

# 1.

## Električni strojevi



### 1.1. Transformatori

- 1.1.1. Osnovne značajke i načelo rada
- 1.1.2. Vrste transformatora
- 1.1.3. Zagrijavanje i zaštita transformatora

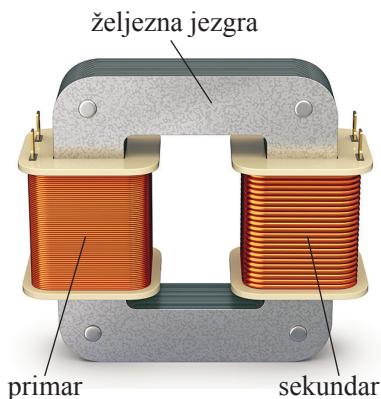
### 1.2. Električni rotacijski strojevi

- 1.2.1. Osnovne značajke i načelo rada
- 1.2.2. Sinkroni strojevi
- 1.2.3. Asinkroni strojevi
- 1.2.4. Istosmjerni strojevi
- 1.2.5. Izmjenični kolektorski motori
- 1.2.6. Mali električni strojevi

## 1.1. Transformatori

### 1.1.1. Osnovne značajke i načelo rada

#### Idealni transformator



**Slika 1.1.**

Glavni dijelovi transformatora sa željeznom jezgrom

**Transformatori** su električni uređaji koji prenose električnu energiju između dviju zavojnica kroz koje prolazi isti magnetski tok. Prijenos energije s jedne zavojnice na drugu odvija se zahvaljujući fizikalnom načelu elektromagnetske indukcije. Transformatori rade isključivo na izmjeničnom naponu jer je preduvjet za elektromagnetsku indukciju promjenjivi magnetski tok. Transformatore u praksi koristimo kada želimo izmjenični napon jedne razine transformirati u izmjenični napon druge razine, pri stalnoj frekvenciji.

Fizikalno načelo rada transformatora razmotrit ćemo na idealnom transformatoru sa željeznom jezgrom u kojem smo zanemarili gubitke u prijenosu energije između namota transformatora.

Osnovni dijelovi svakog transformatora su **željezna jezgra te primarni i sekundarni namot**, koji se još nazivaju **primari i sekundar**, a prikazuje ih slika 1.1. Namoti transformatora izvedeni su tako da postoji dobra izolacija između njih i željezne jezgre, primara i sekundara i između pojedinih zavoja.

Na primarni namot priključuje se 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  $\Phi$ .

Budući da 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  $E_2$ :

$$e_{1S} = -N_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, \quad e_{2M} = -N_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

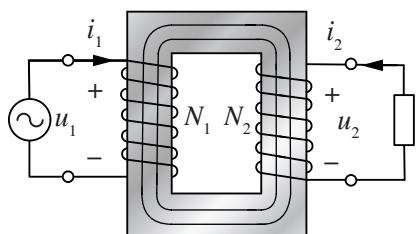
gdje su:

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

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

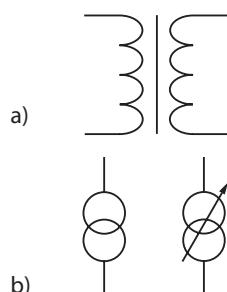
Dakle, efektivna vrijednost napona na primaru  $U_1$  jednaka je naponu samoindukcije, a napona na sekundaru  $U_2$  naponu međuindukcije:

$$U_1 = E_1, \quad U_2 = E_2.$$



Slika 1.2.

Transformator opterećen trošilom impedancije  $Z$



Slika 1.3.

Simboli transformatora u schemama:

- a) transformator s jezgrom
- b) jednofazni i regulacijski transformator

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

$$E_1 = 4,44 N_1 f \Phi_m, \quad E_2 = 4,44 N_2 f \Phi_m,$$

gdje je:

$f$  frekvencija, Hz

$\Phi_m$  amplituda magnetskog toka, Wb.

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

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}.$$

Na slici 1.2 shematski je prikaz transformatora u normalnom pogonu, a slika 1.3 prikazuje simbole transformatora u električnim schemama.

