

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Katedra elektrotechniky a elektromechanických systémů

ELEKTRICKÉ STROJE

Učební texty

**Doc. Ing. Eva Konečná, CSc.
Doc. Ing. Aleš Richter, CSc.**

Upravené vydání
září 2000

ÚVOD

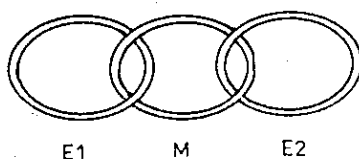
Tyto učební texty nemají za cíl suplovat přednášky z předmětu „Elektrotechnika“, ale podávají pouze stručný přehled uvedené problematiky, včetně zjednodušeného matematického popisu tak, aby posluchači strojní i textilní fakulty lépe porozuměli přednášeným tématům, uvědomili si základní principy činnosti elektrických strojů a dokázali se správně orientovat v doporučené studijní literatuře, která je uvedena v závěru.

1 ZÁKLADNÍ ZÁKONY ELEKTROMAGNETICKÉ PŘEMĚNY ENERGIE

Elektrický stroj je zařízení, které využívá elektromagnetické indukce k přeměně mechanické energie na elektrickou nebo elektrické na mechanickou nebo mění elektrickou energii na energii jiných vlastností a parametrů. Základní částí každého elektrického stroje jsou:

- primární elektrický obvod E_1 ,
- magnetický obvod M ,
- sekundární elektrický obvod E_2 ,

kdy elektrické obvody jsou navzájem vázány magnetickým polem, obr. 1.1. Základní principy činnosti elektrických strojů jsou speciálními případy obecných zákonitostí, vyjádřených Maxwellovými rovnicemi [1].



Obr.1.1. Definice elektrického stroje

U transformátorů, budících cívek stejnosměrných strojů a pod. platí pro vinutí s N závitů protékanými proudem I vztah pro **magnetomotorické napětí**:

$$U_m = \int H_1 \cdot dl = N \cdot I \quad [A ; A \cdot m^{-1} \cdot m]$$

kde H_1 je průmět vektoru intenzity magnetického pole do směru integrační dráhy ($H \perp l$).

Zákon elektromagnetické indukce: indukované napětí v cívce, která se nachází v proměnném magnetickém poli, je

$$u_i = \frac{d\psi}{dt} = N \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad [V ; Wb = V \cdot s, s^{-1}]$$

kde N - počet závitů cívky,

ϕ - magnetický tok, sprážený magnetický tok cívky s N závitů $\Psi = N \cdot \phi$.

U střídavých elektrických strojů se v ustáleném stavu používá odvozený vztah pro efektivní hodnotu napětí indukovaného v jedné fázi vinutí statoru (platí pro harmonický průběh $\phi = \phi_m \cdot \sin \omega t$, $f=50\text{Hz}$):

$$U_i = N \cdot \frac{d\phi}{dt} = N \cdot \omega \cdot \phi_{\max} \cdot \cos \omega t = N \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{\phi_{\max}}{\sqrt{2}} = 4,44 \cdot N \cdot \phi_{\max} \cdot f$$

Ve stejnosměrných strojích se v magnetickém poli budícího vinutí pohybuje vodič kotvy. Indukované napětí v kotvě (za předpokladu, že vektor magnetické indukce \mathbf{B} , vodič o délce l a směr rychlosti otáčení \mathbf{v} jsou na sebe kolmé) je dané vztahem:

$$u_i = (\mathbf{B} \times \mathbf{v}) \cdot l \quad [V; T=Vs.m^{-2}, m, m.s^{-1}]$$

Síla působící na vodič délky l protékáný proudem I v magnetickém poli ($\mathbf{B} \perp \mathbf{l} \perp \mathbf{I}$):

$$\mathbf{F} = (\mathbf{B} \times \mathbf{l}) \cdot I \quad [N; T=Vs.m^{-2}, A., m]$$

Zákon magnetického toku ($\mathbf{B} \perp \mathbf{S}$): $\oint \mathbf{B} \cdot \mathbf{S} = \mu_0 \cdot I$ [Wb(Vs); $T=Vs.m^{-2}, m^2$]

Vztah mezi intenzitou magnetického pole H a magnetickou indukcí B je dán **materiálovou konstantou** μ :

$$B = \mu \cdot H = \mu_0 \cdot \mu_R \cdot H \quad [T=Vs.m^{-2}; H.m^{-1}, A.m^{-1}]$$

kde **permeabilita** μ má charakter měrné magnetické vodivosti,

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ permeabilita vakua} \quad [H.m^{-1}]$$

μ_R - poměrná permeabilita prostředí (bez rozměru).

