

Transformátory

Modul transformátory se zabývá dělením transformátorů na jednofázové a třífázové. U obou těchto oblastí je popsán princip činnosti elektrického zařízení, jeho konstrukce, zapojení, jednotlivé druhy provozních stavů a energetická bilance zařízení.

Základní poznatky

Tato lekce se zabývá základními děleními transformátorů.

Rozdělení transformátorů

Rozdělení podle počtu fází:

- Jednofázové
- Trojfázové

Rozdělení podle konstrukce magnetického obvodu:

- Plášťové
- Jádrové
- Toroidní

Podle způsobu chlazení:

- Chlazené vzduchem/plynem
- Chlazené olejem/jinou kapalinou

Podle využití transformátoru:

- Síťový transformátor
- Autotransformátor
- Oddělovací transformátor
- Svářecí transformátor
- Měřicí transformátory

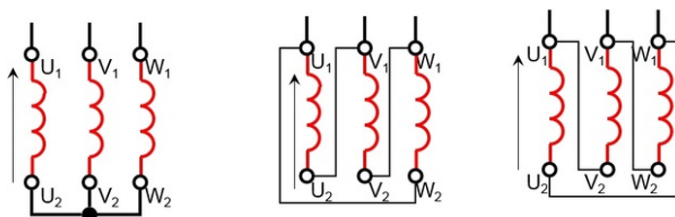
Druhy zapojení vinutí třífázových transformátorů

A/ Zapojení vinutí do hvězdy se značí písmenem **Y**, konce vinutí jsou zapojeny do uzlu, začátky vinutí jsou vyvedeny na svorky.

B/ Zapojení vinutí do trojúhelníka se značí písmenem **D** nebo symbolem Δ , konce vinutí jsou spojeny se začátky vinutí další cívký.

C/ Zapojení do lomené hvězdy vinutí jsou rozdělena na polovinu, používá se pouze pro sekundární vinutí transformátorů (není uvedeno).

Obr. 1: Druhy zapojení vinutí [1]



Třífázové transformátory se obvykle používají pro přenos a distribuci elektrické energie. Jejich výkony bývají v řádech kVA až MVA. Konstrukci mívají většinou jádrovou s vinutím z hliníkových vodičů. Jejich konstrukce je obdobná jako u jednofázových transformátorů, jádro má tři magnetické větve. Každá fáze má vlastní primární vinutí a sekundární vinutí. Cívky primárního vinutí, resp. cívky sekundárního vinutí jsou v zapojení do hvězdy, trojúhelníka nebo do lomené hvězdy. Transformátory pro velké výkony se značně zahřívají, a proto je třeba je chladit. Větší transformátory bývají ponořeny ve speciální nádobě s olejem, který odvádí teplo a chladí se přes stěny nádoby vzduchem.

Obr. 2: Třífázové transformátory [2]



Oddělovací transformátory mají stejný počet závitů na sekundární i primární cívce, to znamená stejné napětí na primáru i sekundáru. Používají se ke galvanickému oddělení obvodů a zajištění bezpečnosti před výskytem nebezpečného dotykového napětí. Oddělovací ochranné transformátory dle ČSN EN 61558-2-4 se vyrábějí pro sekundární napětí do 50V a jsou vyráběny dle ČSN EN 61558-2-6 jako bezpečnostní ochranné transformátory (SELV).

Obr. 3: Oddělovací transformátory [3]



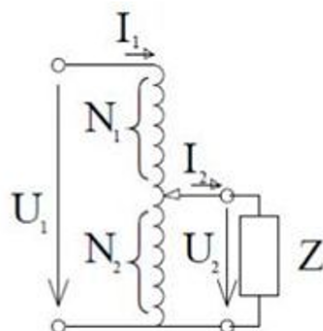
Svařovací transformátory – pro odporové svařování se využívají transformátory s malým počtem závitů na sekundární straně, neboť nám postačuje velmi malé napětí, ale je zde potřeba velkých proudů, řádově desítky kA. Pro obloukové svařování je třeba transformátor s regulovatelným výstupním napětím. To je většinou zajištěno odbočkami ze sekundárního vinutí.

Obr. 4: Svařovací transformátory [4]



Autotransformátory jsou transformátory s jedním vinutím (cívkou) rozděleným odbočkou na dvě části. Jedna část vinutí je společná pro primární i sekundární stranu. Tyto transformátory se používají k regulaci výstupního napětí. Je však třeba mít na paměti, že sekundární strana není galvanicky (vodivě) oddělena od strany primární! Tedy je vodivě spojena.

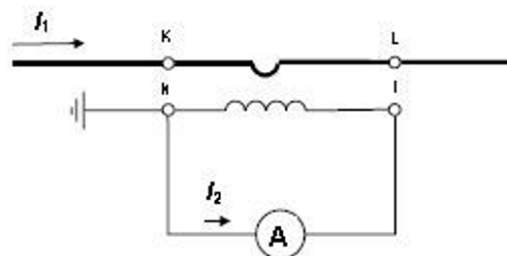
Obr. 5: Autotransformátor – zapojení [5]



Měřicí transformátory převádějí vysoká napětí a velké proudy na hodnoty akceptovatelné pro relé, elektroniku nebo měřicí přístroje. Při naprosto přesném převodu hodnot umožní bezpečné měření přístroji mimo dosah zařízení vysokého napětí a velkých výkonů, ve kterých např. nelze kvůli měření proudu rozpojovat měřené obvody. Dělí se na:

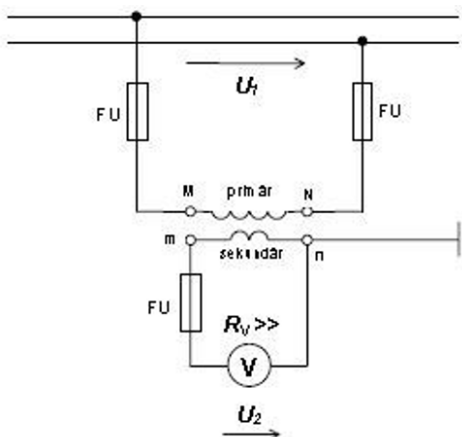
- **Proudový měřicí transformátor** - slouží k připojení ampérmetru nebo proudového vedení (např. k wattmetru). Vstupní svorky (**K** a **L**) se připojují na vodič, ve kterém měříme proud. K výstupním svorkám **k** a **l** se připojuje ampérmetr. Pořadí svorek na měřeném vodiči odpovídá toku energie ze zdroje ke spotřebiči. Jmenovitý výstupní proud proudového měřicího transformátoru je (maximálně) 1 A nebo 5 A (přizpůsobený rozsahům měřicích přístrojů). Přístroje jsou zařazeny do tříd přesnosti.

Obr. 6: Přístrojový transformátor MTP [6]



- **Napěťový měřicí transformátor** - převádí měřené vysoké napětí v udaném poměru na napětí měřitelné běžným voltmetrem. Má velmi malé rozptylové pole a přesně udaný převodní poměr v celém pracovním rozsahu. Výkon bývá podle napětí a konstrukce od 5 VA až do 300 VA. Napěťové měřicí transformátory se zařazují jako měřicí přístroje do tříd přesnosti 0,1 až 3. Převodní poměr bývá volen tak, aby se dal použít k měření voltmetr s rozsahem do 110V.

Obr. 7: Přístrojový transformátor MTN [7]



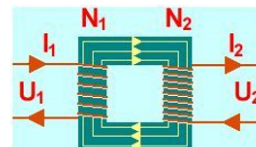
Jednofázové transformátory

Ve výukovém modulu jednofázové transformátory jsou uvedeny poznatky z principu činnosti, dělení transformátorů podle provedení. V jednotlivých lekcích je popis konstrukčního provedení, zapojování a jednotlivé druhy provozních stavů včetně kreslení fázorových diagramů a náhradních schémat. V závěru je uvedena energetická bilance zařízení.

Jednofázový transformátor

Tato lekce se zabývá principem a konstrukcí jednofázového transformátoru.

Obr. 1: Princip [1]



Princip činnosti

Transformátory jsou elektrické stroje, které pracují na principu elektromagnetické indukce, kdy v primárním vinutí se při průchodu střídavého elektrického proudu vytváří elektromagnetické pole, které se v sekundárním vinutí přemění opět na elektrický proud o jiné velikosti, to znamená, že přeměňují střídavý proud o určitém napětí na střídavý proud o jiném napětí. Při transformaci proudu dochází ke změně napětí a proudu, ale frekvence se nemění.

Připojíme-li vstupní cívku ke střídavému napětí, vytvoří proud procházející touto cívku v železném jádře střídavé magnetické pole, které indukuje napětí v závitěch výstupní cívky. Poměr vstupního napětí U_1 k výstupnímu napětí U_2 je převod p transformátoru (lze jej značit také velkým písmenem K). Při zanedbání úbytků (ideální transformátor) odpovídá převod poměru počtu závitů.

Převod transformátoru

$$p = \frac{U_1}{U_2} \quad (-, V, V)$$

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

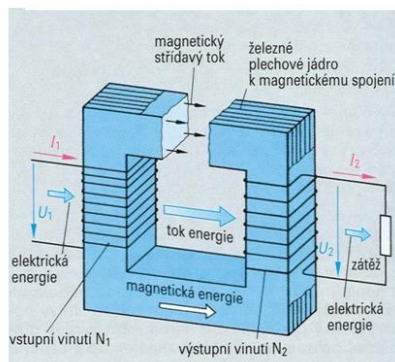
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (V, V, A, A)$$

Ve vztazích představují U_1 , N_1 , I_1 napětí, počet závitů a proud ve vstupní cívce (primární) a U_2 , N_2 , I_2 pak napětí, počet závitů a proud ve výstupní cívce (sekundární).

Konstrukce transformátoru

Transformátory mohou být konstruovány jako jednofázové nebo trojfázové. Jednofázové sestávají se ze dvou nebo více cívek, které jsou od sebe elektricky odděleny (výjimkou jsou autotransformátory). Cívky jsou magneticky vázány společným železným jádrem (magnetizovatelný feromagnetický materiál), na kterém jsou navinuty. Magnetizační obvod bývá z izolovaných transformátorových plechů o tloušťce 0,5mm nebo 0,35mm. Aby byl magnetizační proud co nejmenší, je magnetický obvod uzavřen bez vzduchové mezery.

Existuje široká škála konstrukčních řešení transformátorů v závislosti na výkonu, kmitočtu a aplikaci.



Hlavní části transformátoru

- Magnetický obvod
- Vinutí
- Nádoba naplněná olejem
- Víko nádoby s příslušenstvím

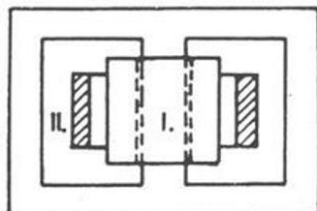
Provedení magnetického obvodu - uspořádání cívek

- Plášťové
- Jádrové

Plášťové transformátory

Plechý u nich částečně obklopují vinutí a tím dochází k menšímu rozptylu magnetického toku a k jeho souměrnějšímu rozdělení => lepší magnetická vazba. Magnetický obvod tvoří střední sloupek, spojky a krajní sloupky. Spojky a krajní jádra mohou mít poloviční průřez než jádra s vinutím, neboť jimi prochází poloviční magnetický tok. Nevýhodou je jeho větší hmotnost a horší chlazení, které má na svědomí „plášť“ vytvořený z plechů kolem cívek.

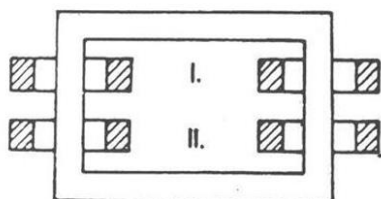
Obr. 2: Plášťový transformátor [2]



Jádrové transformátory

U těchto transformátorů jsou jednotlivá vinutí umístěna na jednotlivých jádrech. Nevýhodou tohoto řešení je větší magnetický rozptyl, zejména pokud je primární a sekundární vinutí umístěno každé na jednom jádře. Rozptyl se ovšem dá zmenšit tím, že se obě vinutí rozdělí na dvě části a každá se umístí na jednotlivý sloupek => na každém jádru jsou pak obě vinutí. Oproti plášťovému provedení se jádrové lépe ochlazují. V případě, že primární a sekundární cívky jsou oddělené, tak se dají snadno opravit - „převinout“. Převine se jen poškozená cívka. Plášťové provedení má obě cívky vždy navinuty „na sobě“, převinutí je tedy náročnější. Vzhledem k tomu, že jsou cívky transformátoru samostatné, má to další výhodu z hlediska vyšší vzájemné izolace, a tedy i bezpečnosti.

Obr. 3: Jádrový transformátor [2]



Toroidní transformátory

Obvykle jsou cívky těchto transformátorů navinuty okolo feromagnetického jádra tvaru prstence (tzv. toroidu). Nacházejí uplatnění ve vysokofrekvenčních aplikacích a jádra s vysokou permeabilitou pak tam, kde je vyžadována velká citlivost indukovaného napětí v sekundárním vinutí na změny magnetizačního proudu a kde je požadováno minimální zkreslení přenášeného signálu. Hodí se i k výrobě tlumivek s velkou indukčností. Vykazují malé ztráty při magnetování střídavým proudem. Pro dosažení ideálních magnetických vlastností se doporučuje dodržet poměr výška / vnějším průměrem toroidního jádra $< 2,5$.

Obr. 4: Toroidní transformátor [2]



Výhody toroidního transformátoru:

- Nízké magnetické ztráty
- Kompaktní rozměry
- Uzavřený magnetický tok
- Nízká hmotnost
- Nízká hlučnost

Základní veličiny jednofázových transformátorů

Tato lekce se zabývá základními veličinami u jednofázových transformátorů.

Transformátor je netočivý stroj, který pomocí elektromagnetické indukce mění velikost vstupního střídavého napětí U_1 na jedné straně transformátoru na výstupní napětí U_2 o jiné hodnotě na druhé straně transformátoru. Frekvence se tím nemění.

Štítek transformátoru - má každý transformátor na viditelném místě. Výkonové transformátory mají na štítku tyto údaje:

- Označení výrobce
- Typ transformátoru, výrobní číslo a rok výroby
- Počet fází a jejich zapojení
- Jmenovitý zdánlivý výkon
- Jmenovité vstupní a výstupní napětí
- Jmenovitý vstupní a výstupní proud
- Napětí nakrátko
- Jmenovitou frekvenci
- Druh chlazení a chladiwa
- Krytí transformátoru a třídy izolací
- Hmotnost chladiwa a celkovou hmotnost

Štítkové údaje je možno podle potřeby doplňovat v souladu s příslušnými normami.

Účinnost transformátoru

Účinnost transformátoru je poměr odevzdaného výkonu P_2 a přijatého výkonu P_1 . Může se vyjádřit i pomocí ztrát ΔP a to vztahem

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} \cdot 100 (\%),$$

kde P_2 je výkon v sekundárním vinutí a ΔP jsou ztráty. 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 %.

Na rozdíl od motorů a řady dalších spotřebičů elektrické energie se transformátory navrhují podle zdánlivého a ne podle činného výkonu. Proto základní štítkovou hodnotou je jmenovitý zdánlivý výkon

$$S_{1n} = \sqrt{3} \cdot U_{1n} \cdot I_{1n}$$

kde S_{1n} je zdánlivý výkon [VA], U_{1n} je jmenovité napětí [V] a I_{1n} je jmenovité napětí na primární vedení, podle kterého se určují rozměry transformátoru.

Při transformaci elektrické energie vznikají v transformátoru ztráty ΔP_z konstantní a proměnné, závisející na zatížení.

Konstantní 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 konstantních 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.

Převod transformátoru

Převod transformátoru vyjadřujeme poměrem vstupního napětí a výstupního napětí. Budeme uvažovat, že ztráty v transformátoru jsou nulové, pak výkon na vstupní straně je stejný jako výkon na výstupní straně:

kde N_1 , N_2 jsou počty závitů na primárním a sekundárním vinutí.
Pak

$$p = \frac{U_1}{U_2}$$

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

tedy proudy jsou v převráceném poměru k napětí a k počtu závitů. Převod transformátoru se udává poměrem napětí při chodu naprázdno. Jen u transformátorů do 5 kVA se udává poměr napětí při jmenovitém zatížení.

Napětí naprázdno

Připojíme-li vstupní vinutí na střídavé napětí U_1 a na výstupní vinutí nepřipojíme žádnou zátěž (spotřebiče), říkáme, že transformátor pracuje naprázdno. Napětí, které přitom naměříme na výstupním vinutí, bude rovno napětí naprázdno.

Procentní napětí nakrátko

$$u_k = \frac{U_{1k}}{U_{1n}} \cdot 100,$$

kde U_{1k} je primární napětí při chodu nakrátko a U_{1n} jmenovité napětí.

Malé u_k zajišťuje, že se výstupní napětí transformátoru nebude se zatížením příliš měnit, značný ale bude zkratový proud. Zkratově odolnější jsou transformátory s velkou hodnotou u_k , např. 14 %.

Napětí nakrátko je napětí, které musíme připojit na vstupní vinutí transformátoru, aby výstupním vinutím spojeným nakrátko procházel jmenovitý proud transformátoru. V praxi se tato hodnota vyjadřuje v procentech vstupního jmenovitého napětí a značí se u_k . Pokud opět zanedbáme ztráty transformátoru a zvýšíme napětí připojené na vstupní vinutí transformátorů z hodnoty napětí nakrátko na plnou jmenovitou hodnotu, zvýší se ve stejném poměru i výstupní proud. Hodnota, kterou takto získáme, odpovídá hodnotě, které by při provozu dosáhl proud ve výstupním vinutí, pokud bychom jej spojili nakrátko.

Jednofázový transformátor - chod při zatížení

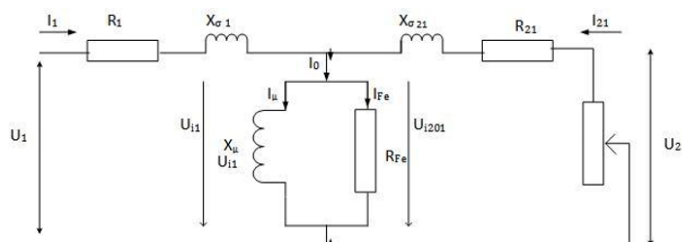
Tato lekce se zabývá chodem jednofázového transformátoru při zatížení.

Princip činnosti chodu transformátoru při zatížení

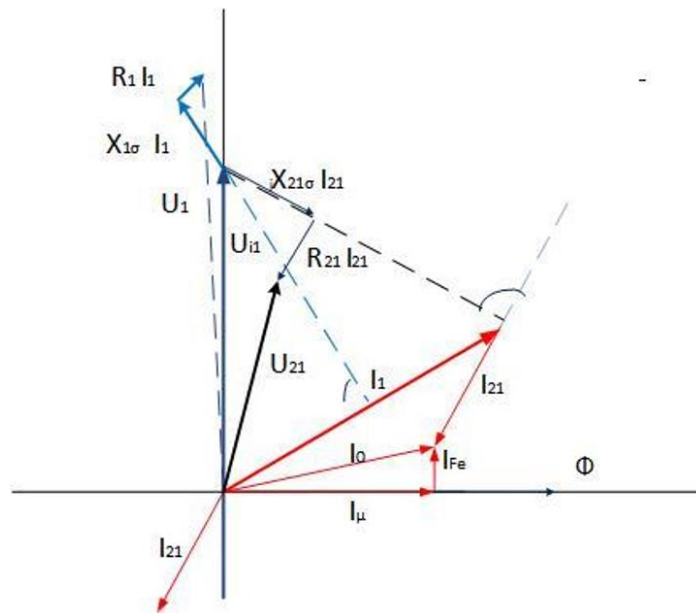
Transformátor pracuje při zatížení tehdy, jestliže se jeho vstupní vinutí připojí ke zdroji střídavého napětí a k výstupnímu vinutí se připojí zátěž. Zátěž může být činná, indukční, kapacitní. V praxi se nejčastěji vyskytuje zátěž induktivního charakteru. U skutečného transformátoru je třeba respektovat nejen magnetizační proud, ale i činné odpory obou vinutí a rozptylový magnetizační tok.

