuđivanje magnetskog polja u jezgri transformatora potrebni su prema zakonu protjecanja uzbudni amperzavoji, koji će ovisiti potrebnoj veličini magnetskog toka u jezgri, geometrijskim dimenzijama jezgre, te o magnetskim karakteristikama limova, iz kojih je jezgra načinjena [1]. Krivulja magnetiziranja prikazana je na slici 2.4.

Priključivanje primara transformatora na sinusni valni oblik, odnosno na mrežu tada će se u jezgri inducirati sinusni magnetski tok, koja prema (2-5) glasi:

$$\Phi_m = \frac{U_1}{4.44 f N_1} \quad (2-12)$$

Pretpostavimo prilikom proračuna da se magnetski tok u cijeloj jezgri ima jednaku momentnu vrijednost Φ_t . Iz te pretpostavke možemo lako izračunati magnetsku indukciju B jer je na svakome mjestu u jezgri ona ista.

$$B = \frac{\Phi_t}{S} \quad (2-13)$$

Jakost magnetsko polja u zračnim rasporima H_0 će se računati prema formuli:

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} \quad (2-14)$$

Gdje je μ_0 permeabilnost vakuuma, a B_0 je magnetska indukcija u zračnom rasporu.

U kolegiju Osnove elektrotehnike se učilo da se iz petlje histereze za svaku vrijednost magnetske indukcije unutar jezgre može očitati pripadna vrijednost jakosti magnetskog polja unutar jezgre.

Na osnovu toga možemo odrediti jakost magnetskog polja na svim dijelovima unutar jezgre te po zakonu protjecanja

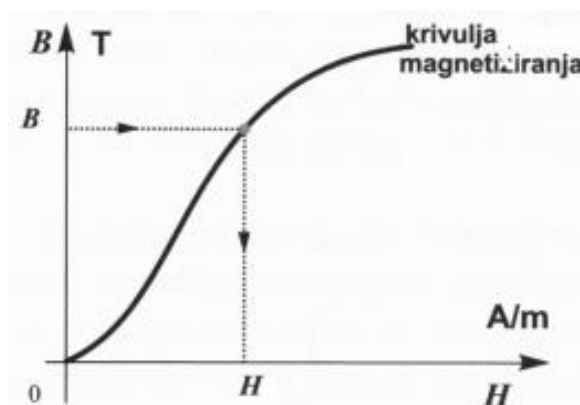
$$\oint H_l dl = i_0 w \quad (2-15)$$

možemo izračunati potrebne amperzavoje struje magnetiziranja.

Integriranje ćemo provesti na način da ćemo H_l razdvojiti na jakost magnetskog polja kroz željezo i kroz zračni raspor pa dobijemo:

$$i_\mu = \frac{\oint H_{fe} dl + \int H_\delta dl}{w_1} = i_{fe} + i_\delta \quad (2-16)$$

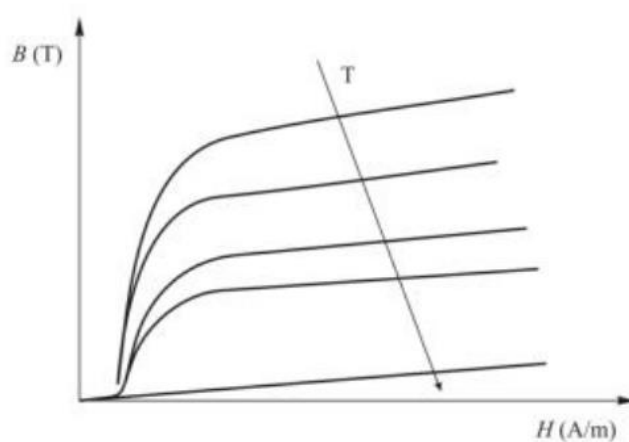
U konačnici smo još rastavili na struje za uzbuđivanje željeza i_{fe} i uzbuđivanje zračnog raspora i_δ .



Slika 2.4 Krivulja magnetiziranja. Preuzeto s [5]

Vrijednost materijala za izradu magnetskog kruga (magnetske jezgre) mjeri se njegovim električkim, tehničkim i tehnološkim svojstvima, ali najvažnije svojstvo je veličina magnetskog toka (Φ) kojeg taj materijal propusti pri određenom vanjskom magnetskom polju (H) [6].

Porastom temperature slabe magnetska svojstva materijala [6], prikazano na slici 2.5. Indukcija zasićenja pada, krivulja se linearizira i pri određenoj temperaturi prelazi u pravac (materijal se ponaša kao paramagnetski) [6]. Taj proces je reverzibilan, te nakon hlađenja materijal poprima svoja prethodna svojstva (ako materijal nije prethodno termički obrađen da se dobije neka specijalna struktura u svrhu poboljšanja magnetskih svojstava) [6].

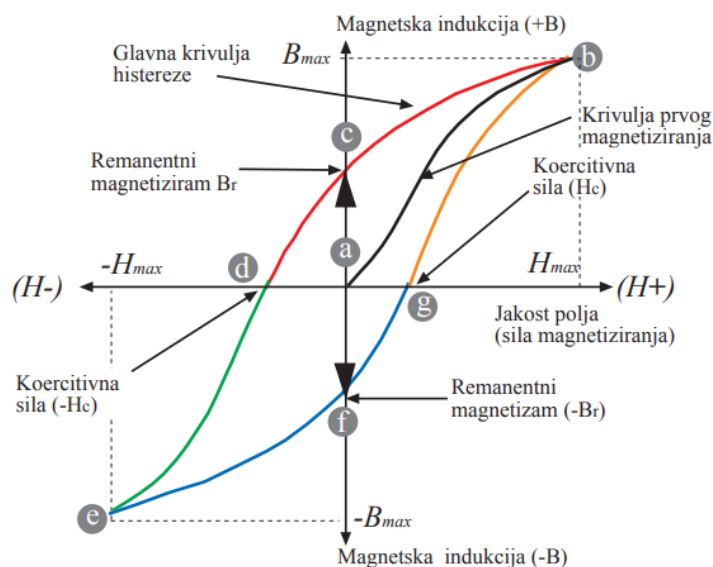


Slika 2.5 Temperaturna ovisnost krivulje magnetiziranja. Preuzeto s [6]

2.2.2. Gubici u željezu

Kada kažemo gubici u željezu to se podrazumijeva kao gubici u jezgri transformatora, ti gubici se dijele na gubitke petlje histereze i gubitke vrtložnih struja.

Gubici petlje histereze nastaju zbog izmjeničnog magnetiziranja magnetskog kruga. Energija uslijed histereze jednaka je razlici energije koja se, povećanjem magnetopobudne sile i indukcije, dovodi magnetskom krugu i energije koja se pri smanjenju ovih dvaju veličina vraća u mrežu, tj. ona je jednaka s površinom histerezinog ciklusa [2]. Ta površina predstavlja potrebnu energiju koja je potrebna za jedan ciklus premagnetiziranja, drugim riječima površina mora biti što manja jer su tada i gubici manji, najidealniji slučaj bi bio kad bi se mogao dobiti pravac koji prolazi kroz ishodište što nije nikako moguće u praksi.



Slika 2.6 Petlja histereza. Preuzeto s [17]

Kako bi se pobliže mogla objasniti petlja histereza (Slika 2.6) moramo razumjeti i ostale elemente koji ju karakteriziraju kao što su: glavna krivulja histereze, remanentni magnetizam i koercitivna sila.

Glavna krivulja histereze nastaje postepenim smanjivanjem jakosti magnetskog polja (vanjsko magnetsko polje) od trenutka kada se jezgra nalazi u zasićenju pa sve dok ne dostigne vrijednost 0 A/m. Postepenim smanjivanjem vanjskog magnetskog polja polako dolazi i do opadanja vrijednosti magnetske indukcije u jezgri, ali njena vrijednost neće biti 0 T, što znači da u trenutku prestanka rada transformatora u jezgri će i dalje biti prisutna magnetska indukcija koji se naziva remanentni magnetizam ili tzv. remanencija.

Remanentni magnetizam moguće je maknuti iz jezgre transformatora jedino ako vanjsko magnetsko polje poprimi negativnu vrijednost, ta negativna vrijednost jakosti magnetskog polja potrebna za poništenje zaostale magnetske indukcije naziva se koercitivna sila.

Gubitke nastale zbog histereze računamo prema Steinmetzovoj formuli koja glasi:

$$P_H = \eta f m B_m^2 \quad (2-17)$$

gdje su:

- P_H – gubici uslijed histereze
- f – frekvencija
- m – masa željezne jezgre

- B_m – maksimalna vrijednost magnetske indukcije
 η – histerezin sačinilac, dobije se eksperimentalno i predstavlja površinu petlje histereze što znači da ovisi o vrsti materijala

Bitna činjenica koja je vidljiva iz formule (2-15) je da gubici uslijed histereze rastu s kvadratom magnetske indukcije.

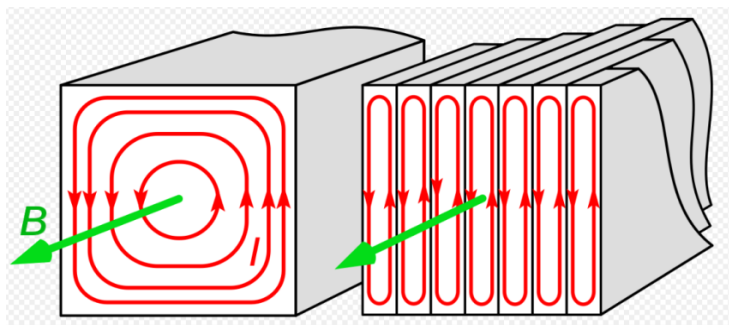
Steinmetz-ova formula prema izrazu (2-15) se koristi za iznose magnetskog toka veće od 1 T, a u slučaju da je vrijednost manja od 1 T onda se u formuli mora promijeniti vrijednost potencije za maksimalnu vrijednost magnetske indukcije, te iznosi 1.6 .

$$P_H = \eta f m B_m^{1.6} \quad (2-18)$$

Konkretno rečeno, histereza je pojava koja nastaje zbog kašnjenja magnetske indukcije tijekom promjene jakosti magnetskog polja. Kod odabira materija za jezgru transformatora moramo koristiti feromagnetske materijale, najbolje je željezo. U praksi se najčešće koristi meko željezo jer je utjecaj kašnjenja magnetske indukcije za jakosti magnetskog polja manje nego kod tvrdog željeza.

Gubici vrtložnih struja nastaju zbog električnog polja koje je prisutno u samoj jezgri transformatora kao posljedica promjenjivog magnetskog polja, prikaz vrtložnih struja najbolje je prikazan na slici 2.7. Zbog pojave električnog polja osim vrtložnih struja u jezgri nastaju i elektromotorne sile.

