

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Přehled elektrických strojů

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin KLOUČEK**

Osobní číslo: **E15B0063P**

Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**

Název tématu: **Přehled elektrických strojů**

Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Uveďte fyzikální principy základních druhů elektrických strojů točivých i netočivých.
2. Popište vlastnosti jednotlivých strojů a uveďte oblast jejich použití.
3. Uveďte schematicky typická konstrukční uspořádání jednotlivých strojů točivých.
4. Popište ventilační systémy elektrických strojů točivých.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

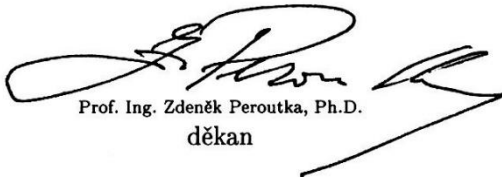
1. Kopylov, I.P.: Stavba elektrických strojů.
2. L. Cigánek: L. Cigánek: Stavba elektrických strojů.
3. Wiedemann, E., Kellenberger, W.: Konstrukce elektrických.
4. J. Červený: Konstrukce elektrických strojů, portál ZCU, Courseware 2016.
5. J. Červený: Stavba elektrických strojů, portál ZCU, Courseware 2016.

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Josef Červený, CSc.**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **5. října 2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **13. června 2019**


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na přehled elektrických strojů, jejich rozdělení, fyzikální principy, vlastnosti, použití, schematická uspořádání a ventilační systémy točivých elektrických strojů.

Klíčová slova

Elektrický stroj, transformátor, motor, asynchronní stroj, synchronní stroj, stejnosměrný stroj, konstrukce, ventilační systém, ventilátor.

Abstract

The bachelor thesis presents the summary of the electric machines, their division, physical principles, properties, usage, schematic arrangement and ventilation systems of rotating electric machines.

Key words

Electric machine, transformer, engine, asynchronous machine, synchronous machine, DC machine, construction, ventilation system, ventilator.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 5.6.2019

Martin Klouček

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Josefovi Červenému, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 ELEKTRICKÉ STROJE	11
1.1 VÝVOJ ELEKTRICKÝCH STROJŮ VE SVĚTĚ.....	11
1.2 VÝVOJ ELEKTRICKÝCH STROJŮ V ČESKÝCH ZEMÍCH	11
1.3 ROZDĚLENÍ ELEKTRICKÝCH STROJŮ	12
2 NETOČIVÉ ELEKTRICKÉ STROJE	13
2.1 TRANSFORMÁTORY - VÝZNAM A POUŽITÍ.....	13
2.1.1 Provedení transformátoru	14
2.1.2 Funkce transformátoru.....	17
2.1.3 Náhradní schéma transformátoru.....	17
2.1.4 Chod naprázdno	18
2.1.5 Chod nakrátko	18
2.1.6 Trojfázové transformátory.....	18
2.2 REAKTORY	20
2.3 TLUMIVKY	21
3 TOČIVÉ ELEKTRICKÉ STROJE	21
3.1 ASYNCHRONNÍ STROJE – VÝZNAM A POUŽITÍ	21
3.1.1 Provedení asynchronního stroje.....	22
3.1.2 Asynchronní stroj s klecí nakrátko.....	23
3.1.3 Asynchronní stroj s vinutým rotorem.....	24
3.1.4 Funkce asynchronního stroje.....	24
3.1.5 Náhradní schéma asynchronního stroje	25
3.1.6 Momentová charakteristika asynchronního stroje.....	26
3.2 SYNCHRONNÍ STROJE.....	26
3.2.1 Provedení synchronního stroje	27
3.2.2 Synchronní stroje s vyniklými póly	27
3.2.3 Synchronní stroje s hladkým rotorem	29
3.2.4 Funkce synchronního stroje.....	31
3.2.5 Náhradní schéma synchronního stroje	33
3.2.6 Momentová charakteristika synchronního stroje.....	34
3.3 STEJNOSMĚRNÉ STROJE	34
3.3.1 Provedení stejnosměrného stroje.....	35
3.3.2 Funkce stejnosměrného stroje	36
3.3.3 Vlastnosti stejnosměrných strojů	38
3.4 SPECIÁLNÍ STROJE	40
4 VENTILAČNÍ SYSTÉMY TOČIVÝCH ELEKTRICKÝCH STROJŮ	43
ZÁVĚR	48
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	1

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na přehled elektrických strojů, jejich rozdělení, fyzikální principy, vlastnosti, použití, konstrukční uspořádání a také ventilační systémy točivých elektrických strojů.

Text je rozdělen do čtyř hlavních částí; první z nich se zabývá vývojem a rozdělením elektrických strojů, druhá část představuje elektrické stroje netočivé, mezi kterými jsou transformátory, reaktory a tlumivky. Třetí část obsahuje elektrické stroje točivé a jsou mezi nimi stroje asynchronní, stroje synchronní, stroje stejnosměrné a také stroje speciální. Ve čtvrté části jsou popsány ventilační systémy.

Seznam symbolů a zkratek

NN	nízké napětí
VN	vysoké napětí
3f.....	tři fáze
V	ventilátor
VO	ventilační obvod
SmCo	samarium-kobalt
NdFeB.....	neodym-železo-bor
AlNi	hliník-nikl
U	elektrické napětí [V]
I.....	elektrický proud [A]
R	elektrický odpor [Ω]
U	elektrické napětí [V]

1 Elektrické stroje

Elektrickým strojem rozumíme zařízení, které slouží k přeměně elektrické energie na mechanickou energii na principu elektromagnetické indukce, popřípadě naopak, nebo k přeměně elektrické energie rovněž na elektrickou, avšak s jinými parametry. Elektrický stroj je vždy měničem energie a jeho provedení závisí na druhu energie na jeho výstupu (elektrická, mechanická) a druhu proudu [4].

1.1 Vývoj elektrických strojů ve světě

První průmyslové použití elektrických strojů se datuje do druhé poloviny 19. století. Nejdříve byly kolem roku 1850 použity stejnosměrné stroje s permanentními magnety. Německý vynálezce Siemens použil jako první v roce 1867 elektromagnety, přičemž buzení bylo zapojené sériově s vinutím kotvy. O šest let později, tedy v roce 1873 se poprvé využila bubnová kotva v závodě Siemens. V této době se určily základy uspořádání konstrukce strojů točivých, jenž se využívají do přítomnosti. Koncem druhé poloviny 19. století se uvažuje o přenosu elektrické energie na delší vzdálenosti a dochází tak k pokusům o jeho dosažení. Objevují se také první trojfázové stroje. Pro konstrukci elektrických strojů se začínají využívat kvalitnější materiály s lepšími fyzikálními vlastnostmi a vznikají počátky základů teorie elektrických strojů a způsoby jejich návrhu. Postupem času se začaly zvyšovat výkony elektrických strojů, kdy na přelomu 19. a 20. století začínají přesahovat 5000 kW a na konci 30. let 20. století dosahují výkony turboalternátorů hodnoty až do 100 MW. Vývoj se posouval stále kupředu a dnešní maximální výkony turboalternátorů dosahují hodnot kolem 1300 MVA a u hydroalternátorů kolem 700 MVA [2].

1.2 Vývoj elektrických strojů v českých zemích

V Praze roku 1896 byl založen elektrotechnický závod Kolben a spol. Na elektrizaci české země a na výrobě elektrických strojů usiluje František Křižík. Roku 1923 vznikl Elektrotechnický závod Škoda, jehož výrobní program byl rozšířen na mnoho druhů elektrických strojů. V následujících letech se ETD Škoda postupně dostává na vrchol mezi světovou elitou, převážně kvůli růstu výkonů jejich turboalternátorů. V roce 1959 měl turboalternátor vyrobený Elektrotechnickým závodem Škoda výkon 100 MVA a roku 1994 již 1000 MVA. Největší hydroalternátor byl zde vyroben roku 1996 pro přečerpávací vodní elektrárnu Dlouhé stráně, jehož výkon dosahuje 355 MVA [2].

1.3 Rozdělení elektrických strojů

Elektrické stroje dělíme podle různých hledisek a kritérií, mezi kterými je způsob přeměny energie, vstupní nebo výstupní proud, princip elektrického stroje a způsob pohybu magnetického pole [2,4].

- ***Dle způsobu přeměny energie***

1. Elektrické stroje točivé jsou:
 - a) generátory, které mění energii mechanickou na elektrickou,
 - b) motory fungují opačným způsobem a to tak, že mění energii elektrickou na mechanickou,
 - c) kompenzátory, sloužící v elektrizační síti ke kompenzaci jalové energie,
 - d) další podskupinu tvoří měniče, regulátory, snímače polohy
2. Elektrické stroje netočivé představují např. transformátory, tlumivky a reaktory

- ***Dle výstupního a vstupního proudu***

1. Stejnoseměrné
2. Střídavé

- ***Dle principu***

1. Stejnoseměrné
2. Synchronní
3. Asynchronní
4. Střídavé s komutátorem
5. Plazmové (MHD – magnetohydrodynamický princip)

- ***Dle složitosti zařízení od jednodušších po složitější***

1. Transformátory
2. Asynchronní stroje
3. Synchronní stroje
4. Stejnoseměrné stroje
5. Střídavé stroje s komutátorem

- ***Podle způsobu pohybu magnetického pole***

1. Netočivé – do skupiny netočivých elektrických strojů patří: transformátory, reaktory a tlumivky
2. Točivé – mezi točivé elektrické stroje řadíme: asynchronní motory, synchronní motory, stejnosměrné motory a střídavé stroje s komutátorem

2 Netočivé elektrické stroje

Do skupiny netočivých elektrických strojů řadíme především transformátory, ale také tlumivky a reaktory. Proces výroby této skupiny elektrických strojů se liší od způsobu výroby točivých strojů mechanickou částí. Některé výrobní postupy jsou však podobné, a to například izolování plechů. Nejvíce se způsoby výroby liší v případě vinutí a řešení jeho izolace [5].

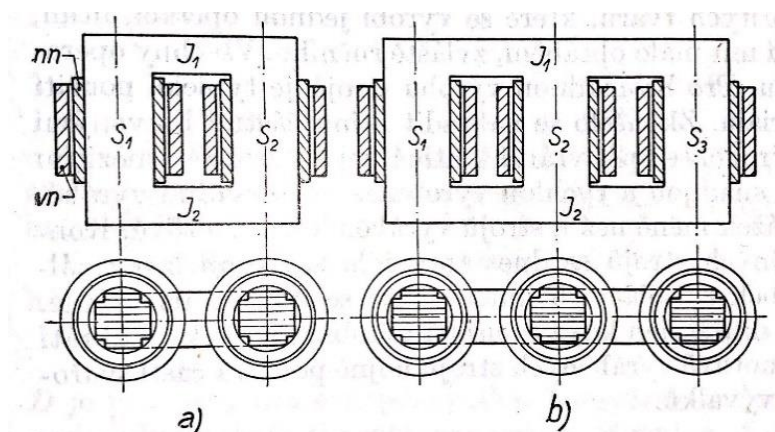
2.1 Transformátory - význam a použití

Transformátory se řadí do skupiny netočivých elektrických strojů. Transformátor je elektrický stroj, který pracuje na základě elektromagnetické indukce. Používá se k přeměně elektrické energie, která má dané napětí, opět na energii elektrickou, jenž má jinou, případně stejnou hodnotu napětí, bez působení mechanické energie. Nejčastější využití transformátoru se nachází v energetice, jelikož umožňuje při nejvýhodnějších napětích z hlediska ekonomie, přenos i rozvod elektrické energie. Tento elektrický stroj však nachází opodstatnění nejen v energetice, ale i v dalších odvětvích [6].

- **Oblasti použití transformátorů**
 1. Energetika – slouží pro přenos a rozvod elektrické energie
 2. Svařovací – snižují napětí a slouží ke svařování kovů pomocí elektrického oblouku
 3. Pecové – používají se pro napájení pecí pro tavení kovů
 4. Napájení usměrňovačů
 5. Spouštěcí – slouží pro rozběh asynchronních motorů větších výkonů

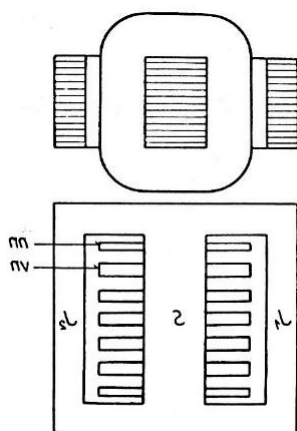
2.1.1 Provedení transformátoru

Základem transformátoru je železné jádro, podle jehož provedení rozdělujeme transformátory na jádrové a plášťové. Jádrové transformátory (obr. 1) mají dva sloupky S_1 a S_2 , které na sobě mají navinuté nízkonapěťové a vysokonapěťové cívky. Tyto sloupky jsou spojeny pomocí spojek J_1 a J_2 , na kterých se nachází stahovací konstrukce jádra. Vyrábí se také trojfázový jádrový transformátor, který má tři sloupky S_1 , S_2 a S_3 a jsou rovněž spojeny dvěma spojkami J_1 a J_2 . Každý z těchto tří sloupků má na sobě navinutou jednu cívku NN a jednu cívku VN.



