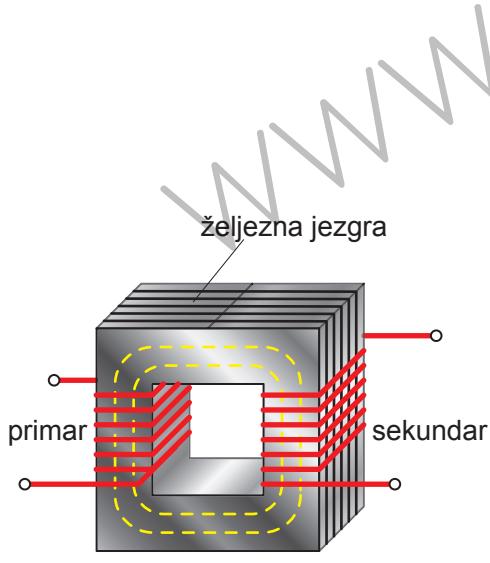


# 1. Transformatori

- 1.1 Fizikalna slika rada transformatora
- 1.2 Stvarni transformator
- 1.3 Reduciranje transformatorskih veličina
- 1.4 Pokus praznog hoda i kratkog spoja
- 1.5 Nadomjesna shema transformatora
- 1.6 Konstrukcijski dijelovi i funkcija
- 1.7 Proračun mrežnog transformatora
- 1.8 Trofazni transformator
- 1.9 Posebne vrste transformatora
- 1.10 Prigušnica
- 1.11 Elektromagnetsko pojačalo
- 1.12 Zaštita transformatora



Slika 1.1-1

Glavni dijelovi transformatora sa željeznom jezgrom

Transformator je električni uređaj koji međuinduktivno povezuje dva električna kruga izmjenične struje. Sastoje se od magnetske jezgre na koju su namotana u pravilu dva međusobno odvojena svitka (namota). Prijenos energije s jednog svitka na drugi odvija se zahvaljujući fizičkom načelu elektromagnetske indukcije, u načelu pri stalnoj frekvenciji. Postoje i transformatori poput autotransformatora koji radi pri promjenjivoj frekvenciji. U praksi transformatore koristimo u prijenosu i razdoblju električne energije, u mjerenu električnih veličina, u elektroničkim sklopovima za prijenos signala, za prilagodbu impedancije dvaju električnih krugova ili za njihovo međusobno izoliranje itd.

## 1.1 FIZIKALNA SLIKA RADA TRANSFORMATORA

### IDEALNI TRANSFORMATOR

Osnovni dijelovi svakog transformatora su željezna jezgra te primarni i sekundarni namot, koji se još nazivaju primar i sekundar, a prikazuje ih slika 1.1-1. Namoti transformatora izvedeni su tako da postoji dobra izolacija:

- između namota i željezne jezgre,
- između namota primara i namota sekundara,
- između zavoja pojedinog namota.

Na primarni namot se priključuje izvor izmjeničnog sinusnog napona efektivne vrijednosti  $U_1$  koji kroz njega tvara izmjeničnu sinusnu struju  $I_1$ , a ona stvara promjenjivi magnetski tok  $\Phi$ . Sinusni oblik napona rezultira sinusnim magnetskim tokom  $\Phi$ .

Pošto su namoti primara i sekundara na istoj željeznoj jezgri, isti promjenjivi magnetski tok  $\Phi$  u namotu primara inducira napon samoindukcije  $e_{1S}$  efektivne vrijednosti  $E_1$ , a u sekundaru napon međuindukcije  $e_{2M}$  efektivne vrijednosti  $E_2$ . Vrijednost napona  $e_{1S}$  i  $e_{2M}$  računamo prema izrazima:

$$e_{1S} = N_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

$$e_{2M} = N_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

gdje su:

$N_1$  i  $N_2$  brojevi zavoja primarnog i sekundarnog namota

$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  vremenska promjena magnetskog toka, Wb/s.

Dakle, efektivna vrijednost napona na primaru  $U_1$  jednaka je naponu samoindukcije, a napona na sekundaru  $U_2$  naponu međuindukcije:

$$\begin{aligned} U_1 &= E_1 \\ U_2 &= E_2. \end{aligned}$$

Inducirani naponi su sinusnog oblika, kao i magnetski tok. Efektivne vrijednosti tih napona su:

$$\begin{aligned} E_1 &= 4,44 N_1 f \Phi_m \\ E_2 &= 4,44 N_2 f \Phi_m, \end{aligned}$$

gdje je:

$f$  frekvencija, Hz

$\Phi_m$  amplituda magnetskog toka, Wb.

Ako ta dva napona stavimo u međusobni omjer, dobivamo izraz:

$$\begin{aligned} \frac{E_1}{E_2} &= \frac{N_1}{N_2} \\ \frac{U_1}{U_2} &= \frac{N_1}{N_2}. \end{aligned}$$

Omjer efektivnih vrijednosti napona primara  $U_1$  i sekundara  $U_2$  transformatora jednak je omjeru broja zavoja primarnog i sekundarnog namota  $N_1$  i  $N_2$ . Omjer  $\frac{N_1}{N_2}$  nazivamo **prijenosni omjer transformatora**.

Za idealni transformator bez gubitaka vrijedi da je snaga na primaru jednak snazi na sekundaru jer se sva energija dovedena namotu primara magnetskim putem prenosi na namot sekundara:

$$\begin{aligned} P_1 &= P_2 \\ U_1 I_1 &= U_2 I_2, \end{aligned}$$

gdje su:

$P_1, P_2$  snaga primara i sekundara, W

$I_1, I_2$  efektivna vrijednost struje primara i sekundara, A.

Na temelju toga proizlazi:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}.$$

Efektivne vrijednosti struja primara  $I_1$  i sekundara  $I_2$  odnose se obrnuto proporcionalno njihovom broju zavoja  $N_1$  i  $N_2$ .

Možemo zaključiti kako, zahvaljujući transformatoru, ovisno o omjeru zavoja namota primara i sekundara možemo mijenjati vrijednost napona i struje.

Ako je na sekundar transformatora priključeno trošilo impedancije:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2},$$

gdje je:

$R$  realni dio, a

$X$  imaginarni dio

impedancije trošila, tada efektivnu vrijednost struje sekundara  $I_2$  računamo iz izraza:

$$I_2 = \frac{U_2}{\sqrt{R^2 + X^2}}.$$

Fazni pomak  $\varphi_2$  između napona na sekundaru  $U_2$  i struje sekundara  $I_2$  ovisi o omjeru imaginarnog  $X$  i realne komponente  $R$  impedancije priključenog trošila:

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{X}{R}.$$

Efektivnu vrijednost struje primara  $I_1$  računamo:

$$I_1 = I_2 \frac{N_2}{N_1},$$

gdje su:

$N_1, N_2$  broj zavoja primara i sekundara

$I_2$  efektivna vrijednost struje sekundara, A.

