

KONČAR

Školska godina:
2005./2006.

Završni rad iz Električnih strojeva

Pokus opterećenja jednofaznog transformatora

Mentor:
Raska

Učenik:
Tywin

U Zagrebu, travanj 2006.

Sadržaj:

1. Uvod

1.1. Povjesni razvoj transformatora

2. Općenito o transformatoru

2.1. Konstrukcija transformatora

2.2. Princip rada transformatora

2.3. Pogonska stanja transformatora

3. Opterećenje transformatora

3.1. Pokus opterećenja transformatora

3.2. Primjer pokusa opterećenja transformatora

3.3 Zaključak pokusa

4. Zagrijavanje i hlađenje transformatora

4.1. Zagrijavanje transformatora

4.2. Hlađenje transformatora

4.3. Vrste pogona transformatora

5. Zaštita transformatora

6. Zaključak

7. Literatura

8. Prilozi

8.1. Prilog 1

8.2. Prilog 2

1. Uvod

Svoj sam završni rad odlučio posvetiti upravo transformatoru jer smatram da je on nezamjenjivi dio cijelog elektro-energetskog sustava. Prva, jedinstvena i najvažnija namjena transformatora bila je, a i ostala, na polju energetike tj. za prijenos energije na velike udaljenosti, što do tada nije bilo moguće. Razvojem tehnologije transformator je, osim manjeg i boljeg izgleda te veće korisnosti, dobio i nove primjene: za galvansko odvajanje električnih krugova, za ispravljače, za zavarivanje itd.

Iako transformator radi na principu elektromagnetske indukcije koji je otkrio Faraday [Faradaj] 1831. prvi upotrebljivi transformator je napravljen tek 54 godine kasnije. Tri su mađarska inženjera Blathy [Blati], Déri [Đeri] i Zipernowski [Zipernovski] konstruirala transformator 1885. godine. To se dogodilo u tvornici Ganz [Ganc] u Budimpešti te su izum i patentirali. Ti su prvi transformatori bili suhi jednofazni s jezgrom prtenasta oblika. Priključne su stezaljke bile smještene na jednoj od dviju drvenih ploča, između kojih je bila stegnuta jezgra s namotajem. Jezgra se gradila od običnog crnog lima. Magnetske su indukcije u jezgri dosežale, u najboljem slučaju, 0.8 T a specifični su se gubitci kretali oko 10 W/kg pri navedenoj indukciji i frekvenciji od 50 Hz.

1. 1. Povjesni razvoj transformatora

Pojava transformatora mnogo je značila za onda mladu elektrotehniku jake struje otvarajući joj mogućnost odvajanja prijenosa električne energije od mreža za napajanje rasvjete i elektromotora. Ondašnji uređaji istosmjerne struje imali su sa svojim pogonskim naponima vrlo malen doseg. Razmak od nekoliko stotina metara bio je za ono vrijeme već velik doseg prijenosa. Bilo je moguće prekoračenje tih granica samo s povećanjem prijenosnog napona, a to nije bilo moguće s istosmjernim pogonom iz dva razloga. Prvi je razlog što je svako povećanje napona istosmjernog stroja povećavalo ionako težak problem iskrenja na kolektoru, a drugi što se zbog sigurnosti ljudi nije smijelo ići na više pogonske napone električnih aparata i stojeva.

U to su doba postojeći jednofazni motori izmjenične struje bili neusporedivo lošiji od najslabijih istosmjernih motora, tako da se primjena transformatora ograničila na napajanje instalacija za rasvjetu. No ideje Nikole Tesle su donjele nove promjene. Prva od tih je došla 1888. godine, ideja o okretnom magnetskom polju koja je omogućila konstrukciju jednostavnog višefaznog elektromotora koji nije imao probleme svoga jednofaznog prethodnika. To je otkriće dalo novi polet u razvoju transformatora. Zbog povećanja potražnje za električnom energijom došlo je do potrebe gradnje jačih i većih transformatora čija razina gubitaka i zagrijavanja više nije bila tako mala. Tako se jezgra počela graditi od hladnovaljanih i toplovaljanih silicijumom legiranih te kasnije visokolegiranih limova dosežući magnetske indukcije do 1.4 T. Problem zagrijavanja je u početku bio riješen povećanjem razmaka između svitaka, a tek je 1911. transformator uronjen u ulje, iako je ideja stvorena 1889. u jednom od patenata Nikole Tesle.

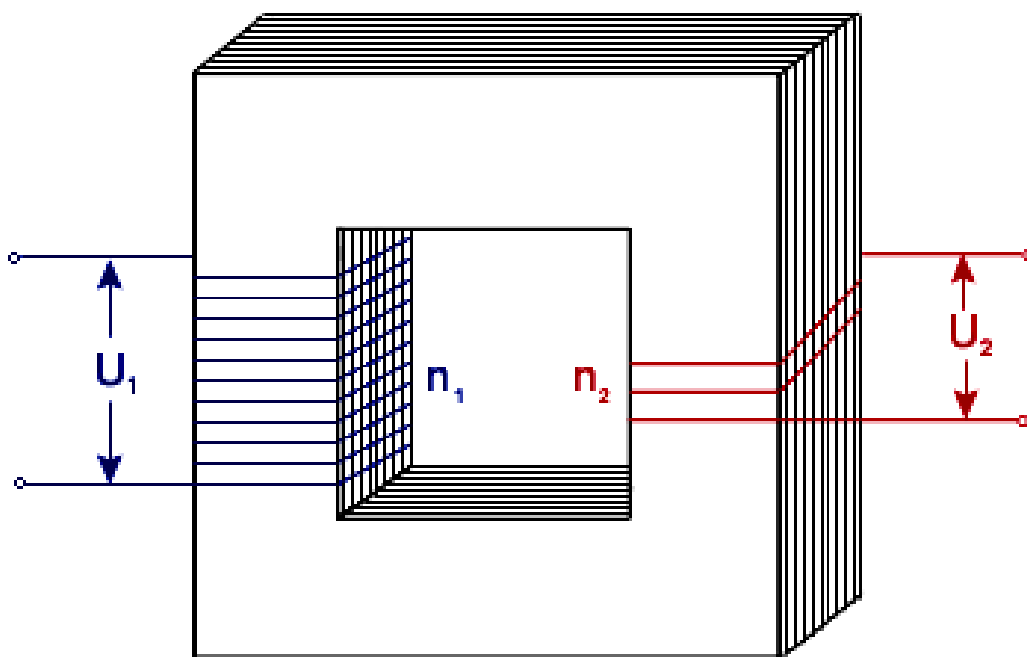
Daljnji razvoj transformatora kreće se u pravcu osvajanja sve većih snaga i viših radnih napona te se paralelno rješavaju i ekonomski oblici gradnje transformatora i električnih strojeva uopće. Do drugog svjetskog rata najbitniji je, za transformatore, prijelaz s pločastog namota na cilindrični, zatim regulacija napona, posebno ona pod teretom, konstruirana 1927. u Americi, i vraćanje s upotrebljenom gustoćom struje u namotu odprilike 3 A/mm^2 na kojoj se održala do danas.

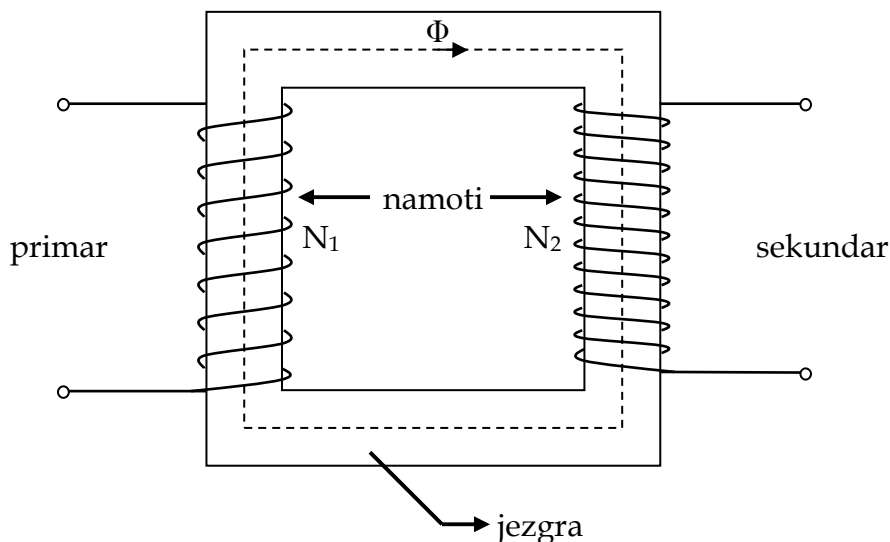
Novi val razvoja je došao pronalaskom hladnovaljanog legiranog lima s usmjerenim kristalima koji dopuštaju indukcije i do 1.8 T , dok su se specifični gubitci kretali oko 0.6 W/kg pri indukciji od 1 T i frekvenciji od 50 Hz . U to se doba za izolaciju među limovima koristio, najčešće, papir i oksid, najtanji limovi su dosežali 0.5 , odnosno 0.35 mm . Lim je bio hladnovaljani (M-6X) i toplovaljani (TL 93), iako se danas toplovaljani lim koristi samo za transformatore malih snaga. Transformatori su se gradili i za vrijednosti 360 MVA .

Danas se lim, uglavnom, izrađuje u debljinama od 0.3 mm , izolira lakom i carlitom. Lim je tipa *Unisil M140-30S* te *Unisil-H M105-30P*, snage prelaze vrijednosti 500 MVA , radni naponi se kreću od par volti (3.5 i 8 V) pa do 735 kV .