Hopkinsův zákon: je analogický Ohmovu zákonu pro elektrické obvody (platí jen v některých linearizovaných případech)

$$U_m = \phi \cdot R_m = \frac{\phi}{\Lambda} = N \cdot I \quad [A; Vs, A.(Vs)^{-1}]$$

$$\text{kde magnetický odpor } R_m = \frac{l}{\Lambda} = \frac{l}{\mu \cdot S} \quad [A.(Vs)^{-1} = 1. \{(Vs.A^{-1})\}^{-1} = m. \{Vs.(Am)^{-1}\}^{-1} . m^{-2}]$$

Λ - magnetická vodivost,

l - délka magnetického obvodu,

S - průřez magnetického obvodu.

2 ROZDĚLENÍ ELEKTRICKÝCH STROJŮ

Elektrické stroje se dělí podle různých hledisek. Podle *proudové soustavy* mohou být elektrické stroje

- **stejnosměrné** - (s cizím buzením, derivační, seriové, kompaundní),
- **střídavé** - 1-, 3- a vícefázové (asynchronní, synchronní, komutátorové),
- **univerzální**,

dále **točivé** (motory, generátory, dynamy) a **netočivé** (transformátory a natáčivé transformy).

Jiné možné dělení je podle *směru toku a druhu energie*, kdy se elektrické stroje dělí na:

- **motory** (vstupní energie je elektrická, výstupní mechanická),
- **generátory** střídavé - **alternátory** nebo stejnosměrné - **dynamy** (vstupní energie mechanická, výstupní elektrická),
- **měníče** - mají na vstupu a výstupu elektrickou energii různých vlastností .

Podle *výkonu* se točivé elektrické stroje dělí na:

- **drobné** (domácí spotřebiče) do 0,5 kW,
- **malé** od 0,5 do 15 kW,
- **střední** od 15 do 100 kW,
- **velké** s výkony nad 100 kW.

Rozdělení podle *rychlosti otáčení*: **pomalé** s otáčkami nižšími než 1000 min^{-1} , **normální** (1000 až 2000 min^{-1}) a **rychloběžné** s otáčkami nad 2000 min^{-1} .

Rozdělení strojů podle *principu působení*:

transformátory, stroje stejnosměrné, asynchronní (indukční), synchronní, komutační, speciální (lineární, krokové a diskové motory, servomotory a selsyny).

3 MATERIÁLY A PŘÍKONENÍ ELEKTRICKÝCH STROJŮ

3.1 Elektrické obvody

V elektrických strojích se používají pouze izolované měděné nebo hliníkové vodiče. Izolace chrání vodič proti nežádoucímu odvodu proudu do sousedního vodiče nebo do magnetického obvodu, případně do jiných částí elektrického stroje. Vodiče vinutí se nejčastěji vyrábějí z elektrolytické mědi o hustotě $8,9 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, pevnost v tahu nad 300 MPa , bod tání 1083°C , měrný el.odpor $\rho = 1,786 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, měrná el.vodivost $\gamma = 56 \cdot 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$, teplotní součinitel $\alpha = 3,93 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Měď je dobře obrobitelná, dá se táhnout, pájet a svařovat. Tvrdá se používá u komutátorů, měkká je určena pro tažené vodiče kruhového i obdélníkového průřezu.

Hliník má hustotu $2,65 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, pevnost v tahu asi 70 MPa , bod tání 658°C , měrný el.odpor $\rho = 2,87 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, měrná el.vodivost $\gamma = 36 \cdot 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ a teplotní součinitel $\alpha = 3,77 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Má menší hmotnost, na povrchu se rychle okysličuje, vzniklá vrstva kyslíčnicku má veliký odpor a je příčinou obtížného spojování. V současné době se nahrazuje mědí.

Odpor vodičů s teplotou roste podle vztahu

$$R_2 = R_1 \cdot [1 + \alpha(\vartheta_2 - \vartheta_1)] \quad [\Omega; \Omega, ^\circ\text{C}, ^\circ\text{C}]$$

Teplotní součinitel α je konstantní pro určitou teplotu.

