SADRŽAJ

	UVOD	5
1.	OSNOVNA FUNKCIJA TRANSFORMATORA	5
2.	ZADATAK PROJEKTOVANJA	6
3.	OSNOVNE KARAKTERISTIKE I GARANTOVANE VREDNOSTI	8
4.	MAGNETSKO KOLO	
4.1	Dimenzionisanje magnetskog kola	10
4.2	Postupak proračuna magnetskog kola	29
5.	NAMOTAJI	
5.1	Opšti pojmovi	30
5.2	Vrste namotaja	30
5.2.1	Cilindrični slojni namotaj	30
5.2.2	Cilindrični folijski namotaj	35
5.2.3	Kolutni spiralni namotaj	36
5.2.4	Kolutni rušeni namotaj	37
6.	IZOLACIONI SISTEM	
6.1	Stepen izolacije i ispitni naponi	40
6.2	Izolaciona rastojanja, rashladni kanali i konstrukcija	41
6.3	Izbor izolacionih rastojanja	44
7.	DIMENZIONISANJE NAMOTAJA	
7.1	Podaci o provodnicima i izbor provodnika	44
7.2	Određivanje broja navojaka	47
7.3	Izbor vrste namotaja	48
8.	NAMOTAVANJE I POVEZIVANJE NAMOTAJA ZA DOBIJANJE ZADATE SPREGE	
8.1	Opšti pojmovi	52
8.2	Crtanje vektorskih dijagrama	53
8.3	Standardne sprege distributivnih transformatora	55

9.	PRORAČUN KARAKTERISTIČNIH VELIČINA	
9.1	Izračunavanje mase bakra i gubitaka usled opterećenja	58
9.1.1	Izračunavanje Fildovog koeficijenta	58
9.1.2	Izračunavanje otpora namotaja	59
9.2	Izračunavanje napona kratkog spoja	60
9.3	Toplotni proračun transformatora	63
9.3.1	Izračunavanje toplotne vremenske konstante	63
9.3.2	Zagrevanje namotaja	65
9.3.3	Proračun zagrevanja cilindričnih slojnih namotaja	67
9.3.4	Proračun zagrevanja kolutnih namotaja	69
9.4	Proračun dinamičkih naprezanja	70
9.4.1	Proračun radijalnih dinamičkih sila	72
9.4.2	Aksijalne dinamičke sile	76
10.	TRAFO SUD I SISTEM ZA TRANSPORT I PRENOŠENJE	
10.1	Tipovi trafo suda	81
10.1.1	Transformator sa konzervatorom i radijatorima	81
10.1.2	Transformator sa vazdušnim jastukom i bez konzervatora	84
10.1.3	Provera pritiska vazduha kod transformatora sa vazdušnim jastukom	84
10.1.4	Transformator bez konzervatora, hermetički zaptiven	88
10.2	Toplotni proračun trafo suda	90
10.2.1	Izračunavanje zagrevanja trafo suda sa radijatorima	91
10.2.2	Izračunavanje zagrevanja hermetički zaptivenog trafo suda	92
10.2.3	Provera mehaničke elastičnosti valovitog trafo suda	94
11.	IZRAČUNAVANJE MASE I DIMENZIJA TRANSFORMATORA	
11.1	Izračunavanje zapremine ulja	97
11.2	Izračunavanje mase ulja i ukupne mase transformatora	97
11.3	Izračunavanje dimenzija transformatora	98
12.	STEPEN ISKORIŠĆENJA SNAGE I PAD NAPONA	99
13.	REGULACIJA NAPONA	101
14.	OSNOVNI CRTEŽ TROFAZNOG ULJNOG TRANSFORMATORA (MERNA SKICA)	102
15.	PODACI O PRIKLJUČCIMA ULJNIH TRANSFORMATORA	102
16.	SUVI TRANSFORMATORI	
16.1	Opšte karakteristike	104
16.2	Glavne osobine suvih transformatora	106
16.3	Komparativna analiza parametara suvih i uljnih transformatora	107
16.4	Izolacioni sistem	109
16.5	Vrste namotaja i dimenzionisanje	112
16.6.	Motanje namotaja tehnologijom laminiranja	117

16.7 Proračun zagrevanja namotaja 118
16.8 Metodologija proračuna 123
16.9 Izračunavanje mase i dimenzija transformatora 123