2. Općenito o transformatoru

Transformator je statički elektromagnetski uređaj (naprava, stroj) koji služi za transformiranje (mjenjanje, pretvaranje) jednih vrijednosti izmjeničnog napona i jakosti struje na druge vrijednosti uz stalnu frekvenciju i minimalne gubitke.





2.1. Konstrukcija transformatora

Transformator se sastoji od aktivnog i pasivnog dijela. U aktivnom se dijelu zbivaju sve elektromagnetske pojave, a sastoji se od jezgre i namota. Pasivni dio je oprema transformatora, a sastoji se od kotla, uvoda, odvoda, konzervatora, sušionika, kontrolnih i zaštitnih naprava.

Jezgra transformatora ima za zadatak da provodi vremenski promjenjivi magnetski tok, zbog čega se koriste feromagnetski materijali ($\mu_r \gg 1$). Kako je magnetski tok promjenjiv materijal mora biti meki, tj. mora imati usku petlju histereze da se ne utroši puno energije zbog gubitaka usljed histereze (površina ispod petlje). Jezgra se, u pravilu, ne izrađuje iz jednog komada već od limova (debljina 0.3 mm ili 0.5 mm – prilog 1) da bi se smanjile vrijednosti vrtložnih struja. Ti se limovi međusobno moraju izolirati, a za to se koristi lak i carlita [karlit], dok su se prije koristili papir, oksid i fosfatiranje. Dakle, od jezgre se zahtjeva što veći magnetski tok Φ , što manju vrtložnu struju i što manje gubitke. Takvim kriterijima najbolje odgovara ferosilicijsko željezo (Fe + Si; 0.5 – 5 % Si), iako se koriste i druge slitine željeza.

Limovi, ovisno o načinu izrade, mogu biti toplovaljani i hladnovaljani. Toplovaljanima su gubici između 1.1 i 1.2 W/kg, pružaju jednaku magnetsku vodljivost u svim smjerovima te su jeftiniji. Hladnovaljanima su gubici između 0.5 i 0.6 W/kg, pružaju povećanu magnetsku vodljivost u smjeru valjanja, skuplji su ali i u široj primjeni.

Jezgra se sastoji od stupova i jarmova. Stupovi služe za smještaj namota, a jarmovi za provođenje magnetskog toka. Po obliku, jezgre dijelimo na jezgraste i ogrnute tipove.

Namoti transformatora su namotaji vodiča u cilindrični (prije pločasti) oblik oko stupova. Na svakom transformatoru su dva para namotaja (parova je koliko i faza), ili samo dva ako govorimo o jednofaznom transformatoru.

Jedan par namota N_1 , primarni, služi da se u njemu inducira elektromagnetski tok. Drugi par N_2 , sekundarni, služi da se na njegovim krajevima inducira napon.

Izrađuju se od bakra i aluminijske (rijede), a izolirani su međusobno i prema jezgri. Međusobno se izoliraju lakom, za okrugle presjeke, te papirom i pamukom za profilne presjeke.

2.2. Princip rada transformatora

Na primarni namot transformatora N_1 narinemo jednofazni izmjenični napon U_{1N} koji potjera izmjeničnu struju $I_o = I_\mu + I_g$. Izmjenična struja primara I_o se sastoji od struje magnetiziranja I_μ i struje gubitaka I_g . Struja magnetiziranja I_μ će, protječući kroz primarni namot N_1 , u njemu stvoriti vremenski promjenjivi magnetski tok $\Phi_o = \Phi_{gl} + \Phi_r$. Promjenjivi magnetski tok Φ_o se sastoji od glavnog magnetskog toka Φ_{gl} i rasipnog magnetskog toka Φ_r . Glavni magnetski tok Φ_{gl} se zatvara kroz željeznu jezgru te obuhvaća primarni N_1 i sekundarni N_2 namot transformatora. Inducirati će se elektromotorne sile E_1 u primarnom namotu N_1 na temelju pojave samoindukcije, te E_2 u sekundarnom namotu N_2 na temelju pojave međuiindukcije.

Da bi razumjeli princip rada potrebno je poznavati znakove elektrotehnike, u ovom slučaju elektromagnetske indukcije, samoindukcije i međuiindukcije:

- *elektromagnetska indukcija* je pojava da se u vodiču ili svitku inducira elektromotorna sila usljed promjene magnetskog toka ili sječenjem magnetskih silnica
- *samoindukcija* je pojava da se u svitku, koji je protjecan strujom, inducira napon usljed promjene magnetskog toka nastalog u tom svitku
- *međuiindukcija* je pojava da se u svitku inducira napon usljed promjene magnetskog toka nastalog u drugom svitku, ako je taj magnetski tok zatvoren kroz oba svitka

Osnovna jednačina transformatora je $P_1 = P_2$, pa iz toga proizlazi sledeće. Naponi primara i sekundara su u omjeru proporcionalni kao i omjer broja namota primara i broja namota sekundara, a obrnuto proporcionalni sa omjerom struje primara i struje sekundara. Taj se omjer naziva prijenosni omjer $k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$

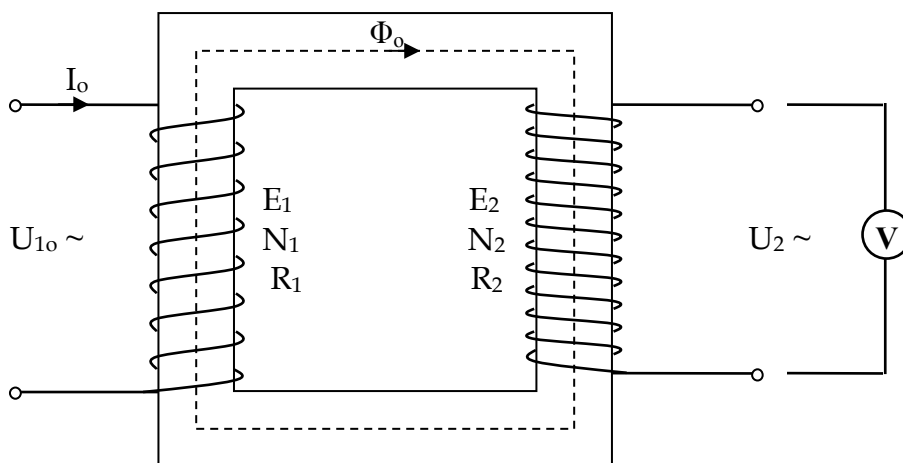
2.3. Pogonska stanja transformatora

Na stezaljke sekundarnog namota N_2 transformatora se mogu spajati različita trošila, što je i slučaj kod svakog transformatora. Ovisno o jačini tog trošila, odnosno veličini impedancije Z tog trošila razlikujemo tri pogonska stanja i to kad se iznos impedancije mijenja od 0 do ∞ . Sva su pogonska stanja postojeća ako je na primarni namot N_1 narinut napon U_1 .

1. prazni hod – iznos impedancije je beskonačno velik ($Z = \infty \Omega$), odnosno stezaljke sekundarnog namota N_2 nisu spojene galvanskom vezom. U slučaju praznog hoda, za razliku od kratkog spoja, nije bitno da li je transformator doveden u to pogonsko stanje namjerno ili nenamjerno jer ne uzrokuje transformatoru štetne posljedice. Često se izvodi pokus praznog hoda jer su informacije dobivene iz tog pokusa potrebne.

Pokus se provodi tako da se na sekundarni namot transformatora N_2 priključi voltmetar, otpor voltmetra je beskonačno velik pa on predstavlja prekid strujnog kruga. Zato kroz sekundarni namot N_2 ne teče struja iako se inducira napon U_2 , dok je na primarni namot N_1 narinut izmjenični napon U_1 i teče struja I_0 . Pokus provodimo da bi odredili gubitke u željeznoj jezgri, gubitci u bakru su zanemarivo mali pa ih zanemarujemo. Da bi ustvrdili točnost prijenosnog omjera, određujemo snagu praznog hoda P_0 , struju praznog hoda I_0 i faktor snage $\cos\varphi_0$.

Sve se te veličine mjere u primarnom namotu namotu N_1 jer kroz sekundarni ne teče struja. Te veličine u ovisnosti o naponu na primaru U_1 nazivamo karakteristikom praznog hoda P_0 , I_0 , $\cos\varphi_0 = f(U_{10})$ koju također snimamo prilikom ovog pokusa. Pokus se provodi tako da se napon mijenja u koracima. Krivulje snimljene ovim pokusom i shema spoja nalaze se u prilogu broj 1.

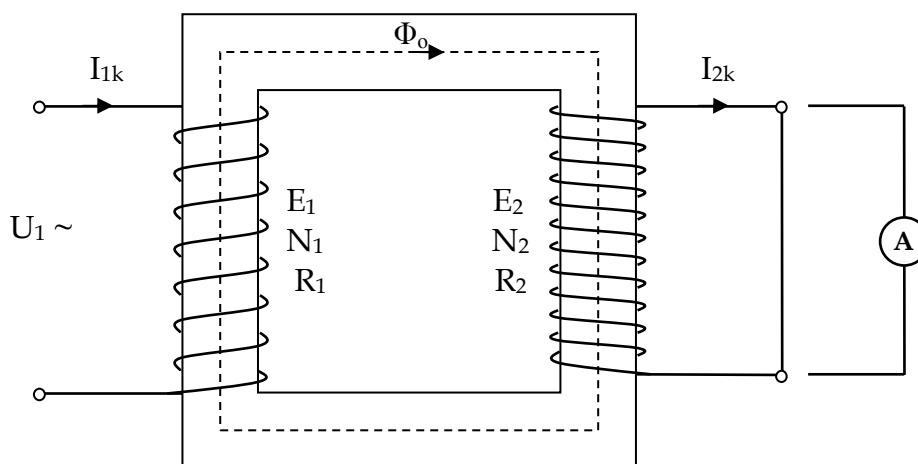


2. kratki spoj – iznos impedancije je približno jednak nuli ($Z \approx 0 \Omega$). Tu razlikujemo dva slučaja: kada nastane namjerno i kada nastane nenamjerno, odnosno ispitni i pogonski kratki spoj.