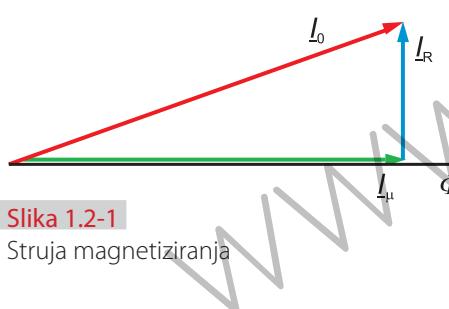
## 1.2 STVARNI TRANSFORMATOR

Prilikom dosadašnjih razmatranja zanemarili smo niz činjenica. Kako bismo dobili realnu sliku stanja, tj. stvarni transformator, u obzir moramo uzeti sljedeće činjenice:

### Struja magnetiziranja

Ako je transformator neopterećen u njegovom primarnom namotu teče struja praznog hoda  $I_o$ . Ta se struja može prikazati s dve komponente: strujom magnetiziranja  $I_\mu$  koja stvara magnetski tok  $\Phi$  i strujom koja pokriva gubitke u željeznoj jezgri i namotu primara  $I_R$  prema slici 1.2-1. Komponenta struje praznog hoda  $I_R$  znatno je manja od struje praznog hoda  $I_o$  te je možemo zanemariti. U tom slučaju uzimamo da je struja magnetiziranja  $I_\mu$  jednaka struci praznog hoda  $I_o$ .

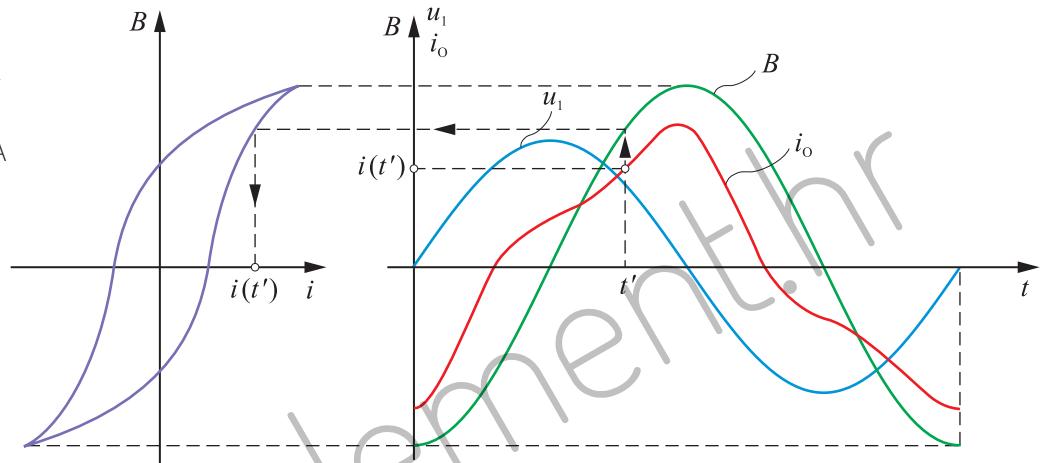
Ovdje je potrebno naglasiti da zbog promjenjive magnetske permeabilnosti željezne jezgre struja magnetiziranja nije sinusna. To proizlazi iz nelinearnosti krivulje magnetiziranja, što je ilustrirano slikom 1.2-2.



Slika 1.2-1

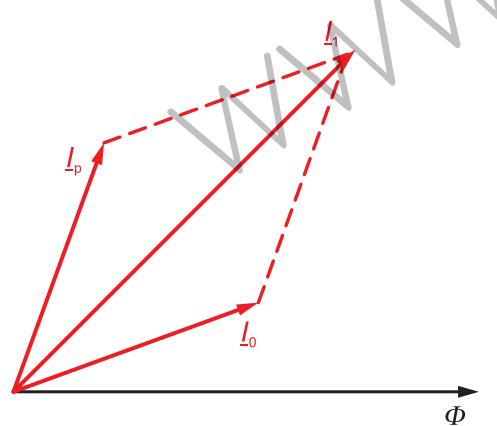
Struja magnetiziranja

$B$  magnetska indukcija, T  
 $U_1$  napon primara, V  
 $i_o$  struja magnetiziranja, A



Slika 1.2-2

Valni oblik struje magnetiziranja transformatora sa željeznom jezгром



Slika 1.2-3

Struja primarnog namota transformatora

Struja  $I_p$  je suprotna struci sekundara  $I_2$ . Njezina

$$\text{vrijednost je } I_p = I_2 \frac{N_2}{N_1}.$$

### Struja primara

Struju  $I_1$  možemo rastaviti na dve komponente: na struju praznog hoda  $I_o$  i struju opterećenja  $I_p$ , kako je prikazano na slici 1.2-3. Ako je transformator opterećen, struja magnetiziranja  $I_o$  je znatno manja od struje opterećenja  $I_p$  pa možemo smatrati da je primarna struja  $I_1$  jednaka struci opterećenja.

### Gubici u namotima

Namoti transformatora, najčešće izrađeni od bakra, imaju određeni djelatni otpor na kojem se troši dio snage koji zagrijava namote. To su gubici u bakru:

$$P_{Cu1} = I_1^2 R_1$$

$$P_{Cu2} = I_2^2 R_2,$$

gdje su:

$P_{Cu1}, P_{Cu2}$  gubici u bakru primara i sekundara, W

$R_1, R_2$  djelatni otpor namota primara i sekundara,  $\Omega$ .

Gubici u namotima računaju se za toplo stanje namota od  $75^\circ\text{C}$ .

### Gubici u željezu

Izmjenični magnetski tok u željeznoj jezgri uzrokuje gubitke zbog histereze i vrtložnih struja. Njih računamo prema izrazima:

$$P_h = h \cdot f \cdot B_m^2 \cdot m$$

$$P_v = v \cdot f^2 \cdot B_m^2 \cdot m,$$

gdje je:

$P_h$  gubici zbog histereze, W

$P_v$  gubici zbog vrtložnih struja, W

$h, v$  jedinični gubici, W/kg

$f$  frekvencija, Hz

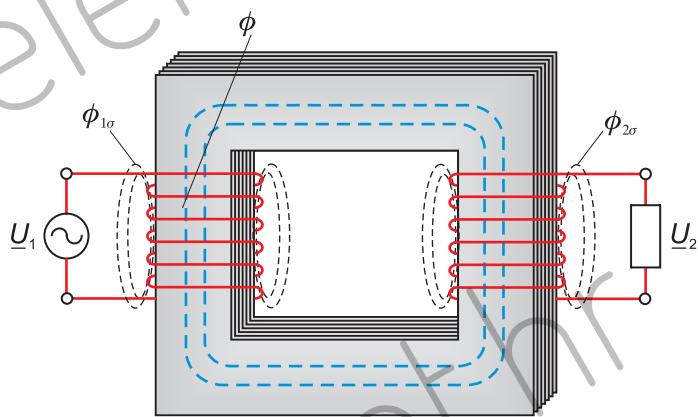
$B_m$  amplituda magnetske indukcije, T

$m$  masa jezgre, kg.