17. ISPITIVANJE ENERGETSKIH TRANSFORMATORA 124

18. PREGLED STANDARDA ZA ENERGETSKE TRANSFORMATORE 124

19. METODOLOGIJA PRORAČUNA TRANSFORMATORA 126

20. PRIMERI PRORAČUNA
20.1 Primer iterativnog postupka proračuna trofaznog uljnog transformatora snage 160 kva za dobijanje karakterističnih vrednosti namotaja i magnetskog kola u granicama tolerancije 131
20.2 Primer proračuna trofaznog uljnog transformatora snage 250 kVA 138
20.3 Primer proračuna trafo suda trofaznog uljnog transformatora sa vazdušnim "jastukom" snage 100 kVA 156
20.4 Primer proračuna trofaznog uljnog transformatora snage 8000 kVA 159
20.5 Primer proračuna trofaznog suvog laminiranog transformatora snage 1000 kVA 173
20.6 Primer proračuna monofaznog uljnog transformatora snage 160kVA 186

21. LITERATURA 194

UVOD

Opstanak ljudske civilizacije bi danas bio nezamisliv bez električne energije. Obično, čovek ne vidi elektranu kao mesto proizvodnje električne energije niti visoko-naponske prenosne vodove, ali u svojoj blizini, često u zgradi u kojoj stanuje, vidi i čuje transformator. Zato, transformator dobro nam poznat uređaj u našoj okolini, igra veoma važnu ulogu u našoj egzistenciji.

Još 1831. godine je Majkl Faradej uočio pojavu promene napona na namotaju namotanom preko jednog namotaja, a smešteni na istom gvozdenom jezgru. Pedeset godina kasnije, na međunarodnoj elektrotehničkoj izložbi u Frankfurtu, prezentovana je prednost višefaznog sistema naizmenične struje, pošto je uspešno demonstriran u industrijskim razmerama trofazni sistem, počev od generatora pa preko transformatora do potrošača na niskom naponu."Magični" Teslin pronalazak višefaznog asihronog motora za naizmeničnu struju sa obrtnim magnetnim poljem je tada bio preloman događaj, koji je odredio način prenošenja energije na velike daljine i omogućio povezivanje velikih energetskih sistema. Tada se ostvarila zamisao, da se zahvaljujući naizmeničnoj struji, energija lako može pretvoriti u oblik koji obezbeđuje njeno korišćenje na najekonomičniji način. Odmah mora da se kaže da je u tom tehničkom sistemu ključnu ulogu imao transformator, koji je zahvaljujući ruskim (Dolivo-Dobrovoljski), nemačkim (firme Lahmeyer, Siemens &Halske) i američkim inženjerima (Westinghouse) počeo da se razvija, usavršava i realizuje. Prvi komercijalni transformator u Evropi je proizveden u Mađarskoj u „Ganz"-u i od 1885. godine pa do danas, nema oblasti elektrotehnike gde transformator nije našao primenu.

1. OSNOVNA FUNKCIJA TRANSFORMATORA

TRANSFORMATOR (TR) je statički električni uređaj koji funkcioniše na principu elektromagnetske indukcije i koji transformiše električnu energiju u električnu energiju iste učestanosti, ali sa promenjenim parametrima. On, dakle, ne proizvodi električnu energiju, ali omogućava da se parametri električne energije u proizvodnji, prenosu i distribuciji podešavaju na vrednosti sa kojima se postiže ispunjenje svih tehničkih zahteva na najekonomičniji način. TR jednostavno preobražava električnu energiju jednog oblika u električnu energiju drugog oblika iste frekvencije, pri čemu se ova transformacija obavlja tako da su gubici energije veoma mali, pa je koeficijent iskorišćenja snage TR veliki (preko 98%, za klasu energetskih TR snage $\geq$ 50kVA). TR je u osnovi jednostavna električna mašina, koja se sastoji od dva ili više namotaja, međusobno spregnuta zajedničkim magnetskim fluksom preko magnetskog kola. Kada se jedan od namotaja priključi na naizmenični napon (primarni napon), proizvodi se naizmenični magnetni fluks kojim je obuhvaćen i drugi namotaj u kome se indukuje drugi napon (sekundarni napon), čija vrednost zavisi od broja navojaka i indukovane elektromotorne sile (EMS). Izborom odredjenog broja navojaka primarnog i sekundarnog namotaja postiže se željeni prenosni odnos.

Sa stanovišta primene transformatori se mogu klasifikovati u nekoliko osnovnih grupa:

- Energetski transformatori (generatorski, prenosni-interkonektivni i distributivni)
- Ispravljački (za napajanje jednosmernih kola)
- Za napajanje elektrovučnih vozila
- Za zavarivanje
- Transformatori specijalnih karakteristika u elektronici, telekomunikacijama, energetskim pretvaračima, autotransforamtori, i td.