Omjer efektivnih vrijednosti napona primara  $U_1$  i sekundara  $U_2$  transformatora jednak je omjeru broja zavoja primarnog i sekundarnog namota  $N_1$  i  $N_2$ . Tu jednakost nazivamo **prijenosni omjer transformatora**, odnosno, **omjer transformacije**.

Spajanjem trošila na sekundar transformatora snaga dovedena primaru prenosi se na sekundarnu stranu na trošilo.

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

$$P_1 = P_2$$

$$U_1 I_1 = U_2 I_2,$$

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 razmjerno njihovom broju zavoja  $N_1$  i  $N_2$ .

Zahvaljujući transformatoru, ovisno o omjeru zavoja namota primara i sekundara, možemo mijenjati vrijednost napona.

Ako je na sekundar transformatora priključeno trošilo impedancije:

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

gdje je:

$R$  realni dio

$X$  imaginarni dio

$Z$  impedancija 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

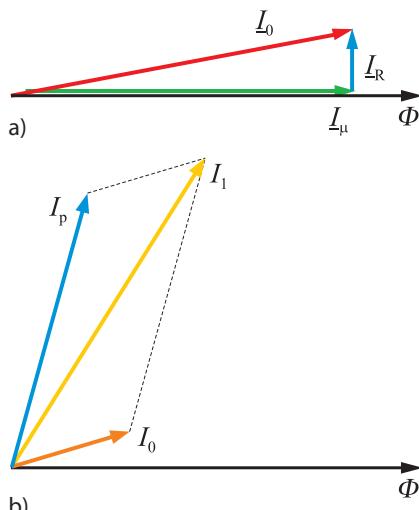
$I_1, I_2$  efektivna vrijednost struje sekundara, A.

### Stvarni transformator

Kako bismo dobili realnu sliku stanja, tj. karakteristike stvarnog transformatora, moramo razmotriti koji parametri unose razliku između idealnog i stvarnog transformatora:

- struja magnetiziranja
- struja primara
- gubitci u namotima
- gubitci u željezu
- rasipni magnetski tok.

Ako je transformator neopterećen, u njegovom primarnom namotu teče **struja praznog hoda**  $I_0$ . Ta se struja može prikazati dvijema komponentama: strujom magnetiziranja  $I_\mu$  koja stvara magnetski tok  $\Phi$  i strujom koja pokriva gubitke u željeznoj jezgri i namotu primara  $I_R$  prema slici 1.4a. Komponenta struje praznog hoda  $I_R$  znatno je manja od struje praznog hoda  $I_0$ . Za manje točne izračune možemo uzeti da je struja praznog hoda  $I_0$  približno jednaka struci magnetiziranja.



Slika 1.4.

- Fazorski dijagram:
- struja praznog hoda
  - struja primara  $I_1$

**Struju primara  $I_1$**  opterećenog transformatora možemo rastaviti na dvije komponente: na struju praznog hoda  $I_0$  i struju opterećenja  $I_p$  (slika 1.4b). Ako je transformator opterećen, struja praznog hoda  $I_0$  je znatno manja od struje opterećenja  $I_p$ , pa možemo smatrati da je primarna struja  $I_1$  približno jednaka struci opterećenja.

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

$$P_{\text{Cu}1} = I_1^2 R_1$$

$$P_{\text{Cu}2} = I_2^2 R_2,$$

gdje su:

$P_{\text{Cu}1}, P_{\text{Cu}2}$  gubitci u bakru primara i sekundara, W

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

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

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

$$P_h = hfB_m^2 m$$

$$P_v = vf^2 B_m^2 m,$$

gdje je:

$P_h$  gubitci zbog histereze, W

$P_v$  gubitci zbog vrtložnih struja, W

$h, v$  jedinični gubitci, W/kg

$f$  frekvencija, Hz

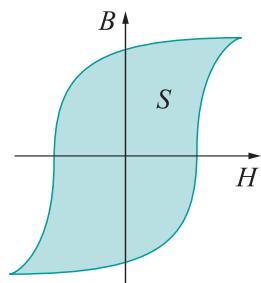
$B_m$  amplituda magnetske indukcije, T

$m$  masa jezgre, kg.