Gubici u željezu detaljno su objašnjeni u osnovama elektrotehnike.

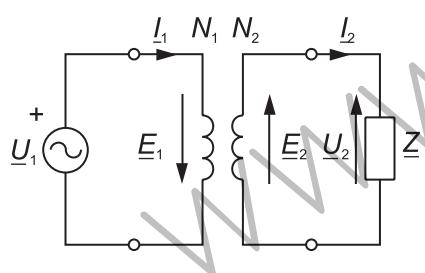
### Rasipni magnetski tok

Sav magnetski tok u željeznoj jezgri transformatora ne obuhvaća sve zavoje primarnog i sekundarnog namota. Dio magnetskog toka koji obuhvaća samo zavoje primara ili sekundara naziva se rasipni magnetski tok  $\Phi_{1\sigma}$  i  $\Phi_{2\sigma}$  kao što je prikazano na slici 1.2-4.



Slika 1.2-4

Glavni magnetski tok  $\Phi$  i rasipni magnetski tokovi  $\Phi_{1\sigma}$  i  $\Phi_{2\sigma}$



Slika 1.2-5

Transformator opterećen trošilom impedancije  $Z$

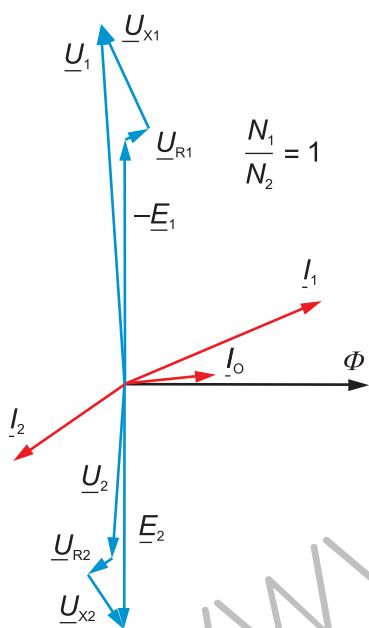
### Pojava viših harmonika struje magnetiziranja

Struja magnetiziranja nije sinusna, jer magnetska permeabilnost željeza nije stalna, kako je vidljivo sa slike 1.2-2. Navedene činjenice donekle mijenjaju fizikalnu sliku djelovanja transformatora, pa ćemo ih ukratko razjasniti analizirajući pogonska stanja stvarnog transformatora.

### TRANSFORMATOR OPTEREĆEN IMPEDANCIJOM $Z$

Svaki je transformator projektiran i građen za određenu prividnu snagu koju nazivamo **nazivnom snagom**  $S_N$ . Ako na primaru i sekundaru vladaju **nazivni naponi**  $U_{IN}$  i  $U_{2N}$ , transformator radi nazivnom snagom, a namotima teku nazivne struje  $I_{IN}$  i  $I_{2N}$ . Ove se vrijednosti uvijek nalaze na natpisnoj pločici transformatora.

Analizirajmo sada pogonska stanja stvarnog transformatora, prema shemi na slici 1.2-5, ovisno o impedanciji trošila  $Z$  priključenog na sekundaru.



Slika 1.2-6

Fazorski dijagram stvarnog transformatora opterećenog impedancijom  $Z$

Djelatni otpor namota primara i sekundara predstavljamo otporima  $R_1$  i  $R_2$ , na kojima struje primara i sekundara  $I_1$  i  $I_2$  stvaraju padove napona  $U_{R1}$  i  $U_{R2}$ :

$$\begin{aligned} \underline{U}_{R1} &= I_1 R_1 \\ \underline{U}_{R2} &= I_2 R_2 \end{aligned}$$

Zbog rasipnih tokova  $\Phi_{1\sigma}$  i  $\Phi_{2\sigma}$  u namotima primara i sekundara nastaju inducirani naponi koje prikazujemo kao padove napona  $U_{X1}$  i  $U_{X2}$  na induktivnom otporu primara i sekundara  $X_1$  i  $X_2$ :

$$\begin{aligned} \underline{U}_{X1} &= jI_1 X_1 \\ \underline{U}_{X2} &= jI_2 X_2 \end{aligned}$$

Za primar i sekundar transformatora možemo napisati:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= -\underline{E}_1 + \underline{U}_{R1} + \underline{U}_{X1} \\ \underline{U}_2 &= \underline{E}_2 - \underline{U}_{R2} - \underline{U}_{X2}, \end{aligned}$$

gdje je:

- $\underline{U}_1$  napon priključen na primar,
- $\underline{U}_2$  napon na trošilu impedancije  $Z$ , koje je priključeno na sekundar,
- $\underline{E}_1, \underline{E}_2$  inducirani naponi u primaru i sekundaru.

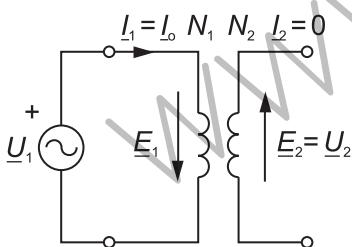
Temeljem jednadžbi II. Kirchhoffovog zakona možemo načiniti fazorski dijagram stvarnog transformatora. Iz praktičnih razloga uzmimo da

je prijenosni omjer transformatora  $\frac{N_1}{N_2} = 1$ , a transformator je opterećen induktivnom impedancijom. Fazorski dijagram transformatora prikazuje slika 1.2-6.

Crtanje dijagrama počinjemo tako da magnetski tok  $\Phi$  postavimo u realnu os, a s njim u fazi je struja magnetiziranja  $I_\mu$ . Inducirani naponi na primaru i sekundaru zaostaju za magnetskim tokom za  $90^\circ$ . Djelatni padovi napona na primarnoj i sekundarnoj strani,  $U_{R1}$  i  $U_{R2}$ , u fazi su s primarnom i sekundarnom strujom, dok su induktivni padovi napona  $U_{X1}$  i  $U_{X2}$  okomiti na smjer pripadajućih struja.

### PRAZNI HOD TRANSFORMATORA

**Prazni hod** je pogonsko stanje kod kojeg je na primar priključen napon, a sekundarne stezaljke su otvorene, prema slici 1.2-7. Napon na sekundaru jednak je induciranim naponu  $E_2$ , a sekundarna struja  $I_2$  jednaka je nuli.