Različitost TR sa stanovišta njegove primene je posledica različitosti njegovih funkcija, pa se zato razlikuju konstrukcijska rešenja, vrste izolacionog i rashladnog medija (uljni i suvi), ali se kod svih TR rad zasniva na istim fundamentalnim zakonitostima. Poznato je da se pod distributivnim TR podrazumevaju TR snage 50 do 2500 kVA za transformaciju sa 6, 10, 20, 35 kV (u nekim zemljama 11, 22, 33 kV) na napon potrošača 400, 420 V (u nekim zemljama 415, 433V). To su uglavnom trofazni uljni TR, ali u novije vreme suvi TR dobijaju sve više na značaju i postaju alternativa uljnim.

Zahvaljujući generatoru i transformatoru koji su osnovni element elektroenergetskog sistema, već više od 100 godina, uživamo u blagodetima naizmenične struje.

2. ZADATAK PROJEKTOVANJA

PROJEKTOVANJE je jedna od najvažnijih inženjerskih disciplina i predstavlja osnovnu kariku u lancu realizacije jednog uređaja. Svakoj industrijskoj proizvodnji prethodi priprema, koja obuhvata izradu konstrukcijske tehničke dokumentacije, obezbeđenje potrebnog materijala, tehnološku pripremu i mnogo drugih pripremnih radnji. Projekat TR je osnovni dokument tehničke dokumentacije, što je zadatak projektanta. Projektrovanje i izrada distributivnih TR danas uglavnom predstavlja uhodan proces, diktiran prvenstveno proizvodnim uslovima u kojima dominira raspoloživost materijalima, a takođe i zahtevima kupaca, posebno onih najvećih, odnosno distributivnih preduzeća. Izrada proračuna i tehničke dokumentacije se danas obavlja kompjuterskom obradom, pa je vreme izrade mnogostruko skraćeno.

Zadatak projektanta je da proračunom postigne optimalno tehničko rešenje, tj. ono koje će dati najekonomičniji TR u eksploataciji, a najjeftiniji za proizvodnju uz ispunjenje svih zadatih tehničkih uslova. Osnovne zahtevane veličine TR, proistekle iz karakteristika elektroenergetskog sistema su: nominalana snaga, nominalni naponski odnos (odnos transformacije), napon kratkog spoja, gubici praznog hoda i gubici usled opterećenja. Osnovne veličine TR vezane za proizvodnju su: tehnologija izrade i količine osnovnih materijala bakra, trafo lima i trafo ulja. Iznalaženje optimalnog rešenja je često složen i dugotrajan posao, jer je pojam niskih troškova sa stanovišta kupca (što manji gubici) suprotan od pojma niskih troškova sa stanovišta proizvođača (što manje težine). Problem koji se javlja pri proračunu zadatog TR je postojanje velikog broja mogućnosti izbora električnih i geometrijskih veličina koje definišu TR, pri čemu je međuzavisnost ovih veličina mnogostruka i nelinearna. Ona je uslovljena velikim brojem ograničenja (gubici, izolaciona rastojanja, napon kratkog spoja, zagrevanje namotaja, mogućnost nabavke

određenih materijala i td.), pri čemu željena promena jednog parametra izaziva neželjenu promenu drugih. Što je TR dimenzionalno manji i težinski lakši, a time i jeftiniji za proizvodnju, to se materijali specifično više opterećuju i gubici se povećavaju, što ne odgovara zahtevima kupca. Sa druge strane smanjenje gubitaka zahteva povećanje mase osnovnih materijala, koji se specifično manje opterećuju, pa su takvi TR za kupca povoljniji, a za proizvođača skuplji. Dalje, promena napona kratkog spoja (u_k) dovodi do promene dimenzija, težina i gubitaka, pa je za manju vrednost u_k, TR viši i uži, a za veću vrednost u_k, niži i širi. Dakle, za istu nominalnu snagu, naponski nivo i gubitke mogu da postoje različiti tehnički uslovi (na primer različiti u_k), koji zahtevaju različite vrednosti u pogledu utroška materijala i dimenzija, što se može videti na primeru TR snage 160 kVa za različite napone kratkog spoja, tabela 2.1. Međutim, za zadate osnovne karakteristike TR i garantovane vrednosti gubitaka, napona kratkog spoja i težina samo jedno rešenje predstavlja najjeftiniji TR za proizvodnju. Zadatak projektanta je upravo nalaženje parametara za ovakav TR, što često nije lako postići. U svim inženjerskim problemima od osnovnog značaja je iznalaženje takvog optimalnog rešenja, koje među svim zadovoljavajućim rešenjima najbolje odgovara nekom postavljenom kriterijumu, odnosno u najboljoj meri ispunjava suprotstavljene interese proizvođača i korisnika.

