

Transformator

TRANSFORMATOR

Savršeni transformator

TRANSFORMATOR Savršeni jednofazni transformator

➤ **Jednofazni transformator u praznom hodu**

Savršeni jednofazni transformator je jezgra (od magnetskih limova bez gubitaka) s dva namota.

TRANSFORMATOR Savršeni jednofazni transformator

Narinuti napon \underline{U}_1 potjera takvu struju \underline{I}_1 koja sa svojim protjecanjem stvori takav magnetski tok Φ da njegova promjena inducira napon \underline{E}_1 koji drži ravnotežu narinutom naponu.

Istovremeno se zbog promjene magnetskog toka inducira napon \underline{E}_2 u sekundarnom namotu.

Sekundarni krug je otvoren (prazni hod transformatora), pa u sekundarnom namotu ne teče struja, $\underline{I}_2=0A$: $\underline{U}_2 = \underline{E}_2$

TRANSFORMATOR Savršeni jednofazni transformator

Pretpostavke:

relativna magnetska permeabilnost željeza $\mu_{r, Fe} \gg 1$

koeficijent magnetske veze $k = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}} \cong 1$

Sav magnetski tok ulančava oba namota.

Rasipni tokovi, koji ulančavaju samo jedan ili drugi namot ili njihove dijelove, su zanemarivi.

TRANSFORMATOR Savršeni jednofazni transformator

Naponska jednačba za primarni krug:

$$u_1 = i_1 R_1 + \frac{d\Psi_1}{dt} = i_1 R_1 + \frac{d(i_1 L_1)}{dt}$$

Ulančani magnetski tok struje i_1

$$\Psi_1 \cong N_1 \Phi$$

glavni magnetski tok

Uz $L_1 = \text{konst.}$ vrijedi: $u_1 = i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt}$

$$u_1 = i_1 R_1 + N_1 \frac{d\Phi}{dt} = i_1 R_1 + e_1$$

Inducirani napon u primarnom namotu $e_1 = \frac{d\Psi_1}{dt} = L_1 \frac{di_1}{dt} \cong N_1 \frac{d\Phi}{dt}$

TRANSFORMATOR
Savršeni jednofazni transformator

Zakon protjecanja:

$$\oint_{I_{Fe}} \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum i$$

Uz $S_{Fe} = konst.$ vrijedi: $H I_{Fe} = N_1 i_1 \Rightarrow H = \frac{N_1 i_1}{l_{Fe}}$

Magnetski tok $\Phi = S_{Fe} \vec{B} = S_{Fe} \mu_{Fe} \vec{H} = S_{Fe} \mu_{Fe} \frac{N_1 i_1}{l_{Fe}}$

Naponska jednačba:

$$u_1 = i_1 R_1 + N_1 \frac{d\Phi}{dt} = i_1 R_1 + \mu_{Fe} \frac{S_{Fe}}{l_{Fe}} N_1^2 \frac{di_1}{dt} = i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt}$$

TRANSFORMATOR
Savršeni jednofazni transformator

Induktivitet primara $L_1 \cong \mu_{Fe} \frac{S_{Fe}}{l_{Fe}} N_1^2 = \frac{\mu_{Fe} N_1^2}{\frac{l_{Fe}}{S_{Fe}}}$ magnetska vodljivost $\frac{1}{R_m}$ magnetski otpor

Fazorski prikaz naponske jednačbe primarnog kruga:

$$\underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + j\omega L_1 \underline{I}_1 = R_1 \underline{I}_1 + \underline{E}_1$$

Magnetski tok $\Phi(t)$ inducira u sekundarnom namotu napon e_2 :

$$e_2 = \frac{d\Psi_{12}}{dt} = \frac{d}{dt}(M i_1) \cong N_2 \frac{d\Phi}{dt} = \frac{N_1}{N_2} \frac{d\Phi}{dt}$$

Prva glavna jednačba transformatora:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1 \frac{d\Phi}{dt}}{N_2 \frac{d\Phi}{dt}} = \frac{N_1}{N_2}$$

TRANSFORMATOR
Savršeni jednofazni transformator

Ulančani magnetski tok struje i_1 kroz sekundarni namot

$$\Psi_{12} = N_2 \Phi \cong M i_1$$

Međuinduktivitet $M \cong \frac{N_2 \Phi}{i_1} = \mu_{Fe} \frac{S_{Fe}}{l_{Fe}} N_1 N_2 = \frac{\mu_{Fe} N_1 N_2}{\frac{l_{Fe}}{S_{Fe}}}$ magnetska vodljivost $\frac{1}{R_m}$ magnetski otpor

Fazor inducirano napona na sekundaru $\underline{E}_2 = j\omega M \underline{I}_1$

Napon na stezaljkama sekundara \underline{U}_2 jednak je naponu \underline{E}_2 jer u sekundarnom namotu ne teče struja:

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

TRANSFORMATOR
Savršeni jednofazni transformator

Napon $\underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + \underline{E}_1$
 $\underline{U}_1 \cong \underline{E}_1$

Prva glavna jednačba: $\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$

Fazorski prikaz napona i struje savršenog transformatora u praznom hodu

TRANSFORMATOR Savršeni jednofazni transformator

Jednofazni transformator pod opterećenjem

Impedancija trošila $\underline{Z}_t = R_t + jX_t$

Priključimo li trošilo u sekundarni krug, kroz sekundarni namot poteče struja \underline{I}_2 .

TRANSFORMATOR Savršeni jednofazni transformator

Uz oznake početaka namota prema slici, smjer struje \underline{I}_2 je suprotan smjeru struje \underline{I}_1 .