Náhradní schéma transformátoru při zatížení

Obr. 1: Náhradní schéma [1]



Obr. 2: Fázorový diagram [2]



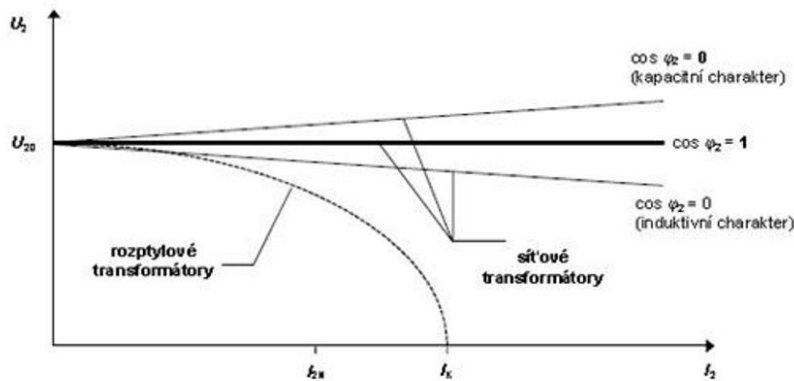
Poznámky:

- Při zatížení prochází výstupním vinutím zatěžovací proud I_2 , který vyvolá vznik magnetického toku Φ_2 , který má opačný směr než magnetický tok Φ_1 , který je vybuzen proudem I_1 .
- Kolem výstupního vinutí se uzavírá rozptylový magnetický tok $\Phi_{2\sigma}$.
- Magnetickým obvodem prochází magnetický tok Φ_{2v} . Pak: $\Phi_2 = \Phi_{2v} + \Phi_{2\sigma}$.
- Výsledný magnetický tok Φ určuje velikost indukovaného napětí: $\Phi = \Phi_{1v} - \Phi_{2v}$.
- Proud naprázdno nezávisí na zatížení: $I_1 = -I_{21} + I_0 = -I_{21} + I_{Fe} + I_{\mu}$.
- Z náhradního schématu zjistíme napěťové poměry na výstupní straně: $U_{21} = U_{i21} + R_{21} I_{21} + jX_{21\sigma} I_{21}$.
- Výstupní napětí U_{21} je menší než napětí U_{i21} o úbytky napětí na rezistoru R_{21} a rozptylové reaktanci $X_{21\sigma}$.
- Při kreslení fázorového diagramu vycházíme z požadovaných hodnot veličin na výstupní straně transformátoru, což jsou U_2 , I_2 , $\cos\varphi_2$, P_2 , I , apod.

Zatěžovací charakteristika

Je grafická závislost $U_2 = f(I_2)$ při $\cos \varphi = \text{konst.}$ a je velmi důležitá.

Obr. 3: Srovnání zatěžovacích charakteristik rozptylových a síťových transformátorů [1]



Tvrdost charakteristiky závisí na napětí nakrátko $u_{k\%}$ a $\cos \varphi_k$.

Jednofázový transformátor - chod nakrátko

Tato lekce se zabývá chodem jednofázového transformátoru naprázdno a nakrátko.

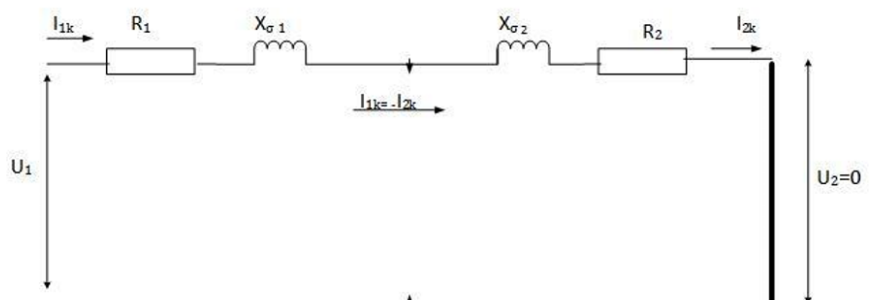
Princip činnosti chodu nakrátko ($s = 1$)

Stavem nakrátko rozumíme případ, kdy jsou výstupní svorky spojeny nakrátko bezodporovou spojkou. Vstupním vinutím prochází při zkratu značný proud I_{1k} a výstupním vinutím I_{2k} . Při výpočtu zanedbáváme magnetizační i ztrátový proud (příčná větev), protože jsou velmi malé (asi 200-400x menší než proud nakrátko).

Napětí nakrátko je napětí, které výstupním vinutím transformátoru protlačuje jmenovitý proud, jsou-li jeho výstupní svorky spojeny nakrátko.

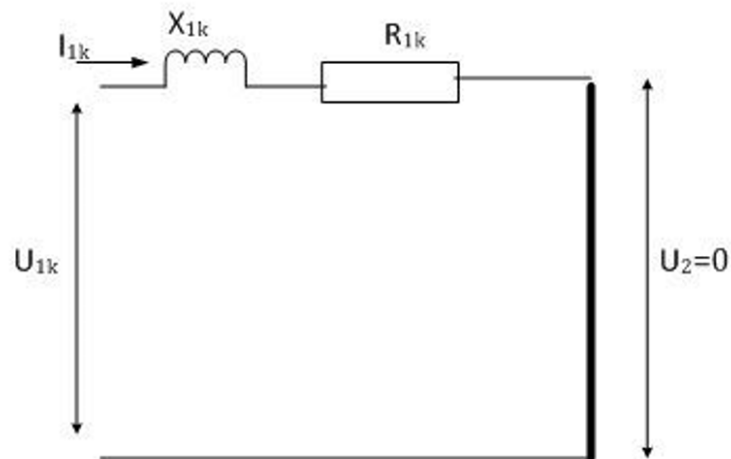
Náhradní schéma

Obr. 1: Náhradní schéma [1]



Zjednodušené schéma

Obr. 2: Zjednodušené náhradní schéma [1]



Výpočet

Aplikace II. Kirchhoffova zákona:

$$U_{1k} = R_1 I_{1k} + jX_1 \sigma I_{1k} + jX_2 \sigma I_{1k} + R_2 I_{1k} \quad -I_{2k} = I_{1k}$$

$$U_{1k} = (R_1 + R_2) I_{1k} + (jX_1 \sigma + jX_2 \sigma) I_{1k} \quad R_{1k} = R_1 + R_2$$

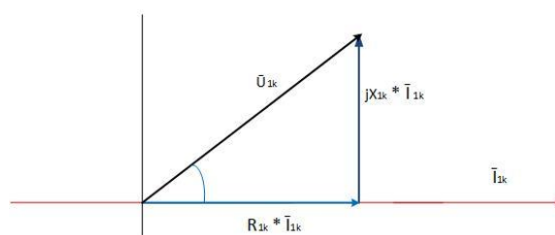
$$U_{1k} = R_{1k} I_{1k} + jX_{1k} I_{1k} \quad X_{1k} = X_1 \sigma + X_2 \sigma$$

$$U_{1k} = R_{1k} I_{1k} + jX_{1k} I_{1k}$$

$$U_{1k} = (R_{1k} + jX_{1k}) I_{1k} \quad Z_{1k} = R_{1k} + jX_{1k}$$

$$U_{1k} = I_{1k} Z_{k1}$$

Obr. 3: Fázorový diagram nakrátko [1]



Závěry

- Z výše uvedeného je patrné, že celé přiváděné napětí je spotřebováno na krytí vnitřních úbytků napětí.
- Čím větší je napětí nakrátko, tím menší je proud nakrátko.
- Napětí nakrátko bývá 4 – 6% u transformátorů do 1,6MVA a u vyšších až 11%.

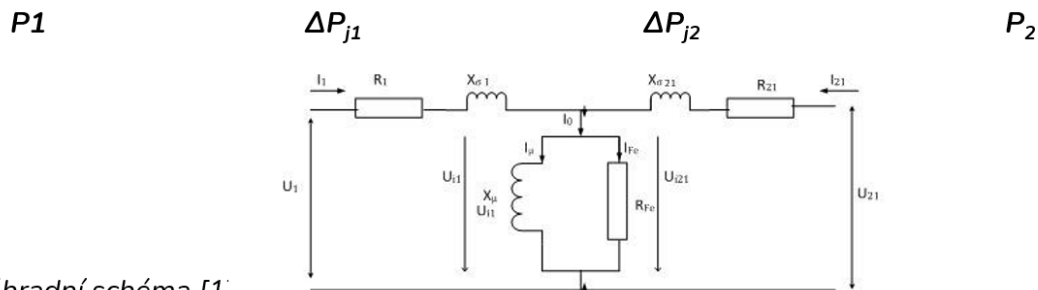
Jednofázový transformátor – energetická bilance

Tato lekce se zabývá energetickou bilancí transformátoru.

Princip činnosti chodu transformátoru při zatížení

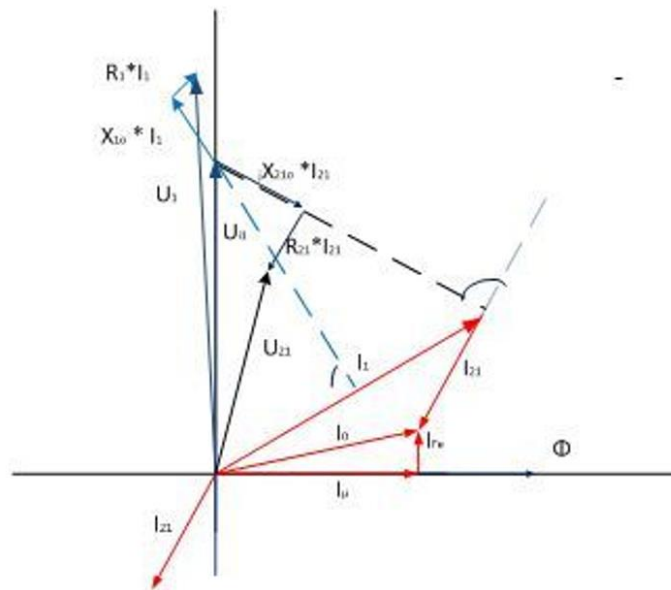
Transformátor pracuje při zatížení tehdy, jestliže jeho výstupní vinutí se připojí ke zdroji střídavého napětí a k výstupnímu vinutí se připojí zátěž. U skutečného transformátoru je třeba respektovat nejen magnetizační proud, ale i činné odpory obou vinutí a rozptylový magnetizační tok.

Náhradní schéma transformátoru při zatížení



Obr. 1: Náhradní schéma [1]

Obr. 2: Fázorový diagram [1]

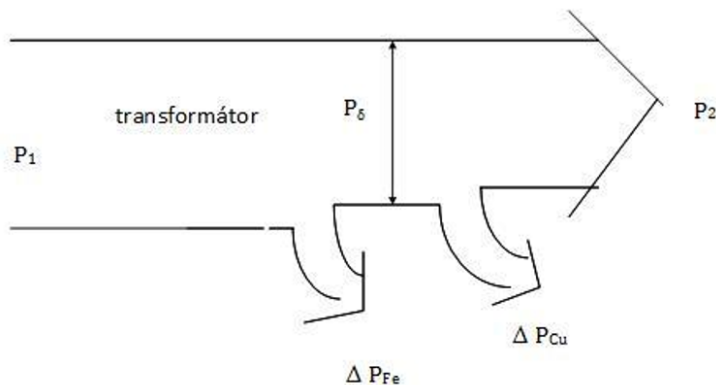


Porovnání ztrát transformátoru a indukčního motoru

Obr. 3: Ztráty na transformátoru [1]

ΔP_{Fe} - ztráty v železe

ΔP_{Cu} - ztráty v mědi

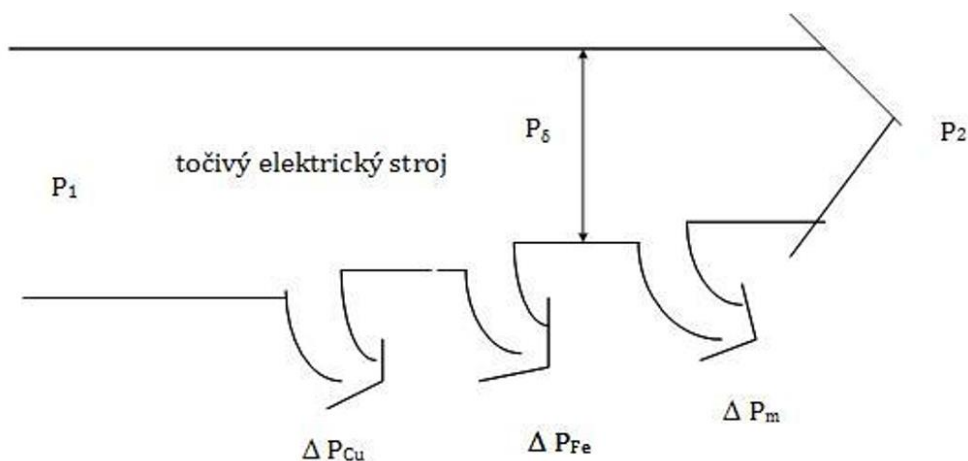


Obr. 4: Ztráty na motoru [1]

ΔP_{Fe} - ztráty v železe

ΔP_{Cu} - ztráty v mědi

ΔP_m - ztráty mechanické



Závěry

- Účinnost velkých transformátorů je až 99 %, u točivých strojů podle výkonu 75 až 90 %.
- Při chodu transformátoru naprázdno jsou ztráty v železe.
- Při chodu naprázdno transformátor odebírá většinu jalové energie na magnetování jádra. Tento stav je nežádoucí a transformátor se musí odpojit.
- Při chodu nakrátko jsou velké ztráty ve vinutí.
- Transformátor je konstruován tak, aby maximální účinnost byla dosažena při nejvíce používaném zatížení v pásmu $(0,5 \text{ až } 0,8)P_{2n}$.
- 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 %.

Trojfázové transformátory

Ve výukovém modulu trojfázové transformátory jsou uvedeny poznatky z principu činnosti, dělení transformátorů podle provedení. V jednotlivých lekcích je popis konstrukčního provedení, zapojování a jednotlivé druhy provozních stavů včetně kreslení fázorových diagramů a náhradních schémat. V závěru je uvedena energetické bilance zařízení.

Trojfázový transformátor

Tato lekce se zabývá konstrukcí trojfázového transformátoru.

Trojfázové transformátory se používají především v energetice pro hospodárný přenos elektrické energie pomocí vysokých a velmi vysokých napětí.

Princip činnosti

Transformátory jsou elektrické stroje, které pracují na principu elektromagnetické indukce, kdy se při průchodu primárním vinutím vytvoří magnetické pole, které v sekundárním vinutí indukuje napětí. Při připojení zátěži protéká sekundárním vinutím el. proud o jiné velikosti, to znamená, že přeměňují střídavý proud při určitém napětí na jiný střídavý proud při jiném napětí. Při transformaci proudu dochází ke změně napětí a proudu, ale frekvence se nemění.

Konstrukce transformátoru

Transformátory mohou být konstruovány jako jednofázové nebo trojfázové. Jednofázové sestávají se ze dvou nebo více cívek, které jsou od sebe elektricky odděleny (výjimkou jsou autotransformátory). Magnetizační obvod bývá z izolovaných transformátorových plechů o tloušťce 0,5mm nebo 0,35mm. Aby byl magnetizační proud co nejmenší, je magnetický obvod uzavřen bez vzduchové mezery.

Hlavní části transformátoru

- magnetický obvod
- Vinutí
- nádoba naplněná olejem
- víko nádoby s příslušenstvím

Rozdělení transformátorů

- Plášťové
- Jádrové

Existuje široká škála konstrukčních řešení transformátorů v závislosti na výkonu, kmitočtu a aplikaci. Zde se zaměříme na transformátory pro průmyslový kmitočet (případně s obsahem harmonických vyšších řádů), napětí NN a VN a střední výkony od desítek kVA do desítek MVA.

- Suché transformátory (nezalité)
- Suché transformátory se zalévaným vinutím
- Olejové transformátory

Suché transformátory nezalité - s vrstevným vinutím, což je vůbec nejstarší konstrukce transformátorů.

Obr. 1: Suchý transformátor s vrstevným vinutím [1]



Pokud probíhá vinutí jednotlivých závitů ve vrstvách, pak u závitů ležících pod sebou u jednoho čela vinutí dojde k tomu, že napětí mezi nimi je rovno dvojnásobku napětí na jednu vrstvu. To je nesmírně nerovnoměrné namáhání, vedoucí k nutnosti dělat mezivrstevnou izolaci silnou, i když jsou její izolační schopnosti využity jen na jednom okraji. Na NN to samozřejmě není až tak velký problém, ale zcela odlišné jsou poměry u vinutí VN. Proto se tato, jinak velmi jednoduchá konstrukce, používá běžně u NN transformátorů, ale u VN maximálně do napětí 7,2kV a výkonu cca 15MVA. Výhodou je relativně nízká cena, velmi nízké požární zatížení, výborná odolnost vůči rychlým změnám okolní teploty, odolnost vůči chladu (i do méně než -20°C) a snadná recyklovatelnost.

Suché transformátory nezalité - s kotoučovým vinutím (nezalité) mají podstatně lepší rozložení napětového namáhání, a proto se vyrábějí až do napětí 36kV, s výkony do cca 15MVA. Mají stejné výhody jako předchozí, ale jejich cena je vyšší. Při správné konstrukci mají i dobrou zkratovou odolnost.

Obr. 2: Suchý transformátor s kotoučovým vinutím [1]



Pro transformátory VN/NN (případně VN/VN) a výkony od desítek kVA výše jsou ale naprosto převažující další dvě konstrukční provedení – transformátory se zalitým vinutím a olejové typy.

Výhody transformátorů se zalévaným vinutím

- Suché transformátory jsou téměř bezúdržbové (olejové, a to i hermetické, vyžadují podstatně rozsáhlejší údržbu). Při zvyšující se ceně pracovní síly bude tento argument v průběhu životnosti transformátoru nabývat na významu. Jejich montáž je také velmi jednoduchá.
- Omezené nebezpečí požáru: požár olejového transformátoru není nic neobvyklého a následky bývají značné a to pro velké množství oleje a vysokou teplotu hoření (viz např. web stránky www.pozary.cz, odkud je i připojený obrázek). Ročně u nás dochází (podle oficiálních údajů Požární ochrany) téměř ke stovce požárů způsobených transformátory.

Obr. 3: Požár olejového transformátoru [1]



Na druhou stranu je třeba říci, že ne všechny suché transformátory jsou stejně odolné ohni – proto se rozdělují do tříd F0 a F1 (podle ČSN EN 60726) takto:

- **Třída F0** – blíže nespecifikované protipožární charakteristiky. S výjimkou charakteristik vlastních samotné konstrukci transformátoru nejsou přijata žádná zvláštní opatření k omezení hořlavosti.
- **Třída F1** – transformátory vystavené nebezpečí ohně. Je požadovaná omezená hořlavost. Musí být minimalizována emise toxických látek a neprůhledných kouřů.

Obecně lze říci, že kvalitní transformátory se zalitým vinutím jsou nesnadno hořlavé a samozhášivé.

Ekologické hledisko

Olejová trať (zejména od „levných“ výrobců) mají úniky, nemluvě o likvidaci celého transformátoru někdy v budoucnu, kdy požadavky na ekologii budou ještě přísnější. Zalévané transformátory jsou i při likvidaci (na konci životnosti) ekologičtější (z větší části jsou recyklovatelné) než transformátory olejové.

V prašném, vlhkém, agresivním a vůbec znečištěném prostředí je suchý transformátor výhodnější, mimo jiné proto, že má podstatně větší povrchové vzdálenosti.

Kompaktní konstrukce zalitého transformátoru (zejména s fóliovým vinutím na NN, tj. z fólie široké po celé šířce sloupku) je odolnější účinkům dynamickým sil při zkratech.

Zároveň má tato konstrukce podstatně lepší rozložení teploty.

Vinutí VN z hliníkových pásků umožňuje ideální rozložení napětového namáhání (oproti nerovnoměrnému namáhání u vrstevných vinutí). To se zase projeví ve větší napětové odolnosti transformátoru.

Zalité provedení je celkově daleko odolnější než jiné konstrukce, a to jak mechanicky, tak proti některým vlivům prostředí (slaná mlha aj.).

Obr. 4: Zahoření nekvalitního zalévaného transformátoru



Pokud je zalévání prováděno kvalitně, je zalitý transformátor mimořádně odolný i proti přepětím. Kvalitu zalití lze do určité míry rozpoznat při zkouškách.

Pokud je kvalitně složený magnetický obvod, má zalévaný transformátor i nízké ztráty naprázdno a malou hlučnost.

Zalévané transformátory lze vyrobit i v provedení odolném otřesům a vibracím (např. do zemětřesných oblastí, do lodí, na lokomotivy).

Zalévané transformátory lze vyrobit i v provedení se sníženými ztrátami naprázdno, případně i nakrátko. Takové provedení šetří provozní náklady.

U zalévaných transformátorů je výhodnější provedení vinutí z Al oproti Cu.

Zalévané transformátory mají podstatně nižší nároky na stanoviště (zaberou méně místa) a nevyžadují olejovou jímku. Díky jejich vlastnostem je lze umístit blíže k místu spotřeby a tím opět o něco snížit ztráty. Vinutí NN lze provést jako chlazené vodou (chladičí voda přímo protéká vodičem), případně lze vodou chladit i jádro (magnetický obvod).

Vzhledem k velké časové oteplovací konstantě lze zalité transformátory krátkodobě přetěžovat. Pro možnost ještě většího krátkodobého zvýšení výkonu lze osadit radiální ventilátory.

Ventilátory ale samy mají určitou spotřebu, takže snižují účinnost transformátoru. S ohledem na pohyblivé části je i jejich životnost obvykle kratší než životnost samotného transformátoru. Rychlejší proudění vzduchu také způsobuje větší zanášení větracích mřížek nebo otvorů.