Iz prakse znamo da su tanki limovi od kojih jezgra sačinjena međusobno izolirani, pa iz toga proizlazi da se vrtložne struje stvaraju u svakom limu zasebno. Razlog zašto se to radi je zato što su gubici koji nastaju kao posljedica vrtložnih struja manji, ali ni to nije bilo dovoljno pa se limovi od kojih je sačinjena jezgra rade od praškastog materijala takozvanog ferita (još se naziva i alfa-željezo). Na taj način mi umjesto jedne „velike” vrtložne struje u svakom limu imamo jako puno malih.



Slika 2.7 Prikaz Vrtložnih struja. Preuzeto s [18]

Smjer kretanja vrtložnih struja je okomito na smjer magnetskog polja. Relacija po kojoj se računaju vrtložne struje je:

$$P_{VT} = \sigma f^2 m B_m^2 \quad (2-19)$$

Koeficijent vrtložnih struja se računa prema formuli:

$$\sigma = \frac{1.64}{\mu_{Fe}} \cdot a^2 \cdot \rho \quad (2-20)$$

gdje su:

- μ_{Fe} – specifična permeabilnost željeza
- a – debljina jednog lima
- ρ – električni otpor lima

Sada kad imamo formule za gubitke nastale uslijed histereze i vrtložnih struja ukupni gubici u željezu se računaju kao zbroj te dvije formule.

$$P_{Fe} = P_H + P_{VT} = \eta f m B_m^2 + \sigma f^2 m B_m^2$$

$$P_{Fe} = (nf + \sigma f^2) m B_m^2 \quad (2-21)$$

Izraz unutar zagrade u formuli (2-19) predstavlja gubitke kod mase limova od 1kg i pri magnetskoj indukciji od $\pm 1T$, ti gubici se još nazivaju specifični jedinični gubici.

$$\Gamma_{Fe1} = \eta f + \sigma f^2 \quad (2-21a)$$

Za transformatorske limove od 0.35mm vrijednosti specifičnih jediničnih gubitaka Γ_{Fe1} (tj. Za 1 kg lima pri maksimalnoj vrijednosti indukcije $B_m=1T$ i $f=50Hz$) kretale su se, za normalne i razne vrste legiranih limova, 3,15 – 2,3 – 1,6 – 1,45 – 1,3 kg, a za novije također visokolegirane ovi gubici iznose 1,15 do 1,00 W/kg [2]. Znači da specifični jedinični gubici ovise isključivo o karakteristikama materijala od kojega je jezgra sačinjena.

Gubici u željezu bez obzira na snagu s kojom teretimo transformator su približno konstantnog iznosa. To smo zaključili na osnovu toga jer znamo da je napon mreže stabilan (postoje male oscilacije napona koje možemo zanemariti), stabilan napon nam stvara i stabilnu elektromotornu silu E , pa je samim time i magnetska indukcija B_m u jezgri konstantnog iznosa. Osim toga zaključka znamo da su koeficijent vrtložnih struja (σ), histerezin koeficijent (η), masa jezgre i frekvencija mreže također konstantnog iznosa. Svi ti zaključci u konačnici potvrđuju tezu da su gubici u željezu konstantnog iznosa ($P_{Fe}=\text{const.}$).

Gubici u željezu u laboratorijima se ispituju iz pokusa praznog hoda, a to znači da su nam stezaljke sekundara transformatora odspojene.

2.2.3. Gubici u bakru

Gubici u bakru nastaju prilikom prolaska struje kroz namote transformatora jer struja zagrijava vodiče, ti gubici se još nazivaju i Jouleovi gubici.

Gubici u bakru transformatora se računaju prema formuli:

$$P_{Cu} = P_{Cu1} + P_{Cu2} = q_1 k_{f1} R_1 I_1^2 + q_2 k_{f2} R_2 I_2^2 \quad (2-22)$$

gdje su:

- q_1, q_2 – Broj faza primara, sekundara
- k_{f1}, k_{f2} – Fildov koeficijent za primar, sekundar
- R_1, R_2 – Omski otpor primara, sekundara
- I_1, I_2 – Struja primara, sekundara
- P_{cu} – Gubici u bakru

U formuli za računanje gubitaka u bakru nećemo koristiti klasičnu formulu za računanje Jouleovih gubitaka ($P = I^2 R$) zato što je ona primijenjenija za istosmjernu struju, a transformator koristi izmjeničnu struju za svoj rad. Kada vodičem teče izmjenična struja dolazi do stvaranja

neravnomjerno raspoređene gustoće struje pa su time i omski gubici nešto malo veći. Razlog neravnomjerno raspoređene gustoće struje je rasipanje magnetskog toka oko vodiča. Stoga da bi se izbjegla ta mala pogreška, odnosno da bi nam rezultat bio točniji, trebamo pomnožiti omske otpore s Fildovim koeficijentom k_f i tako za svaki namot zasebno ili jednostavno sve još pomnožiti s brojem zavoja.

Gubici u bakru u laboratorijima se ispituju iz pokusa kratkog spoja, a to znači da su nam stezaljke sekundara transformatora kratko spojene. Gubici u bakru nisu isti za sva opterećenja kao što je to bio slučaj kod gubitaka u željezu nego se s povećanjem opterećenja, odnosno struje, ti gubici povećavaju.

$$P_{Cu} = \left(\frac{P_s}{P_{sn}} \right)^2 P_{Cun} \quad (2-23)$$

Gdje su:

- P_s – Gubici u bakru pri opterećenju različitom od nominalnog
- P_{sn} – gubici u bakru pri nominalnom opterećenju
- P_{cun} – nominalni gubici u bakru.

3. NAČINI PRIJENOSA TOPLINE

Prijenos topline je proces prelaženje toplinske energije s tijela više temperature na tijelo niže temperature dok se te dvije temperature ne izjednače. Prijenose topline možemo podijeliti u tri kategorije: prijenos topline kondukcijom (provođenjem), konvekcijom (strujanjem) i zračenjem (radijacijom).

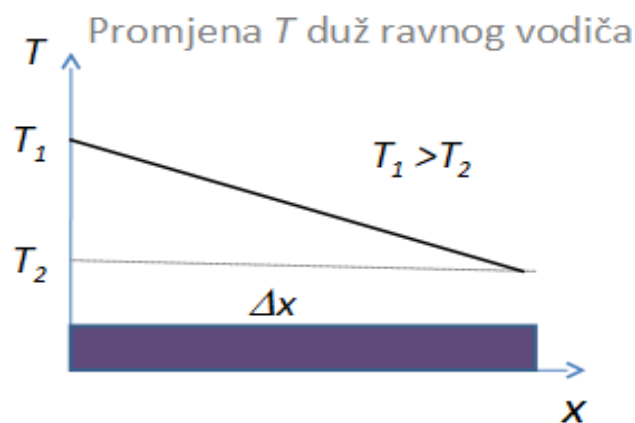
Razlika između širenja topline kondukcijom i konvekcijom je u tome što se kod kondukcije proces širenja topline prenosi s molekule na molekulu, a sami predmet miruje. Dok se kod konvekcije proces širenja topline dešava s molekule na molekule, ali dok je predmet u pokretu. Prijenos topline konvekcijom se dešava kod tekućina i plinova dok je prijenos topline kondukcijom moguć samo kod krutih tvari.

Prijenos topline zračenjem bi značilo, kao što i samo ime kaže, da se toplina prenosi na daljinu što bi značilo da predmeti nisi u direktnom dodiru. Pri prijenosu topline zračenjem toplinska energija tijela pretvara se u elektromagnetsko zračenje koje tijelo emitira u okolni prostor [8]. Količina toplinske energije koju tijelo prenosi zračenjem u okolinu ili na druga tijela jako ovisi o temperaturi samog tijela, gdje će ugrijano tijelo s većom temperaturom prenjeti više toplinske energije i na veću udaljenost

3.1. Prijenos topline kondukcijom

Prijenos topline kondukcijom (provođenjem) podrazumijeva prijenos topline međusobnom interakcijom molekula, odnosno da toplina prelazi s molekule na molekulu. Brzina širenja topline ovisi o kinetičkoj energiji koju posjeduju same molekule, a to bi značilo da ako se molekule brže gibaju tada imamo i veću temperaturu pa će samim time taj predmet proizvoditi i veću toplinsku energiju (toplinu). Jednostavnije rečeno, kada predmet s višom temperaturom prislonimo na predmet s nižom temperaturom brže molekule će početi usporavati jer će se sudarati sa sporijim molekulama te će samim time i predati jedan dio svoje kinetičke energije na sporije molekule. Sporije molekule će zbog toga početi ubrzavati sve dok se brzine gibanja molekula ne izjednače. Iz svega toga možemo zaključiti da su temperatura i toplina direktno povezane. Prijenos topline kondukcijom se odnosi samo na krute tvari. Kao primjer iz svakodnevnog života možemo uzeti električni štednjak kod kojega se prijenos topline kondukcijom dešava s ugrijane ploče na metalni lonac koji se nalazi na toj ploči.

Vođenje topline kroz homogeni materijal može se računati pomoću Fourierova zakona [8]. Kako bi se lakše razumio Fourierov zakon najbolje ga možemo prikazati preko vođenja topline kroz sredstvo s poprečnim presjekom S , prikazano slikom 3.1. Za početak moramo napraviti pretpostavku da naša temperatura opada linearno od jednog do drugog kraja te da je homogeno raspoređena po cijeloj dužini sredstva. Također ćemo razmatrati stacionarni prijenos topline što znači da ćemo pretpostaviti da temperatura bilo koje točke sredstva ne ovisi o vremenu, već samo o mjestu u sredstvu [8].



Slika 3.1 Prikaz Fourierova zakona vođenja topline. Preuzeto s [19]

T_1 predstavlja temperaturu na mjestu grijanja promatranog presjeka sredstva, a T_2 temperaturu na drugom kraju presjeka, dok Δx predstavlja međusobnu udaljenost ta dva presjeka.

Toplina koja s jednog do drugog kraja sredstva dođe u određenom vremenu t se računa po formuli:

$$Q = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} S t \quad (3-1)$$

gdje su:

Q – Toplina

λ – Koeficijent toplinske vodljivosti

$\Delta T / \Delta x = (T_2 - T_1) / \Delta x$ – Gradijent temperature

(-) – Minus označava prijenos topline s područja višeg temperature na područje niže temperature

Toplinska energija u krutim tvarima se prenosi migracijom slobodnih elektrona te vibracijom rešetke [10]. Prijenos topline pomoću slobodnih elektrona je puno učinkovitiji od prijenosa topline vibracijom rešetke kod krutih tijela, dok se kod nemetala toplina prenosi vibracijom rešetke. Dobar električni vodič je dobar vodič topline zbog prisutnosti velike količine slobodnih elektrona, koji mogu prenositi toplinsku energiju iz područja više temperature prema nižem dok prenose električni naboj [10].