Tabela 2.1 Uporedni tehnički podaci za transformator sa različitim naponima kratkog spoja

OSNOVNI TEHNIČKI PODACI

Nominalna snaga	S_n	kVA	160	
Nominalni naponi	U_1/U_{20}	kV	10/0,42	
Nominalna struja	I_1/I_2	A	9,24/(127)220	
Regulacija		%	± 5	
Sprega			Yd5	
Gubici u gvožđu i u kratkom spoju	P_{Fe}/P_k	W	460/2350	
Napon kratkog spoja	u_k	%	4	6

PODACI O MAGNETSKOM KOLU

Indukcija / Presek jezgra	B_m/S_{Fe}	T/cm^2	1,67 / 153	1,67 / 145
Elektromotorna sila	E_t	V/nav.	5,67	5,38
Dimenzije jezgra	D/L/H	mm	147 / 690 / 329	143 / 734 / 302
Masa i gubici u gvožđu	m_{Fe}/P_{Fe}	kg/W	227 / 454	263 / 431

PODACI O NAMOTAJIMA

Broj navojaka NN	N_2	nav.	74	78
Dimenzije žice	p x q	mm	7,2 x 6,3/0,4	6 x 8/0,4
Dimenzije namotaja	a_2 / h_2	mm	14 / 289	21 / 256
Masa i gubici u kratkom spoju	m_{Cu2}/P_{k2}	kg/W	48 / 970	55 / 1060
Broj navojaka VN	N_1	nav.	1068	1126
Dimenzije žice	p x q	mm	∅ 2,1	∅ 2,2
Dimenzije namotaja	a_1 / h_1	mm	27 / 269	32 / 242
Masa i gubici u kratkom spoju	m_{Cu1}/P_{k1}	kg/W	74 / 1230	91 / 1272

Tabela 3.2 Tehnički podaci za trofazne uljne distributivne transformatore

Nom. snaga	Nominalni naponi		Sprega	Regulacija	Gubici		Nap. krat. spoja	Dimenzije			Mase		Buka
S_n	U_1	U_{20}			P_{Fe}	P_k	u_k	A	B	C	m_u	m_{ul}	L_{WA}
kVA	kV			%	W		%	mm			kg		dB
50	10	0,42 0,4	Yzn5	±2 x 2,5	190 (125)	1100 (875)	4	820	560	1170	95	420	55
	20							890	610	1330	125	460	
100	10				320 (210)	1750 (1475)		910	660	1330	160	490	59
	20							970	660	1470	170	740	
160	10				460 (300)	2350 (2000)		1140	650	1340	160	870	62
	20							1060	710	1450	210	980	
250	10		Dyn5		650 (425)	3250 (2750)		1350	800	1430	230	1100	65
	20							1400	740	1600	270	1460	
400	10				930 (610)	4600 (3850)		1480	850	1620	290	1700	68
	20							1540	800	1700	330	1790	
630	10				1300 (860)	6500 (5400)		1730	890	1700	340	2100	70
	20							1730	890	1820	420	2500	
1000	10				1700 (1100)	10500 (9500)	6	2050	1120	2000	470	3200	72
	20							2050	1100	2140	570	3600	
1600	10				2600	15000		2390	1500	2050	690	4000	74
	20							2390	1470	2180	860	4400	

4. MAGNETSKO KOLO

4.1 Dimenzionisanje magnetskog kola

Poznato je da u osnovi rada TR leži pojava elektromgnetske indukcije, odnosno da se u sekundarnom namotaju indukuje EMS, ako se na primarni namotaj dovede naizmenični napon. Indukovana EMS u navojku proporcionalna je brzini promene magnetskog fluksa obuhvaćenog tim navojkom i iznosi:

$$E_J = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot B_m \cdot S_{Fe} = 222 \cdot B_m \cdot S_{Fe} \cdot 10^{-4} \; (V/nav) \qquad 4.1$$

gde je: $B_m\,(T)$, $S_{Fe}(cm^2)$, $f = 50Hz$

Ovo je prva jednačina TR koja pokazuje da je EMS srazmerna sa frekvencijom, maksimalnom vrednošću magnetske indukcije i površinom preseka stuba magnetskog kola. Koristeći zakon o održanju energije i činjenicu da je EMS u bilo kom navojku primara ili sekundara ista zbog približno istog obuhvaćenog fluksa, kod idealnog transformatora (bez gubitaka) dobijaju se jednačine, koje predstavljaju osnovne zakonitosti rada TR i to:

za naponsku ravnotežu $U_1 \cdot N_2 = U_{20} \cdot N_1 \rightarrow \frac{U_1}{U_{20}} = \frac{N_1}{N_2}$ 4.2

za ravnotežu struja (iz zakona o održanju energije) $U_1 \cdot I_1 = U_{20} \cdot I_2 \rightarrow \frac{U_1}{U_{20}} = \frac{I_2}{I_1}$ 4.3

za ravnotežu magnetopobudnih sila $N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2 \rightarrow \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$ 4.4