Naponska jednačba za sekundarni krug:

$$\underline{U}_2 = \underline{Z}_t \underline{I}_2 = \underline{E}_2 - \underline{R}_2 \underline{I}_2$$

napon na radnom otporu sekundarnog namota

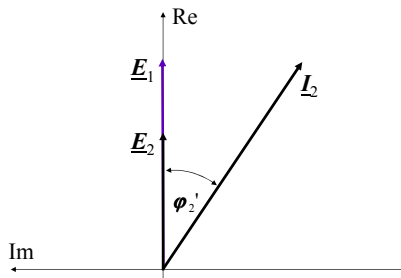
$$\underline{E}_2 = \underline{I}_2 (\underline{R}_2 + \underline{Z}_t)$$

aktivni napon na sekundaru

Fazni pomak struje sekundara prema induciranoj naponu

$$\varphi_2' = \arctg \frac{X_t}{R_2 + R_t}$$

TRANSFORMATOR
Savršeni jednofazni transformator



Fazorski prikaz napona i struje u sekundaru savršenog transformatora

TRANSFORMATOR
Savršeni jednofazni transformator

Ukupno protjecanje u magnetskom krugu

$$\Theta = N_1 I_1 - N_2 I_2$$

Struja kroz sekundar naruši ravnotežu u magnetskom krugu, stvorenu u praznom hodu:

- protjecanje se promijeni (smanji se),
- magnetski tok se promijeni (smanji se),
- inducirani naponi se promijene (smanje se).

Narinuti napon $\underline{U}_1 > R_1 \underline{I}_1 + \underline{E}_1$

TRANSFORMATOR
Savršeni jednofazni transformator

Transformator povuče dodatnu struju tereta iz izvora napajanja da se uspostavi prijašnji magnetski tok i ravnoteža napona u primarnom krugu.

Protjecanje dodatne struje primara

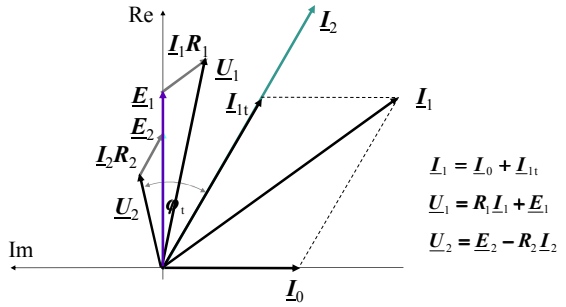
$$N_1 I_{1t} = N_2 I_2$$

Dodatna struja primara

$$I_{1t} = \frac{N_2}{N_1} I_2$$



TRANSFORMATOR
Savršeni jednofazni transformator



Fazorski prikaz napona i struja savršenog transformatora pod opterećenjem

TRANSFORMATOR
➤ **Svođenje sekundarnih veličina na primar**

Ukupna snaga na sekundaru

$$\begin{aligned} \underline{S}_2 &= \underline{E}_2 \underline{I}_2^* = \underline{E}_2 \frac{\underline{E}_2^*}{(R_2 + R_1 + jX_1)^*} = \frac{E_2^2}{(R_2 + R_1 - jX_1)} = \\ &= \frac{E_2^2}{(R_2 + R_1)^2 + X_1^2} (R_2 + R_1 + jX_1) = \\ &= \frac{E_2^2}{\sqrt{(R_2 + R_1)^2 + X_1^2}} \left(\frac{R_2 + R_1}{\sqrt{(R_2 + R_1)^2 + X_1^2}} + j \frac{X_1}{\sqrt{(R_2 + R_1)^2 + X_1^2}} \right) = \\ &= \frac{E_2^2}{|R_2 + Z_1|} (\cos \varphi_2' + j \sin \varphi_2') \end{aligned}$$

Inducirani napon na sekundaru $E_2 = \frac{N_2}{N_1} E_1$

TRANSFORMATOR
Snaga na sekundaru

$$\begin{aligned} \underline{S}_2 &= \frac{E_1^2}{|R_2 + Z_1| \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2} (\cos \varphi_2' + j \sin \varphi_2') = \\ &= \frac{E_1^2}{|R_2' + Z_1'|} (\cos \varphi_2' + j \sin \varphi_2') \end{aligned}$$

Svedeni otpori i reaktancija

$$R_2' = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 R_2 \quad R_1' = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 R_1 \quad X_1' = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 X_1$$

Umjesto s naponom \underline{E}_2 možemo računati s naponom \underline{E}_1 i svedenim otporima i reaktancijama.

TRANSFORMATOR

Svođenje struje slijedi iz jednakosti snaga sa nesvedenim i svedenim veličinama.

Snaga na sekundaru

$$S_2 = E_2 I_2 = E_1 \frac{N_2}{N_1} I_2 = E_1 I_2' = E_2' I_2'$$

Svedena sekundarna struja

$$I_2' = \frac{N_2}{N_1} I_2 \Rightarrow I_2' = \frac{N_2}{N_1} I_2 = I_{11}$$

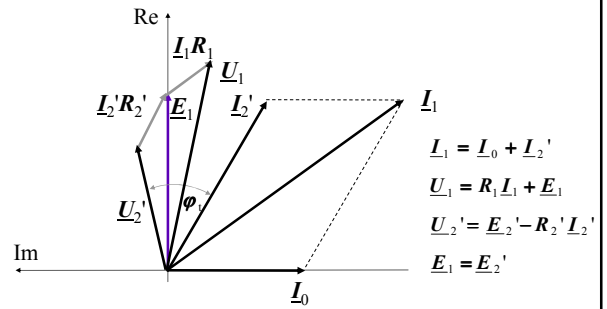
Svedeni sekundarni naponi

$$\underline{E}_2' = \frac{N_1}{N_2} E_2 = \underline{E}_1 \quad \underline{U}_2' = \frac{N_1}{N_2} U_2$$

Svođenje na primar znači da je broj zavoja sekundara izjednačen s brojem zavoja primara!