Kada tu tvrdnju usporedimo s koeficijentom toplinske vodljivosti λ vidimo da su metali s jako dobrom električnom vodljivošću (srebro, bakar, aluminij) ujedno i dobri odvodnici topline. Materijali s jako malim koeficijentom toplinske vodljivosti λ (vuna, zrak, plastika) se upotrebljavaju kao toplinski izolatori.

Tablica 3.1: Koeficijent toplinske vodljivosti za određene materijale pri 20°C. Preuzeto s [11]

Metali	λ , W/(m·K)	Tekućine	λ , W/(m·K)
Srebro	427	Živa	8,00
Bakar	398	Voda	0,58
Zlato	315	Metanol	0,21
Aluminij	250	Aceton	0,16
Željezo	50	Motorno ulje	0,15

Tablica 3.2 Nastavak. Preuzeto s [11]

Nemetali	λ , W/(m·K)	Plinovi	λ , W/(m·K)
Opeka	1,60	Vodik	0,168
Staklo	1,05	Helij	0,124
PVC plastika	0,19	Metan	0,030
Drvo	0,13	Zrak	0,024
Staklena vuna	0,04	Ugljični dioksid	0,015

3.2. Prijenos topline konvekcijom

Prijenos topline konvekcijom podrazumijeva prijenos topline u tekućinama i plinovima gdje se toplina prenosi strujanjem fluida, a strujanje nastaje kao posljedica promjene gustoće fluida. Prijenos topline kondukcijom kod tekućina i plinova je vrlo slabo pa ga stoga možemo zanemariti. Kao primjer prijenosa topline konvekcijom možemo uzeti sustav grijanja u kućanstvima, gdje radijator zagrijava okolni zrak te se zagrijani zrak diže prema stropu dok se onaj hladni spušta prema podu i dolazi do radijatora gdje se cijeli proces ponovi. Zaključak toga procesa je da hladniji zrak ima veću gustoću od toplijeg, isti slučaj je i kod tekućina.

Primjer konvekcije koji je gore naveden se zove slobodna konvekcija, postoji još i prisilna konvekcija gdje moramo uložiti dodatnu energiju. Da bi se postigla prisilna konvekcija moramo uložiti energiju u rad pumpi ili ventilatora koji će ubrzati sami proces prijenosa topline.

Prijenos topline konvekcijom možemo računati pomoću Newtonova zakona hlađenja [8]:

$$q = h_c (T_p - T_f) \quad (3-2)$$

gdje su:

- q – gustoća toplinskog toka
- h_c – koeficijent konvekcije
- T_p – Temperatura čvrste plohe uz koju struji fluid
- T_f – Temperatura fluida dalje od granične plohe

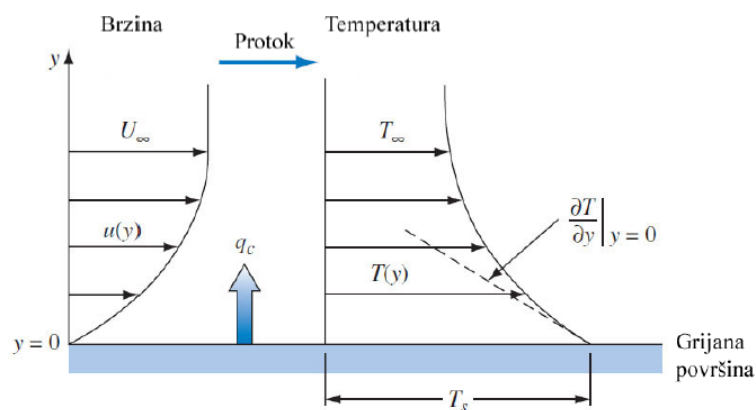
Tablica 3.3 Koeficijenti konvekcije. Preuzeto s [10]

Materijal	W/(m ² · K)
Zrak, slobodna konvekcija	6-30
Pregrijana para ili zrak, prisilna konvekcija	30-300
Ulje, prisilna konvekcija	60-1800
Voda, prisilna konvekcija	300-18000
Voda, 100°C	3000-60000
Para, kondenzacija	6000-120000

Formula za Newtonov zakon hlađenja (3-2) se koristiti isključivo onda kada zrak struji iznad zagrijane ravne plohe te ju hladi.

Na slici 3.2 prikazane su temperatura fluida pri T_∞ koji teče paralelno na ploču i temperatura ploče T_s . Brzina fluida pri stijenci će biti 0 te će se postepeno povećavati do U_∞ , a to je prikazano kao rezultat viskozne sile. Pri samom dodiru sa sučeljem toplina se prenosi isključivo kondukcijom jer se fluid pri sučelju ne giba. Ukoliko bi temperaturni gradijent i toplinska kondukcija bili poznati kod sučelja, mogla bi se izračunati brzina prijenosa topline preko jednadžbe [12]:

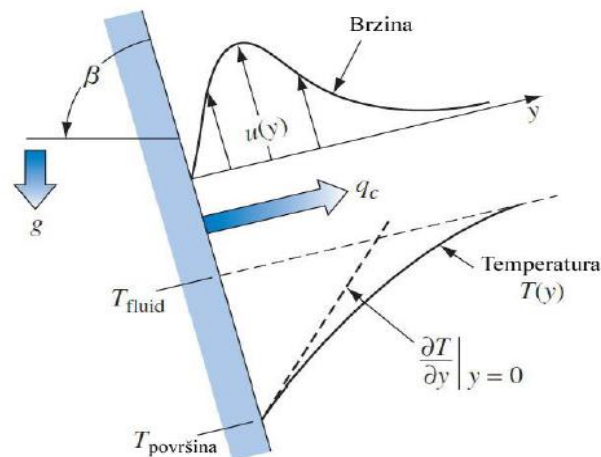
$$q_c = -k_f \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} \right) \quad (3-3)$$



Slika 3.2 Brzina i profil temperatura za prijenos topline konvekcijom zagrijane ploče s tokom fluida preko svoje površine. Preuzeto s [12]

Kod prisilne konvekcije, tj. umjetno stvorene, brzina dalje od ploče se približava vrijednosti brzine slobodnog protoka brzini nametnutoj od strane vanjske sile, dok se kod prirodne brzina povećava s udaljenošću te se kasnije smanjuje, kao što je prikazano na slici 3.3[12].

Do toga dolazi zbog toga što se s udaljenosti od površine viskoznost brzo smanjuje, dok se razlika u gustoći sporije smanjuje. Približavanjem gustoće fluida vrijednosti nezagrijanog okoliša fluida dolazi do smanjenja dinamičke sile. Kao posljedica toga dolazi do interakcije sila koja prouzrokuje povećanje brzine do maksimuma te će zatim doseći nultu vrijednost. Temperaturna polja u prirodne i inducirane konvekcije imaju slične karakteristike te u oba slučaja mehanizam prijenosa topline fluid-ploča je kondukcija[21].



Slika 3.3 Brzina i temperaturna raspodjela za prirodnu konvekciju preko grijane ploče pod kutom β u odnosu na horizont. Preuzeto s [12].

Iz do sada rečenoga može se zaključiti da prijenos topline konvekcijom ovisi o brzini fluida, gustoći fluida, viskoznosti fluida i o temperaturnim karakteristikama (kondukciji i specifičnoj toplini).

U prirodne konvekcije brzina ovisi o temperaturnoj razlici između površine i fluida, koeficijentu toplinskog širenja (koji određuje promjenu gustoće po jedinici temperaturne razlike), te sili polja samog tijela odnosno gravitacijskoj sili [21]. Procijeniti vrijednost koeficijenta konvekcije h_c je vrlo teško zato što ga puno parametara određuje kao što su: oblik, dimenzije i položaj površine, brzini, karakteristikama fluida i o razlici u temperaturi ΔT . Svi ti parametri vrlo često jako puno variraju i to je razlog teške procjene koeficijenta konvekcije h_c . Stoga trebamo razlikovati lokalni i prosječni prijelaz topline konvekcijom. Lokalni se računa prema formuli [12]:

$$dq_c = h_c dA (T_s - T_\infty) \quad (3-4)$$

lokalni prosječni koeficijent h_c se može definirati preko lokalne vrijednosti [12]:

$$\bar{h}_c = \frac{1}{A} \iint_A h_c dA \quad (3-5)$$


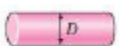
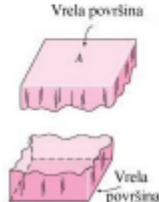

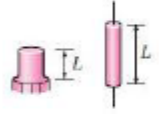

Iz izraza (3-2) može se odrediti toplinska kondukcija za prijenos topline konvekcijom K_c , koja glasi:

$$K_c = \bar{h}_c \cdot A \quad (3-6)$$

te toplinski otpor za prijenos topline konvekcijom R_c izrazom[12]:

$$R_c = \frac{1}{\bar{h}_c \cdot A} \quad (3-7)$$

Tablica 3.4 Pojednostavljene relacije koeficijenta prijenosa topline konvekcijom pri laminarnim uvjetima za pojedina geometrijska tijela pri atmosferskom tlaku

	$h_{\text{conv}} = 1,42 \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{0,25}, \quad (\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}))$
	$h_{\text{conv}} = 1,32 \left(\frac{\Delta T}{D} \right)^{0,25}, \quad (\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}))$
	$h_{\text{conv}} = 1,32 \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{0,25}, \quad (\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}))$ $h_{\text{conv}} = 0,59 \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{0,25}, \quad (\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}))$
	$h_{\text{conv}} = 2,44 \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{0,25}, \quad (\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}))$
	$h_{\text{conv}} = 3,53 \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{0,25}, \quad (\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}))$
	$h_{\text{conv}} = 1,92 \left(\frac{\Delta T}{D} \right)^{0,25}, \quad (\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}))$

3.3. Prijenos topline zračenjem

Prijenos topline zračenjem se razlikuje od prijenosa topline kondukcijom ili konvekcijom u tome što mu nije potreban nikakva čvrsta tvar ili fluid kako bi se prenijela energija na drugo tijelo ili u okolinu, takav prijenos topline najučinkovitiji je u vakuumu. Kada neko tijelo zrači ono zrači elektromagnetske valove koji se u najvećoj mjeri nalaze u infracrvenom području. Infracrveno zračenje se emitira samo onda kada temperatura tijela nije dovoljno visoka kako bi se uz infracrveno zračenje emitirala još i vidljivu svjetlost, a ako tome tijelu počinjemo dodatno povećavati temperaturu ono će početi zračiti i ultraljubičastu svjetlost. Stoga možemo zaključiti da će temperatura tijela definirati kojim intenzitetom i u kojem spektru će tijelo zračiti toplinsku energiju.