Na odporu měděných vodičů vinutí vznikají při průtoku proudu výkonové ztráty Joulovým teplem,

$$\Delta P_{\text{Cu}} = R \cdot I^2 \quad [\text{W}; \Omega, \text{A}]$$

Provozní spolehlivost elektrických strojů záleží hlavně na jakosti použitých **izolačních materiálů** jak vodičů, tak i mechanických dílů, která musí vydržet určité teploty a mechanická namáhání, musí odolávat vlhkosti, prachu, chemickým vlivům, otřesům, různé tepelné roztažnosti částí strojů a mít přiměřeně dlouhý život. Norma ČSN 34 0270 i [IEC](#) normy rozdělují izolační materiály do 7 tříd:

třída Y (do 90°C) - neimpregnované látky - bavlna, hedvábí, papír, PVC, polyamidové vlákniny a pod.,

třída A (do 105°C) - impregnované látky jako je bavlna, hedvábí, papír, folie z acetátu celulózy, vulkánfibr aj.

třída E (do 120°C) - tvrzené bavlněné tkaniny, tvrzený papír, polyvinylformalové emailované dráty aj.,

třída B (do 130°C) - slída, skleněné vlákniny, azbest, výlisky s minerálním pojivem aj.,

třída F (do 155°C) - slída, skleněné vlákniny, azbest, upravené např. epoxidovými pryskyřicemi,

třída H (do 180°C) - silikonové elastomery s pojivy jako silikonová pryskyřice,

třída C (nad 180°C) - slída, porcelán sklo a křemen ve spojení s anorganickými pojivy.

Vlastnosti izolací se mění s teplotou. Základní vztah mezi dobou života a teplotou izolace udává experimentálně odvozený Moutsingerův vztah, podle kterého zvýšení teploty o 10 °C způsobí pokles životnosti na 1/2. Při maximální teplotě je dosahovaná životnost asi 60000 hodin za předpokladu, že teplota okolního vzduchu nepřestoupí 35 °C a že stroj nepracuje výše než 1000 m nad mořem. Oteplení je dané vztahem

$$\Delta\vartheta = \Delta P / \lambda \cdot S \quad [^{\circ}\text{C}; \text{W}, \text{W} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}, \text{m}^2]$$

kde ΔP - jsou výkonové ztráty,

λ - součinitel přestupu tepla (měrná povrchová tepelná vodivost, pro vzduch je 0,00027, hliník 2,03, měď 3,8, měkká ocel 0,65, dynamové plechy 0,65,

S - povrch tělesa, který se stýká s chladícím prostředím.

Na oteplení elektrických strojů má vliv jejich [krytí](#) (ČSN 34 5550). Značka krytí je vyznačena na výkonnostním štítku stroje a je tvořena písmeny [IP](#) a dvojčíslicím. První číslice (0 až 6) vyjadřuje stupeň ochrany před nebezpečným dotykem a vniknutím cizích předmětů, druhá (0 až 8) stupeň ochrany před vniknutím vody [7].

Na štítku elektrických spotřebičů je nově uvedena rovněž energetická náročnost výrobku písmeny A, B, C, D, E, F, G. Nejméně energeticky náročný je výrobek označený A.

Tvar točivého elektrického stroje je dán vnější úpravou mechanických částí stroje z hlediska jeho spojení s jiným strojem a jeho upevněním na základ nebo hnaný stroj. Tvarem je také určena poloha osy hřídele elektrického stroje pro zabudování do jiného stroje, např.: HO - patkový vodorovný stroj, H7 - vodorovný stroj s přírubou na zadním štítu, V7 - svislý stroj s přírubou na zadním štítu atd.

S provedením el. stroje souvisí i způsob odvádění tepla, vzniklého při práci stroje. Kdyby neměl žádné zařízení pro intenzivnější odvádění tepla, odvedlo by se přirozeným ochlazením z 1 m² jeho povrchu při oteplení o 1°C jen asi 11 W ztrát. Proto se stroje uměle chladí, mohou mít **chlazení** přirozené, vlastní a cizí, kapalinou a plynem, značí se malým písmenem a číslem.