Jednačina 4.2 pokazuje da TR menja napon prema odnosu broja navojaka. Vrednosti odnosa napona $k = \frac{U_1}{U_{20}}$ (odnos transformacije) i odnosa navojaka $n = \frac{N_1}{N_2}$ (prenosni odnos) nisu jednake, ali su veoma bliske, pa greška koja se javlja u prenosnom odnosu $\delta\,(\%)$ mora da zadovolji dozvoljenu toleranciju. Greška δ definisana izrazom 4.5 se proverava merenjem pri ispitivanju TR u svim položajima regulacije napona. Proverava se i računskim putem:

$$\delta(\%) = \frac{n-k}{k} \cdot 100 \qquad 4.5$$

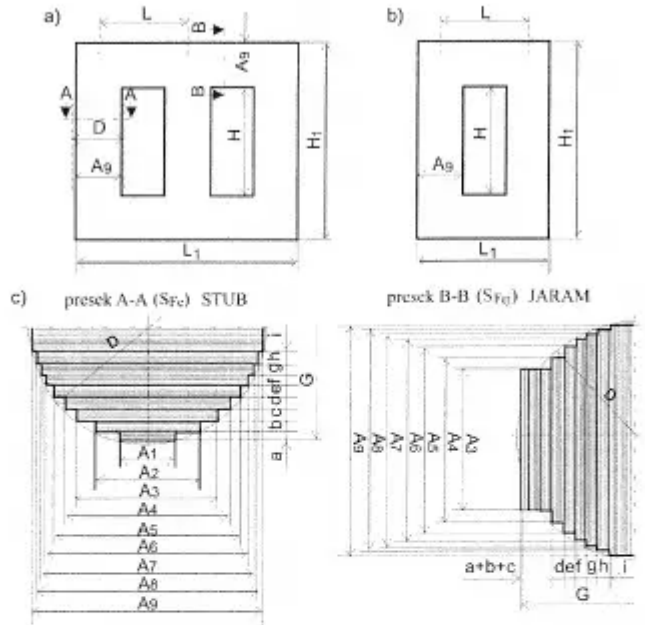
Primer: **Trofazni uljni TR naponskog odnosa u praznom hodu 10/04 kV, sprege Dyn5 ima brojeve navojaka faznih namotaja primara 823 i sekundara 19.**

Greška prenosnog odnosa je:

$$k = \frac{10 \cdot \sqrt{3}}{0{,}4} = 43{,}301 \qquad n = \frac{823}{19} = 43{,}315$$

$$\delta = \frac{43{,}315 - 43{,}301}{43{,}301} \cdot 100 = 0{,}032\% < 0{,}5\%$$

Kod trofaznih energetskih TR (suvih ili uljnih) primenjuje se stubno magnetsko kolo, koje se najčešće sastoji od 3 stuba stepenastog poprečnog preseka povezanih sa gornjim i donjim jarmom, takođe stepenastog poprečnog preseka, slika 4.1.a, pri čemu broj stepenica raste sa snagom TR. Kod monofaznih energetskih TR primenjuje se magnetsko kolo koje se sastoji od dva stuba stepenastog poprečnog preseka i povezanih sa gornjim i donjim jarmom, slika 4.1.b.



Slika 4.1 Magnetsko kolo sa uobičajenim stepenastim presekom stuba i jarma
a) osnovne dimenzije trostubnog magnetskog kola;
b) osnovne dimenzije dvostubnog magnetskog kola;
c) stepenasti oblik stuba i jarma

Osnovne veličine koje definišu magnetsko kolo su:
- efektivna površina poprečnog preseka stuba i jarma ..... S_{Fe} i S_{Fe} (cm^2)
- prečnik opisanog kruga oko preseka stuba ili jarma..... D (mm)
- osno rastojanje stubova ..... L (mm)
- visina stuba ili "prozora" magnetskog kola..... H (mm)

Poznato je iz teorije TR da su glavne dimenzije magnetskog kola: S_{Fe}, D, L i H i da direktno zavise od snage TR preko empirijskih relacija, datih u izrazima 4.6. Brojne vrednosti koeficijenata srazmernosti ili dimenzionih koeficijenata nisu jednoznačne vrednosti, jer osim od snage, napona i broja faza zavise i od gubitaka i u_k. Oni su ustanovljeni kao rezultat optimalne konstrukcije proizvedenih TR snage 50 do 8000 kVA,

napona 10, 20, 35 kV, raznih proizvođača. Brojne vrednosti koeficijenata K_{SFe}, K_D, K_L, K_H za trofazne i monofazne uljne TR, kao i za trofazne suve TR dati su u tabeli 4.1.