- pogonski kratki spoj nastaje nenamjerno, što često znači da uzrokuje oštećenja ako nema nužno potrebne zaštite. Do njega dolazi nekim kvarom, oštećenjem izolacije, nepažnom i slično. Problem ovog kratkog spoja je to što se dogodi pri nazivnim naponima i protjera stuje 8 do 25 puta jače od nazivnih struja.
- ispitni kratki spoj nastaje namjerno, u ispitnoj stanici, kao dio svake provjere transformatora prije njegove distribucije na tržište, odnosno upuštanja u rad.

Vrši se tako da se na sekundarni namot N_2 priključi ampermetar. Kako ampermetar ima jako mali otpor predstavlja kratki spoj strujnog kruga sekundarnog namota N_2 . Narinuti napon U_1 na primarnom namotu N_1 je takav da uzrokuje nazivne struje I_{1N} i I_{2N} kroz primarni N_1 odnosno sekundarni N_2 namot transformatora.

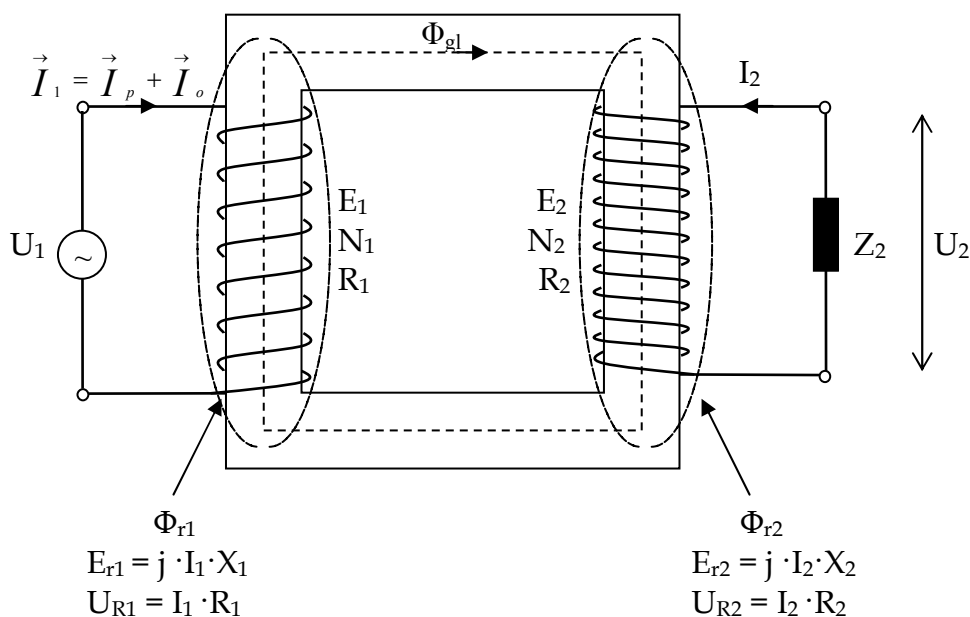
Pomoću ispitnog kratkog spoja određujemo vrijednost napona kratkog spoja, gubitke u bakru P_{fe} , udarnu struju kratkog spoja I_k i ekvivalentne otpore te snimamo karakteristiku kratkog spoja: snagu kratkog spoja P_k , struju kratkog spoja I_k i faktor snage kratkog spoja $\cos\varphi_k$ u ovisnosti o naponu kratkog spoja na primaru U_{1k} , P_k , I_k , $\cos\varphi_k = f(U_{1k})$. Pokus se provodi mijenjajući napon u koracima kako bi se postigle određene vrijednosti struje. Krivulje dobivene ovim pokusom i shema spoja nalaze se u prilogu broj 2.



3. opterećenje – iznos impedancije, ovisno o vrsti trošila, kreće se između nule i beskonačno velike ($0 \Omega \leq Z \leq \infty \Omega$). No transformator koji bi bio opterećen tako da bi bio blizu prvom pogonskom stanju – praznom hodu, bio bi pogonski neiskorišten. Naprotiv, kad bi bio tako malo opterećen da bi se više ili manje približio drugom pogonskom stanju – kratkom spoju, transformator bi bio doveden u opasnost da bude brzo uništen

3. Opterećenje transformatora

Na stezaljke primarnog namota N_1 transformatora narinemo napon U_1 (pogl. 2.2). Ako se na stezaljke sekundarnog namota N_2 spoji trošilo impedancije $Z_2^2 = R_2^2 + X_2^2$ transformator će biti opterećen. Tada će kroz sekundarni krug poteći struja I_2 . Struja sekundara I_2 , protječući kroz sekundarni namot N_2 , u njemu stvara vremenski promjenjiv magnetski tok Φ_2 koji se suprotstavlja glavnom magnetskom toku Φ_{gl} . Tako se smanjuje vrijednost ukupnog magnetskog toka što dovodi do smanjenja samoinducirane elektromotorne sile u primaru E_1 što uzrokuje smanjenje vrijednosti stuje primara I_o . Time je ravnoteža transformatora, koja uvjetuje konstantne vrijednosti ukupnog magnetskog toka Φ , samoinduciranu elektromotornu silu na primaru E_1 i struju primara I_o , narušena. Da se to nebi dogodilo transformator iz mreže povuče dodatnu, paralizirajuću struju I_p na primarni namot transformatora, te protječući kroz njega stvara vremenski promjenjiv magnetski tok Φ_p . Vremenski promjenjivi magnetski tok Φ_p je jednak po iznosu a suprotan po smjeru od vremenski promjenjivog magnetskog toka sekundara Φ_2 , pa se ti magnetski tokovi poništavaju a kao rezultatni magnetski tok ostaje glavni magnetski tok Φ_{gl} te se tako ostvaruje povratak ravnoteže transformatora.



Da postoje idelane stvari postojao bi i idealni transformator kod kojeg nebi dolazilo do gubitaka u vodičima U_{R1} i U_{R2} , gubitaka u jezgri E_{r1} i E_{r2} kao niti do rasipnog magnetskog toka Φ_{r1} i Φ_{r2} . Ali kako postoje samo realni transformatori ovi gubitci postoje, pa se prema II. Kirchhoffom zakonu (zbroy svih elektromotornih sila u zatvorenom strujnom krugu jednak je zbroju svih padova napona u tom strujnom krugu) pišu naponske jednačbe:

- za primar: - idealni: $U_1 = -E_1$

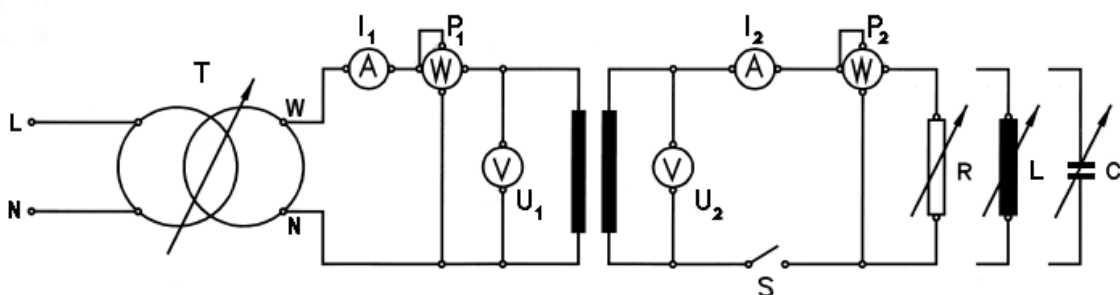
- realni: $U_1 > E_1 \rightarrow \vec{U}_1 = -\vec{E}_1 + \vec{I}_1 \cdot R_1 + j \cdot \vec{I}_1 \cdot x_1$

- za sekundar: - idealni: $U_2 = -E_2$

- realni: $E_2 > U_2 \rightarrow \vec{E}_2 = \vec{U}_2 + \vec{I}_2 \cdot R_2 + j \cdot \vec{I}_2 \cdot x_2$

3.1. Pokus opterećenja transformatora

Shema spoja:



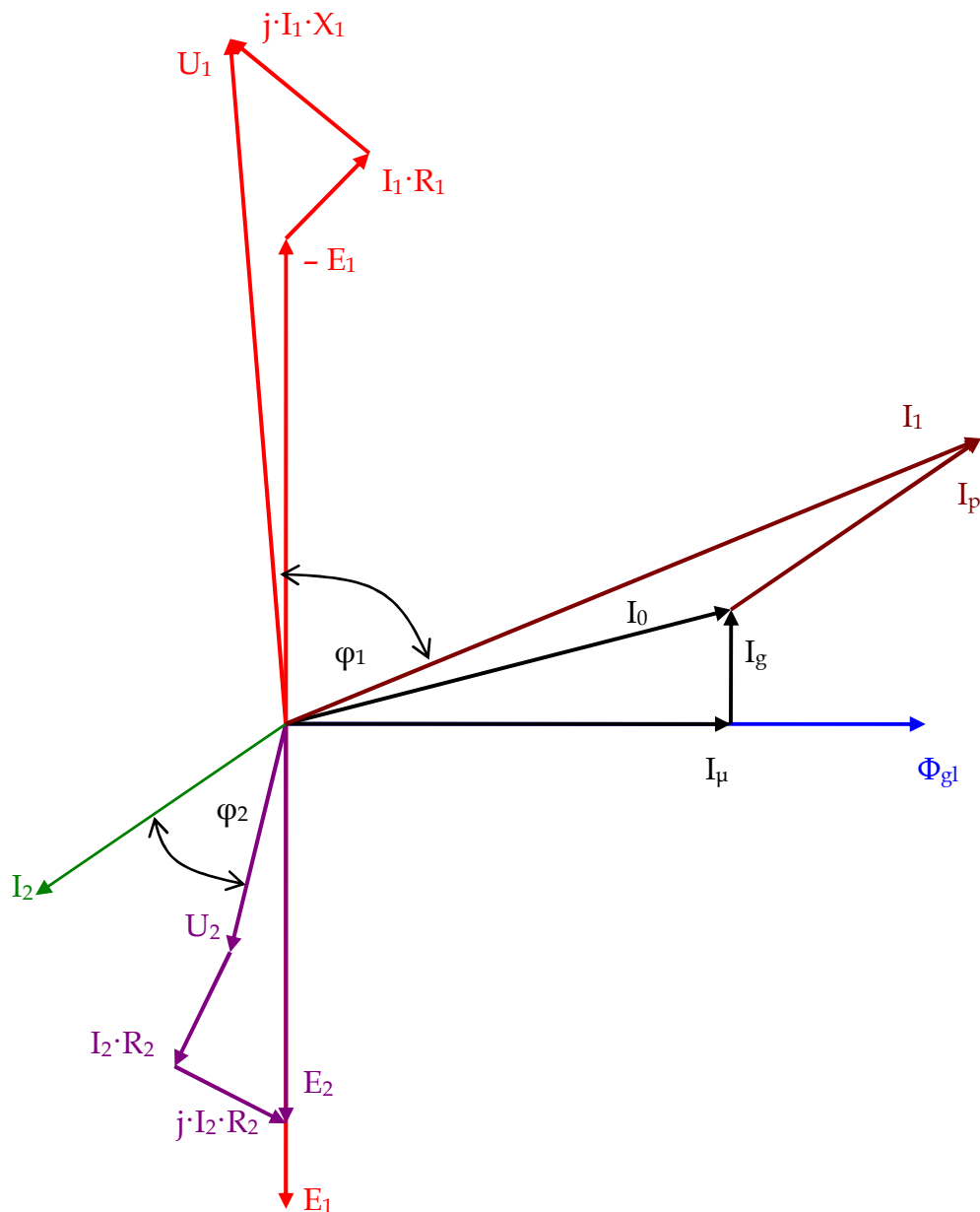
Ovom se shemom koristimo pri pokusu opterećenja transformatora ali i kod rada transformatora, zbog kontrole ispravnosti. Pokus se provodi tako da se na primarne stezaljke transformatora narine nazivni napon U_{1n} a na sekundarne stezaljke priključimo trošilo. Radi boljeg uvida u karakteristike transformatora spajaju se različita trošila – radno, induktivno i kapacitivno i to tako da mjenjamo njihovu vrijednost postići struje vrijednosti 0, 50, 100 i 110 % nazivnih vrijednosti struja primara I_1 i sekundara I_2 .

Ovisno o karakteru trošila struja I_2 protjecana kroz trošilo Z_2 , tjerana sekundarnim naponom na stezalkama U_2 , će biti fazno pomaknuta na isti, U_2 , za neki kut φ_2 . Zbog prebacivanja tereta na primarnu stranu, tj. paralizirajuće struje, i primarna će struja I_1 biti fazno pomaknuta u odnosu na narinuti napon izvora U_1 za neki kut φ_1 . Struja magnetiziranja I_μ , gledano na primarnoj strani, će svojim induktivnim karakterom povećati taj kut. Izrazito je nepovoljan slučaj kada je trošilo Z_2 čistog radnog karaktera jer će i tada struja I_0 svojom magnetizirajućom komponentom I_μ stvarati fazni pomak φ_1 primarne struje I_1 na narinuti napon U_1 , a time i lošiji faktor snage $\cos\varphi_1$. Faktor snage računamo za primarnu $\cos\varphi_1 = \frac{P_1}{U_1 \cdot I_1}$ i za sekundarnu

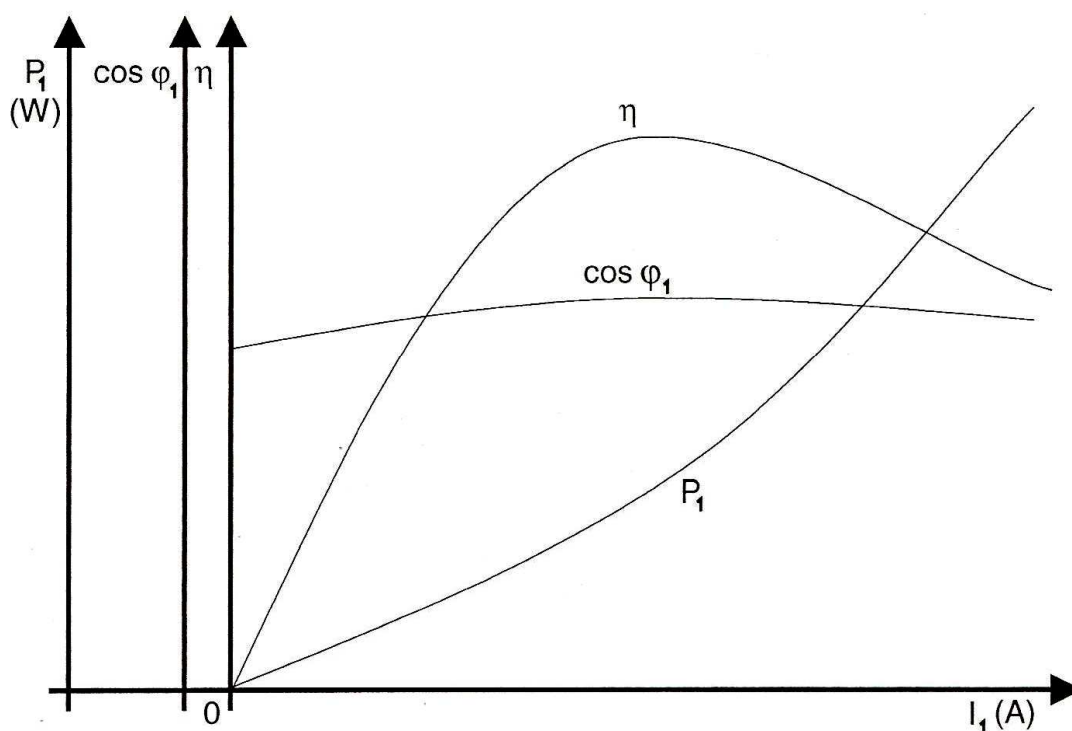
$\cos\varphi_2 = \frac{P_2}{U_2 \cdot I_2}$ stranu.

Gubitke nastale opterećenjem transformatora dijelimo na gubitke u željezu, gubitke u bakru te dodatne gubitke. Gubitke praznog hoda određujemo pokusom praznog hoda (iako gubitci nisu samo u željezu), a gubitke u bakru pokusom kratkog spoja. Gubitci se u željezu s opterećenjem nešto smanjuju (što vrijedi i za tošila induktivnog i kapacitivnog karaktera) jer narinutom naponu pomažu održati ravnotežu induktivni i djelatni pad napona. Te je zbog toga inducirani napon, o kojem ovise gubitci u željezu, manji.

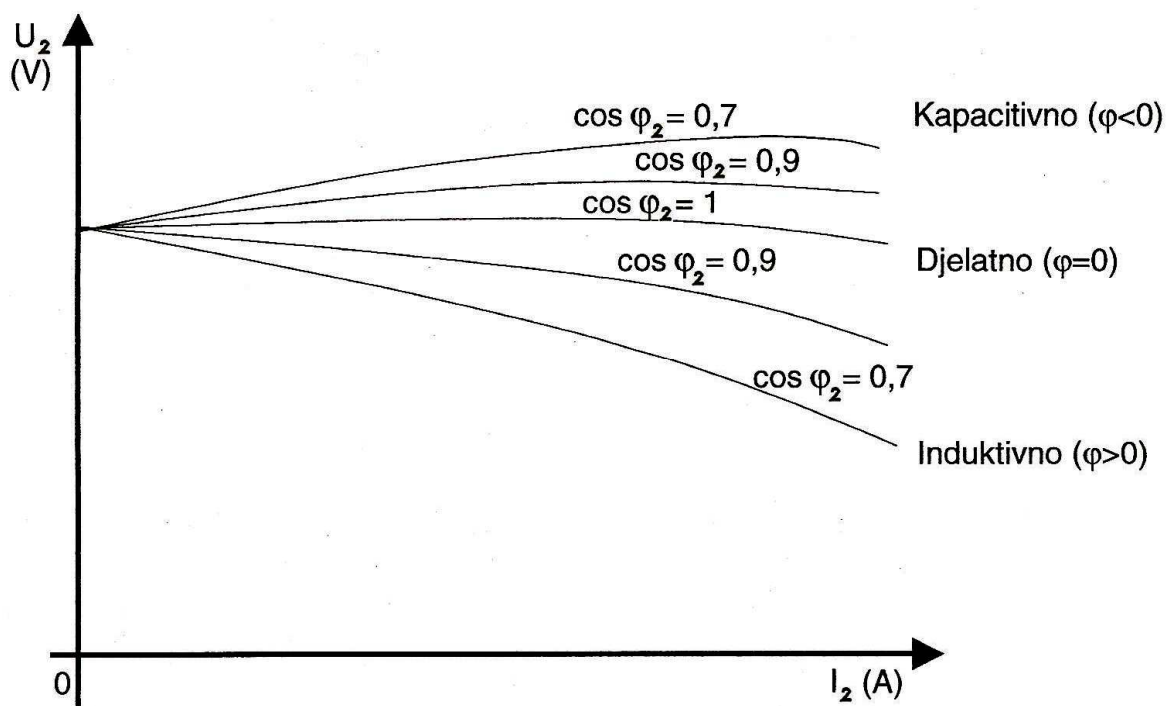
Sa pokusom se snima:
fazorski diagram:



karakteristike: - primarna strana: snaga P_1 , faktor snage $\cos \varphi_1$ i korisnost η , sve u ovisnosti o primarnoj struji opterećenja I_1 (opteretna karakteristika)