TRANSFORMATOR

Savršeni jednofazni transformator



Fazorski prikaz napona i struja savršenog transformatora pod opterećenjem

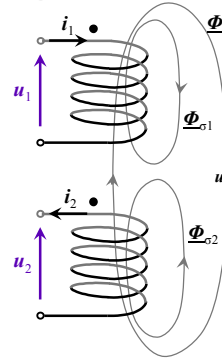
TRANSFORMATOR

Realni transformator bez željezne jezgre

TRANSFORMATOR

Realni transformator bez željezne jezgre

➤ Dva magnetski vezana strujna kruga



Naponske jednačbe:

$$u_1 = i_1 R_1 + \frac{d\Psi_1}{dt}$$

ulančani magnetski tok kroz prvu zavojnicu

$$u_2 = -i_2 R_2 + \frac{d\Psi_2}{dt}$$

ulančani magnetski tok kroz drugu zavojnicu

TRANSFORMATOR

Realni transformator bez željezne jezgre

Pretpostavka:

- sav rasipni tok $\Phi_{\sigma 1}$ obuhvaća sve primarne zavoje,
- $\Phi_{\sigma 2}$ obuhvaća sve sekundarne zavoje.

Ukupni ulančani tokovi kroz promatrane krugove

$$\Psi_1 = L_1 i_1 - M i_2 \cong N_1 (\Phi + \Phi_{\sigma 1})$$

$$\Psi_2 = M i_1 - L_2 i_2 \cong N_2 (\Phi - \Phi_{\sigma 2})$$

Struja i_2 ima negativan predznak jer ruši tok u primarnom krugu.

TRANSFORMATOR

Realni transformator bez željezne jezgre

Pretpostavka: $L_1 = konst.$
 $L_2 = konst.$
 $M = konst.$

Naponske jednačbe:

$$u_1 = i_1 R_1 + \frac{d}{dt} (L_1 i_1 - M i_2)$$

$$u_2 = -i_2 R_2 + \frac{d}{dt} (M i_1 - L_2 i_2)$$

Rasipni induktiviteti

$$L_{\sigma 1} = L_1 - \frac{N_1}{N_2} M \Rightarrow L_1 = L_{\sigma 1} + \frac{N_1}{N_2} M$$

$$L_{\sigma 2} = L_2 - \frac{N_2}{N_1} M \Rightarrow L_2 = L_{\sigma 2} + \frac{N_2}{N_1} M$$

TRANSFORMATOR
Realni transformator bez željezne jezgre

Naponske jednačbe:

$$u_1 = i_1 R_1 + \frac{d}{dt} \left(L_{\sigma 1} + \frac{N_1}{N_2} M \right) i_1 - M \frac{d i_2}{dt}$$

$$u_2 = -i_2 R_2 + M \frac{d i_1}{dt} - \frac{d}{dt} \left(L_{\sigma 2} + \frac{N_2}{N_1} M \right) i_2 \quad / \cdot \frac{N_1}{N_2}$$

Sekundarna struja

$$i_2 = \frac{N_1}{N_2} i_2'$$

Glavni induktivitet (međuinaktivitet)

$$L_m = \frac{N_1}{N_2} M$$

TRANSFORMATOR
Realni transformator bez željezne jezgre

Naponske jednačbe:

$$u_1 = i_1 R_1 + \frac{d}{dt} \left(L_{\sigma 1} + \frac{N_1}{N_2} M \right) i_1 - \frac{N_1}{N_2} M \frac{d i_2'}{dt}$$

$$u_2 \frac{N_1}{N_2} = -i_2' \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 R_2 + \frac{N_1}{N_2} M \frac{d i_1}{dt} - \frac{d}{dt} \left(L_{\sigma 2} + \frac{N_2}{N_1} M \right) \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 i_2'$$

$$L_{\sigma 2}' = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 L_{\sigma 2}$$

TRANSFORMATOR
Realni transformator bez željezne jezgre

Naponske jednačbe:

$$u_1 = R_1 i_1 + L_{\sigma 1} \frac{d i_1}{dt} + L_m \frac{d (i_1 - i_2')}{dt}$$

$$u_2' = -R_2' i_2' - L_{\sigma 2}' \frac{d i_2'}{dt} + L_m \frac{d (i_1 - i_2')}{dt}$$

Struja magnetiziranja

$$i_\mu = i_1 - i_2'$$

$$u_1 = R_1 i_1 + L_{\sigma 1} \frac{d i_1}{dt} + L_m \frac{d i_\mu}{dt}$$

$$u_2' = -R_2' i_2' - L_{\sigma 2}' \frac{d i_2'}{dt} + L_m \frac{d i_\mu}{dt}$$

TRANSFORMATOR
Realni transformator bez željezne jezgre

Naponske jednačbe – fazorski oblik:

$$\underline{U}_1 = (R_1 + j\omega L_{\sigma 1}) \underline{I}_1 + j\omega L_m (\underline{I}_1 - \underline{I}_2')$$

$$j\omega L_m (\underline{I}_1 - \underline{I}_2') = \underline{U}_2' + (R_2' + j\omega L_{\sigma 2}') \underline{I}_2'$$