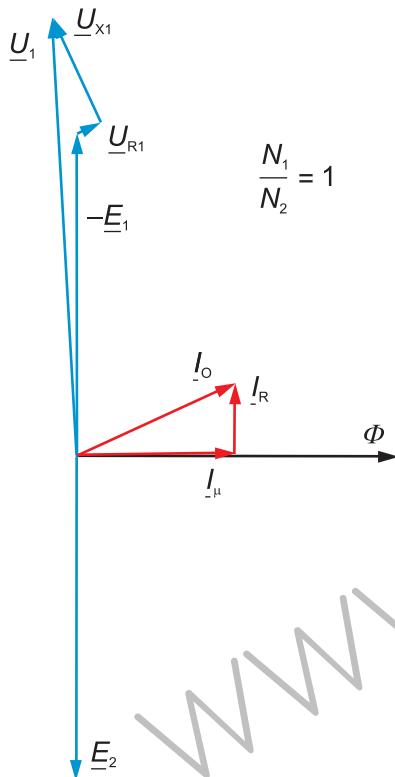


Slika 1.2-7

Prazni hod transformatora

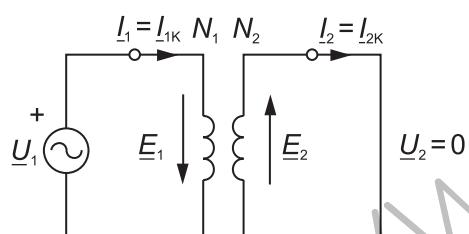
U primarnom namotu teče samo struja praznog hoda  $I_0$ . Glavni magnetski tok  $\Phi$  u željeznoj jezgri stvara gubitke uslijed histerezze i vrtložnih struja te stoga struja praznog hoda ima dvije komponente: induktivnu  $I_\mu$  i djelatnu komponentu  $I_R$ , što vidimo na slici 1.2-1:

$$I_0 = I_\mu + I_R .$$



Slika 1.2-8

Fazorski dijagram stvarnog transformatora u praznom hodu



Slika 1.2-9

Kratki spoj transformatora

Induktivna komponenta struje stvara glavni magnetski tok, a djelatna predstavlja gubitke koji nastaju u jezgri transformatora.

Ako napone prikažemo kao fazore, jednadžbe II. Kirchhoffovog zakona za primar i sekundar su:

$$\begin{aligned}\underline{U}_1 &= -\underline{E}_1 + \underline{U}_{R1} + \underline{U}_{x1} \\ \underline{U}_2 &= \underline{E}_2,\end{aligned}$$

gdje je:

- $\underline{U}_1$  napon sinusnog izmjeničnog izvora priključen na primar,
- $\underline{E}_1, \underline{E}_2$  inducirani naponi u primaru i sekundaru,
- $\underline{U}_{R1}, \underline{U}_{x1}$  napon na djelatnom otporu i induktivnom otporu primara koje stvara struja praznog hoda  $I_o$ .

Fazorski dijagram stvarnog transformatora u praznom hodu prikazan je na slici 1.2-8. Prepostavili smo da prijenosni omjer transformatora iznosi 1.

#### KRATKI SPOJ TRANSFORMATORA

**Kratki spoj** transformatora je stanje kvara kod kojeg je na primarnu stranu transformatora priključen napon  $U_1$ , a sekundarne stezaljke su kratko spojene, što znači da je sekundarni napon  $U_2 = 0$  V, kako je prikazano na slici 1.2-9.

U namotima transformatora teku struje kratkog spoja koje svojim vrijednostima višestruko nadmašuju nazivnu struju primara i sekundara.

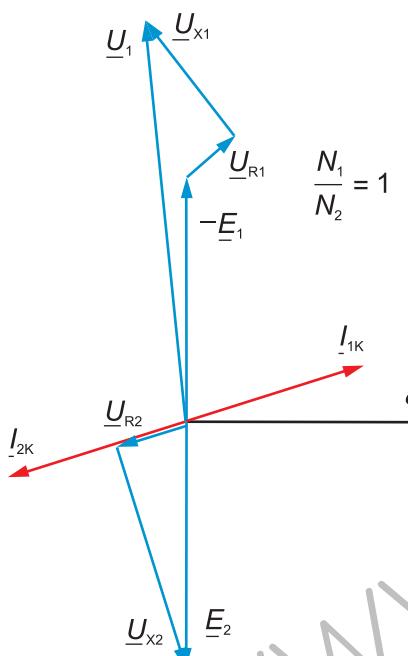
Jednadžbe II. Kirchhoffovog zakona za primarni i sekundarni krug sada glase:

$$\begin{aligned}\underline{U}_1 &= -\underline{E}_1 + \underline{U}_{R1} + \underline{U}_{x1} \\ 0 &= \underline{E}_2 - \underline{U}_{R2} - \underline{U}_{x2},\end{aligned}$$

gdje je:

- $\underline{U}_1$  napon izmjeničnog izvora priključen na primar,
- $\underline{E}_1, \underline{E}_2$  inducirani naponi u primaru i sekundaru,
- $\underline{U}_{R1}, \underline{U}_{R2}$  padovi napona na djelatnom otporu primara i sekundara koje stvaraju struje kratkog spoja  $I_{1K}$  i  $I_{2K}$ ,
- $\underline{U}_{x1}, \underline{U}_{x2}$  padovi napona na induktivnom otporu primara i sekundara koje stvaraju struje kratkog spoja  $I_{1K}$  i  $I_{2K}$ .

Pogonsko stanje kratkog spoja vrlo je nepovoljno, jer struja kratkog spoja znatno povećava gubitke u namotima koji rastu s kvadratom vrijednosti struje. Posljedice mogu biti pogubne na transformator, ako u kratkom vremenu ne dođe do prekida ovakvog pogonskog stanja. U transformatoru se razvija velika količina topline i stvaraju se velika mehanička naprezanja, što može potpuno uništiti transformator i izazvati štetu na okolnim dijelovima postrojenja.



Slika 1.2-10

Fazorski dijagram transformatora u kratkom spoju

**Napon kratkog spoja**  $U_k$  je vrijednost primarnog napona kod kojeg kroz kratko spojeni sekundar teče nazivna struja  $I_{2N}$ . To je iznimno važan podatak svakog transformatora i izražava se u postocima nazivnog primarnog napona  $U_{IN}$ :

$$u_k \% = \frac{U_k}{U_{IN}} \cdot 100\%$$

Ovaj podatak je od neobične važnosti jer se pomoću njega može izračunati struja kratkog spoja – značajan podatak za projektiranje zaštite transformatora.

Fazorski dijagram stvarnog transformatora u kratkom spoju prikazan je na slici 1.2-10, uz prijenosni omjer transformatora  $\frac{N_1}{N_2} = 1$ .