- sekundarna strana: napon sekundara U_2 u ovisnosti o sekundarnoj struji opterećenja I_2 (vanjska karakteristika)



3.2. Primjer pokusa opterećenja transformatora

Primjer pokusa opterećenja transformatora sam obavio u Elektrotehničkoj školi, Konavoska 2, u učionici za električne strojeve. Koristio sam sljedeću opremu:

▪ jednofazni transformator 1ST05	kom. 1
▪ izmjenični ampermetar A	kom. 2
▪ izmjenični voltmetar V	kom. 2
▪ vatmetar W	kom. 2
▪ jednofazni regulacijski autotransformator T, 0-300V, 10A	kom. 1
▪ potencijometar R	kom. 1
▪ induktivno trošilo L	kom. 1
▪ kapacitivno trošilo C	kom. 1
▪ jednofazni izvor 220V, 50Hz, 10A	kom. 1
▪ sklopnička jedinica S	kom. 1
▪ spojni vodovi	kom. 26

Predmet moje obrade bio je jednofazni transformator tipa 1ST05:

- nazivni napon primarne / sekundarne strane U_{n1} / U_{n2} : 220 / 48 [V]
- nazivna struja primarne / sekundarne strane I_{n1} / I_{n2} : 2,27 / 10,48 [A]
- nazivna snaga S_n : 500 [W]
- nazivna frekvencija f_n : 50 [Hz]

Opis rada:

U učionicu sam došao pripremljen za pokus tako da sam ponovio općenito o transformatoru, a posebno njegov princip rada i ponašanje u opterećenju i ostalim pogonskim stanjima. Također sam ponovio svrhu provođenja pokusa opterećenja, ali i praznog hoda i kratkog spoja.

U pokusu sam promatrao rad (ponašanje) jednofaznog transformatora kod se nalazi u opterećenju djelatnim, induktivnim i kapacitivnim trošilom električne energije. Tokom promatranja sam i zapisivao dobivene vrijednosti u tablice obrađujući pozornost na karakteristiku opterećenja transformatora primarne strane: ponašanje snage P_1 , faktora snage $\cos\varphi_1$, te korisnost η s obzirom na promjenu primarne struje opterećenja I_1 ; te vanjsku karakteristiku transformatora sekundarne strane: ponašanje napona sekundarne strane U_2 s obzirom na promjenu sekundarne struje opterećenja I_2 . Matematički zapisano: P_1 , $\cos\varphi_1$, $\eta = f(U_1)$ te $U_2 = f(I_2)$.

Spojio sam opremu tako da odgovara shemi spoja opterećenja transformatora (pogl. 3.1.) tako da redom na stezaljke sekundarnog namota transformatora N_2 bude priključeno radno trošilo R, induktivno trošilo L pa kapacitivno trošilo C. Regulacijski autotransformator T mora biti na nuli.

Prije početka samog pokusa, odnosno provođenja mjerenja, sklopka S treba biti isključena, a trošilo (R, L ili C) namješteno na vrijednost koja osigurava najmanju

struju pri uključenju. Pomoću jednofaznog regulacijskog autotransformatora T treba namjestiti nazivni napon na primarnoj strani $U_1 = U_{n1}$. Ukoliko je to moguće, mjerenje je potrebno provesti u barem četiri točke za svako priključeno trošilo:

1. u neopterećenom stanju; sklopka je otvorena; $U_1 = U_{n1}$; $I_2 = 0$
2. pri djelomičnom opterećenju; sklopka S je zatvorena; $U_1 = U_{n1}$; $I_1 = 0,5 \cdot I_{n1}$
3. pri nazivnom opterećenju; sklopka S je zatvorena; $U_1 = U_{n1}$; $I_1 = I_{n1}$
4. pri preopterećenju; sklopka je zatvorena; $U_1 = U_{n1}$; $I_1 = 1,1 \cdot I_{n1}$

Opterećenje, odnosno primarnu I_1 i sekundarnu I_2 struju, postizemo namještanjem otpora na trošilu (R, L ili C) priključenom na sekundarne stezaljke transformatora N_2 . Za svaku namještenu vrijednost opterećenja sam mjerio primarni U_1 i sekundarni U_2 napon, primarnu I_1 i sekundarnu I_2 struju opterećenja te sugu na primarnoj P_1 i sekundarnoj P_2 strani. Izmjerene vrijednosti sam upisao u tablice, plavo su obojena polja namjenja izmjerenim vrijednostima a žuto označena polja izjerenim vrijednostima:

Radno trošilo (R):

U_1	I_1	P_1	$\cos\varphi_1$	U_2	I_2	P_2	$\cos\varphi_2$	η
V	A	W		V	A	W		
220	0,098	11	0,51	48,3	0	0	0	0
220	1	220	1	45,5	4	181	0,995	82,273
220	2,27	470	0,941	40	9,83	393	0,999	83,617
220	2,5	500	0,909	39	10,7	410	0,983	82

Pokuse za induktivno (L) i kapacitivno (C) trošilo nisam proveo jer škola, u svojoj opremi, ne posjeduje takva trošila potrebna za ovaj pokus.

Izračun svakog reda gornje tablice se sastoji od izračuna faktora snage primara $\cos\varphi_1$ i sekundara $\cos\varphi_2$ te korisnosti η transformatora po sljedećim formulama:

$$\cos\varphi_1 = \frac{P_1}{U_1 \cdot I_1}; \quad \cos\varphi_2 = \frac{P_2}{U_2 \cdot I_2}; \quad \eta[\%] = \frac{P_1}{P_2} \cdot 100$$