Obr. 5: Radiální ventilátory, možnost přetížení až o 40% [1]



Obr. 6: Axiální ventilátory, možnost přetížení až o 50% [1]



Typické aplikace pro kvalitní zalévané transformátory

Na druhou stranu jsou místa a aplikace, kde vychází výhodnější olejové transformátory, a to jsou:

- Venkovní prostředí s teplotami hluboko pod bod mrazu a se zapínáním transformátorů z těchto nízkých teplot. Běžné zalévané transformátory lze bez dalších opatření zapínat až od teplot -5°C .
- Provedení pro napětí vyšší než $U_0 = 35\text{kV}$ a výkony větší než cca 20MVA
- Obecně lze říci, že olejový transformátor běžného provedení je investičně levnější než zalévaný, jeho provoz je však nákladnější.

Trojfázový transformátor - zapojení vinutí

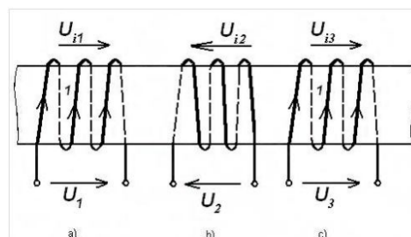
Tato lekce se zabývá různými druhy zapojování vinutí trojfázového transformátoru. Vznikne spojením tří jednofázových transformátorů. V praxi lze použít:

1. Tři jednofázové transformátory – větší spotřeba materiálu, ale v záloze stačí jeden transformátor menšího výkonu.
2. Jeden trojfázový transformátor – menší spotřeba materiálu, ale v záloze musí být jeden velký transformátor stejného výkonu.

Spojování vinutí

Cívky primárního a sekundárního vinutí mohou být navinuty dvojím způsobem – **souhlasně** (obr. 1a, obr. 1c) nebo **nesouhlasně** (obr. 1b).

Obr. 1: Princip [1]



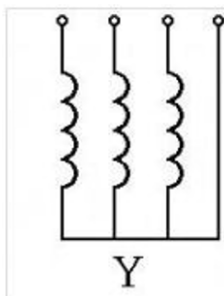
Při souhlasném vinutí cívek mají indukovaná napětí stejný směr, při nesouhlasném vinutí mají indukovaná napětí opačný směr.

Cívky mohou být rovněž různým způsobem spojeny:

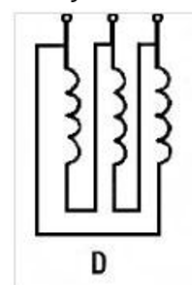
Vinutí spojená do hvězdy – značí se **Y**, cívky všech tří fází jsou spojeny paralelně.

Vyvedením středního vodiče ze společného uzlu získáváme soustavu dvou napětí – **sdružené** (mezi fázemi) a **fázové** (mezi fázovým a středním vodičem)

Obr. 2: Zapojení do hvězdy [1]



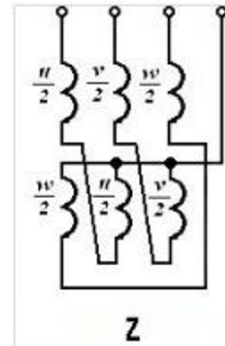
Obr. 3: Zapojení do trojúhelníku [1]



Vinutí spojená do trojúhelníku – značí se **D**, cívky všech tří fází jsou spojeny do série – získáváme pouze sdružené napětí.

Vinutí spojená do lomené hvězdy – značí se **Z**. Cívky každé fáze jsou rozděleny na polovinu a jedna polovina je posunuta na následující sloupek magnetického obvodu. Používá se pouze na výstupní straně transformátoru pro vyrovnání nerovnoměrného zatížení jednotlivých fází.

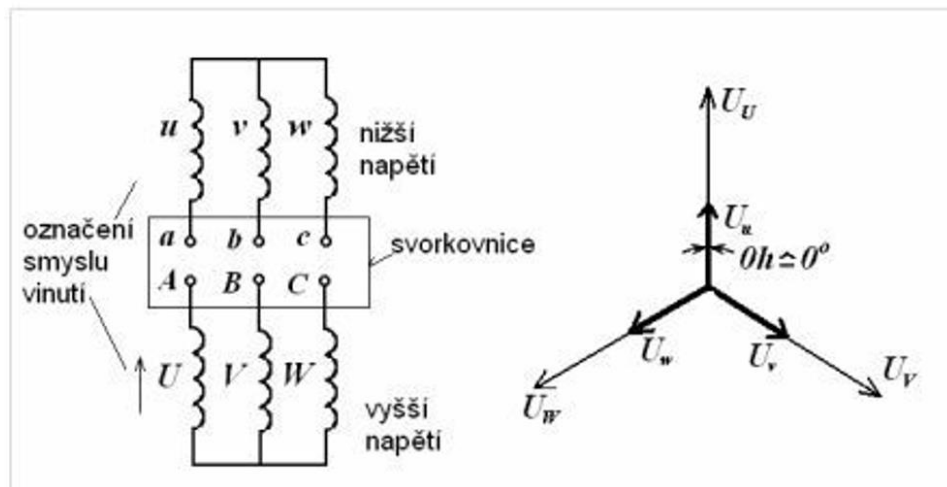
Obr. 4: Zapojení do lomené hvězdy [1]



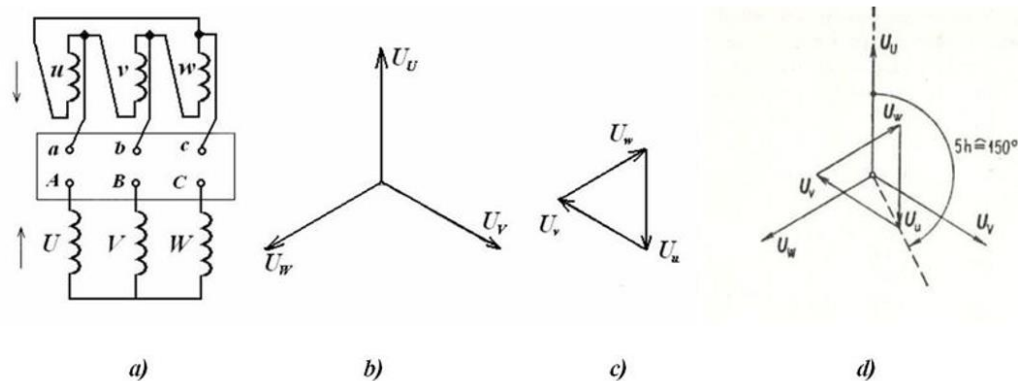
U skutečných transformátorů může být primární i sekundární vinutí zapojeno různě.

- Velká písmena (**D**, **Y**) znamenají stranu vyššího napětí. Malá písmena (**d**, **y**, **z**) znamenají stranu nižšího napětí.
- V praxi se používají tato zapojení **Yy**, **Dy**, **Yz**, **Yd**.
- **Dd** se používá zřídka.

Obr. 5: Zapojení **Yy0** [1]



Obr. 6: Zapojení Dy5 [1]



a) svorkovnice

b) fázorový diagram strany vyššího napětí zapojené do hvězdy

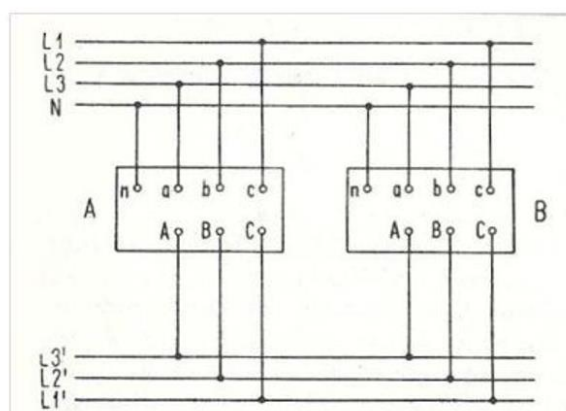
c) fázorový diagram strany nižšího napětí zapojené do trojúhelníku

d) celkový fázorový digram – hvězda je umístěna do těžiště trojúhelníku, hodinový úhel je mezi příslušným fázorem a spojnici těžiště s vrcholem trojúhelníku

Paralelní chod trojfázových transformátorů

Tato lekce se zabývá základními podmínkami paralelního chodu třífázových transformátorů.

Obr. 1: Paralelní chod transformátorů [1]



Pokud nepostačuje pro konkrétní použití výkon transformátoru, můžeme použít dva transformátory v paralelním zapojení. Abychom je takto mohli zapojit, je nutno splnit určité podmínky.

Obecné podmínky paralelního chodu transformátorů (pro jednoduchost je v textu uvažováno spojení dvou transformátorů), obecně je ale možné i spojení více strojů za stejných podmínek:

- Stejný sled fází
- Stejně hodinové číslo
- Stejná jmenovitá napětí
- Stejný převodový poměr
- Stejně napětí nakrátko

Vysvětlení k jednotlivým bodům:

Stejný sled fází – podmínka zřejmá (pravotočivý sled fází)

Stejně hodinové číslo – paralelně lze spojit za určitých podmínek i transformátory s rozdílným hodinovým číslem a to tehdy, pokud permutací (prohozením) svorek buď na primárním, nebo na sekundárním vinutí (někdy i na obou zároveň) lze zajistit, že se dosáhne stejného fázového natočení vektorů. Aby bylo takového přepojení možné, je nutné, aby oba transformátory patřily do stejné skupiny hodinových čísel. Skupiny hodinových čísel jsou tři a to:

- 0 - 4 - 8
- 2 - 6 - 10
- 1 - 3 - 5 - 7 - 9 - 11

Stejná jmenovitá napětí – podmínka stejných napětí je zřejmá (vstupní i výstupní napětí obou transformátorů mají být stejná - jmenovitá napětí se nesmí lišit o více než 5 %)

Stejný převodový poměr - rozdíl převodových poměrů se připouští jen několik desetin procenta. Rozdíl v převodovém poměru způsobuje trvalý vyrovnávací proud, omezený impedancí transformátorů. Přibližná velikost vyrovnávacího proudu bude:

$$I_v = 100 \cdot b (u_{k1} + u_{k2}),$$

kde I_v je vyrovnávací proud v procentech jmenovitého proudu, b je rozdíl v převodových poměrech v procentech, u_k je napětí nakrátko jednotlivých transformátorů v procentech.

Stejně napětí nakrátko – přípustný rozdíl v napětí nakrátko je 10%. Rozdíl způsobuje nerovnoměrné zatížení jednotlivých transformátorů (výkon se rozdělí nepřímo úměrně poměru napětí nakrátko):

$$S_1 : S_2 = \frac{S_{n1}}{u_{k1}} : \frac{S_{n2}}{u_{k2}},$$

kde S_1 je skutečný výkon, který podává transformátor č. 1, S_{n1} je jmenovitý výkon transformátoru č. 1, u_{k1} je napětí nakrátko transformátoru č.1.

Poměr jmenovitých výkonů paralelně spolupracujících transformátorů menší než 3, 2. Předpisy doporučují paralelně spojovat transformátory s poměrem výkonu do 1:2. To by mělo být zohledněno při volbě transformátoru.

Při větším poměru už je přínos menšího stroje tak malý, že paralelní chod ztrácí smysl. Krátkodobě se využívá paralelní chod transformátorů s větším poměrem výkonů pouze při přepojování zátěže z většího stroje na menší a naopak bez přerušení dodávky. V tomto případě nemusí být ani splněná předepsaná tolerance pro napětí nakrátko.

Trojfázový transformátor – řízení napětí

Tato lekce se zabývá řízením napětí třífázového transformátoru.

Změna výstupního napětí síťových transformátorů **změnou počtu vstupních nebo výstupních závitů vinutí** za účelem kompenzace úbytků napětí i při proměnném zatížení.

Řízení napětí na vstupní straně je výhodnější, protože při větším počtu závitů je řízení jemnější a přepínací kontakty mají menší průřez (vedou menší proud). **Nevýhodou** je změna magnetického toku, způsobená změnou počtu závitů, čímž vzniká nestejně zatížení a využití aktivního průřezu jádra. Zmenšováním vstupních závitů se výstupní napětí zvyšuje.

Při řízení napětí na výstupní straně zůstává magnetický tok při změně počtu závitů na výstupní straně stále stejný. Řízení napětí **je však méně výhodné**, protože se dá realizovat jen v hrubých skocích a přepínač musí být vzhledem k velkým proudům masivní a rozměrný.

Napětí transformátoru můžeme řídit změnou převodu, který je dán poměrem

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \text{Odtud výstupní napětí} \quad U_2 = U_1 \frac{N_2}{N_1}.$$

Zmenšováním počtu výstupních závitů se výstupní napětí snižuje. Tak například u transformátorů do 1600 kVA, které mají předepsanou regulaci $\pm 5\%$ na vstupní straně, se používá přepínač umístěný na víku nádoby transformátoru, řízení napětí větších transformátorů (do 2000 kVA) se provádí po 8 – 9 napěťových stupních po 1,78 nebo 2% jmenovité hodnoty vyššího napětí. Jsou to tzv. říditelné transformátory. Přepínání odboček musí být možné za provozu bez přerušení dodávky proudu.

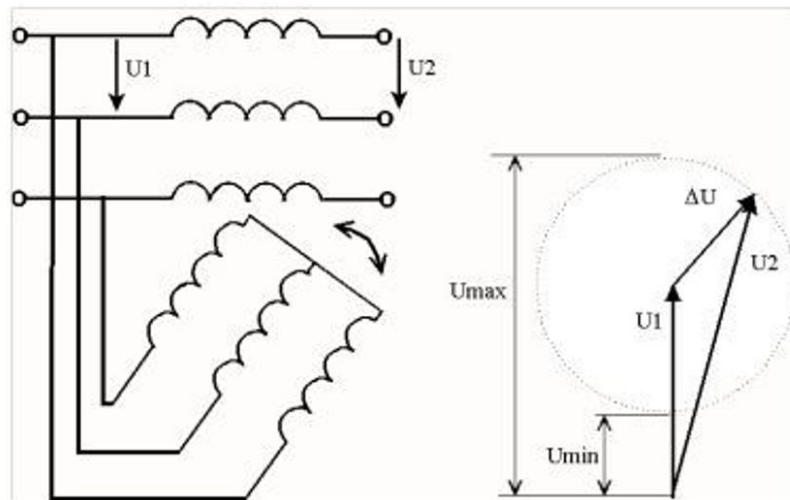
Řízení napětí může být buď stupňové, nebo plynulé.

- Stupňového řízení napětí se dosáhne přepínáním odboček na vinutí
- Plynulého řízení se dosáhne u sběračového transformátoru
- Plynulého řízení se dosáhne natáčecím transformátorem



Obr. 1: Natáčivý transformátor [1]

Obr. 2: Princip řízení napětí [2]



Elektrické stroje k plynulému řízení napětí nazýváme natáčivé transformátory neboli boostery. Jsou vhodné pro aplikaci ve zkušebnách, pro stabilizaci napětí při kolísání napětí v síti, pro řízení teploty v odporových pecích, jako zdroje regulovatelného napětí.

Trojfázové speciální transformátory

Tato lekce se zabývá speciálními druhy trojfázových transformátorů.

Přístrojové transformátory

Přístrojové transformátory s izolací papír-olej jsou používány pro měření proudu a napětí v rozvodnách VN a VVN o rozsahu napětí 24 - 420 kV. Jejich hermetické provedení v kombinaci s vhodnými materiály je určují pro dlouhodobý provoz ve venkovním prostředí.

Vyrábějí se ve třech provedeních:

- **JOF** - Přístrojový transformátor proudu (měření proudu)
- **EOF** - Přístrojový transformátor napětí (měření napětí)
- **EJOF** - Přístrojový transformátor kombinovaný (měření proudu i napětí)

Jednotlivé části přístrojových transformátorů

Hlava s dilatačním systémem

Hlava přístrojových transformátorů je vyrobena z hliníkové slitiny. Vývody primárního připojení jsou dodávány dle požadavků zákazníka. Hermetický a beztlakový uzávěr oleje je zajištěn dilatační kovovou komorou vyrobenou z nerezové oceli. U přístrojových transformátorů napětí do 72 kV je uzávěr proveden membránou z umělé hmoty. Stav dilatačního olejového systému 123 kV může být zvenčí kontrolován. Tento typ konstrukce zaručuje v případě potřeby dobrou demontovatelnost a tím i opravitelnost transformátoru. Díky dokonalé hermetické konstrukci jsou přístrojové transformátory bezúdržbové.

Izolátor

Izolátor s minimální dráhou povrchové izolace 2,5 cm/kV lze dodat buď v porcelánovém nebo dnes častěji v kompozitním provedení. Pro zaručení vysoké mechanické pevnosti je keramický izolátor přímo zacementován do vrchní části vany, kompozitní izolátor je vlepen do pouzdra hlavy přístrojového transformátoru.

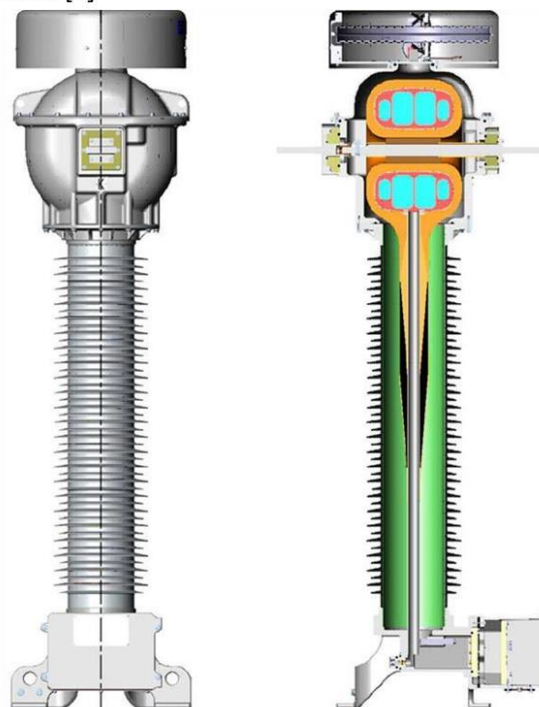
Izolace papír-olej

Pouzdra s aktivními částmi přístrojových transformátorů, svod napětí i vyvedení sekundárních vývodů proudových jader jsou opatřeny papírovou izolací. Pro zajištění dobrého řízení elektrického pole jsou svody opatřeny odstupňovanými kondenzátorovými průchodky. Papírová izolace je zcela vysušena horkým vzduchem. Následné pomalé plnění přístrojového transformátoru olejem za zvýšené teploty ve vysokém vakuu má zásadní význam pro dlouhodobý bezporuchový provoz přístrojového transformátoru.

Vana přístrojového transformátoru

Vana přístrojového transformátoru je opět vyrobena z hliníkové slitiny a opatřena skříňkou sekundárních vývodů, uzemňovací vývody, výpustným šroubem oleje a typovým štítkem. Sekundární vývody jsou provedeny jako řadová svorkovnice nebo závitové svorníky a umístěny ve skříni se slepou přírubou.

Obr. 1: Příkladový transformátor proudu [1]



Obr. 2: Příkladové transformátory napětí [1]



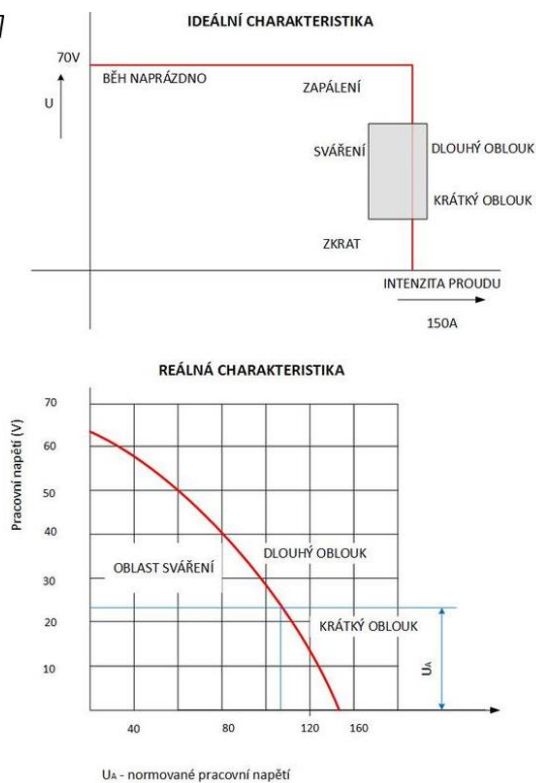
Sběračový transformátor

Jednofázový nebo trojfázový transformátor pro malé výkony s mnohastupňovým (téměř plynulým) řízením napětí. Posouváním uhlíkových kladek na dvou protilehlých pásech se mění velikost odebíraného (výstupního) napětí i jeho fáze. Kladky se posouvají ručně (řídícím kolečkem), nebo dálkově (zabudovaným el. motorkem). Rozšířené jsou tzv. sběračové autotransformátorky, kde je pohyb sběracího kontaktu buď přímočarý, nebo kruhový. Zvláštním případem je tzv. dělič napětí, tj. autotransformátor s velkým počtem odboček, které umožňují řízení napětí od nuly až po napětí síťové, popř. i vyšší.