Inducirani napon

$$\underline{E} = j\omega L_m (\underline{I}_1 - \underline{I}_2') = j\omega L_m \underline{I}_\mu$$

$$\underline{E} = \underline{E}_1 = \underline{E}_2'$$

Struja magnetiziranja

$$\underline{I}_\mu = \underline{I}_1 - \underline{I}_2'$$

Naponske jednačbe:

$$\underline{U}_1 = (R_1 + j\omega L_{\sigma 1}) \underline{I}_1 + \underline{E}$$

$$\underline{E} = \underline{U}_2' + (R_2' + j\omega L_{\sigma 2}') \underline{I}_2'$$

TRANSFORMATOR
Realni transformator bez željezne jezgre

Glavna reaktancija

$$X_m = \omega L_m$$

Rasipna reaktancija primara

$$X_{\sigma 1} = \omega L_{\sigma 1}$$

Rasipna reaktancija sekundara

$$X_{\sigma 2} = \omega L_{\sigma 2}$$

Inducirani napon

$$\underline{E} = j X_m \underline{I}_\mu$$

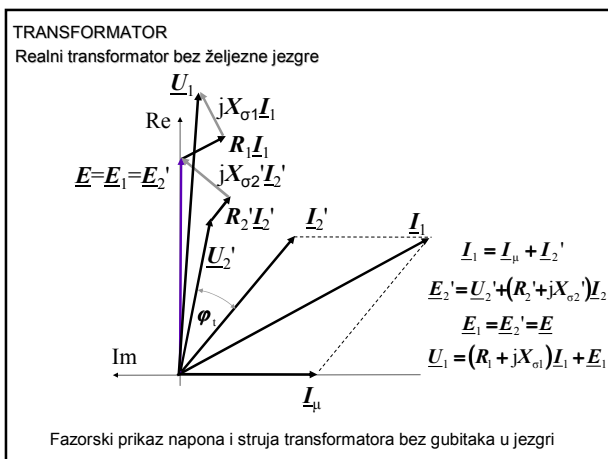
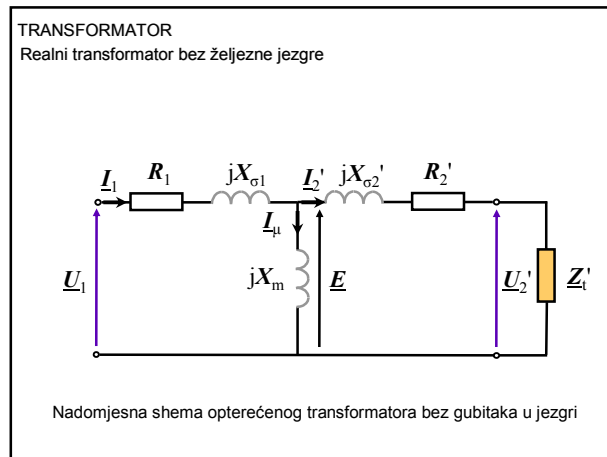
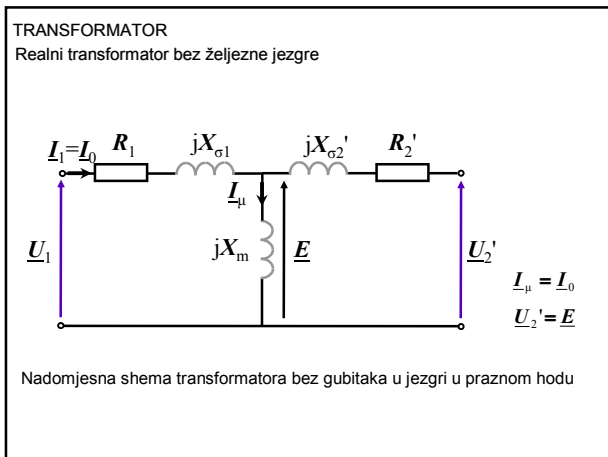
Naponske jednačbe:

$$\underline{U}_1 = (R_1 + j X_{\sigma 1}) \underline{I}_1 + \underline{E}$$

$$\underline{E} = \underline{U}_2' + (R_2' + j X_{\sigma 2}') \underline{I}_2'$$

TRANSFORMATOR
Realni transformator bez željezne jezgre

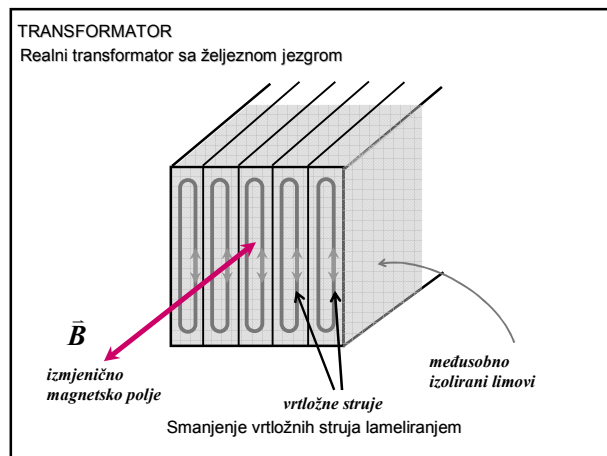
Nadomjesna shema transformatora bez gubitaka u jezgri