Ovi se gubitci nazivaju **gubitci u željezu**.

Petlja histereze u  $B$ - $H$  koordinatnom sustavu predstavlja određenu površinu čija je vrijednost razmjerna umnošku magnetske indukcije  $B$  i jakosti magnetskog polja  $H$  (slika 1.5).

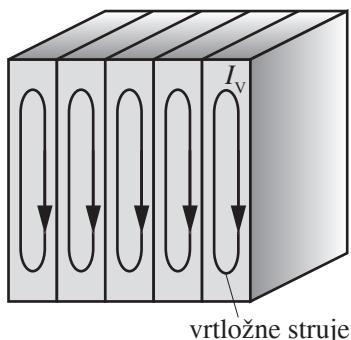
Pri periodičnom magnetiziranju i razmagnetiziranju (što se događa pri protoku izmjenične struje) svaki se put mora dodatnom koercitivnom silom savladavati remanentni magnetizam na što se troši energija i manifestira se kao dodatno zagrijavanje materijala jezgre.



Slika 1.5.

Gubitci zbog petlje histereze

Površina petlje histereze proporcionalna je energiji utrošenoj za jedan ciklus magnetiziranja, a nastali gubitci nazivaju se gubiticima zbog histereze.

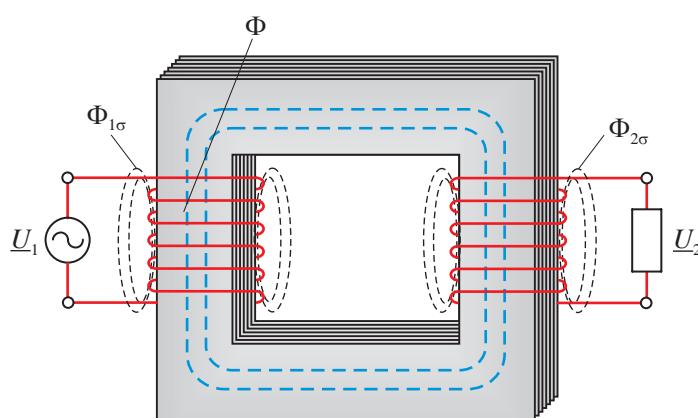


Slika 1.6.

Prikaz vrtložnih struja u jezgri od tankih limova

Ako se feromagnetik magnetizira izmjeničnom strujom, u njemu će nastati vrtložne struje. Vrtložne će struje u feromagnetiku, ovisno o električnom otporu, stvarati određenu količinu topline. Energija koja se u tom slučaju troši beskorisna je i smatramo je gubitkom, a nastali gubici nazivaju se gubicima zbog vrtložnih struja (slika 1.6).

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 1.7.



Slika 1.7.

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

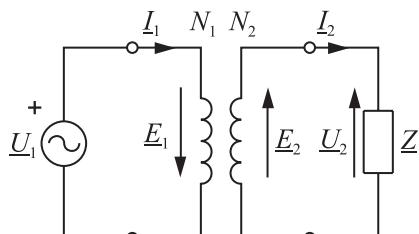
### Pogonska stanja transformatora

Svaki je transformator projektiran i građen za određenu prividnu snagu koju nazivamo **nazivnom snagom**  $S_N$ . Ako na primaru i sekundaru vladaju **nazivni naponi**  $U_{1N}$  i  $U_{2N}$ , transformator radi nazivnom snagom, a namotima teku nazivne struje  $I_{1N}$  i  $I_{2N}$ . Ove se vrijednosti uvek nalaze na natpisnoj pločici transformatora.

Analizirajmo sada pogonska stanja stvarnog transformatora, prema shemi na slici 1.8, ovisno o impedanciji trošila  $Z$  priključenog na sekundaru.

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  $U_{R2}$ :

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



Slika 1.8.