$$S_{Fe}\left(cm^2\right) = K_{SFe}\cdot\sqrt{\frac{S_n}{3}} \qquad L\ (mm) = K_L\cdot D$$
$$D\ (mm) = K_D\cdot\sqrt{S_{Fe}} \qquad H\ (mm) = K_H\cdot D \qquad 4.6$$

Tabela 4.1 Dimenzioni koeficijenti magnetskog kola

	Trofazni uljni TR	Monofazni uljni TR	Trofazni suvi TR
K_{SFe}	17 ÷ 25	22 ÷ 30	20 ÷ 28
K_D	11,8 ÷ 12,5	11,8 ÷ 12,5	11,8 ÷ 12,5
K_L	1,7 ÷ 2,3	1,7 ÷ 2,2	2,1 ÷ 2,5
K_H	2,2 ÷ 3,4	1,8 ÷ 2,9	3,5 ÷ 4,5

Presek jezgra definišu sledeće veličine:
- površina kruga opisanog oko preseka stuba (jarma), prečnika D..... S_D (cm^2)
- geometrijska površina preseka stuba (jarma)..... S (cm^2)
- čista površina gvozđa preseka stuba (jarma)..... S_{Fe} (S_{Fe}) (cm^2)
- koeficijent ispune gvozđa..... $K_{Fe} = S_{Fe}/S = 0,96 \div 0,98$
- koeficijent ispune kruga ..... $K_d = S_{Fe}/S_D = 0,92 \div 0,94$

Za magnetsko kolo se uvek vezuju režim praznog hoda i gubici u gvozđu. PRAZAN HOD je režim rada TR u kome je na primarni namotaj priključen nominalni napon, a sekundarni namotaj je bez opterećenja. Prividnu snagu, koju tada TR uzima iz mreže (S_0), čine aktivna snaga (P_{Fe}), koja se pretvara u toplotu zagrevajući magnetsko kolo i kojoj odgovara aktivna komponenta struje (I_a), i reaktivna snaga (Q_μ) za stvaranje naizmeničnog magnetskog polja ili magnećenja jezgra i kojoj odgovara reaktivna komponenta struje ili struja magnećenja (I_μ). Struja praznog hoda koju meri instrument u ogledu praznog hoda je vektorski zbir ove dve komponente, a prividna snaga praznog hoda je vektorski zbir navedene dve snage , pa je:

$$I_0 = \sqrt{I_a^2 + I_\mu^2} \qquad S_0 = \sqrt{P_{Fe}^2 + Q_\mu^2}$$

Gubitke u praznom hodu čine gubici usled histerezisa (P_H) i gubici usled vihornih struja (P_V) i oni se izračunavaju prema poznatom obrascu iz teorije TR:

$$P_{Fe} = P_H + P_V = \eta\cdot f\cdot m_{Fe}\cdot B_m^n + \sigma\cdot f^2\cdot m_{Fe}\cdot B_m^2$$

gde je: η - Štajnmecov koeficijent histerezisa, koji zavisi od kvaliteta lima
σ - koeficijent vihornih struja, koji zavisi od debljine lima i električnih osobina lima
n – varira najčešće od 1,7 do 2,2, a u pojednostavljenim proračunima se uzima 2, pa je:

$$P_{Fe} = m_{Fe} \cdot B_m^2 \cdot \left(\mu \cdot f + \sigma \cdot f^2\right) = m_{Fe} \cdot B_m^2 \cdot p_{Fel} = m_{Fe} \cdot p_{Fe}$$

$$\sigma = \frac{1{,}64}{\gamma_{Fe}} \cdot \frac{d^2}{\rho_{Fe}} \qquad p_{Fel} = \mu \cdot f + \sigma \cdot f^2 \qquad p_{Fe} = p_{Fel} \cdot B_m^2$$

gde je:

- $d\ (mm)$ – debljina lima
- $\gamma_{Fe}\ (kg/dm^3) = 7{,}65$ – specifična masa trafo lima, koja je zbog izolacije manja od specifične mase gvožđa
- $\rho_{Fe}\ (\Omega mm^2/m)$ – specifični električni otpor lima
- $p_{Fel}\ (W/kg)$ – specifični jedinični gubici snage za $1kg$ mase pri $50Hz$ i indukciji od $1T$
- $p_{Fe}\ (W/kg)$ – specifični aktivni gubici snage pri maksimalnoj indukciji Bm