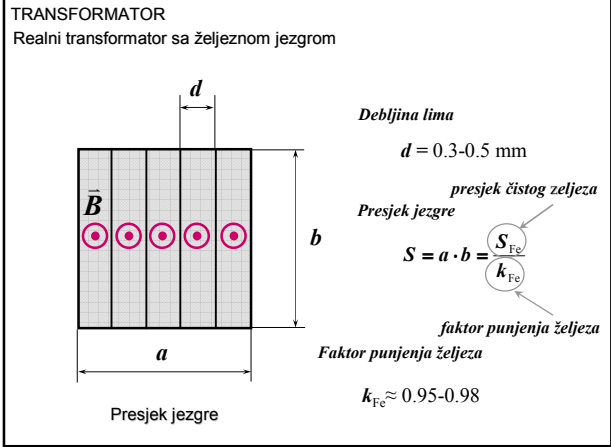


TRANSFORMATOR

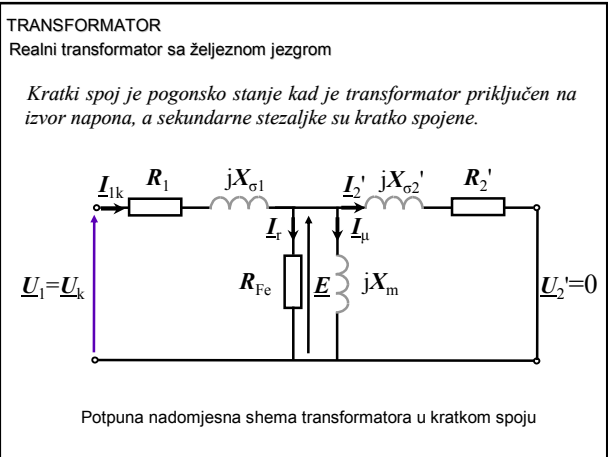
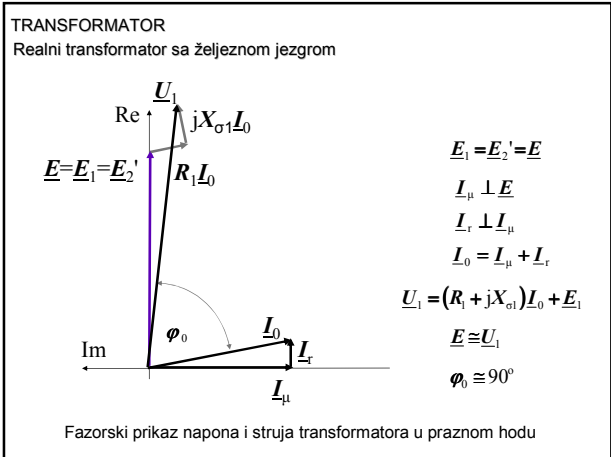
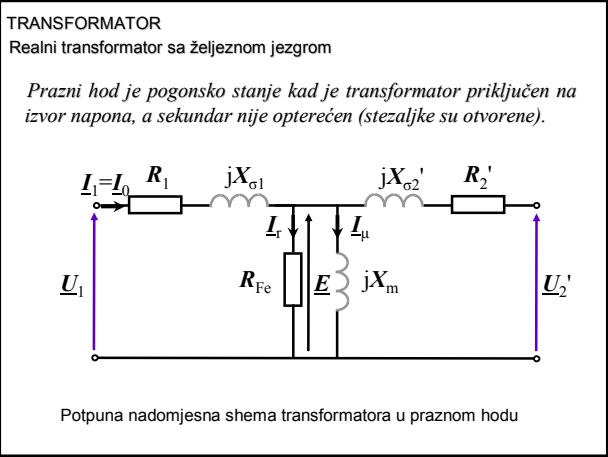
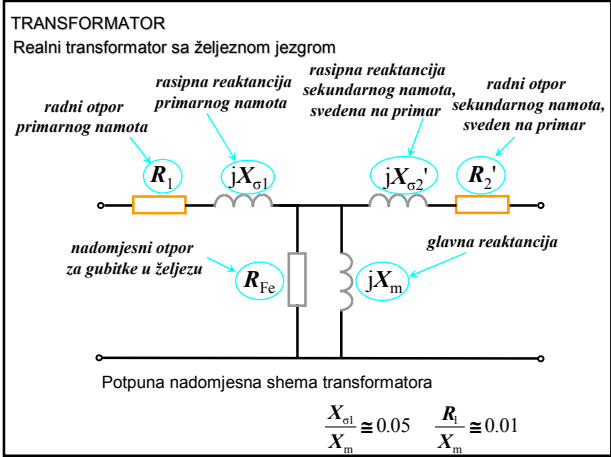
Realni transformator sa željeznom jezgrom