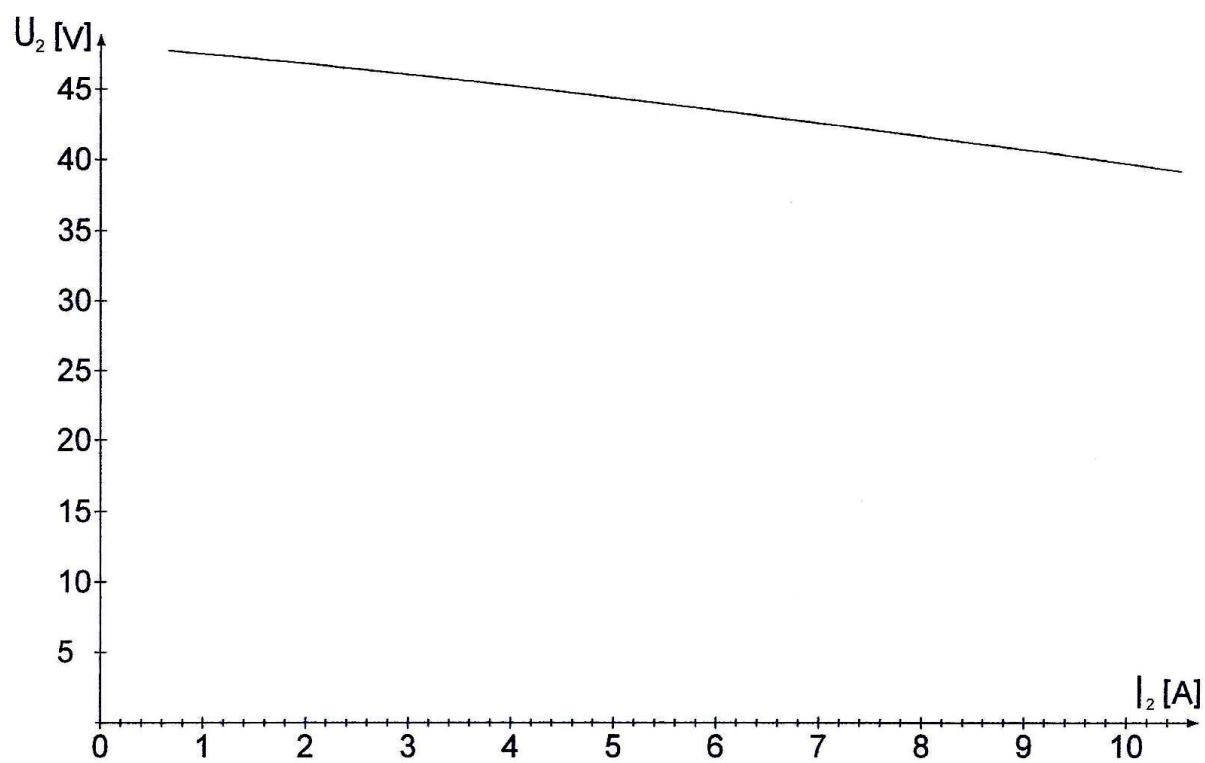
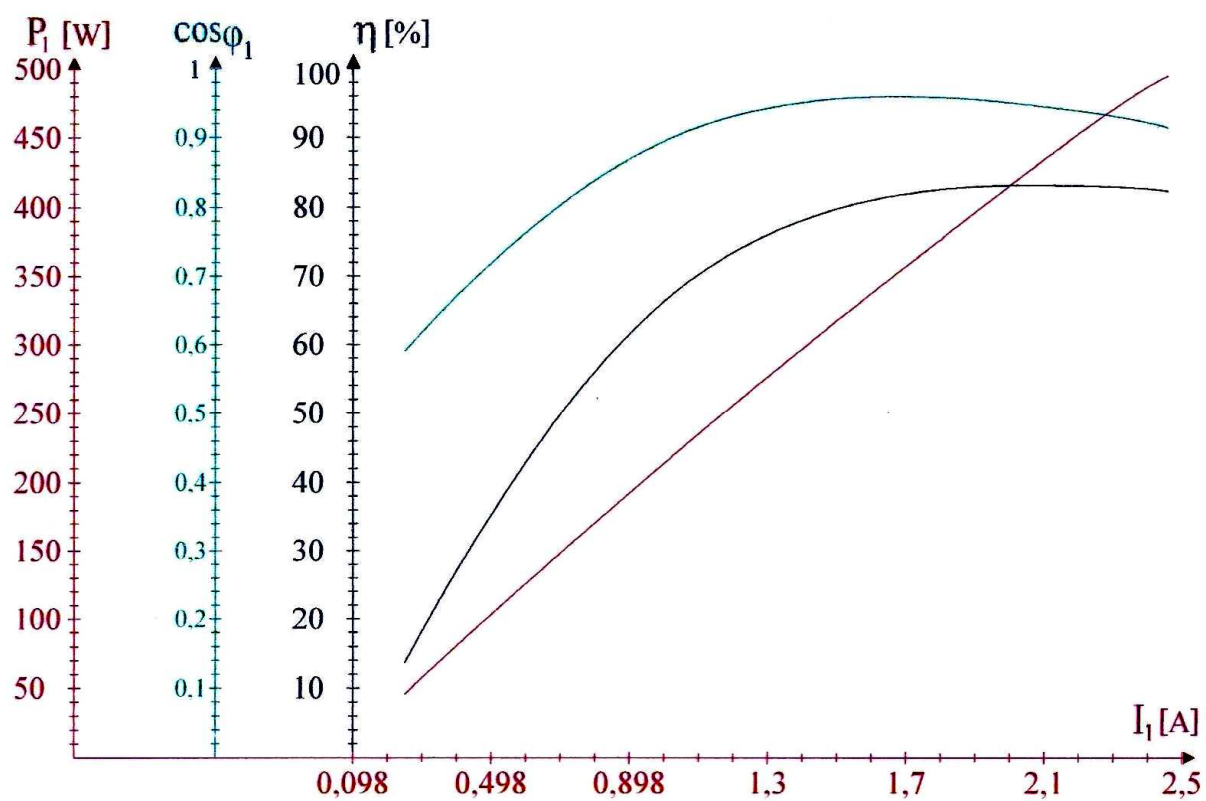
Dakle za nazivno opterećenje, tj. kada je napon primara jednak $U_1 = 220V$ te kroz njega teče struja $I_1 = 2,27 A$. Što znači nazivne podatke, odnosno treći redak iz tablice, računamo:

$$\cos\varphi_{n1} = \frac{P_{n1}}{U_{n1} \cdot I_{n1}} = \frac{470}{220 \cdot 2,27} = \frac{470}{499,4} = 0,941$$

$$\cos\varphi_{n2} = \frac{P_{n2}}{U_{n2} \cdot I_{n2}} = \frac{393}{40 \cdot 9,83} = \frac{393}{393,2} = 0,9995$$

$$\eta_n[\%] = \frac{P_{n2}}{P_{n1}} \cdot 100 = \frac{393}{470} \cdot 100 = 83,617\%$$

Prema dobivenim rezultatima mjerenja i izračuna snimio sam karakteristiku opterećenja i vanjsku karakteristiku:



3.3 Zaključak pokusa

Tokom provođenja pokusa utvrdio sam svoje poznavanje transformatora. Nakon provedenog pokusa te računske obrade istog donio sam neke zaključke.

Napon na primarnoj strani je konstantan, dok na sekundarnoj strani lagano opada sa povećanjem struje zbog padova napona, no uglavnog ga smatramo konstantim.

Prvi redak tablice, odnosno prvo mjerenje, je zapravo prazni hod jer se na stezaljkama sekundarnog namota inducirao napon ali nije tekla struja.

Postupak dobivanja, redom, drugog, trećeg i četvrtog reda tablice je povećanjem otpora Z_2 na stezaljkama sekundarnog namota. Kako sam već prije napomenuo, vrijednost sekundarnog napona se smatra konstantom, a struja je prema Ohmovom zakonu obrnuto proporcionalna sa vrijednosti otpora odnosno $I_2 = \frac{1}{Z_2}$. Prema

tome znači da se struja u u drugom, trećem i četvrtom mjerenju povećava, što je i istina. No ne povećava se samo struja sekundarnog kruga I_2 nego se elektromagnetskim prijenosom opterećenja povećava i struja sekundarnog kruga I_1 .

S konstantnim naponom i povećanom strujom raste i iznos ukupne snage koju je potrebno povući iz mreže te predati sekundarnom strujnom krugu, tj. $S_1 = U_1 \cdot I_1$ odnosno $S_2 = U_2 \cdot I_2$. Mjerenjem možemo ustanoviti veličinu radne snage, a računom veličinu ukupne snage. No kako je transformator uređaj koji se služi zavojnicama (namotima) za prijenos energije on sam predstavlja radno-induktivno trošilo (iako je jedan od ciljeva transformatora proizvesti što manje gubitke) stvara se neki fazni pomak struje naspram napona. Zbog toga i postoji faktor snage na primarnoj $\cos\varphi_1$ i $\cos\varphi_2$ koji se računaju po gore navedenim formulama.

Transformator najbolje prenosi energiju pri nazivnim vrijednostima napona i struje, što je inače slučaj ali ne i kod ovog transformatora školske primjene. To je zato jer su limovi, tj. jezgra, dimenzionirani i izrađeni tako da se pri nazivnim vrijednostima stvori najveći magnetski tok (vrh krivulje magnetiziranja). Tom tehnikom se jezgra transformatora iskoristi u potpunosti a ne odvede u zasićenje. Upravo je zbog toga najveća korisnost točno kod nazivnog opterećenja, dok je faktor snage najpovoljniji blizu istih.

Transformator školske namjene ne pokazuje najbolje osobine no svakako odlično služi svojoj svrsi – demonstracija svih pokusa i rada transformatora.

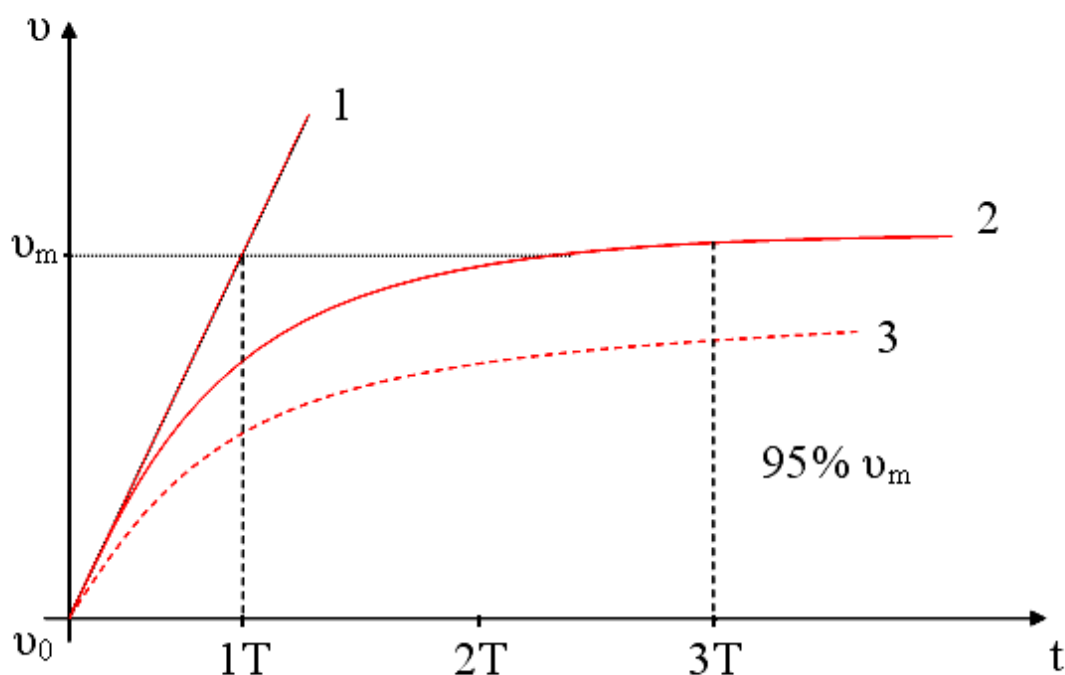
4. Zagrijavanje i hlađenje transformatora

4.1. Zagrijavanje transformatora

Osnovni zakoni i neke karakteristike zagrijavanja i hlađenja zajednički su za sve vrste električnih strojeva i transformatora, pa ih treba razmotriti prije nego specifičnosti koje u tom pogledu pripadaju transformatoru.