Obr. 1 Jádrové transformátory; a) jednofázový, b) trojfázový [4]

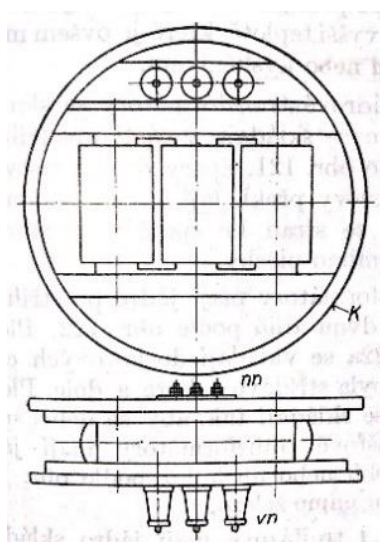
Plášťové provedení transformátoru (obr. 2) se vyrábí výhradně pouze jednofázové. Tento typ transformátoru má kotoučové cívky navinuté na jádro kvůli požadavkům na chlazení. Jeden sloupek, na který je navinuta cívka, je uzavřen pomocí dvou spojek J_1 a J_2 , obklopujících vinutí z obou stran. Kotoučová cívka je tvořena tenkými cívkami VN a NN střídavě navinutých za sebou, mezi kterými jsou z důvodu chlazení izolační mezery [4].



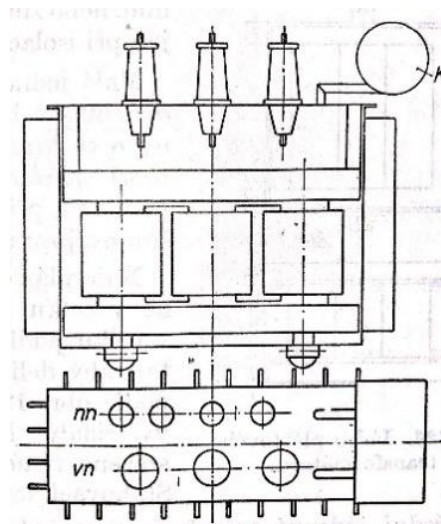
Obr. 2 Plášťový transformátor [4]

Transformátory se dělí také podle typu chlazení na transformátory vzduchové (suché) a olejové transformátory. Vzduchové transformátory (obr. 3) nacházejí svoje uplatnění pro menší výkony a pro použití do prostorů, kde by olej představoval nebezpečí pro okolní prostředí, zejména kvůli své hořlavosti. Jádru včetně cívek je uchyceno do dvojice kruhů, které se používají při přepravě a lze tak transformátor valit. Vysokonapěťové svorky se nachází na izolátorech, které jsou uchyceny k rámu. Nízkonapěťové svorky představují šrouby upevněné na plátu tvrzeného papíru.

Olejové transformátory (obr. 4) jsou určeny pro velké výkony díky účinnějšímu chlazení a používají se tam, kde nehrozí riziko požáru či výbuchu. Jádru s vinutím se u tohoto typu transformátoru nachází uvnitř olejové nádoby. Pro snadné vyjmutí jádra z nádoby se jádro zpravidla věší na víko. Trojice vysokonapěťových průchodek a čtveřice nízkonapěťových se též nachází na víku a slouží jako vývod proudu z vinutí na vnější svorky. Trubky nebo zvlněná stěna nádoby zvětšují povrch chlazení. Konzervátor (K) se u transformátoru nachází kvůli tepelné roztažnosti oleje [4].



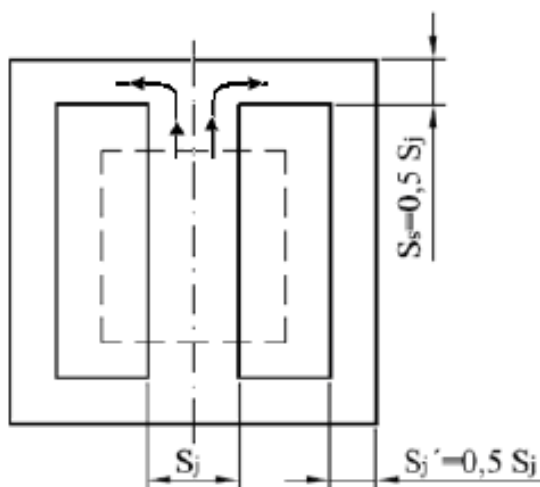
Obr. 3 Vzduchový transformátor [4]



Obr. 4 Olejový transformátor [4]

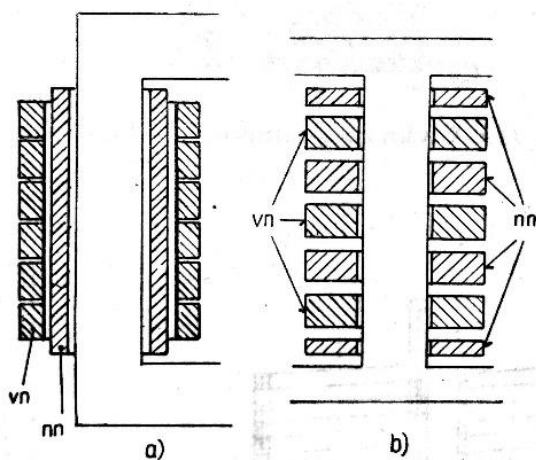
Magnetický obvod je tvořen ocelovými plechy o tloušťce 0,35 mm či 0,5 mm, které jsou navzájem izolované. Tyto plechy nazýváme transformátorové. Dnes se používají plechy válcované zastudena, jejichž výhoda spočívá v mnohem nižších ztrátách, kvůli malému magnetickému odporu ve směru válcování. Povrch plechů válcovaných zastudena je hladší a proto mají lepší koeficient plnění oproti plechům, které jsou válcované za tepla. U orientovaných plechů je využito skládání tak, aby tekla magnetický tok po směru válcování.

Plechys jsou od sebe izolované pomocí laku nebo hedvábného papíru sloužícího k ochraně proti vířivým proudům. Magnetický obvod má tři hlavní části, a to jádro s vinutím, jádro pomocné bez vinutí a spojku (obr. 5) [2,4].



Obr. 5 Jednofázový plášťový transformátor a jeho části: S_j – jádro, S'_j – pomocné jádro, S_s – spojka [2]

Vinutí tvoří cívky navinuté z vodičů z mědi či hliníku, které mají čtyřhranný nebo kulatý tvar. Izolace vodičů se provádí pomocí opředení a opletení bavlnou nebo ovinutí papírového pásu kolem vodiče. Pro použití do oleje je lepší izolace pomocí papíru než bavlny. V některých ojedinělých případech se používá i izolace třídy H, tzn. silikony nebo sklo. Použití čtyřhranných vodičů je výhodnější z hlediska lepšího odvodu tepla a vyšší pevnosti cívky. Vinutí dělíme podle jeho celkového uspořádání na válcové dle obr. 6a, nebo kotoučové podle obr. 6b. Provedení válcové má vysokonapěťové a niskonapěťové cívky koncentricky v sobě. U kotoučového provedení jsou vn a nn cívky střídaně na sloupku [4].



Obr. 6 Válcové a kotoučové cívky [4]

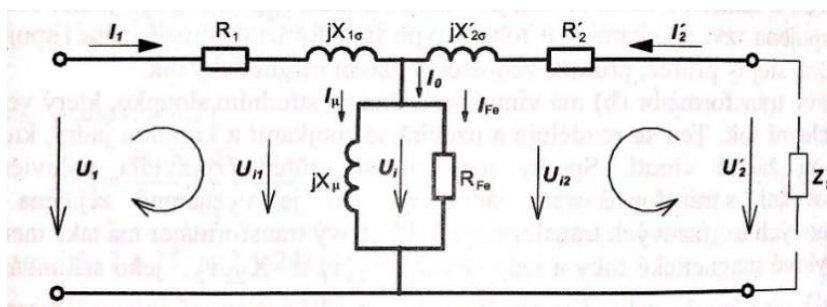
2.1.2 Funkce transformátoru

Princip činnosti transformátoru spočívá ve využití elektromagnetické indukce. Na vstupní svorky je přivedeno střídavé napětí a následně vinutím protéká proud, jenž svými účinky vyvolá střídavý magnetický tok. Tento tok je magneticky spřažen s výstupním vinutím. Podle rovnice (2.1.2.1) se ve vinutích indukují napětí kvůli časové změně spřaženého magnetického toku ψ [3].

$$-e = u_i = \frac{d\Psi}{dt} = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.1.2.1)$$

2.1.3 Náhradní schéma transformátoru

U náhradního schématu vycházíme z předpokladu ideálního transformátoru. Dané schéma obsahuje zapojení pasivních prvků, které představují obvod (rezistory a cívky) a lze jej použít, pokud jsou v obvodu harmonické průběhy veličin a také pro transformátor v ustáleném stavu. Parametry těchto prvků náhradního obvodu odpovídají parametrům transformátoru. Proudů můžeme získat, pokud známe poměry mezi veličinami u reálného transformátoru a jeho náhradního zapojení. Hodnoty prvků transformátoru (odpory, reaktance) získáme z téhož schématu a pomocí zjištěných charakteristik (při stavu transformátoru naprázdno a nakrátko). Náhradní schéma tohoto elektrického stroje má tvar T-článku (obr. 7). Prvky na výstupní (sekundární) straně označujeme pomocí čárky a jsou převáděny na vstupní (primární) část. Uvedené schéma platí pro transformátor, jehož převod je roven 1. Vztahy pro převod (2.1.3.1) můžeme po vyřešení rovnic použít pro výpočet reálných hodnot proudů a napětí v transformátoru [3].



Obr. 7 Náhradní schéma transformátoru ve tvaru T-článku [3]

Vztahy mezi reálnými a převedenými veličinami:

$$U'_2 = kU_2 \quad I'_2 = \frac{1}{k}I_2 \quad Z'_2 = k^2Z_2 \quad (2.1.3.1)$$

2.1.4 Chod naprázdno

Chod transformátoru naprázdno znamená, že jsou výstupní svorky rozpojeny a k transformátoru není připojena zátěž ($I_2 = 0, U_2 = U_{20}$). Měření naprázdno je prováděno zvyšováním napětí, až do 130 % U_n . Příkon, který je transformátorem odebírán ze sítě je spotřebován na kompenzaci ztrát. Proud naprázdno je malý ($I_0 \approx (1 \div 10)\%I_n$) a ztráty ve vstupním vinutí lze oproti ztrátám v železe zanedbat ($\Delta P_{10} \ll \Delta P_{Fe}$) [3].

2.1.5 Chod nakrátko

Výstupní svorky jsou vyzkratované ($U_2 = 0$). Při průchodu jmenovitého proudu je hodnota vstupního napětí nazývána jako napětí nakrátko U_{kn} . Napětí nakrátko se zpravidla vyjadřuje pomocí poměrných hodnot a v případě lineárního magnetického obvodu, jehož výstupní svorky jsou spojeny nakrátko platí rovnice (2.1.5.1)

$$u_k = \frac{U_{kn}}{U_n} = \frac{I_n}{U_n} \frac{U_k}{I_k} = \frac{Z_k}{Z_n} = z_k \quad (2.1.5.1)$$

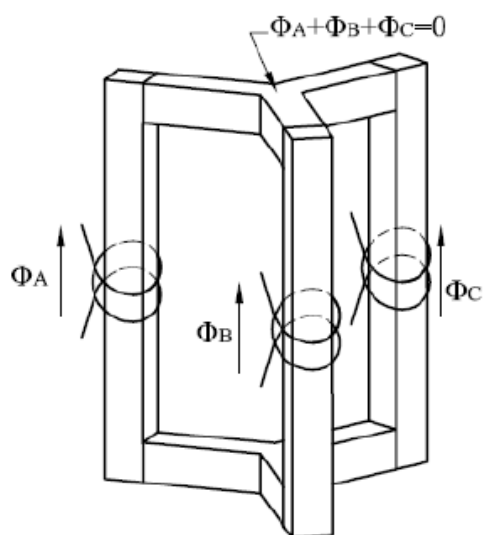
U transformátorů s vysokými výkony je velikost napětí nakrátko v poměrných hodnotách v rozmezí $u_k = (4 \div 12)\%$. Pro transformátory pro výkonovou elektroniku může být tato hodnota až 30 %. Tato hodnota určuje tvrdost zdroje. Hodnota napětí nakrátko je přímo úměrná úbytku napětí na impedanci transformátoru. Pokud je napětí nakrátko malé, tak je sice transformátor tvrdý, ale není tak odolný vůči zkratům. Velikost napětí nakrátko se při návrhu stroje určuje podle toho, pro jaký účel je transformátor zvolen. Postup měření je obdobný jako v případě naprázdno. Příkon se opět využije na kompenzaci Jouleových ztrát. Impedanci nakrátko lze vyjádřit pomocí vzorce (2.1.5.2) [3].