Druhy prostředí pro elektrická zařízení jsou uvedeny v ČSN 33 0300. Rozdělují se na základní a složitá. Venkovní prostředí je takové, v němž na elektrické zařízení působí pouze přímé povětrnostní vlivy mírného pásma.

3.2 Magnetické obvody

Magneticky uzavřený obvod je uspořádání magneticky vodivých částí - jha (jádra), kotvy (pohyblivá část), budících cívek (vinutí), permanentních magnetů a případně i vzduchové mezery, kdy se podstatně větší část magnetického toku uzavírá magneticky vodivým materiálem po tzv. střední indukční čáře. Část magnetického toku, uzavírající se mimo magneticky vodivý materiál, je **rozptylový magnetický tok**.

Magnetický obvod zajišťuje vytvoření magnetického pole pomocí budící cívky (zdroj magnetického napětí).

Magnetické obvody magnetované proudem (stejnoseměrným nebo střídavým) se skládají z těchto částí:

1. ferromagnetické jádro a kotva (pohyblivá část),
2. budící vinutí (cívka) napájené stejnosměrným nebo střídavým proudem,
3. pracovní vzduchové mezery ($B = 1,2$ až $1,5$ T pro vzduchovou mezeru 0,2 až 0,3 mm, $B = 0,8$ až $0,5$ T pro mezeru 1 až 2 mm).

Materiály pro stejnosměrné magnetické obvody: jsou magneticky měkké s velkou permeabilitou μ_R a úzkou hysterezní smyčkou $B=f(H)$, magnetický tok \oint je jedné polarity.

Na elektromagnety a pólové nástavce se používá plný feromagnetický materiál, např. měkká a elektrotechnická ocel, ocelolitina a litina.

Magnetické materiály pro střídavé obvody mají rovněž úzkou hysterezní smyčku $B=f(H)$, ale \varnothing je proměnný, kvůli zmenšení ztrát vířivými proudy se staví z elektrotechnické oceli ve formě plechů, transformátorových plechů (tloušťky 0,35 až 0,5mm, $B_{\max} = 1$ T) nebo dynamových plechů (pro točivé stroje, tloušťka 0,5 mm, $B_{\max} = 1$ T) válcovaných za tepla z křemíkové oceli. Dalšími materiály např. pro jádra měřících transformátorů jsou permalloyové plechy, pro obvody složitých tvarů např. magneticky měkké ferity. Plechy jsou od sebe vzájemně izolovány jednostranným polepem papíru, lakováním, oxidováním nebo nátěrem organickými látkami.

Střídavým magnetováním vznikají ztráty, způsobené natáčením magnetických dipólů uvnitř materiálů, které se mění v magnetických obvodech na teplo. Jejich velikost se udává **ztrátovým číslem**. Periodická změna toku vede ke vzniku **hysterezních ztrát** (závisí lineárně na frekvenci) a **ztrát vířivými proudy** (závisí na kvadrátu frekvence).

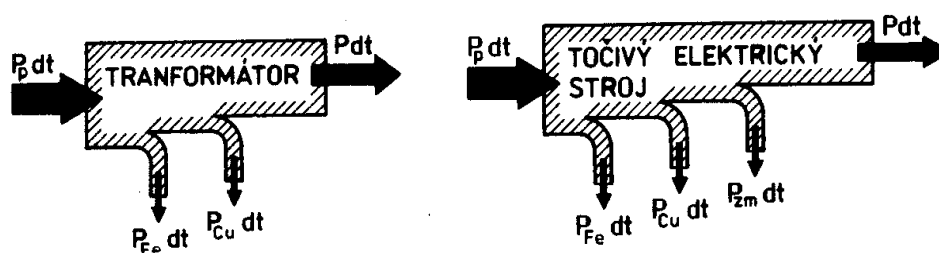
Závislost $\mu = f(B)$ je příčinou nelinearity obvodu. Magnetické obvody různého tvaru a uspořádání mají obvykle zadanou určitou hodnotu indukce B a lze je počítat analogicky jako obvody elektrické.

3.3 Energetická bilance elektrických strojů

Energie P_1 (příkon) dodaná do stroje za dobu dt se v něm přemění na energii P_2 (výkon). Výkon $P_2 < P_1$, protože ve stroji při přeměně energie vznikají ztráty ΔP_z .