Svi gubici u električnim strojevima i transformatorima, u kojoj god da se formi javljaju, na kraju se pretvaraju u toplinu. Toplina proizvedena na taj način u transformatoru povećava temperaturu namota i ostalih dijelova. Električni strojevi i transformatori zagrijavaju se po zakonitosti izraženi jednačinom:

$\nu = \nu_0 + \nu_m (1 - e^{-t/T})$, gdje je ν temperatura namota, ν_0 početna temperatura namota, ν_m konačna temperatura namota, t vrijeme i T vremenska konstanta. Ta je zakonitost prikazana diagramom:



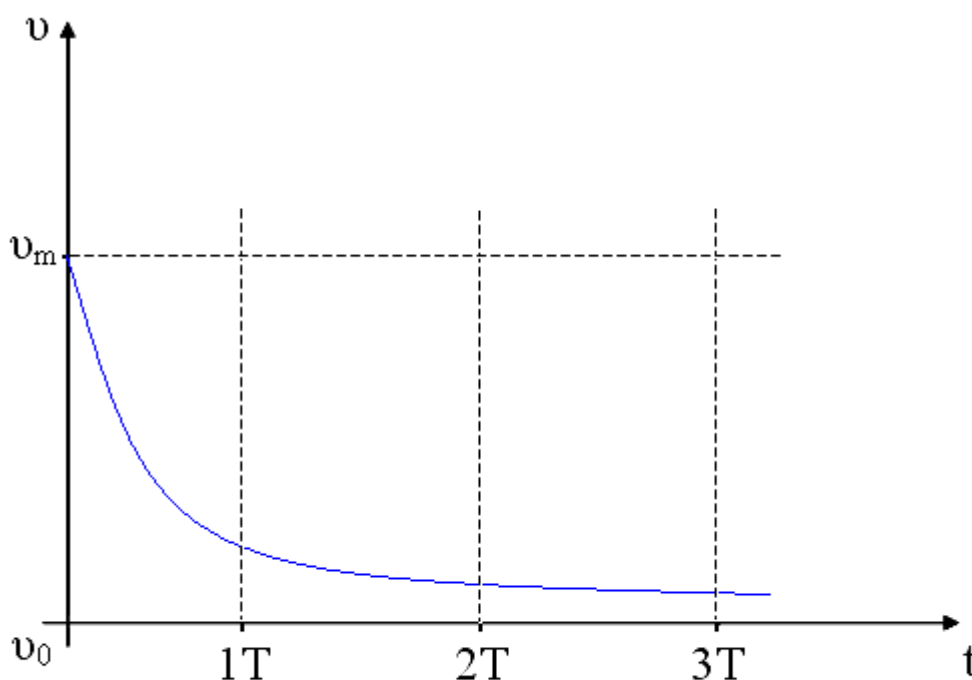
- Krivulje: 1. – bez odvođenja topline
2. – uz odvođenje topline
3. – opterećenje manje od nazivnog

Vremenska konstanta T je vrijeme za koje bi se transformator zagrijao do temperature koja predstavlja dozvoljenu granicu transformatora i to bez odvođenja topline a uz nazivno opterećenje. Može se računati prema formuli: $T = \frac{G \cdot c}{A \cdot \lambda}$, gdje su G masa, c specifični toplinski kapacitet, A rashladna površina i λ koeficijent toplinske provodljivosti.

Općenito gledajući zagrijavanje transformatora je posljedica opterećenja. A zagrijavanje se javlja u jezgri i namotima. Zagrijavanje je jedini čimbenik koji utječe na nazivnu snagu transformatora, a utječe i na životnu dob izolacije, tj. vijek trajanja transformatora. Npr. papir i pamuk podnose temperaturu do 100 °C.

4.2. Hlađenje transformatora

Zbog zagrijavanja se transformator mora i hladiti. Poželjno je da se transformator hladi po krivulji:



Odnosno po zakonitosti: $v = v_0 + v_m e^{-t/T}$. Postoji prirodno i prisilno hlađenje. Prirodno hlađenje je kada se toplina odvodi prirodnim putem, bez dodatnog sustava. Prisilno hlađenje ima dodatni sustav koji pospešuje odvođenje topline. Način hlađenja ovisi o nazivnoj snazi i mjestu ugradnje. Tako da postoje suhi i uljni transformatori.

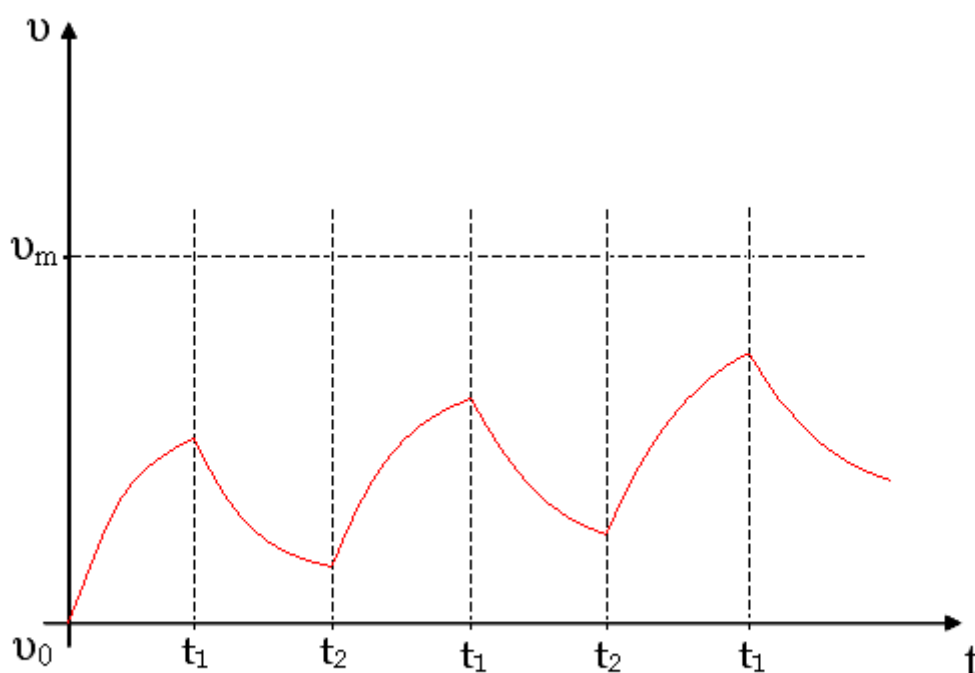
Kod suhih transformatora višak topline s njihove se površine odvodi prirodnim (AN – air nature) i prisilnim (AF – air force) cirkuliranjem zraka

Kod uljnih transformatora višak topline preuzima ulje, a zatim se ta toplina preko kotla i rashladnog uređaja odvodi u okolinu. Rashladni uređaji mogu biti radijatori, hladnjaci, vodni hladitelji. Tako da razlikujemo: ONAN – oil nature, air nature; ONAF – oil nature, air force; OFWF – oil force, water force.

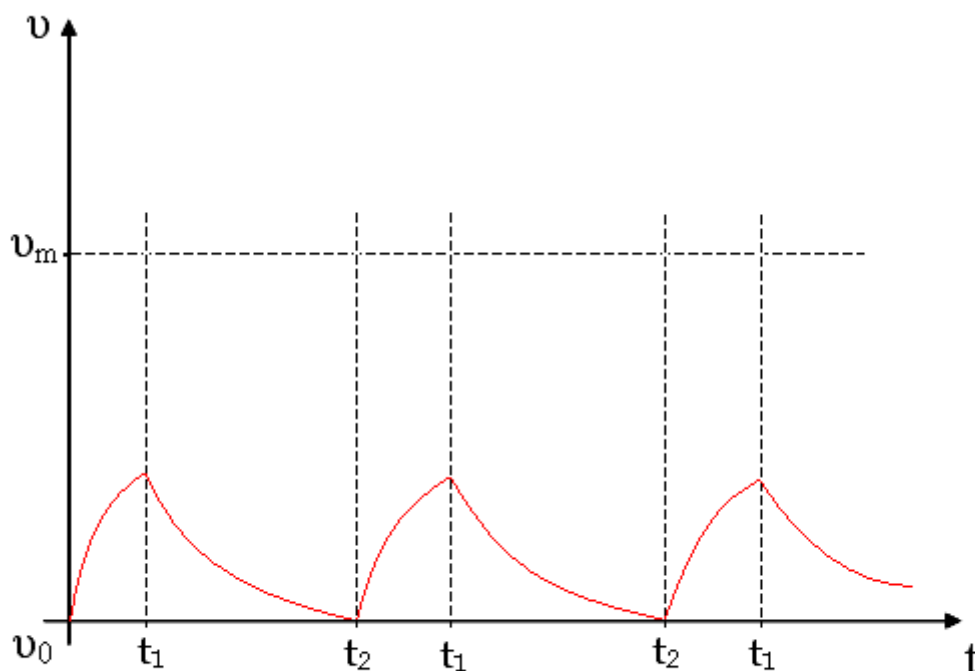
4.3. Vrste pogona transformatora

Do sad sam pisao samo o trajnom pogonu (TP), transformator trajno opterećen istom snagom. Ali osim toga postoje još dvije vrste pogona. To su intermitirani pogon (IP) i kratotrajni pogon (KP).