Pri razmatranju prijenosa topline zračenjem treba uzeti u obzir energiju koju tijelo izrači i energiju što je apsorbira, te rezultatni toplinski tok dobiti kao razliku tih dvaju tokova [8]. Energija koja će biti razmijenjena između promatranih tijela ovisi o svojstvima tijela, udaljenosti površini svakog tijela. Najjednostavniji je primjer kada se tijelo površine S_1 , temperature T_1 i koeficijenta emisije ε_1 nalazi unutar šupljine čije stijenke imaju temperaturu T_2 . U slučaju da je površina stijenki šupljine idealno crno tijelo (savršeni apsorber upadnog zračenja) tada će se izmjena topline računati prema formuli:

$$\Phi = \varepsilon_1 \sigma S_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (3-8)$$

gdje su:

- ε – koeficijent emisije
- σ – dimenzijska konstanta ($5.67 \cdot 10^{-8}$)
- Φ – toplinski tok

4. MJERENJA U LABORATORIJU

Mjerenja su obavljena u laboratoriju za osnove električnih mjerenja na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek. Mjerenje se obavilo dana 17.07.2019. godine s početkom u 9:00 sati, a završilo je u 18:00 sati u navedenom laboratoriju. U laboratoriju su bili prisutni: mentor izv. prof. dr. sc. Tomislav Barić, viši laborant Mario Srnović ing. el., student Luka Gudelj univ. bacc. ing. el. i student Karlo Jakopović – obavlja mjerenja. Slike pokusa i mjerne opreme je fotografirao student Karlo Jakopović. Sva tri pokusa su uspješno odrađena s dobivenim željenim rezultatima.

U laboratoriju su obavljena potrebna mjerenja kako bi se utvrdili gubici na transformatoru i kako bi se dobio graf zagrijavanja i graf hlađenja transformatora. Obavljeni pokusi su: pokus praznog hoda, pokus kratkog spoja i pokus opterećenja.

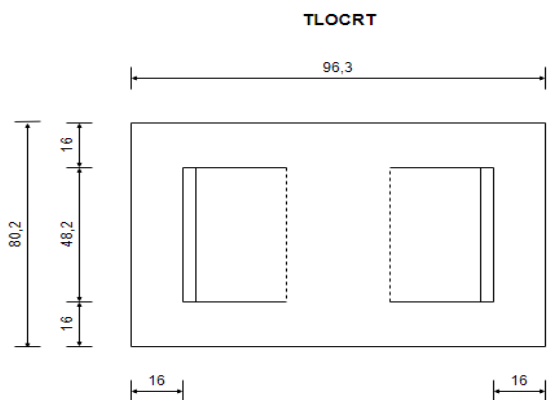
Za pokuse je korišten jednofazni transformator koji ima sljedeće podatke na natpisnoj pločici:

- Naziv transformatora: Telemecanique ABT7 ESM025B
- Nazivna snaga: $S_n = 250 \text{ VA}$
- Nazivni primarni napon: $U_{1n} = 230 \text{ V}$
- Nazivni sekundarni napon: $U_{2n} = 24 \text{ V}$

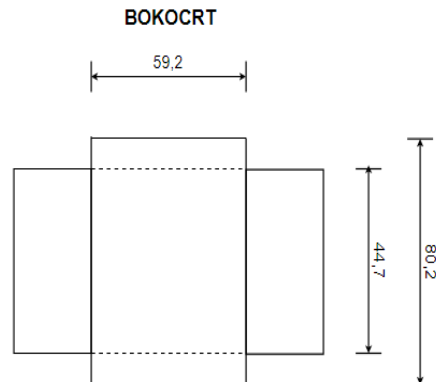
Mjerenje površina koje sudjeluje u prijenosu topline konvekcijom(Slika 4.1):



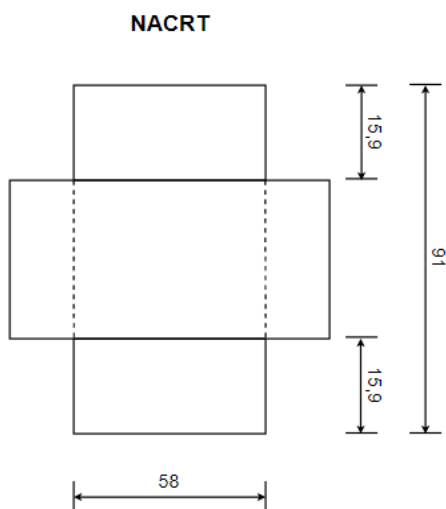
Slika 4.1 Mjerenje dimenzija površina transformatora



Slika 4.2 Tlocrt transformatora



Slika 4.3 Bokocrt transformatora



Slika 4.4 Nacrt transformatora

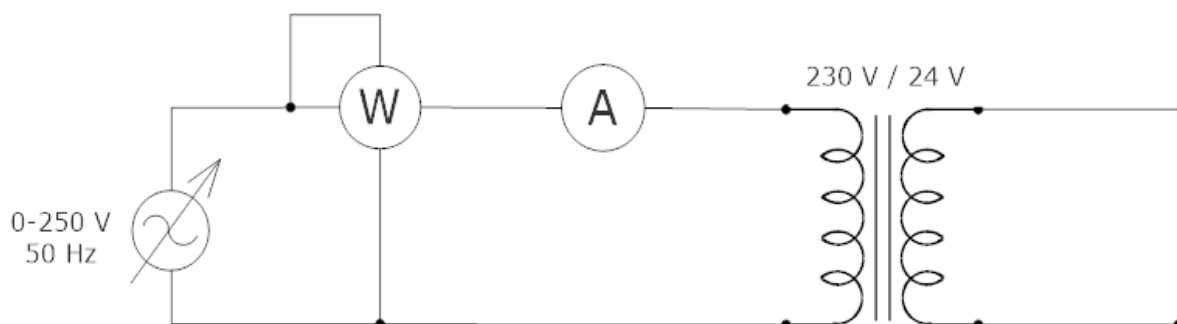
Projekcija transformatora je napravljena pomoću draw.io [20], sve izmjerene veličine su u milimetrima (mm).

Površina koja sudjeluje u konvekciji je sva ona vanjska površina koja je vidljiva promatraču. U konvekciji ne sudjeluju površine kao što su donja ploha transformatorske jezgre. Te površine ne sudjeluju u prijenosu topline konvekcijom zato što topli zrak koji se stvara ide prema stropu prostorije, a ne prema podu.

Površina koja sudjeluje u prijenosu topline konvekcijom se računa preko formule:

$$A = L \cdot W \quad (4-1)$$

4.1 Pokus praznog hoda transformatora



4.5. Prikaz sheme pokusa praznog hoda transformatora

Ovaj pokus se izvodi na način da preko regulacijskog transformatora podesimo primarni napon na 230 V, dok su sekundarne stezaljke odspojene ili spojene na voltmetar. Zatim na vatmetru očitamo radnu snagu koja nam predstavlja gubitke u željezu, a na ampermetru struju praznog hoda koja je potrebna za magnetiziranje jezgre, oba instrumenta su spojena na način kako je prikazano na slici 4.1. Ovaj pokus se može izvesti i bez vatmetra na način da znamo napon, struju i faktor snage na primarnoj strani transformatora te prema formuli $P_0 = U_{1n} \cdot I_{10} \cdot \cos(\varphi_{10})$ izračunamo gubitke u željezu.

Iz pokusa praznog hoda izmjereni su sljedeći podaci:

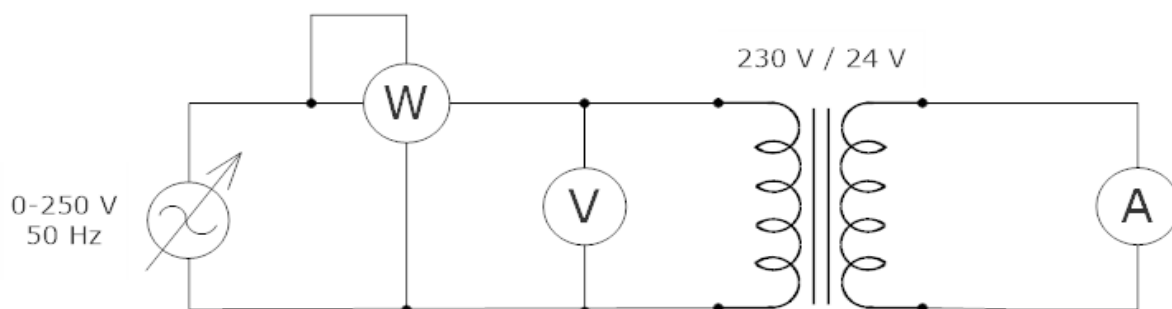
- Gubici u željezu: $P_0 = 12,7 \text{ W}$
- Struja praznog hoda: $I_{10} = 0,23 \text{ A}$
- Faktor snage primara: $\cos(\varphi_{10}) = 0,24$

Najmanji faktor snage koji je moguće dobiti je onaj koji je se izmjeri iz pokusa praznog hoda.

Popis korištene opreme tijekom mjerenja:

- Transformator: Telemecanique ABT7 ESM025B
- Digitalni vatmetar: Metrix PX110
- Digitalni multimetar: UNI-T UT58A

4.2. Pokus kratkog spoja transformatora



Slika 4.6 Prikaz sheme pokusa kratkog spoja transformatora

Ovaj pokus se izvodi na način da preko regulacijskog transformatora polako podižemo primarni napon dok na sekundarnoj strani ne dođemo do nazivne vrijednosti struje. Zatim na vatmetru očitamo radnu snagu koja nam predstavlja gubitke u bakru, a na voltmetru napon koji je potreban za nazivnu vrijednost struje na sekundarnoj strani, sva tri instrumenta su spojena na način kako je prikazano na slici 4.2. Kod ovog pokusa su gubici u željezu vrlo mali pa ih možemo zanemariti zbog toga što su magnetska indukcija (B) i struja magnetiziranja (I_{μ}) vrlo male, zbog toga je $P_k \approx P_{Cu}$. Ovaj pokus se može izvesti i bez vatmetra na način da znamo napon primara, struju i faktor snage na primarnoj strani transformatora te prema formuli $P_k = U_{1k} \cdot I_{1k} \cdot \cos(\varphi_{1k})$ izračunamo gubitke u bakru.

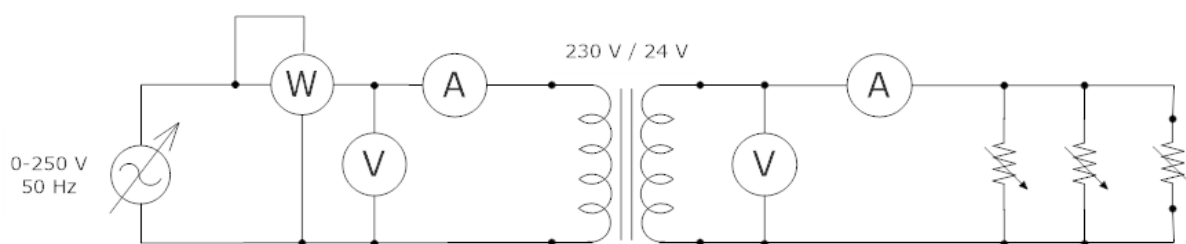
Iz pokusa kratkog spoja izmjereni su sljedeći podaci:

- Gubici u bakru: $P_k = 21,3 \text{ W}$
- Napon primara: $U_{1k} = 23,5 \text{ V}$

Popis korištene opreme tijekom mjerenja:

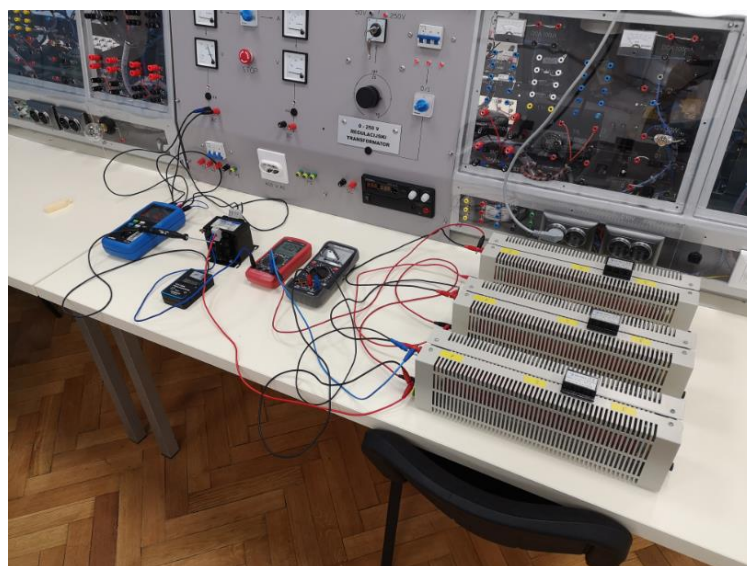
- Transformator: Telemecanique ABT7 ESM025B
- Digitalni vatmetar: Metrix PX110
- Digitalni multimetar: ELMARK EM3055

4.3. Pokus opterećenja transformatora



Slika 4.7 Prikaz sheme spoja transformatora pod opterećenjem

U ovom pokusu trebamo postići nazivno opterećenje transformatora, a takav pokus se izvodi na način da preko regulacijskog transformatora polako podižemo primarni napon dok na primarnoj i sekundarnoj strani ne dobijemo nazivne vrijednosti napona. Zatim trima paralelno spojenima promjenjivim otpornicima na sekundarnoj strani transformatora polako i ujednačeno (kako bi svaki promjenjivi otpornik bio jednako opterećen) spuštamo vrijednost otpora od maksimalne vrijednosti otpora pa sve do vrijednosti otpora koja nam je potrebna da bi se sekundarna strana transformatora opteretila s nazivnom vrijednosti struje. Prije odabira promjenjivih otpornika bilo je potrebno izračunati potreban otpor koji bi bio potreban za pokus opterećenja, ali da pritom pazimo i na maksimalnu vrijednost struje koju svaki promjenjivi otpornik može provesti kako ne bi došlo do pregaranja ili oštećenja.



Slika 4.8 Izvedba pokusa opterećenja



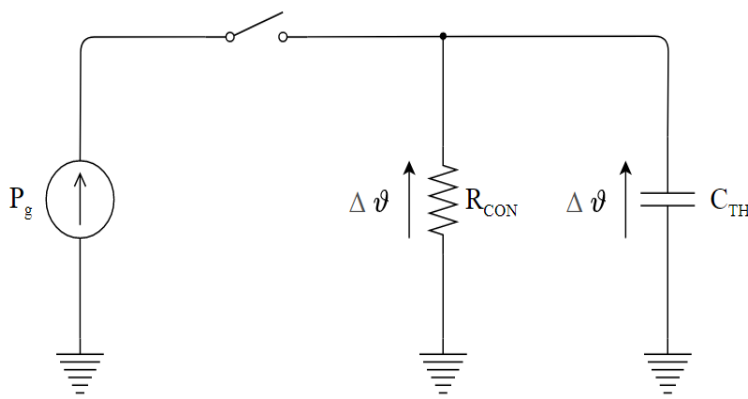
Slika 4.9 Korišteni mjerni instrumenti u pokusu

Popis korištene opreme tijekom mjerenja:

- Transformator: Telemecanique ABT7 ESM025B
- Digitalni vatmetar: Metrix PX110
- Digitalni multimetar: UNI-T UT58A
- Digitalni multimetar: ELMARK EM3055
- Digitalni termometar: GREISINGER GTH 175/Pt
- Promjenjivi otpornici: METREL 10 Ω , 5,7 A

4.3.1 Zagrijavanje transformatora

U prvoj dijelu ovog pokusa transformator je terećen s nazivnim opterećenjem te se pomoću preciznog termometra očitavala temperatura svakih 5 minuta sve dok se nije dobilo ustaljeno stanje, odnosno stanje u kojemu se temperatura nije uopće mijenjala ili su promjene bile neznatne.



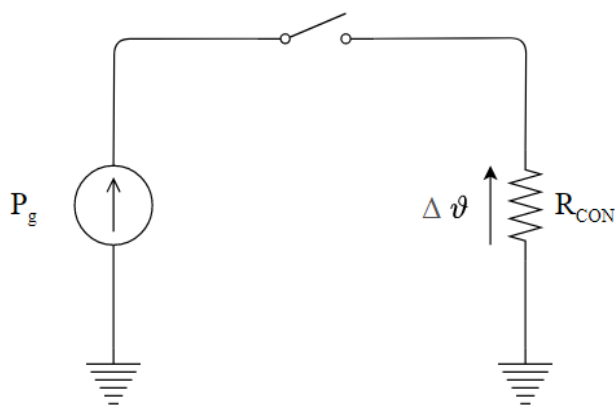
Slika 4.9 Električni prikaz zagrijavanja transformatora u tranzijentu ([0 , 5τ>)

Na slici 4.9 prikazali smo kako bi izgledalo zagrijavanje transformatora prije nego je dostignuto ustaljeno stanje. Graf koji se dobije zagrijavanjem transformatora je identičan grafu punjenja kondenzatora stoga je i formula za zagrijavanje transformatora identična, samo što je u formuli umjesto napona stavljena temperatura. Formula glasi:

$$\vartheta(t) = \Delta\vartheta_0 \left(1 - e^{\left(\frac{-t}{\tau}\right)} \right) + \vartheta_a \quad (4-4)$$

Pokus se smatra gotovim onda kada je vrijeme mjerenja doseglo vrijednost $\geq 4\tau$ (inženjerski dovoljno točno) ili ako je vrijeme mjerenja doseglo vrijednost $\geq 5\tau$ (znanstveno dovoljno točno). Za ovaj završni rad je dovoljno da bude $\geq 4\tau$. Tau (τ) predstavlja toplinsku vremensku konstantu, a dobije se grafičkim ili računskim putem na način da stavimo tangentu na prvu izmjerenu točku u grafu i u točki di se sijeku tangenta i maksimalna izmjerena temperatura u ustaljenom stanju očitamo vrijeme. To očitano vrijeme predstavlja τ , zatim to vrijeme pomnožimo 4 i možemo vidjeti da li smo ušli u ustaljeno stanje, ako naš graf završava prije 4τ tada nismo ušli u ustaljeno stanje i pokus bi trebalo ponoviti .

Kada je nastupilo ustaljeno stanje tada i električni prikaz zagrijavanja transformatora izgleda drugačije, prikazano na slici 4.10.



Slika 4.10 Električni prikaz zagrijavanja transformatora u ustaljenom stanju

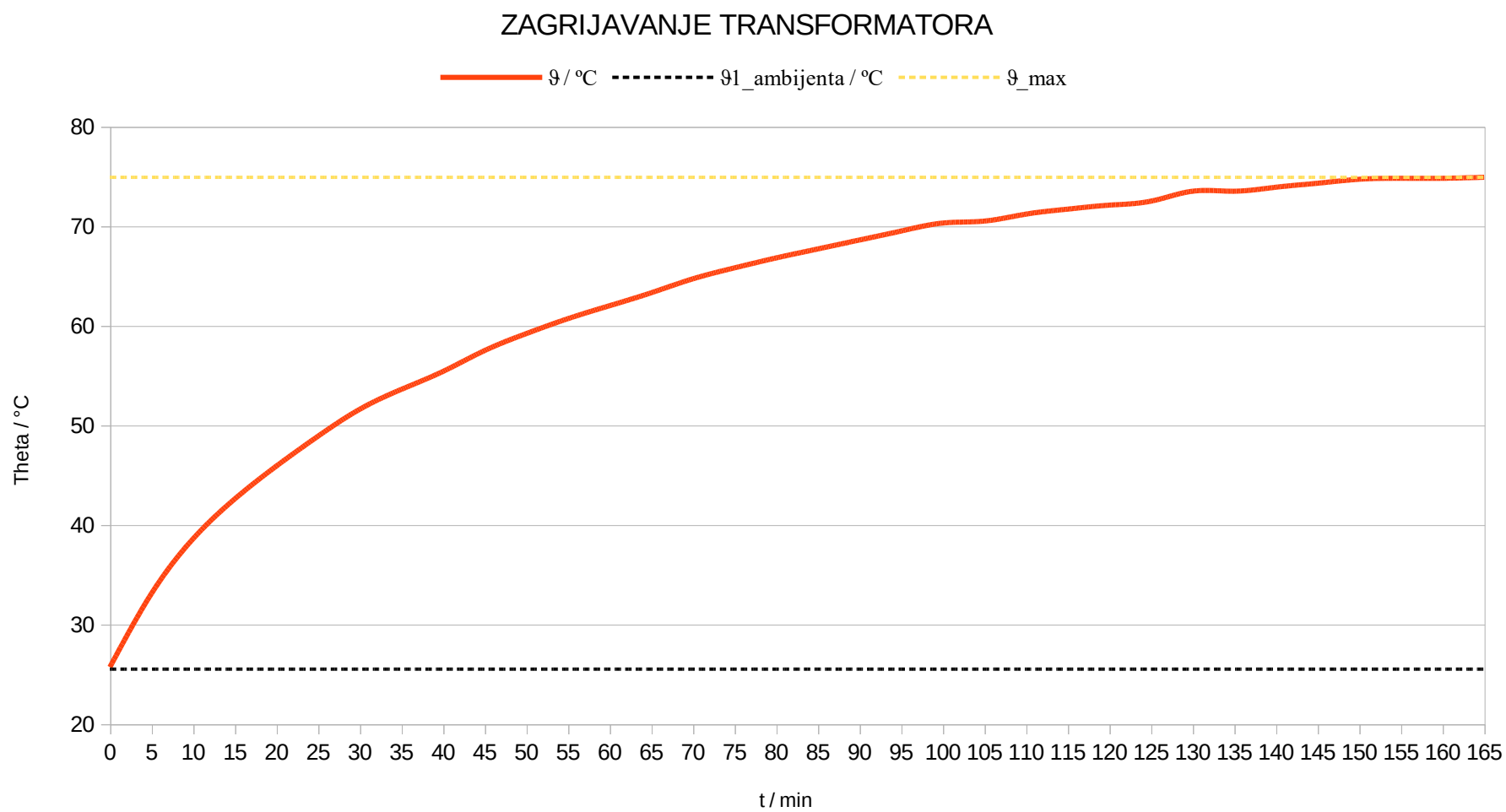
Sada će u tablici 4.1 i tablici 4.2 biti prikazane izmjerene temperatura prostorije i temperature transformatorskog namota koje su dobivene pri nazivnom opterećenju transformatora.