Transformator opterećen trošilom impedancije  $Z$

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

$$\underline{U}_{X1} = I_1 X_1$$

$$\underline{U}_{X2} = I_2 X_2.$$

Za primar i sekundar transformatora možemo napisati:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{U}_{R1} + \underline{U}_{X1}$$

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - \underline{U}_{R2} - \underline{U}_{X2},$$

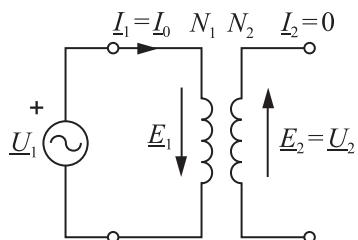
gdje je:

$\underline{U}_1$  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.

Ovo je bila analiza strujno-naponskih prilika transformatora u normalnom pogonu.



Slika 1.9.

Prazni hod transformatora

**Prazni hod** transformatora je pogonsko stanje kod kojeg je na primar priključen napon, a sekundarne priključnice su otvorene, prema slici 1.9. Napon na sekundaru jednak je induciranim naponu  $\underline{E}_2$ , a sekundarna struja  $I_2$  jednaka je nuli.

U primarnom namotu teče samo struja praznog hoda  $I_0$ . Glavni magnetski tok  $\Phi$  u željeznoj jezgri stvara gubitke uslijed histereze i vrtložnih struja te stoga struja praznog hoda ima dvije komponente: induktivnu  $I_\mu$  i djelatnu komponentu  $I_R$ , prema slici 1.4a:

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_\mu + \underline{I}_R.$$

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

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

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{U}_{R1} + \underline{U}_{X1}$$

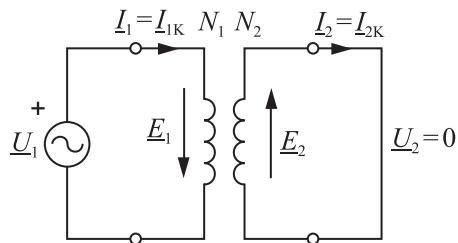
$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2,$$

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 struju praznog hoda  $I_0$ .

**Slika 1.10.**

Kratki spoj transformatora

**Kratki spoj** transformatora je stanje kvara u kojem je na primarnu stranu transformatora priključen napon  $U_1$ , a sekundarne priključnice su kratko spojene, što znači da je sekundarni napon  $U_2 = 0$  V, kako je prikazano na slici 1.10.

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

Jednadžbe II. Kirchhoffova 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 primarni
- $\underline{E}_1, \underline{E}_2$  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 za 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.

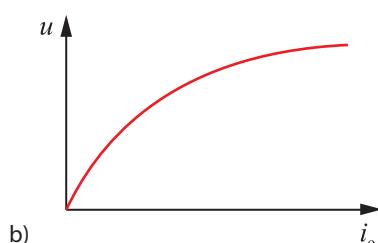
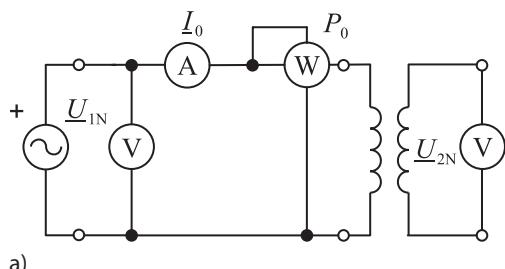
**Napon kratkog spoja**  $U_K$  je vrijednost primarnog napona pri kojem kroz kratko spojeni sekundar teče nazivna struja  $I_{2N}$ . Napon kratkog spoja izražava se u postotcima nazivnog primarnog napona  $U_{1N}$ :

$$u_K \% = \frac{U_K}{U_{1N}} \cdot 100 \%.$$

To je iznimno važan podatak svakog transformatora jer se s pomoću njega može izračunati struja kratkog spoja, a koristi se pri projektiranju zaštite transformatora.

### 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 s pomoću kojih definiramo glavne karakteristike promatranoj transformatora. Uobi-



Slika 1.11.