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k} = R_k + jX_k = R_1 + R'_2 + j(X_{1\sigma} + X'_{2\sigma}) \quad (2.1.5.2)$$

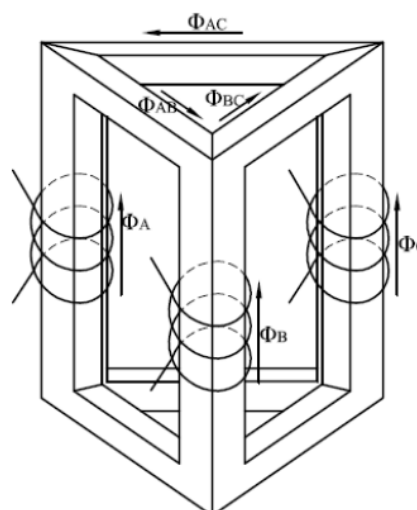
2.1.6 Trojfázové transformátory

Přeměnu trojfázového napětí lze zajistit pomocí tří jednofázových transformátorů nebo použitím jednoho trojfázového transformátoru. Při použití třech jednofázových máme však zvýšené požadavky na spotřebu materiálu a tím je vyšší i cena. Výhodou je menší rozměr jednoho jednofázového transformátoru oproti trojfázovému, a to znamená snadnější přepravu tohoto elektrického stroje. Při revizi nebo při výskytu poruchy je při použití třech

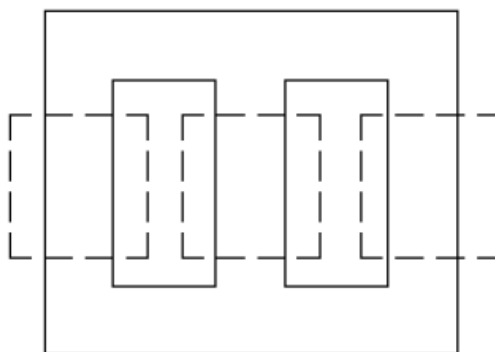
jednofázových transformátorů výhodou nižší potřebná rezerva výkonu. Magnetické toky, které prochází jádry transformátoru tvoří symetrický systém za předpokladu, že se transformátory střetávají svými svislými spojkami, na kterých není navinuto vinutí. Prostřední jádro lze zanedbat, jelikož suma okamžitých hodnot magnetických toků v tomto jádře je nulová. Pro rovinné uspořádání transformátoru musí být spojky fáze zkráceny. Zkrácení spojek jedné fáze sice vytvoří nesouměrnost, kde mají fáze na krajích vyšší hodnotu reluktance a musí jimi protékat pro určité napětí větší magnetizační proud, ale jelikož je hodnota magnetizačního proudu I_{μ} mnohonásobně nižší než hodnota proudu I_{1n} , tak při normálním provozu tato nesouměrnost neznámá žádný problém. Na obr. 8, 9 a 10 se nachází různé uspořádání trojfázového transformátoru dle konstrukce magnetického obvodu [2,3].



Obr. 8 Trojfázový prostorový transformátor, spojení mag. částí do hvězdy [2]



Obr. 9 Trojfázový prostorový transformátor, spojení mag. částí do trojúhelníka [2]

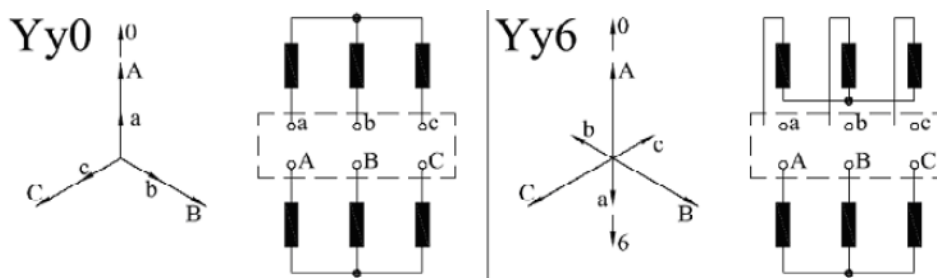


Obr. 10 Trojfázový rovinný transformátor v jádrovém provedení, vzniklý z uspořádání do hvězdy [2]

Pro zapojení vinutí transformátoru jsou tři způsoby, a to zapojení do hvězdy (Y), trojúhelníka (D) nebo do lomené hvězdy (Z). Zapojení vinutí do lomené hvězdy znamená, že vinutí jedné fáze je rozděleno a navinuto na dvě vedlejší jádra. Hodinové číslo znamená, jak jsou mezi sebou natočeny fázory primáru a sekundáru té samé fáze. Měření probíhá ve směru od strany vyššího napětí k nižšímu. Je vyjádřeno násobky 30° . V tabulce č. 1 jsou zmíněné propojení trojfázových vinutí. Na obr. 11 jsou uvedeny dva konkrétní příklady zapojení 3f vinutí, a to Yy0 a Yy6 [2,3].

Tab.1 Způsoby zapojení 3f vinutí [2]

Hodinové č.		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Y	Y	x						x					
	D		x				x		x				x
	Z		x				x		x				x
D	Y		x				x		x				x
	D	x		x		x		x		x		x	
	Z	x		x		x		x		x		x	



Obr. 11 Příklady zapojení 3f vinutí [2]

2.2 Reaktory

Do skupiny netočivých elektrických strojů řadíme také reaktory. Tento elektrický stroj je určen ke snížení nadproudů při vzniku zkratu v silnoproudém obvodu a to tak, že zvyšuje celkovou impedanci obvodu. Indukčnost reaktoru nezávisí na průběhu proudu a je neměnná. Reaktory jsou bezpečné z hlediska zkratu a odolávají přepětí. Vyrábí se buď jako jednofázové nebo trojfázové. Vinutí je hlavní částí reaktoru. Na vinutí cívky se používá měď nebo hliník a izolace je řešena pomocí papíru, který je opředen bavlnou. Jsou určeny pro proudy o velikosti od 20 A až do 2 kA. Při použití do napětí 22 kV jsou reaktory chlazeny vzduchem (vzduchové) a pro vyšší napětí jsou reaktory olejové [5].

2.3 Tlumivky

Tlumivky jsou určeny jak pro stejnosměrný, tak střídavý proud a mají velkou indukčnost. Vyrábějí se ve vzduchovém či olejovém provedení a mohou být buď s neměnnou indukčností nebo se jejich indukčnost může měnit. Změnu indukčnosti lze provést pomocí počtu závitů, nebo v železném jádře změnou délky vzduchové mezery. U jednofázových tlumivek se používá plynulá změna indukčnosti. Transformátorové plechy tvoří jádro a mají dvě či více vzduchových mezer. Lineární charakteristika tlumivky od nulového proudu až do proudu jmenovitého je zajištěna pomocí těchto vzduchových mezer. Výroba vinutí je totožná jako u transformátorů. Tlumivky regulačních transformátorů jsou určeny k omezení vyrovnávacího proudu při průchodu mezi jeho odbočkami. Jsou v jednofázovém nebo trojfázovém provedení [5].

3 Točivé elektrické stroje

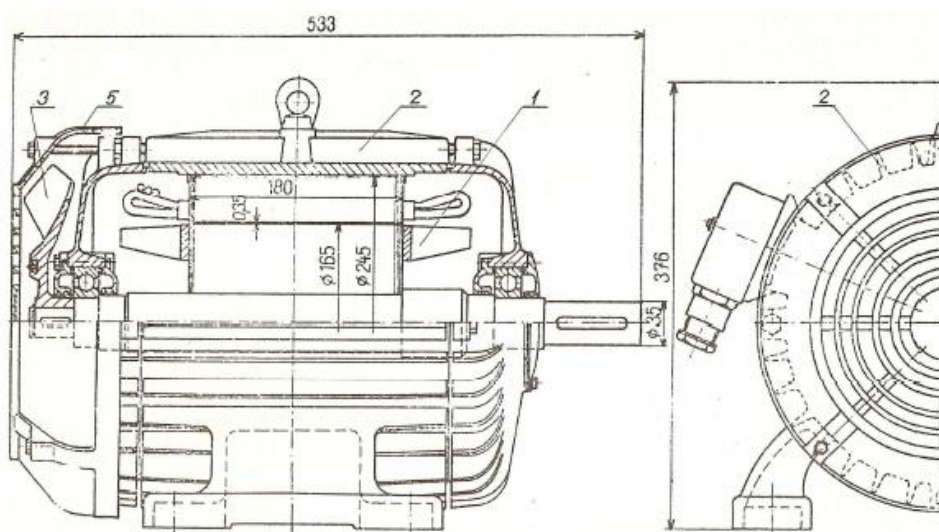
Základem točivého elektrického stroje je magnetický obvod. Tyto stroje využívají pro svou funkci elektromagnetický princip. Magnetický obvod je rozdělen na stator a rotor vzduchovou mezerou, aby bylo možné pohybu rotoru. Vzduchová mezera vykazuje značný magnetický odpor a na tom závisí i magnetizační proud. Tím náročnější je i dimenzace vinutí. Vinutí se skládá do drážek, stejně tak na rotoru a statoru točivého elektrického stroje a díky tomu může být vzduchová mezera co nejmenší. Přeměna energie pomocí tohoto typu stroje (točivého) není však beze ztrát. Při přeměně elektrického (mechanického) příkonu na mechanický (elektrický) vznikají značné ztráty. Projevem těchto ztrát je zpravidla teplo, hluk či vibrace stroje. Do této skupiny řadíme stroje asynchronní, synchronní, stejnosměrné či stroje speciální [3].

3.1 Asynchronní stroje – význam a použití

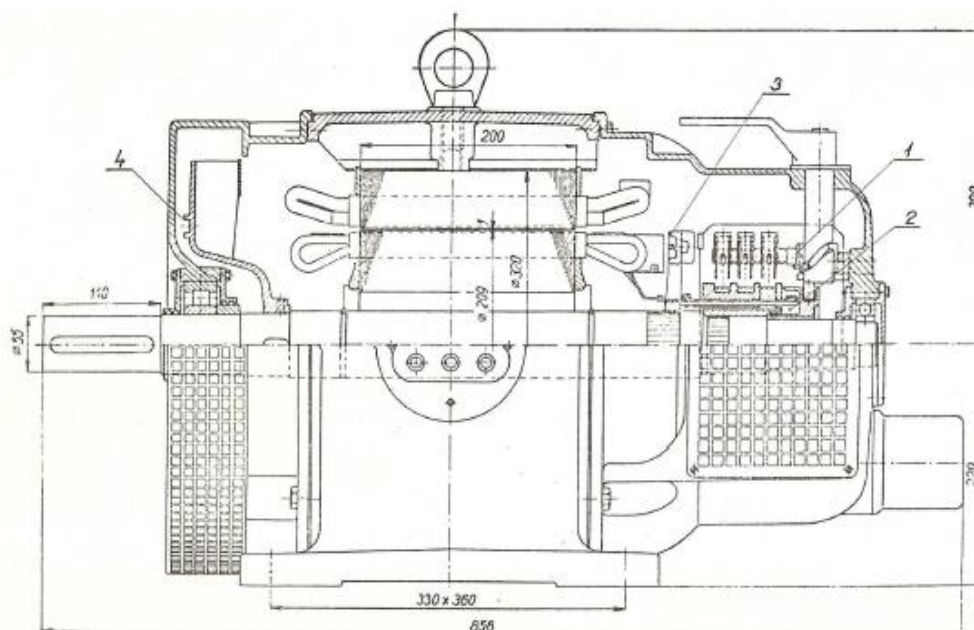
Nejpoužívanějším druhem elektrických strojů v současnosti jsou stroje asynchronní. Při napájení stroje ze sítě jsou používány tam, kde není potřeba měnit moment či rychlost. Pokud je potřeba regulovat některý z těchto parametrů, používá se napájení z měniče kmitočtu, které umožňuje dobré řízení stroje. Výkon u této skupiny strojů je od jednotek wattů až do 20 MW. Dle velikosti výkonu dělíme stroje na pomaloběžné (do 20 MW) a rychloběžné (do 6 MW) [3].

3.1.1 Provedení asynchronního stroje

Asynchronní stroje se oproti strojům synchronním vyrábí pro menší výkony. Většinou slouží jako motory a nachází své uplatnění v mnoha oblastech, kterými mohou být například trakční motory, motory určené do neobvyklého prostředí (prašné, chemicky agresivního, výbušného či do mrazu nebo horka). Na obr. 12 je výkres asynchronního motoru, který má klec nakrátko a pro malé výkony se jedná o značně používaný typ. Na obr. 13 se nachází asynchronní motor kroužkový, který je otevřený, patkový a má ložiskové štíty [1].



Obr. 12 Asynchronní motor s klecí nakrátko – uzavřený, 1) lopatky vnitřního ventilátoru, 2) chladičí žebra, 3) vnější ventilátor, 5) kryt vnějšího ventilátoru [1]

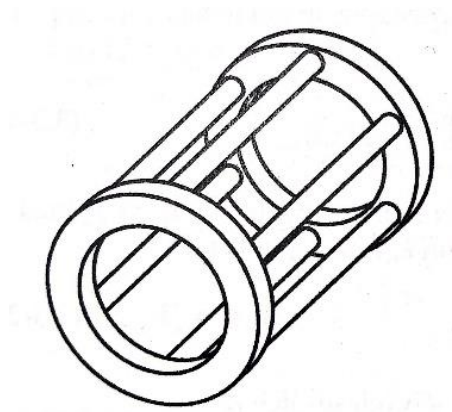


Obr. 13 Asynchronní motor kroužkový – otevřený, 1) držák kartáčů, 2) kroužky, 3) kotouč s vyvažující drážkou, 4) ventilátor s vyvažující drážkou [1]

Hlavní částí asynchronního stroje je stator a rotor. Stator je uspořádán zpravidla pokaždé stejným způsobem, a to tak, že do kostry je vložen indukt. Indukt je složen ze staženého plechového svazku, který má založené vinutí. Ke kostře jsou následně připojeny štíty. Konstrukce se mohou lišit, a to např. podle použitého materiálu a tvaru kostry, dle způsobu ventilace stroje atd. Stator stroje asynchronního může být shodný jako u stroje synchronního. Provedení rotoru se však liší a může být buď s klecí nakrátko nebo rotor vinutý [1].