Rozptylové transformátory

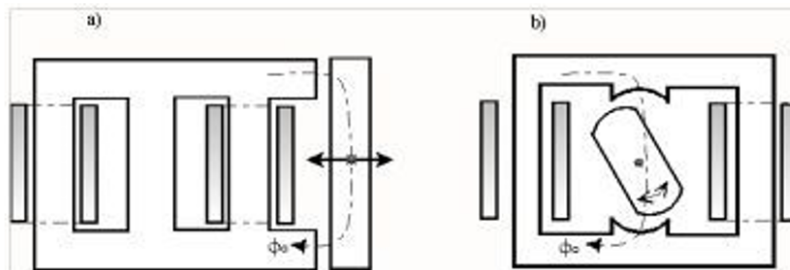
Typickým představitelem rozptylových transformátorů jsou svařovací transformátory. U svařování obloukem potřebujeme vyšší napětí na zapálení oblouku (cca 70V) a na udržení oblouku napětí nižší (30-40V), které by se navíc mělo kolísat s délkou oblouku tak, aby proud oblouku byl přibližně konstantní. Tyto požadavky vedou na měkký zdroj přibližující se charakteristice proudového zdroje s napětovým omezením.

Obr. 3: Charakteristika - rozptyl transformátoru [2]



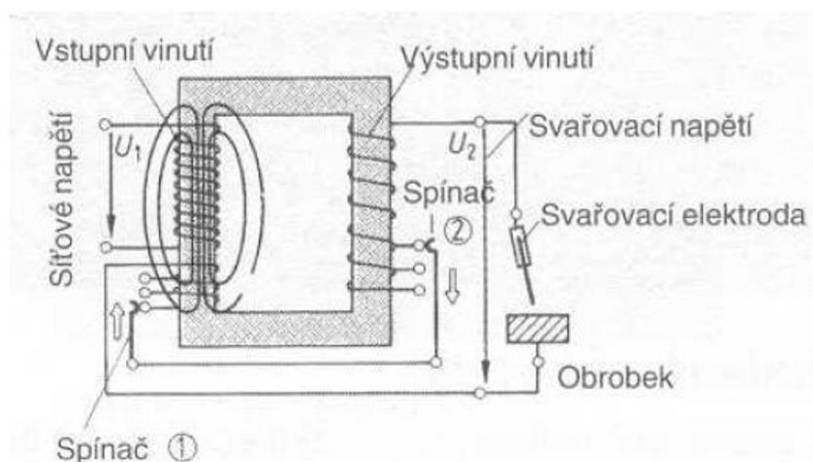
Měkčí charakteristiky lze dosáhnout zvětšením vnitřního odporu zdroje, zde zvýšením impedance nakrátko Z_k . Impedance Z_k má dvě složky: činný odpor R a rozptylovou reaktanci X . Pokud bychom zvýšili činný odpor (použitím odporového materiálu v primárním nebo sekundárním vinutí), zvýšily by se i ztráty ve vinutí, což by bylo ekonomicky nepříznivé. Správnou cestou je tedy zvýšení rozptylové reaktance zvýšením rozptylového toku transformátoru. Tohoto záměru lze dosáhnout zařazením magnetického bočnicku do cesty rozptylového toku.

Obr. 4: Magnetický bočník [3]



Pohybem, resp. otáčením magnetického bočnicku lze v určitém rozmezí měnit voltampérovou charakteristiku. Při zvětšování vzduchové mezery bude klesat rozptyl a charakteristika se stane tvrdší.

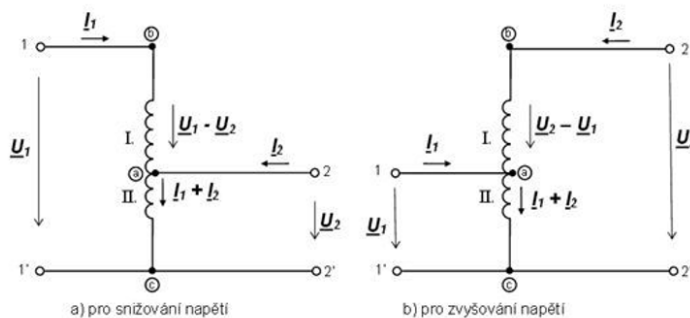
Obr. 5: Schéma svařovacího transformátoru [3]



Pro řízení svařovacího proudu se u kvalitních svařovacích transformátorů používá regulace posuvem jádra magnetického obvodu transformátoru. Pro svařovací proudy do cca 100A se svařovací transformátory spokojí s připojením na jednofázové napájecí napětí 230V/50Hz. Připojení na třífázové napětí 3x400V/50Hz je vhodné pro vyšší proudy nad cca 100A.

Autotransformátory

jsou transformátory, u kterých se pro primární i sekundární vinutí používá stejná cívka. Z mechanického hlediska jde vlastně o cívku na železném jádře s odbočkou pro primární a pro sekundární vinutí. Nevýhodou je, že při takové konstrukci přicházíme o galvanické oddělení primárního a sekundárního vinutí. Odbočka sekundárního vinutí může být realizována pomocí pohyblivého jezdce, přičemž nastavením tohoto jezdce je pak možné regulovat velikost sekundárního napětí. Tento jezdec může být nastaven elektrickým pohonem, odtud zřejmě pochází název autotransformátor - ve smyslu automatický transformátor. Autotransformátory často najdeme v elektrických laboratořích, kde se používají jako regulovatelné zdroje střídavého napětí.



Obr. 6: Schéma zapojení [4]

Pecní transformátory

slouží k vytápění tavicích, žhacích, kalicích, smaltovacích a sušících pecí. Dělíme je na:

- **Odporové** - topné odporové články jsou připojeny na řízené napětí sekundárního vinutí.
- **Obloukové** - transformují vysoké napětí na nízké o velikosti desítek voltů, potřebné k zapálení a k hoření elektrického oblouku. Na straně nízkého napětí jsou proudy až statisíců ampér, proto se řízení napětí provádí na primární straně.
- **Indukční** - sekundárním vinutím je tekutý prstenec zahříváné látky - kovu. Primární vinutí je podobné jako u běžného transformátoru. Pro menší ohříváné předměty se používají kmitočty $2 \div 10$ kHz.

Stejnoseměrné stroje

Následující modul se zabývá stejnosměrnými stroji. Je zde vysvětlen princip fungování stejnosměrného stroje a popsána jeho konstrukce, princip komutace stejnosměrného proudu, způsob vinutí strojů a reakce kotvy stejnosměrného stroje.

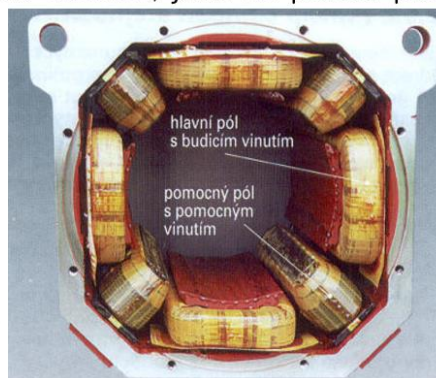
Následuje popis základních stejnosměrných strojů – dynama a motoru s cizím buzením s různým zapojením budicího vinutí. Jsou zde rovněž uvedeny funkční vlastnosti těchto strojů spolu s provozními charakteristikami. Závěrem jsou zmíněny klasické metody řízení otáček stejnosměrných motorů.

Princip činnosti a konstrukce

Stejnoseměrné stroje jsou historicky nejstaršími elektrickými stroji a nejprve se používaly jako generátory pro výrobu stejnosměrného proudu. V současné době se stejnosměrné stroje používají především jako motory v elektrických regulovaných pohonech (např. u obráběcích strojů, válcovacích stolic, těžních strojů, v automobilovém průmyslu a v elektrické trakci). Generátory (dynama) jsou postupně nahrazovány polovodičovými usměrňovači. Regulované pohony se stejnosměrnými motory jsou v řadě technických oblastí postupně nahrazovány střídavými regulovanými pohony s asynchronními motory zejména proto, že stejnosměrné motory jsou vzhledem k asynchronním motorům složitější a výrobně a provozně nákladnější. Stále však existují oblasti, ve kterých se stejnosměrné stroje používají pro některé své výhodné vlastnosti a speciální charakteristiky.

Konstrukční uspořádání

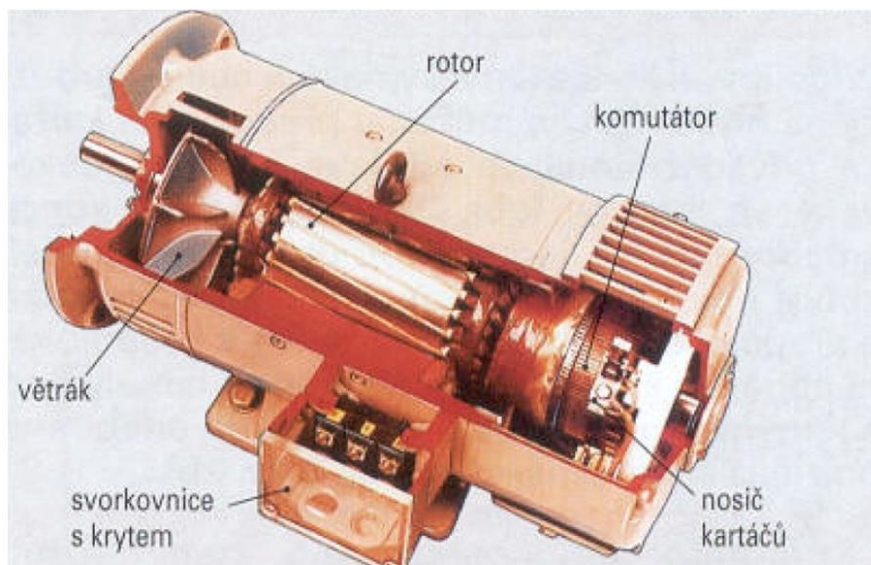
Na statoru jsou k vytvoření magnetického toku umístěny hlavní póly, které mohou být buzeny cívkami, kterými protéká proud (tzv. *budící vinutí*), nebo permanentními magnety. Póly s budícím vinutím se skládají z pólového jádra a pólového nástavce. Dále zde mohou být tzv. pomocné póly (komutační), které jsou umístěny mezi hlavními póly pro zlepšení komutačních vlastností stroje. Rotor (pohyblivá část stroje, která se nazývá kotvou) je složen z dynamových (izolovaných křemíkových) plechů, v jehož drážkách, umístěných po obvodu, je vinutí. Jednotlivé cívky vinutí kotvy jsou připojeny k měděným, vzájemně izolovaným lamelám komutátoru, který zde zastává funkci mechanického usměrňovače proudu. Komutátor je spolu s magnetickým obvodem mechanicky nasazeným na hřídeli stroje. Na komutátor dosedají kartáče, které jsou umístěny ve speciálních držácích, jimiž se přivádí proud do vinutí kotvy. Komutátor a kartáče tvoří sběrné ústrojí stroje. [1]



Obr. 1: Provedení statoru stejnosměrného stroje [2]

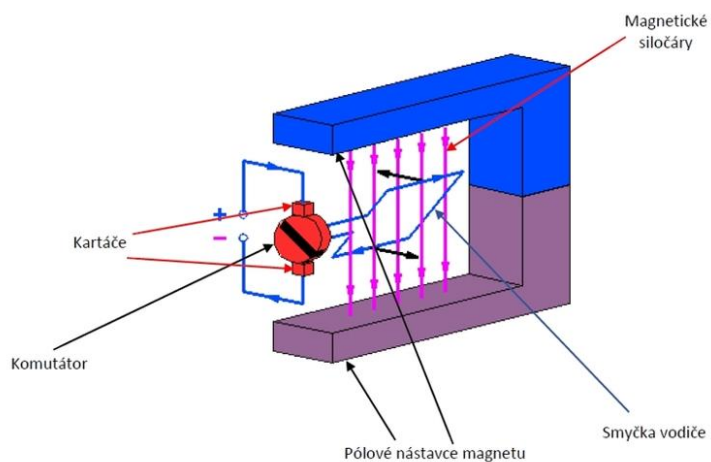


Obr. 2: Konstrukce stejnosměrného stroje [2]



Princip činnosti stejnosměrného stroje

Princip činnosti lze vysvětlit na elementárním stroji, jehož vinutí kotvy tvoří pouze dva vodiče spojené do jednoho závitu umístěného na rotoru, který se otáčí v magnetickém poli vytvořeném dvojicí hlavních pólů (s jedním severním a jižním pólem).



Obr. 3: Princip činnosti stejnosměrného stroje [3]

Závít je připojen ke dvěma lamelám komutátoru, které jsou navzájem izolovány a otáčejí se společně s rotorem. Na komutátor dosedají dva nepohyblivé kartáče, které jsou umístěny do tzv. neutrální osy, tj. do geometrické osy mezi dvěma sousedními hlavními póly. Stejnosemnné stroje mohou pracovat jako generátory (přeměňují mechanickou energii na elektrickou), a nebo jako motory (přeměňují naopak elektrickou energii na mechanickou). Schéma elementárního stroje je na obr. 3.

Otáčeli se kotva otáčkami n , pohybují se vodiče závitu o délce l v magnetickém poli s indukci B rychlostí v (kolmou složkou na směr siločar), indukují se do nich dle indukčního zákona pohybová napětí

$$u_{ind} = B \cdot l \cdot v.$$

Za polovinu otáčky si vodiče vymění místa a indukovaná napětí v nich změni svůj směr, a mají tedy tvar střídavého napětí. Vodiče jsou připojeny k lamelám komutátoru, na který dosedají kartáče. Ke spodnímu kartáči (+) je vždy připojen vodič pod jižním pólem a k hornímu kartáči (–) vodič pod severním pólem. Polarita napětí na kartáčích se tedy nemění, to znamená, že komutátor usměřňuje střídavé napětí indukované ve vinutí kotvy. Vnější obvodem připojeným ke kotvě protéká stejnosměrný proud, zatímco ve vodičích kotvy má proud střídavý charakter. Indukované napětí na svorkách stroje je pulzující, pro jeho zlepšení se vinutí kotvy vyrábí s větším počtem cívek a jemu odpovídajícím počtem lamel komutátoru.

Na vodiče, kterými prochází proud I_a a které se nacházejí v magnetickém poli s indukci B , působí síla F , jejíž velikost je dána vztahem:

$$F = B \cdot I_a \cdot l.$$

Síly působící na jednotlivé vodiče cívky vytvářejí točivý moment, jehož směr bude závislý na směru proudu ve vodičích a v přívodu k motoru. V případě připojení napětí zdroje, které je větší než napětí indukované, bude mít moment stroje hnací účinek, jehož důsledkem bude snaha o urychlení rotoru a zvýšení otáček až na hodnoty rychlosti naprázdno ω_0 (otáček n_0) a tím i indukovaného napětí na hodnotu napětí zdroje.

V případě připojení napětí menšího nebo pouze rezistoru bude mít moment stroje brzdný účinek, jehož důsledkem bude snaha o snížení otáček a tím i indukovaného napětí. Časový průběh momentu stejně jako indukovaného napětí má opět pulzující tvar.

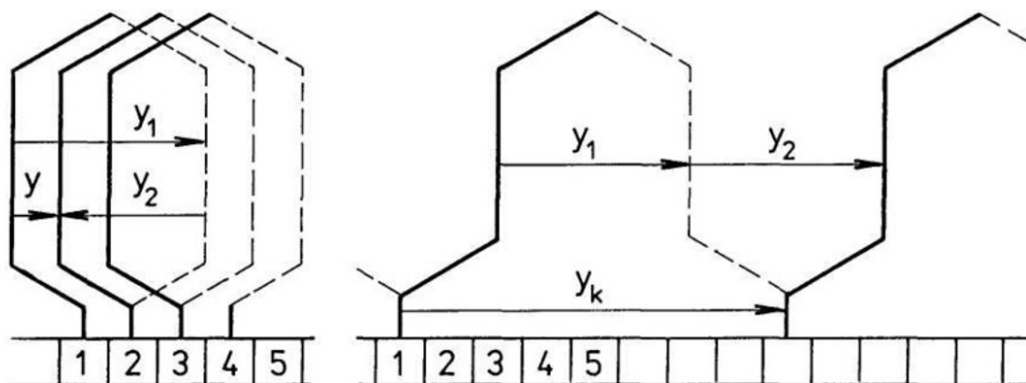
Vinutí stejnosměrných strojů

Na vnějším obvodu rotoru stejnosměrného stroje je uloženo vinutí kotvy v drážkách, jejichž počet a rozměry jsou voleny tak, aby nedocházelo k přesycení rotorových zubů. Vinutí je obvykle válcové, někdy zvané bubnové, jeho obě strany cívek jsou aktivní a leží na válcové ploše u vzduchové mezery. Cívka je tvořena jedním nebo několika závity. Vinutí je většinou dvouvrstvé, u něhož přední strana cívky je uložena zpravidla v horní vrstvě, zadní strana v dolní vrstvě drážky. Jednovrstvé vinutí se používá zřídka, hlavně u strojů na nízké napětí. [1]



Obr. 1: Smyčkové vinutí a vlnové vinutí [4]

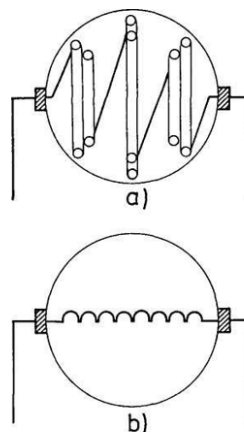
Podle tvaru cívek se vinutí dělí na smyčkové, nebo vlnové, jejichž několik cívek je naznačeno na obr. 2. Vzdálenost mezi přední a zadní aktivní stranou téže cívky měřenou na obvodu kotvy nazýváme zadní cívkový krok y_1 . Indukované napětí v cívce vinutí generátoru či točivý moment motoru je největší, je-li cívkový krok roven pólové rozteči, tj. vzdálenosti os dvou sousedních hlavních pólů ($y_1 = \tau_p$).



Obr. 2: Smyčkové vinutí a vlnové vinutí [5]

Pro zlepšení komutace se někdy cívkový krok nepatrně zkracuje, vinutí má pak krok zkrácený ($y_1 < \tau_p$), výjimečně se krok prodlužuje ($y_1 > \tau_p$). V praxi je zvykem udávat krok v počtu drážek nebo v počtu cívkových stran.

Kartáče se na komutátoru umísťují tak, aby indukované napětí bylo co možná největší a aby se komutující cívky nacházely co nejbližše magnetické neutrále. Potom napětí indukované v komutujících cívkách, které jsou kartáči spojené nakrátko, bude minimální. Při geometricky souměrných cívkách rotorového vinutí jsou kartáče nastavené do geometrické neutrální osy, tj. umístěny v osách hlavních pólů.



Obr. 3: Náhrada vinutí cívkou se stálou polohou v prostoru [5]

Proudy ve vodičích mezi dvěma sousedními kartáči protékají v jednom smyslu a v druhé polovině vodičů v opačném smyslu. Pro vinutí kotvy lze nakreslit náhradní vinutí - viz obr. 3a, které má stejné elektromagnetické vlastnosti jako původní vinutí. Vinutí kotvy s komutátorem se z hlediska elektromagnetického působení jeví jako pseudostacionární, tedy zdánlivě stojící. Smysl magnetického pole tohoto vinutí se určí podle pravidla pravé ruky. Osa magnetického pole vinutí podle obr. 3 prochází osami kartáčů. Jsou-li kartáče v geometrické neutrální ose, je magnetické pole kotvy kolmé k magnetickému poli hlavních pólů. [2]

Proud kotvy dvou pólového stroje prochází od kartáče jedné polaroty ke kartáči opačné polaroty dvěma paralelními větvemi vinutí. U strojů více pólových je počet paralelních větví větší. Lze dokázat, že smyčkové vinutí má počet paralelních větví $2a$ stejný jako počet pólů $2p$ ($2a = 2p$), nazývá se paralelní vinutí. Krok na komutátoru smyčkového vinutí je

$$y_k = \pm \frac{a}{p} = \pm 1,$$

kde a je počet párů paralelních větví a p je počet pólových dvojic.

Znaménko plus platí pro nejčastěji používané vinutí nekřížené, znaménko minus pro vinutí křížené. Pro $a > p$ se smyčkové vinutí rozpadá na více paralelních větví, než má stroj pólů, a nazývá se víceparalelní nebo též několikaparalelní. U smyčkového vinutí je počet kartáčů roven počtu pólů. Polarita kartáčů se po obvodu komutátoru střídá. Kartáče téže polaroty jsou navzájem propojeny, takže vývody od kotvy jsou vždy dva.

Pro vlnová vinutí platí pro krok na komutátoru vztah

$$y_k = \frac{\pm K \mp a}{p}$$

plynoucí z obecného vztahu

$$y_k = \frac{\pm \varepsilon K \mp a}{p},$$

kde K je počet lamel komutátoru, a je počet párů paralelních větví, p je počet pólových dvojic, $\varepsilon = 0$ platí pro smyčková a $\varepsilon = 1$ pro vlnová vinutí. Jsou-li znaménka ve vztahu souhlasná, vinutí je křížené, jsou-li nesouhlasná, je vinutí nekřížené.