Celkové ztráty ΔP_z vznikající při činnosti elektrického stroje se dělí na ztráty (obr.3.1)

- **elektrické** $\Delta P_{Cu} = R \cdot I^2$ - způsobené průtokem proudu vinutím (v „mědi“),
- **magnetické** ΔP_{Fe} - vznikající hysterezí a vířivými proudy ve feromagnetických částech stroje – „železe“,
- **mechanické** ΔP_m - způsobené třením v ložiskách, třením o vzduch, třením na kartáčích nebo kroužcích.



Obr.3.1. Energetické schéma transformátoru a točivého elektrického stroje

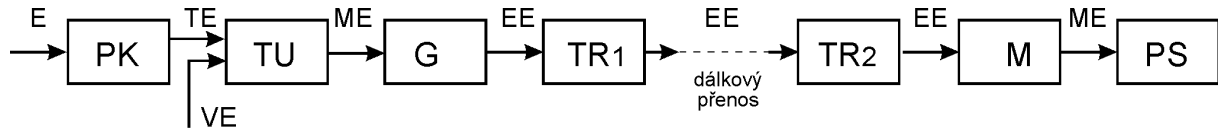
Ztráty ΔP_{Fe} se určují zkouškou stroje *naprázdno*, při chodu *nakrátko* převažují ztráty ve vinutí ΔP_{Cu} , kdy výkon $P_2 = 0$ a celý dodávaný příkon se ve stroji přemění na ztráty. Výstupní výkon elektrický u dynama nebo generátoru je $P_2 \cong U \cdot I$, vstupní příkon musí být v tomto případě mechanický, $P_1 = M \cdot \omega$, u elektrických motorů je tomu naopak, tedy mechanický výstup $P_2 = M \cdot \omega$ a vstupní příkon je elektrický, $P_1 \cong U \cdot I$.

Poměr $\eta = 100 \cdot \frac{P_2}{P_1}$ je **účinnost** elektrického stroje.

Účinnost velkých transformátorů je až 99 %, u točivých strojů podle výkonu 75 až 90 %.

3.4 Elektrické stroje v systému výroby a přenosu elektrické energie

Začlenění elektrických strojů do systému energetických přeměn v souvislosti s přeměnou jiných energií na elektrickou a její využití v systému energetického napájení uvádí obr.3.2:



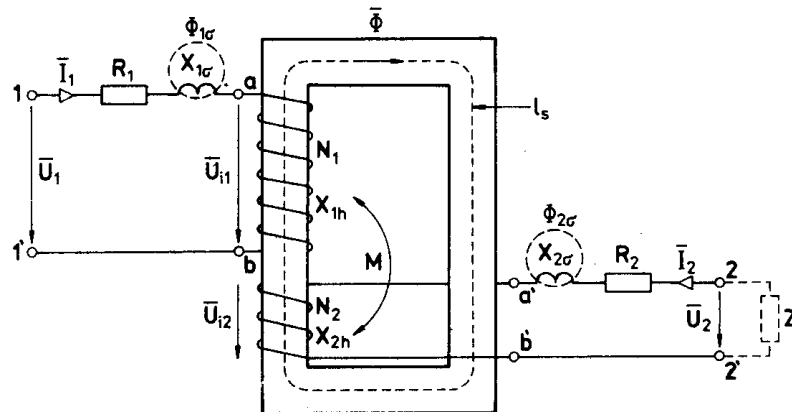
Obr. 3.2 Elektrické stroje v systému energetických přeměn

kde značí: E - vstupní energie (chemická, jaderná), PK - parní kotel, energie tepelná TE nebo vodní VE, TU turbína, ME – mech. energie, G - generátor (6,3;10,5 kV), EE - el. energie, TR₁ - transformátor zvyšovací (např. 22/110 kV), dálkový přenos (110, 220 nebo 400 kV), TR₂ - snižovací T (např.22kV//400V/230V), ME - mechanická energie, PS - pracovní stroj.

4. TRANSFORMÁTORY

Transformátor (T) je netočivý elektrický stroj pracující na principu elektromagnetické indukce ($u_i = N \cdot d\Phi/dt$). Používá se ke změně napětí střídavého proudu při stálém kmitočtu. Pomocí T se zvyšuje napětí při dálkovém přenosu energie, čímž se snižují ohmické ztráty ve vedení v důsledku menšího proudu a snižuje následně napětí pro uživatelský rozvod.