Tablica 4.1 Izmjerena temperatura prostorije

ϑ_1_ambijenta / °C
25,5

Tablica 4.2 Izmjerene temperature transformatora

t / min	ϑ / °C	t / min	ϑ / °C
0	25,7	85	67,7
5	33,1	90	68,6
10	38,6	95	69,5
15	42,6	100	70,3
20	45,9	105	70,5
25	48,9	110	71,2
30	51,6	115	71,7
35	53,6	120	72,1
40	55,4	125	72,5
45	57,5	130	73,5
50	59,2	135	73,5
55	60,7	140	73,9
60	62,0	145	74,3
65	63,3	150	74,7
70	64,7	155	74,8
75	65,8	160	74,8
80	66,8	165	74,9



Slika 4.11 Grafički prikaz zagrijavanja transformatora

4.3.2 Hlađenje transformatora

Hlađenje transformatora je drugi dio pokusa koji se izvodi na način da u trenutku kada je došlo do ustaljenja temperature namota prilikom zagrijavanja, naglo isključi dovod napajanja na primarnoj strani transformatora. Nakon naglog isključenja napajanja, očitavamo svakih 5 minuta temperaturu sve dok ne primijetimo ustaljenje. Temperatura će se spuštati sve dok se temperatura namota i temperatura prostorije ne izjednače, što bi bilo predugo za čekati, stoga kada primijetimo da se ista temperatura počinje više puta ponavljati stajemo s mjerenjem.

Graf koji se dobije hlađenjem transformatora je identičan grafu pražnjenja kondenzatora stoga je i formula za hlađenje transformatora identična, samo što je u formuli umjesto napona stavljena temperatura. Formula glasi:

$$\vartheta(t) = \Delta\vartheta_{max} e^{\left(\frac{-t}{\tau}\right)} + \vartheta_a \quad (4-5)$$

Pokus se smatra gotovim isto kao i kod zagrijavanja transformatora, a to je onda kada je vrijeme mjerenja doseglo vrijednost $\geq 4\tau$. Način dobivanja vrijednosti tau je isti, samo što se ovdje tangenta treba sjeći s temperaturom prostorije (ϑ_a).

Sada će u tablici 4.3 i tablici 4.4 biti prikazane temperatura prostorije i temperature transformatorskog namota koje su dobivene prirodnim procesom hlađenja.

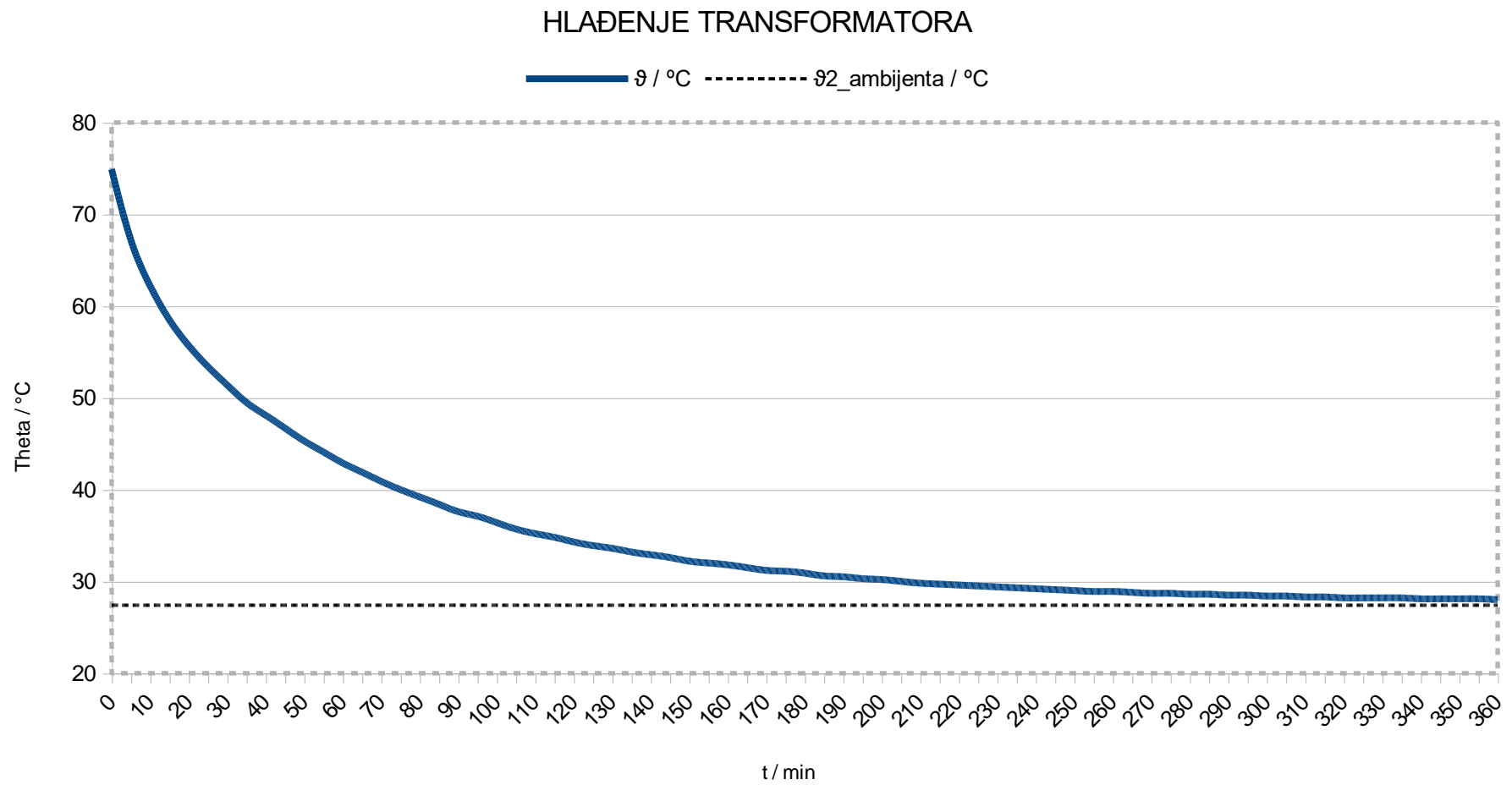
Tablica 4.3 Izmjerena temperatura prostorije

ϑ_2 ambijenta / °C
27,4

Temperatura prostorije je ponovno izmjerena zbog duljine trajanja mjerenja i jer je pokus odrađen u ljetnom periodu, pa je pretpostavljeno da je došlo do promjene temperature, što se pokazalo i točnim. Na taj način se moglo lakše pretpostaviti kada bi se mogle temperatura prostorije i temperatura transformatora dovoljno blizu približiti da kažemo da je nastupilo ustaljeno stanje i stanemo s mjerenjem.

Tablica 4.4 Izmjerene temperature transformatora

t / min	θ / °C	t / min	θ / °C
0	74,9	185	30,6
5	67,2	190	30,5
10	62,2	195	30,3
15	58,5	200	30,2
20	55,7	205	30,0
25	53,4	210	29,8
30	51,4	215	29,7
35	49,5	220	29,6
40	48,1	225	29,5
45	46,7	230	29,4
50	45,3	235	29,3
55	44,1	240	29,2
60	42,9	245	29,1
65	41,9	250	29,0
70	40,9	255	28,9
75	40,0	260	28,9
80	39,2	265	28,8
85	38,4	270	28,7
90	37,6	275	28,7
95	37,1	280	28,6
100	36,4	285	28,6
105	35,7	290	28,5
110	35,2	295	28,5
115	34,8	300	28,4
120	34,3	305	28,4
125	33,9	310	28,3
130	33,6	315	28,3
135	33,2	320	28,2
140	32,9	325	28,2
145	32,6	330	28,2
150	32,2	335	28,2
155	32,0	340	28,1
160	31,8	345	28,1
165	31,5	350	28,1
170	31,2	355	28,1
175	31,1	360	28,0
180	30,9		



Slika 4.12 Grafički prikaz hlađenja transformatora

5. ANALIZA MJERNIH REZULTATA

5.1 Analiza pokusa praznog hoda i kratkog spoja

Ovaj završni rad nema naglasak na analizu pokusa praznog hoda i kratkog spoja nego na analizu pokusa opterećenja. Stoga će u ovoj analizi biti napisane samo neka osnovna razmatranja.

Iz ta dva pokusa mogu se utvrditi glavni podaci svakoga transformatora, a ono najbitnije za ovaj završni rad je da se transformator grije u svome radu baš upravo zbog vlastitih gubitaka koje smo izmjerili u pokusu praznog hoda i kratkog spoja.

Mjerenjem pokusa praznog hoda utvrđeni su snaga praznog hoda, struja praznog hoda i faktor snage, a sve vrijednosti su izmjerene na primarnoj strani transformatora. Iz snage praznog hoda izmjerila se snaga koju transformator uzima iz mreže za pokrivanje gubitaka u željezu i ta snaga je uvijek konstantnog iznosa bez obzira na opterećenje. Struja praznog hoda (struja magnetiziranja) za male transformatore treba iznositi iznad 5% nazivne vrijednosti struje primara[2]:

$$i_0[\%] = \frac{I_0}{I_n} \cdot 100\% = \frac{0,23}{\left(\frac{250}{230}\right)} \cdot 100\% = 21,1\% \quad (5-1)$$

Faktor snage ima najmanju vrijednost u praznome hodu, a ujedno je izmjeren i kako bi se provjerilo da li su gubici dobro izmjereni, a gubici se računaju prema formuli:

$$P_0 = U_{10} \cdot I_{10} \cdot \cos(\varphi_{10}) = 230 \cdot 0,23 \cdot 0,24 = 12,696 \text{ W} \quad (5-2)$$

Izmjerena vrijednost iznosi 12,7 W i jednaka je vrijednosti dobivenoj računski, što znači da je pokus praznog hoda uspješno odrađen.

Mjerenjem pokusa kratkog spoja utvrđeni su snaga kratkog spoja i napon primara, a sve vrijednosti su izmjerene na primarnoj strani transformatora. Iz gubitaka kratkog spoja izmjerila se snaga koju transformator uzima iz mreže za pokrivanje gubitaka u bakru i ti gubici se mijenjaju ovisno o kvadratu struje te se još nazivaju Jouleovi gubici. Iz pokusa kratkog spoja potrebno je odrediti napon kratkog spoja i maksimalnu struju sekundara.