Podle počtu paralelních větví mohou být vinutí podle tabulky:

název	možnost provedení		
		smyčková	vlnová
sériová	$a = 1$	-	+
sériově paralelní	$1 < a < p$	-	+
paralelní	$a = p$	+	+
několikaparalelní	$a = n \cdot p$	+	+

Proud ve vodiči, který se rovná proudu v jedné paralelní větvi, je dán počtem paralelních větví vinutí

$$I_v = I_a = \frac{I}{2a},$$

kde I je proud kotvy.

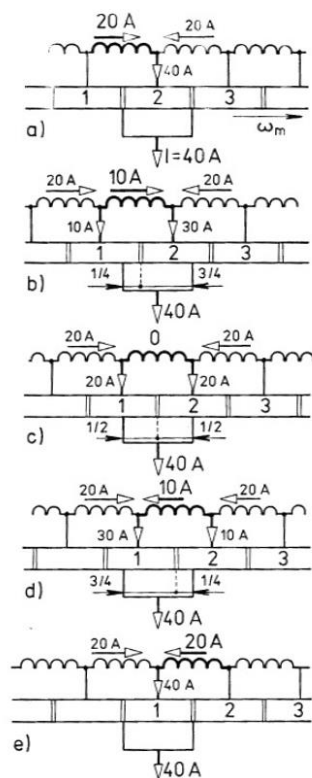
Sériová vinutí se používají u strojů na vyšší napětí, např. u dráhových motorů. Pro dané napětí u nich vychází nejmenší počet vodičů ve vinutí kotvy, což je důležité při návrhu stroje. Nejčastěji používaná jsou paralelní vinutí, uplatňují se u většiny běžných strojů, několikaparalelní vinutí bývají navrhována obvykle pro stroje na nízká napětí a velké proudy. Sériově paralelní vinutí se používají obvykle u strojů velkých výkonů na vyšší napětí. [3]

Komutace

Základy komutace jsou vysvětleny na příkladu paralelního smyčkového vinutí, jehož cívky jsou vyvedeny na sousední lamely. Předpokládejme, že proud kartáčem, pro zjednodušení o šířce rovné lamelové rozteči, je konstantní. Dotýká-li se kartáč pouze jedné lamely, podle obr. 1, je proud procházející cívkami „zleva“ a „zprava“ stejně veliký. Dotýká-li se kartáč dvou lamel, uvažovaná cívka je tímto kartáčem zkratována a komutuje.

Komutace je změna proudu v cívce z jedné polaritu na polaritu opačnou při přechodu z jedné paralelní větve do druhé, cívka je přitom kartáči spojena nakrátko. [1]

Obr. 1: Komutace [4]



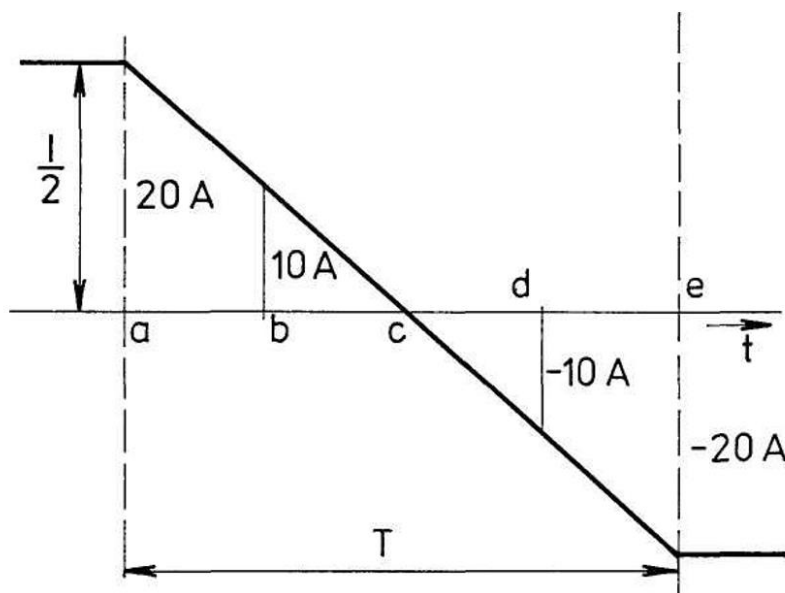
Proces komutace ve vyznačené cívce, při zvoleném proudu kartáčem $I = 40 \text{ A}$, je zřejmý z obr. 1. Předpokládejme, že proud procházející oběma vývody cívky je přímo úměrný dotykové ploše a příslušné části kartáče s lamelou. Například na obr. 1b je v dotyku s lamelou č. 1 jedna čtvrtina kartáče a zbývající tři čtvrtiny se dotýkají lamely č. 2. Proud ve vývodech je rozdělen ve stejném poměru.

Na obr. 1 je znázorněno pět stavů procesu komutace pro různé časové okamžiky při rovnoměrném pohybu (konstantní rychlosti). Proud v komutující cívce nabývá hodnot $+20 \text{ A}$, $+10 \text{ A}$, 0 , -10 A , -20 A . Časová závislost těchto proudů je lineární, tato komutace se nazývá lineární nebo též přímková.

Lineární komutace (ideální) byla odvozena za zjednodušujících předpokladů:

- Rozdělení proudů ve vývodech cívek je dáno pouze přechodovým odporem mezi kartáči a lamelami.
- Vlastní a vzájemná indukčnost cívek kotvy nechtě je zanedbatelná.
- V komutující cívce se při komutaci indukuje nulové napětí.
- Odpor komutující cívky je zanedbatelný ve srovnání s přechodovým odporem kartáčů.

Obr. 2: Závislost proudu komutující cívky na čase při lineární komutaci

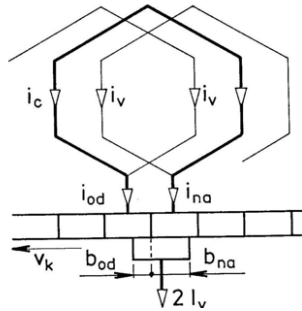


Komutace v reálných strojích však není lineární, neboť uvedené předpoklady nejsou beze zbytku splněny. Aby se komutace alespoň blížila lineárnímu průběhu, používají se u stejnosměrných strojů kartáče s velkým přechodovým odporem kartáč - lamela. Místo původně používaných měděných kartáčů se používají kartáče uhlografitové či elektrografitové.

V komutující cívce se vlivem vlastních a vzájemných indukčností současně komutujících cívek indukuje **reaktanční napětí**, které působí proti příčině svého vzniku:

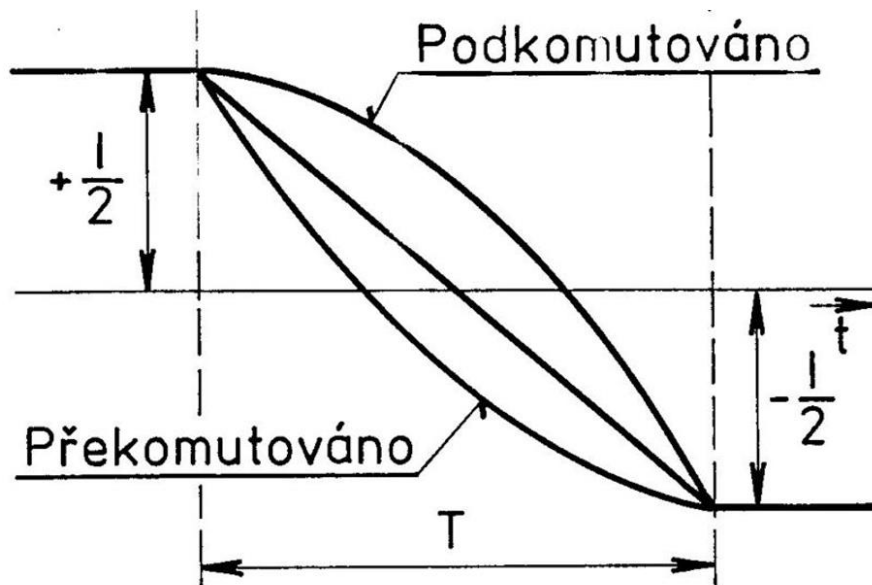
Reaktanční napětí závisí přímo úměrně na obvodové rychlosti komutátoru, proudu kotvy, na druhé mocnině počtu závitů komutující cívky a na magnetickém odporu cest rozptylového toku.

Jestliže **komutační napětí** u_B , tj. indukované napětí od vnějšího pole, které vytvoříme pro zlepšení komutace, vyruší napětí reaktanční, je výsledné napětí indukované v komutující cívce nulové.



Obr. 3: Komutující cívky

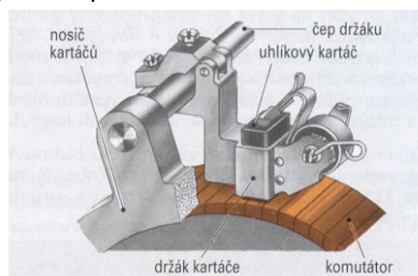
Obr. 4: Průběh komutace



Jiskření pod kartáči, podle jehož intenzity se posuzuje kvalita komutace, závisí především na proudové hustotě pohyblivého styku kartáč - lamela. Proudová hustota v kterékoliv části kartáče je dána poměrem proudu a plochy, jíž prochází. Je úměrná směrnicí tečny časového průběhu proudu v komutující cívce. Proudová hustota závisí na rychlosti změny proudu v dané části kartáče. Při lineární komutaci je proudová hustota na kluzném kontaktu po celou dobu komutace konstantní. Lze ji ovlivnit např. velikostí proudu.

Převažuje-li reaktanční napětí, pak probíhá komutace tzv. zpomalená, viz obr. 4. Na konci komutace nutně narůstá rychlost změny proudu v komutující cívce, tím ale neúměrně roste proudová hustota a k jiskření dochází pod odbíhající hranou kartáče. Stroj je podkomutován.

K odstranění nepříznivého vlivu reaktančního napětí je nutno vytvořit komutační napětí opačného znaménka tím, že se vytvoří opačné pole v místě, v němž se nachází komutující cívka. Je-li komutační napětí příliš velké, dochází ke zrychlené komutaci, stroj je tzv. překomutovaný a k jiskření dochází na nabíhající straně kartáče. Oba stavy jsou nepříznivé.

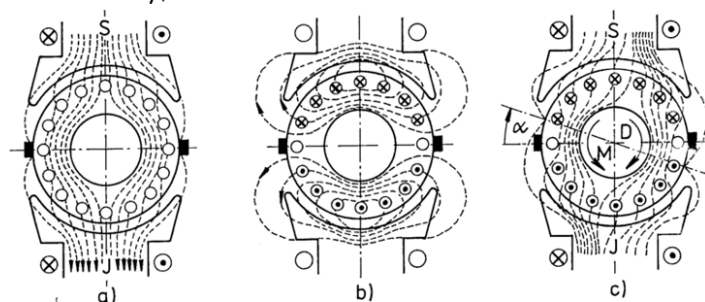


Obr. 5: Provedení komutátoru

Reakce kotvy

Kotva stejnosměrného stroje při zatížení se jeví jako cívka, jež je protékána stejnosměrným proudem a její osa má v prostoru stálý směr daný polohou kartáčů. Jsou-li kartáče v geometrické neutrální ose, má magnetické pole vytvořené proudem kotvy charakter příčný vzhledem k poli hlavních pólů, jehož poloha je definována jako podélná. **Zpětné působení tohoto pole na pole hlavní je reakce kotvy.**

Magnetické pole hlavních pólů (budícího vinutí) a pole samostatného vinutí kotvy jsou naznačeny na obr. 1a a obr. 1b. Na obr. 1c je výsledné pole deformované tak, že v jedné polovině pólů dochází k zesílení magnetického pole, v druhé polovině pólů dochází k jeho zeslabení. Místa nulové magnetické indukce na obvodu kotvy, tj. magnetické neutrály, se natočí o úhel α .



Obr. 1: Magnetické pole hlavních pólů, vinutí kotvy a výsledné pole stejnosměrného stroje

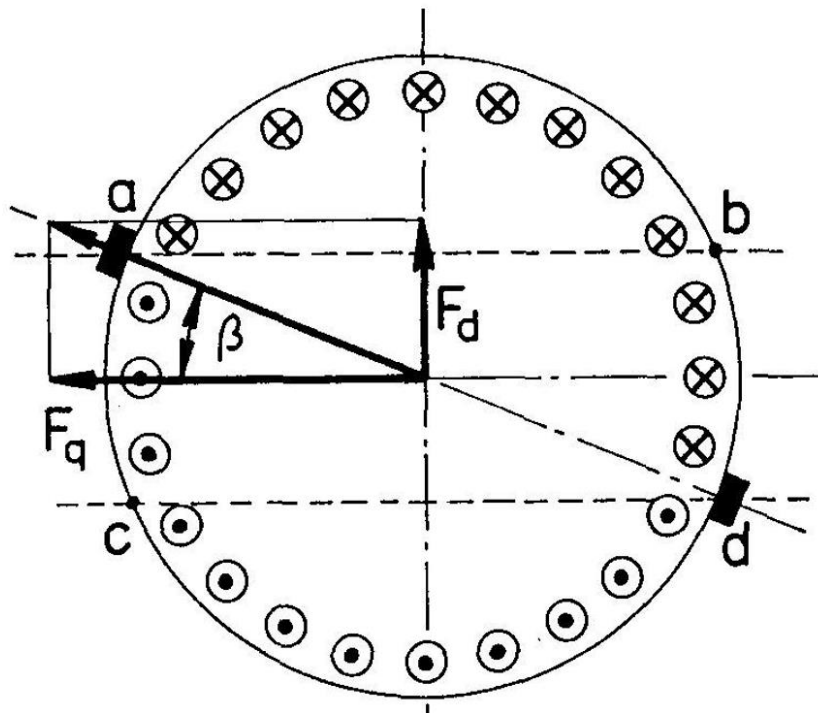
Pro zvolenou polaritu hlavního magnetického pole a proudu kotvy by se rotor motoru otáčel podle pravidla levé ruky doleva, u dynama podle pravidla pravé ruky doprava.

Vliv reakce kotvy na komutaci

Natočení kartáčů je třeba provést ve směru natočení magnetické neutrální osy o úhel větší, než je toto natočení, aby komutující cívky komutovaly v poli opačné polarity než před natočením. Pak se v komutujících cívkách indukuje napětí, kompenzující napětí reaktanční. Natáčení kartáčů se používá pouze u strojů malých výkonů, neboť má tyto nevýhody:

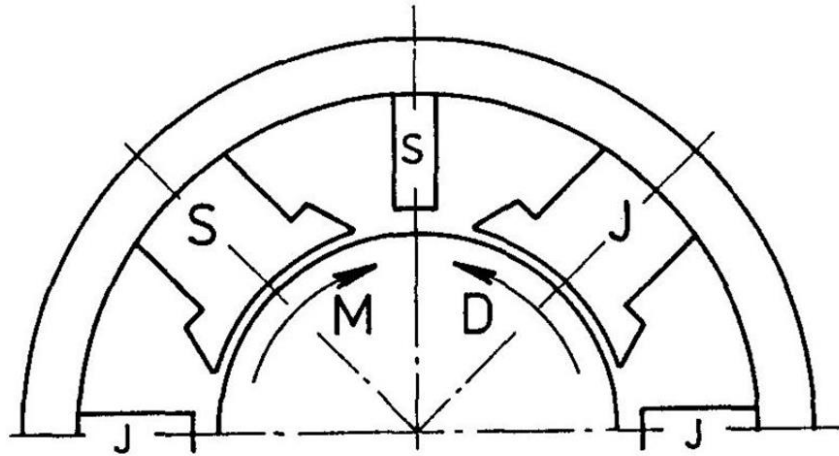
- Natočení kartáčů o určitý úhel odpovídá jen určité reakci kotvy, a tedy jen určitému zatížení. Pro jiné zatížení by k zajištění optimální komutace bylo nutno kartáče natočit do jiné polohy.
- Natočením kartáčů vzniká podélná složka reakce kotvy, jak plyne z obr. 2, v němž indukční čáry pole hlavních pólů směřují shora dolů. Reakci kotvy, jejíž smysl je definován polohou kartáčů, je možno rozložit na složku příčnou, která při zatížení ve stroji vznikne vždy, a na složku podélnou, která při natočení kartáčů správným směrem (tj. ke zlepšení komutace) působí proti poli hlavních pólů a odbuzuje stroj.

Obr. 2: Rozložení reakce kotvy na podélnou a příčnou složku



• Natočení kartáčů je možné pouze u strojů pro jeden smysl točení. Při otáčení stroje v opačném smyslu by stav odpovídal natočení kartáčů na opačnou stranu, kdy by sice podélná složka reakce kotvy přibuzovala stroj, komutace by se však podstatně zhoršila.

Pomocné (komutační) póly jsou nejčastějším prostředkem ke zlepšení komutace. Jsou umístěny mezi hlavními póly v geometrické neutrální ose, viz obr.3.



Obr. 3: Konstruktivní uspořádání pomocných pólů

Komutační póly mají **dvě základní funkce**:

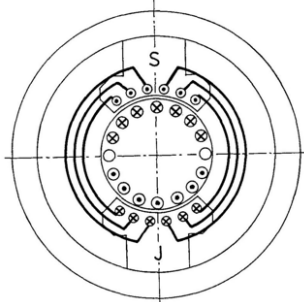
1. Zrušit pole reakce kotvy v geometrické neutrální ose.
2. Vytvořit pole, které indukuje do komutujících cívek **komutační napětí** opačné polarity než má reaktanční napětí.

Má-li být působení pomocných pólů závislé na zatížení, musí být jimi vytvořené pole úměrné proudu kotvy. Jejich vinutí je tedy zapojeno do série s kotvou a je protékáno proudem kotvy. Jsou navrženy tak, aby byly magneticky málo syceny, aby jejich působení bylo přímo úměrné proudu kotvy. Polarita pomocných pólů je u dynama stejná jako polarita následujícího hlavního pólu ve smyslu otáčení rotoru, u motoru je polarita opačná. Při použití pomocných pólů se kartáče z geometrické neutrální osy nenatáčejí.

Vliv reakce kotvy na lamelové napětí

Deformací magnetického pole působením reakce kotvy se lokálně zvyšuje hodnota magnetické indukce ve vzduchové mezeře na obvodu stroje a tím se zvětšuje **lamelové napětí** (napětí mezi sousedními lamelami). Zvýšené lamelové napětí může způsobit vznik oblouku mezi lamelami (zejména za nepříznivých podmínek – prach, vlhkost, znečištění komutátoru apod.), který se může vlivem ionizace prostředí rozšířit na ostatní lamely, a může tak dojít k přejiskření mezi kartáči a tím k havárii stroje.

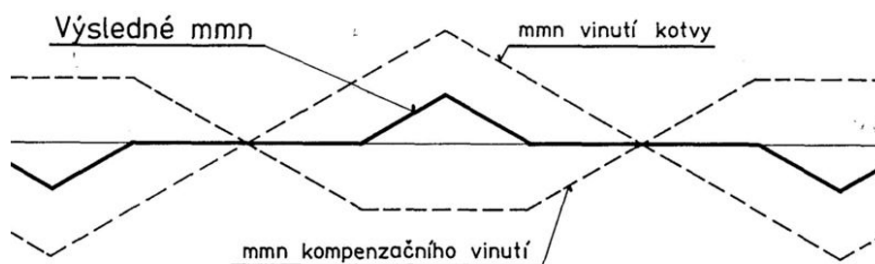
Maximální hodnota lamelového napětí nemá být proto větší než $25 \div 28$ V u strojů velkých výkonů ($30 \div 35$ V u středních a $50 \div 60$ V u malých strojů). Motory s hlubokou regulací otáček budícím proudem mohou pracovat silně odbuzené. Vlivem reakce kotvy může přitom dojít k tzv. “odfouknutí” magnetického pole stroje, což způsobí podstatné zhoršení komutace. Tyto nepříznivé účinky reakce kotvy lze odstranit kompenzačním vinutím uloženým v drážkách pólových nástavců hlavních pólů, viz obr. 4.



Obr. 4: Kompenzační vinutí

Kompenzační vinutí je zapojeno do série s obvodem kotvy ke kompenzaci reakce kotvy při různém zatížení. Jeho osa je kolmá k ose hlavních pólů.

Za předpokladu rovnoměrného rozložení vinutí kotvy a kompenzačního vinutí po obvodu (při zanedbání drážkování) jsou průběhy magnetomotorických napětí lineární s opačnou směrnicí. Výsledné magnetomotorické napětí vzniklé jejich součtem je na obr. 5 vyznačeno silnější čarou. Podle uložení vodičů kompenzačního vinutí je zřejmé, že působí pouze pod hlavními póly. Výsledné magnetomotorické napětí v geometrické neutrální ose je menší než magnetomotorické napětí vinutí kotvy, a proto může být vinutí pomocných pólů stroje s kompenzačním vinutím dimenzováno slaběji.