Jednofázový transformátor jsou v podstatě dvě cívky, navinuté na uzavřené jádro z feromagnetického materiálu, obr.4.1.



Obr.4.1 Zapojení 1-fázového transformátoru

Když je na primární stranu s N_1 závitů připojené harmonické, časově proměnné napětí $u_1 = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \sin \omega t$, vznikne ve vinutí časově proměnný proud i_1 , který vytvoří v magnetickém obvodu časově proměnný magnetický tok Φ_1 . Indukční čáry mag.toku jsou sprážené se závitů obou cívek, tedy i s cívkou s N_2 závitů, ve které se indukuje harmonické napětí u_2 . Pokud není na sekundár připojena zátěž, je na výstupních svorkách napětí naprázdno u_2 . Po připojení

spotřebiče poteče sekundárním obvodem proud i_2 , vytvářející magnetický tok Φ_2 . Oba toky se sčítají jako fázory a vytváří společný magnetický tok $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$.

Magnetický tok Φ indukuje v obou cívkách napětí ve smyslu indukčního zákona, jehož efektivní hodnota je

$$U_{i1} = 4,44 \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot \Phi_m$$

$$U_{i2} = 4,44 \cdot f_1 \cdot N_2 \cdot \Phi_m$$

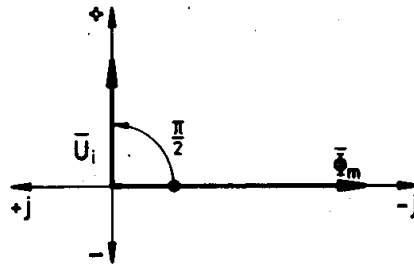
Zvýšený odběr energie na sekundárním vinutí se prostřednictvím magnetického pole přenáší na primár a odtud na síť (zdroj energie). U transformátoru se definuje napěťový převod jako poměr

$$p = \frac{U_{i1}}{U_{i2}} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Vyjádří-li se harmonické časové průběhy magnetického toku a vnitřního indukovaného napětí pro N závitů cívky fázory, platí

$$U_i = j \cdot \frac{2\pi \cdot f}{\sqrt{2}} \cdot \Phi_m \cdot f \cdot N = j \cdot 4,44 \cdot \Phi_m \cdot f \cdot N$$

Tomu odpovídá fázorový diagram na obr.4.2.

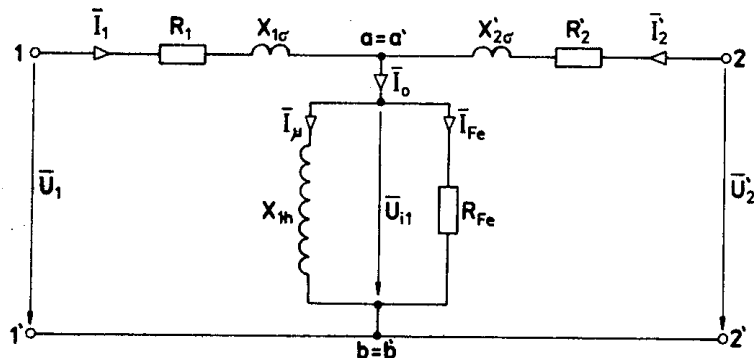


Obr.4.2 Fázorový diagram magnet. toku a vnitřního indukovaného napětí ideálního transformátoru

4.1 Napěťové rovnice skutečného transformátoru

U 1-fázového transformátoru se vstupním i výstupním vinutím souhlasně navinutým na společném feromagnetickém jádře se hlavní magnetický tok Φ_{1h} primárního vinutí uzavírá celým feromagnetickým obvodem, kdežto rozptylový magnetický tok primárního vinutí $\Phi_{1\sigma}$ se uzavírá pouze kolem primární cívky (částečně feromagnetikem i vzduchem) a nepřenáší elektrickou energii z primárního vinutí do vinutí sekundárního. Alternativně totéž platí pro sekundární rozptylový magnetický tok $\Phi_{2\sigma}$.

Teorie transformátoru vychází z **náhradního schématu**, které vystihuje proudové, napěťové a výkonové poměry skutečného transformátoru. Jednotlivé obvody T jsou nahrazeny elektrickými obvody s galvanickými vazbami mezi zapojenými impedancemi ([obr.4.3](#)).



Obr.4.3 Náhradní schéma transformátoru

kde R_1, R_2' - činný odpor primárního (vstupního) a přepočítaný činný odpor sekundárního (výstupního) vinutí,

$X_{1\sigma} = \omega \cdot L_{1\sigma}, X_{2\sigma}' = \omega \cdot L_{2\sigma}'$ - rozptylové reaktance primárního a přepočítaná reaktance sekundárního vinutí,

R_{Fe} - odpor respektující ztráty v železe,

X_{1h} - hlavní reaktance představující společný magnetický tok Φ ,

I_{μ} - magnetizační proud vytvářející společný magnetický tok Φ ,

I_{Fe} - proud odpovídající ztrátám v železe,

$$I_0 = I_{\mu} + I_{Fe} = I_1 + I_2' \text{ - fázor proudu naprázdno.}$$

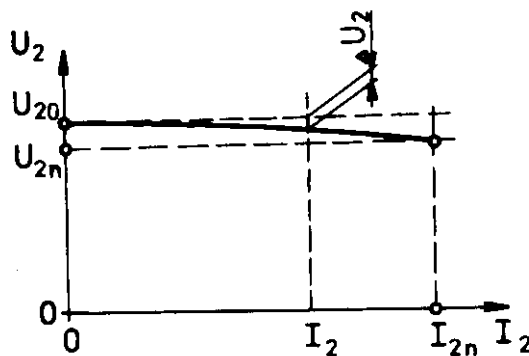
Vzhledem k tomu, že ve skutečnosti je mezi primárem a sekundárem jen magnetická vazba (elektrické spojení obou vinutí, jak je znázorněno v náhradním schématu, neexistuje), přepočítávají se sekundární veličiny na primární stranu pomocí napěťového převodu p :

$$R_2' = p^2 \cdot R_2; \quad X_{2\sigma}' = p^2 \cdot X_{2\sigma}; \quad U_2' = p \cdot U_2; \quad I_2' = I_2 \cdot 1/p.$$

Základní rovnici zatíženého transformátoru lze sestavit po aplikaci Kirchhoffových zákonů na náhradní schéma:

$$\begin{aligned} U_1 &= R_1 \cdot I_1 + j \cdot X_{1\sigma} \cdot I_1 + U_{11} \\ U_2' &= R_2' \cdot I_2' + j \cdot X_{2\sigma}' \cdot I_2' + U_{12}' \\ I_0 &= I_{\mu} + I_{Fe} = I_1 + I_2'. \end{aligned}$$

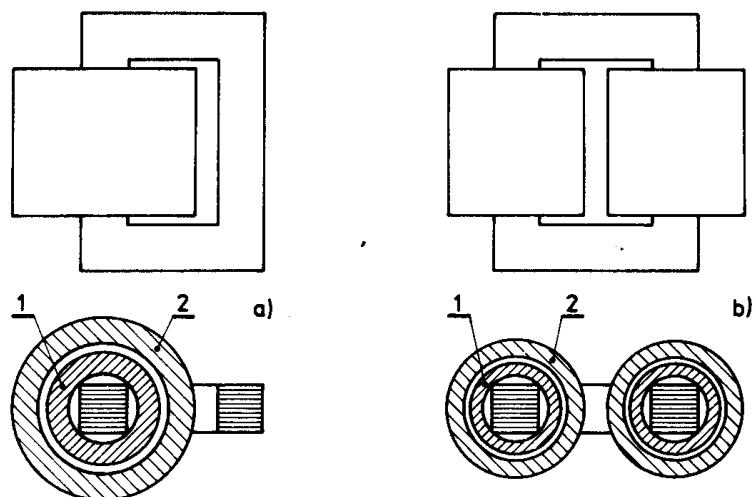
Tyto rovnice vystihují poměry na transformátoru ve všech *provozních stavech*, t.j. ve stavu naprázdno, nakrátko a zatíženém transformátoru. Na transformátoru dochází k rozdílu výstupního napětí při chodu naprázdno a při zatížení. Tento úbytek napětí narůstá se zatížením podle zatěžovací volt-ampérové charakteristiky (T je zdrojem střídavého napětí), obr.4.4.



Obr.4.4 Zatěžovací charakteristika výkonového transformátoru

4.2 Konstrukční uspořádání

Nízkofrekvenční výkonový transformátor se skládá z magnetického a elektrického obvodu - vinutí. Magnetický obvod sestává z jader (sloupků), na kterých jsou umístěna vinutí primáru a sekundáru a ze spojek, spojujících jádra navzájem, obr. 4.5.



Obr. 4.5 Varianty konstrukčního uspořádání 1-fázového jádrového transformátoru
1 - vinutí vyššího napětí, 2 - vinutí nižšího napětí

Trojfázový transformátor je možné si představit jako spojení třech stejných 1-fázových transformátorů, jejichž elektrické obvody se spojují mezi sebou buď do hvězdy (Y, y), trojúhelníka (D, d) nebo do lomené hvězdy (z). Podle vzájemného propojení vinutí dochází ke vzniku různých fázových posuvů mezi fázovým napětím první fáze primáru a sekundáru, označovaných jako **hodinový úhel**. Pro transformátory existují z konstrukčních důvodů jen určité možné hodinové úhly, normovaných je 26 různých zapojení, např. Yy 0, 6; Dd 0, 2, 4, 6, 8, 10; Yd, Dy, Yz 1, 5, 7, 11.

Použití transformátorů vzhledem k jejich zapojení:

- Yy - souměrná zátěž, kde uzel ani nulovací vodič nejsou zatíženy,
- Yz - distribuční T středních výkonů v sítích s nesouměrnou zátěží,
- Dy - velké distribuční T s plně zatíženým nulovacím vodičem,
- Yd - pro velké výkony a pro přenos elektrické energie *vn sítěmi* na výstupu z elektrárny.

4.3 Paralelní spolupráce transformátorů

Důvodem paralelního chodu transformátorů je požadavek transformace většího výkonu než je schopen zajistit instalovaný transformátor, ale jsou to i důvody ekonomické (rezervní T má menší výkon a je levnější) a konstrukční (omezený typový výkon). Paralelní spolupráce transformátorů musí splňovat určité podmínky:

1. $U_{1n} = U_{2n}$, tolerance $\pm 0,1\%$, při větším rozdílu vznikají vyrovnávací proudy,
2. stejné hodinové úhly,
3. stejný napěťový převod,
4. stejné napětí nakrátko u_k - přípustná tolerance 10 %, což lze splnit při maximálním

poměru výkonů $S_{1n} : S_{2n} = 3 : 1$.

Procentní napětí nakrátko $u_k = U_{1k} / U_{1n} \cdot 100 \%$, kde U_{1k} je primární napětí při chodu nakrátko a U_n . Malé u_k zajišťuje, že se výstupní napětí T nebude se zatížením příliš měnit, značný ale bude zkratový proud. Zkratově odolnější jsou transformátory s velkou hodnotou u_k , např. 14 %.

4.4 Ztráty a účinnost

Na rozdíl od motorů a řady dalších spotřebičů elektrické energie se transformátory navrhují podle zdánlivého a ne podle činného výkonu. Proto základní štitkovou hodnotou je jmenovitý zdánlivý výkon $S_{1n} = \sqrt{3} \cdot U_{1n} \cdot I_{1n}$, podle kterého se určují rozměry transformátoru.

Při transformaci elektrické energie vznikají v T ztráty ΔP_z trvalé a proměnné, závislé na zatížení. *Trvalé ztráty* v magnetickém obvodu jsou určeny velikostí magnetické indukce B a frekvence f_1 a prakticky nezávisí na zatížení, pokud transformátor pracuje při stálém primárním napětí a frekvenci. Velikost trvalých ztrát se měří při chodu naprázdno. *Proměnné ztráty* v primárním a sekundárním vinutí při jmenovitém zatížení ($I_1 = I_{1n}$) jsou rovny činnému výkonu při chodu nakrátko.

Účinnost transformátoru je dána vztahem

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{(P_1 - \Delta P_z)}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P_z}{P_1}$$

Transformátor je konstruován tak, aby maximální účinnost byla dosažena při nejvíce používaném zatížení v pásmu (0,5 až 0,8) P_{2n} . Jmenovitá hodnota účinnosti η_n je o něco menší než η_{max} a dosahuje u velkých transformátorů 98-99 %, u transformátorů malého výkonu je však podstatně nižší, asi 70÷80 %.