3.1.2 Asynchronní stroj s klecí nakrátko

Z konstrukčního hlediska jde o nejjednodušší elektrický stroj. Tyče uložené v drážce tvoří rotorové vinutí a jsou na svých koncích propojené pomocí kruhů (obr. 14). Materiál tyčí a kruhů je buď hliník nebo měď. Hliník se používá pro malé výkony a klec se odlévá dohromady s tyčemi a kruhy. Měď nachází uplatnění u výkonů vyšších, klec se skládá z vodičů, které jsou umístěny v drážkách a na svých koncích mají přivařeny kruhy taktéž z tohoto materiálu [2].

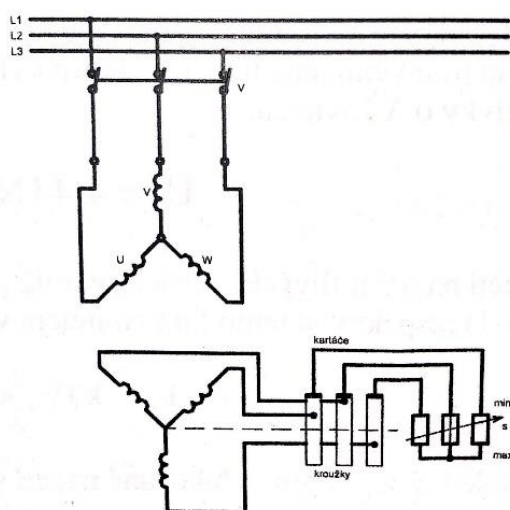


Obr. 14 Uspořádání klece nakrátko [3]

Při rozběhu tohoto typu motoru mohou nastat komplikace kvůli činiteli vinutí, který je roven 1 pro všechny harmonické složky ($k_v = 1$), od nižších harmonických složek tak mohou být v momentové charakteristice sedla momentu. Tyto komplikace při rozběhu mohou být zredukovány již při návrhu stroje a to tak, že se zvolí ideální počet drážek klece [2].

3.1.3 Asynchronní stroj s vinutým rotorem

Tento druh asynchronního stroje se nazývá také kroužkový. Vinutí rotoru a statoru má většinou shodný počet fází a je vloženo do drážek, které mohou být otevřené nebo polouzavřené. Sběrací kroužky slouží jako vývod pro každou fázi. Do každé fáze jsou jimi při rozbíhání stroje z nulových otáček zařazovány pomocí kartáčů elektrické odpory. Při nárůstu otáček se tyto odpory snižují, a nakonec dojde k jejich kompletnímu odpojení. Aby nedošlo k opotřebení, kroužky se vyzkratují a odpojí se kartáče. Z tohoto důvodu je součástí motoru odklápěč kartáčů. Při rozběhu stroje při nižším napětí je součástí troje také přepínač hvězda-trojúhelník. Provedení vinutého rotoru je zobrazeno na obr. 15 [1].



Obr. 15 Provedení vinutého rotoru [3]

3.1.4 Funkce asynchronního stroje

Točivé magnetické pole se vytvoří tak, že statorové vinutí připojíme k třífázové síti. V rotoru se indukují napětí z důvodu protínání indukčních siločar s rotorovými vodiči. To je zajištěno pohybem magnetického pole. Kvůli tomuto indukovanému napětí začne rotorem protékat proud. Tím je způsobena silová interakce rotorových vodičů se statorovými. Podmínkou pro vznik indukovaného napětí ve vodičích je relativní pohyb rotoru vůči statorovému točivému elektromagnetickému poli. V případě, že se statorové elektromagnetické pole otáčí 3000 otáčkami za minutu při napájení s frekvencí 50 Hz a rotor se otáčí stejnou rychlostí, pak není jeho pohyb vůči statorovému poli relativní a není možná indukce napětí. Nutností tedy je, že se rotor musí otáčet nižší rychlostí než statorové pole. Skluz udává rozdíl statorových a rotorových otáček. Lze jej vyjádřit pomocí vztahu 3.1.4.1., kde n_1 značí statorové synchronní otáčky a n jsou rotorové mechanické otáčky. Velikost otáček u magnetického statorového pole závisí na počtu jeho pólů (póly statoru). Pokud

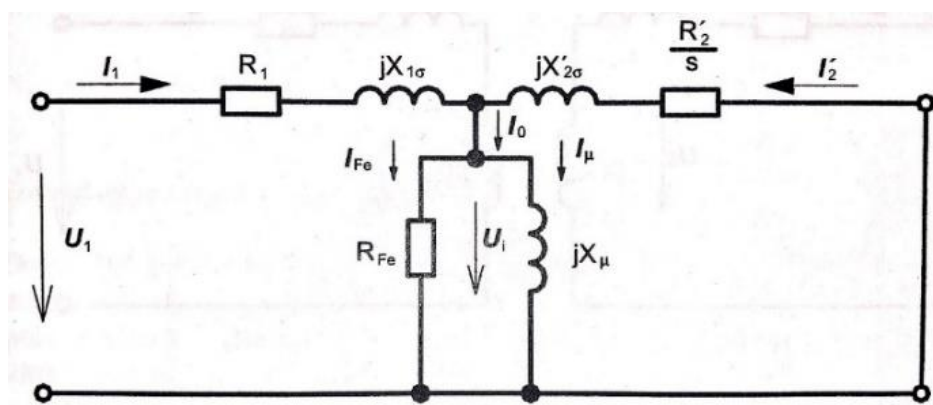
máme stroj, jehož elektromagnetické pole statoru se otáčí 3000 otáčkami za minutu, znamená to, že stator má dva póly (S a J), které tvoří jeden pólový pár. Skluz závisí na tom, jak je daný stroj zatížen. Při vyšším zatížení stroje, je vyšší i skluz. Podíl kmitočtu (f_1) a počtu pólových párů (p) nám udává počet otáček statorového točivého pole n_1 3.1.4.2 [7].

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (3.1.4.1)$$

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} \quad (3.1.4.2)$$

3.1.5 Náhradní schéma asynchronního stroje

Náhradní schéma pro asynchronní stroj se od náhradního schématu pro transformátor v několika ohledech liší, avšak právě z něho vycházíme. Mezi rozdíly mezi těmito dvěma náhradními schématy patří odlišné kmitočty proudů statoru a rotoru. Transformátor narozdíl od asynchronního stroje nemá vzduchovou mezeru. Mechanický výkon hřídele se musí přepočítat na elektrický výkon. V náhradním schématu se musí převést rotorové veličiny na stator. Náhradní schéma lze vyjádřit ve tvaru T-článku (obr. 16) a je platné pro ustálený stav s harmonickým napájením [3].



Obr. 16 Náhradní schéma asynchronního stroje ve tvaru T-článku [3]

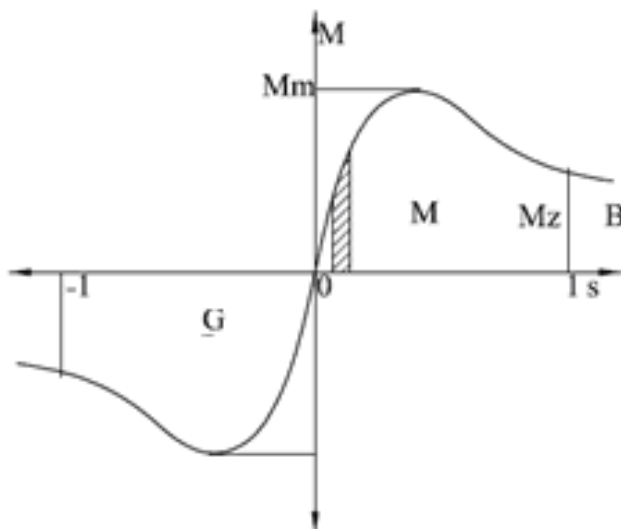
Popis pomocí rovnic (3.1.5.1-2) pro výše uvedené náhradní schéma ve tvaru T-článku lze pak vyjádřit:

$$U_1 = (R_1 + jX_{1\sigma})I_1 + U_i \quad (3.1.5.1)$$

$$0 = \left(\frac{R_2}{s} + jX_{2\sigma}\right)I_2 + U_i \quad (3.1.5.2)$$

3.1.6 Momentová charakteristika asynchronního stroje

Na obr. 17 je uvedena obecná momentová charakteristika, která je nejdůležitější charakteristikou. Zobrazuje závislost velikosti momentu na hřídeli na otáčkách. Při jmenovité hodnotě momentu M_n a při skluzu s_n je jmenovitý pracovní bod. Moment zvratu neboli maximální moment M_{max} je dosažen při maximálním skluzu s_{max} . Pro spuštění stroje je nezbytný moment záběrný $M_{záb}$, kterého docílíme při skluzu $s=1$ [3].



Obr. 17 Momentová charakteristika asynchronního stroje [2]

3.2 Synchronní stroje

Skupina točivých elektrických strojů synchronních využívá rovněž jako stroje asynchronní princip točivého magnetického pole. Rozdílem však je, že u synchronních strojů jejich funkce probíhá při synchronních otáčkách, kde se rotor točí stejnou rychlostí jako magnetické pole statoru. Synchronní rychlost vyjadřujeme pomocí vzorce 3.2.0.1., kde n značí otáčivou rychlost magnetického pole, f je frekvence proudu a p je počet pólových párů stroje.

$$n = \frac{60f}{p} \quad (3.2.0.1)$$

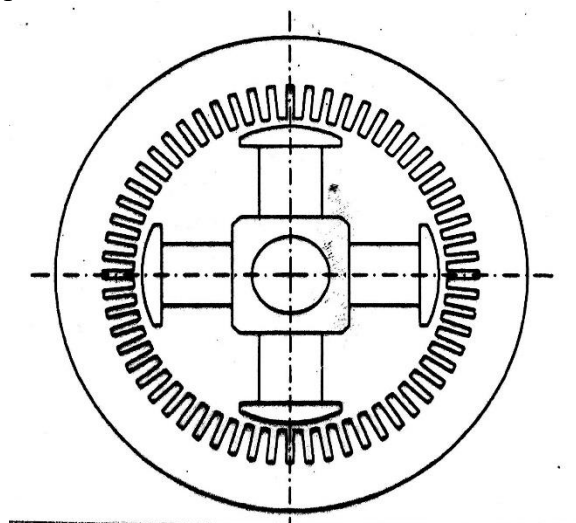
Synchronní stroje se dle konstrukce rozdělují na horizontální či vertikální. Dále se dělí podle provedení rotoru na synchronní stroje s hladkým rotorem, které se vyrábějí až do výkonu přesahujícího 1000 MW a na stroje s vyniklými póly [2].

3.2.1 Provedení synchronního stroje

Provedení se u strojů s hladkým rotorem a s vyniklými póly liší. Synchronní stroje s rotorem hladkým (válcovým) mají vzduchovou mezeru neměnnou, protože zanedbáváme drážkování. U strojů s vyniklými póly se vzduchová mezera mění. Tyto dva druhy se od sebe liší především v momentové charakteristice. Synchronní stroje jsou nejrozměrnější ze skupiny strojů vyrábějících elektrickou energii. Jelikož se vyrábějí pro různé výkony, liší se jejich konstrukce. Synchronní stroj může pracovat jak v generátorickém, tak v motorickém režimu [3].

3.2.2 Synchronní stroje s vyniklými póly

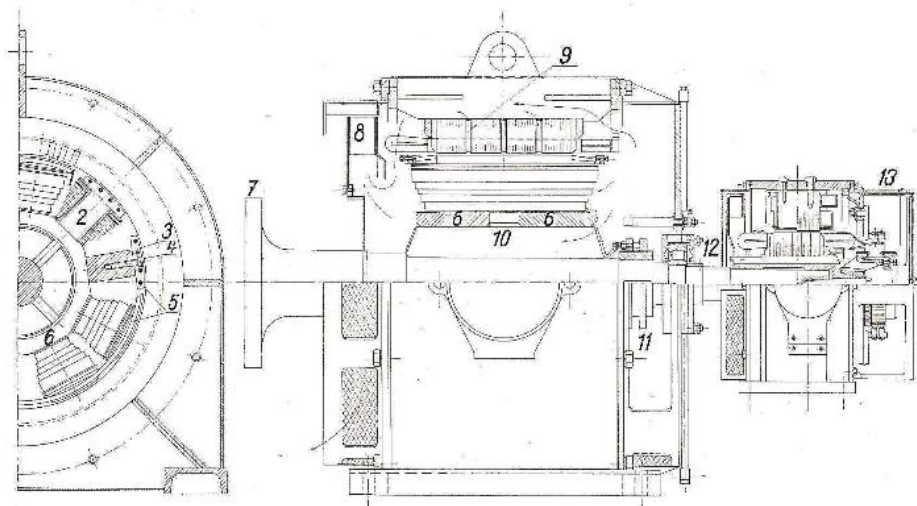
Synchronní stroje s vyniklými póly (obr. 18) nazýváme též hydroalternátory a nacházejí svoje uplatnění ve vodních elektrárnách. Na obr. 19 a 20 jsou znázorněny jejich konstrukce. Na prvním z uvedených se nachází synchronní generátor určený pro nižší výkon, je patkový a obsahuje ložiskový štít. V případě druhém se jedná o řez hydroalternátorem pro výkon 70 MVA v horizontálním provedení.