### 1.3 REDUCIRANJE TRANSFORMATORSKIH VELIČINA

Prilikom crtanja fazorskih dijagrama za različita pogonska stanja stvarnog transformatora pretpostavili smo 1:1 prijenosni omjer kako bismo mogli pregledno prikazati sve karakteristične veličine i uočiti njihove međusobne odnose.

Pri velikim prijenosnim omjerima postoji problem fazorskih dijagrama. Zbog toga se pribjegava postupku reduciranja sekundarnih veličina na primar. Ako s  $U'_2$  označimo sekundarni napon pri broju zavoja  $N_2$ , a s  $U'_2$  sekundarni napon kod  $N_1$  zavoja, tada vrijedi:

$$\begin{aligned} U'_2 : U_2 &= N_1 : N_2 \\ U'_2 &= U_2 \frac{N_1}{N_2}. \end{aligned}$$

Istom postupkom dobivamo izraz za preračunavanje struje:

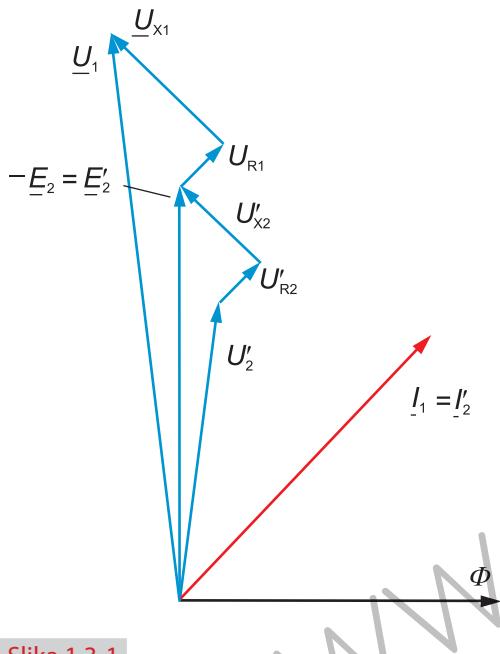
$$I'_2 = I_2 \frac{N_2}{N_1}.$$

Pošto otpor predstavlja omjer napona i struje, dobivamo izraze za reduciranje djelatnog otpora  $R_2$  sa sekundara na primar:

$$\begin{aligned} R'_2 &= \frac{U'_{R2}}{I'_2} = \frac{U_{R2} \frac{N_1}{N_2}}{I_2 \frac{N_2}{N_1}} \\ R'_2 &= R_2 \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \end{aligned}$$

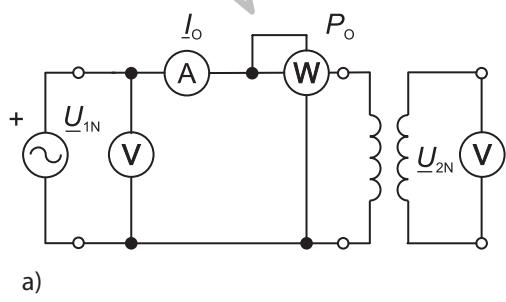
i induktivnog otpora  $X_2$ :

$$X'_2 = \frac{U'_{X2}}{I'_2} = \frac{U_{X2} \frac{N_1}{N_2}}{I_2 \frac{N_2}{N_1}}$$

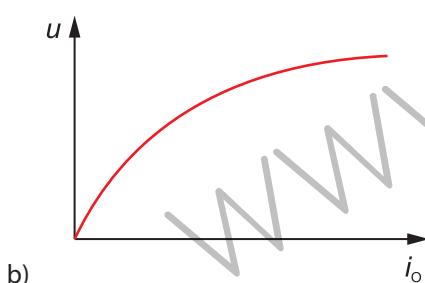


Slika 1.3-1

Fazorski dijagram transformatora s reduciranim veličinama na primarnu stranu



a)



b)

Slika 1.4-1

Pokus praznog hoda:  
a) električna shema  
b) karakteristika praznog hoda

$$X'_2 = X_2 \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2.$$

Jednadžbe II. Kirchhoffovog zakona za stvarni transformator opterećen impedancijom  $Z$ , s veličinama reduciranim na primarnu stranu su:

$$\begin{aligned}\underline{U}_1 &= -\underline{E}_1 + \underline{U}_{R1} + \underline{U}_{X1} \\ \underline{U}'_2 &= \underline{E}'_2 - \underline{U}'_{R2} - \underline{U}'_{X2},\end{aligned}$$

gdje je:

$$\underline{U}'_2 = \underline{U}_2 \frac{N_1}{N_2}$$

$$\underline{E}'_2 = \underline{E}_2 \frac{N_1}{N_2}$$

$$\underline{U}'_{R2} = \underline{I}'_2 \underline{R}'_2 = I_2 \frac{N_2}{N_1} R_2 \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 = \underline{U}_{R2} \frac{N_1}{N_2}$$

$$\underline{U}'_{X2} = \underline{I}'_2 \underline{X}'_2 = I_2 \frac{N_2}{N_1} X_2 \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 = \underline{U}_{X2} \frac{N_1}{N_2}.$$

Osim što se sekundarne veličine reduciraju na primar, pri crtanju fazorskog dijagrama se iz praktičnih razloga sekundarne veličine zarotiraju za  $180^\circ$ . Na taj način možemo bolje uočiti međusobne odnose.

Fazorski dijagram stvarnog transformatora opterećenog induktivnom impedancijom  $Z$  prikazan je na slici 1.3-1. Moguće je i obrnuti postupak – da se primarne veličine po istom načelu reduciraju na sekundar.

## 1.4 POKUS PRAZNOG HODA I KRATKOG SPOJA

Određivanje glavnih karakteristika transformatora možemo izvršiti eksperimentalnim putem. Mjeranjem napona, struja i snage u načinu rada praznog hoda i kratkog spoja dobivamo podatke pomoću kojih definiramo glavne karakteristike promatrano transformatora. Uobičajeni naziv za te mjerne postupke je pokus praznog hoda i kratkog spoja.

### POKUS PRAZNOG HODA

Pokus praznog hoda jednofaznog transformatora izvodimo prema električnoj shemi na slici 1.4-1. Na primarnoj stranici transformatora priključimo nazivni napon efektivne vrijednosti  $U_{1N}$ , a sekundar je neopterećen, tj. na njegove stezaljke je spojen voltmeter velikog unutarnjeg otpora. Na primarnoj strani su, osim voltmetra, spojeni ampermetar, koji mjeri struju primara, i vatmetar, koji mjeri snagu.

Voltmetri na primarnoj i sekundarnoj strani mjeri nazivne napone primara i sekundara  $U_{1N}$  i  $U_{2N}$ , a pomoću tih vrijednosti možemo izračunati

prijenosni odnos transformatora:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}}.$$

Ampermetar mjeri struju praznog hoda  $I_o$ , a vatmetar snagu koju transformator u praznom hodu uzima iz mreže  $P_o$ .

U praznom hodu teće samo struja u primaru koja je znatno manja od nazivne, oko 1% kod većih trofaznih transformatora, pa kao takva stvara zanemarive gubitke u bakru. Na temelju toga zaključujemo da snaga koju mjeri vatmetar predstavlja gubitke u željezu transformatora:

$$P_{Fe} \approx P_o.$$

Na temelju izmjerenih veličina možemo odrediti fazni pomak između napona i struje primara, računajući  $\cos \varphi_o$ :

$$\cos \varphi_m = \frac{P_{Fe}}{U_{1N} I_o}.$$

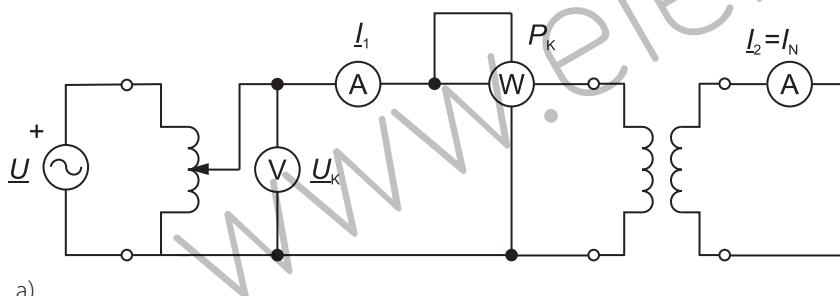
#### POKUS KRATKOG SPOJA

Pokus kratkog spoja izvodimo prema električnoj shemi na slici 1.4-2. Tijekom pokusa mjerimo primarni napon, struju i snagu, a na sekundaru transformatora koji je kratko spojen mjerimo struju kratkog spoja.

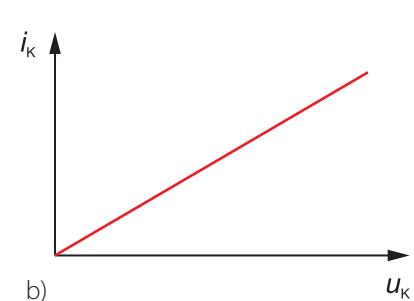
Pokus provodimo na način da pomoću regulacijskog transformatora postupno povećavamo primarni napon  $U_1$ , od vrijednosti 0 V do vrijednosti  $U_K$ , kod koje na sekundarnoj strani transformatora poteče nazivna struja  $I_{2N}$ . U isto vrijeme primarnim namotom poteče nazivna struja  $I_{1N}$ . Snagu koju mjeri vatmetar na primarnoj strani označimo sa  $P_K$ .

Pri naponu  $U_K$ , koji je znatno manji od nazivnog primarnog napona  $U_{1N}$ , struja magnetiziranja i magnetska indukcija vrlo su male, pa su gubici u željezu transformatora zanemarivi. Stoga izmjerena snaga  $P_K$  predstavlja gubitke u bakru transformatora:

$$P_{Cu} \approx P_K.$$



a)



b)

Slika 1.4-2

Pokus kratkog hoda:

- a) električna shema
- b) karakteristika pokusa kratkog hoda

Na temelju izmjerena vrijednosti možemo izračunati i faktor faznog pomaka:

$$\cos \varphi_K = \frac{P_{Cu}}{U_K I_{IN}}.$$

Uobičajeno je da se napon kratkog spoja  $U_K$  izražava u postocima nazinevnog primarnog napona  $U_{IN}$ :

$$u_{K\%} = \frac{U_K}{U_{IN}} \cdot 100.$$

To je jedan od važnih podataka o transformatoru i redovito se nalazi na njegovoj natpisnoj pločici. Pomoću njega možemo, poznavajući nazivnu struju transformatora  $I_N$ , izračunati vrijednost struje kratkog spoja  $I_{KS}$ :

$$I_{KS} = I_N \frac{100}{u_{K\%}}.$$

Struja kratkog spoja nam je važan podatak za projektiranje zaštite i ostalih dijelova rasklopnnog postrojenja.

## 1.5 NADOMJESNA SHEMA TRANSFORMATORA

Transformator kao dio strujnog kruga ili električne mreže trebamo moći prikazati nadomjesnom shemom kako bismo mogli načiniti odgovarajuće proračune i analize strujnih krugova. Nadomjesna shema mora sa zadovoljavajućom točnošću opisati ponašanje transformatora.

### FIZIKALNE OSNOVE NADOMJESNE SHEME

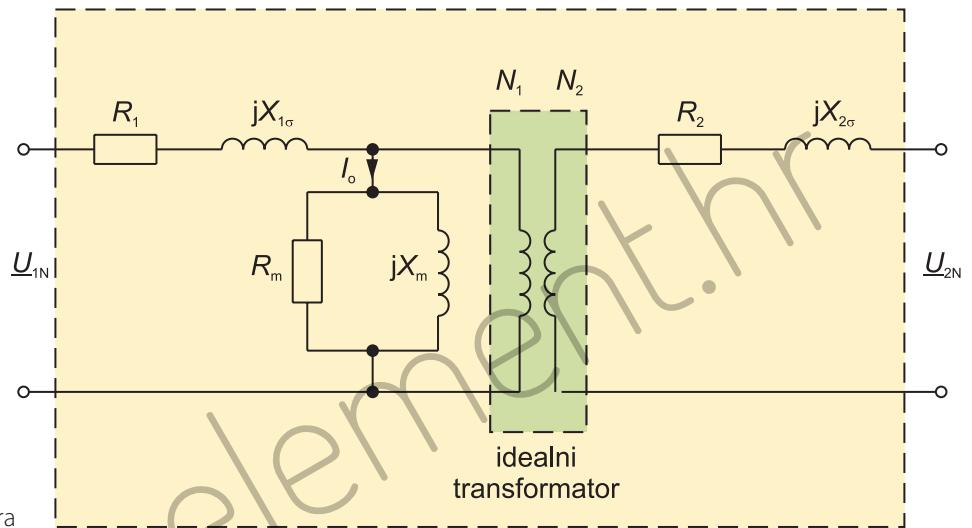
Pri konstrukciji nadomjesne sheme moramo uzeti u obzir sljedeće fizikalne činjenice:

- a) prolaskom struje kroz namote primara i sekundara namoti se zagrijavaju zbog gubitaka koji nastaju u njima, proporcionalnih kvadratu struje (gubici u bakru);
- b) željezna jezgra transformatora se zagrijava zbog vrtložnih struja;
- c) željezna jezgra se zagrijava zbog histereze;
- d) primarni i sekundarni namot imaju rasipni induktivitet.