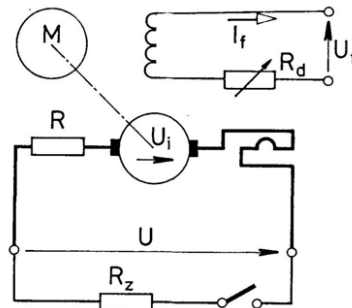
Obr. 5: Působení kompenzačního vinutí

Kompenzační vinutí je technologicky náročné, a zvyšuje tak výrobní náklady stroje, má však významné výhody. Snižuje možnost přejiskření na komutátoru, snižuje nerovnoměrné magnetické namáhání železa a příznivě ovlivňuje komutaci. Stroje opatřené kompenzačním vinutím jsou vždy navrhovány s pomocnými póly. Kompenzační vinutí se používá převážně jen u velkých strojů s vysokými nároky na komutaci, u strojů s velkými proudovými nárazy (např. válcovací stolice) a u regulačních motorů, které mohou při hluboké regulaci otáček pracovat silně podbuzeny.

Dynama - stejnosměrné generátory

Generátor s cizím buzením

Generátor s cizím buzením (schéma viz obr. 1) má budicí vinutí napájené z nezávislého zdroje stejnosměrného proudu I_f . Velikost budicího napětí bývá často stejná jako jmenovité napětí kotvy pro případ eventuálního paralelního připojení budicího vinutí ke kotvě.

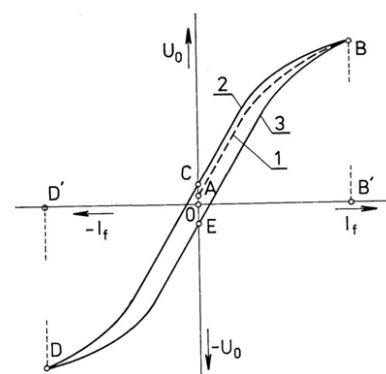


Obr. 1: Schéma generátoru s cizím buzením

Budicí vinutí má velký počet závitů o malém průřezu, a má tudíž velkou vlastní indukčnost a činný odpor. Budicí proud I_f je pouze zlomkem jmenovitého proudu I_N . Odpor R zahrnuje všechny činné odpory v obvodu kotvy (odpor kotvy, vinutí pomocných pólů, případně kompenzačního vinutí a též odpor kartáčů). Odpor obvodu kotvy R bývá malý, u malých strojů řádu 1Ω , u velkých strojů řádu až $10^{-3} \Omega$, aby úbytek napětí $R \cdot I$ a Jouleovy ztráty ve vinutí $R \cdot I^2$ nebyly příliš velké.

Chod naprázdno

Při chodu naprázdno je obvod kotvy rozpojen, výkon generátoru je roven nule ($P = 0$). Charakteristika naprázdno $U_0(I_f)$ při $I = 0$ a $n = \text{konst.}$ v obr. 2 podává obraz o vlastnostech magnetického obvodu stroje.



Obr. 2: Charakteristika naprázdno $U_n(I_f)$ při $n = \text{konst.}$ a $I = 0$

Pro nenabuzený stroj, je-li $I_f = 0$, je při dané rychlosti otáčení n na kotvě generátoru remanentní napětí U_0 (byl-li generátor někdy předtím nabuzen). Zvětšujeme-li budicí proud ve smyslu kladném, roste napětí naprázdno $U_0 = U_i$ podle křivky 1. Při zmenšování buzení z bodu B klesá napětí podle křivky 2 do bodu D pro záporné buzení. Křivka 2 a křivka 3 představují hysterezní smyčku pro použité magnetické materiály. Mechanický příkon, který generátoru naprázdno dodává pohonný motor, je roven ztrátám naprázdno

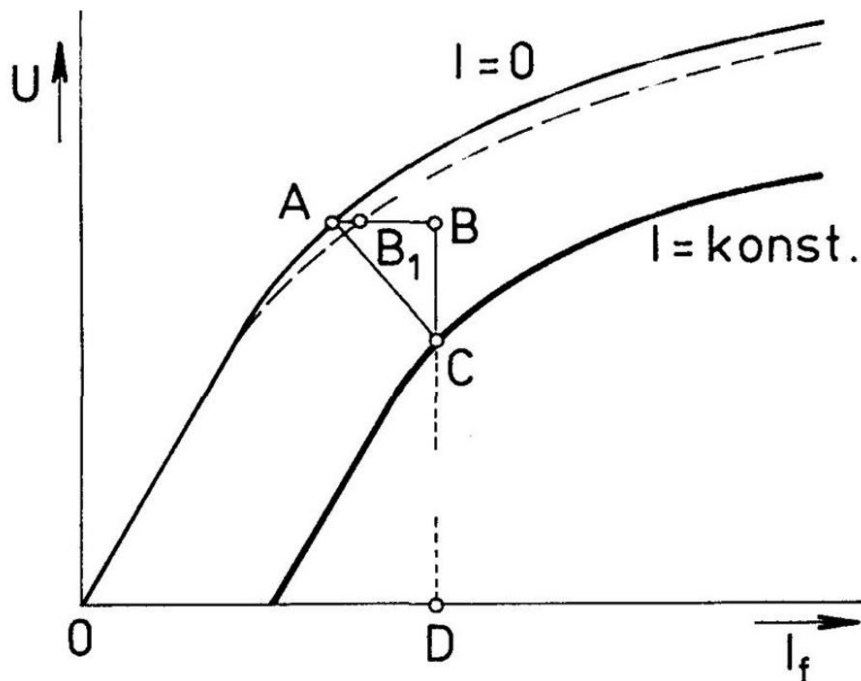
$$(\Delta P_0 = \Delta P_m + \Delta P_{Fe}),$$

kde ΔP_m jsou ztráty mechanické a ΔP_{Fe} jsou ztráty v železe.

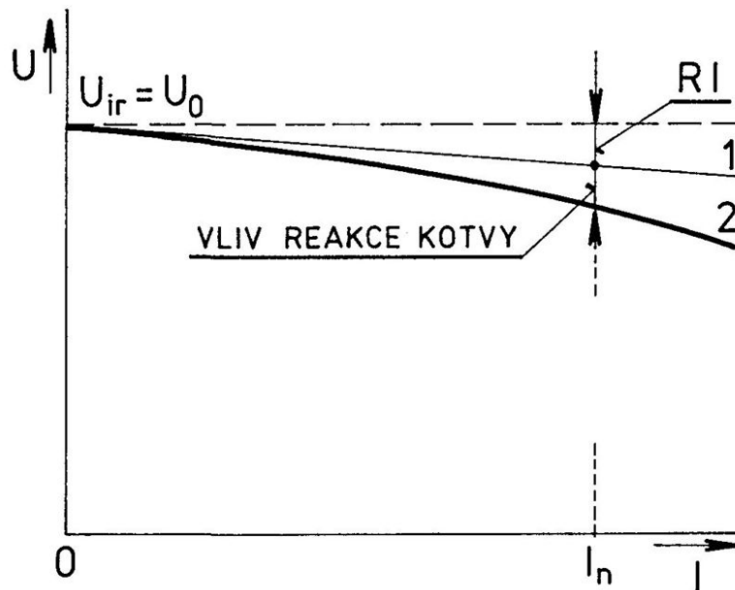
Chod při zatížení

Při připojení spotřebiče na svorky kotvy nabuzeného generátoru dodává generátor elektrický výkon $P_e = U \cdot I$. Zatěžovat lze např. připojením zatěžovacího odporu na svorky stroje nebo zvětšením indukovaného napětí budícím proudem či rychlostí otáčení. Zároveň se tím mění i svorkové napětí. Vlastnosti zatíženého generátoru s cizím buzením je možno sledovat v zatěžovacích charakteristikách, kdy $I \neq 0$.

Obr. 3: Pracovní charakteristika generátoru s cizím buzením



Pracovní charakteristika $U(I_f)$ při $I = \text{konst.}$, $n = \text{konst.}$ se odvodí z charakteristiky naprázdno (viz obr.3). Při zatížení se uplatňuje úbytek na odporech obvodu kotvy (BC) a účinky reakce kotvy (AB_1). Úsečka (B_1B) odpovídá přibuzení odstraňující účinek podélné složky reakce kotvy při natočení kartáčů

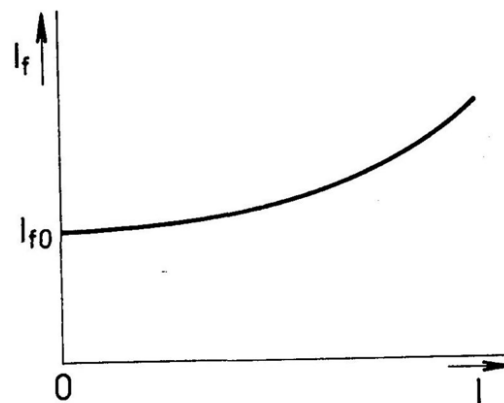


Obr. 4: Vnější charakteristika generátoru s cizím buzením

Vnější charakteristika $U(I)$ (zatěžovací) při $I_f = \text{konst.}$, $n = \text{konst.}$ plyne z napěťové rovnice:

$$U = k \cdot \Phi \cdot \omega_m - R \cdot I = U_i - R \cdot I.$$

Rovnice je rovnicí přímky se zápornou směrnici ($-R \cdot I$) (přímka 1 v obr. 4). Vlivem demagnetizačního účinku reakce kotvy klesá svorkové napětí více (křivka 2), než by odpovídalo průběhu 1. I tak lze konstatovat, že v pracovní oblasti napětí se zatížením klesá málo, generátor je poměrně "tvrdý" zdroj napětí. Napětí $U = 0$ odpovídá proud nakrátko, je mnohem větší než jmenovitý proud I_N .



Obr. 5: Regulační charakteristika generátoru s cizím buzením

Regulační charakteristika $I_f(I)$ při $U = \text{konst.}$ a $n = \text{konst.}$ (obr. 5) plyne z tvaru vnější charakteristiky. Udává, jak je třeba budit zatížený generátor, aby napětí i při zatížení zůstalo konstantní.

Chod nakrátko

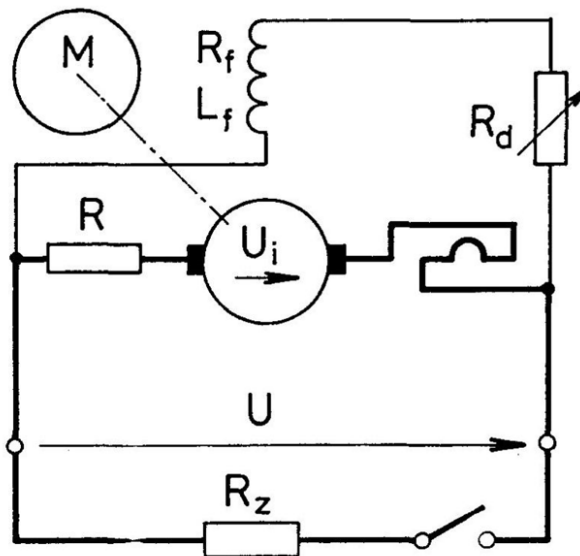
Charakteristika nakrátko $I_k(I_f)$ při $U = 0$ a $n = \text{konst.}$ Při zvyšování budicího proudu I_f rychle roste proud kotvy od hodnoty I_{k0} , dané remanentním napětím generátoru. Charakteristika nakrátko nemá praktický význam a obvykle se neměří.

Zhodnocení a užití generátoru s cizím buzením

Generátoru s cizím buzením se používalo jako zdroje stejnosměrného napětí říditelného plynule v širokém rozsahu od $-U_{\max}$ do $+U_{\max}$, například pro napájení stejnosměrných motorů s reverzací a s hlubokým řízením otáček. Výhodou generátoru s cizím buzením je malý pokles svorkového napětí se zatížením. Nevýhodou je potřeba zvláštního zdroje pro buzení.

Generátor s paralelním buzením (derivační)

Generátor s paralelním buzením má budicí vinutí připojeno paralelně k vinutí kotvy a patří do skupiny generátorů s vlastním buzením. Schéma je na obr. 6:



Obr. 6: Generátor s paralelním buzením

Základním předpokladem vlastního nabuzení je remanentní magnetický tok, který při otáčení rotoru vytvoří remanentní napětí, které při správném zapojení budicího vinutí zvýší budicí proud, zvětší se magnetický tok, tím indukované napětí, tím budicí proud ... atd. Při nesprávném zapojení budicího vinutí budicí proud zmenšuje remanentní tok a generátor se odbudí. Nabuzování je přechodný děj popsáný diferenciální rovnicí

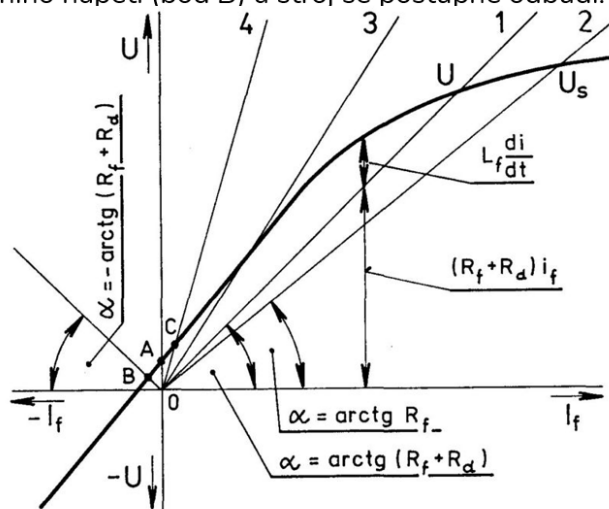
$$(R_f + R_d) \cdot i_f + L_f \cdot \frac{di_f}{dt} = u(i_f).$$

Tato diferenciální rovnice je vzhledem k pravé straně nelineární. Přechodný děj přejde v ustálený stav při vymizení druhého členu levé strany rovnice, která přejde ve tvar

$$(R_f + R_d) \cdot i_f = u_f.$$

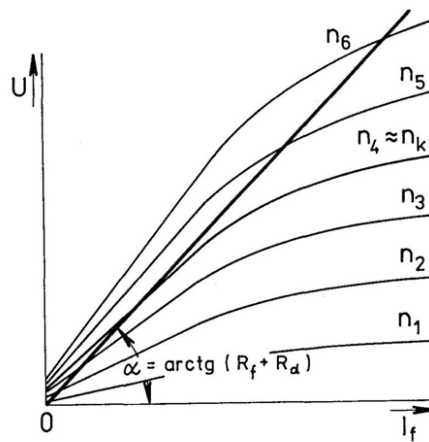
Odtud plyne, že generátor s paralelním buzením se nabudí na napětí U , dané průsečíkem charakteristiky $U(i_f)$ a tzv. odporové přímky $U = (R_f + R_d) \cdot i_f$, která je vyjádřením Ohmova zákona pro budicí obvod. Aby se stroj nabudil, musí být pravá strana rovnice nenulová pro $i_f = 0$. Tuto podmínku splňuje remanentní napětí $U \sim OA \neq 0$ v obr. 7. U zcela nového stroje se musí remanentní tok vytvořit pomocí nízkého napětí, např. z baterie nebo provozem stroje v režimu motoru, byť krátkodobém.

Nabuzování závisí na tom, je-li směrnice odporové přímky kladná, nebo záporná. Označíme-li při dané rychlosti polaritu remanentního napětí za kladnou OA v obr. 7, je směrnice odporové přímky kladná tehdy, má-li za následek zvýšení indukovaného napětí, viz přímky 1 až 4 v obr. 7. Při záporné směrnici napětí klesá pod hodnotu remanentního napětí (bod B) a stroj se postupně odbudí.



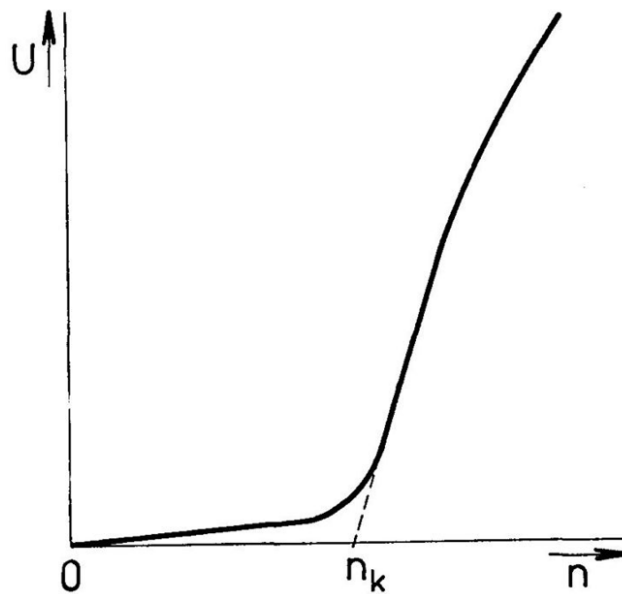
Obr. 7: Charakteristika naprázdno $U(i_f)$ při $n = \text{konst.}$ při různém R_d a nabuzování generátoru s paralelním buzením

Velikost napětí, na které se generátor s paralelním buzením při dané rychlosti nabudí, závisí na směrnici odporové přímky $\tan \alpha$, tj. na velikosti odporu R_d vřazeného do budicího obvodu. Největší napětí, nazývané **stropní napětí**, je při $R_d = 0$, viz přímka 2 v obr. 7. Je-li činný odpor v obvodu buzení ($R_f + R_d$) příliš velký při dané rychlosti otáčení (přímka 4), generátor se nabudí pouze na malé napětí (bod C). Odpor v obvodu buzení (nebo regulační odpor), při jehož překročení se generátor s paralelním buzením při daných otáčkách nenabudí, se nazývá **kritický odpor**.



Obr. 8: Souvislost charakteristik naprázdno generátoru s paralelním buzením při různých otáčkách a odporové přímky s nabuzováním

Obr. 9: Závislost napětí na otáčkách a kritické otáčky

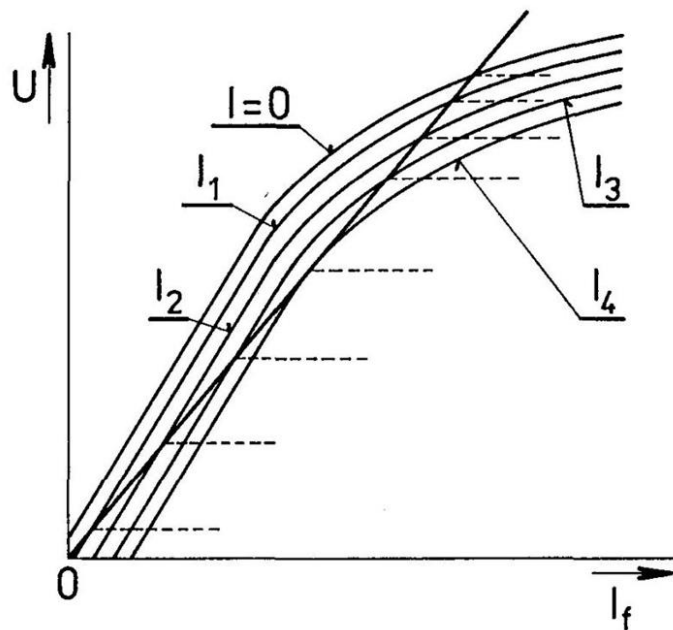


Při nastavení konstantní velikosti derivačního odporu zvyšujeme rychlost generátoru ve správném smyslu. Generátor se začne nabuzovat při určitých, tzv. **kritických otáčkách** n_k . Zdůvodnění plyne z obr. 8, kde jsou zakresleny charakteristiky $U(I_f)$ pro různé otáčky. Průsečíky zvolené odporové přímky s těmito charakteristikami určují charakteristiku $U(n)$ a kritické otáčky n_k v obr. 9. Z obr. 8 plyne možnost řídit napětí generátoru. To je možné pouze v oblasti za kolenem charakteristiky $U(I_f)$, kde průsečíky charakteristik s odporovou přímkou jsou výrazné. Řízení v oblasti nenasycené části charakteristiky je nestabilní.

Chod naprázdno

Chod naprázdno je definován jako chod při odpojené zátěži, tj. při proudu kotvy $I = 0$. Ten je však nenulový a je roven budicímu proudu, viz obr. 6. Změřená charakteristika naprázdno se příliš neliší od charakteristiky naprázdno stroje s cizím buzením (pokud se jí podaří naměřit v lineární části).

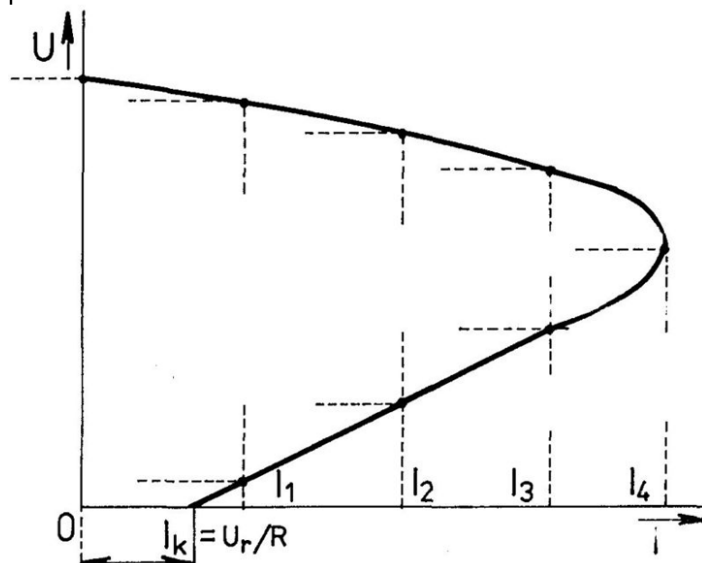
Chod při zatížení



Obr. 10: Pracovní charakteristiky $U(I_f)$ pro různé proudy kotvy a $n = \text{konst.}$

(4) (5) (6) (7) (8) (9) (10) (11) (12)

Pracovní charakteristika $U(I_f)$ při $I = konst.$, $n = konst.$ má obdobný průběh jako u generátoru s cizím buzením (obr. 10). Ustálená hodnota svorkového napětí U pro daný zatěžovací proud I a rychlost odpovídá průsečíku dané charakteristiky s odporovou přímkou. Pro derivační odpor $R_d = 0$ lze graficky odvodit maximální napětí pro dané zatížení.



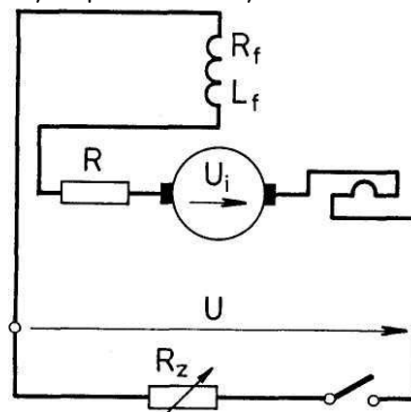
Obr. 11: Pracovní charakteristiky $U(I_f)$

Vnější charakteristika $U(I)$ při $R_d = konst.$, $n = konst.$ s rostoucím zatěžovacím proudem klesá více než u generátoru s cizím buzením, neboť napětí klesá nejen vlivem úbytku napětí na odporu v obvodu kotvy a demagnetizačního účinku reakce kotvy, ale navíc i vlivem zmenšování budicího proudu (budicí obvod je připojen na klesající napětí kotvy). Je-li stroj správně navržen, není rozdíl v průběhu vnějších charakteristik v pracovní oblasti podstatný. Při dále stoupajícím zatěžovacím proudu může poklesnout svorkové napětí natolik, že už není schopno dodat potřebný budicí proud k vytvoření indukovaného napětí. Toto napětí tak poklesne a není schopno dodat odpovídající zatěžovací proud. Proud poklesne pod maximální hodnotu, která může dosáhnout hodnoty (2 až 2,5) I_N . Při dalším zatěžování, při $U = 0$ dosáhne proud zátěže **ustálené hodnoty proudu nakrátko I_k** , jehož velikost je dána remanentním napětím a odporem v obvodu kotvy, viz obr. 11. Ze srovnání ustálených proudů vyplývá, že zatímco u generátoru s cizím buzením dosahuje proud nakrátko nepřijatelných hodnot, podstatně větších než proud jmenovitý, u generátoru s paralelním buzením je proud nakrátko mnohem menší a je srovnatelný s jmenovitým proudem. U generátoru s paralelním vinutím lze tedy připustit trvalý chod nakrátko, nikoli však zkrat. Při zkratu neklesne magnetický tok okamžitě na minimální hodnotu, nýbrž zaniká pomaleji s časovou konstantou, jež závisí na parametrech elektrických i magnetických tlumících obvodů. Proud při zkratu tak může dosáhnout stejně nebezpečných hodnot jako u generátoru s cizím buzením a způsobit přejiskření na komutátoru.

Zhodnocení a užití generátoru s paralelním buzením

Největší výhodou generátoru s paralelním buzením je skutečnost, že nevyžaduje zvláštní zdroj budicího stejnosměrného proudu. Svorkové napětí závisí na zatěžovacím proudu kotvy v rozsahu do jmenovitých zatížení téměř tak málo jako u generátoru s cizím buzením. Jeho hlavní nevýhodou je omezená možnost řízení napětí, neboť bez zvláštní úpravy magnetického obvodu, např. pólů (**isthmus**), je řízení napětí zpravidla nestabilní. Výhody generátoru s cizím a paralelním buzením lze využít například tak, že generátor s paralelním buzením napájí budicí vinutí pólů cizího buzeného generátoru. Tento způsob lze použít například u tzv. *Leonardova soustrojí*, při buzení alternátorů apod. U nově vyráběných zařízení jsou všechny druhy generátorů postupně vytlačovány řízenými i neřízenými polovodičovými usměrňovači.

Generátor se sériovým buzením



Obr. 12: Schéma zapojení generátoru se sériovým buzením [4]

Generátor se sériovým buzením (séριοvé dynamo) má vlastní buzení, budicí vinutí je zapojeno do série s vinutím kotvy, viz obr. 12. Je protékáno proudem kotvy a má malý počet závitů velkého průřezu. Pro jeho nabuzení platí podobné podmínky jako u derivačního generátoru.

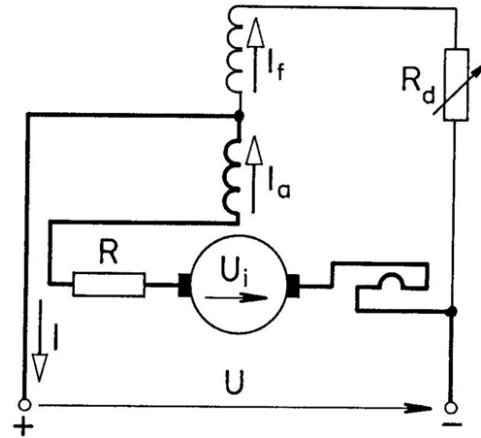
Aby se sériový generátor nabudil

- Musí být zatížen (např. odporem R_z), viz obr. 12
- Musí mít remanentní magnetický tok
- Zatěžovací proud musí zesilovat remanentní tok.

Protože svorkové napětí silně závisí na zatížení, navíc se zatížením roste, sériového generátoru se jako zdroje stejnosměrného napětí nepoužívá. Jejich vlastnosti se však využívají, neboť dosud používané stejnosměrné motory se sériovým buzením v závislé trakci při brzdění pracují jako generátory.

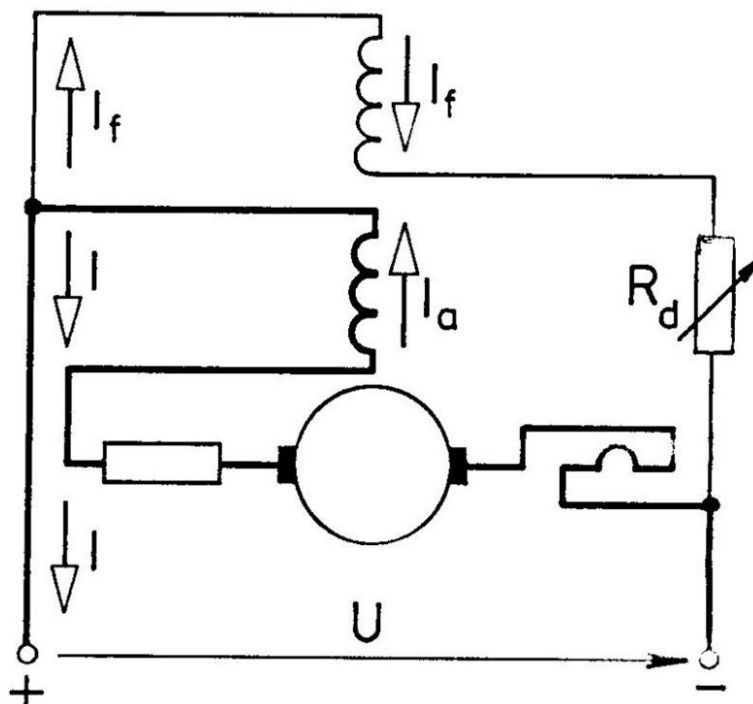
Generátor se smíšeným buzením (kompaundní)

Kompaundní generátor má na hlavních pólech budící vinutí paralelní i sériové. Jeho charakteristické vlastnosti závisí na vzájemném poměru magnetomotorických napětí budících vinutí a na tom, zda budící vinutí působí ve stejném, nebo opačném smyslu (kompaundní nebo protikompaundní dynamo), viz obr. 13 a obr. 14. Základní bývá budící vinutí paralelní. Poměr magnetomotorických napětí obou vinutí se volí tak, aby sériové vinutí kompenzovalo úbytek napětí na kotvě a účinek reakce kotvy při zatížení. Svorkové napětí pak klesá velmi málo, při předimenzování sériového vinutí může se zatížením i stoupat. Protikompaundní generátor se používá jen ve zvláštních případech, neboť jeho napětí se zatížením velmi klesá, má tzv. „měkkou“ vnější charakteristiku.



Obr. 13: Schéma zapojení kompaundního generátoru

Obr. 14: Schéma zapojení protikompaundního generátoru



Motor s cizím buzením

Motor s cizím buzením se konstrukčně ani principiálním zapojením neliší od dynama s cizím buzením. Rozdíl je ve formě vstupní a výstupní energie. Napěťová rovnice motoru má tvar

$$U = k \cdot \Phi \cdot \omega_m + R \cdot I = U_i + R \cdot I,$$

kde k je konstanta, Φ je hodnota magnetického toku a ω_m je úhlová rychlost otáčení motoru.

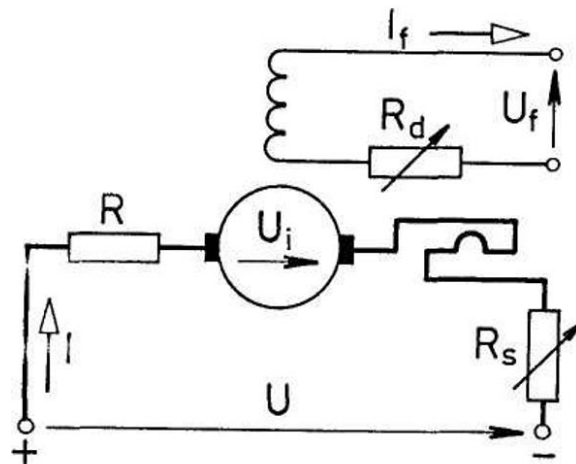
Spouštění

Schéma spouštění motoru s cizím buzením je na obr. 1. Aby měl stejnosměrný motor velký záběrný moment

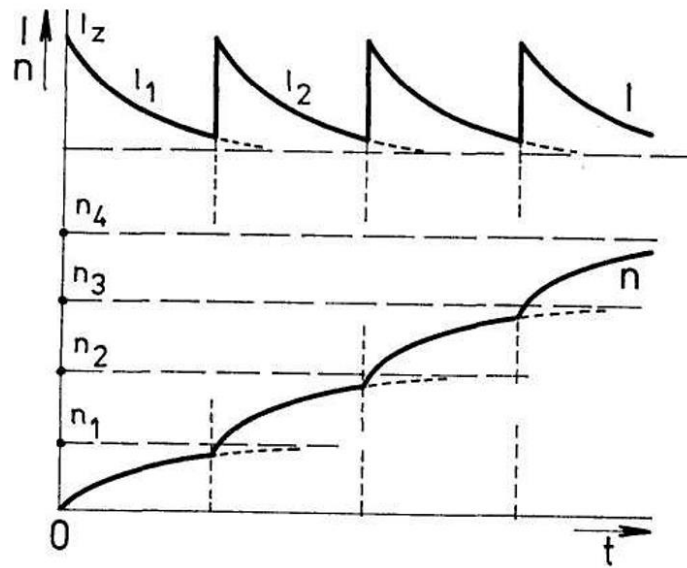
$$M_z = k \cdot \Phi \cdot I_z,$$

kde I_z je záběrný proud, i při přípustném menším záběrném proudu kotvy (z důvodu malého jiskření při komutaci), musí být při spouštění **plně nabuzen**. Poté připojíme kotvu na zdroj, zpravidla přes stupňovitý spouštěcí odpor R_s , protože při stojícím motoru je $U_i = 0$ a záběrný proud je omezen pouze malým odporem kotvy.

Obr. 1: Schéma spouštění motoru s cizím buzením



Obr. 2: Průběh proudu a otáček při spouštění motoru s cizím buzením



Záběrný proud při popsaném spouštění je

$$I_k = \frac{U}{R + R_s},$$

kde R a R_s odpovídají obr. 1.

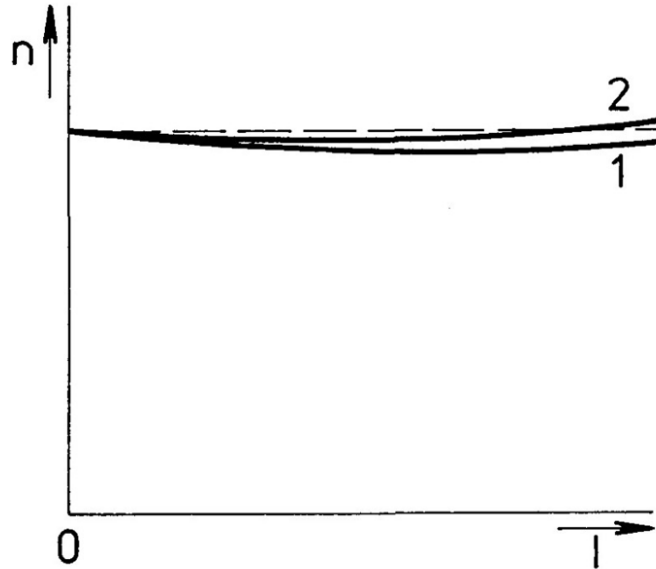
Jakmile se motor začne otáčet, indukované napětí nabude nenulové hodnoty a proud kotvy je roven

$$I = \frac{U - U_i}{R + R_s}.$$

Se stoupající rychlostí n roste indukované napětí U_i , klesá proud I a moment M . Rychlost a proud se ustálí na hodnotách n_1 a I_1 , viz obr. 2. Vyřadíme-li jeden stupeň spouštěcího odporu při zanedbání indukčnosti vinutí, skokem stoupne napětí na kotvě U a tím i proud I_2 . Tím vzroste moment urychlující setrvačné hmoty až na rychlost n_2 . Proces se opakuje až do vyřazení spouštěcího odporu, kdy je spouštění skončeno. Motor s cizím buzením je možno spouštět bez spouštěcího odporu řízením napětí zdroje U , od nulové hodnoty, například z Leonardova soustrojí nebo z řízeného usměrňovače.

Chod při zatížení

Vlastnosti motoru při zatížení vyjadřují jeho zatěžovací charakteristiky:



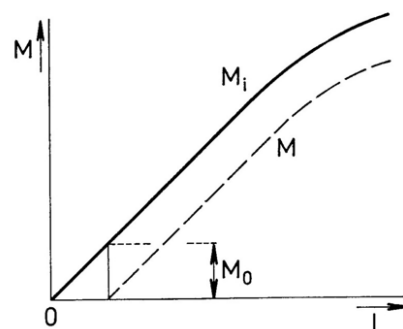
Obr. 3: Rychlostní charakteristika

Rychlostní charakteristika $n(I)$ při $U = \text{konst.}$, $I_f = \text{konst.}$

$$n = \frac{U - R \cdot I}{k_E \cdot \Phi} = \frac{U}{k_E \cdot \Phi} - \frac{R \cdot I}{k_E \cdot \Phi}$$

kde n je počet otáček, k_E je konstanta stroje a Φ je magnetický tok buzení.

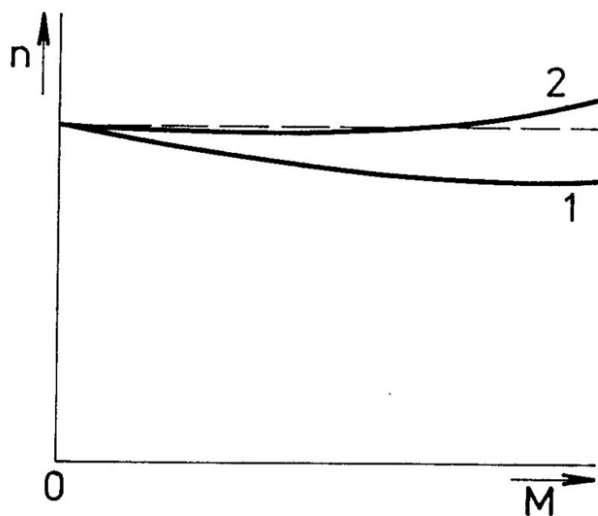
Podle této rovnice rychlost n při rostoucím proudu I nepatrně klesá vlivem úbytků napětí $R \cdot I$ na kotvě. Demagnetizační účinek reakce kotvy při kartáčích v neutrální ose způsobí, že pokles otáček je menší, než by odpovídalo přímce, viz obr. 3, křivka 1. Při vyšších proudech může vliv zeslabení pole převažovat nad vlivem úbytků napětí na kotvě, a charakteristika $n(I)$ může dokonce stoupat podle křivky 2 a v některých případech může nepříznivě ovlivnit stabilitu chodu motoru.



Obr. 4: Momentová charakteristika [4]

Momentová charakteristika $M(I)$ při $U = \text{konst.}$, $I_f = \text{konst.}$ je na obr. 4.

Z rovnice plyne, že charakteristika je přímková, pokud se při vyšších hodnotách proudu neprojeví demagnetizující účinek reakce kotvy. K zakřivení dochází zpravidla při proudech větších než proud jmenovitý. Mechanický moment na hřídeli M v témže obrázku je menší o moment ztrát naprázdno M_0 než vnitřní elektromagnetický moment M_i .



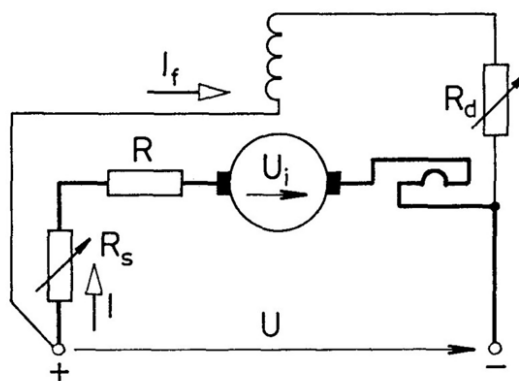
Obr. 5: Mechanická charakteristika

Mechanická charakteristika $n(M)$ při $U = \text{konst.}$, $I_f = \text{konst.}$ v obr. 5 je tvarem podobná charakteristice rychlostní $n(I)$, neboť závislost momentu M na proudu I je téměř lineární.

Zhodnocení a užití motorů s cizím buzením

Hlavní výhodou motoru s cizím buzením je snadné, široké a plynulé řízení rychlosti. Z toho vyplývá použití cizí buzených stejnosměrných motorů převážně u regulačních pohonů, zejména ve spolupráci v Leonardově skupině nebo s řízeným usměrňovačem. [2]

Motor s paralelním buzením



Obr. 6: Spouštění derivačního motoru

Motor s paralelním buzením (derivační) musí mít při rozběhu budicí obvod připojen přímo na plné napájecí svorkové napětí před spouštěcí odpor a nikoliv na svorky kotvy, jak je naznačeno na obr. 6, aby byla splněna podmínka plného nabuzení při spouštění. Z téhož důvodu není možno derivační motor spouštět změnou napájecího napětí na kotvě. Při sníženém napětí na kotvě by bylo snížené napětí i na svorkách budicího obvodu, a tudíž by nemohla být splněna základní podmínka pro spouštění a stroj by nemohl být při spouštění plně nabuzen.,

Rovněž nelze řídit rychlost změnou napětí na svorkách, a tedy není možno jej řídit v Leonardově zapojení. Rychlost lze snadno a plynule řídit změnou budicího proudu nebo odporem v obvodu kotvy. Z toho však vyplývá menší rozsah řízení rychlosti a řízení je navíc ztrátové.

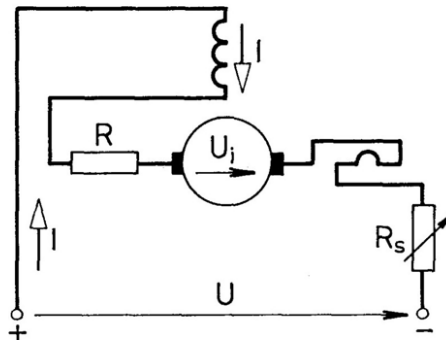
Derivační motor má pro konstantní napájecí napětí stejné charakteristiky jako motor s cizím buzením. Jeho rychlost je velmi málo závislá na zatížení. Je možno jej použít např. u textilních a obráběcích strojů.

Motor se sériovým buzením

Motor se sériovým buzením (sériový) má budicí vinutí zapojeno v sérii s kotvou, a proud kotvy je tedy současně proudem budicím (obr. 7).