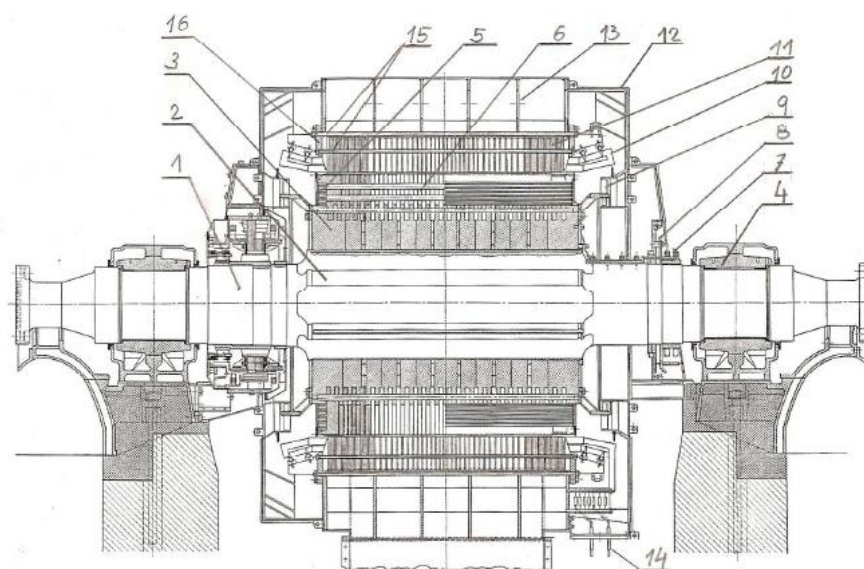
Obr. 18 Synchronní stroj s vyniklými póly [4]

Kostra u strojů s nižším výkonem se odlévá a pro výkony vyšší bývá kostra vyráběna pomocí svařování. Indukt se nachází v této kostře. Uložení plechového svazku, který tvoří spolu s vinutím indukt, se liší podle způsobu chlazení stroje. Kostra je tvořena deskami z oceli o kruhovém tvaru, které se podélně spojují trámci. Na trámce se poté upevní pravítka, která mají tvar lichoběžníku. Hřídel, magnetické jho, póly s budícím vinutím, tlumič a kroužky, tvoří rotor. Kroužky slouží pro přivedení budícího proudu. Aktivní částí je právě magnetické jho. Póly jsou ke jhu připevněny. Tlumič, který je součástí rotoru, tvoří tyče,

jenž se nachází v pólovém nástavci. Kruhy tyto tyče na obou koncích spojují. V případě lištěného pólového nástavce, jsou tyče vloženy do vyražených drážek uvnitř celého nástavce. U jednolitých pólových nástavců by bylo velmi složité a finančně náročné vytvoření těchto otvorů, a navíc to není nezbytné. Jelikož jsou nástavce z oceli, tak mají velkou elektrickou vodivost a lze tedy říci, že fungují jako tyče tlumiče. Měděné kolíky dlouhé 10–15 cm slouží jako náhrada tyčí a jsou na koncích opět spojeny pomocí kruhů. Důležitou část rotoru tvoří v neposlední řadě také sběrací kroužky z oceli, sloužící k přivedení budícího proudu [1,4].

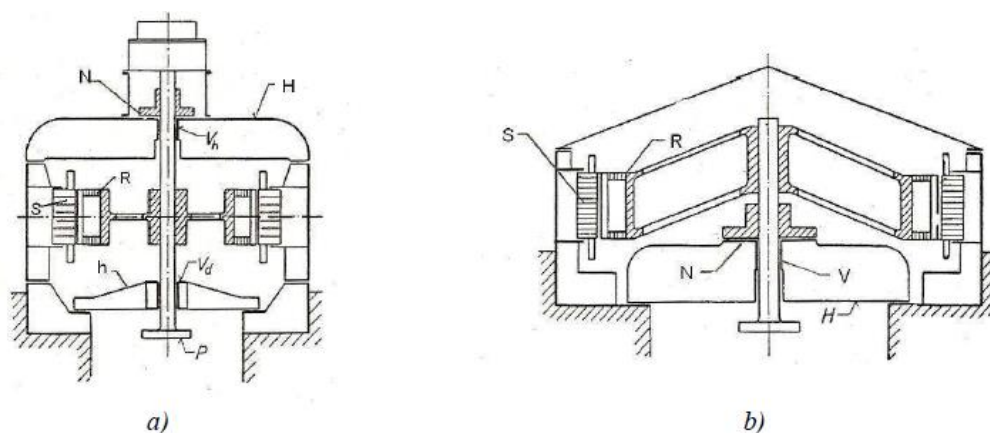


Obr. 19 Příčný a podélný řez synchronním generátorem pro menší výkon (100 kVA), 1) cívka buzení, 2) pól, 3) pólový nástavec, 4, 5) tyče a kruh tlumiče, 6) jho rotoru, 7) příruba spojující hřídel s poháněcím strojem, 8) radiální ventilátor, 9) indukt, 10) přivařená ramena, 11) kroužky a roubíky kartáčů pro přívod budícího proudu do pólových cívek, 12) válečkové ložisko, 13) budič [1]



Obr. 20 Hydroalternátor o výkonu 70 MVA v horizontálním provedení, 1) hřídel, 2) žebra, 3) kované mezikruhové desky nasazené na žebra, tvořící rotorové jho, 4) stojanové ložisko, 5) budící cívka, 6) pól, 7) kroužky, 8) sběrací ústrojí (kartáče a jejich držáky), 9) axiální ventilátor, 10) čela statorového vinutí, 11) plechový svazek induktu, 12) krycí štít čelního prostoru, 13) prostor kostry, 14) základ, 15) stahovací svorníky plechového svazku, 16) stahovací deska plechového svazku [1]

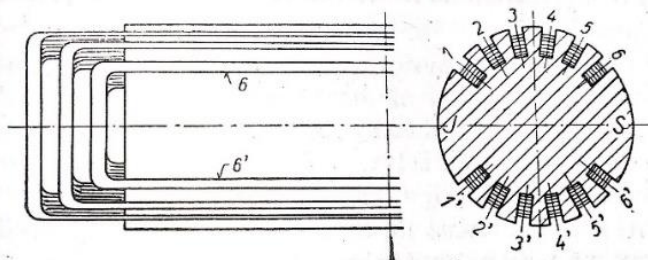
Pro vertikální provedení hydroalternátorů, které mají odlišné provedení ložisek, a to nosného a vodícího, jsou uvedena na obr. 21 jejich schémata. Na obr. 21a je umožněn bezproblémový přístup k nosnému ložisku, avšak pokud je těsnost oleje pro mazání narušena, je způsobeno jeho následné vniknutí dovnitř stroje a poškození izolace. V případě podle obr. 21b je zamezeno vniknutí oleje, ale ložisko již není snadno přístupné. Aby byl dosažen bezproblémový chod stroje, musí být vzdálenost úrovně nosného ložiska co nejmenší k úrovni, která prochází rotorem, respektive jeho těžištěm. Z tohoto důvodu musí být rotorová ramena v náklonu [1].



Obr. 21 Uspořádání hydroalternátorů ve vertikálním provedení, N – nosné ložisko, V – vodící ložisko, H a h – horní a dolní nosná hvězda, S – stator, R – rotor [1]

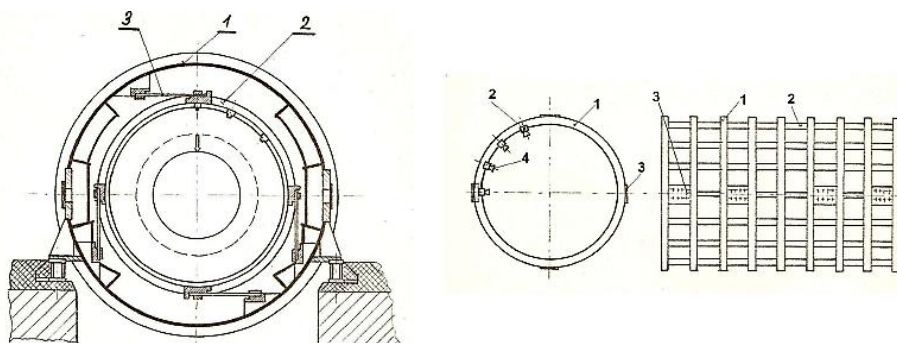
3.2.3 Synchronní stroje s hladkým rotorem

Synchronní stroje s hladkým rotorem (obr. 22) se nazývají též turboalternátory, používají se při vysokých otáčkách a spojují se s turbínou (plynovou či parní). Používají se při vysokých otáčkách. Při kmitočtu 50 Hz a se dvěma póly se otáčí rychlostí 3000 ot/min. S frekvencí 60 Hz lze použít i 4 póly a rychlost otáčení je následně 3600 ot/min. Průměr rotoru musí být kvůli vysoké rychlosti a vysoké odstředivé síle působící na rotor menší, a proto jsou tyto stroje dlouhé a mají malý průměr, narozdíl od strojů s vyniklými póly [4].



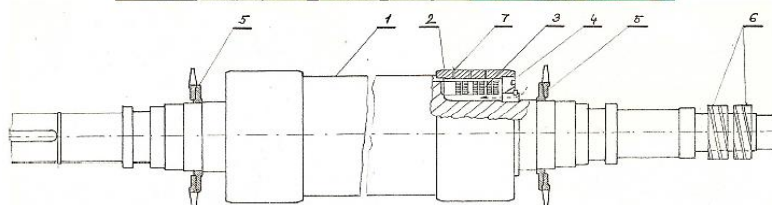
Obr. 22 Synchronní stroj s hladkým rotorem [4]

Stator u strojů s vyniklými póly a u strojů s hladkým rotorem se téměř neliší, rozdíl je pouze v jejich délce a průměru. Kluzná ložiska slouží k uložení rotoru. Kostra je vyrobena pomocí sváření a má z obou stran štíty, které jsou magneticky nevodivé, a to z toho důvodu, aby byla snížena magnetická vodivost a zredukovány ztráty. Generátory pro velké výkony mají také odpružení induktu od stroje k omezení vibrací do okolí. Kostra vnější i vnitřní se proto spojuje pomocí pružných částí. Vnější kostra umožňuje upevnění stroje a ve vnitřní se nachází indukt (obr.23) [1].



Obr. 23 Odpružení uložení kostry vnitřní, vlevo celkové uspořádání: 1) vnější kostra, 2) vnitřní kostra, 3) ploché pružiny, vpravo kostra vnitřní: 1) kruhy, 2) trámce, 3) desky pro uchycení pružin, 4) lichoběžníková pravítka [1]

Rotor turboalternátoru se od rotoru hydroalternátoru liší. Je tvořen vykováním a opracováním hřídelem z oceli a dalších přísad. Předností jsou výhodné vlastnosti, a to jak magnetické, tak z hlediska mechanické pevnosti. Na obr. 24 je uvedený příklad rotoru a jeho výkres. Budící vinutí je vloženo do vyfrézovaných drážek na rotoru. Část rotoru bez drážek tvoří pólový nástavec [1].



Obr. 24 Rotor turboalternátoru, 1) tělo rotoru, 2) nemagnetická bandáž, 3) čela budícího vinutí, 4) podpěrný kruh bandáže s drážkou pro vyvažovací závaží, 5) axiální ventilátor, 6) sběrací kroužky, 7) otvory v bandáži pro výfuk chladícího vzduchu [1]

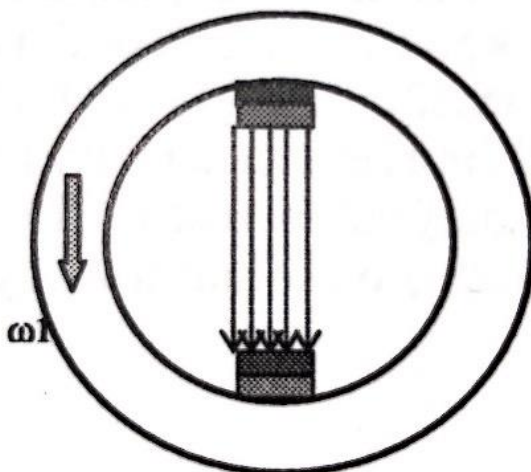
3.2.4 Funkce synchronního stroje

Tato skupina strojů, rovněž jako stroje asynchronní používají pro svou funkci točivé pole, avšak fungují při synchronní rychlosti otáčení, tedy stejné rychlosti jako je rychlost statorového pole. Synchronní rychlost lze vyjádřit vztahem 3.2.4.1.

$$\omega_s = \frac{\omega_1}{p} \quad (3.2.4.1)$$

Při provozu se stroj otáčí právě vyjádřenou rychlostí. Úhlová rychlost ω_1 je stanovena podle frekvence napájení a lze říci, že $\omega_1 = 2\pi f_1$. Pólové páry, respektive jejich počet je ve vzorci označen jako p a udává nám, že se stav p -násobně opakuje okolo celého stroje.

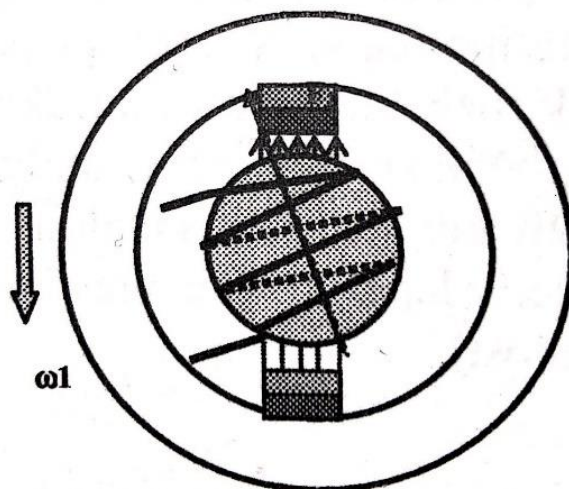
Zjednodušeně lze statorové magnetické pole vyjádřit pomocí otáčejících se magnetů a pomocí nich vznikne magnetické napětí F_1 (obr. 25).



Obr. 25 Model točivého pole pomocí permanentních magnetů [3]

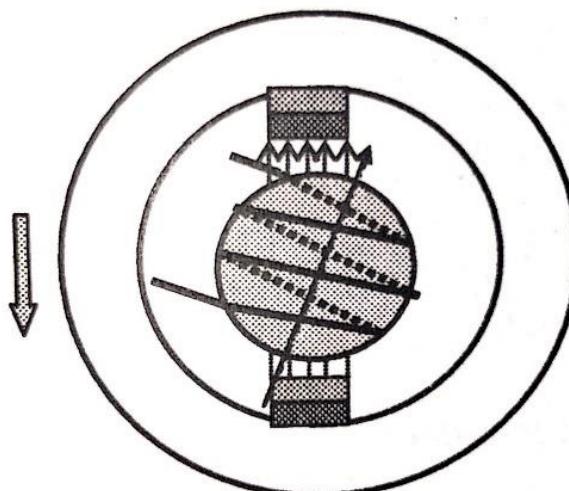
Rotor může být vyjádřen více způsoby a vytvoří magnetické napětí F_2 . Pro vytvoření magnetického napětí F_2 musí být splněna podmínka přítomnosti buzení nebo musí obsahovat permanentní magnet. Jak již bylo výše uvedeno, rotory u tohoto stroje mohou mít dvojí provedení. Válcový rotor je vyjádřen pomocí válce, které má budící vinutí. Ve většině případů se provádí ve dvojpólovém provedení ($p=1$). V opačném případě s vyniklými póly se provádí $2p \geq 4$, avšak může dosahovat hodnoty 60 a více.

Různé druhy rotorů budou následně vloženy do točivého statorového pole (obr. 25), včetně budícího vinutí či bez. Válcové provedení rotoru na obr. 26 vytváří sekundární magnetické pole v důsledku budícího proudu I_b .



Obr. 26 Model stroje s válcovým rotorem – generátorický režim [3]

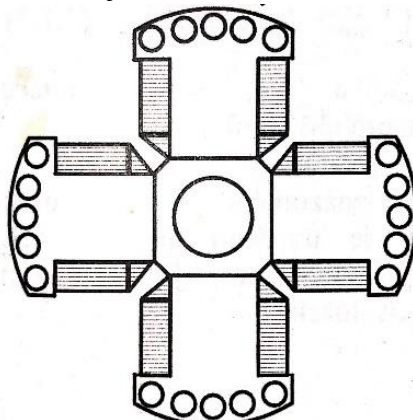
Pokud se rotorové pole otáčí vyšší rychlostí než pole statorové, hovoříme pak o generátorickém režimu stroje. U opačného případu, kde se rotor otáčí nižší rychlostí než pole statorové, hovoříme o režimu motorickém (obr. 27).



Obr. 27 Synchronní stroj – motorický režim [3]

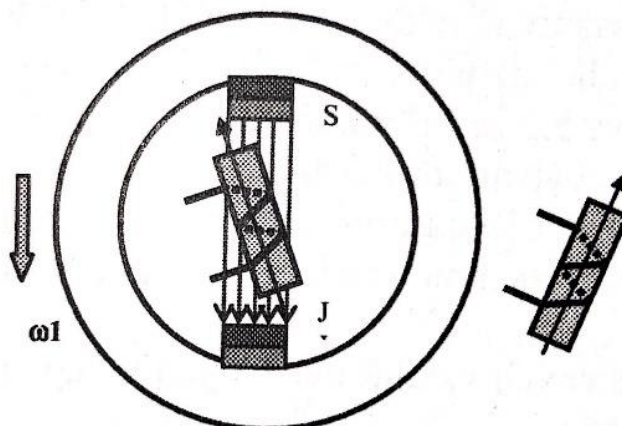
Moment stroje lze vyjádřit pomocí vektorového součinu F_1 a F_2 . Magnetické napětí rotoru a budící proud jsou si úměrné a hodnota maximálního momentu odpovídá hodnotě budícího proudu. Za předpokladu nepřítomnosti buzení válcového rotoru, nemůže vzniknout synchronní moment. Pokud je však rotor vyroben z masivní oceli, vytvoří moment asynchronní. Pokud je rotor zhotoven z materiálu, který nevede elektrický proud, jako jsou

izolované plechy, moment nevznikne. V případě rotoru s vyniklými póly (obr. 28), kde není vzduchová mezera konstantní, se objeví další součást momentu.



Obr. 28 Rotor synchronního stroje s vyniklými póly [3]

Funkce tohoto typu je zobrazena na obr. 29. Reluktanční moment vzniká v případě nekonstantní vzduchové mezery a nezávisí na buzení, ale pouze na tvaru rotoru, resp. magnetické vodivosti. Celkový moment je získán sečtením obou částí [3].

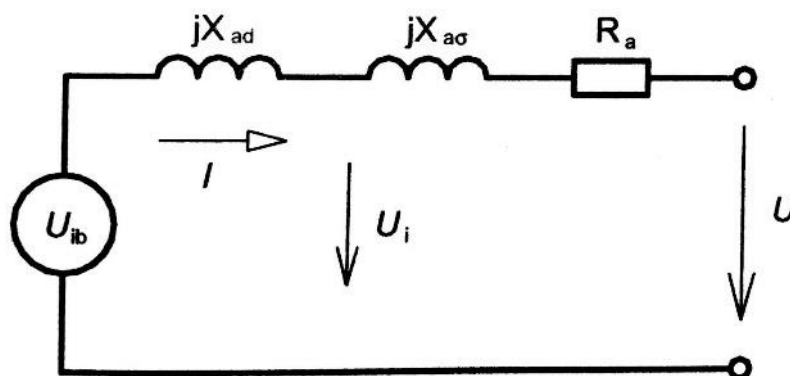


Obr. 29 Generátorický a motorický režim stroje s vyniklými póly [3]

3.2.5 Náhradní schéma synchronního stroje

V náhradním schématu je indukované napětí spojeno k výstupním svorkám pomocí vazby, ve které se projeví činný odpor statoru, rozptylová a magnetizační reaktance. Magnetizační reaktance se také v tomto případě nazývá reaktance reakce kotvy X_{ad} . Dle těchto předpokladů lze použít náhradní schéma na obr. 30. Opět zde nastává složitost převodu veličin na stator, avšak v tomto případě je komplikovaná z důvodu počtu fází na statoru a na rotoru, kde je jich rozdílný počet. U tohoto případu předpokládáme, že jsou veličiny převedeny, na stator či rotor. Tento obvod lze popsat pomocí níže uvedených vztahů (3.2.5.1) [3].

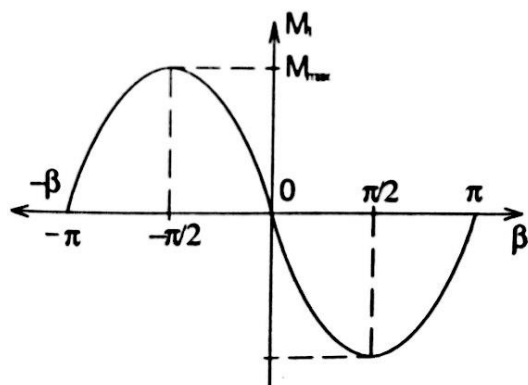
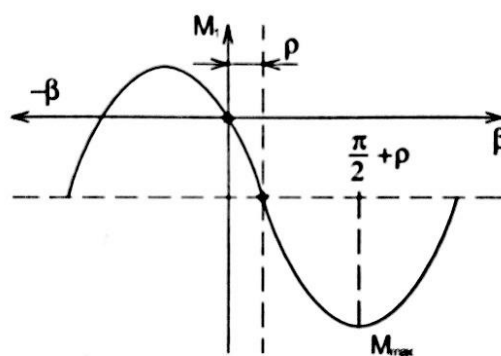
$$U - U_{ib} - Z_d I = 0; Z_d = R_a + j(X_{a\sigma} + X_{ad}) \quad (3.2.5.1)$$



Obr. 30 Náhradní schéma stroje s válcovým rotorem [3]

3.2.6 Momentová charakteristika synchronního stroje

V případě válcového rotoru uvažujeme nulové ztráty a to znamená, že výkon a příkon stroje jsou v rovnosti. Maximální hodnota momentu M_{max} odpovídá hodnotě budícímu proudu I_b , $M_{max} \approx I_b$ (obr. 31). Pro generátorický režim platí, že zátěžný úhel $\beta > 0$ a moment $M_i < 0$, jelikož posuv fáze $\varphi = \varphi' + \pi < 0$. U režimu motorického nastává opačný stav, tj. $M_i > 0$ a $\beta < 0$ (obr. 32) [3].

Obr. 31 Momentová charakteristika synchronního stroje $R_a = 0$ [3]Obr. 32 Momentová charakteristika synchronního stroje $R_a \neq 0$ [3]

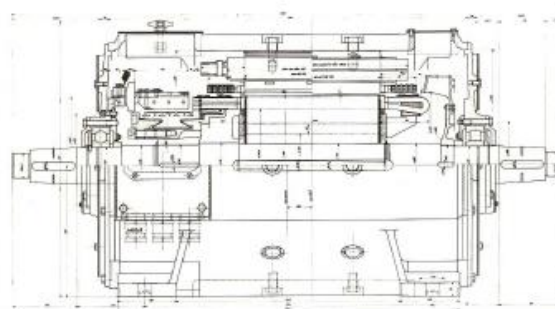
3.3 Stejnsměrné stroje

Z historického hlediska se jedná o první stroje sloužící k tvorbě elektrické energie. Používají se jako dynamo nebo motory. Motory mění elektrickou energii na energii mechanickou. Svého technologického vrcholu dosáhly tyto stroje koncem 20. století. Dnes je jejich použití sice omezeno, avšak stále se s nimi lze setkat, a to tam, kde je potřeba snadno

regulovat otáčky. Mezi hlavní výhodou stejnosměrného stroje řadíme právě jeho dobré řízení a možnosti snadné regulace. Základ těchto strojů tvoří komutátor, což je v případě motorů mechanický střídač či u dynam mechanický usměrňovač. Výkony mohou dosahovat hodnoty až 5 MW [3].

3.3.1 Provedení stejnosměrného stroje

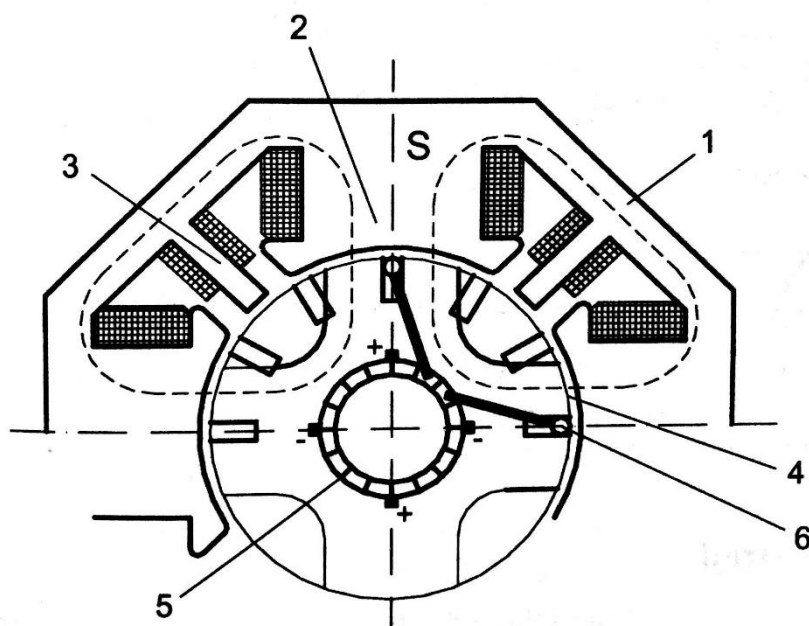
Indukt se u těchto strojů nachází na rotoru a na statoru zdroj magnetického toku. Takto je to nezbytné z důvodu přítomnosti komutátoru. Na obrázku č. 33 je uvedeno klasické uspořádání stroje pro menší výkon, které se zpravidla vyrábí s ložiskovými štíty a hřídel se nachází ve valivých ložiskách. V místě, kde se přenáší krouticí moment vystupuje volný konec hřídele.



Obr. 33 Patkový otevřený stroj a jeho řez [1]

Hlavní části jsou stator, rotor a komutátor. Základem statoru je kostra, ta je v tomto případě aktivní část a dochází zde k uzavření magnetického toku. Na kostru se připevňují póly – hlavní a pomocné, včetně buzení. Ve většině případů u velkých strojů mají hlavní pólové nástavce také kompenzační vinutí. Stator obsahuje štíty, které slouží ke krytí, sběrače, svorkovnice atd. Kostra bývá jednolitá, ale občas i lištěná a pomocí ní lze také celý stroj upevnit. Požaduje se, aby byla mechanicky odolná. Jednolitě kostry se zhotovují odléváním nebo svářením. Při odlévání lze bez problému zhotovit i složitý tvar. U svařování je třeba dbát na místo sváření, jelikož má rozdílné magnetické vlastnosti oproti kostře. Póly hlavní se nejčastěji vyrábí lištěné nebo kombinované, kdy je pouze nástavec lištěný a zbytek jednolitý. Průběh indukce vzduchové mezery závisí na tvaru nástavce. Póly na sobě mají buzení. Póly pomocné kompenzují magnetické napětí reakce kotvy a reaktanční napětí a jsou tenčí než póly hlavní. Vinutí kompenzační kompenzuje magnetické napětí reakce kotvy pod hlavními póly, respektive jejich pólovým nástavcem. Tvoří ho tyčové izolované vodiče z mědi o velkém průřezu a zapojuje se sériově s vinutím kotvy. Vinutí je vloženo do drážek na nástavcích hlavních pólů. Sběrače tvoří kartáčové držáky, kde se nachází kartáče

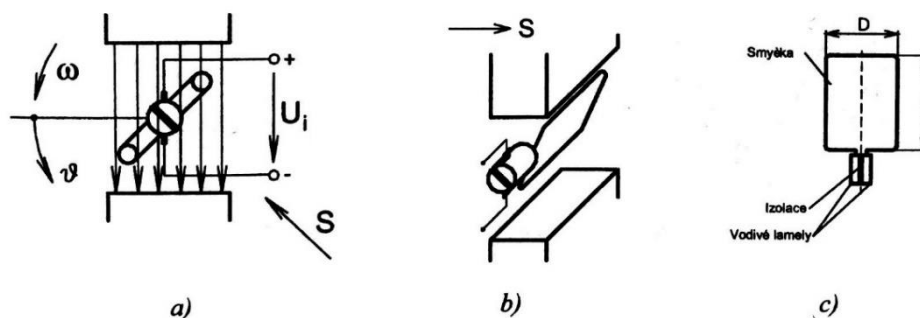
z grafitu. Kartáče se přitlačují pružinou ke komutátoru. U rotoru je hlavní částí hřídel, kam se upevňuje kotva. Kotva je tvořena svazkem z plechu s vinutím a komutátorem. Komutátor představuje střídač a stejnosměrný napájecí proud mění na střídavý, v opačném případě hovoříme o generátoru, u kterého se střídavý proud rotoru usměrní. Měděné lamely tvoří hlavní část. Další část rotoru představuje také ventilátor. Příčný řez stejnosměrným strojem je na obr. 34 [1].



Obr. 34 Příčný řez stejnosměrným strojem, 1) kostra, magnetický obvod, 2) póly hlavní, 3) póly pomocné, 4) drážkovaný rotor, 5) komutátor, 6) cívka rotoru [3]

3.3.2 Funkce stejnosměrného stroje

Stejnospměrný stroj pro svou činnost využívá opět silového působení magnetického pole na vodiče, kterými protéká elektrický proud a o indukci napětí do vodičů, které se pohybují. Pro správnou funkci stroje musí být zajištěna náležitá konstrukce stroje. Princip stejnosměrného stroje je možné pro zjednodušení vyjádřit pomocí smyčky, která se otáčí ve stejnorodém magnetickém poli. Skutečná konstrukce stroje se však liší. Konce smyčky jsou vyvedené na dvojici segmentů, které jsou mezi sebou izolované a ke zdroji napětí jsou připojeny přes kluzný kontakt (obr. 35).



Obr. 35 Princip stejnosměrného stroje: a) rotující smyčka v magnetickém poli, b) prostorový pohled, c) rozměry smyčky [3]

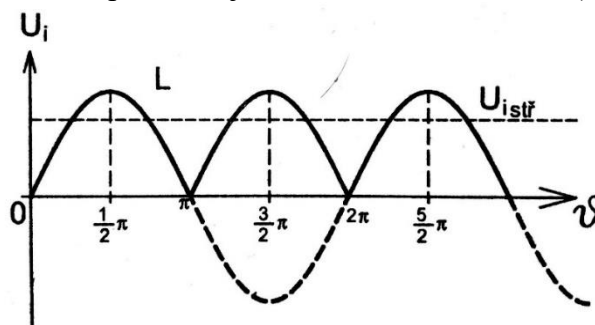
Předpokládáme, že magnetické pole je stejnorodé a kladný směr souřadnic obrácený ke směru B , je možné vyjádřit tok, který cívkou prochází pomocí rovnice 3.3.2.1.

$$\Phi_c = -\Phi_m \cos\vartheta; \vartheta = \omega t; \Phi_m = D \cdot l \cdot B \quad (3.3.2.1)$$

Z této rovnice vyplývá vztah pro indukované napětí (3.3.2.2).

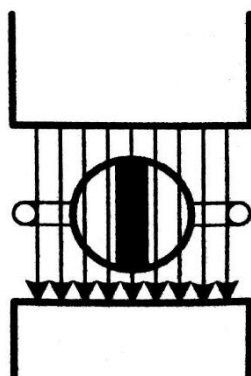
$$u_i = \frac{d\Phi_c}{dt} = \omega \Phi_m \sin\vartheta \quad (3.3.2.2)$$

Indukované napětí je tedy střídavé a vůči toku v cívkce je posunuté o 90° . Kvůli vyvedení smyčky přes izolované segmenty dojde k přepínání vývodů tím způsobem, že k náležitému kluznému kontaktu se připojuje strana smyčky ležící v adekvátní polorovině, která je daná začátkem souřadnic. Kluzný kontakt se nazývá kartáč. Jestliže budou vývody natočeny tak, jak je zobrazeno na obr. 35a, cívkky v poloze $\vartheta = 0, \pi$ atd., budou spojeny na krátkou dobu pomocí lamel nakrátko a cívka se tak při následujícím pohybu ke kartáčům přepojí obrácenými stranami. Tímto způsobem je uskutečněno usměrnění (obr. 36).



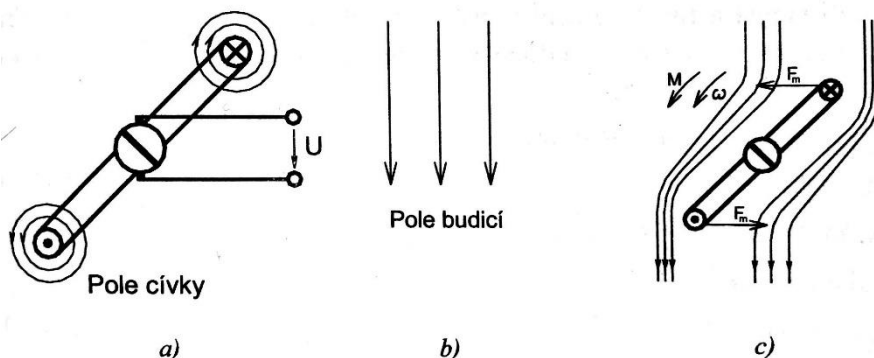
Obr. 36 Indukované napětí a jeho usměrnění [3]

K vyzkratování smyčky dochází pouze tehdy, když je indukované napětí nulové (obr. 37) a je to také bezpodmínečná podmínka pro činnost skutečného stroje.



Obr. 37 Poloha smyčky při nulovém indukovaném napětí [3]

Podle obr. 38 smyčkou protéká proud, který kolem smyčky vytvoří vlastní magnetické pole, a to vzájemným působením s budícím polem způsobí silové účinky. Moment je výsledkem účinku dvou mechanických sil (F_m) a svoje maximum dosáhne v úhlech $\vartheta = k\frac{\pi}{2}$, kde $k = 1, 3, 5$ atd., nulovou hodnotu bude mít pro $\vartheta = k\pi$, kde $k = 0, 1, 2$ atd. a moment tedy odpovídá hodnotě indukovaného napětí [3].



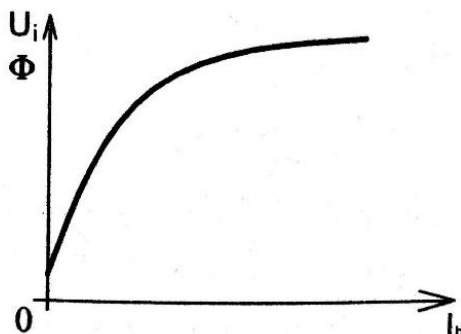
Obr. 38 Vznik točivého momentu: a) pole smyčky, b) budící pole, c) pole výsledné a silový účinek [3]

3.3.3 Vlastnosti stejnosměrných strojů

Stejnoseměrný stroj může pracovat buď jako motor nebo jako dynamo (generátor). Ze vztahů (3.3.3.1) je možné vyvodit vlastnosti těchto strojů.

$$U_i = k\Phi\omega; M = k\Phi I; U = U_i \pm R_a I \pm \Delta U_k; \Phi = \Phi(I_b) \quad (3.3.3.1)$$

Úbytek kartáč-lamela uvažujeme $\Delta U_k=0$ a odpor R_a zahrnuje veškeré odpory vinutí spojené sériově s kotvou. Bereme v potaz, že funkce $\Phi(I_b)$ není lineární a dochází zde k syčení (obr. 39). Otáčivá rychlost motoru vychází z výše uvedených rovnic a je možné ji vyjádřit vztahem 3.3.3.2.

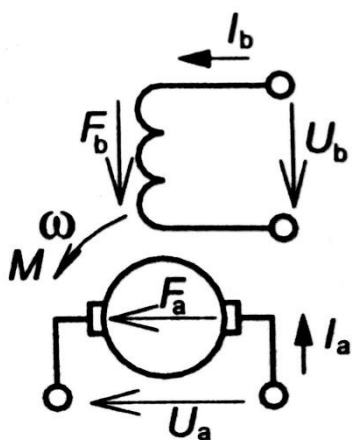


Obr. 39 Závislost toku (indukovaného napětí) na budícím proudu [3]

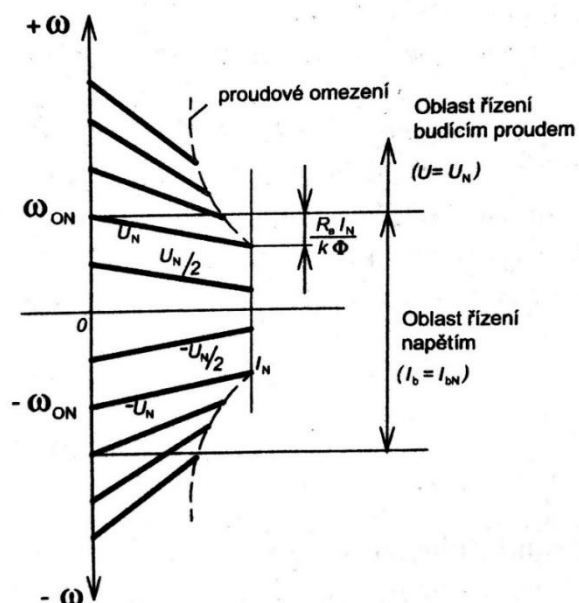
$$\omega = \frac{U_i}{k\Phi} = \frac{U - R_a I}{k\Phi}; M = k\Phi I \quad (3.3.3.2)$$

Zmíněné vztahy slouží ke zjištění chování těchto motorů. Velikost toku Φ závisí na budícím proudu, ale také na proudu kotvy. Dle způsobu buzení máme dva typy motorů, a to motor s cizím buzením a motor sériový.

Motor s cizím buzením umožňuje nezávislé řízení napětí kotvy a budícího proudu. Způsob zapojení je uveden na obr. 40 a pro stanovení charakteristik použijeme rovnice 3.3.3.2. Rychlostní charakteristiky (obr. 41) získáme právě po úpravě těchto rovnic.

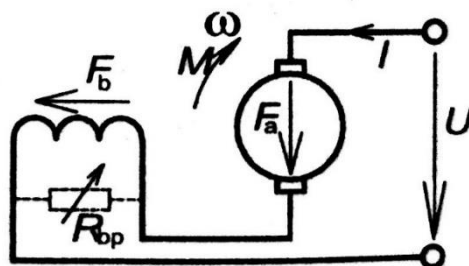


Obr. 40 Motor s cizím buzením [3]

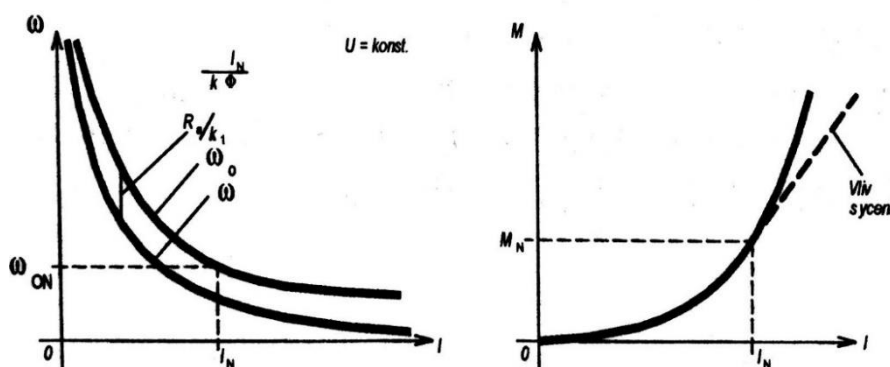


Obr. 41 Rychlostní charakteristiky stroje s cizím buzením [3]

U sériového motoru (obr. 42) je budící proud i proudem kotvy. Velikost buzení je závislá na tom, jak je stroj zatížen. Vlastnosti získáme ze stejných rovnic jako v předchozím případě. Tento motor nemůže být odlehčen. Vliv sycení, který je naznačen v momentové charakteristice (obr. 43) nemůže být zanedbán z důvodu velkých proudových přetíženích. Sériový motor lze odbudit odporem R_{bp} . Ze skupiny stejnosměrných strojů je jako jediný, který funguje i když je napájen střídavým napětím [3].