U intermitiranom pogonu postoje stanke u radu, a vrijeme te stanke je približno jednako vremenu rada transformatora $t_1 \approx t_2$. Tada transformator možemo opteretiti nešto većim opterećenjem nego što bi ga opteretili u trajnom pogonu a njegova krivulja zagrijavanja izgleda:



U kratkotrajnom pogonu također postoje stanke u radu, no pri tome je vrijeme rada manje od vremena stanke transformatora $t_1 \ll t_2$. Vrijeme stanke je takvo da se transformator stigne ohladiti na početnu temperaturu v_0 te su zbog toga moguća kratkotrajna preopterećenja transformatora. Krivulja zagrijavanja transformatora u kratkotrajnom pogonu izgleda:



5. Zaštita transformatora

Zbog čestih smetnji i kvarova transformatoru se, kao i svim ostalim djelovima elektroenergetskog sustava, mora osigurati zaštita. Za razliku od smetnji, koje otežavaju rad, kvarovi prekidaju rad. Postoje vanjski kvarovi koji se događaju u vanjskoj mreži (npr. kratki spoj na sabirnicama) te unutarnji kvarovi. Unutarnji kvarovi su u samom transformatoru a mogu biti kratki spjevi u željeznoj jezgri i proboji između primarnih i sekundarnih namota, dvije faze na istoj strani, zavoja iste faze te od namota prema masi transformatora.

Da do kvarova i smetnji nebi došlo koristimo:

- *osigurače*: postavljaju se na ulazu i izlazu transformatora
- *nadstrujni relej*: kad kroz relej prođe struja veće vrijednosti od vrijednosti najveće dozvoljene struje, taj će porast struje aktivirati učinsku sklopku koja će isključiti transformator s mreže
- *diferencijalnu zaštitu*: zasniva se na mjerenju struje na istoj fazi primarne i sekundarne strane, pa se te struje uspoređuju preko stujnih mjernih transformatora. Ako su struje različite ta će zaštita izazvati isključenje transformatora s mreže. No ova je metoda skupa pa se koristi kod transformatora većih snaga.
- *Buchholzov relej* [Bucholc]: ugrađen je u spojnu cijev konzervatora s kotlom i registira pojavu plina, a koristi se samo kod uljnih transformatora

6. Zaključak

Transformator, iako „star“ već 120 godina, zaslužuje svoje posebno mjesto u elektrotehnici. Nezamjenjiv je dio i široke je primjene u svojoj struci.

Tema transformatora je za mene bila izazovna i zanimljiva. Iz mnoštva podataka izvući ono najbitnije i to sažeto i jednostavno, a s druge strane informativno i zanimljivo, te pomoću toga opisati rad transformatora nije bilo lagano. Uzevši u obzir njegovu dugu prošlost i da je sam pojam transformator preopširan da bi ga se dalo kvalitetno sažeti a opet reći sve. Tako sam i ja u svom maturalskom radu odlučio izostaviti proračun transformatora, paralelni rad transformatora, autotransformator... Opisivanjem toga morao bi se dotaknuti i trofaznog transformatora te ostalih vrsta transformatora (mjernih, za zavarivanje, za pretvaranje, za regulaciju...) te svih njihovih pogonskih stanja, kvarova i nesimetričnosti u radu. Što smatram da bi radnju rastegnulo do toga da bi se izgubio smisao.

Smatram da je transformator, kao i do sada, još uvijek u napretku. Svakog dana doživimo neki novi izum, patent i inovaciju na cijelom polju ne samo tehnike nego i života. Tako se i transformator, za sada, u svojem vrhuncu nezamjetljivo ali uspješno razvija u malim koracima. Dimenzije su danas u širokom rasponu, kao i prije, samo u omjeru smanjene. Novi materijali, točnije slitine, se otkrivaju i primjenjuju za izradu limova jezgre. Novi izolacijski materijali koji zadržavaju ili čak i popravljaju svojstva starih, a neki su i manjih dimenzija, igraju važnu ulogu. Različita ulja za hlađenje, te izrada rebara i kotlova također pridonose razvoju transformatora.

Velik broj elektrotehničara je zadužen za proračun, izradu i sastavljanje transformatora ukazuje da je transformator toliko razvijen da više njegova izrada i primjena nisu jednostavne. Iako postoje takve.

Nadam se da će mi ovaj rad pomoći u razumjevanju, ne samo rada, nego i izrade i primjene transformatora da bi se sutra mogao, uz pomoć, uhvati u koštac s takvim zadatkom.

7. Literatura

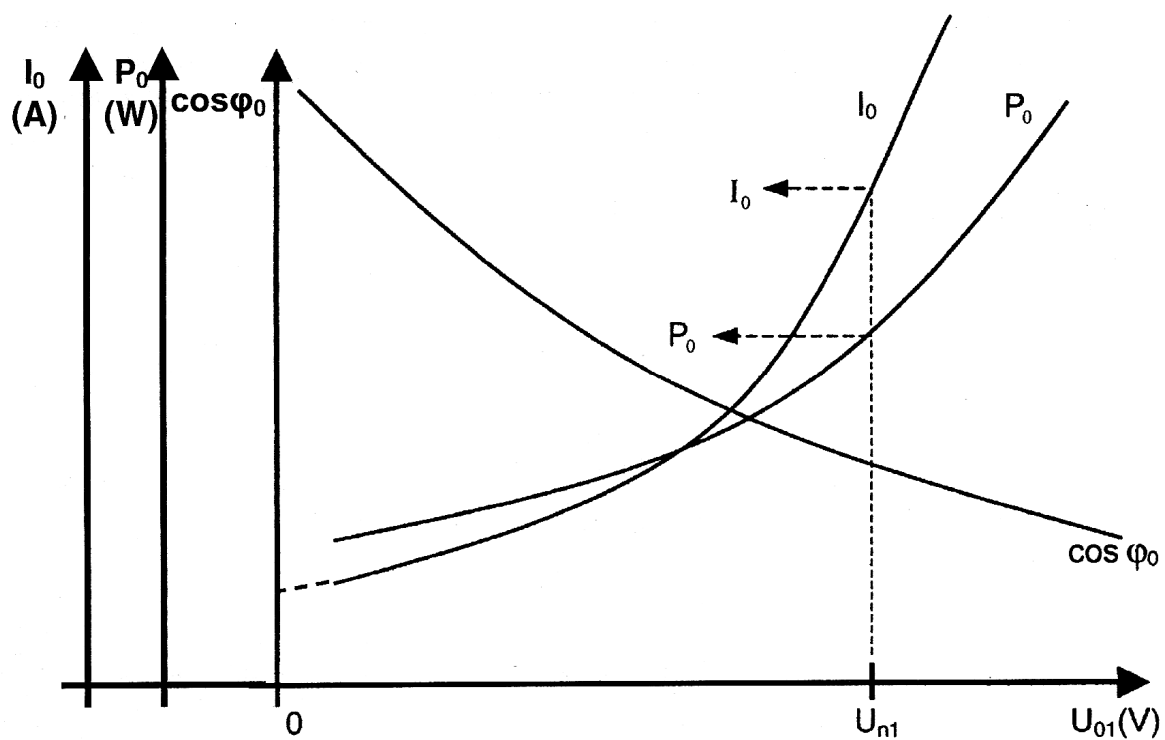
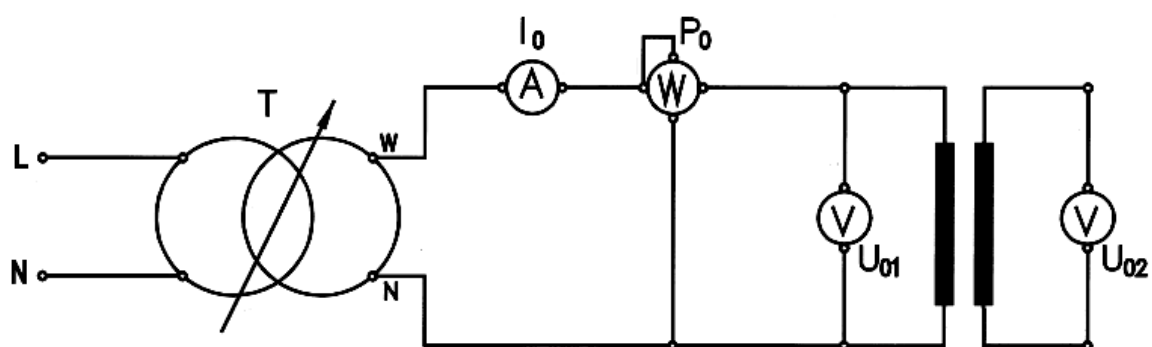
Pri pisanju maturalskog rada služio sam se sljedećom literaturom:

- Vladimir Hartl, dipl. ing. – ELEKTRIČNI STROJEVI 1, udžbenik za elektrotehničke i slične škole, XI. izdanje, Školska knjiga – Zagreb, 1996.
- Zdravko Jašarević – ELEKTRIČNI STROJEVI – Laboratorijske vježbe, pripreme za vježbe i radni listovi, 2. izdanje, TIPEX – Zagreb, 2002.
- Bilješke sa nastave profesorice Dragice Huzanić - Električni strojevi, 2004./2005. godine
- Internet – korištena tražilica Google i Yahoo

8. Prilozi

8.1. Prilog 1

Shema spoja i krivulje pokusa praznog hoda:



8.2. Prilog 2

Shema spoja i krivulje pokusa kratkog spoja:

