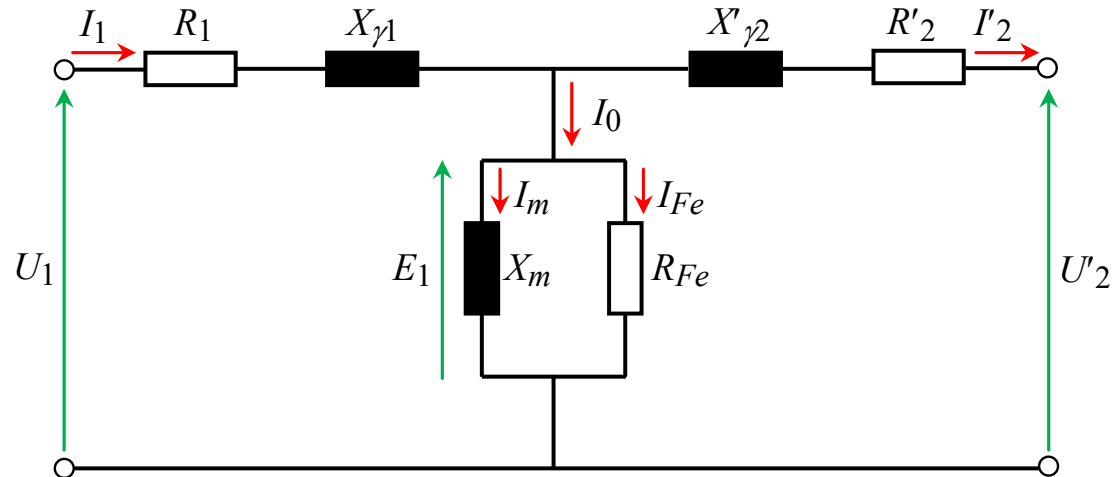
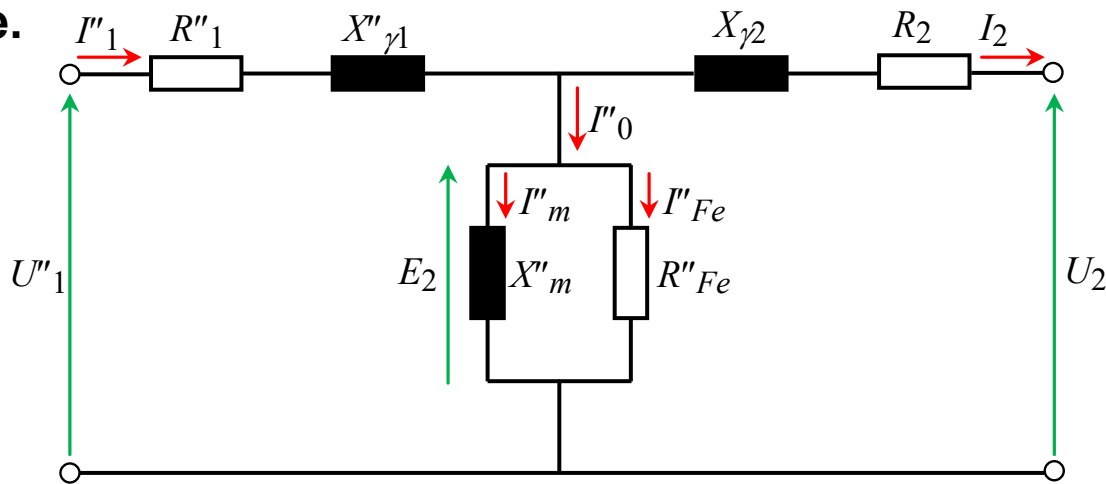


4.7. EKVIVALENTNA ŠEMA TRANSFORMATORA



Sekundar sveden na primar. Šema TR pogodna za proučavanje pojava sa primarne strane.

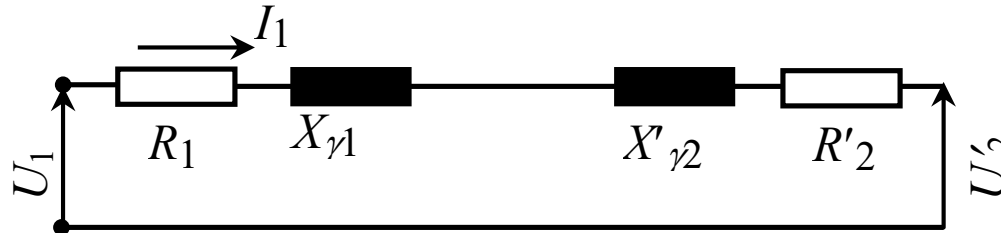


Primar sveden na sekundar. Šema TR pogodna za proučavanje pojava sa sekundarne strane.

Ovo su T-ekv. šeme TR i one verno prikazuju naponske i strujne prilike u TR u opsegu 5÷500Hz.

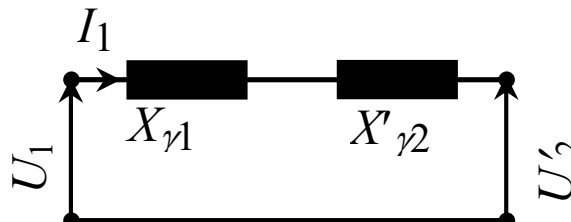
4.7. UPROŠĆENE EKVIVALENTNE ŠEME TRANSFORMATORA

Tipično su parametri otočne (poprečne) grane za jedan do dva reda veličine veći od parametara redne grane. Zbog toga se u mnogobrojnim proračunima zanemaruje grana magnećenja a transformator modeluje samo sa rednom granom.



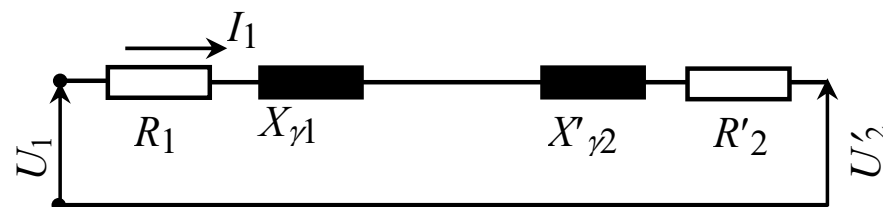
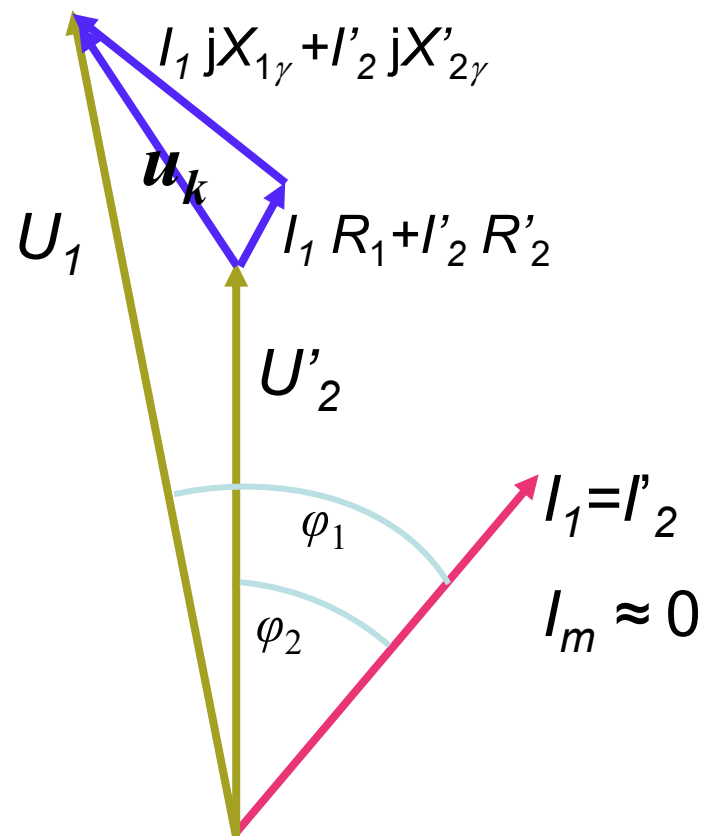
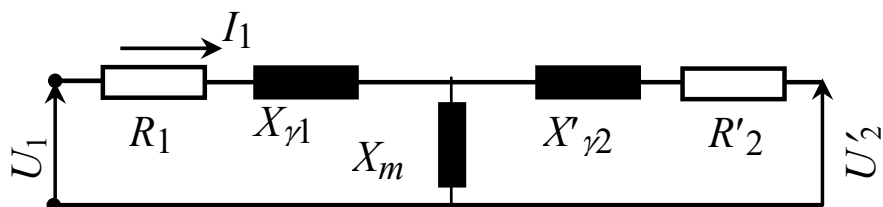
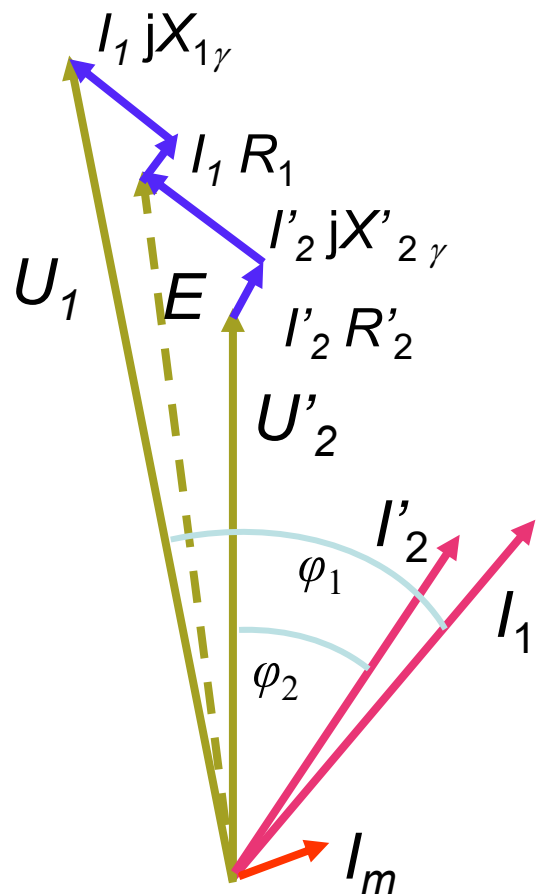
Ekvivalentna šema TR sa zanemarenom granom magnećenja.

Omske otpornost podužne grane su mnogo manje u odnosu na reaktanse rasipanja pa se one mogu zanemariti. U većini proračuna tokova snaga i struja kratkih spojeva u EES ekvivalentna šema transformatora se svodi samo na rednu vezu rasipnih induktivnosti.



Ekvivalentna šema TR za proračun struja kratkih spojeva u EES.

4.7.5 Fazorski dijagram opterećenog TR za T-ekv. šemu.



4.7.3 + 4.7.3.1 OGLED PRAZNOG HODA

Prazan hod transformatora nastaje kada je jedan namotaj neopterećen, a TR je magnetno pobuđen. U ph. TR se ponaša kao prigušnica na gvozdenom jezgru priključena na naizmenični napon.

Struja ph. I_0 može se razložiti na I_{Fe} i I_m . Kako je I_{Fe} manje od $0,1 \cdot I_m$ to se merenjem I_0 može proceniti kvalitet slaganja limova i izrade magnetnog kola.

Ogled ph. se izvodi sa otvorenim jednim namotajem i nominalnim naponom na drugom namotaju. Sprovodi se zbog određivanja k-ka i kvaliteta transformatora. Na osnovu podataka izmerenih u ph. određuje se i proverava: 1. odnos transformacije, 2. gubici u gvožđu TR.

$$m_T = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2}$$

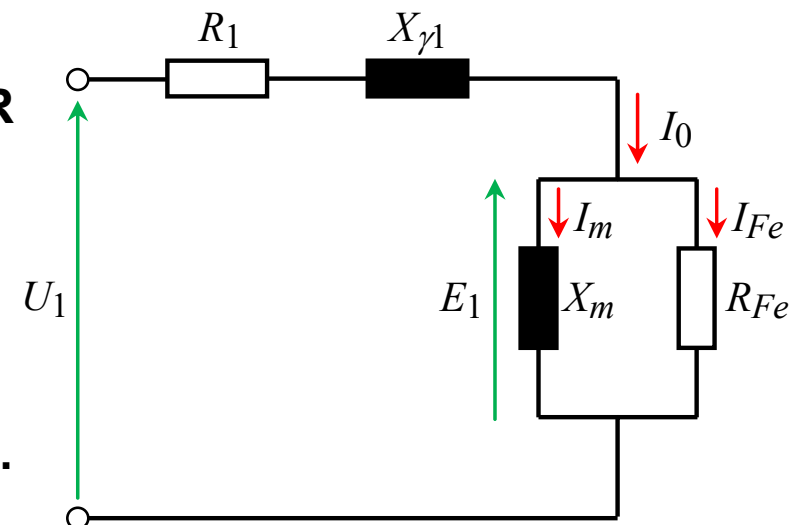
$$P_0 = P_{Cu0} + P_{Fe} \approx P_{Fe}$$

Iz snage koju uzima transformator u praznom hodu pri nom. naponu napajanja dobijamo nominalne gubitke u gvožđu.

Ogled ph. je sastavni deo ispitivanja svakog TR i uobičajeno se primenjuje sa nižeg napona.

Tokom ogleda praznog hoda **meri se**:

- Napon napajanja $U_0 \approx U_n$.
- Struja primara I_0 – struja ph. I_0 ($0,2 \div 3\% I_n$).
- Snaga uzeta iz mreže P_0 – snaga praznog hoda.



4.7.3.1 OGLED PRAZNOG HODA

Iz izmerenih veličina u ogledu ph. može se doći do parametara ekv. kola:

Impedansa i faktor snage praznog hoda: $Z_0 = \frac{U_0}{I_0}$ $\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_0 I_0}$

Otpornost u otočnoj grani: $R_{Fe} = \frac{3U_0^2}{P_0} = \frac{Z_0}{\cos \varphi_0}$

Reaktansa magnećenja: $X_m = \frac{Z_0}{\sin \varphi_0}$

Za ocenu kvaliteta magnetnog kola TR karakt. podaci su relativna struja ph. i_0 i faktor snage praznog hoda $\cos \varphi_0$.

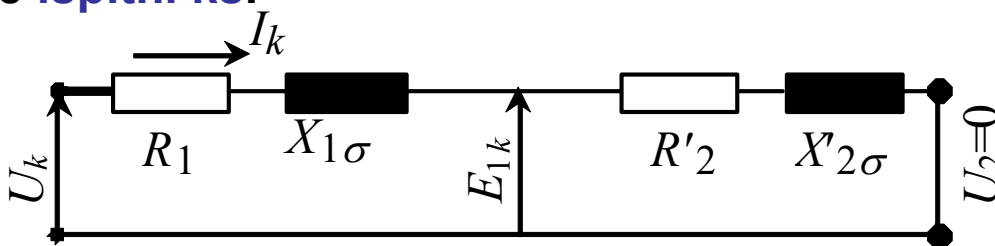
$$i_0 = \frac{I_0}{I_n} \cdot 100 \quad [\%]$$

Mali jednofazni transformatori			Trofazni transformatori		
S_n [VA]	i_0 [%]	$\cos \varphi_0$	S_n [kVA]	i_0 [%]	$\cos \varphi_0$
25	22	0,28÷0,35	10	3	0,35÷0,4
100	17		50	1,5	
250	15		100	0,8	
500	14		1000	0,5	
1000	13		10000	0,3	
2000	11		100000	0,21	
4000	8		300000	0,18	

4.7.3.2 OGLED KRATKOG SPOJA

Kratak spoj je režim rada u kome je jedan namotaj kratko spojen. U slučaju da ks. nastaje kada je primarni namotaj priključen na U_n govori se o **havarijskom ks.** Struje u namotajima tada iznose $10 \div 20 \times I_n$. Ovolike struje dovode do povećanih mehaničkih i termičkih naprezanja TR.

Drugi slučaj ks. javlja se prilikom njegovog ispitivanja. Tada se na primarnu stranu dovodi sniženi napon U_k pri kome se u TR uspostavlja I_n . Napon kratkog spoja potreban za nominalnu struju je $U_k = 2 \div 10\% U_n$. Ovaj slučaj ks. se zove **ispitni ks.**



$$u_k = \frac{U_k}{U_n} 100 \quad [\%]$$

Kako je napon napajanja tokom izvođenja ogleda ks. veoma mali to će indukcija koja je direktno proporcionalna naponu biti veoma mala pa će i struja magnećenja i gubici u gvožđu biti mali. Zbog toga se u ekvivalentnom kolu TR za ks. može izostaviti poprečna grana. Magnetni fluks koji nastaje zbog proticanja struje I_1 kroz primarni namotaj je rasipni fluks i zatvara se najvećim delom kroz primarni namotaj. Isto važi i za fluks koji nastaje zbog sekundarne struje. U režimu ks. dominantni su fluksevi rasipanja primarnog i sekundarnog namotaja.

4.7.3.2 OGLED KRATKOG SPOJA

Ogled kratkog spoja TR se sprovodi posle njegove izrade ili remonta. Meri se:

- **Napon napajanja** (napon kratkog spoja) U_k (2-10% U_n).
- **Struja kratkog spoja** I_k .
- **Snaga uzeta iz mreže** P_k tokom kratkog spoja, što pri nominalnoj struji predstavlja nominalne gubitke transformatora u bakru.

Ogled se izvodi sa one strane sa koje je lakše obezbediti napajanje i mernu instrumentaciju. Iz ogleda ks. se određuju i k-čni parametri TR: u_k , u_x , u_r , i

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3}U_k I_k}$$

Mali jednofazni transformatori			Trofazni transformatori		
S_n [VA]	u_k [%]	$\cos \varphi_k$	S_n [kVA]	u_k [%]	$\cos \varphi_k$
25	15,5	0,96	10	3	0,66
125	7,5	0,93	50	3,5	0,43
250	6,2	0,89	100	4	0,30
500	4,4	0,83	1000	6	0,14
1000	2,6	0,77	10000	8	0,06
2000	2,4	0,54	100000	13	0,025
4000	2,2	0,43	300000	17	0,013

4.7.3.2 OGLED KRATKOG SPOJA

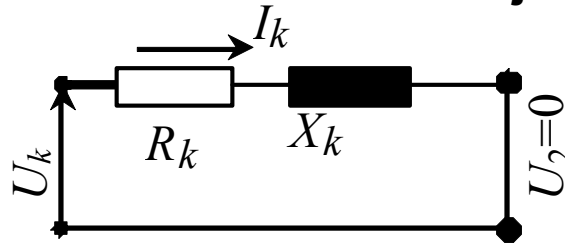
Pomoću ovog ogleda se određuju parametri ekvivalentne šeme – redna grana.

Izračunava se impedansa kratkog spoja: $Z_k = \frac{U_k}{I_k} = \frac{U_{kn}}{I_{kn}}$

Aktivna otpornost kratkog spoja: $R_k = \frac{P_k}{3I_k^2}$

Reaktansa kratkog spoja: $X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}$

Na osnovu ekvivalentne šeme važi da je: $R_1 + R'_2 = R_k$ $X_{\gamma 1} + X'_{\gamma 2} = X_k$



Može se pretpostaviti da je: $X_{\gamma 1} = X'_{\gamma 2} = \frac{X_k}{2}$ jer se geometrijske mere namotaja bitno ne razlikuju, a namotaji su u istoj magnetnoj sredini.

Može se pokazati da je: $R_1 = R'_2 = \frac{R_k}{2}$

Dokaz. Ako je gustina J struje primara i sekundara ista tada je iz:

$$N_1 i_1 = N_2 i_2 \quad N_1 \cdot J \cdot S_1 = N_2 \cdot J \cdot S_2$$

Gde su S_1 i S_2 površine poprečnih preseka provodnika primara i sekundara.

Ako su l_1 i l_2 približno isti:

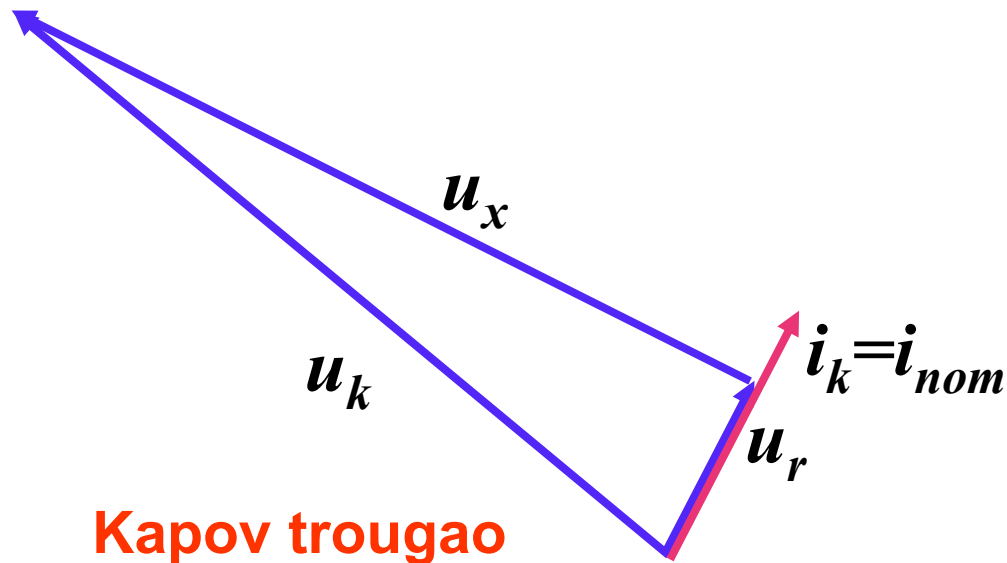
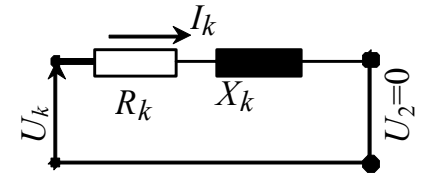
$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{N_1 \rho l_1}{S_1} \frac{S_2}{N_2 \rho l_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2$$

$$R_1 = R_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 = R'_2$$

$$P_{Cu1} = P_{Cu2}$$

KRATAK SPOJ - KAPOV TROUGAO

Kako je napon na sekundarnim stezaljkama nula to se sav napon troši na padove napona. Fazorski dijagram struja i napona TR tokom kratkog spoja. Trougao napona na ovom dijagramu predstavlja Kapov trougao, dužine njegovih stranica bitne su za proračune i eksploataciju transformatora.



Kapov trougao

$$\underline{U}_k = (R_k + jX_k)\underline{I}_k$$

$$u_k = \frac{U_k}{U_n} = \frac{Z_k I_n}{U_n}$$

$$u_r = \frac{R_k I_n}{U_n} = \frac{P_k}{S_n}$$

$$u_x = \frac{X_k I_n}{U_n} = \sqrt{u_k^2 - u_r^2}$$

NAPOMENA. Ovaj fazorski dijagram i račun je dat pri struji kratkog spoja I_{nom} ali se može prikazati i pri bilo kom U_k i odgovarajućoj struji.

$$u_k(\%) = 100u_k = 100 \frac{U_k}{U_n} = 100 \frac{Z_k I_n}{U_n} = z_k[\%]$$

$$u_k(\%) = z_k(\%)$$

KAPOV TROUGAO-Razlike u parametrima malih i velikih transformatora

Mali transformator

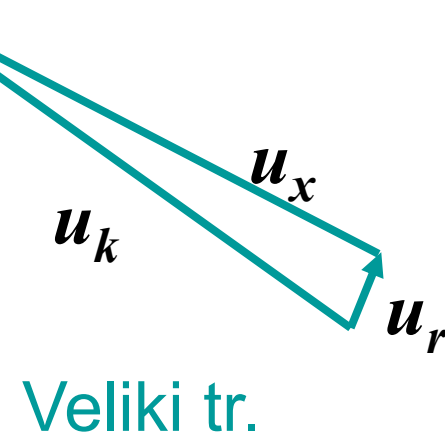
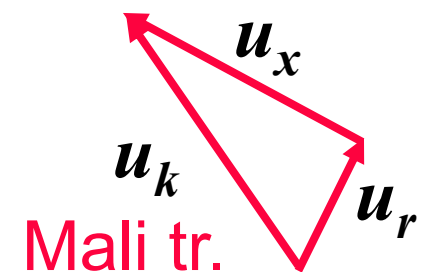
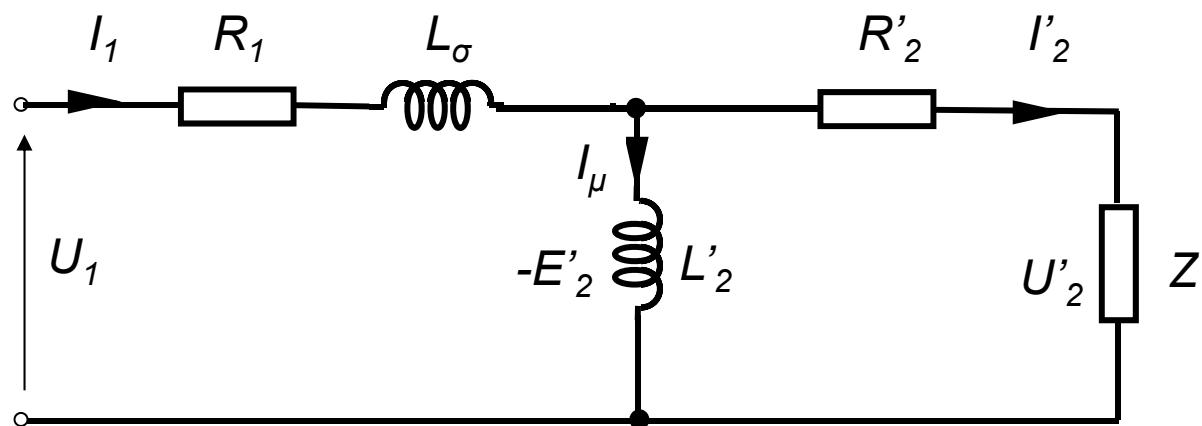
$$R_1 \approx R'_2 = 1 \%$$

$$X_\sigma = L_\sigma = 5 \%$$

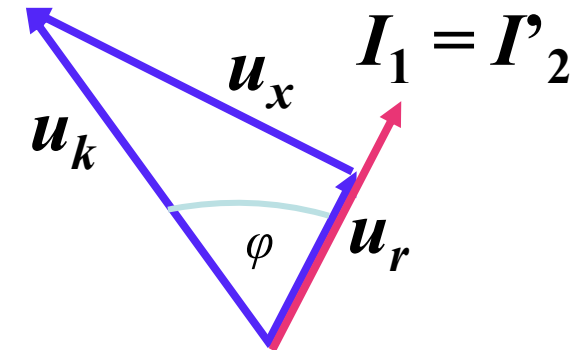
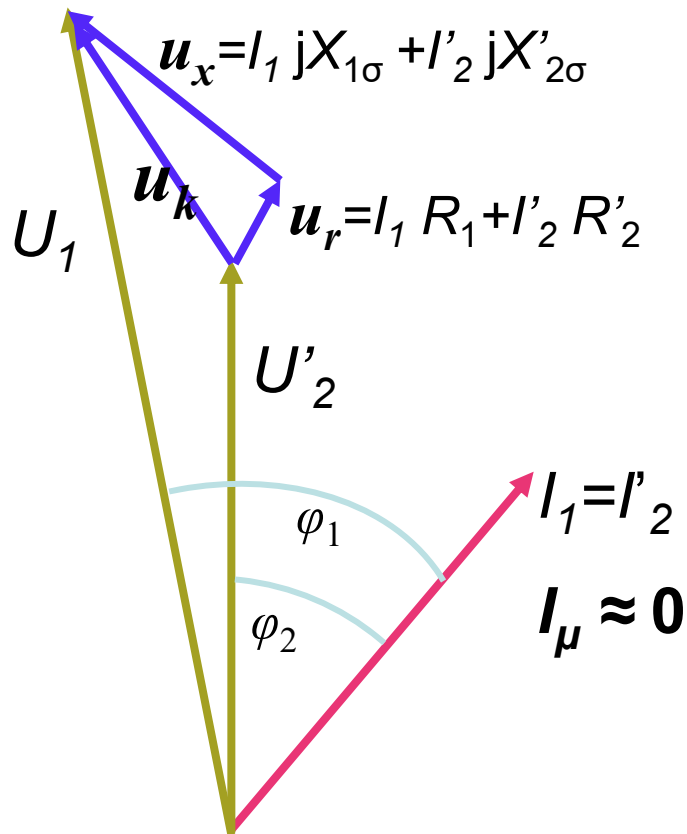
Veliki transformator

$$R_1 \approx R'_2 = 0,1 \%$$

$$X_\sigma = L_\sigma = 12 \%$$



Fazorski dijagram opterećenog TR. Kapov trougao



Kapov trougao-
Trougao kratkog spoja

Trougao unutrašnjih padova napona na fazorskom dijagramu TR je zapravo dijagram napona kratkog spoja uz struju kratkog spoja jednakoj struji opterećenja I . Veličina Kapovog trougla je utoliko veća što je veća struja ili unutrašnji otpori transformatora.

Prilikom opterećenja transformatora strujom I napon U'_2 biće manji zbog pada napona na unutrašnjim otporima transformatora od napona U_1 za napon kratkog spoja uz struju I .

4.8. PROMENA NAPONA NA TRANSFORMATORU

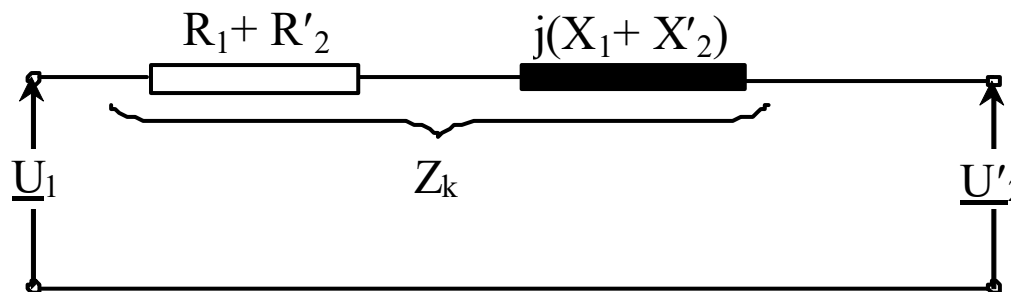
zovemo i PAD NAPONA NA TRANSFORMATORU

Predstavlja odstupanje napona sekundara pri nekom opterećenju od onog u praznom hodu.

KOLIKO ON IZNOSI?

U ogledu kratkog spoja za nominalnu struju transformatora potrebno je 2-10% nominalnog napona. Sledi da ni pad napona na transformatoru ne može da bude veliki.

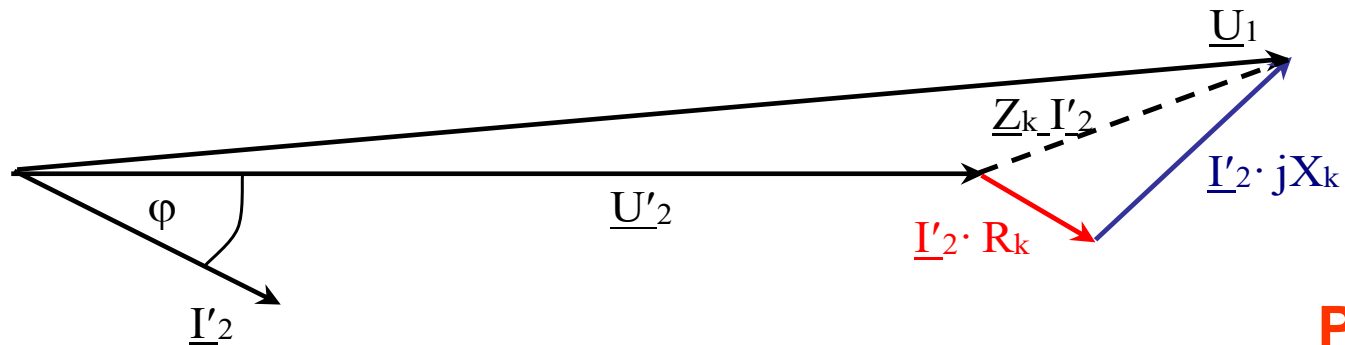
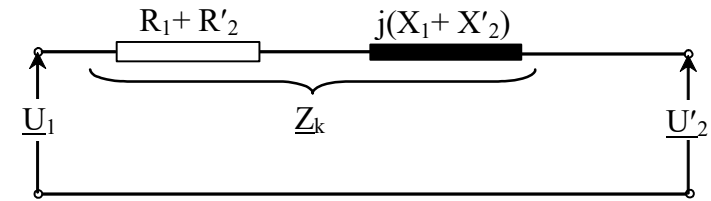
Za proračun promene napona na transformatoru koristi se ekvivalentna šema:



Struja u poprečnoj grani praktično ne doprinosi promeni napona transformatora za dobro sagrađene transformatore.

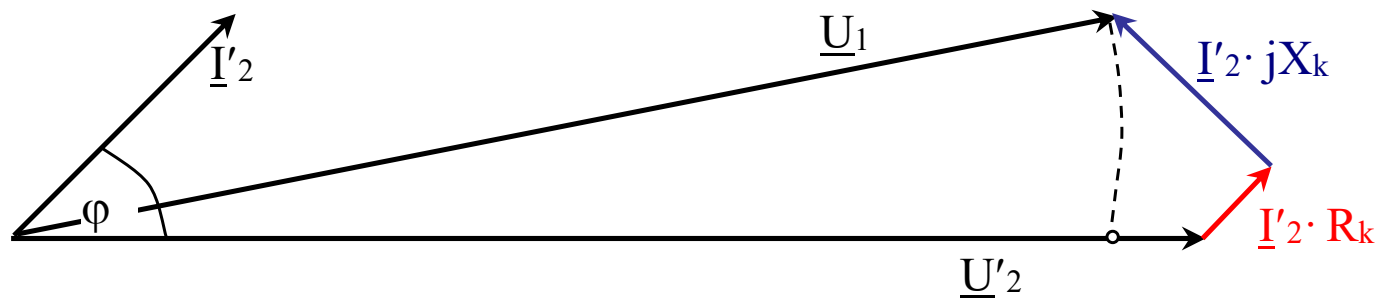
PAD NAPONA NA TRANSFORMATORU

Fazorski dijagram ove šeme.



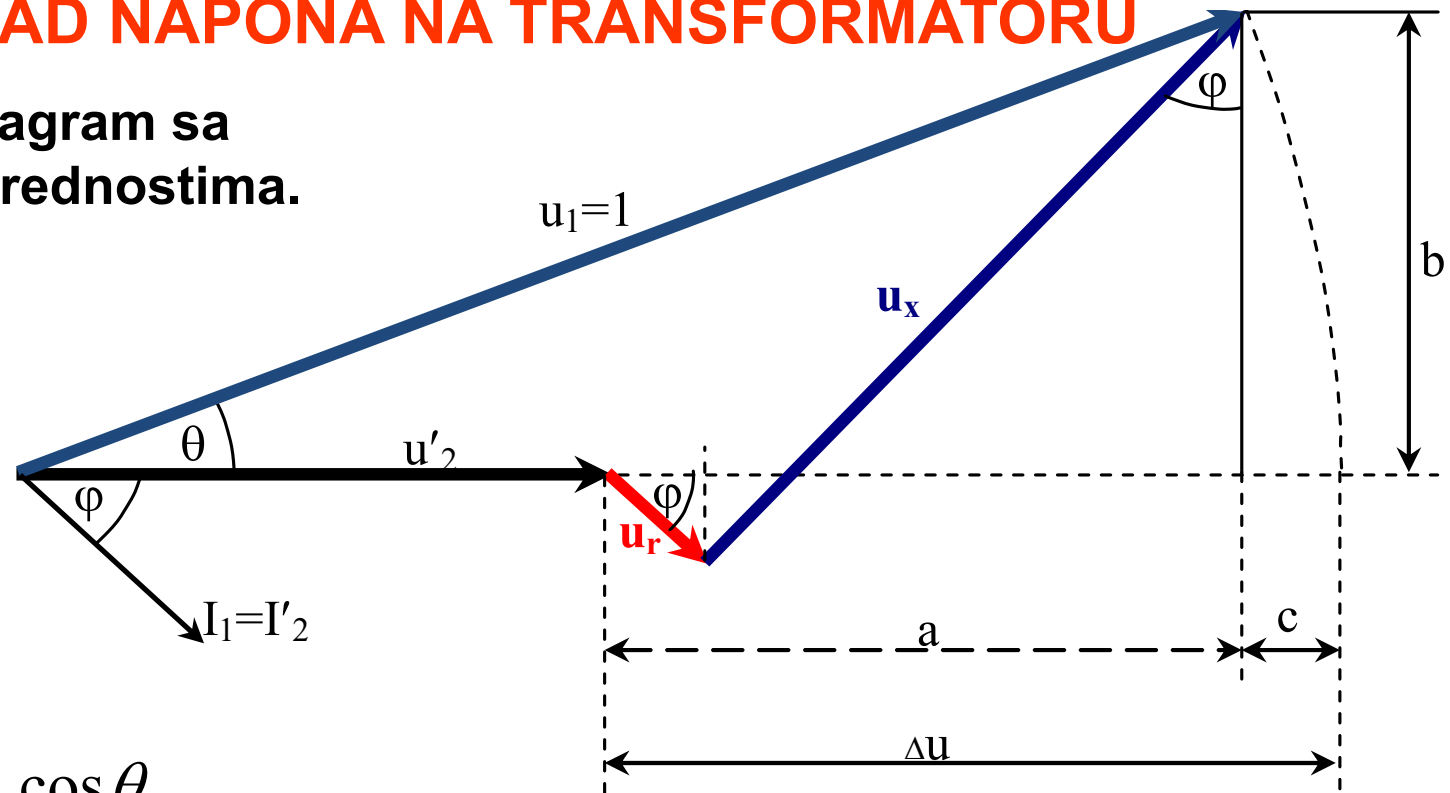
Promena napona

$$\Delta U = |U_1| - |U'_2|$$



PAD NAPONA NA TRANSFORMATORU

Fazorski dijagram sa relativnim vrednostima.



$$u'_2 + a = u_1 \cos \theta$$

$$u_1 - \Delta u + a = u_1 \sqrt{1 - \sin^2 \theta}$$

$$\sqrt{1 - \sin^2 \theta} \approx 1 - \frac{\sin^2 \theta}{2}$$

$$\sin \theta = \frac{b}{u_1}$$

$$\Delta u = u_1 - u_1 \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{b}{u_1} \right)^2 \right] + a = a + \frac{b^2}{2}$$

Gde su:

$$a = u_r \cos \varphi + u_x \sin \varphi$$

$$b = u_x \cos \varphi - u_r \sin \varphi$$

PAD NAPONA NA TRANSFORMATORU

Pad napona na TR. $\Delta u = a + \frac{b^2}{2} \quad [r.j.] \quad \Delta u = a + \frac{b^2}{200} \quad [\%]$

Gde su: $a = u_r \cos \varphi + u_x \sin \varphi \quad b = u_x \cos \varphi - u_r \sin \varphi$

Ako je struja opterećenja $I_2 \neq I_{2n}$ tada se Δu može odrediti kao:

$$\Delta u = \beta \cdot \left((u_{rn} \cos \varphi + u_{xn} \sin \varphi) + \frac{\beta}{200} (u_{xn} \cos \varphi - u_{rn} \sin \varphi)^2 \right) [\%]$$

gde su $\beta = I_2/I_{2n} = S/S_n$ a u_{rn} i u_{xn} nominalne komponente padova napona.

Ako je $z_k < 10\%$ može se zanemariti drugi sabirak, pa je:

$$\Delta u \approx a = u_r \cos \varphi + u_x \sin \varphi \quad [r.j.] \text{ ili } [\%] \text{ a može i } [V].$$

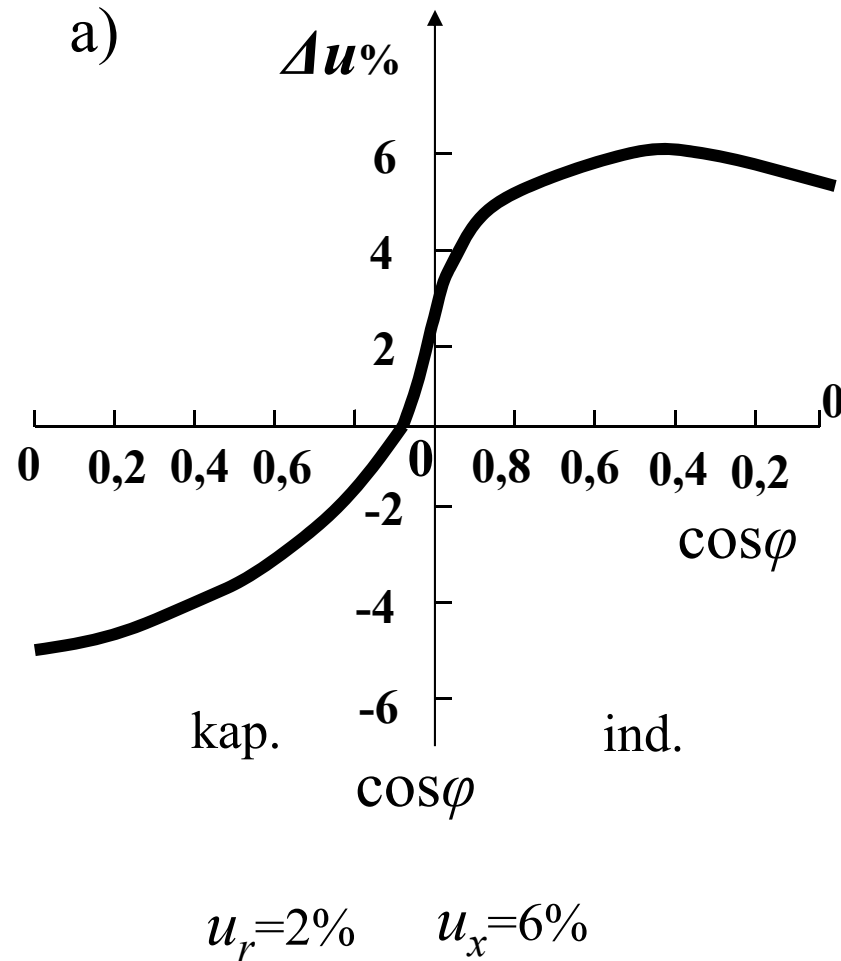
$$\Delta u = R_k \cdot I_2 \cdot \cos \varphi + X_k \cdot I_2 \cdot \sin \varphi$$

Promene napona na transformatoru zavisi od faktora snage opterećenja $\cos \varphi$ i od opterećenja TR.

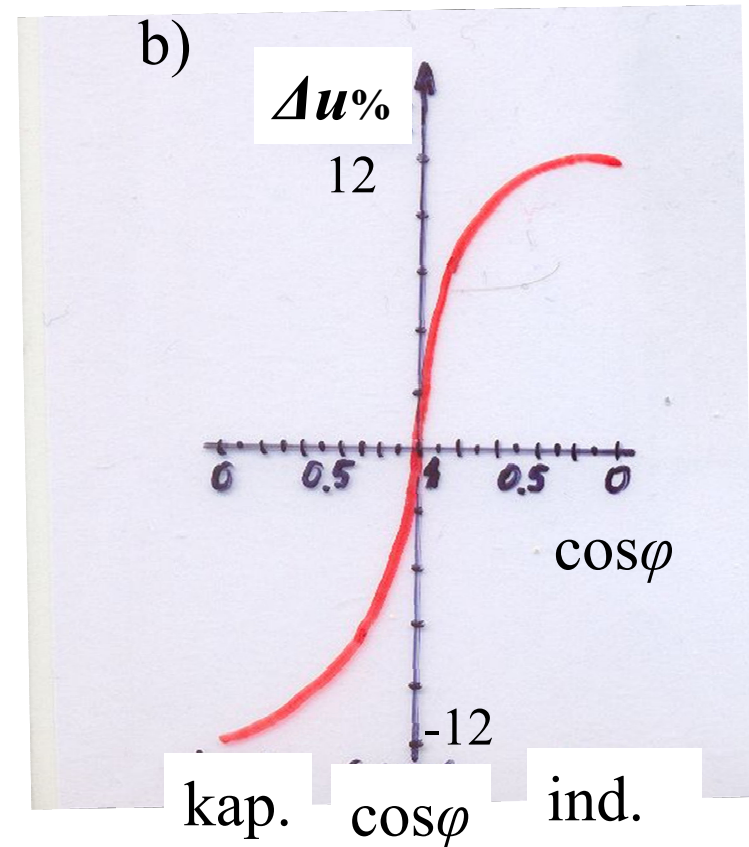
PAD NAPONA NA TRANSFORMATORU-uticaj $\cos\varphi$

$$\Delta u_{\%} = \beta [u_{r\%} \cos\varphi + u_{x\%} \sin\varphi + 0,005\beta (u_{x\%} \cos\varphi - u_{r\%} \sin\varphi)^2]$$

Mali transformatori



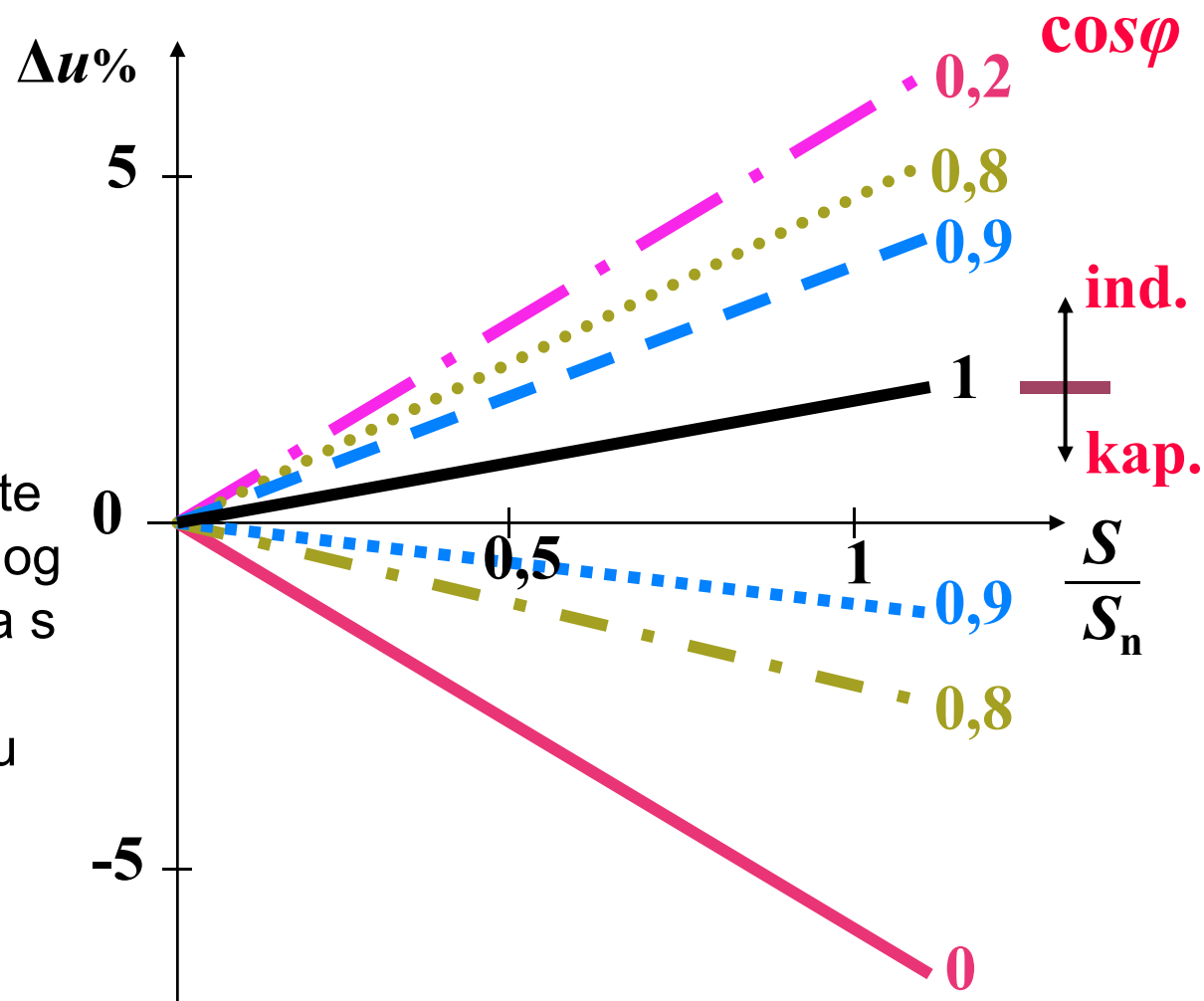
Veliki (mrežni) transformatori



PAD NAPONA NA TRANSFORMATORU-uticaj opterećenja

$$\Delta u_{\%} = \beta [u_{r\%} \cos \varphi + u_{x\%} \sin \varphi + 0,005\beta (u_{x\%} \cos \varphi - u_{r\%} \sin \varphi)^2]$$

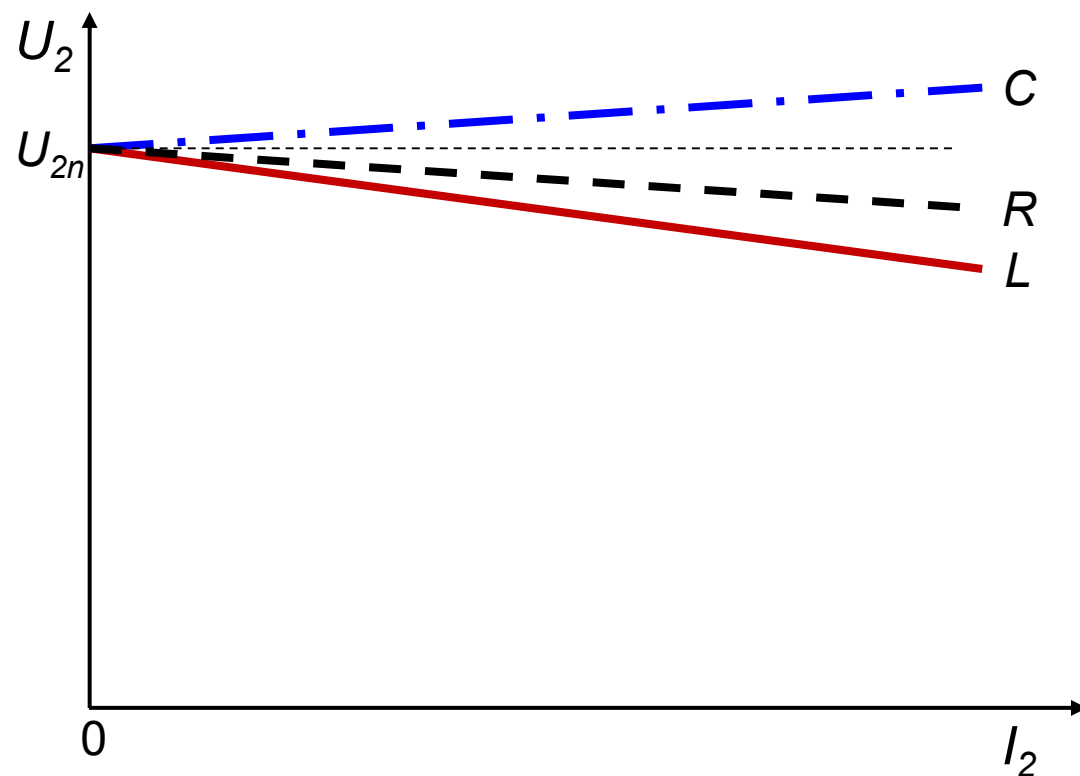
Napon sekundara raste s porastom kapacitivnog opterećenja, dok pada s porastom induktivnog opterećenja (u odnosu na prazan hod).



SPOLJAN K-KA TRANSFORMATORA

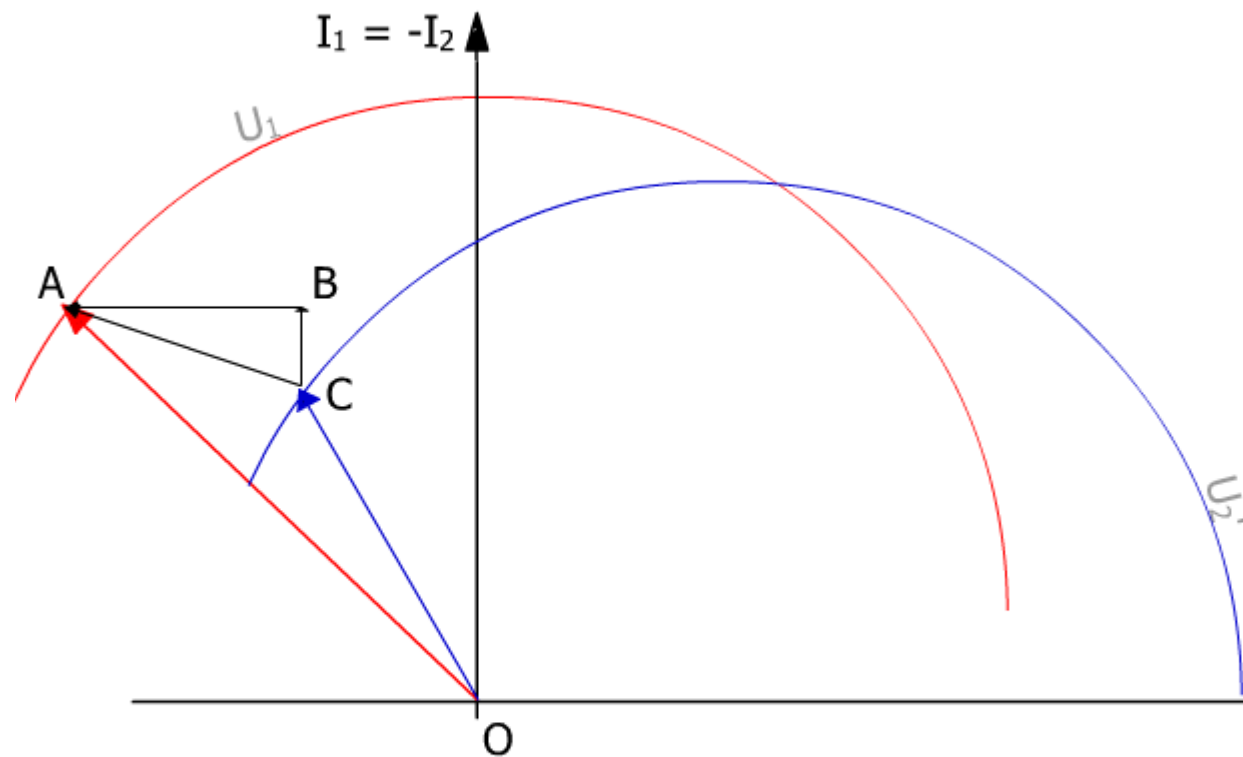
$U_1 = \text{konst.}$, faktor snage - parametar

- » C – kapacitivno opterećenje
- » R – aktivno opterećenje
- » L – induktivno opterećenje



Spoljna k-ka TR se izračunava na osnovu pada napona.

Relation of Equivalent Secondary Voltage to $\cos \varphi_2$ of Load



$$\begin{aligned} OA &= U_1 \\ OC &= -U_2' \\ \varphi_2 &= \text{angle } (-U_2', I_1) \end{aligned}$$

90°

φ_2

-45°

$\varphi_2 = -30^\circ$

TEMPUS

JEP 16-127

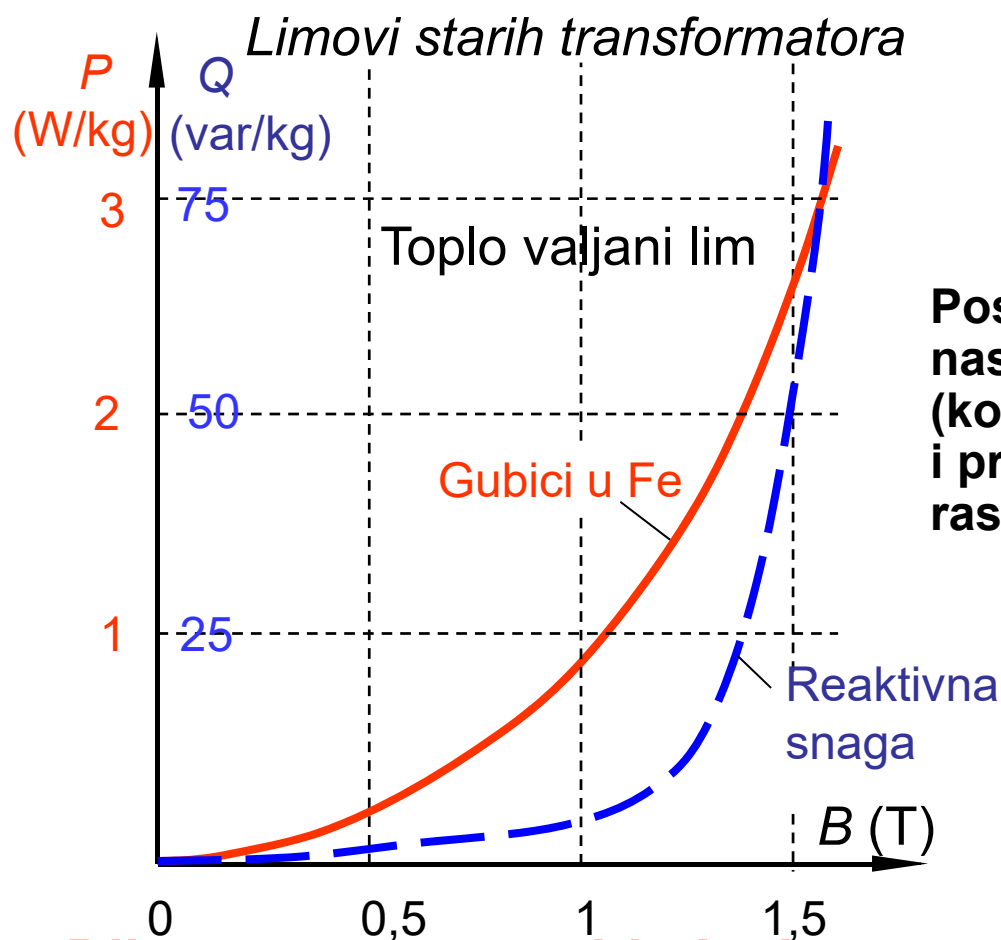
L.Filipovic

- Flux plot - loaded
- Flux plot - OC
- Flux plot - SC
- Magnetizing current
- Vector diagram
- Voltage regulation
- 3-F Connection

4.9 + 4.9.1 SNAGA GUBITAKA

Gubici u gvožđu transformatora: zbog histerezisa i vrtložnih struja:

$$P_{Fe} = P_{FeH} + P_{FeV} = \left(k_H \cdot f \cdot B_m^n + k_V \cdot f^2 \cdot B_m^2 \cdot d^2 \right) \cdot m_{Fe}; \quad n = 2 \div 3$$



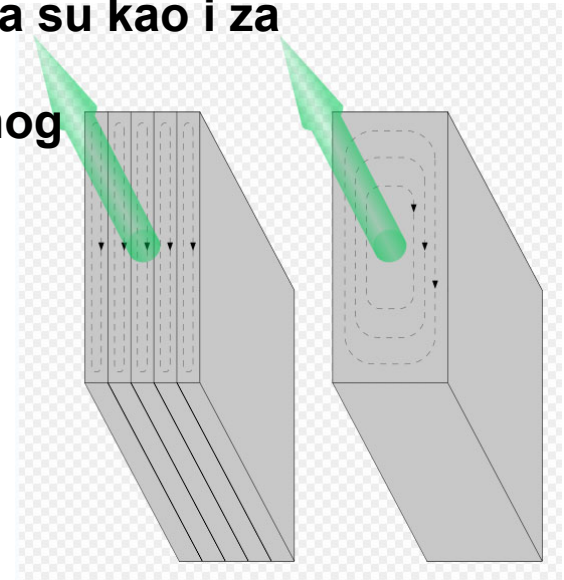
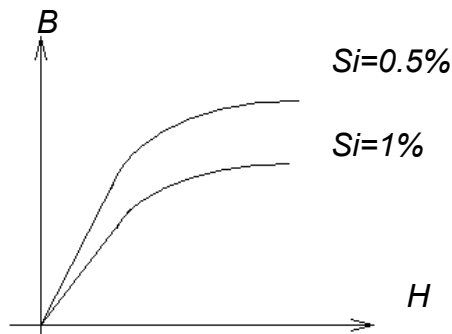
Prilikom izrade jezgra specifični gubici se povećaju (10-30%) zbog unutrašnjih mehaničkih naprezanja.

Postoje i dodatni gubici u Fe koji nastaju u konstruktivnim delovima (kotao, oklopi oko izvoda, metalni držači i priteznici jezgra) nastaju zbog rasipnog fluksa.

Dijagram snage gubitaka i snaga magnećenja po jedinici mase feromagnetnog materijala.

SNAGA GUBITAKA

Feromagnentno jezgro se pravi od paketa čeličnih limova sa malim sadržajem **C** do 0,1% i **Si** do 3%. **Si** se dodaje u cilju smanjenja gubitaka usled vrtložnih struja – **hipersli lim**. Limovi su sa orijentisanom kristalnom strukturom, dobijaju se hladnim valjanjem i imaju izraženu magnetnu anizotropiju tj. mali magnetni otpor u pravcu valjanja do 30% bolja svojstva u pravcu valjanja. Limovi su međusobom izolovani sa neorganskim materijalom (karlit) deblj. **4 μ m**. Gubici usled vrtložnih struja proporcionalni su sa kvadratom debljine lima. Tipične debljine lima su 0,15-0,23-0,27-0,3-0,35mm. Boljom orijentacijom strukture dobija se **Super hipersli (“H i B”) lim** koji ima za 10% manje gubitke od hipersila. U cilju daljeg smanjenje gubitaka u Fe laserskim snopom se zarezuje površina lima pod 90° u odnosu na smer valjanja čime se smanjuje dimenzija domena, a time i gubici. Tako se dobija **laserski obrađen lim** oznake **ZDKH**. Pravac fluksa treba da se poklopi sa pravcem valjanja lima. Prolaskom fluksa pod 90° svojstva hladno valjanog lima se degradiraju i ista su kao i za toplovaljani lim. Povećavanjem procenta silicijuma uz istu jačinu magnetnog polja, magnetna indukcije u limovima se smanjuje.

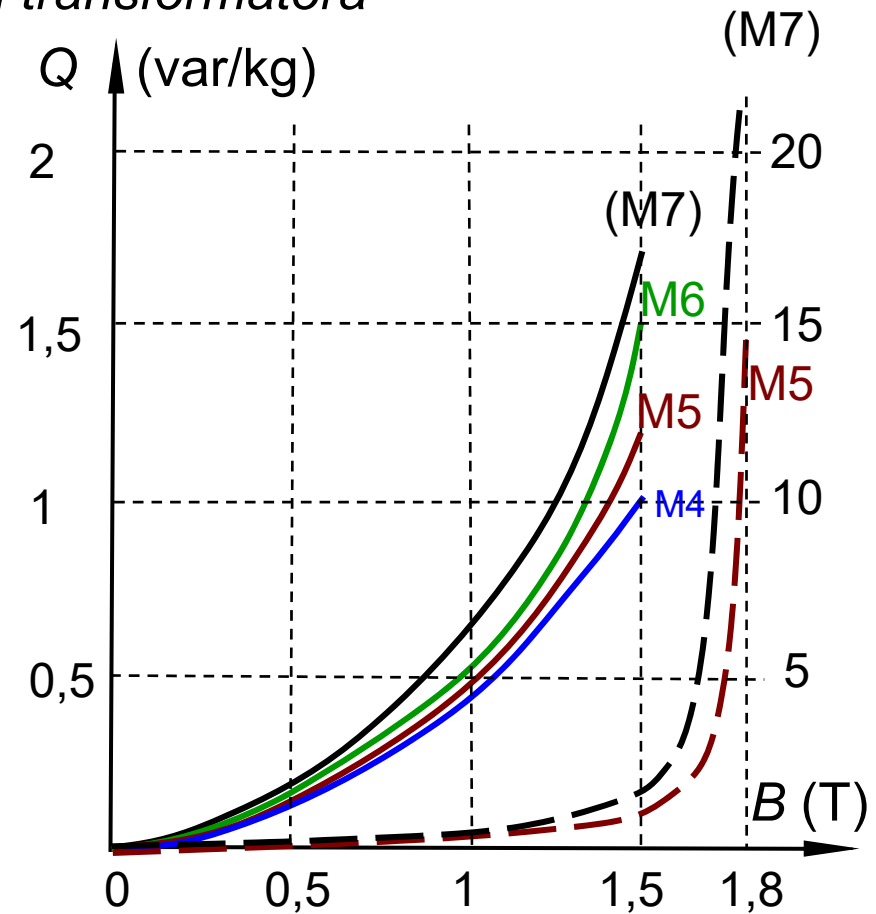
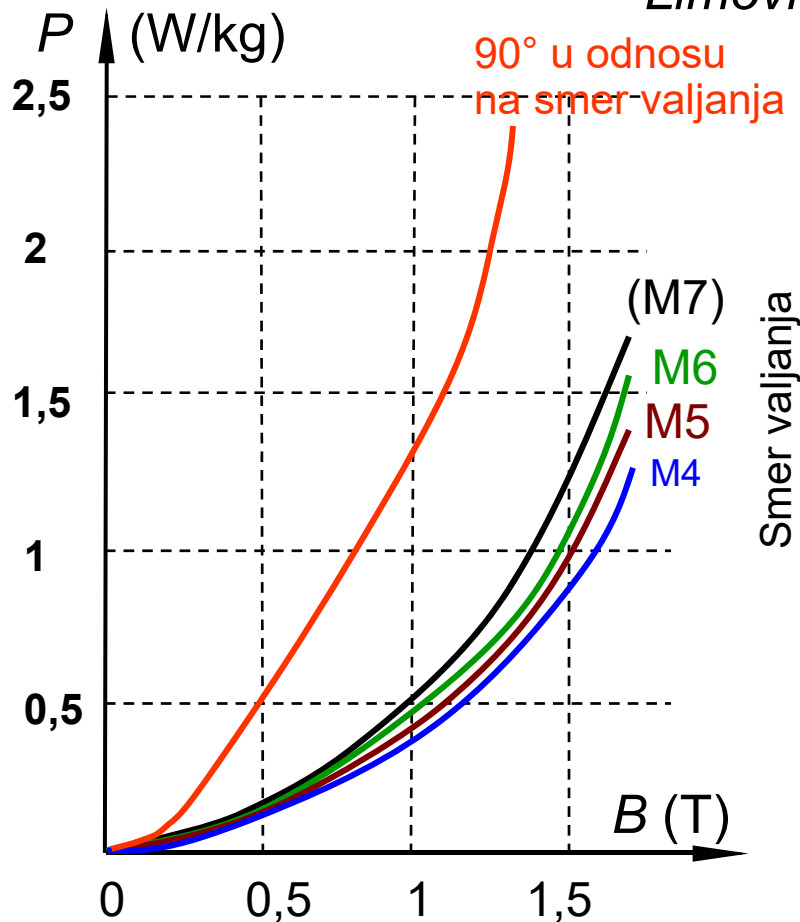


	Debljina mm	Gubici pri 1,5 T , 50 Hz W/kg	Gubici pri 1,7 T , 50 Hz W/kg
CGO	0,23	0,72	1, 14
	0,27	0,81	1,21
	0,30	0,87	1,26
	0,35	0,95	1,35
HGO	0,23	0,64	0,90
	0,27	0,72	0,99
	0,30	0,74	1,01
	0,35	0,86	1,14
HGO-DR	0,23	0,60	0,81
	0,27	0,65	0,87

SNAGA GUBITAKA

Gubici u gvožđu transformatora su gubici praznog hoda.

Limovi novih transformatora



Dijagram snage gubitaka i snaga magnetćenja po jedinici mase feromagnetnog materijala.

4.9.2 SNAGA GUBITAKA

Gubici u bakru transformatora (gubici usled opterećenja) :

1. **Džulovi gubici** u namotajima.
2. **Dopunski gubici** usled povećanja otpora namotaja koji nastaju zbog rasipnog fluksa, tj. usled indukovanih lokalnih struja u provodnicima.
3. **Drugi dopunski gubici** u konstrukcionim delovima usled indukovanih parazitnih struja.

SNAGA GUBITAKA

1. Džulovi gubici u namotajima.

$$P_g = \sum RI^2 = \sum \rho \frac{l}{S} I^2$$

STRUJA JE JEDNOSMERNAAA!!!

Ovi gubici zavise od materijala (**bakar** - **aluminijum**) i temperature.

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{235 + \theta_2}{235 + \theta_1}$$

Formula za preračunavanje otpornosti na odgovarajuću temperaturu.

Resistance:

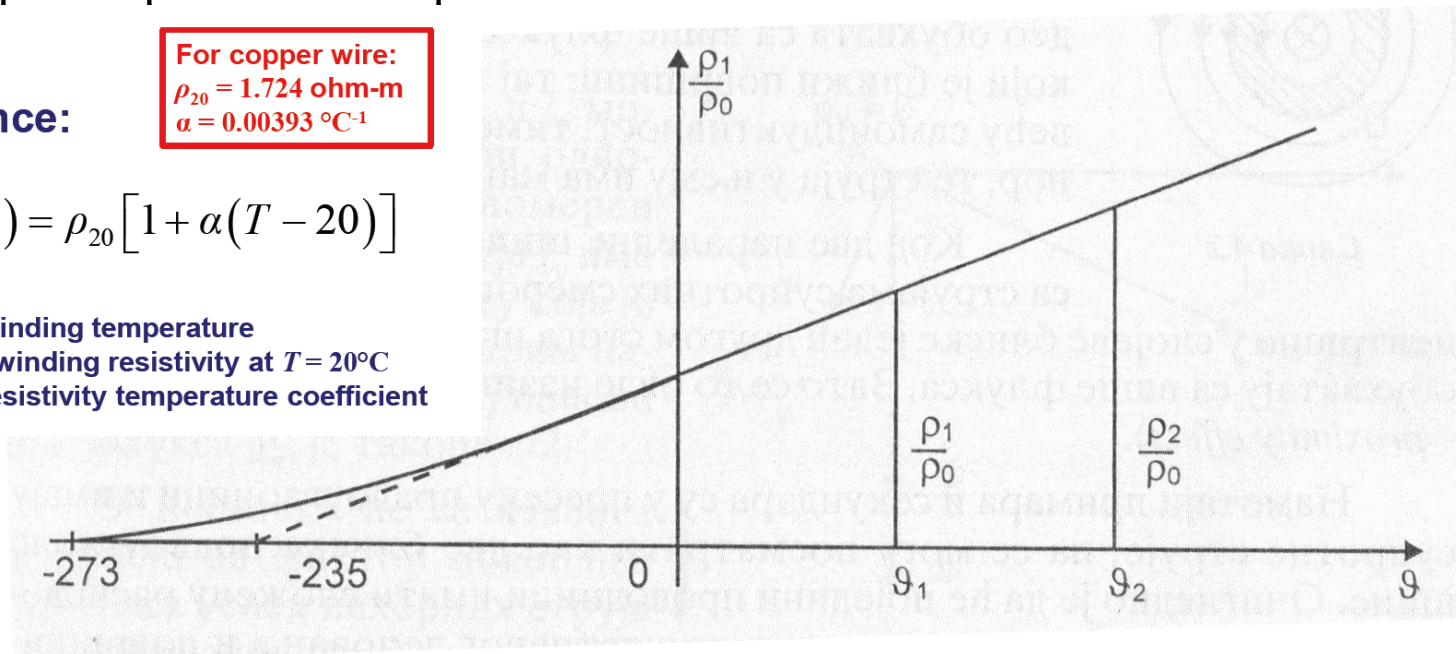
For copper wire:
 $\rho_{20} = 1.724 \text{ ohm-m}$
 $\alpha = 0.00393 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

$$\rho(T) = \rho_{20} [1 + \alpha(T - 20)]$$

T = winding temperature

ρ_{20} = winding resistivity at $T = 20^\circ\text{C}$

α = resistivity temperature coefficient

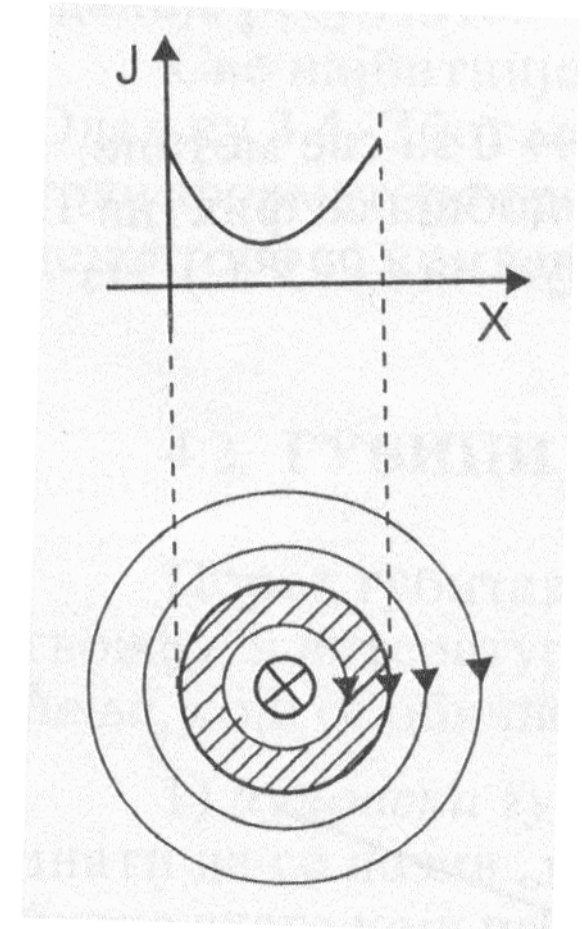


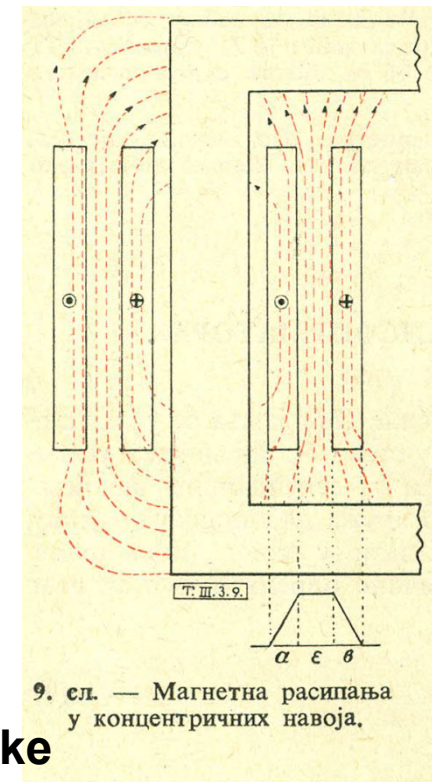
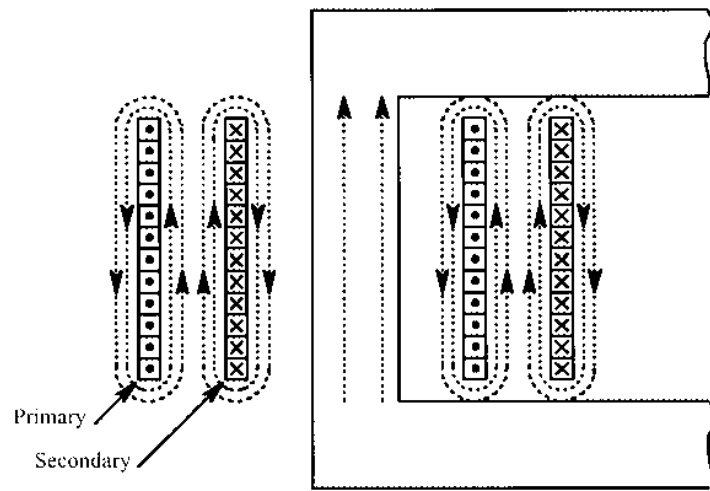
SNAGA GUBITAKA

2. **Dopunski gubici** usled povećanja otpornosti namotaja koji nastaju zbog rasipnog fluksa.

Magnetna indukcija rasipnog polja indukuje u provodnicima ems koja u masivnim provodnicima stvara lokalne tj. vrtložne struje. Ove struje u zbiru sa ukupnom strujom dovode do nejednake raspodele struje po površini poprečnog preseka. Struja je potisnuta ka površini provodnika. **Površinski (skin)** efekat. Primer usamljenog provodnika sa strujom čija struja stvara magnetsko polje kako oko provodnika tako i u njemu. Jasno je da se centralni deo provodnika obuhvata sa više fluksa nego spoljašnji, taj centralni deo ima zato veću samoinduktivnost tj. Induktivni otpor te struja u njemu ima manju gustinu.

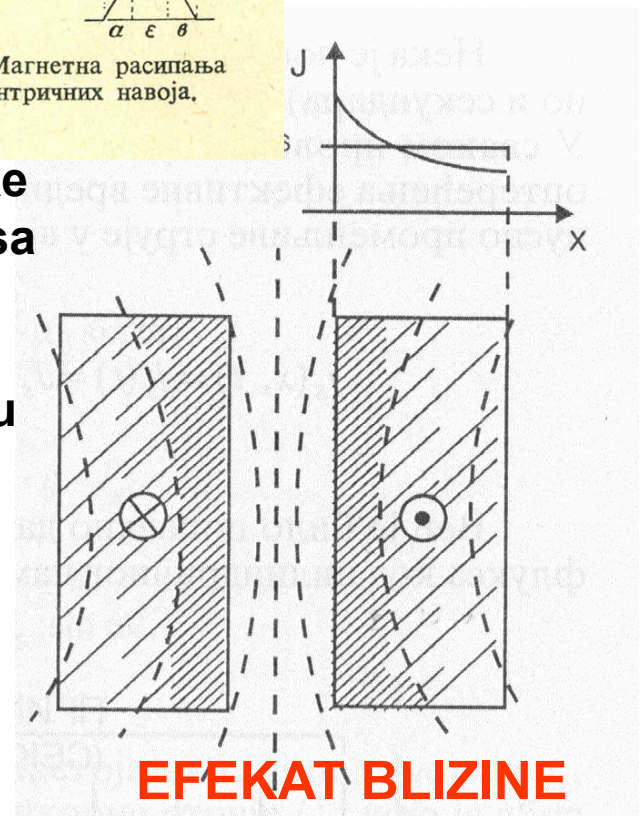
POVRŠINSKI EFEKAT





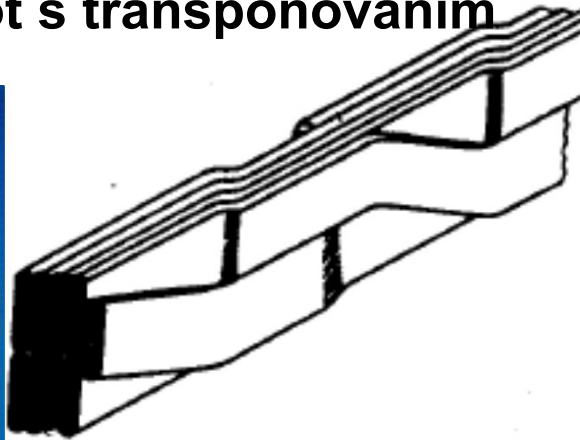
Namotaji primara i sekundara su u preseku pravougaonici i imaju struje koje su suprotno orijentisane pa sa mogu posmatrati kao dve bliske pravougaone šine. Struja se koncentriše u slojeve bliske jedan drugom zato što se udaljeniji slojevi obuhvataju sa više fluksa. Zbog toga je induktivni otpor duž preseka različit a time i gustina struje. Neravnomerna raspodela struje po poprečnom preseku ekvivalentna je smanjenju efektivne površine preseka. Aktivna otpornost se povećava u odnosu na otpornost prema jednosmernoj struji.

Fildovim sačiniocem se uzima u obzir povećanje gubitaka usled neravnomerne raspodele struje po poprečnom preseku.



Zbog nejednolike raspodele magnetskog polja po radijalnoj širini namota najveće polje je u namotajima uz kanal između VN i NN namotaja pa su tu najveći i gubici zbog vrtložnih struja, pa je onda i zagrevanje najveće u tim delovima namota. U svrhu smanjenja tih dodatnih gubitaka presek provodnika okomit na magnetno polje mora biti što manji, pa se namoti rade od delova provodnika relativno malog preseka.

Kod velikih energetskih transformatora rade se posebne vrste namota radi smanjenja dodatnih gubitaka u namotu, npr. presloženi disk namot s transponovanim provodnicima.



4.9.4. KOEFICIJENT KORISNOG DEJSTVA TRANSFORMATORA

Korisnost transformatora je odnos predane i primljene aktivne snage izražen u %.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma P_g} = \frac{P_1 - \Sigma P_g}{P_1}$$

Današnji najveći transformatori postižu $\eta=99,80\%$.

Ako se definiše relativno opterećenje:

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2n}} = \frac{U_{2n} \cdot I_2}{U_{2n} \cdot I_{2n}} = \frac{S_2}{S_n}$$

I uvaži da je:

$$P_2 = S \cos \varphi = \beta \cdot S_n \cos \varphi$$

KOEFICIJENT KORISNOG DEJSTVA TRANSFORMATORA

Dobija se:

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_n \cos \varphi}{\beta \cdot S_n \cos \varphi + P_{Cu} + P_{Fe}}; \quad P_{Cu} = \beta^2 \cdot P_{Cun}$$

Preporuke IEC za energetske transformatore su:

$$P_{Fe} \approx P_0 = f(U) = f(B, f) \quad \text{ i } \quad P_{Cun} \approx P_{k 75^\circ C}$$

Gubici u bakru i u kratkom spoju pri nominalnoj struji.

pa je:

$$\eta = \frac{\beta \cdot U_{2n} \cdot I_{2n} \cos \varphi}{\beta \cdot U_{2n} \cdot I_{2n} \cos \varphi + \beta^2 \cdot P_{k 75^\circ C} + P_0}$$

Koef. korisnog dejstva zavisi od faktora snage. Najveću vrednost ima za omsko opterećenje $\cos \varphi = 1$, a za $\cos \varphi = 0$ $\eta = 0$ uz istu snagu gubitka.

KOEFICIJENT KORISNOG DEJSTVA TRANSFORMATORA

Ako se ogled kratkog spoja izvodi na temperaturi θ_1 tada je snaga kratkog spoja:

$$P_{k\theta_1} = P_{Cu\theta_1} + P_{d\theta_1} = 3(R_1 + R'_2)I_1^2 + P_{d\theta_1}$$

Gde su R_1 i R'_2 otpornosti izmerene jednosmernom strujom.

Snaga kratkog spoja obračunata na standardizovanu radnu temperaturu:

$$P_{k 75^\circ C} = P_{Cu 75^\circ C} + P_{d 75^\circ C}$$

$$P_{Cu 75^\circ C} = \frac{235 + 75}{235 + \theta_1} P_{Cu\theta_1}$$

$$P_{d 75^\circ C} = \frac{235 + \theta_1}{235 + 75} P_{d \theta_1}$$

KOEFICIJENT KORISNOG DEJSTVA TRANSFORMATORA

Koeficijent korisnog dejstva je funkcija opterećenja (β) i **ima maksimum** pri nekom opterećenju, koji se može naći iz:

$$\frac{d\eta}{d\beta} = 0$$

$$\beta \cdot U_{2n} \cdot I_{2n} \cos \varphi + \beta^2 \cdot P_{k75^\circ C} + P_0 - \beta (U_{2n} \cdot I_{2n} \cos \varphi + 2\beta \cdot P_{k75^\circ C}) = 0$$

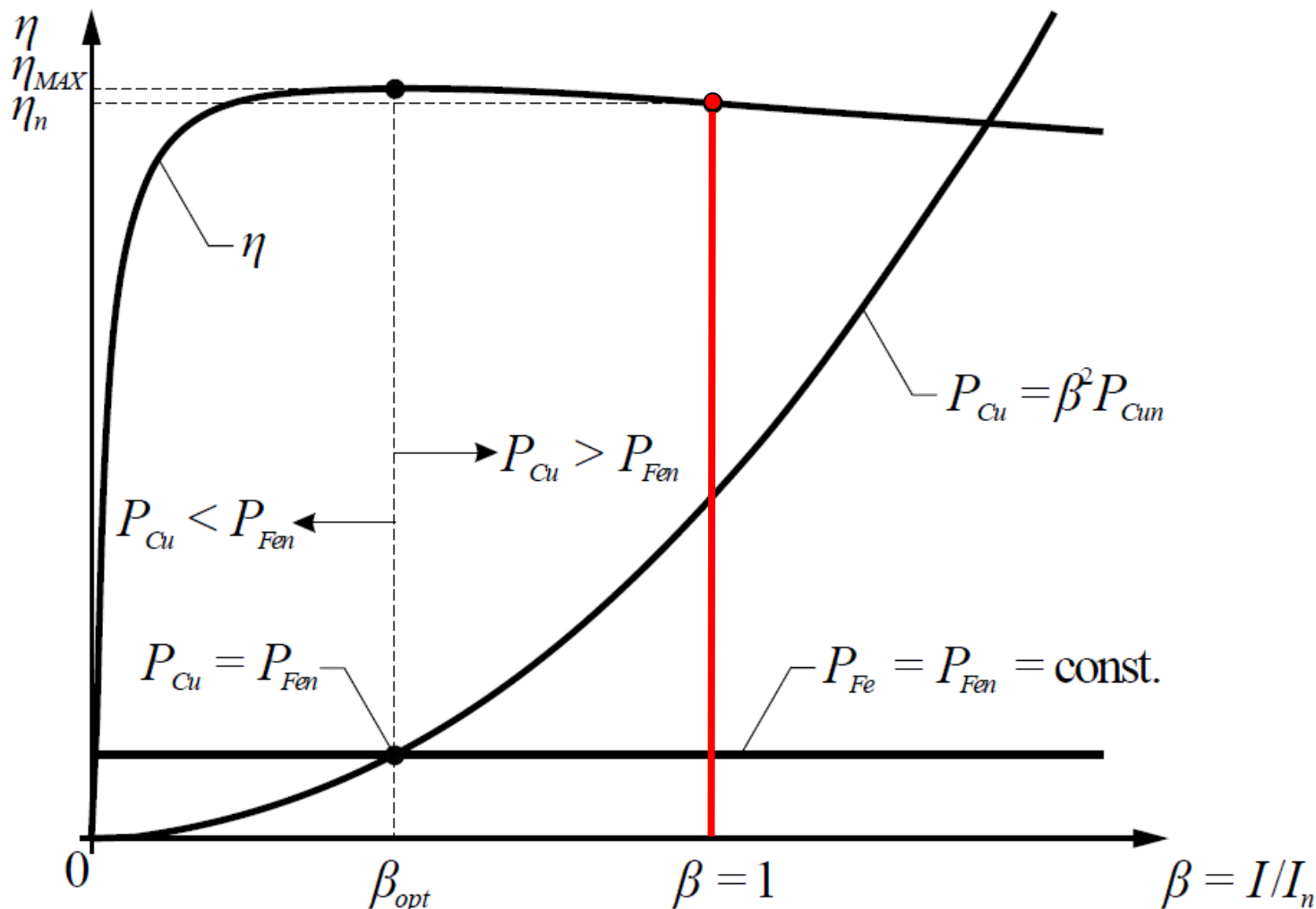
Koeficijent korisnog dejstva je maksimalna kada se **gubici usled opterećenja** izjednače sa **gubicima u praznom hodu**.

$$P_0 = \beta^2 \cdot P_{k75^\circ C}$$

Opterećenje pri kome je koeficijent korisnog dejstva maksimalan:

$$\beta_{opt} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{k75^\circ C}}}$$

KOEFICIJENT KORISNOG DEJSTVA TRANSFORMATORA



Transformatori koji rade 24h dnevno pod punim opt. treba da imaju $\beta_{opt} \cong 1$ tj. da su nominalni gubici usled opterećenja jednaki gubicima ph. Za distributivne transformatore $0,4 < \beta_{opt} < 1$.

KOEFICIJENT KORISNOG DEJSTVA TRANSFORMATORA

Većinu eksploatacionog veka transformator neće raditi punom nego sa smanjenom snagom. Uobičajena je izvedba transformatora sa **gubicima usled opterećenja** koji su **dva** do **šest** puta veći od **gubitaka usled praznog hoda**, što znači da je max. korisnost postignuta pri opterećenju:

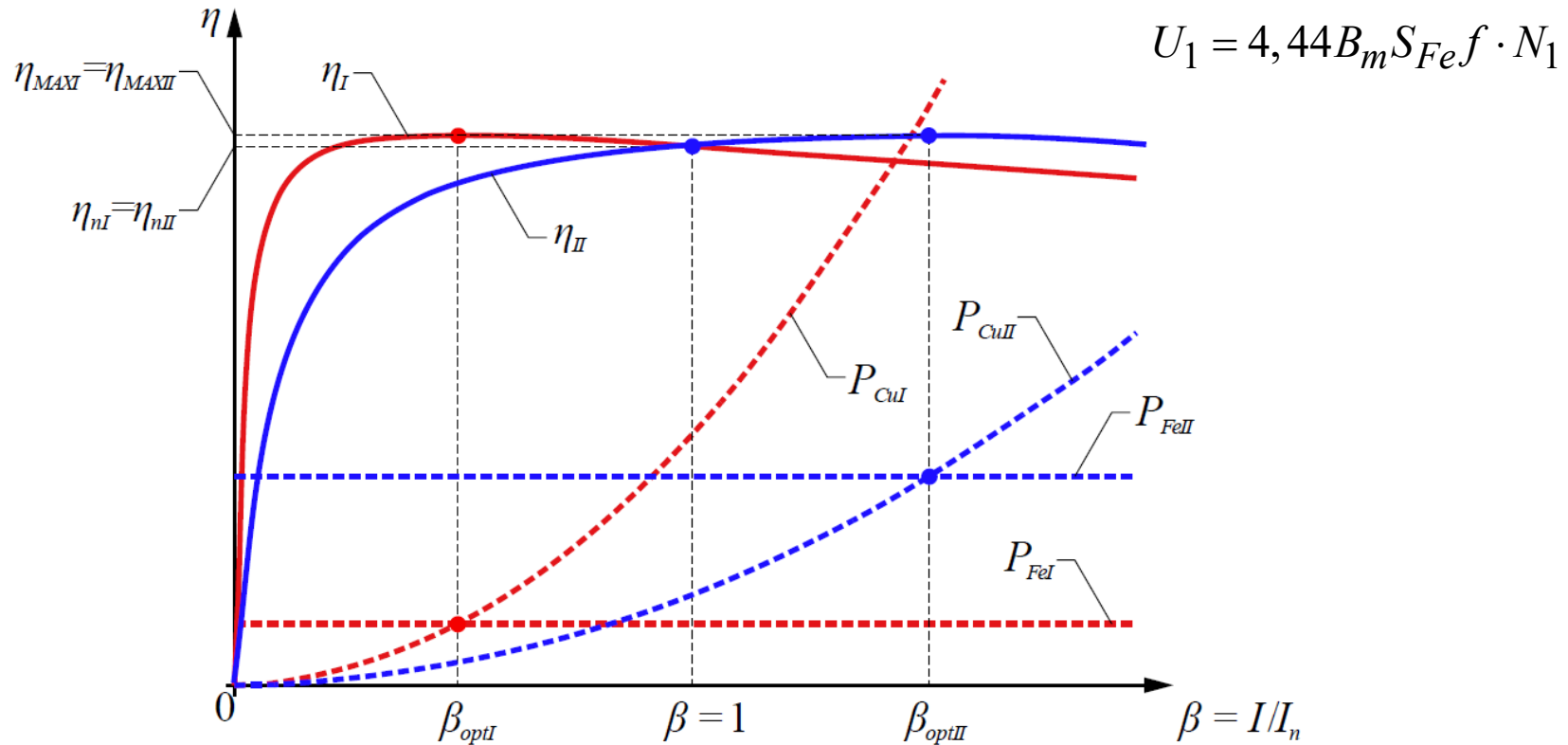
$$\beta_{opt} = \sqrt{\frac{P_0}{2 \cdot P_0}} = 0,71 \quad \text{odnosno} \quad \beta_{opt} = \sqrt{\frac{P_0}{6 \cdot P_0}} = 0,41$$

Maksimalna korisnost se postiže pri opterećenju od 40% kod manjih do 70% kod najvećih transformatora.

$$\beta_{opt} = \sqrt{\frac{P_0}{P_k 75^\circ C}}$$

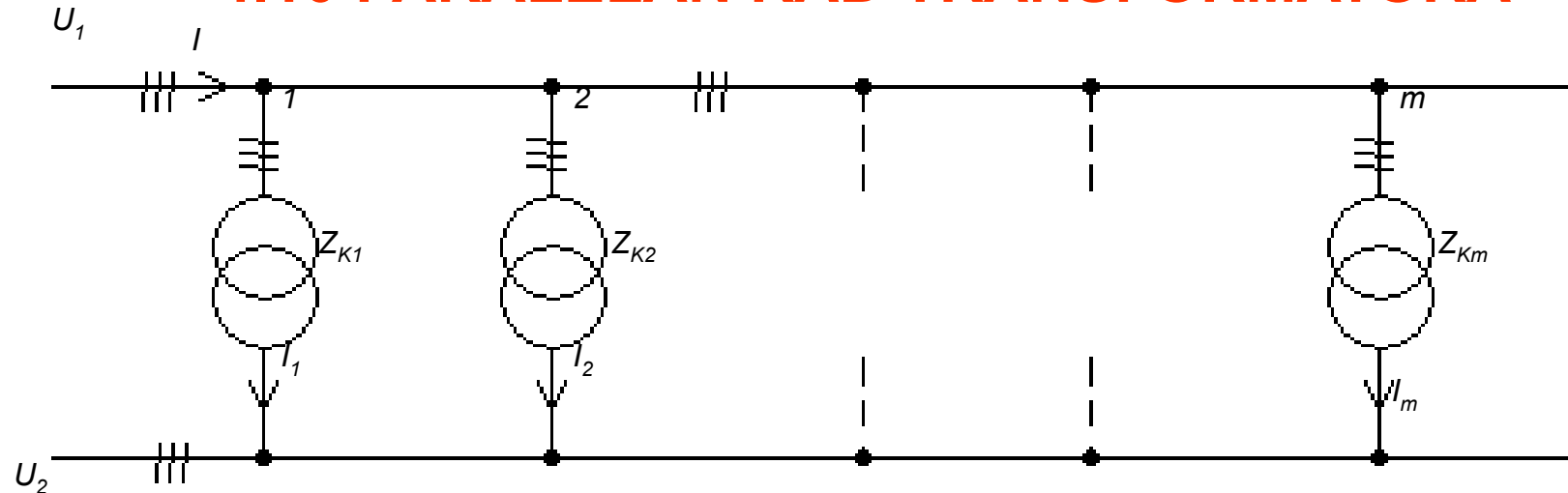
U fazi projektovanja izborom gustine struje (utiče se na gubitke u bakru) i **gustine fluksa** (indukcija, utiče se na gubitke u gvožđu) **maksimalni stepen korisnog dejstva se može postići pri željnom opterećenju.**

KOEFICIJENT KORISNOG DEJSTVA TRANSFORMATORA



Dijagrama gubitaka i stepena korisnosti za dva TR sa različitim vrednostima β_{opt} . Prvi TR ima relativno malu masu i mali presek jezgra magnetnog kola te je potreban veći broj navojaka i veća masa bakra. Drugi TR ima veću masu magnetnog kola (veći presek jezgra), pa ima veće gubitke P_{Fe} u odnosu na prvi TR. Zbog povećanog preseka jezgra imaće, pri istoj indukciji za oba TR, veću elektromotornu silu po navojku. Za iste napone potreban je manji broj navojaka, to jest manja je masa bakra u odnosu na prvi TR. Pri istoj gustini struje, gubici u bakru drugog transformatora su manji. Drugi transformator ima veću vrednost (β_{opt}), odnosno ima se ($\beta_{II} > \beta_I$).

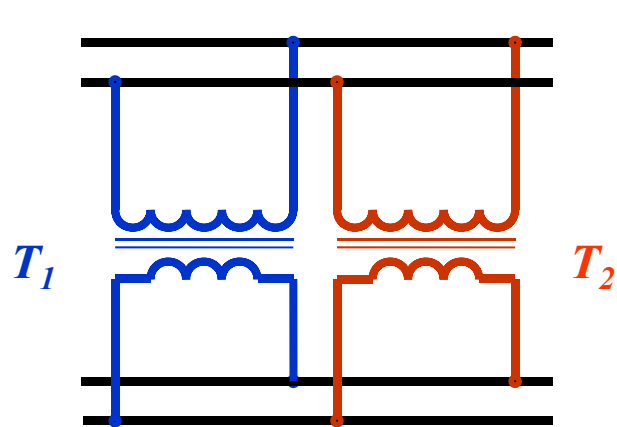
4.10 PARALELAN RAD TRANSFORMATORA



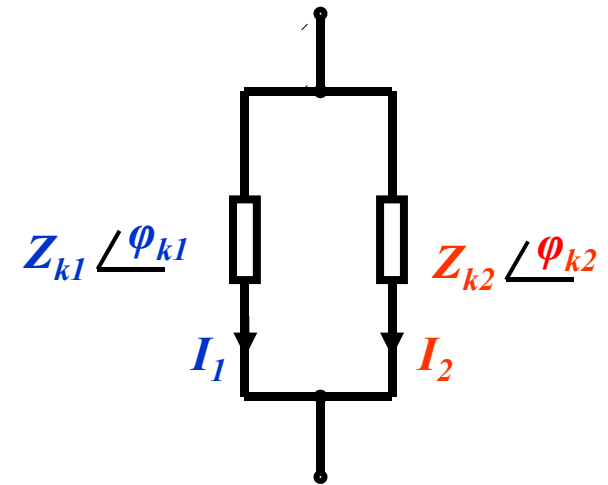
Ako dva ili više transformatora (**m**) priključimo na mrežu tako, da su im primarne strane na zajedničkim sabirnicama, a sekundarne strane na drugim sabirnicama tada se transformatori nalaze u paralelnom radu.

RAZLOZI:

1. Veća sigurnost.
2. Ekonomičnost u eksploataciji (isključenjem jednog slabo opterećenog transformatora tokom noći ili na kraju radnog vremena).
3. Postepeni planirani i neplanirani rast konzuma.



PARALELAN RAD TRANSFORMATORA



Uslovi za paralelan rad transformatora:

1. Da nominalni naponi primara i sekundara budu isti.
2. Isti prenosni odnosi.
3. Da satni brojevi (fazni stavovi) budu isti ili iz iste grupe.
4. Približno jednaki naponi kratkog spoja, razlika do 10%.
5. Odnos nazivnih snaga ne veći od 3.

Šta će se desiti ako uslovi za paralelan rad nisu ispunjeni?

Ukoliko bilo koji od navedenih uslova nije ispunjen usloviće da se između pojedinih transformatora pojavi dopunska struja izjednačenja (struja cirkulacije) usled čega bi se pojedini transformatori preterano zagrejali i oštetili.

Pravilan rad transformatora u paralelnom radu znači:

Da pri paralelnom radu TR niti jedan transformator ne sme biti trajno preopterećen.

- 1. Da opterećenje dele srazmerno svojim nominalnim snagama. Ovaj uslov će biti približno ispunjen ako se nominalne snage transformatora odnose 1:3.**
- 2. Da nema nepotrebnih gubitaka (usled struje cirkulacije).**
- 3. Da bude izbegnuto svako havarijsko stanje.**

ODREĐIVANJE STVARNE RASPODELE SNAGA TRANSFORMATORA U PARALELNOM RADU

Ako se spregnu na primer tri transformatora sa:

$$S_{nI} \neq S_{nII} \neq S_{nIII}$$

$$Z_{kI} \neq Z_{kII} \neq Z_{kIII}$$

Tada se može napisati:

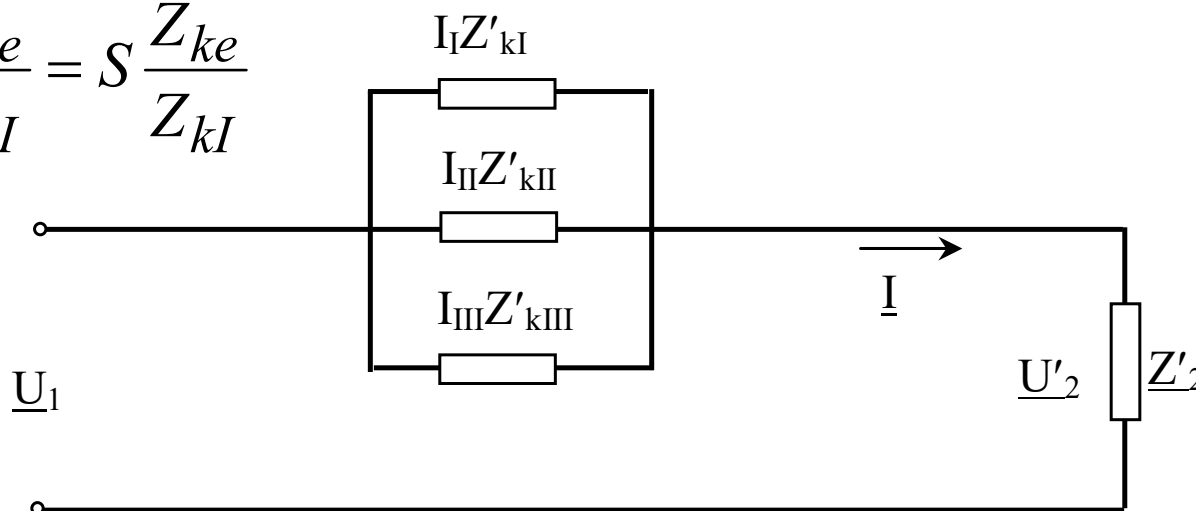
$$Z_{kI} \cdot I_{kI} = Z_{kII} \cdot I_{kII} = Z_{kIII} \cdot I_{kIII} = Z_{ke} \cdot I$$

KAKO TRANSFORMATORI U PARALELNOM RADU DELE OPTEREĆENJE?

$$S_I = U_I \cdot I_I = U_I \cdot I \frac{Z_{ke}}{Z_{kI}} = S \frac{Z_{ke}}{Z_{kI}}$$

$$S_{II} = S \frac{Z_{ke}}{Z_{kII}}$$

$$S_{III} = S \frac{Z_{ke}}{Z_{kIII}}$$



Uprošćena ekvivalentna šema transformatora u paraleli

Ako se svaka impedansa izrazi preko $u_k \%$:

$$Z_k = \frac{U_1}{I_n} \frac{u_{k\%}}{100} \quad \frac{1}{Z_{ke}} = \frac{1}{Z_{kI}} + \frac{1}{Z_{kII}} + \frac{1}{Z_{kIII}} = \frac{100}{U_1} \sum \frac{I_{ni}}{u_{ki}}$$

Od ukupne snage S prvim transformatorom se prenosi deo koji iznosi S_I :

$$\frac{S_I}{S} = \frac{Z_{ke}}{Z_{kI}} = \frac{100 I_{n1}}{u_{kI\%} \cdot U_1} \frac{U_1}{100} \frac{1}{\sum \frac{I_{ni}}{u_{ki}}} = \frac{S_{nI}}{u_{kI\%}} \frac{1}{\sum \frac{S_{ni}}{u_{ki}}}$$

Najkritičniji TR u pogledu mogućeg pregrevanja usled prevelike struje koja bi išla kroz njega je TR sa $u_{k \min}$. Taj TR određuje maksimalno dopušteno S_d a da ne dođe do njegovog pregrevanja (tada on nosi S_n). Tada je opterećenje pojedinog TR S_i :

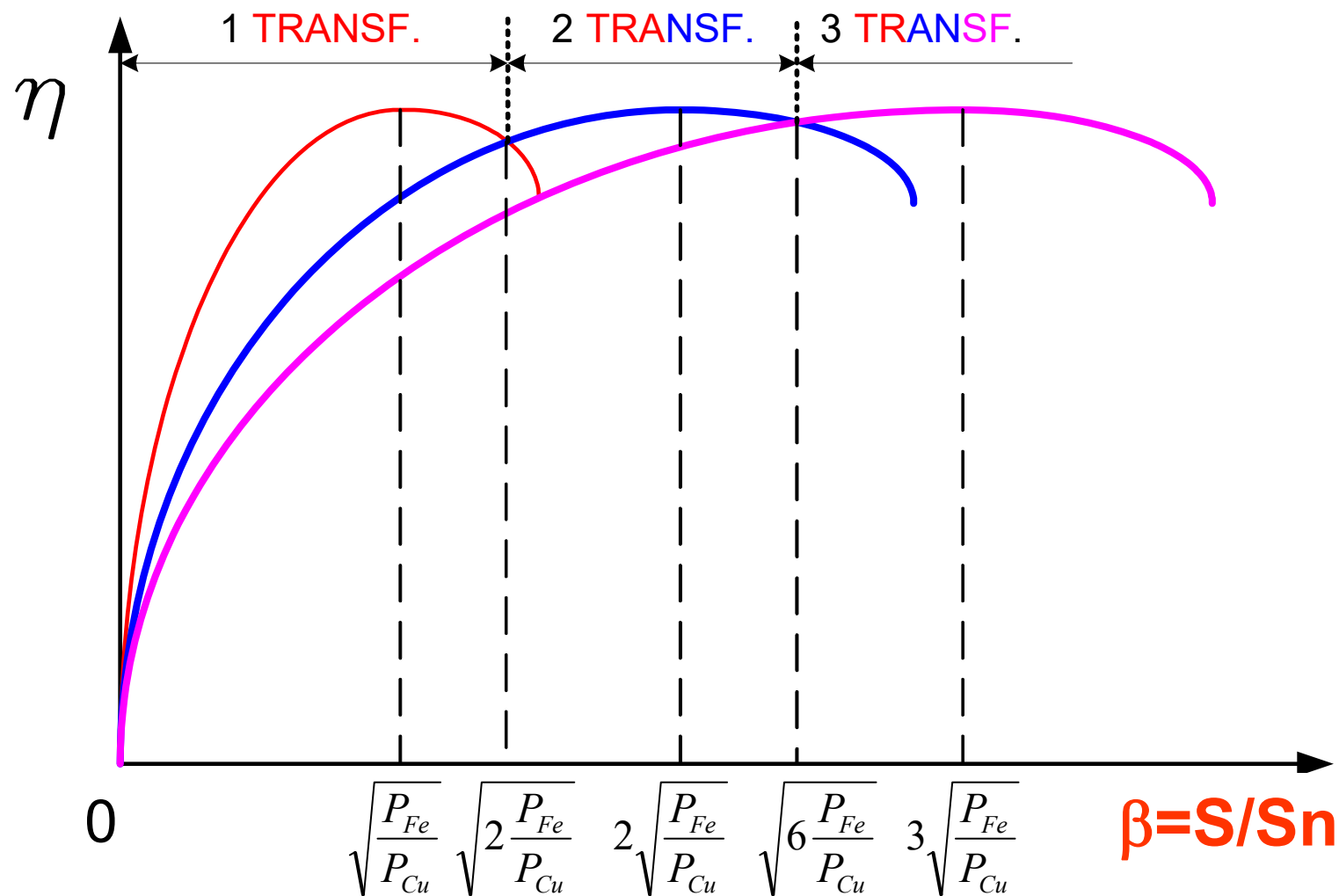
$$S_d = u_{k \min} \sum_{i=1}^m \frac{S_{ni}}{u_{ki}}$$

$$S_i = \frac{S_{ni}}{u_{ki}} u_{k \min}$$

u_{ki} - napon kratkog spoja i -tog transformatora

$u_{k \min}$ - napon kratkog spoja transformatora s minimalnim u_k

Koeficijent korisnosti grupe jednakih TR u paralelnom radu



Podela sprege TR prema satnim brojevima i mogućnosti paralelnog spajanja

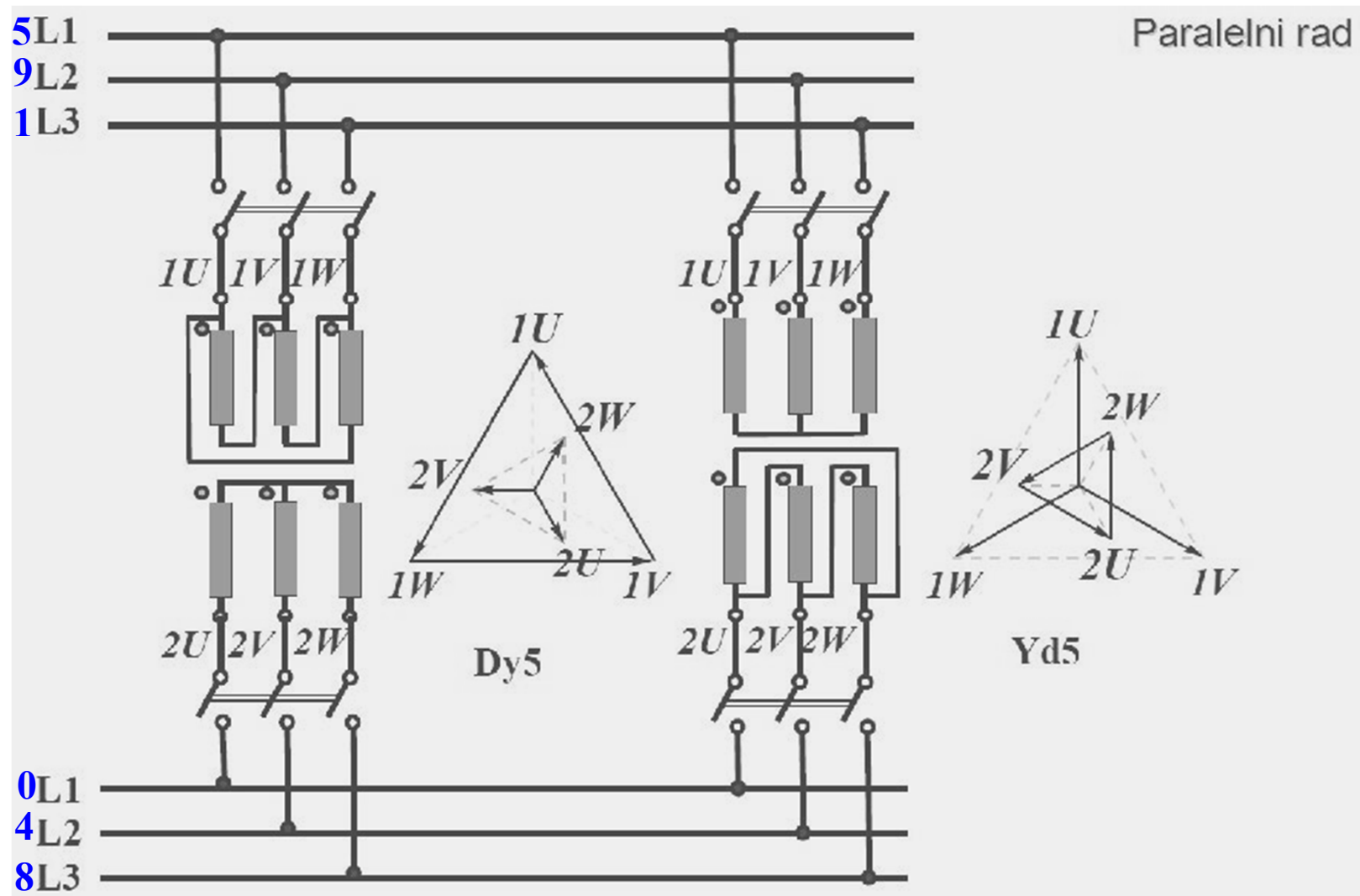
Način vezivanja ulaznih i izlaznih krajeva namotaja primara i sekundara naziva se sprezanje – sprega transformatora. Dve osnovne sprege namotaja su Y-zvezda i D ili Δ - sprega trougao. Način sprezanja namotaja primara i sekundara utiče na fazni pomak između napona na primaru i sekundaru. Kod trofaznih transformatora taj pomak je celobrojni umnožak ugla od 30° tj. $k \cdot 30^\circ$. Ugao od 30° odgovara uglu od jednog sata na analognom časovniku a broj k se naziva sati broj. Parni satni brojevi propadaju istorodnim spregama namotaja (Yy, Dd) a neparni satni brojevi raznorodnim spregama namotaja (Dy, Yd). Prema vrednosti satnog broja sprege transformatora su razvrstane u četiri grupe.

- *Grupa I* - satni broj 0, 4 i 8
- *Grupa II* - satni broj 2, 6 i 10
- *Grupa III* - satni broj 1 i 5
- *Grupa IV* - satni broj 7 i 11

Paralelan spoj transformatora spajanjem izvoda (bez otvaranja kotla) je moguć spajanjem transformatora samo iz iste grupe s parnim satnim brojevima i spajanjem transformatora s obe neparne grupe s neparnim satnim brojevima.

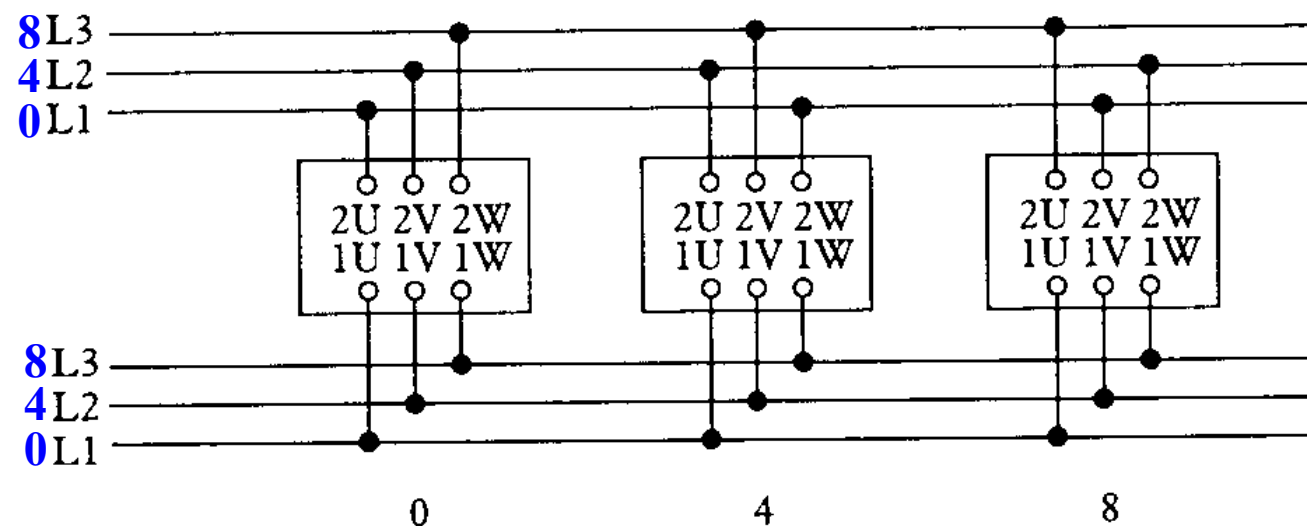
Paralelno spajanje transformatora grupe spoja Dyn i Yzn se ne preporučuju zbog različitih nultih reaktansi.

PARALELAN RAD TRANSFORMATORA Dy5 i Yd5

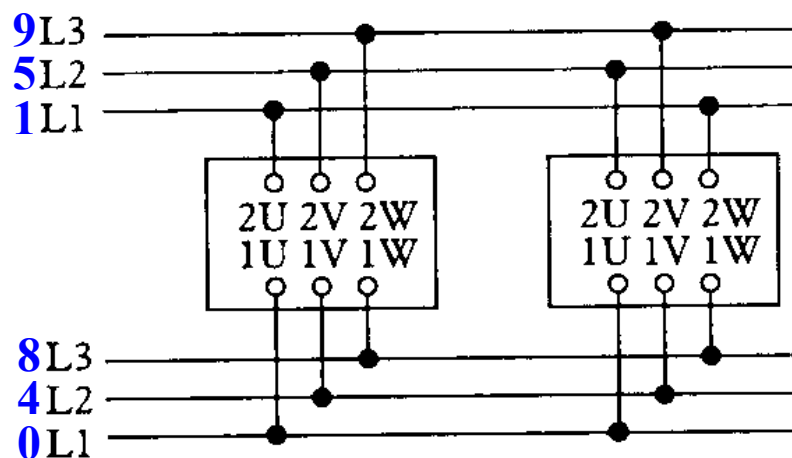


Paralelni spoj transformatora s različitim satnim brojevima – satni brojevi iz iste grupe

Grupa I



Grupa III

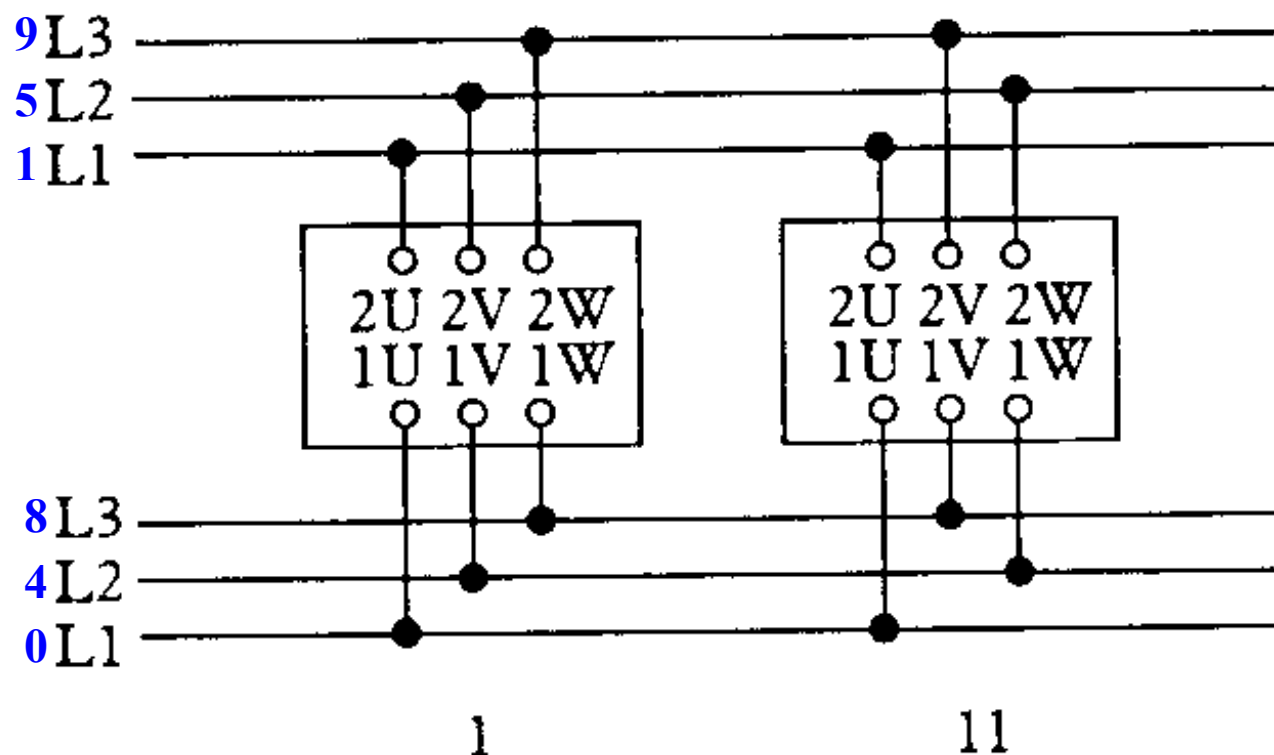


Skupina III

1

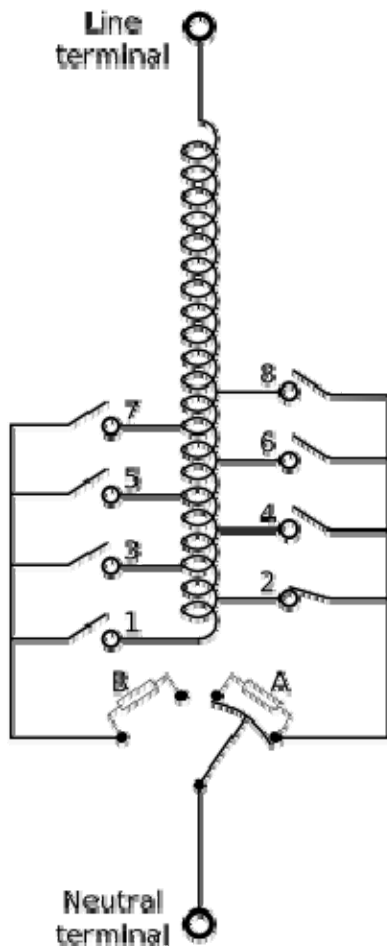
5

Mogućnost paralelnog rada transformatora iz različitih grupa (III i IV) - neparni satni brojevi



Vezivanje u paralelan rad TR iz grupe III i IV moguć je samo uz promenu redosleda faza transformatora (primara i sekundara) a uz isti redosled sabirnica. Satni broj za suprotan redosled faza je 12-k.

$$\Phi = \frac{U_{mr}}{4,44 f \cdot N}$$



Promena napona pod opterećenjem.
(110±10x1,5)/35kV

REGULACIONA SKLOPKA

Napon na transformatoru se menja sa promenom opterećenja. Da bi se napon **donekle** učinio nezavisnim od opterećenja menja se broj navojaka na VN strani transformatora u okviru regulacione sklopke, **teretnog menjača, tap changera**. Time se menja fluks odnosno napon na sekundaru. Regulacioni deo namotaja kod odvojnog TR se nalazi na delu namotaja prema zvezdištu.

Promena broja navojaka se realizuje:

- pod opterećenjem** (kod transformatora u prenosu) ili
 - u bezanaponskom stanju** (kod distributivnih transformatora).
- Uobičajena je promena ±2x2,5%.

Rated voltage [kV]	
HV	20 ± 2x2.5%
LV	0.42
Tap no.	HV voltage [V]
1	21000
2	20500
3	20000
4	19500
5	19000

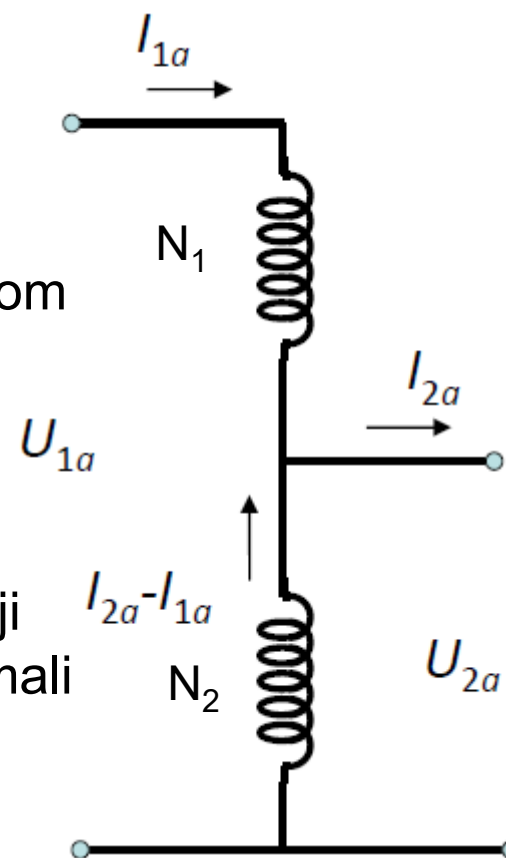
4.12. AUTOTRANSFORMATOR - Transformator u štednom spoju

Ako odvojnem transformatoru spojimo namotaje nižeg i višeg napona dobili smo autotransformator.

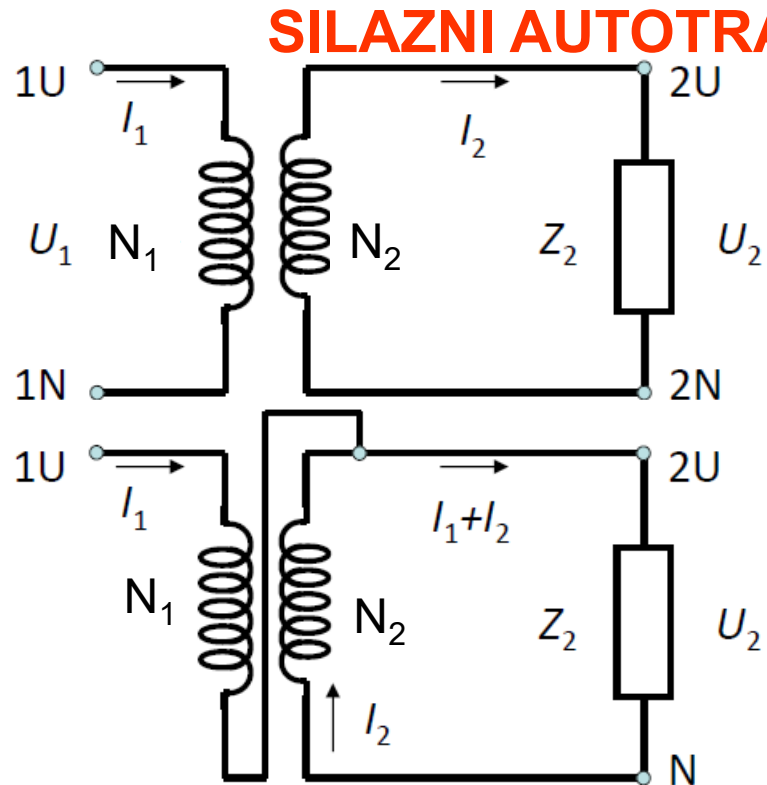
- Višenaponska strana autotransformatora sastoji se od serijskog i zajedničkog namota.
- Niženaponska strana se sastoji samo od zajedničkog namota.
- U autotransformatoru samo se deo snage prenosi induktivnim putem, dok se preostali deo prenosi direktno s primara na sekundar preko galvanske veze namota.

Budući da su zajednički i serijski namot namotani na istom stubu, za autotransformator važi isto što i za klasični dvonamotni transformator:

- Indukovani napon po navojku u oba namota je jednak,
- Amper navoji oba namota su praktično jednaki, ali suprotnog predznaka ($N_1 \cdot I_{1a} \approx N_2 \cdot (I_{2a} - I_{1a})$), tj. ampernavoji za magnećenje jezgra u današnjim izvedbama su vrlo mali (ispod 1%),
- Nazivne prividne snage oba namota su jednake, S_T .



SILAZNI AUTOTRANSFORMATOR



$$a = \frac{U_{1a}}{U_{2a}} = \frac{N_1 + N_2}{N_2} = \frac{I_{2a}}{I_{1a}}$$

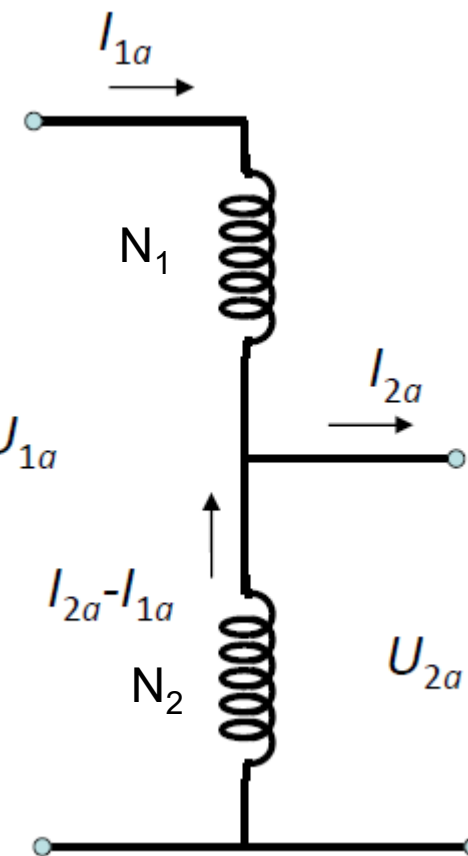
$$N_1 \cdot I_{1a} = N_2 (I_{2a} - I_{1a})$$

U_{1a} – Viši (Primarni) napon AT

U_{2a} – Niži (Sekundarni) napon AT

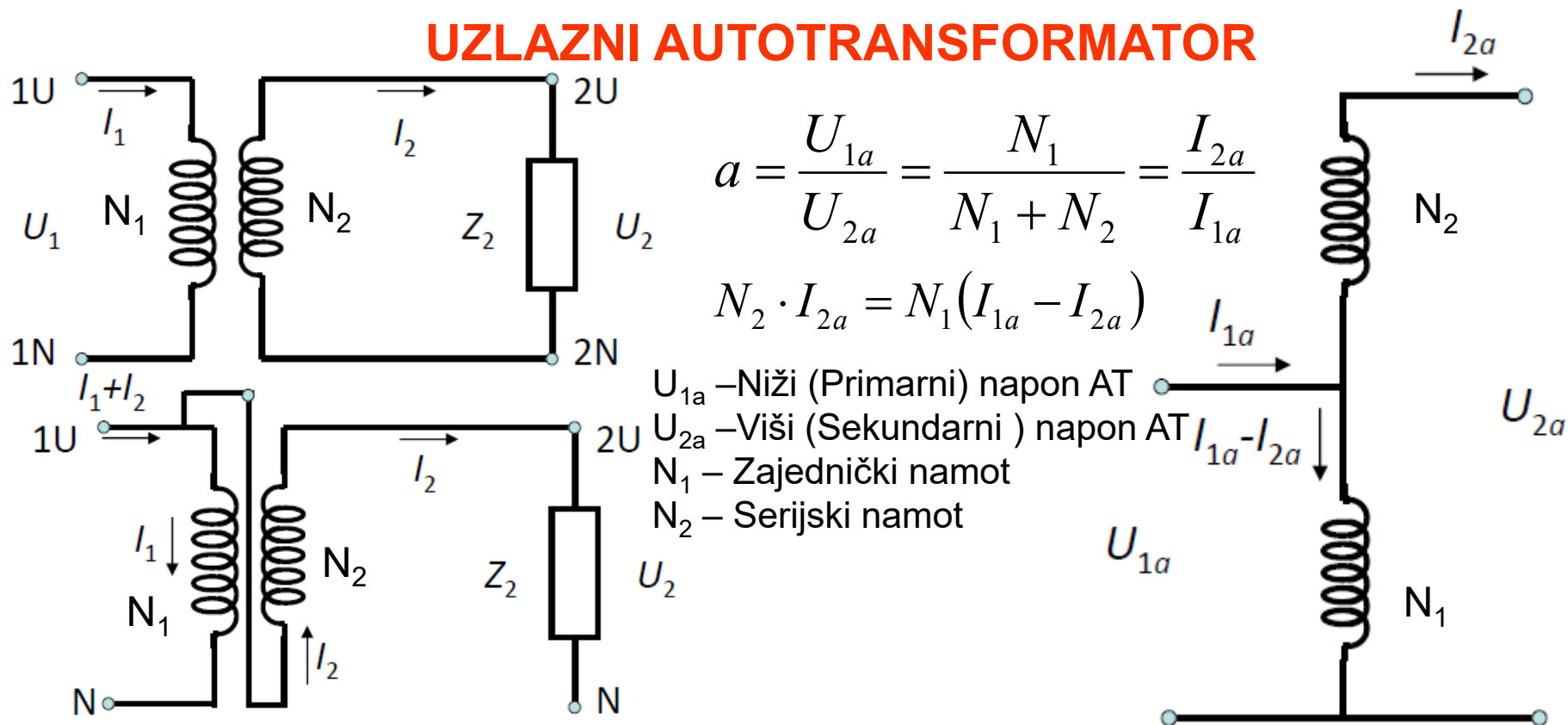
N_1 – Serijski namot

N_2 – Zajednički namot



Serijski namotaj spušta napon na potrošaču – Silazni AT (*bucking AT connection*).

UZLAZNI AUTOTRANSFORMATOR



Serijski namotaj podiže napon na potrošaču – Uzlazni AT (*boosting AT connection*).

SNAGA SILAZNOG AUTOTRANSFORMATORA

Snaga autotransformatora:

$$S_a = U_{1a} \cdot I_{1a} = (U_1 + U_2)I_1$$

$$S_a = U_1 I_1 \cdot \left(1 + \frac{U_2}{U_1}\right)$$

$$S_a = S_T \cdot \frac{U_{1a}}{U_{1a} - U_{2a}}$$

Tipska snaga transformatora

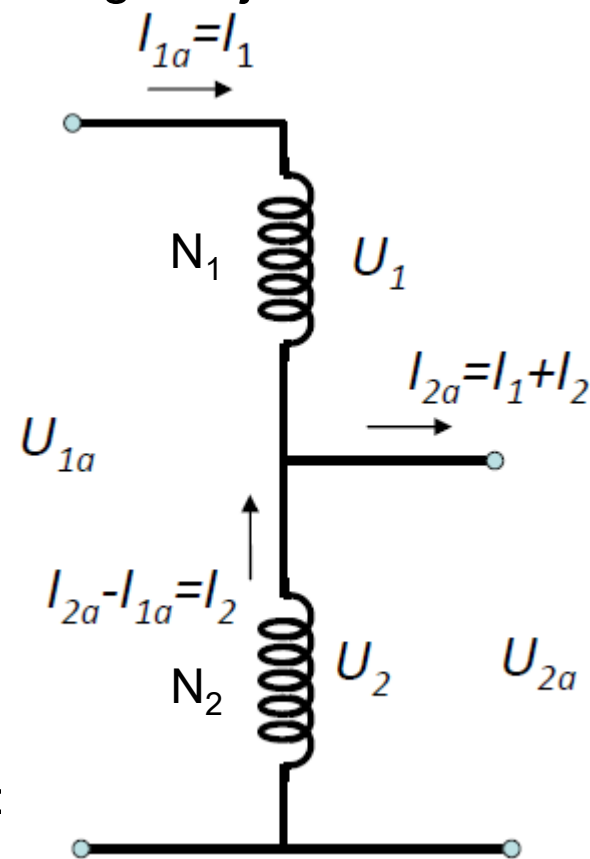
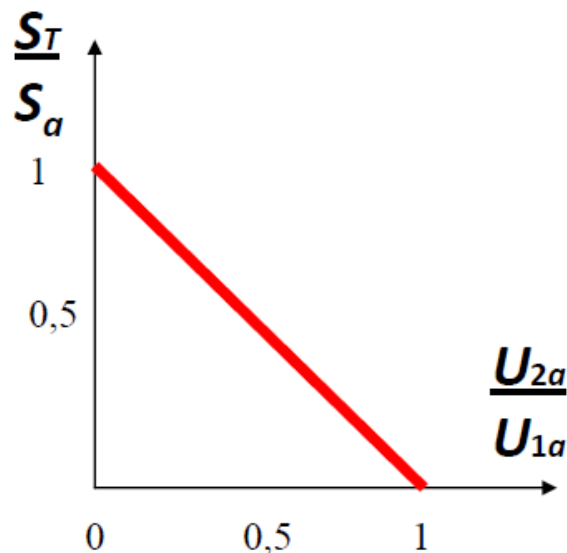
$$S_T = S_a \cdot \left(1 - \frac{U_{2a}}{U_{1a}}\right)$$

Faktor redukcije snage autotransformatora na tipsku snagu:

$$q = \frac{S_T}{S_a} = 1 - \frac{U_{2a}}{U_{1a}}$$

Primer: Ako je $U_{2a}/U_{1a}=0,9$ tada je $S_T=0,1S_a$. Odnosno $S_a=10S_T$. Faktor redukcije q kaže da ako ti treba auto transformator snage 10kVA i potreban ti je odnos napona $U_{2a}/U_{1a}=0,9$ (blizak jedinici) onda ti je dovoljan odvojni transformator za 1kVA vezan kao silazni autotransformator.

Tipska snaga transformatora - S_T je nazivna snaga odvojnog TR bez regulacije.



SNAGA UZLAZNOG AUTOTRANSFORMATORA

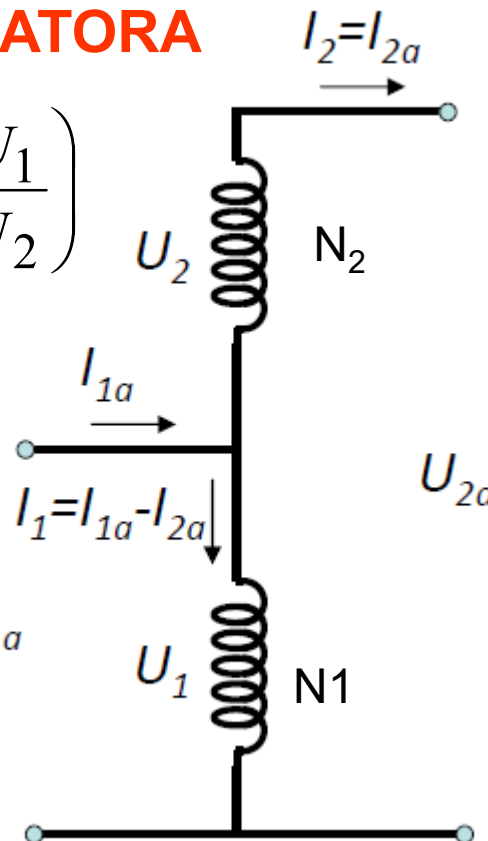
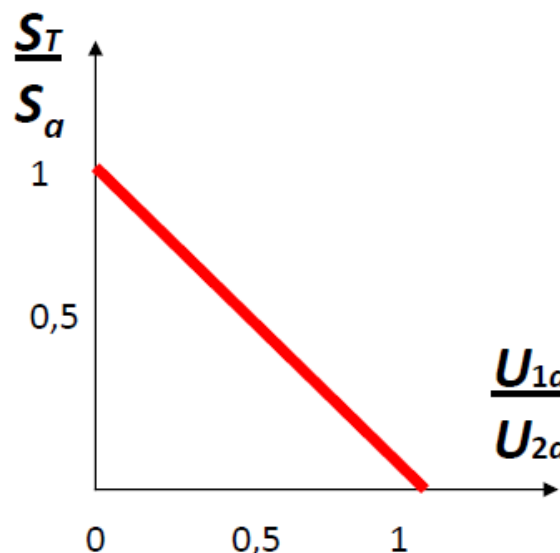
Snaga autotransformatora:

$$S_a = U_{1a} \cdot I_{1a} = U_1(I_1 + I_2) = U_1 I_1 \cdot \left(1 + \frac{I_2}{I_1}\right) = U_1 I_1 \cdot \left(1 + \frac{U_1}{U_2}\right)$$

$$S_a = S_T \cdot \frac{U_{2a}}{U_{2a} - U_{1a}}$$

Tipska snaga transformatora

$$S_T = S_a \cdot \left(1 - \frac{U_{1a}}{U_{2a}}\right)$$



Faktor redukcije snage autotransformatora na tipsku snagu:

$$q = \frac{S_T}{S_a} = 1 - \frac{U_{1a}}{U_{2a}}$$

Primer: Ako je $U_{1a}/U_{2a} = 220/400 \text{ kV/kV} = 0,5$ tada je $S_T = 0,5 S_a$. Odnosno $S_a = 2 S_T$.

Faktor redukcije q kaže da ako ti treba auto transformator snage 100MVA i potreban ti je odnos napona $U_{1a}/U_{2a} = 0,5$ onda ti je dovoljan odvojni transformator za svega 50MVA vezan kao uzlazni autotransformator. Svi transformatori u prenosu su autotransformatori.

AUTOTRANSFORMATOR- Faktor povećanja kapaciteta autotransformatora

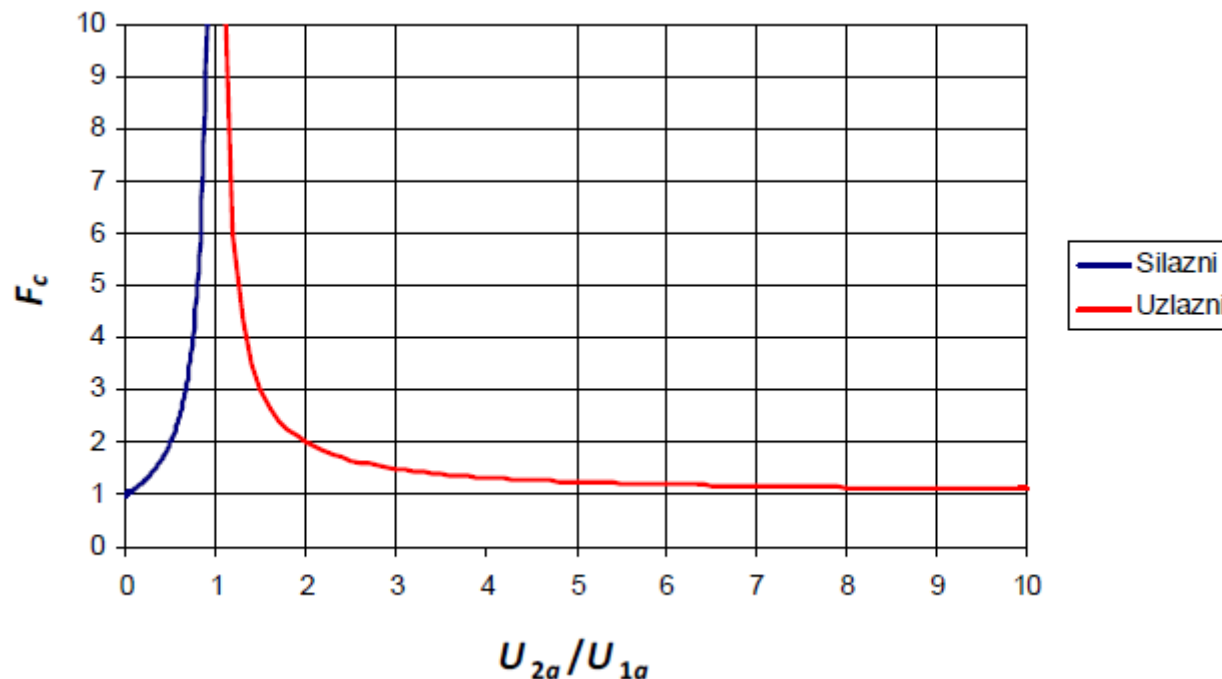
Povećanje snage kroz autotransformator (prolazne snage) u odnosu na tipsku snagu transformatora proizlazi iz činjenice da se deo snage prenosi galvanskom vezom između primarnog i sekundarnog namota, a ne samo posredstvom zajedničkog fluksa. Stoga se može definisati i faktor povećanja kapaciteta autotransformatora u odnosu na tipsku snagu prema sledećim izrazima:

Silazni autotransformator

$$F_c = \frac{S_a}{S_T} = \frac{1}{1 - \frac{U_{2a}}{U_{1a}}}$$

Uzlazni autotransformator

$$F_c = \frac{S_a}{S_T} = \frac{\frac{U_{2a}}{U_{1a}}}{\frac{U_{2a}}{U_{1a}} - 1}$$



Što su bliži naponi U_{1a} i U_{2a} to je veća snaga autotransformatora u odnosu na tipsku. Silazni autotr. se koristi samo za $U_{2a}/U_{1a} \approx 1$. Uzlazni autotr. ima prednosti u odnosu na odvojni ako je $U_{2a}/U_{1a} < 10$.

KONČAR

POWER TRANSFORMERS

ТРОФАЗНИ АУТОТРАНСФОРМАТОР ТИП: 1 ARZ 300 000-420/E				СЕРИЈСКИ БРОЈ 30N100801.01-02		ГОДИНА 2012.	ЕС 60076
НАЗИВНА СНАГА 300 000 / 300 000 / (70 000) kVA				ТИП ХЛАЂЕЊА OFAF			ВН SI 1050 LI 1425-LI 550 AC 230
ГРУПА СПОЈА YNaO+d5				ФРЕКВЕНЦИЈА 50 Hz		РАДНИ УСЛОВИ ТРАЈНИ	
ПОЛОЖАЈ	НАПОН			СТРУЈА			НАПОН КРАТКОГ СПОЈА при 75 °C (ВН+НН - 300 MVA) / (ВН+СТАБ - 70 MVA) / (НН+СТАБ - 70 MVA)
	ВН	НН	СТАБ	ВН	НН	СТАБ	
1	439 820 V	115 000 V	(11 940) V	393.8 A	1 506.1 A	- A	%
9	400 000 V	115 000 V	(10 500) V	433.0 A	1 506.1 A	- A	%
17	368 770 V	115 000 V	(9 320) V	469.7 A	1 506.1 A	- A	%
СТАБИЛИЗАЦИОНИ НАМОТАЈ 70 000 kVA; 10 500 V				МАКС. ТЕМПЕРАТУРА ОКОЛИНЕ 40°C		УКУПНА МАСА 269 000 kg	
ТРАЈАЊЕ СТРУЈЕ КРАТКОГ СПОЈА 2 s				СРЕДЊА НАДТЕМП. НАМОТАЈА 65 K		МАСА АКТИВНОГ ДЕЛА 161 000 kg	
ТИП УЉА NUTRO 10XN ИНХИБИРАНО				МАКС. НАДТЕМП. УЉА 60 K		МАСА УЉА 65 000 kg	
ТИП РЕГУЛАЦИОНЕ СКЛОПКЕ R III 1200Y-123/C-10193WR				СЕРИЈСКИ БРОЈ	НАЗИВНА СТРУЈА 1200 A		ТРАНСПОРТНА МАСА (без уља) 192 000 kg

Za AT podataka datih na natpisnoj pločici odrediti Faktor redukcije snage AT na tipsku snagu, Faktor povećanja kapaciteta autotransformatora u odnosu na tipsku snagu, Nazivnu snagu serijskog i zajedničkog namota.

$$q = \frac{S_T}{S_a} = 1 - \frac{U_{1a}}{U_{2a}} = 1 - \frac{1}{400/115} = 1 - \frac{1}{3,48} = 0,71$$

$$F_c = \frac{S_a}{S_T} = \frac{1}{q} = \frac{1}{0,71} = 1,41$$

$$S_T = S_a \cdot q = 300 \cdot 0,71 = 213 \text{ MVA}$$

AUTOTRANSFORMATOR -Transformator u štednom spoju

Prednost autotransformatora prema odvojnog transformatoru je što su za iste napone i snagu manjih dimenzija, manjih gubitaka, veće korisnosti, lakše se transportuju, imaju manju cenu.