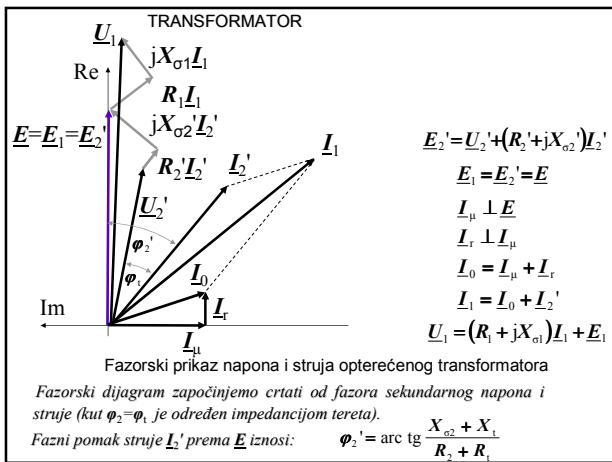
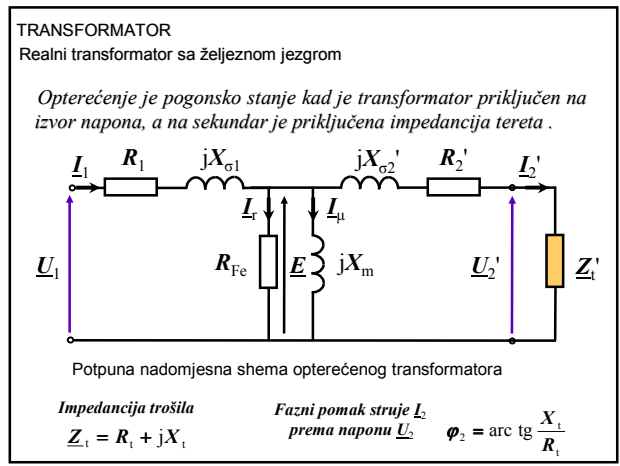
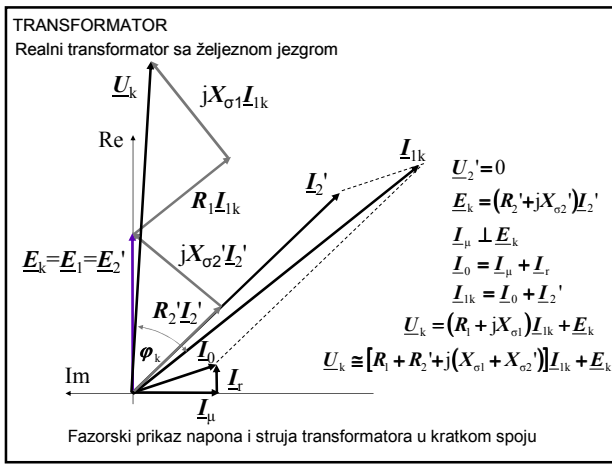
- TRANSFORMATOR
Realni transformator sa željeznom jezgrom
- Transformatori se obično izrađuju s željeznom jezgrom koja dobro vodi magnetski tok.
 - Za istu snagu manje su dimenzije transformatora u odnosu na transformator s jezgrom od nemagnetskog materijala.
 - U željeznoj jezgri nastaju gubici usljed vrtložnih struja i histereze zbog izmjeničnog magnetskog polja.
 - Jezgra se izrađuje od tankih magnetskih limova, međusobno izoliranih, poredanih paralelno u smjeru vođenja toka, čime se smanjuju vrtložne struje.





- TRANSFORMATOR
Realni transformator sa željeznom jezgrom
- Gubitke u jezgri uzrokuju pretežno glavni magnetski tok.
 - Ove gubitke računamo pomoću nadomjesnog radnog otpora R_{Fe} .
 - U nadomjesnoj shemi R_{Fe} se prikazuje paralelno s glavnom reaktancijom X_m .





TRANSFORMATOR

Energetski odnosi u transformatoru

TRANSFORMATOR
Energetski odnosi u transformatoru

Snaga koju transformator uzima iz izvora napajanja

$$S_1 = U_1 I_1$$

Snaga koju transformator predaje trošilu

$$S_2 = U_2 I_2$$

Transformator predaje trošilu snagu S_2 koja je manja od ulazne snage S_1 zbog gubitaka u transformatoru:

$$S_2 < S_1$$

Pretpostavka: nema gubitaka niti padova napona u transformatoru!

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= U_1 I_1 = E_1 I_1 \\ S_2 &= U_2 I_2 = E_2 I_2 \end{aligned} \right\} S_1 = S_2 \Rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

Druge glavna jednažba:

TRANSFORMATOR
Energetski odnosi u transformatoru

Radna snaga koju transformator uzima iz izvora napajanja

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1$$

Radna snaga koju transformator predaje trošilu

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$$

Fazni pomak φ_1 određuje ukupna impedancija transformatora i trošila Z_u :

$$Z_u = Z_1 + \frac{Z_0(Z_2' + Z_t')}{Z_0 + Z_2' + Z_t'} \Rightarrow \varphi_1 = \arctg \frac{\text{Im}(Z_u)}{\text{Re}(Z_u)}$$

Impedancija primara $Z_1 = R_1 + jX_{\sigma 1}$

Impedancija sekundara $Z_2' = R_2' + jX_{\sigma 2}'$

Impedancija poprečne grane $Z_0 = \frac{R_{Fe} \cdot jX_m}{R_{Fe} + jX_m}$

$\varphi_2 = \arctg \frac{X_t}{R_t}$

TRANSFORMATOR
Energetski odnosi u transformatoru

U transformatoru nastaju gubici u ulazna radna snaga namotima i u željezu, pa je:

$$P_1 = P_2 + P_g$$

gubici snage

Ukupni gubici

$$P_g = P_{Cu} + P_{Fe}$$

gubici u namotima
gubici u željezu

Gubici u namotima

$$P_{Cu} = P_{Cu1} + P_{Cu2}$$

Gubici u primarnom namotu
 $P_{Cu1} = I_1^2 R_1$

Gubici u sekundarnom namotu
 $P_{Cu2} = I_2^2 R_2 = I_2'^2 R_2'$

Stupanj djelovanja (korisnost)

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

Gubici u transformatoru mjere se pokusima praznog hoda i kratkog spoja.

TRANSFORMATOR
Energetski odnosi u transformatoru

Gubici u željezu

$$P_{Fe} = P_h + P_v$$

gubici histereze
gubici vrložnih struja

Gubici histereze odrede se pomoću specifičnih gubitaka histereze σ_h (izmjenjena za 1kg materijala, obično kod 50 Hz i 1.0 T):

$$P_h = \sigma_h \frac{f}{50} \left(\frac{B_m}{1.0}\right)^2 m_{Fe}$$

specifični gubici histereze
frekvencija
maksimalna indukcija
masa željezne jezgre

Gubici vrložnih struja odrede se pomoću specifičnih gubitaka σ_v (izmjenjena za 1kg materijala, obično kod 50 Hz i 1.0 T):

$$P_v = \sigma_v \left(\frac{f}{50} \cdot \frac{B_m}{1.0}\right)^2 m_{Fe}$$

specifični gubici vrložnih struja
frekvencija
maksimalna indukcija
masa željezne jezgre

gubici vrložnih struja

TRANSFORMATOR
Energetski odnosi u transformatoru

Gubici u željezu - pojednostavljeno

$$P_{Fe} = p_{Fe} \frac{f}{50} \left(\frac{B_m}{1.0}\right)^2 m_{Fe}$$

specifični gubici u željezu
frekvencija
maksimalna indukcija
masa željezne jezgre
gubici u željezu

Specifični gubici u željezu p_{Fe} sadrže specifične gubitke histereze i vrložnih struja.

Odrede se mjerenjem za 1kg materijala, obično kod 50 Hz i 1.0 T.

Nadomjesni otpor za gubitke u željezu

$$R_{Fe} = \frac{E^2}{P_{Fe}} \cong \frac{U_1^2}{P_{Fe}}$$

Elektromehanička pretvorba energije

ELEKTROMECHANİKA PRETVORBA ENERGIJE

Princip rada električnog generatora

ELEKTROMECHANİKA PRETVORBA ENERGIJE
Princip rada električnog generatora

vodljive tračnice
v
 \vec{B}
a
b
vodljivi štap

Stvaranje elektromotorne sile

Mehanička sila potrebna da se nastavi gibanje

Vektori brzine, indukcije i duljine vodiča su međusobno okomiti!

Elektromotorna sila
 $e = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{l}$

Struja
 $i = \frac{e}{R}$

R_v ukupni otpor petlje

Električna sila na vodiču magnetskom polju
 $\vec{F}_{el} = I(\vec{l} \times \vec{B})$

$\vec{F}_{meh} = -\vec{F}_{el}$

ELEKTROMEĦANIĦKA PRETVORBA ENERGIJE
Princip rada elektriĦnog generatora

Ukupni otpor petlje

$$R(x) = R_s + 2 \cdot [R_k + R_{tr}(x)] + R_v$$

Koordinata x
 $x = x_0 - v \cdot t$

otpor štapa izmeĦu a i b
kontaktni otpor izmeĦu štapa i traĦnica
vanjski otpor
otpor traĦnice

poĦetna udaljenost štapa od vanjskog otpora
Samoinduktivitet petlje je promjenljiv (smanjuje se površina petlje):
 $L = L(x)$

Pretpostavka:
RaĦunamo samo s narinutim magnetskim poljem indukcije \vec{B} - zanemarujemo utjecaj struje na ukupno magnetsko polje:

$$\left| \frac{d[i L(x)]}{dt} \right| \ll |i R(x)|$$

ELEKTROMEĦANIĦKA PRETVORBA ENERGIJE
Princip rada elektriĦnog generatora

Promatramo otvoren strujni krug – na naboj u štapu djeluje Lorentzova sila:

$$d\vec{F} = dq(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) = dq(\vec{E} + \vec{E}_i)$$

naboj u štapu
elektriĦno polje od razdvojenih naboja
inducirano elektriĦno polje

Zbog ravnoteke sila mora biti: $d\vec{F} = 0 \Rightarrow \vec{E} = -\vec{E}_i = -\vec{v} \times \vec{B}$

Elektromotorna sila
Napon izmeĦu a i b

$$e = \int_a^b \vec{E}_i \cdot d\vec{l} = Blv \quad u_{ab} = \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_a^b \vec{E}_i \cdot d\vec{l} = e$$

Inducirani napon – Faradayev zakon

$$e = -\frac{d\psi}{dt} \cong -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{(-Bl dx)}{dt} = Blv$$

Inducirani napon jednak je elektromotornoj sili!

ELEKTROMEĦANIĦKA PRETVORBA ENERGIJE
Princip rada elektriĦnog generatora

Uz konstantnu brzinu v krugom teĦe istosmjerna struja.

Otpor izvora

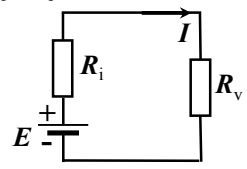
$$R_i = R_s + 2 \cdot [R_k + R_{tr}(x)]$$

otpor traĦnice
kontaktni otpor izmeĦu štapa i traĦnica
otpor štapa izmeĦu a i b

Struja $I = \frac{E}{R_i + R_v}$

Napon na vanjskom otporu $U = E - I R_i$

Snaga koju generator daje vanjskom otporu $P = UI$



ElektriĦna shema generatora

ELEKTROMEĦANIĦKA PRETVORBA ENERGIJE
Princip rada elektriĦnog generatora

Na naboj u gibanju djeluje sila:

$$d\vec{F}_{el} = dq \vec{v} \times \vec{B} = \frac{dq}{dt} d\vec{l} \times \vec{B} = i d\vec{l} \times \vec{B}$$

$\vec{v} = \frac{d\vec{l}}{dt}$ $i = \frac{dq}{dt}$

Sila je suprotna smjeru gibanja – pravilo desne ruke!