Spouštění

Při spouštění motoru se po připojení na svorkové napětí postupně vyřazuje spouštěcí odpor R_s . Tím vzroste proud, spolu s ním magnetický tok, a tedy i moment a motor se urychluje. Indukované napětí U_i se zvětší, proud klesá a moment a rychlost se ustálí na nových hodnotách.

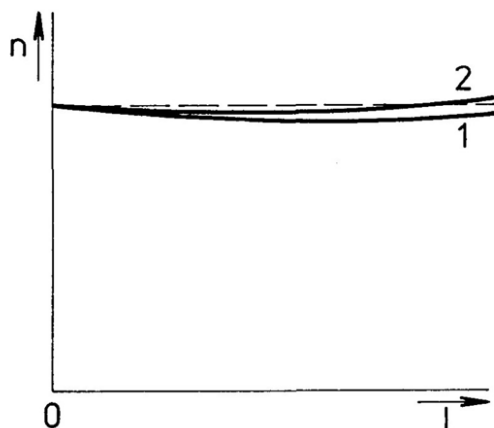


Obr. 7: Spouštění derivačního motoru

Sériový motor nesmí být spouštěn bez zatížení a při provozu se nesmí mechanicky odlehčit, protože při malém mechanickém zatížení odebírá malý proud, tím se odbuzuje a jeho rychlost by mohla nabýt nebezpečných hodnot. Vlastnosti sériového motoru vyjadřují jeho zatěžovací charakteristiky.

Chod při zatížení

Vlastnosti motoru při zatížení vyjadřují jeho zatěžovací charakteristiky:



Obr. 3: Rychlostní charakteristika

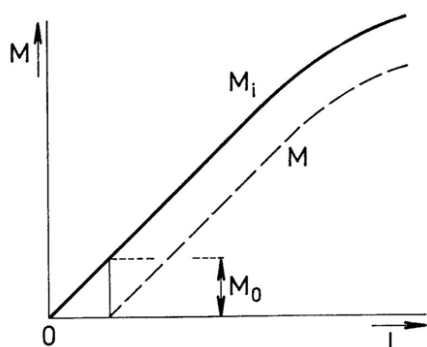
Rychlostní charakteristika $n(I)$ při $U = konst.$, $I_f = konst.$

$$n = \frac{U - R \cdot I}{k_E \cdot \Phi} = \frac{U}{k_E \cdot \Phi} - \frac{R \cdot I}{k_E \cdot \Phi},$$

kde n je počet otáček, k_E je konstanta stroje a Φ je magnetický tok buzení.

Podle této rovnice rychlost n při rostoucím proudem I nepatrně klesá vlivem úbytků napětí $R \cdot I$ na kotvě.

Demagnetizační účinek reakce kotvy při kartáčích v neutrální ose způsobí, že pokles otáček je menší, než by odpovídalo přímce, viz obr. 3, křivka 1. Při vyšších proudech může vliv zeslabení pole převažovat nad vlivem úbytků napětí na kotvě, a charakteristika $n(I)$ může dokonce stoupat podle křivky 2 a v některých případech může nepříznivě ovlivnit stabilitu chodu motoru.



Obr. 4: Momentová charakteristika

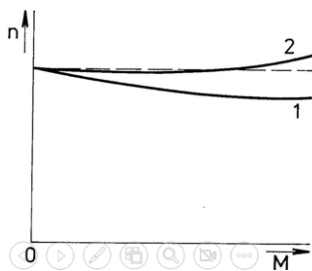
Momentová charakteristika $M(I)$ při $U = konst.$, $I_f = konst.$ je na obr. 4.

Z rovnice plyne, že charakteristika je přímková, pokud se při vyšších hodnotách proudu neprojeví demagnetizující účinek reakce kotvy. K zakřivení dochází zpravidla při proudech větších než proud jmenovitý. Mechanický moment na hřídeli M v témže obrázku je menší o moment ztrát naprázdno M_0 než vnitřní elektromagnetický moment M_f .

Mechanická charakteristika $n(M)$ při $U = konst.$, $I_f = konst.$ v obr. 5 je tvarem podobná charakteristice rychlostní $n(I)$, neboť závislost momentu M na proudu I je téměř lineární.

Zhodnocení a užití motorů s cizím buzením

Hlavní výhodou motoru s cizím buzením je snadné, široké a plynulé řízení rychlosti. Z toho vyplývá použití cize buzených stejnosměrných motorů převážně u regulačních pohonů, zejména ve spolupráci v Leonardově skupině nebo s řízeným usměrňovačem.



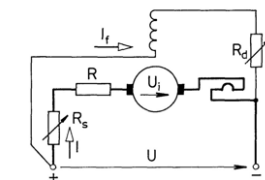
Obr. 5: Mechanická charakteristika

Motor s paralelním buzením

Motor s paralelním buzením (derivační) musí mít při rozběhu budicí obvod připojen přímo na plné napájecí svorkové napětí před spouštěcí odpor a nikoliv na svorky kotvy, jak je naznačeno na obr. 6, aby byla splněna podmínka plného nabuzení při spouštění. Z téhož důvodu není možno derivační motor spouštět změnou napájecího napětí na kotvě. Při sníženém napětí na kotvě by bylo snížené napětí i na svorkách budicího obvodu, a tudíž by nemohla být splněna základní podmínka pro spouštění a stroj by nemohl být při spouštění plně nabuzen.

Rovněž nelze řídit rychlost změnou napětí na svorkách, a tedy není možno jej řídit v Leonardově zapojení. Rychlost lze snadno a plynule řídit změnou budicího proudu nebo odporem v obvodu kotvy. Z toho však vyplývá menší rozsah řízení rychlosti a řízení je navíc ztrátové.

Derivační motor má pro konstantní napájecí napětí stejné charakteristiky jako motor s cizím buzením. Jeho rychlost je velmi málo závislá na zatížení. Je možno jej použít např. u textilních a obráběcích strojů.



Obr. 6: Spouštění derivačního motoru

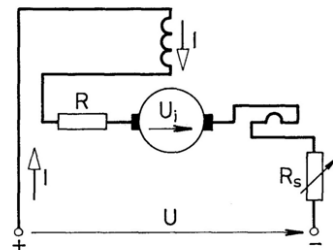
Motor se sériovým buzením

Motor se sériovým buzením (sériový) má budící vinutí zapojeno v sérii s kotvou, a proud kotvy je tedy současně proudem budicím (obr. 7).

Spouštění

Při spouštění motoru se po připojení na svorkové napětí postupně vyřazuje spouštěcí odpor R_s . Tím vzroste proud, spolu s ním magnetický tok, a tedy i moment a motor se urychluje. Indukované napětí U_i se zvětší, proud klesá a moment a rychlost se ustálí na nových hodnotách.

Obr. 7: Spouštění derivačního motoru



Sériový motor nesmí být spouštěn bez zatížení a při provozu se nesmí mechanicky odlehčit, protože při malém mechanickém zatížení odebírá malý proud, tím se odbuzuje a jeho rychlost by mohla nabýt nebezpečných hodnot. Vlastnosti sériového motoru vyjadřují jeho zatěžovací charakteristiky.

Chod při zatížení

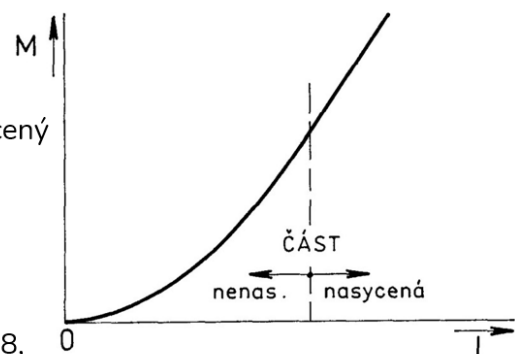
Momentová charakteristika $M_i(I)$ při $U = \text{konst.}$ plyne pro nenasycený stav magnetického obvodu motoru z rovnice

$$M_i = k \cdot \Phi \cdot I \sim c \cdot I^2,$$

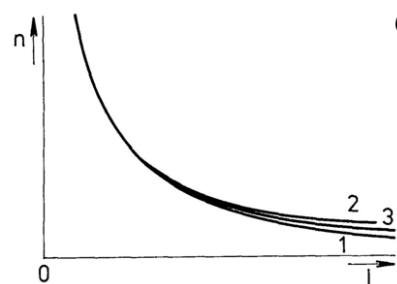
kde c je konstrukční konstanta stroje.

Grafem této funkce je **parabola**, která při vyšších proudech, při nasycení magnetického obvodu motoru, přechází v přímku, viz obr. 8, eventuálně se od této přímky může odklánět k menším momentům.

Rychlostní charakteristika $n(I)$



Obr. 8: Momentová charakteristika



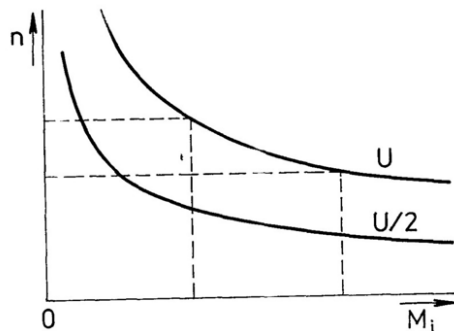
Obr. 9: Rychlostní charakteristika

při $U = \text{konst.}$, vyplývá za předpokladu, že magnetický obvod není nasycen, tvar rovnice

$$n \sim \omega = \frac{U - R \cdot I}{k_m \cdot \Phi} = \frac{U}{c \cdot I} - \frac{R}{c},$$

kde c je konstrukční konstanta stroje, který definuje rychlostní charakteristiku motoru se sériovým buzením jako **rovnoosou hyperbolu, posunutou směrem dolů** k nižším rychlostem (obr. 9). Vlivem nasycení magnetického obvodu při velkých proudech magnetický tok neroste úměrně s proudem a pro větší proudy je rychlost motoru poněkud vyšší, než by odpovídalo průběhu podle hyperboly. Naopak vlivem úbytků napětí $R \cdot I$ se rychlost při větších proudech proti hyperbole snižuje (křivka 1).

Mechanická charakteristika $n(M)$



při $U = \text{konst.}$ vyplývá za předpokladu, že magnetický obvod není nasycen, kdy $\Phi \sim I$, a tudíž $M_i = c \cdot I^2$

Mechanická charakteristika motoru se sériovým buzením je při $U = \text{konst.}$ polytropa, poněkud připomínající hyperbolu, viz obr. 10.

$$\omega = \frac{U}{c \cdot I} - \frac{R}{c} = \frac{U}{c \cdot \sqrt{M_i}} - \frac{R}{c}.$$

Obr. 10: Mechanická charakteristika

Zhodnocení a užití

Při velkém zatížení sériového motoru se automaticky snižuje rychlost, a tak se omezuje výkonové přetížení motoru a napájecí síť. To je výhodné pro trakci. Motor má měkkou, tzv. trakční charakteristiku. Protože s proudem kotvy roste současně budicí proud a magnetický tok, moment se zvětšuje s proudem více než u motoru s cizím buzením. Sériový motor je tedy vhodný pro těžké rozběhy. Používá se pro pohon jeřábů, v těžkých provozech a v elektrické trakci, ovšem i zde je nahrazován levnějšími asynchronními motory se zvláštním napájením.

Motor se smíšeným buzením

Motor se smíšeným buzením (kompaundní) má na hlavních pólech dvě budicí vinutí, paralelní a sériové, která utvářejí vlastnosti motoru tak, že tvoří přechod mezi motorem s paralelním a sériovým buzením. Sériové vinutí je zapojeno tak, aby zesilovalo magnetický tok budicího vinutí zapojeného paralelně ke kotvě. Jeho působením se rychlost se zatížením zmenšuje více než u derivačního motoru. Kompaundní motor má tzv. "měkčí" rychlostní, resp. mechanickou charakteristiku než motor s paralelním buzením. Při odlehčení motoru rychlost vlivem stálého magnetického toku paralelního budicího vinutí neroste na tak vysokou hodnotu jako u motoru se sériovým buzením.

Pro řízení rychlosti platí tytéž zásady jako u ostatních stejnosměrných motorů. Při brzdění kompaundního motoru je též nutno změnit polaritu budicího vinutí, podobně jako u sériového motoru. Brzdit je možno i rekuperací, je však třeba zkratovat sériové budicí vinutí, které by jinak při vyšší rychlosti zeslabovalo výsledné pole stroje.

Řízení otáček

Řízení otáček motoru s cizím buzením

$$n = \frac{U - R \cdot I}{k_E \cdot \Phi} = \frac{U}{k_E \cdot \Phi} - \frac{R \cdot I}{k_E \cdot \Phi}$$

Podle rovnice

je možno otáčky motoru řídit změnou napětí na kotvě U nebo změnou magnetického toku Φ , tj. změnou budicího proudu I_f , případně odporem R v obvodu kotvy. Při poklesu budicího, a tedy magnetického toku stoupne současně proud podle vztahu

$$I = \frac{U - k_E \cdot \Phi \cdot n}{R},$$

neboť vlivem setrvačných hmot otáčejících se částí pohonu nemůže rychlost vzrůst okamžitě. Protože indukované napětí motoru bývá asi $U_i = k_E \cdot \Phi \cdot n \approx 0,9 \cdot U$,

pak při poklesu toku například na $0,8 \cdot \Phi$ je poměr proudu po odbuzení k proudu před odbuzením

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{1 - 0,8 \cdot 0,9}{1 - 0,9} = 2,8.$$

Magnetický tok se zmenšil pouze o 20%, proud se však zvýšil téměř 3x. Zvýšil se tudíž i moment a motor se urychlí až do ustálení otáček a proud poklesne.

Optimální řízení otáček je při maximálním momentu. Toho je možno dosáhnout při trvalém maximálním přípustném, tj. jmenovitém proudu kotvy. Řízení otáček při konstantním proudu lze realizovat postupně: nejprve při plném nabuzení proudem I_f zvyšujeme napětí U na svorkách kotvy. Ze známých vztahů

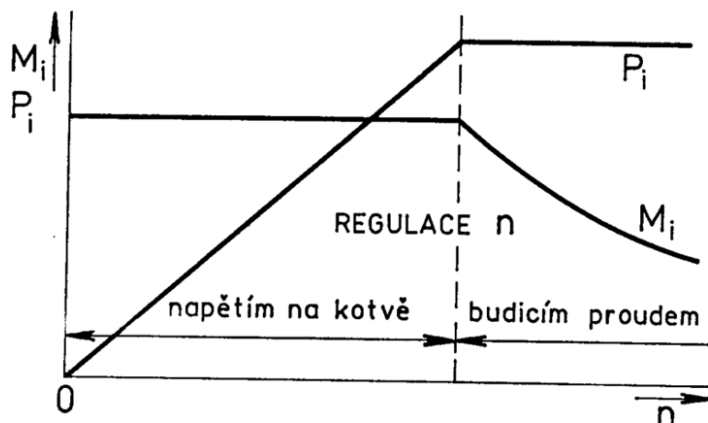
$$M_i = k \cdot \Phi \cdot I$$

$$P_i = M_i \cdot \omega_m$$

vyplývá, že při $I_f = \text{konst.}$ je při řízení otáček konstantní moment. Výkon P_i a úhlová rychlost ω_m rostou lineárně. Při $I = \text{konst.}$ se po dosažení jmenovitého napětí U_N vnitřní výkon dále nemění. Otáčky lze dále zvyšovat odbuzováním. Moment v závislosti na otáčkách při zanedbání úbytku napětí na kotvě klesá podle rovnoosé hyperboly. Platí:

$$P_i = M_i \cdot \omega_m = k \cdot \Phi \cdot I \cdot \frac{U_i}{k \cdot \Phi} = U_i \cdot I = \text{konst.}$$

Řízení rychlosti budicím proudem je řízení při konstantním vnitřním výkonu:

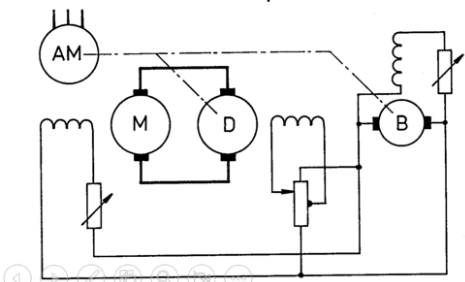


Obr. 1: Řízení otáček motoru s cizím buzením při konstantním proudu

Tento způsob je technicky méně náročný, neboť se řídí v obvodu s menším proudem I_f . Nevýhodou však je, že stroj není plně magneticky využit a při zvyšování otáček moment klesá. Při řízení napětím na kotvě je stroj sice magneticky využit, avšak vyžaduje zvláštní napájecí zdroj říditelného napětí.

Leonardovo soustrojí

Leonardovo soustrojí (nesprávně též Ward-Leonardovo) je zdroj říditelného stejnosměrného napětí a lze jej použít například k řízení otáček stejnosměrného motoru s cizím buzením změnou svorkového napětí na kotvě podle obr. 2. Rozhodujícím článkem Leonardova soustrojí je dynamo s cizím buzením **D**, s širokým řízením napětí buzením, které napájí kotvu řízeného cize buzeného motoru **M**. Buzení obou strojů bývá napájeno ze společného budiče **B** s vlastním (paralelním) buzením. Leonardovo dynamo a budič bývají poháněny obvykle asynchronním motorem **AM**. Je možno je použít u náročných pohonů, které vyžadují řízení otáček v širokých mezích a reverzaci chodu (např. válcovací stolice, těžní stroje apod.).



Obr. 2: Schéma Leonardova soustrojí

Výhody Leonardova soustrojí

- Bezeztrátové, široké, plynulé řízení otáček motoru při konstantním momentu řízením poměrně malého výkonu v obvodu budicího vinutí řídicího dynama.

- V obvodu kotev řídicího dynama a motoru nemusí být ani spínací či regulační zařízení, jež by jinak bylo nutno dimenzovat na velký proud a napětí. Charakteristické je přímé propojení svorek Dynamo – Motor.

- Možnost rekuperace energie do sítě při brzdění motoru.

Nevýhodou Leonardova soustrojí jsou vysoké investiční a provozní náklady. Soustrojí s Leonardovým dynamem se nahrazují polovodičovými řízenými usměrňovači, jež umožňují požadovanou plynulou změnu napětí pro řízení otáček motoru.

Brzdění a reverzace

$$I = \frac{U - U_i}{R}$$

Motor s cizím buzením je možno elektricky brzdit několika způsoby:

Brzdění rekuperací nastává v případě, že indukované napětí stroje je větší než napětí sítě. Proud změří své znaménko podle vztahu. Při stálém buzení se obrátí smysl momentu, stroj pracuje jako dynamo do napájecího zdroje a brzdí se. Zvýšení indukovaného napětí $U_i > U$ je možno dosáhnout třemi způsoby:

- zvýšením otáček stroje nad rychlost naprázdno
- snížením napájecího napětí
- přibuzením, tj. zvýšením budicího proudu motoru.

Brzdění do odporu. Motor se odpojí od napájecího zdroje a na svorky kotvy se připojí odpor. Proud v kotvě a tím i moment změří smysl a stroj pracuje jako dynamo a brzdí se.

Brzdění protiproudem. Kotva se záměnou přívodů připojí na zdroj napájecího napětí. Obrátí se smysl proudu a stroj pracuje jako dynamo a brzdí se. Proud v kotvě bude mnohem větší, neboť je vytvořen nikoli napětím $U - U_i$, nýbrž napětím $-(U + U_i)$ mnohonásobně vyšším (indukované napětí motoru bývá obvykle $U_i \approx 0,9.U$). Do obvodu kotvy je pro omezení proudu nutno zařadit brzdicí odpor. Před úplným zastavením stroje je nutno jej odpojit od napájení, jinak by se roztočil v opačném smyslu. Brzdění protiproudem se používá velmi zřídka.

Řízení otáček sériového motoru

Otáčky sériového motoru se řídí změnou napětí zdroje nebo spouštěcím odporem. Otáčky lze řídit rovněž snižováním budicího proudu pomocí bočnicku. K budicímu vinutí se připojí bočník (*shunt*). Jako bočnicku se nepoužívá činného odporu, neboť při náhlém připojení na napětí by nastal velký proudový náraz tím, že by proud protékal převážně bočníkem, a nikoli budicím vinutím, které má poměrně velkou indukčnost. Stroj by se tak nenabudil.

Brzdění a reverzace sériového motoru

Brzdění sériového motoru se realizuje převážně **do odporu**. Protože se při přechodu z motorového do generátorového režimu mění smysl proudu, je nutno změnit polaritu budicího vinutí, aby v něm zůstal zachován smysl proudu a aby se stroj pracující jako dynamo neobudil. Protože smysl proudu v kotvě je opačný, obrátí se smysl momentu a stroj je brzděn.

Brzdění sériového motoru rekuperací není možné, neboť při stoupající rychlosti klesá proud, tedy i magnetický tok a tím i indukované napětí stroje, který tudíž nemůže přejít do generátorového chodu. Rekuperační brzdění motoru navrženého pro sériové buzení je možné pouze při přepojení jeho budicího vinutí na cizí zdroj.