Napon kratkog spoja se određuje prema formuli:

$$u_k[\%] = \frac{U_{1k}}{U_{1n}} \cdot 100\% \quad (5-3)$$

$$u_k[\%] = \frac{23,5}{230} \cdot 100\% = 10,22\%$$

Maksimalna struja sekundara se određuje prema formuli:

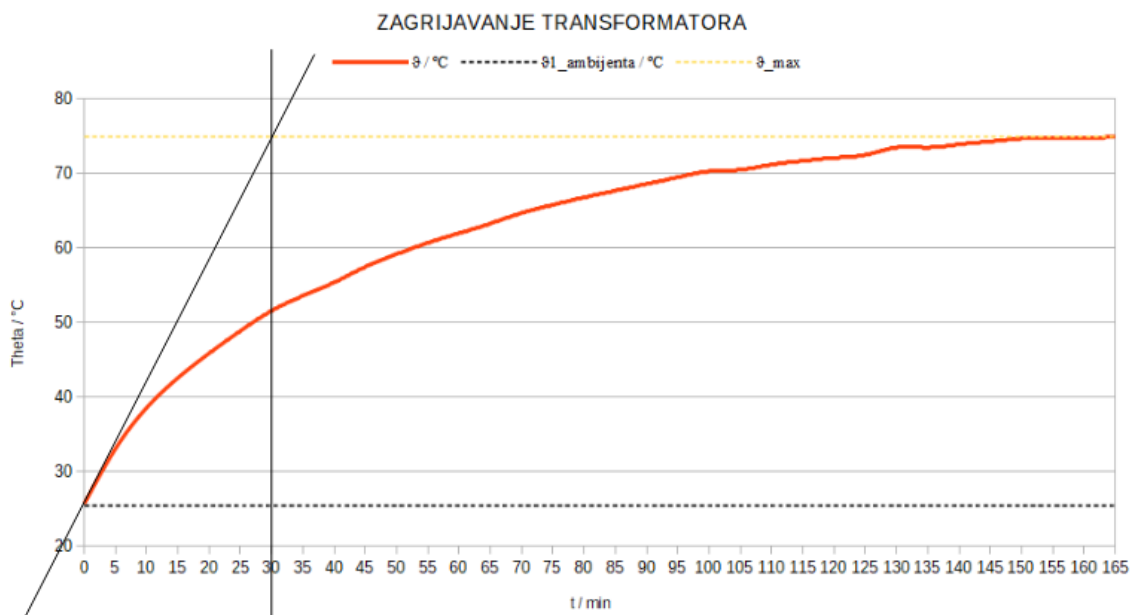
$$I_{2KS} = I_{2n} \cdot \frac{100}{u_k[\%]} \quad (5-4)$$

$$I_{2KS} = \left(\frac{250}{24}\right) \cdot \left(\frac{100}{10,22}\right) = 101,92 \text{ A}$$

Napon kratkog spoja za male transformatore treba iznositi iznad 10% nazivne vrijednosti napona primara, što je i dokazano računski.

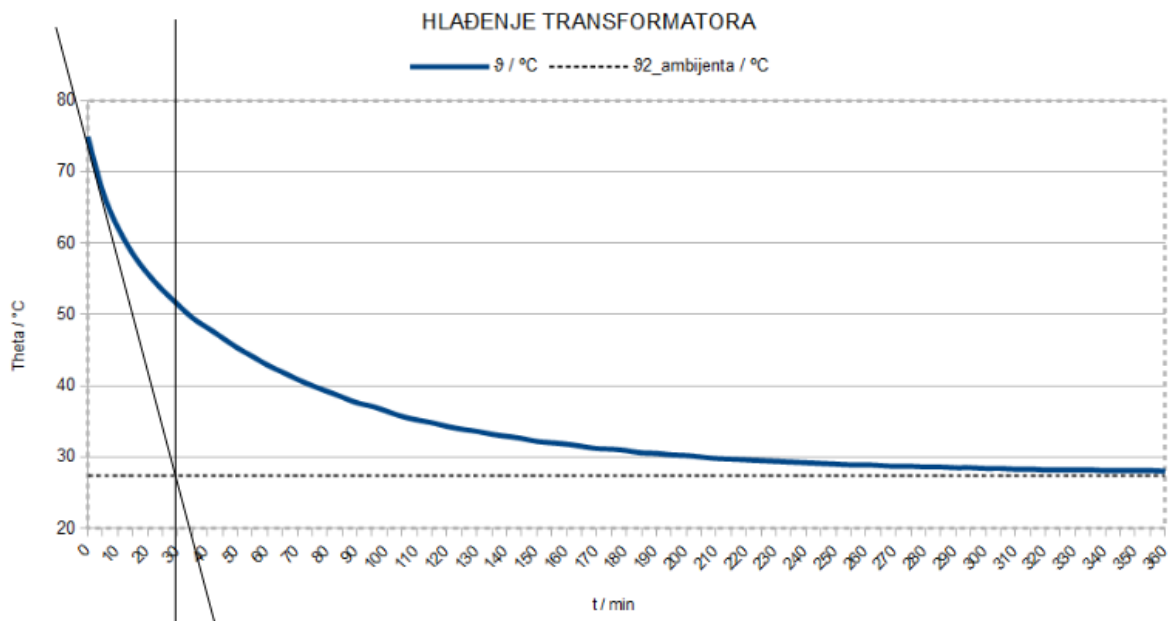
5.2 Analiza pokusa opterećenja

Za početak treba utvrditi da li je mjerenje obavljeno do kraja, odnosno da se vidi da li se postigla vrijednost od minimalno 4 toplinske vremenske konstante. Postupak određivanja toplinskih vremenskih konstanti za slučaj zagrijavanja i hlađenja je prikazano na slikama 5.1 i 5.2.



Slika 5.1 Određivanje toplinske vremenske konstante prilikom zagrijavanja transformatora

Toplinska vremenska konstanta za slučaj zagrijavanja iznosi 30 minuta (1τ). Kako bi znali koliko naš graf ima toplinskih vremenskih konstanti trebamo podijeliti vrijeme trajanja pokusa sa 30 minuta, to onda iznosi: $165/30=5,5$. Dobili smo rezultat od 5.5 toplinskih vremenskih konstanti ($5,5\tau$), što je veće od potrebnih 4τ i to znači da je kriterij ispunjen i da je graf ušao u ustaljeno stanje.



Slika 5.2 Određivanje toplinske vremenske konstante prilikom hlađenja transformatora

Toplinska vremenska konstanta za slučaj hlađenja iznosi 30 minuta (1τ). Postupak je isti trebamo podijeliti vrijeme trajanja pokusa sa 30 minuta, to onda iznosi: $360/30=12$. Dobili smo rezultat od 12 toplinskih vremenskih konstanti (12τ), što je veće od potrebnih 4τ i to znači da je kriterij ispunjen i da je graf ušao u ustaljeno stanje.

Kako bi se jednoznačno utvrdilo da se izmjerene vrijednosti temperatura odnose na ustaljeno stanje u kojemu su fizikalne veličine konstantne, mjerenje je provedeno u trajanju koje je dulje od 4 toplinske vremenske konstante. Iznos vremenske konstante određen je grafičkim putem za proces grijanja i za proces hlađenja transformatora pri nazivnom opterećenju. Sukladno prethodnom utvrđeno je da su toplinske vremenske konstante identične te iznose 30 minuta, a mjerenja su trajala 165 minuta grijanje i 360 minuta hlađenje što iznosi 5.5 vremenskih konstanti za proces zagrijavanja i 12 vremenskih konstanti za proces hlađenja.

Poremećaji do kojih je došlo u procesu zagrijavanja su se dogodili zbog povremenih ulazaka i izlazaka osoblja laboratorija iz laboratorija u toku mjerenja zbog čega je došlo do blagih oscilacija u temperaturi prostorije. Ti poremećaji su vidljivi iz grafa zagrijavanja prikazani na slici 4.11, a trajali su u intervalu od 100-te minute do 104-te minute te u intervalu od 130-te minute do 134-te minute. U grafu hlađenja nije došlo do nikakvih poremećaja.

Kako bi izračunali koeficijent konvekcije prvo trebamo izračunati sve površine koje u konvekciji sudjeluju, formula 4-1. Formule iz kojih se računaju vrijednosti koeficijenata konvekcije se razlikuju ovisno o položaju i obliku plohe. Za slučaj ovoga transformatora trebamo gledati formule koje se odnose na horizontalne plohe, vertikalne plohe i plohe koje su okrenute prema dolje, a da pritom nije ploha koja se nalazi na stolu. Te formule su prikazane na slici 3.4.

Sve kote koje su potrebne za izračun površina ploha željezne jezgre i namota su prikazane na slikama 4.2, 4.3 i 4.4. Za površine ploha namota nije uzeto u obzir zakrivljenost ploha zbog namatanja nego će se te površine ploha gledati kao pravokutnici. Greške koje će zbog toga nastati su neznatne stoga tu zakrivljenost možemo zanemariti.

PRORAČUN

Površine horizontalnih ploha

Horizontalna ploha željezne jezgre:

$$A_{H, Fe} = 96,3 \cdot 59,2 = 5.700,96$$

Horizontalne plohe namota:

$$A_{H, Cu} = 58 \cdot 15,9 \cdot 2 = 1.844,4 \text{ mm}^2$$

Ukupno:

$$A_H = 5.700,96 + 1.844,4 = 7.545,36 \text{ mm}^2 = 0,00754536 \text{ m}^2$$

Površine horizontalnih ploha prema stolu

Horizontalne plohe željezne jezgre prema stolu:

$$A_{H, Fe, STOL} = 0 \text{ mm}^2$$

Horizontalne plohe namota prema stolu:

$$A_{H, Cu, STOL} = 58 \cdot 15,9 \cdot 2 = 1.844,4 \text{ mm}^2$$

Ukupno:

$$A_{H,STOL} = 1.844,4 \text{ mm}^2 = 0,0018444 \text{ m}^2$$

Površine vertikalnih ploha

Vertikalne plohe željezne jezgre:

$$A_{V,Fe} = 48,2 \cdot 16 \cdot 4 + 16 \cdot 96,3 \cdot 4 + 80,2 \cdot 59,2 \cdot 2 = 18.743,68 \text{ mm}^2$$

Vertikalne plohe namota:

$$A_{V,Cu} = 44,7 \cdot 15,9 \cdot 4 + 44,7 \cdot 58 \cdot 2 = 8.028,12$$

Ukupno:

$$A_V = 18.743,68 + 8.028,12 = 26.771,8 \text{ mm}^2 = 0,0267718 \text{ m}^2$$

Iznos razlike temperature

Računa se kao razlika najviše postignute temperature transformatora i temperature prostorije, a očitava se sa slike 4.11.