Gubitke u namotima nadomještamo otporima  $R_1$  i  $R_2$  u primarnom i sekundarnom krugu.

Rasipni magnetski tok u primarnom i sekundarnom namotu  $\Phi_{1\sigma}$  i  $\Phi_{2\sigma}$  nadomještamo zavojnicama induktiviteta  $L_{1\sigma}$  i  $L_{2\sigma}$ , induktivnog otpora  $X_{1\sigma}$  i  $X_{2\sigma}$ .

Struju praznog hoda  $I_o$  nadomještamo s dvije paralelne grane. Kroz jednu teče struja magnetiziranja  $I_\mu$ , a kroz drugu djelatna komponenta  $I_r$ , mjerodavna za gubitke u željezu. Struja  $I_\mu$  kasni u fazi za priključenim naponom za  $90^\circ$  te u njezinu granu stavljamo induktivni otpor  $X_o$ , a u granu struje  $I_R$ , koja je u fazi s priključenim naponom, djelatni otpor  $R_o$ , prema slici 1.5-1.

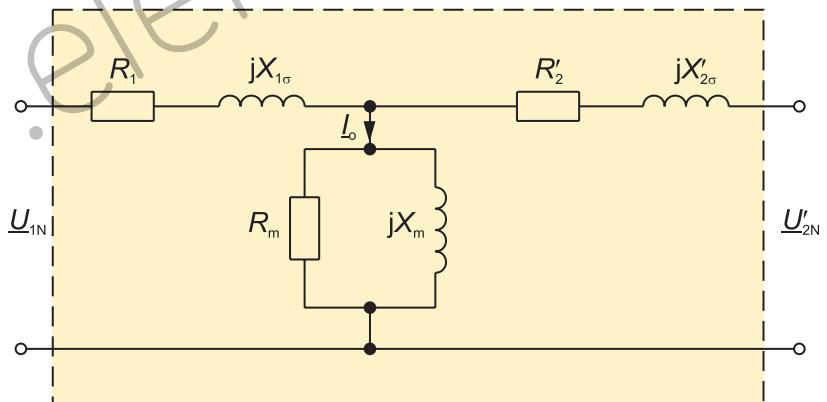


Slika 1.5-1

Nadomjesna shema transformatora

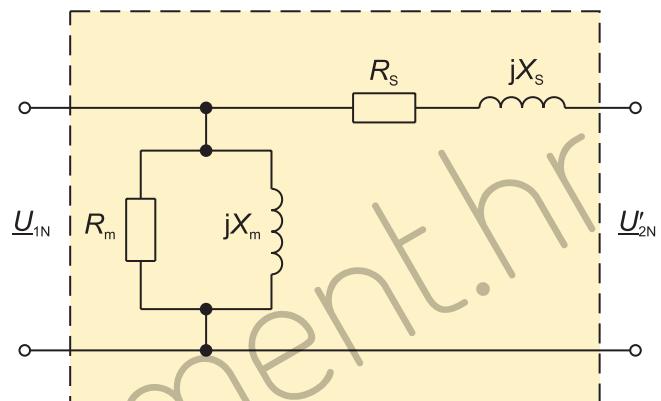
Dodavanjem navedenih elemenata, primarni i sekundarni krug su ostali povezani idealnim transformatorom. Kada bi idealni transformator imao prijenosni omjer 1:1, tada ne bi imao nikakvu funkciju i mogli bismo ga ukloniti. To postižemo reduciranjem sekundarnih veličina na primarni. Konačni oblik nadomjesne sheme prikazan je na slici 1.5-2. (Isti rezultat bismo postigli reduciranjem primarnih veličina na sekundar.)

Ovakva nadomjesna shema je zbog paralelne grane prilično složena i otežava proračune. U normalnom pogonu struja magnetiziranja je znatno manja od struje primara, nekoliko postotaka nazivne struje ovisno o veličini transformatora, te su gubici u željezu dovoljno mali da ih možemo zanemariti. Stoga, ovisno o situaciji, koristimo pojednostavljene nadomjesne sheme transformatora. Zbog male struje  $I_o$  djelatne otpore



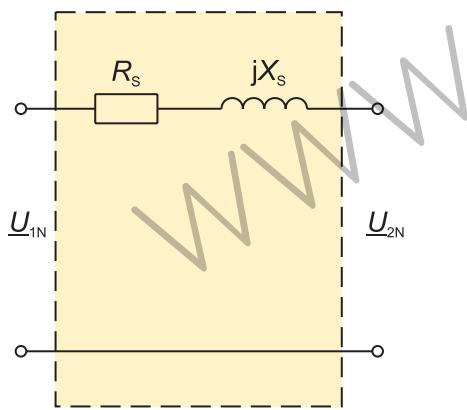
Slika 1.5-2

Nadomjesna shema transformatora reduciranja na primarni



Slika 1.5-3

Nadomjesna shema sa zbrojenim djelatnim i induktivnim otporima



Slika 1.5-4

Pojednostavljena nadomjesna shema uz zanemarenju struju  $I_o$

$R_{1\sigma}$  i  $R'_{2\sigma}$ , te induktivne otpore  $X_{1\sigma}$  i  $X'_{2\sigma}$  možemo međusobno zbrojiti i tako dobiti nadomjesnu shemu, prema slici 1.5-3.

$$R_s = R_{1\sigma} + R'_{2\sigma}$$

$$X_s = X_{1\sigma} + X'_{2\sigma}.$$

Ako struju  $I_o$  zanemarimo, tada više nema paralelne grane i nadomjesna shema izgleda kao na slici 1.5-4.

#### ODREĐIVANJE ELEMENATA NADOMJESNE SHEME

Elemente paralelne grane nadomjesne sheme (slika 1.5-3) određujemo koristeći rezultate pokusa praznog hoda (poglavlje 1.4):

- $U_{1N}$  napon primara,
- $P_{Fe}$  gubici u željezu,
- $I_o$  struja praznog hoda,
- $\cos \varphi_f$  faktor snage.

Faktor faznog pomaka računamo prema izrazu:

$$\cos \varphi_m = \frac{P_{Fe}}{U_{1N} I_o}.$$

Komponenta struje praznog hoda  $I_R$  iznosi:

$$I_R = I_o \cdot \cos \varphi_m.$$

Struja magnetiziranja  $I_\mu$  računamo:

$$I_\mu = I_o \cdot \sin \varphi_m.$$

Otpore u paralelnoj grani nadomjesne sheme  $R_m$  i  $X_m$  računamo:

$$R_m = \frac{U_{1N}}{I_R}, \quad X_m = \frac{U_{1N}}{I_\mu}.$$

Za određivanje elemenata u serijskoj grani nadomjesne sheme koristimo rezultate pokusa kratkog spoja (poglavlje 1.4):

- $U_K$  napon kratkog spoja
- $P_{Cu}$  gubici u bakru
- $\cos \varphi_k$  faktor snage kratkog spoja.

Faktor snage proizlazi iz relacije:

$$\cos \varphi_K = \frac{P_{Cu}}{U_K I_{IN}}.$$

Impedanciju kratkog spoja  $Z_K$  računamo prema izrazu:

$$Z_K = \frac{U_K}{I_{IN}}.$$

Realni i imaginarni dio impedancije  $Z_K = R_s + jX_s$  računamo:

$$R_s = Z_K \cos \varphi_K$$

$$X_s = Z_K \sin \varphi_K.$$

Na temelju izračunatih veličina,  $R_m$ ,  $X_m$ ,  $R_s$  i  $X_s$ , možemo nacrtati nadomjesnu shemu prema slici 1.5-3 ili 1.5-4.

### Primjer 1

Treba odrediti nadomjesnu shemu transformatora od 20 kVA, 10 000/240 V, 50 Hz. Pokusima kratkog spoja i praznog hoda dobiveni su ovi rezultati:

| Pokus praznog hoda          | Pokus kratkog spoja     |
|-----------------------------|-------------------------|
| $U_{IN} = 10\ 000\text{ V}$ | $U_K = 589\text{ V}$    |
| $I_O = 0,245\text{ A}$      | $I_{IN} = 2,0\text{ A}$ |
| $P_{Fe} = 120\text{ W}$     | $P_{Cu} = 480\text{ W}$ |

Izračunajte vrijednosti impedancija nadomjesne sheme reducirane na primarnu stranu. Nacrtajte nadomjesnu shemu. ( $Z_m$  ne treba računati)

Zadano:

$$U_{IN} = 10\ 000\text{ V}$$

$$I_O = 0,245\text{ A}$$

$$P_{Fe} = 120\text{ W}$$

$$U_K = 589\text{ V}$$

$$I_{IN} = 2,0\text{ A}$$

$$P_{Cu} = 235\text{ W}$$

$$Z_m, R_m, X_m, Z_K, R_s, X_s, \cos \varphi_m, \cos \varphi_K = ?$$

Rješenje:

Impedanciju praznog hoda računamo:

$$\cos \varphi_m = \frac{P_{Fe}}{U_{IN} I_O} = \frac{120}{10\ 000 \cdot 0,245} = 0,049$$

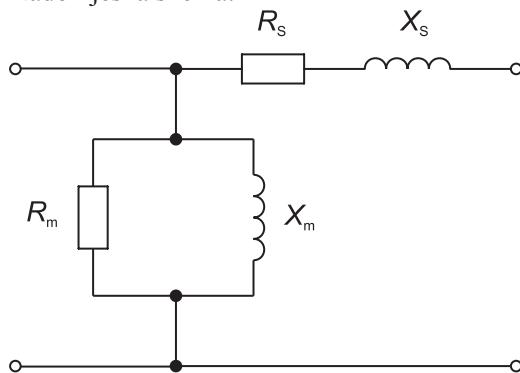
$$I_R = I_O \cos \varphi_m = 0,245 \cdot 0,049 = 0,012\text{ A}$$

$$I_\mu = I_O \sin \varphi_m = 0,245 \cdot 0,998 = 0,244\text{ A}$$

$$R_m = \frac{U_{IN}}{I_R} = \frac{10\ 000}{0,012} = 833\ 333\ \Omega$$

$$X_m = \frac{U_{IN}}{I_m} = \frac{10\ 000}{0,244} = 40\ 984\ \Omega = 41\text{ k}\Omega$$

Nadomjesna shema:



Impedancija kratkog spoja  $Z_K$ :

$$Z_K = \frac{U_K}{I_{IN}} = \frac{589}{2,0} = 294,50 \Omega.$$

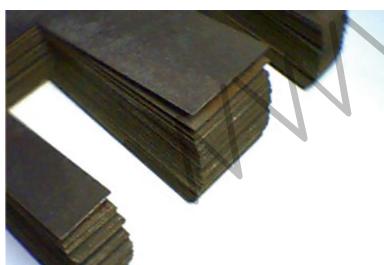
$$\cos \varphi_K = \frac{P_{Cu}}{U_K I_{IN}} = \frac{480}{589 \cdot 2,0} = 0,40747.$$

$$R_s = Z_K \cos \varphi_K = 294,50 \cdot 0,40747 = 120,00 \Omega.$$

$$X_s = Z_K \sin \varphi_m = 294,50 \cdot 0,91322 = 268,94 \Omega.$$

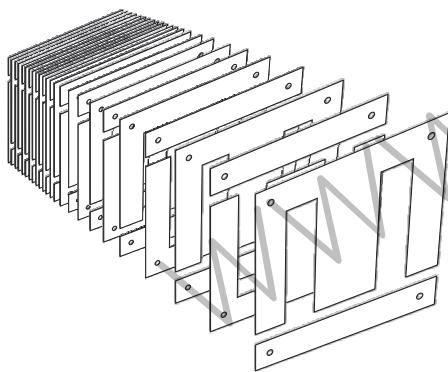
$$Z_K = R_s + jX_s$$

$$Z_K = 120 + j268,94 \Omega.$$



**Slika 1.6-1**

Transformatorski  $E$ -limovi za mrežne transformatore



**Slika 1.6-2**

Slaganje limova u jezgri transformatora

## 1.6 KONSTRUKCIJSKI DIJELOVI I FUNKCIJA

Glavni konstrukcijski dijelovi svakog transformatora su:

- jezgra,
- namot i
- sustav izolacije.

Osim tih dijelova, transformatori velikih snaga još imaju i sustav za hlađenje.

### JEZGRA TRANSFORMATORA

Uloga jezgre transformatora je omogućiti stvaranje magnetskog kruga i ostvariti potrebnu magnetsku indukciju za prijenos energije s primarnog namota na sekundarni, uz što je moguće manje gubitke. Uobičajeno je da se jezgra transformatora izrađuje od željeznih limova, tzv. transformatorskih limova, poput onih na slici 1.6-1.

Debljine limova od kojih se izrađuje jezgra transformatora mogu biti 0,15; 0,27; 0,30; 0,35 i, iznimno, 0,50 mm za transformatore male snage.

Transformatorski limovi se izrađuju toplim i hladnim valjanjem. Hladnovljeni limovi imaju manje specifične gubitke i za postizanje određene magnetske indukcije potrebna im je manja struja magnetiziranja. Loša im je strana povećanje gubitaka i struje magnetiziranja ako silnice magnetskog toka prolaze okomito na smjer valjanja.

Limovi od kojih se sastavlja jezgra moraju biti izolirani. Kao izolacijski materijali koriste se:

- svileni papir,
- lak,
- vodeno staklo.

Nekada se kao izolacijski materijal koristio i prešpan.