Sila na vodiĦ u magnetskom polju MehaniĦka (vanjska) sila potrebna da se nastavi gibanje

$$F_{el} = B I l \quad \vec{F}_{meh} = -\vec{F}_{el}$$

Rad koji vrši vanjska sila $dA = dW_{meh} = \vec{F}_{meh} \cdot d\vec{x} = F_{meh} dx = B I l dx$

ELEKTROMEĦANIĦKA PRETVORBA ENERGIJE
Princip rada elektriĦnog generatora

Rad koji vrši vanjska sila

$$dA = B I l dx \Rightarrow dW_{el}$$

Dobiveni rad se troši u elektriĦnom krugu.

ElektriĦni rad

$$dW_{el} = -E I \cdot dt = -Blv I \cdot dt = -B I l dx$$

Zakon o oĦuvanju energije:

$$dW_{meh} + dW_{el} = 0$$

ElektriĦna energija

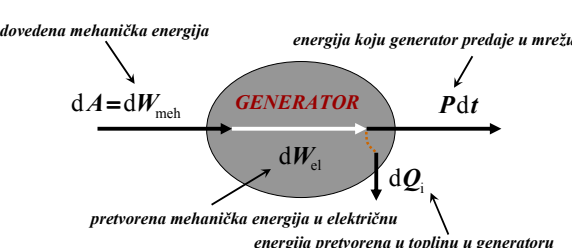
$$-dW_{el} = I^2 R_i \cdot dt + I U dt = dQ_i + P dt$$

toplina na unutarnjem otporu korisna energija

ELEKTROMEĦANIĦKA PRETVORBA ENERGIJE
Princip rada elektriĦnog generatora

dovedena mehaniĦka energija

energija koju generator predaje u mrežu



pretvorena mehaniĦka energija u elektriĦnu
energija pretvorena u toplinu u generatoru

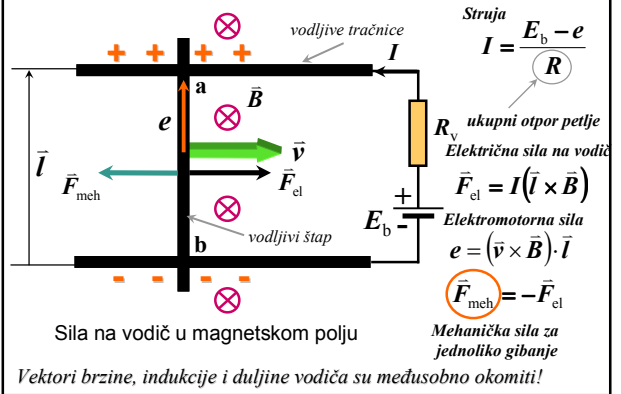
Schema toka energije u generatoru

ELEKTROMECHANİČKA PRETVORBA ENERGIJE

Princip rada električnog motora

ELEKTROMECHANİČKA PRETVORBA ENERGIJE

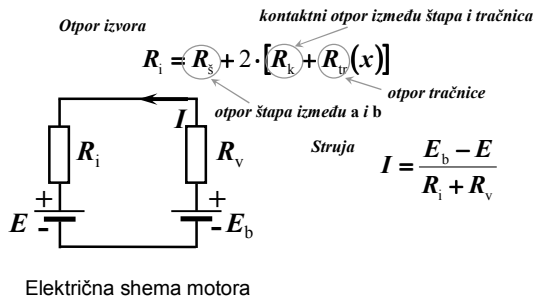
Princip rada električnog motora



ELEKTROMECHANİČKA PRETVORBA ENERGIJE

Princip rada električnog motora

Nakon prijelazne pojave i uz konstantnu brzinu v krugom teče istosmjerna struja I.



ELEKTROMECHANİČKA PRETVORBA ENERGIJE

Princip rada električnog motora

Na štap u gibanju djeluje Lorentzova sila:

$$d\vec{F}_{el} = dq \vec{v} \times \vec{B} = \frac{dq}{dt} d\vec{l} \times \vec{B} = i d\vec{l} \times \vec{B}$$

$$\vec{v} = \frac{d\vec{l}}{dt} \quad i = \frac{dq}{dt}$$

Sila uzrokuje gibanje – djeluje u smjeru gibanja!

Sila na vodič u magnetskom polju $\vec{F}_{el} = B I l$

Mehanička (vanjska) sila potrebna da se nastavi jednoliko gibanje $\vec{F}_{meh} = -\vec{F}_{el}$

Proizveden mehanički rad $dA = dW_{meh} = \vec{F}_{meh} \cdot d\vec{x} = -\vec{F}_{el} \cdot d\vec{x} = -B I l dx$

ELEKTROMECHANİČKA PRETVORBA ENERGIJE

Princip rada električnog motora

Motor daje mehanički rad

$$-dA = B I l dx$$

Motor uzima električnu energiju iz izvora E_b .

Električna energija u štapu $dW_{el} = E I \cdot dt = B l v I \cdot dt = B I l dx \Rightarrow dW_{el} = -dA$

Naponska jednačba nadomjesnog strujnog kruga:

$$E + I R_i + I R_v = E_b \quad / \cdot I dt$$

$$E I dt + I^2 R_i dt + I^2 R_v dt = E_b I dt$$

$$dW_{el} + dQ_i + dQ_v = dW_b$$

električna energija vanjskog izvora

toplina u motoru dQ_i dQ_v dW_b dW_{el} dW_{meh}

ELEKTROMECHANİČKA PRETVORBA ENERGIJE

Princip rada električnog motora