Pokus praznog hoda:

- a) električna shema
- b) karakteristika praznog hoda

čajeni naziv za te mjerne postupke je pokus praznog hoda i kratkog spoja.

**Pokus praznog hoda** jednofaznog transformatora izvodimo prema električnoj shemi na slici 1.11. Na primarni transformator priključimo nazivni napon efektivne vrijednosti  $U_{1N}$ , a sekundar je neopterećen, tj. na njegove stezaljke je spojen voltmetar velikog unutarnjeg otpora. Na primarnoj strani su osim voltmetra spojeni ampermetar, koji mjeri struju primarnu, i vatmetar, koji mjeri snagu.

Voltmetri na primarnoj i sekundarnoj strani mjere nazivne napone primara i sekundara  $U_{1N}$  i  $U_{2N}$ , a s pomoću tih vrijednosti možemo izračunati prijenosni odnos transformatora:

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

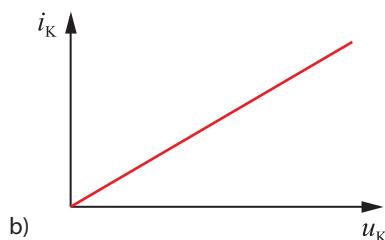
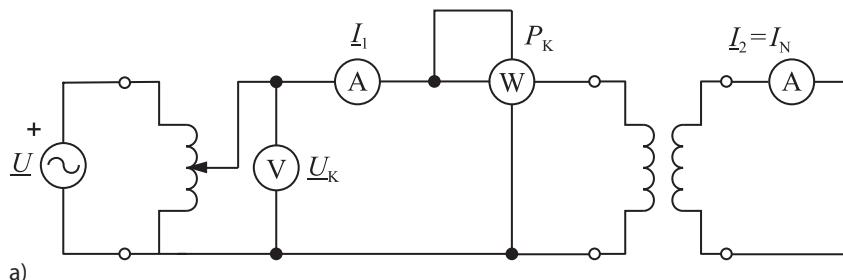
Ampermetar mjeri struju praznog hoda  $I_0$ , a vatmetar snagu koju transformator u praznom hodu uzima iz mreže  $P_0$ .

U praznom hodu teče 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:

$$P_{Fe} \approx P_0.$$

Na temelju izmjerениh veličina možemo odrediti fazni pomak između napona i struje primara, računajući  $\cos \varphi_0$ :

$$\cos \varphi_m = \frac{P_{Fe}}{U_{1N} I_0}.$$



Slika 1.12.

Pokus kratkog hoda:

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

**Pokus kratkog spoja** izvodimo prema električnoj shemi na slici 1.12. 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 s pomoću regulacijskog transformatora postupno povećavamo primarni napon  $U_1$ , od vrijednosti 0 V do vrijednosti  $U_K$ , kod koje na sekundarnoj strani transformatora potiče 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  $U_{IN}$ , struja magnetiziranja i magnetska indukcija vrlo su male, pa su gubitci u željezu transformatora zanemarivi. Stoga izmjerena snaga  $P_K$  predstavlja gubitke u bakru transformatora:

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

Na temelju izmjerenih vrijednosti možemo izračunati i faktor faznog pomaka:

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

Napon kratkog spoja transformatora  $U_K$  je vrijednost primarnog napona pri kojem kroz kratko spojeni sekundar teče nazivna struja  $I_{2N}$ . Napon kratkog spoja izražava se u postotcima nazivnog primarnog napona  $U_{IN}$ :

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

To je iznimno važan podatak svakog transformatora jer se s pomoću njega može izračunati struja kratkog spoja, a koristi se pri projektiranju zaštite transformatora.

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

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

### Konstrukcijski dijelovi i funkcija

Glavni konstrukcijski dijelovi svakog transformatora su:

- jezgra
- namot
- sustav izolacije.

Osim tih dijelova transformatori velikih snaga još imaju:

- sustav za hlađenje
- ostale dijelove.

### 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 1.13.



Slika 1.13.

Transformatorski E-limovi za mrežne transformatore