$$\Delta T = 74,9 - 25,5 = 49,4 \text{ }^\circ\text{C}$$

Koeficijenti konvekcije

Koeficijent konvekcije horizontalnih ploha

$$h_{con,H} = 1,32 \cdot \left(\frac{\Delta T}{A_H}\right)^{0,25} = 1,32 \cdot \left(\frac{49,4}{0,00754536}\right)^{0,25} = 11,874 \text{ W/(m}^2\text{ K)}$$

Koeficijent konvekcije horizontalnih ploha prema stolu

$$h_{con,H,STOL} = 0,59 \cdot \left(\frac{\Delta T}{A_{H,STOL}}\right)^{0,25} = 0,59 \cdot \left(\frac{49,4}{0,0018444}\right)^{0,25} = 7,548 \text{ W/(m}^2\text{ K)}$$

Koeficijent konvekcije vertikalnih ploha

$$h_{con,V} = 2,44 \cdot \left(\frac{\Delta T}{A_V}\right)^{0,25} = 2,44 \cdot \left(\frac{49,4}{0,0267718}\right)^{0,25} = 15,992 \text{ W/(m}^2\text{ K)}$$

6. ZAKLJUČAK

U Završnom radu opisana je teorija prijenosa topline s naglaskom na prijenos topline pomoću konvekcije, te važnost uporabe toplinskog proračuna u današnjem inženjerstvu. Kao primjer je u pokusima i mjerenjima korišten transformator male snage. U mjerenjima su izmjereni svi potrebni podaci kako bi se obavio izračun koeficijenta konvekcije, ali su još dodatno napravljeni pokus kratkog spoja i pokus praznog hoda kako bi se utvrdili iznosi gubitaka koji su zaslužni za grijanje transformatora. Svaki od pokusa je uspješno odrađen, što je i opisano u analizi mjernih rezultata. Nije bilo potrebno vršiti nikakve simulacije grijanja ili hlađenja nego je glavni cilj bio odrediti koeficijent konvekcije iz pokusa opterećenja.

LITERATURA

- [1] A. Dolenc: Transformatori I. i II. dio, ETF Zagreb, Zagreb, 1991.
- [2] B. Mitraković: Transformatori, Naučna knjiga, Beograd, 1985.
- [3] Električni strojevi i uređaji, Transformatori: url:<https://element.hr/artikli/file/2457>
(9.5.2019.)
- [4] I. Gudelj: Proračun transformatora u programskom paketu Ansys-Maxwell, Osijek, 2016.
- Diplomski rad
- [5] Fakultet prometnih znanosti, prezentacija s predavanja iz magnetizma:
url:https://www.fpz.unizg.hr/elektrotehnika/admin/upload/magnetizam_iii.pdf
(12.5.2019.)
- [6] Prezentacija s Fakulteta elektrotehnike i računarstva Zagreb,
url:<https://www.slideserve.com/debbie/magnetski-materijali-i> (12.5.2019.)
- [7] A. Ivanov-Smolensky: Electrical machines, Mir Publishers Moscow, 1982.
- [8] P. Kulišić: Mehanika i toplina, Školska knjiga, 2005.
- [9] Tehnička enciklopedija: Termodinamika - prijenos topline,
url:http://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/termodinamika_prijenos_topline.pdf
- [10] M. Jurić: Numerički proračun prijelazne pojave hlađenja, Osijek, 2015. - Diplomski rad
- [11] J. Nikšić: Toplinski proračun metodom konačnih elemenata, Osijek, 2014. - Diplomski rad
- [12] F. Kreith, R. M. Manglik, M. S. Bohn: Principles of heat transfer, Cengage Learning, Inc.2011
- [13] Prazni hod i kratki spoj transformatora: url:http://www.ss-tehnicka-ri.skole.hr/dokumenti?dm_document_id=637&dm_dnl=1
- [14] Slika jednofaznog transformatora:
utl:<https://hr.wikipedia.org/wiki/Transformator#/media/File:WeldingTransformer-1.63.png>
- [16] Nadomjesna shema modela idealnog transformatora: url:http://eele.fe.uni-lj.si/wiki/images/Eele_slika_visji_067.svg
- [17] Slika petlje histereze:
url:http://tisak.grf.unizg.hr/media/download_gallery/Predavanje%20Dit%208a.pdf

- [18] Prikaz Vrtložnih struja:
url:https://en.wikipedia.org/wiki/Eddy_current#/media/File:Laminated_core_eddy_currents_2.svg
- [19] Prikaz Fourierova zakona vođenja topline:
url:<http://www.phy.uniri.hr/~jurdana/12%20prijenos%20topline.ppt>
- [20] Web stranica za crtanje: url:<https://www.draw.io>
- [21] M. Jelaš: Numerički proračun hlađenja, Osijek, 2014. - Diplomski rad

ŽIVOTOPIS

Karlo Jakopović rođen je 14. prosinca 1995. u Zagrebu. Završio je osnovnu školu „Gustav Krklec“ Zagreb 2010. godine te upisao Elektrotehničku školu Zagreb za zanimanje elektrotehničar. Za vrijeme srednjoškolskog obrazovanja upisuje Cisco Networking Academy 2012. godine. 2014. godine završava srednju školu i polaže državnu maturu, te iste godine završava i Cisco Networking Academy i stječe titulu specijalista za računalne mreže. Stručnu praksu u srednjoj školi obavlja u Hrvatskoj elektroprivredi, HEP - Operator distribucijskog sustava d.o.o. Zagreb u pogonu Sveta Klara. 2014. godine nakon položene državne mature upisuje preddiplomski studij elektrotehnike na Elektrotehničkom fakultetu Osijek, sada Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek. Na drugoj godini studija odabire studijski blok elektroenergetika. Završio je online tečaj 2016. godine na Shaw Academy pod nazivom “Introduction to Web Development”.

U Osijeku, rujan 2019. godine

Karlo Jakopović



Potpis: _____

SAŽETAK

U završnome radu je bilo potrebno dobiti grafove zagrijavanja transformatora pri nazivnom opterećenju i graf hlađenja transformatora kada završi zagrijavanje. U početku su bili opisani i prikazani modeli idealnog i realnog transformatora kako bi se lakše dobio uvid u sami rad transformatora. Kada je opis rada transformatora završen dolaze na red gubici koji su zaslužni za zagrijavanje vodiča (gubici u bakru) i jezgre (gubici u željezu). Načini na koji se toplina širi po transformatoru te u okolni prostor opisani su pomoću prijenosa topline kondukcijom, konvekcijom i zračenjem. Nakon što je opisan sav teorijski dio, prikazan je praktičan dio u laboratoriju gdje je bilo potrebno izmjeriti gubitke u bakru (pokus kratkog spoja) i gubitke u željezu (pokus praznog hoda) te dobiti grafove zagrijavanja i hlađenja iz pokusa opterećenja transformatora. U analizi mjernih rezultata su izračunati svi potrebni parametri koji su dobiveni iz pokusa.

Ključne riječi: transformator, toplina, hlađenje, gubici bakra, gubici željeza, kondukcija, konvekcija, zračenje, vrtložne struje, histerezna petlja, prijenos topline, prirodna cirkulacija

ABSTRACT

In the final paper, it was necessary to obtain graphs of transformer heating at rated load and a transformer cooling graph when the heating was completed. Initially, ideal and realistic transformer models were described and presented to give an easier insight into the operation of the transformer. When the description of the transformer operation is complete, the losses that are responsible for heating the conductors (copper losses) and cores (iron losses) are in order. The ways in which heat spreads across the transformer and into the surrounding space are described by heat transfer through conduction, convection and radiation. After describing all the theoretical part, the practical part in the laboratory is shown where it was necessary to measure copper losses (short circuit test) and iron losses (idle test) and obtain heating and cooling graphs from transformer load tests. In the analysis of the measurement results, all the required parameters obtained from the experiments were calculated.

Key words: transformer, heat, cooling, copper losses, iron losses, conduction, convection, radiation, eddy currents, hysteresis loop, heat transfer, natural circulation

PRILOZI

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SIMBOLA

Simbol	Naziv	Iznos	Mjerna jedinica
A	Površina		m ²
a	Debljina jednog lima		m
B	Magnetska indukcija		T
C ₁₂	Kapaciteti između primarnog i sekundarnog namota		F
E	Efektivna vrijednost napona		V
e _{1S}	Napon samoindukcije primara		V
e _{2M}	Napon međuindukcije sekundara		V
f	frekvencija		Hz
H	Jakost magnetskog polja		A/m
h _c	koeficijent konvekcije		W/(Km ²)
h _{con, H}	Koeficijent konvekcije horizontalne plohe		W/(Km ²)
h _{con, H, STOL}	Koeficijent konvekcije horizontalne plohe prema stolu		W/(Km ²)
h _{con, V}	Koeficijent konvekcije vertikalne plohe		W/(Km ²)
I ₁ , I ₂	Jakost električne struje primara, sekundara		A
I _{KS}	Jakost struje kratkog spoja		A
K _c	Toplinska kondukcija za prijenos topline konvekcijom		W/K
k _{f1} , k _{f2}	Fildov koeficijent za primar, sekundar		/
L	Duljina stranice		m
m	Masa željezne jezgre		kg
n	Omjer primarnog i sekundarnog namota		/
N ₁ , N ₂	Broj zavoja primara, sekundara		/
P ₁ , P ₂	Snaga primara, sekundara		W
P _{Cu}	Gubici u bakru		W
P _{cun}	Nominalni gubici u bakru		W
P _H	Gubici uslijed histereze		W
P _S	Gubici u bakru pri opterećenju različitom od nominalnog		W

P_{sn}	Gubici u bakru pri nominalnom opterećenju		W
P_{VT}	Gubici uslijed vrtložnih struja		W
Q	Toplina		J
q	Gustoća toplinskog toka		W/m ²
q ₁ , q ₂	broj faza primara, sekundara		/
R _c	Toplinski otpor za prijenos topline konvekcijom		K/W
S	Površina poprečnog presjeka		m ²
t	Vrijeme		s
T	Termodinamička temperatura		K
T _f	Temperatura fluida dalje od granične plohe		K
T _p	Temperatura čvrste plohe uz koju struji fluid		K
U ₁ , U ₂	Napon primara, sekundara		V
u _k [%]	Napon kratkog spoja		%
W	Širina stranice		m
ΔT	Razlika temperatura		°C
η	Histerezin (Steinmezov) koeficijent		/
ϑ _a	Temperatura ambijenta (zraka u prostoru)		°C
ϑ _{max}	Maksimalna temperatura transformatora		°C
λ	Koeficijent toplinske vodljivosti		W/(Km)
μ ₀	Permeabilnost vakuuma	4π·10 ⁻⁷	H/m
μ _{Fe}	Permeabilnost željeza	Ovisi o leguri	H/m
ρ	Električni otpor lima		Ω/mm
σ	Koeficijent vrtložnih struja		/
Φ	Magnetski tok		Wb