Struja praznog hoda se izračunava pomoću reaktivne snage magnećenja (Q_μ).

$$I_0(\%) = \frac{Q_\mu}{S_n} \cdot 100$$

Za izračunavanje reaktivne snage magnećenja koristi se empirijski obrazac:

$$Q_\mu(VAr) = m_{Fe} \cdot q_{Fe} + 440 \cdot B_m \cdot E_l$$

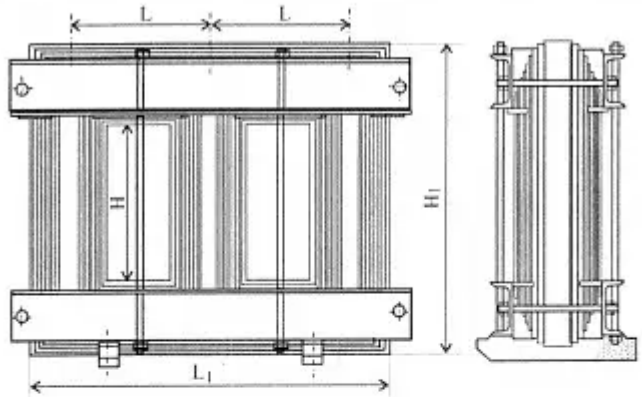
gde je $q_{Fe}\ (VA/kg)$ - specifična reaktivna snaga magnećenja

Da bi struja magnećenja i gubici u gvožđu bili što manji, potrebno je upotrebiti što tanji i kvalitetniji trafo lim sa što većom magnetskom provodnošću i sa što manjim specifičnim gubicima. Kosim sečenjem i slaganjem limova na sastavcima stubova i jarmova pod uglom od 45° postižu se manji gubici, zbog efektivnog smanjenja vazdušnog zazora. Upotrebom tanjih limova gubici usled vihornih struja se smanjuju po kvadratnom zakonu.

Faktori koji utiču na gubitke u gvožđu su:

- kvalitet sečenja lima (treba da ima čiste ivice, bez pucni),
- način sečenja i slaganja lima (pravo ili koso),
- veličina preklopa (4÷6) mm,
- "building" faktor, odnosno koeficijent dodatnih gubitaka (k_d), koji uzima u obzir povećanje gubitaka usled mehaničke obrade lima.

Na slici 4.2 je prikazan jedan sklop trofaznog magnetskog kola sa pripadajućim gvozdenim delovima za stezanje.



Slika 4.2 Sklop magnetskog kola

U tabeli 4.2 su dati specifični gubici za karakteristične indukcije 1,5 i 1,7 T za nekoliko najčešće korišćenih vrsta trafo lima, debljine 0,3 ili 0,27 mm. Trafo lim se izrađuje od hladno valjanog čeličnog lima legiranog sa malom primesom silicijuma (oko 3 %) i orijentisane kristalne strukture (orient core) u novije vreme super orijentisane kristalne strukture (orient-core HI-B) i još laserom obrađene površine (orient core HI-B laser).

Tabela 4.2 Specifični aktivni gubici i specifična reaktivna snaga magnećenja za 50 Hz

Proizvođač	Vrsta lima	p_{Fe} (W/kg)		q_{Fe} (VA/kg)		$\rho(\mu\Omega \cdot cm)$	Kvalitet lima
		1,5 T	1,7 T	1,5 T	1,7 T		
TERNI ARMCO	M5T30	0,90	1,30	1,20	3,40	48	orient core
	M4T27	0,85	1,25	1,10	2,80		
„NIPPON STEEL"	M – 1H 0,30	0,82	1,08	0,90	1,60	45	orient core H-B
	M – 0H 0,30	0,78	1,04	0,85	1,30		
	ZDKH 0,30	0,72	0,98				or. c. H-B laser

Na dijagramima slika 4.3 do 4.11 dati su podaci za specifične aktivne snage gubitaka i specifične reaktivne snage za limove koji su danas najčešće u upotrebi: M5T30, M4T27, M-1H, M-OH, ZDKH-023.

$$P_{Fe} = m_{Fe} \cdot B_m^2 \cdot \left(\mu \cdot f + \sigma \cdot f^2\right) = m_{Fe} \cdot B_m^2 \cdot p_{Fel} = m_{Fe} \cdot p_{Fe}$$

$$\sigma = \frac{1{,}64}{\gamma_{Fe}} \cdot \frac{d^2}{\rho_{Fe}} \qquad p_{Fel} = \mu \cdot f + \sigma \cdot f^2 \qquad p_{Fe} = p_{Fel} \cdot B_m^2$$

gde je:

- $d\ (mm)$ – debljina lima
- $\gamma_{Fe}\ (kg/dm^3) = 7{,}65$ – specifična masa trafo lima, koja je zbog izolacije manja od specifične mase gvožđa
- $\rho_{Fe}\ (\Omega\, mm^2/m)$ – specifični električni otpor lima
- $p_{Fe1}\ (W/kg)$ – specifični jedinični gubici snage za $1kg$ mase pri $50Hz$ i indukciji od $1T$
- $p_{Fe}\ (W/kg)$ – specifični aktivni gubici snage pri maksimalnoj indukciji Bm

Struja praznog hoda se izračunava pomoću reaktivne snage magnećenja (Q_μ).

$$I_0(\%) = \frac{Q_\mu}{S_n} \cdot 100$$

Za izračunavanje reaktivne snage magnećenja koristi se empirijski obrazac:

$$Q_\mu(VAr) = m_{Fe} \cdot q_{Fe} + 440 \cdot B_m \cdot E_j$$

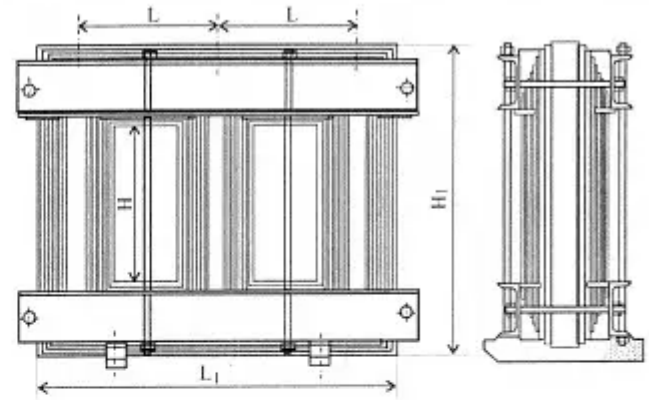
gde je $q_{Fe}\ (VA/kg)$ - specifična reaktivna snaga magnećenja

Da bi struja magnećenja i gubici u gvožđu bili što manji, potrebno je upotrebiti što tanji i kvalitetniji trafo lim sa što većom magnetskom provodnošću i sa što manjim specifičnim gubicima. Kosim sečenjem i slaganjem limova na sastavcima stubova i jarmova pod uglom od 45° postižu se manji gubici, zbog efektivnog smanjenja vazdušnog zazora. Upotrebom tanjih limova gubici usled vihornih struja se smanjuju po kvadratnom zakonu.

Faktori koji utiču na gubitke u gvožđu su:

- kvalitet sečenja lima (treba da ima čiste ivice, bez pucni),
- način sečenja i slaganja lima (pravo ili koso),
- veličina preklopa (4÷6) mm,
- "building" faktor, odnosno koeficijent dodatnih gubitaka (k_d), koji uzima u obzir povećanje gubitaka usled mehaničke obrade lima.

Na slici 4.2 je prikazan jedan sklop trofaznog magnetskog kola sa pripadajućim gvozdenim delovima za stezanje.



Slika 4.2 Sklop magnetskog kola

U tabeli 4.2 su dati specifični gubici za karakteristične indukcije 1,5 i 1,7 T za nekoliko najčešće korišćenih vrsta trafo lima, debljine 0,3 ili 0,27 mm. Trafo lim se izrađuje od hladno valjanog čeličnog lima legiranog sa malom primesom silicijuma (oko 3 %) i orijentisane kristalne strukture (orient core) u novije vreme super orijentisane kristalne strukture (orient-core HI-B) i još laserom obrađene površine (orient core HI-B laser).

Tabela 4.2 Specifični aktivni gubici i specifična reaktivna snaga magnećenja za 50 Hz

Proizvođač	Vrsta lima	p_{Fe} (W/kg)		q_{Fe} (VA/kg)		$\rho(\mu\Omega \cdot cm)$	Kvalitet lima
		1,5 T	1,7 T	1,5 T	1,7 T		
TERNI ARMCO	M5T30	0,90	1,30	1,20	3,40	48	orient core
	M4T27	0,85	1,25	1,10	2,80		
„NIPPON STEEL"	M – 1H 0,30	0,82	1,08	0,90	1,60	45	orient core H-B
	M – 0H 0,30	0,78	1,04	0,85	1,30		
	ZDKH 0,30	0,72	0,98				or. c. H-B laser

Na dijagramima slika 4.3 do 4.11 dati su podaci za specifične aktivne snage gubitaka i specifične reaktivne snage za limove koji su danas najčešće u upotrebi: M5T30, M4T27, M-1H, M-OH, ZDKH-023.