Sprega trofaznog namota autotransformatora mora biti u zvezdu **YNa0 da bi se mogao jedan izvod zajedničkog namota uzemljiti.**

Negativne strane autotransformatora proizlaze iz galvanske veze primarnog i sekundarnog strujnog kruga i time direktnog prenosa prenapona s jednog na drugi.

AT ima manju Z_k zbog čega ima manji pad napona ali je zato veća struja kratkog spoja.

Izolacija autotransformatora je kompleksniji zbog gotovo uvek izvedenih dodatnih regulacijskih navojaka.

AUTOTRANSFORMATORI

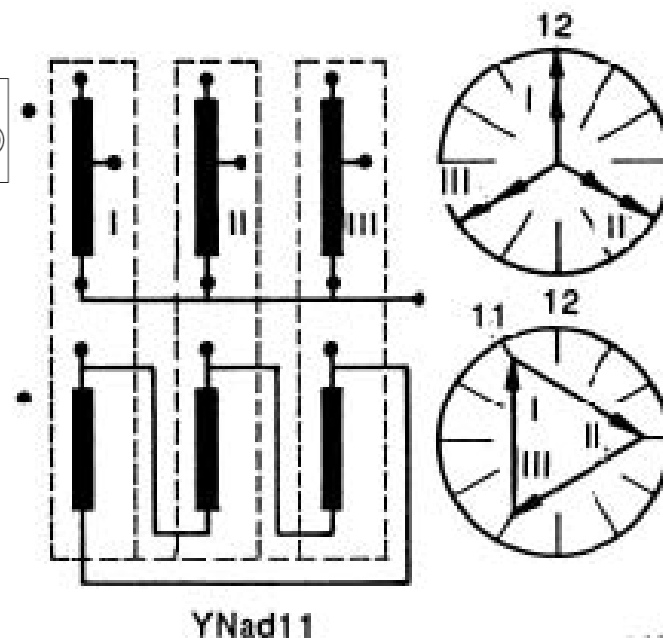
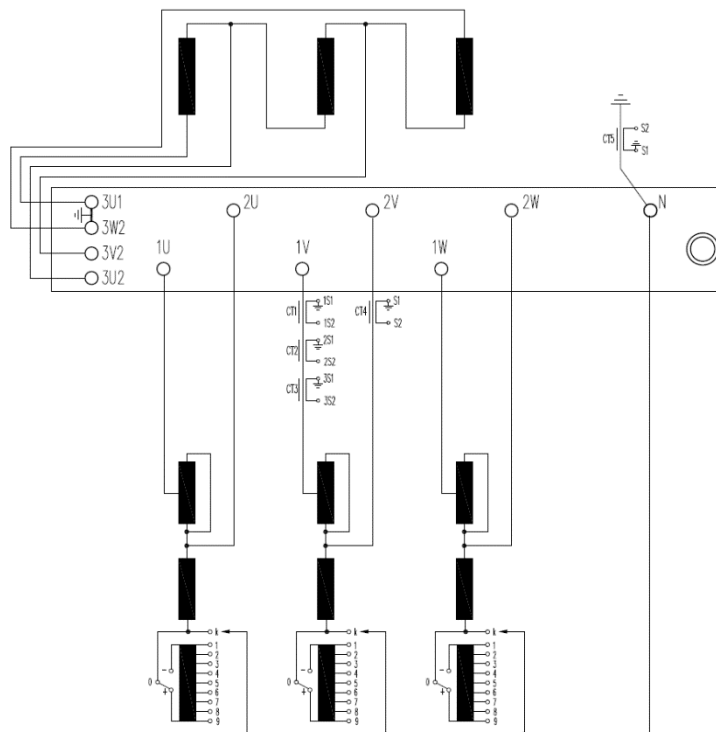
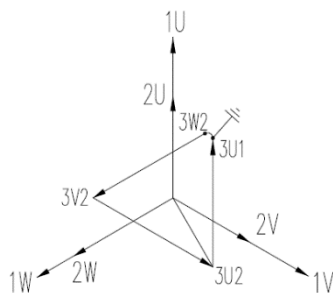
Zbog uštede se često primenjuju autotransformatori za velike snage pri povezivanju VN mreža (400, 220 i 110 kV) bliskih napona.

Najčešće se u prenosnoj mreži izrađuju transformatori s VN i SN namotima spojenim u zvezdu u štednom spoju, a NN namot je galvanski odvojen i spojen je u trougao - tercijar.

Taj se tercijar obično ne koristi za napajanje svoje mreže i tada ga nazivamo stabilizacijski namot, kojim se ostvaruje da u fluksu transformatora i u indukovanom naponu nema trećeg harmonika.

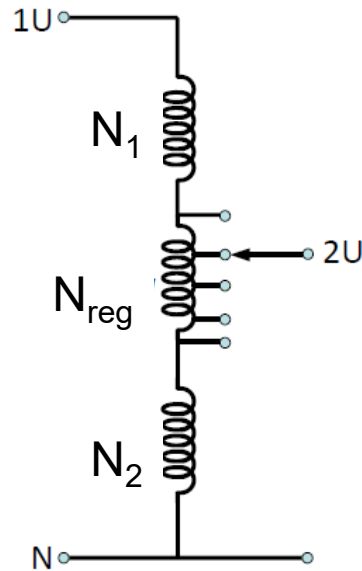
Često se autotransformatorima dograđuje regulaciona sklopka zbog mogućnosti podešavanja prenosnog odnosa pod opterećenjem.

Положај	Положај преклопке	Ознака контакта брече	ВН		НН		СЦАБ	
			Напон (V)	Струја (A)	Напон (V)	Струја (A)	Напон (V)	Струја (A)
17	0-	9	388 770	466.7	115 000	1 506.1	(9 320)	-
16		8	372 300	465.2			(9 450)	-
15		7	375 920	460.7			(9 580)	-
14		6	379 650	456.2			(9 720)	-
13	0+	5	383 480	451.7			(9 860)	-
12		4	387 430	447.1			(10 010)	-
11		3	391 490	442.4			(10 160)	-
10		2	395 680	437.7			(10 310)	-
9c		1	400 000	433.0			(10 500)	-
9b		k	400 000	433.0			(10 500)	-
9a		9	400 000	433.0			(10 500)	-
8		8	404 450	428.2			(10 630)	-
7	0+	7	408 890	423.6			(10 800)	-
6		6	413 630	418.7			(10 980)	-
5		5	418 520	413.9			(11 180)	-
4		4	423 580	408.9			(11 340)	-
3		3	428 810	403.9			(11 530)	-
2		2	434 220	398.9			(11 750)	-
1		1	439 820	393.8			(11 940)	-

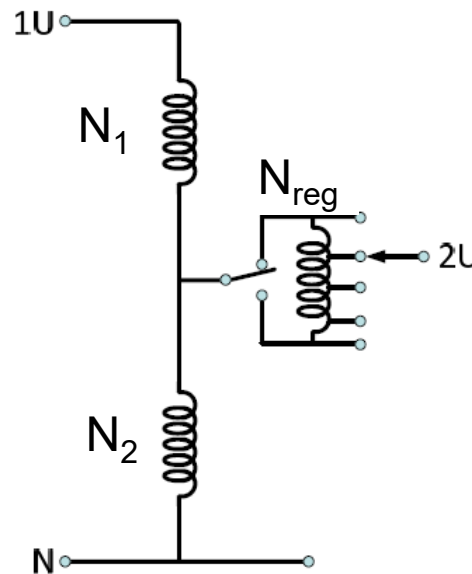


REGULACIJA NAPONA AUTOTRANSFORMATORA

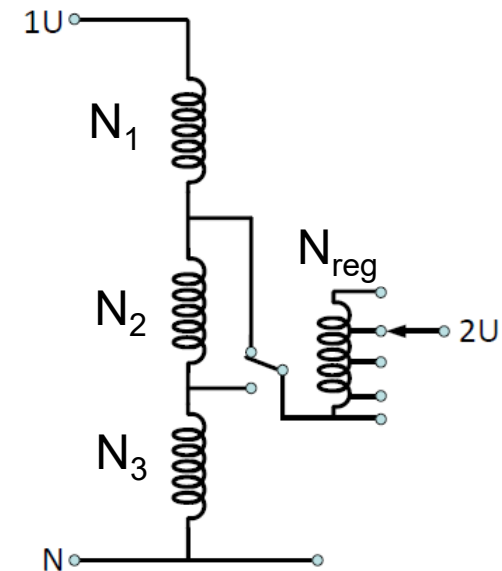
U cilju održanja stalnog napona na NN strani transformatora menja se prenosni odnos autotransformatora regulacionom sklopkom. Ako bi se regulacioni deo namotaja nalazio u zvezdištu otežano je podešavanje traženog prenosnog odnosa, treba više regulacionih navojaka, nejednaka je promena napona za svaki položaj reg.sklopke, ali jednostavna izvedba izolacije. Regulacioni deo namotaja kod AT smešta se na deo namotaja nižeg napona.



$$\frac{U_{2a}}{U_{1a}} = \frac{N_2 + \frac{k}{N_p - 1} N_{reg}}{N_1 + N_2 + N_{reg}}$$



$$\frac{U_{2a}}{U_{1a}} = \frac{N_2 \pm \frac{k}{N_p - 1} N_{reg}}{N_1 + N_2}$$



$k = 0, \dots, N_p - 1$
 N_p broj položaja regulacione sklopke.

N_{reg} – Regulacioni navojci

4.16.UKLJUČENJE TRANSFORMATORA

-Pri uključenju transformatora na mrežu može poteći struja uključenja (inrush current) koja je znatno veća od nazivne struje transformatora. Uzrok ovome jeste nelinearnost magnetnog kola. Radna tačka na karakteristici magnećenja brzo odlazi u oblast zasićenja.

-Veličina struje uključenja zavisi od trenutka uključenja i od remanentne indukcije u jezgru.

-Pri prvom uključenju (bez remanencije) najmanja je struja u fazi u kojoj je napon maksimalan, a najveća u fazi u kojoj je u trenutku uključenja napon nula.

-U najgorem slučaju i uz dodatak zbog remanentnog magnetizma struja uklj. može postići i do $40 \times I_{\text{nom}}$ transformatora.

-Struja uključenja može izazvati niz neugodnosti u mreži kao što su: pogrešno delovanje zaštitnih uređaja, uticati na druge transformatore priključene na iste sabirnice, povećanje buke transformatora zbog velikog iznosa struje, pojava povećanih padova napona u mreži.

UKLJUČENJE TRANSFORMATORA

Jednačina naponske ravnoteže primara u p.h.:

$$\frac{d\Phi}{dt} + R_1 \cdot i_0 \approx \frac{d\Phi}{dt} + \frac{R_1}{L_1} \cdot \Phi = U_m \sin(\omega t + \alpha)$$

$$\Phi = \Phi_{stac} + \Phi_{ap} = \Phi_n \cdot [\sin(\omega t + \alpha - \varphi_0) - \sin(\alpha - \varphi_0) e^{-\frac{R_1}{L_1} t}]; \quad \Phi_n = \frac{U_m}{4,44 \cdot f \cdot N_1}$$

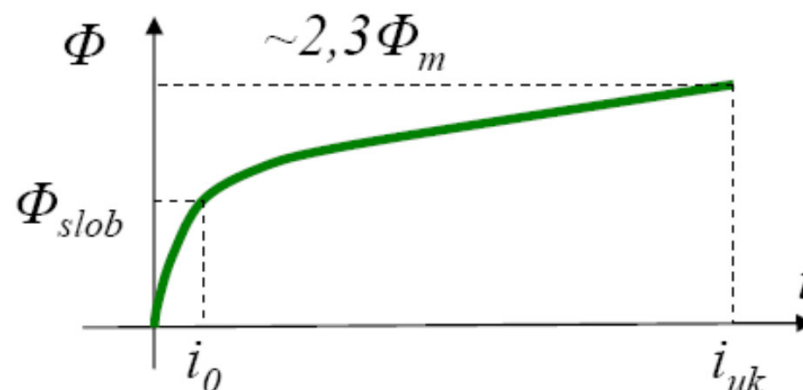
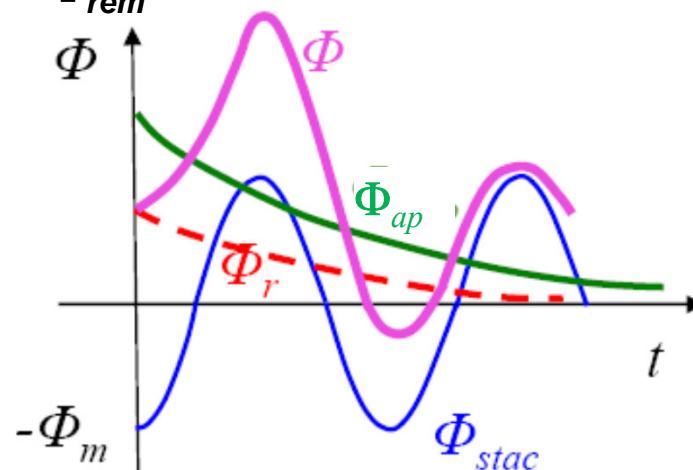
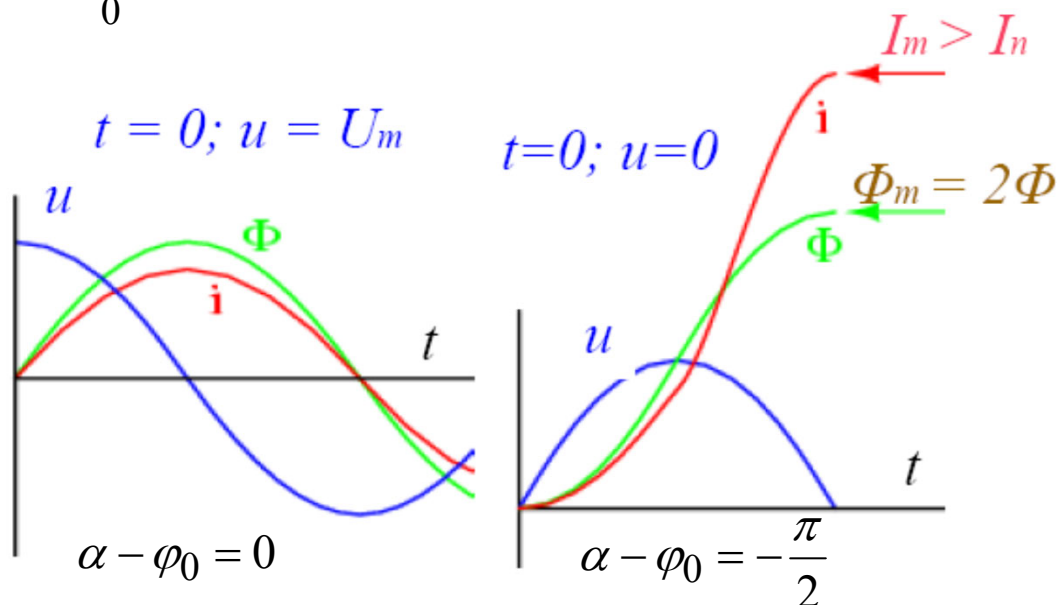
$$\varphi_0 = \arctan \frac{\omega L_1}{R_1} \approx \frac{\pi}{2}$$

Najveći Φ će biti za $\alpha - \varphi_0 = -\frac{\pi}{2} \Rightarrow \Phi_m \approx 2 \cdot \Phi_n$ i ovo će nastupiti u $\omega t = \pi$.

Sa uvaženom remanentnim fluksom $\Phi_m = 2 \cdot \Phi_n + \Phi_{rem}$

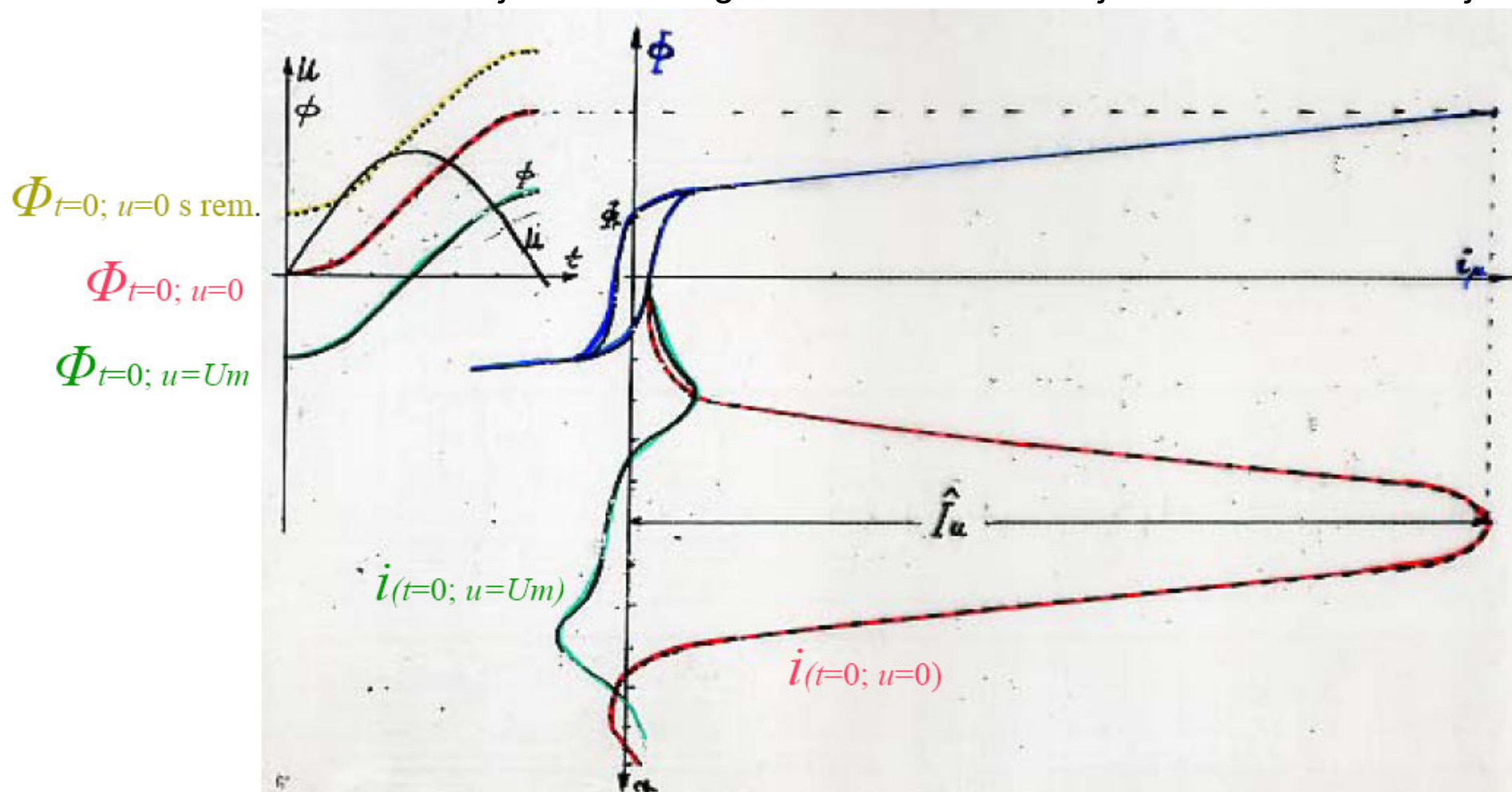
Najveći fluks se uspostavlja ako u trenutku uključenja napon prolazi kroz nulu!

$$\Phi = \int_0^t u(t) dt$$



STRUJA UKLJUČENJE TRANSFORMATORA

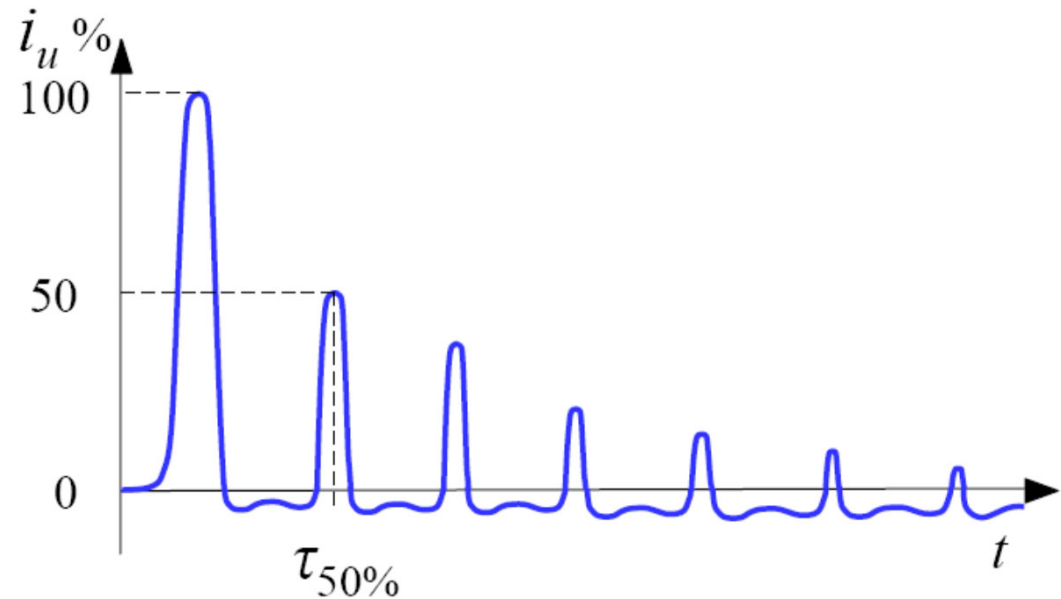
Vidi se da fluks neposredno po uključenju može dostići vrednosti i preko dva puta veće od onih u stacionarnom stanju. To se zbog nelinearnosti znatno jače odražava na struju.



Vremenski tok struje uključenja. Dobijen je preslikavanjem fluksa Φ preko krive magnećenja.

STRUJA UKLJUČENJE TRANSFORMATORA

Struja uključenja $I_{u \max} / I_{n \max} = 9 \div 15$ (40) $\tau_{50\%} = 0,1\text{s}$ do 80s

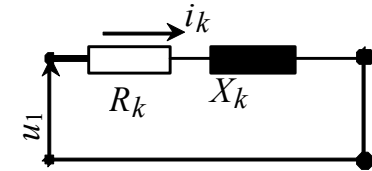


Struja uključenja transformatora.

Struja uključenja TR ima parne harmonike.

Sympathetic inrush. Dolazi do promene u struji transformatora koji je već na mreži usled uključenja susednog transformatora. Nastaje usled promene napona izazvanog strujom uključenja.

4.16.2 Udarni kratak spoj



Najveća struja ks. se dobija ako se TR trenutno kratko spoje sekundarne stezaljke, a pri punom naponu na primaru.

Pretpostavimo zbog lakšeg računa da je pre toga TR bio u praznom hodu.

Kada se zanemari impedansa mreže efektivna vrednost struje kratkog spoja – **trajna struja kratkog spoja**, pri nominalnom naponu na primaru iznosi:

$$I_k = \frac{U_n}{Z_k} = \frac{100}{u_k \%} \cdot I_n$$

Struja I_μ (praznog hoda) i fluks su u fazi pa ako je struja nula u trenutku uključenje to je i fluks nula, pa onda po teoremi o zaleđenom fluksu neće trebati da se pojavi aperiodična komponenta tj. odmah se uspostavlja trajna struja ks.

Ako je kratki spoj nastao u trenutku kad je trenutna vrednost struje praznog hoda jednaka nuli, prelaz iz praznog hoda u kratki spoj je bez prelazne pojave tj. odmah se uspostavlja trajna struja kratkog spoja.

Pri naponu mreže: $u_1 = U_m \sin(\omega t + \alpha)$

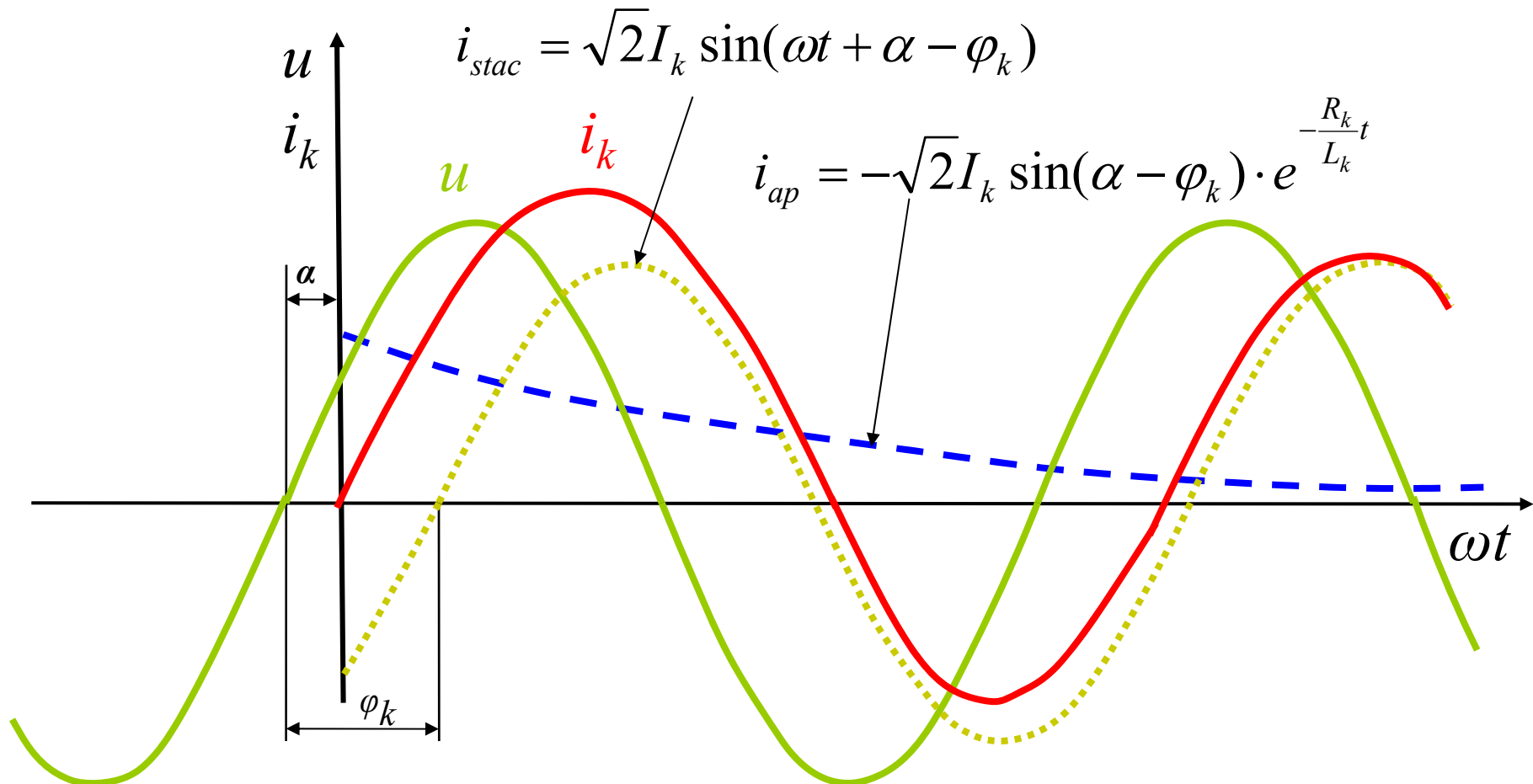
trajna struja kratkog spoja je: $i_k = I_k \sqrt{2} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k)$

U svim ostalim slučajevima imamo aper. komp i udarnu struju kratkog spoja.

Struja transformatora u kratkom spoju

Jednačina naponske ravnoteže u k.s.: $L_k \frac{di_k}{dt} + R_k \cdot i_k = U_m \sin(\omega t + \alpha)$

$$i_k = i_{stac} + i_{ap} = \sqrt{2}I_k \cdot \left[\sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) - \sin(\alpha - \varphi_k) \cdot e^{-\frac{R_k}{L_k}t} \right]; \varphi_k = \arctan \frac{\omega L_k}{R_k}$$



Sile na namote u transformatoru u kratkom spoju

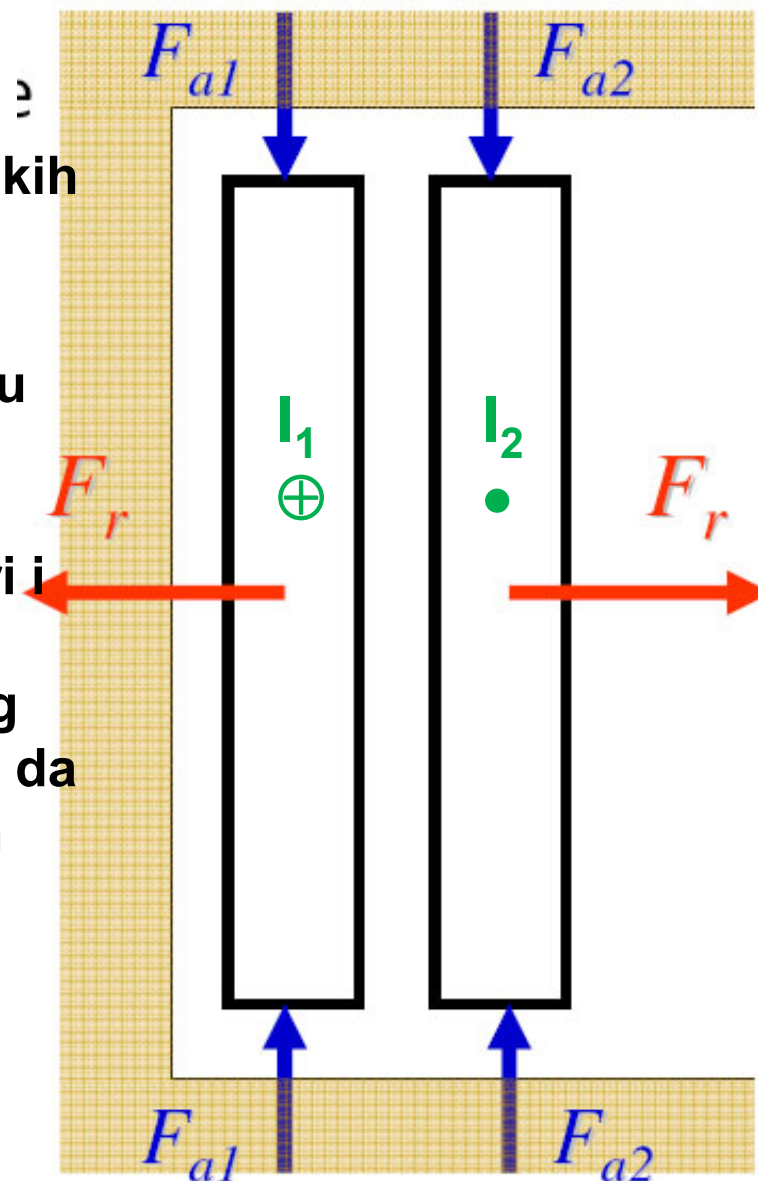
Pod dejstvom struje kratkog spoja namotaji TR su izloženi:

1. Termičkom naprezanju koje obično nije kritično zbog kratkog trajanja,
2. Mehaničkom naprezanju zbog pojave velikih sila na namote transformatora koje mogu oštetiti namote.

Smerovi aksijalne i radijalne sile su u skladu sa Bio-Savarovim zakonom.

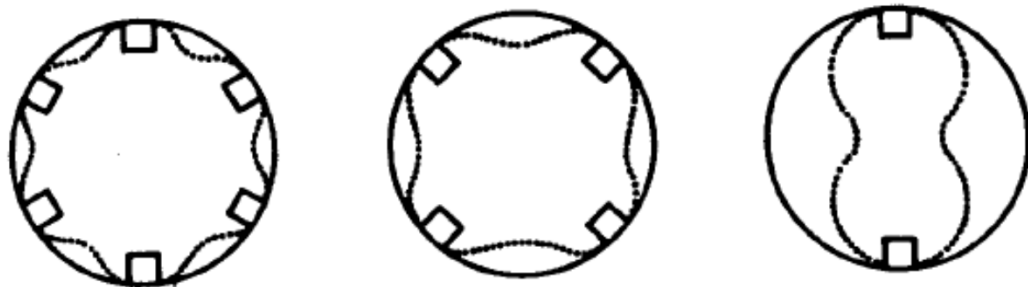
Sila između namota je odbojna. Ona teži da unutrašnji namot skupi a spoljašnji da raširi i ova sila je radijalnog pravca.

U okviru namota struja kroz navojke je istog smera te dolazi do privlačenja- namotaj teži da se skupi. Ova sila se ispoljava u aksijalnom pravcu.



Deformacije namota nastale zbog kratkog spoja transformatora u pogonu

Deformacije unutrašnjeg namota



Tipični primer deformacije unutrašnjeg namota:

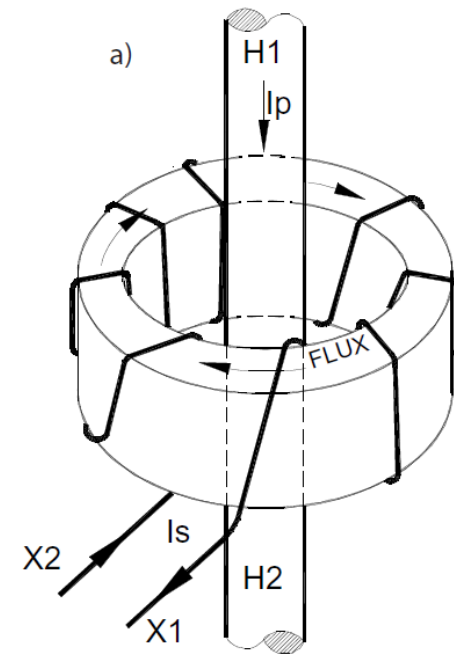
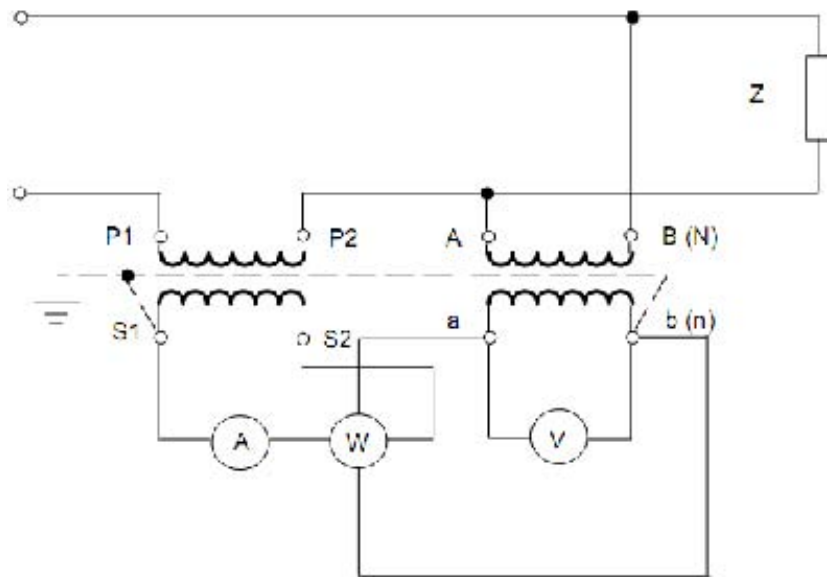


Deformacije namota nastale zbog kratkog spoja transformatora u pogonu



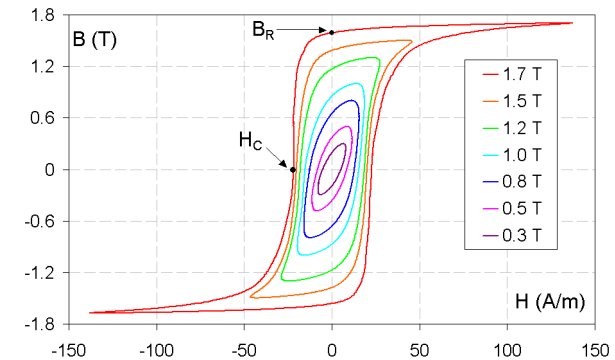
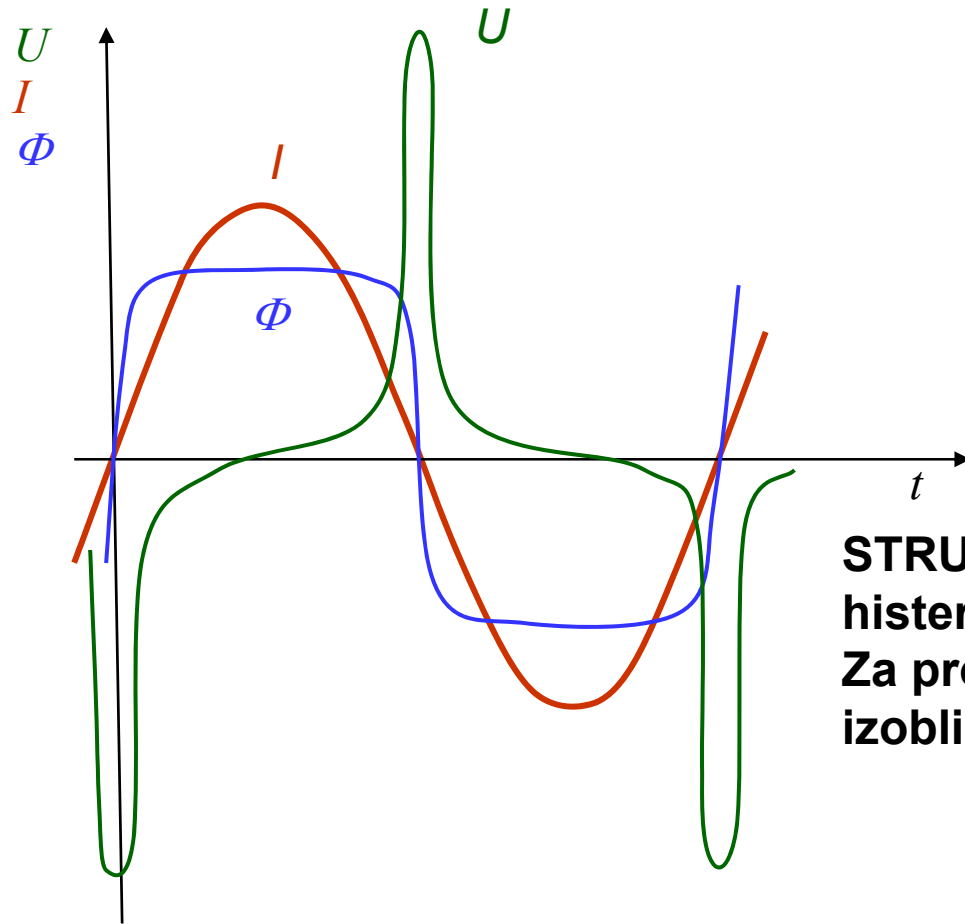
4.14 MERNI TRANSFORMATORI

Primar strujnog mernog transformatora se spaja redno s opterećenjem, a kod naponskog paralelno. Na sekundar MT spaja se potrošač - instrumentacija i/ili zaštitna oprema. Jedna stezaljka MT se uzemljuje. Primarna struja SMT određena je potrošačem i na nju se ne može uticati opterećenjem u sekundaru. Ako je otpor opterećenja u sekundaru veći od dozvoljenog sekundarna struja će biti nedovoljna da poništi primarne ampernavojke usled čega se primarna struja pojavljuje kao struja magnećenja → raste indukcija. **Primer spoja naponskog i strujnog transformatora za merenje struje ampermetrom, napona voltmetrom i snage vatmetrom.** a) **Primer magnetnog kola i namotaja SMT.**



Radna indukcija je za NMT $B \approx 1\text{T}$ a za SMT $B = 0,1 - 0,2\text{T}$. Struja magnećenja NMT je kao kod energetskog TR dok je za SMT osetno manja.

MERNI TRANSFORMATORI



STRUJA primara šeta radnu tačku po histerezisnoj petlji.
Za prostoperiodičnu struju fluks je izobličen.

Najgora situacija po SMT je otvoren sekundar. Čitava primarna struja magneti SMT što dovodi do povećanja indukcije i napona na stezaljkama, zasićenja, gubitaka i zagrevanja. Može doći do oštećenja SMT. SMT ne sme nikada imati otvorene sekundarne stezaljke, mora biti kratko spojen ili opterećen malim otporom.



BUHOLC RELE

Buholc rele je zaštitni uređaj koji se postavlja između kotla i konzervatora uljnog transformatora i u normalnom je radu ispunjen uljem.



BUHOLC RELE

Рад Бухолц-релеја се заснива на развијању гасова приликом појаве електричног лука насталог услед оштећења изолације намотаја или изолације између лимова. Састоји из коморе са два пловка са контактима.

Гасови на путу ка конзерватору долазе у Бухолц-релеј, постепено истискујући уље услед чега горњи пловак пада следећи ниво уља док не затвори контакт сигналног струјног круга. Тиме се добија упозорење да постоји мањи квар у трансформатору.

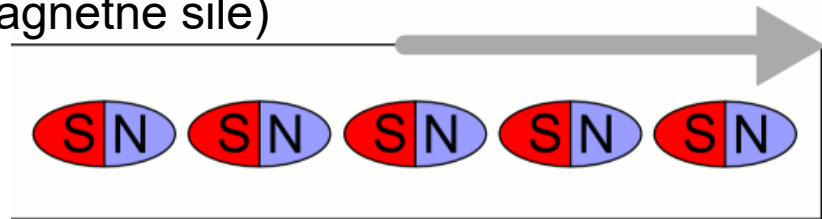
Ако у трансформатору наступи већи квар (кратак спој), настаје веома брзо струјање уља тако да ће доћи пловак који се налази на правцу струјања уља према конзерватору нагло пасти и затворити свој контакт, а тиме и окидни струјни круг, што ће довести до искључења трансформатора.



BUKA

Tri su osnovna izvora buke u transformatoru:

- vibracije magnetnog kola (magnetostrikcija, magnetne sile)
- aerodinamična buka hladnjaka (ventilatori)
- vibracije namota (elektromagnetske sile)

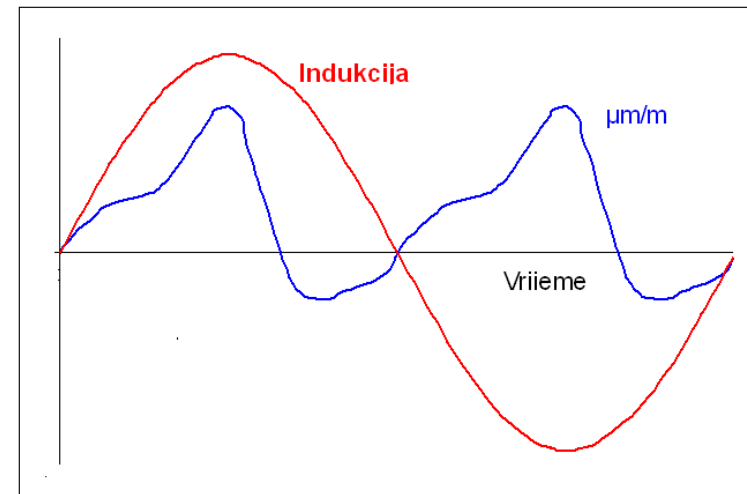
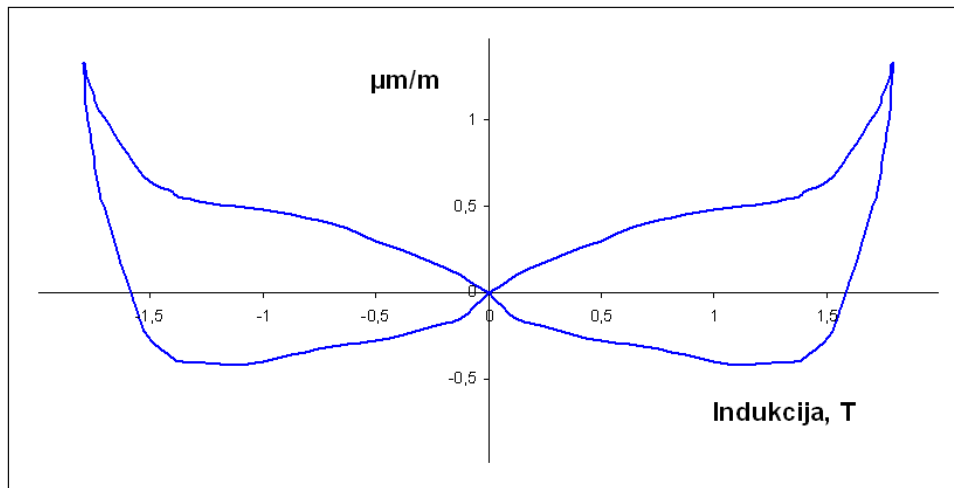


Vibracije magnetnog kola. Buka ph.

Magnetostrikcija je promena dimenzija feromagnetika u magnetnom polju.

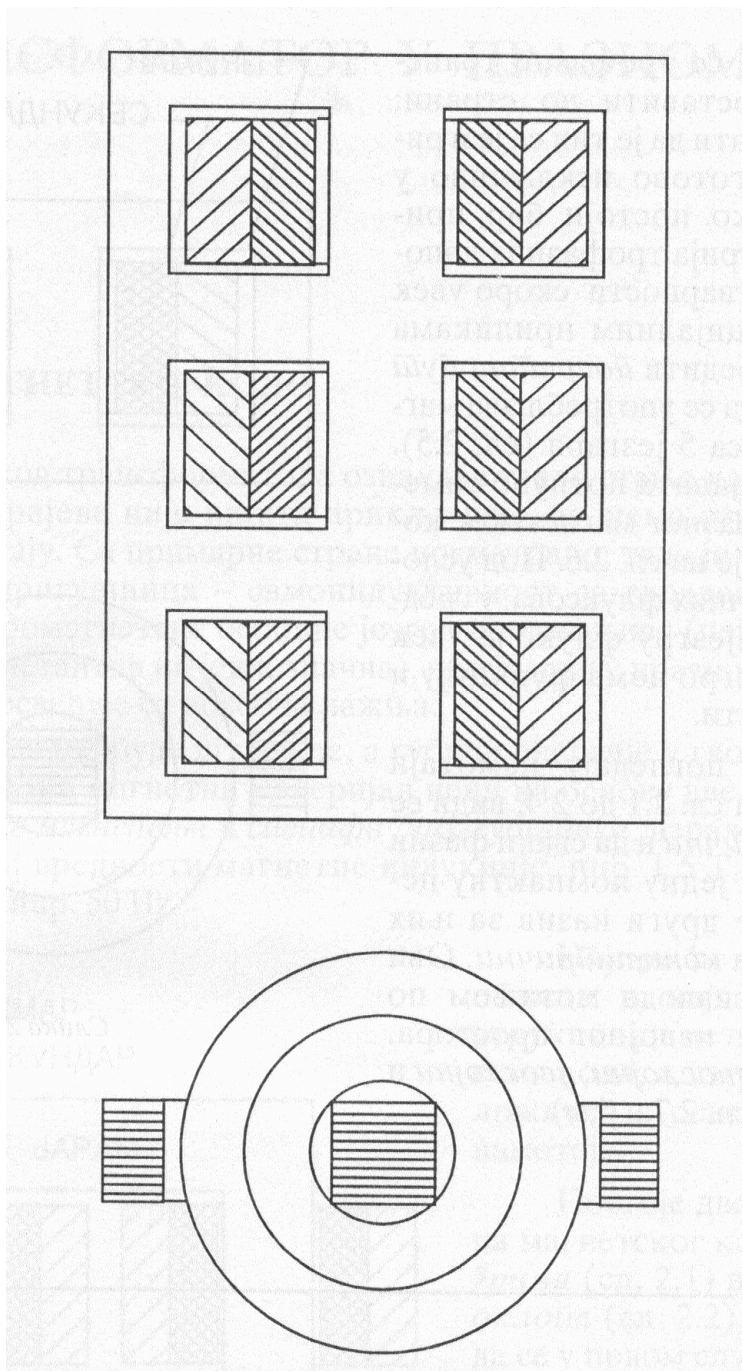
Za uobičajene limove relativna promena je nekoliko $\mu\text{m}/\text{m}$. Njena vrednost zavisi od indukcije, vrste materijala i mehaničkih naprezanja.

Magnetne sile nastaju između limova u spojevima (preklopima) stubova i jarmova.



Frekvencija prvog harmonika vibracija jezgra je 2x frekvencije mreže tj. 100Hz.

Vibracije namota. Buka usled opterećenja. Elektromagnetske sile na provodnike namota, koji su proticani strujom tereta, proizvode aksijalne i radijalne vibracije namota osnovne frekvencije dva puta veće od frekvencije mreže.



Primeri magnetnog kola trofaznog transformatora u obliku oklopa