Obr. 42 Sériový motor [3]



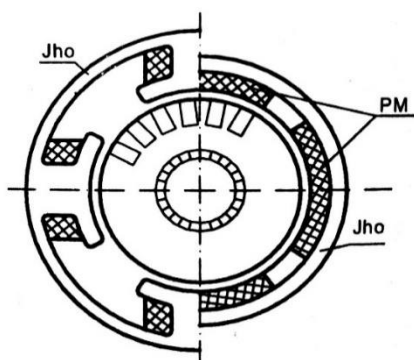
Obr. 43 Charakteristiky sériového motoru [3]

3.4 Speciální stroje

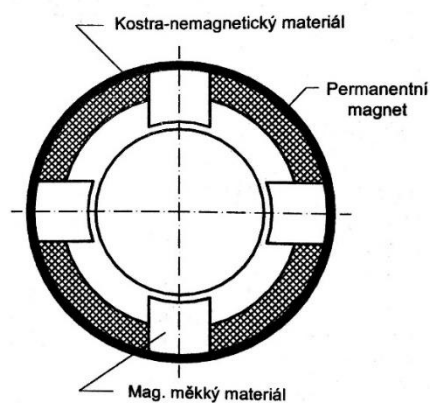
Další skupinou elektrických strojů jsou stroje speciální. Sem řadíme například stroje s permanentními magnety, spínané reluktanční motory, motory krokové, motory lineární atd.

Některé stroje vyžadují, aby nebylo magnetické pole závislé na proudu kotvy. Obvyklé konstrukce strojů pro splnění této podmínky využívají budící vinutí, ve kterém ale vznikají ztráty, které mohou být problémem u malých strojů. Proto se využívají místo budícího vinutí permanentní magnety. Moderní, avšak drahý materiál pro výrobu permanentního magnetu může být například SmCo nebo NdFeB na bázi vzácných zemin. Z ekonomického hlediska se však pro nenáročné aplikace využívají levnější materiály jako je AlNi. Při použití permanentních magnetů však nelze řídit budící pole, ale díky výkonové elektronice je možná

demagnetizace. Cenově přijatelné použití těchto magnetů je do výkonů v řádech kW. Čím větší je stroj, tím vzrůstá potřeba větších magnetů a tím pádem je vyšší i cena. Typické uspořádání stejnosměrného stroje s permanentními magnety je zobrazeno na obr. 42. Dalším možným uspořádáním, které se nazývá segmentové získáme menší průměr stroje z důvodu použití magnetů o polovičním průřezu (obr. 43). Dle umístění magnetů dělíme tyto stroje na stroje s magnety povrchovými a na stroje s magnety vnitřními.

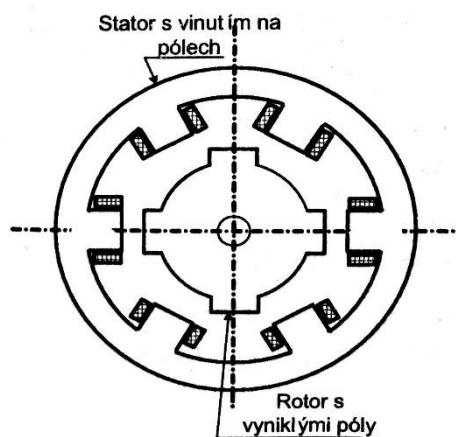


Obr. 42 Stejnosměrný stroj s budícím vinutím a PM, porovnání [3]



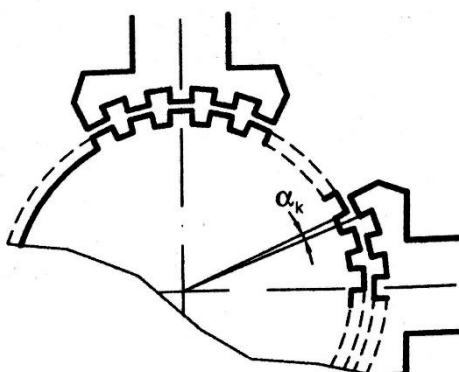
Obr. 43 Segmentové uspořádání [3]

Spínané reluktanční motory se označují také zkratkou SRM a jde o obměnu motoru synchronního v provedení s vyniklými póly. Jeho uspořádání je prakticky stejné jako u motoru krokového, avšak liší se řízením. Krokový motor v daných polohách zastavuje, ale SRM má otáčení kontinuální a právě toto je dosaženo rozdílným řízením. Musí se provést ve správný moment demagnetizace a přesunout ji na následující zuby. Charakter momentu je z tohoto důvodu pulzační a motor je tak při provozu hlučnější. Funkce motoru je podmíněna elektronickými zařízeními, bez kterých nemůže fungovat. Důležité je při návrhu dbát na správný počet zubů a také jejich rozměr. Příklad SRM je zobrazen na obr. 44.



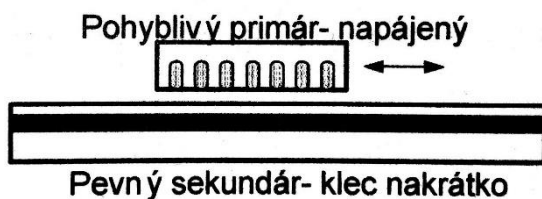
Obr. 44 SRM [3]

U krokových motorů je převedena změna buzení na určený úhel natočení, kterému říkáme krok. Jde o obměnu strojů synchronních. Zuby mají tyto stroje jak na statoru, tak i na rotoru. Ve směru, v jakém je nastavena nejvyšší magnetická vodivost, působí i moment a síla. Z budících cívek vychází magnetické napětí. Obvykle se na statoru nachází cívky a na rotoru permanentní magnety. Když dojde k přemístění toku na další zuby na statoru, síla zapříčiní natočení. U konstrukce uvedené na obr. 45 tvoří moment, který natáčí rotor, série spínání pólových párů.

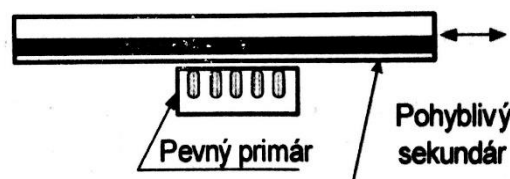


Obr. 45 Reluktanční krokový motor s velkým počtem kroků [3]

Lineární motory nachází svoje uplatnění tam, kde se vyžaduje posuvný pohyb, bez toho, aniž by se získal převodem z pohybu otáčivého. Používají se například v trakci, slouží také jako podavače, či dopravníky. Lineární motor lze získat z jakéhokoliv druhu točivého stroje. Předností je, když jedna část motoru nemusí být napájena, jako je to u motoru asynchronního, reluktančního či synchronního s permanentními magnety. Liší se oproti rotačnímu stroji tak, že část stroje při pohybu se dostane vně magnetického pole. Pokud je to u asynchronního motoru klec nakrátko, nenastává zde žádné silové působení. V případě části, která se napájí, dochází k poklesu magnetické vodivosti a nárůstu proudu. Obvyklé je, že obě části stroje nejsou stejně dlouhé. Na obr. 46 je případ krátkého pohybu, kde se využívá pevný sekundár, u dlouhého pohybu se používá pevný primár (obr. 47) [3].



Obr. 46 Lineární motor, krátký pohyb [3]



Obr. 47 Lineární motor, dlouhý pohyb [3]

4 Ventilační systémy točivých elektrických strojů

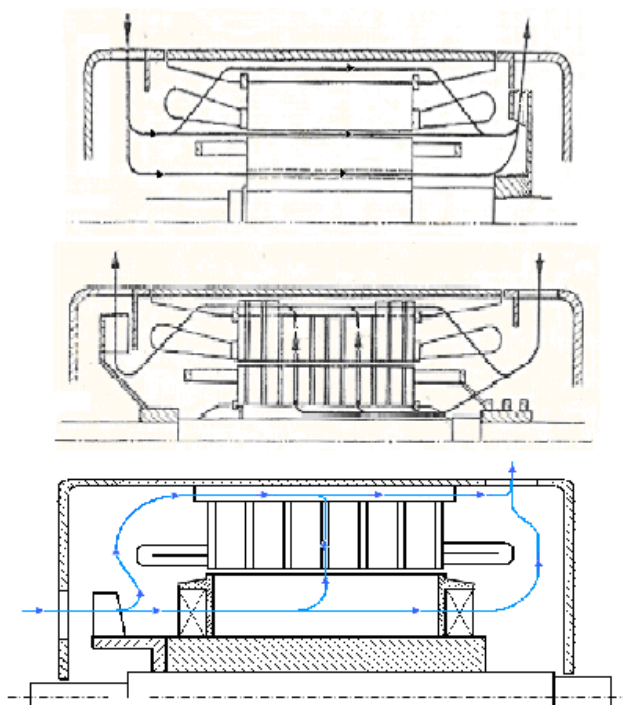
Využití elektrických strojů se neobejde beze ztrát a tyto ztráty se projevují tepelnými účinky. Oteplování prostupuje ze svého zdroje všude do okolního prostoru. Z tohoto důvodu je nutné u každého elektrického stroje umožnit odvod tepla použitím ventilace. Při návrhu stroje jsou stanoveny hodnoty tepelné rezistence izolace a tyto hodnoty nesmí být přesáhnuty. Při navrhování systému pro odvod tepla je třeba brát v úvahu typ chladicího média a výpočet jeho potřebného množství. Vzduch je pro chlazení používán nejvíce, a to z důvodu ceny a dostupnosti. Otevřená ventilace je používána pro menší až střední stroje a vzduch tedy samovolně prostupuje strojem. U strojů určených pro vysoké výkony je využíváno uzavřené cirkulace vzduchu, kde se využívá tepelné výměny ve výměnících (vzduchové či vodní). Mezi další používaná chladicí média řadíme např. vodu, vodík, olej či jiný plyn. Pro stanovení potřebného množství chladicího média pro daný stroj vždy vycházíme z tzv. kalorimetrické rovnice (4.0.0.1). Po její úpravě získáme vzorec pro výpočet množství chladiva (4.0.0.2). Hmotnost chladiva je označena jako m [kg], potřebné množství chladiva prošlého strojem Q [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$], suma ztrát potřebná k odvedení $\sum \Delta P$ [W], hustota chladicího média ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$], hmotnostní měrné teplo chladicího média c_p [$\text{W} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] a oteplení chladicího média prošlého strojem $\Delta \vartheta$ [K].

$$\sum \Delta P = c_p m \Delta \vartheta = c_p \rho Q \Delta \vartheta \quad (4.0.0.1)$$

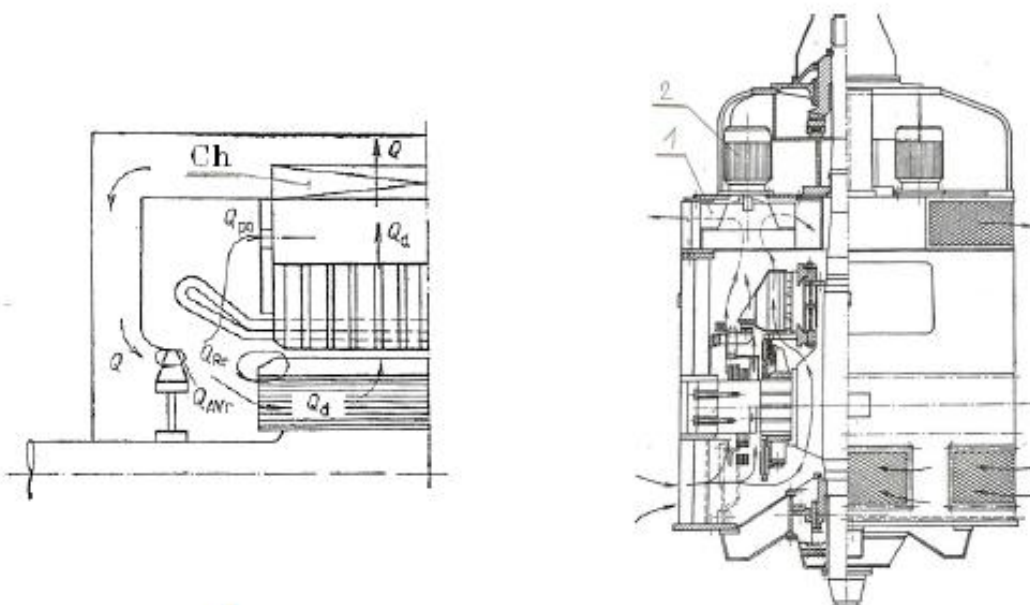
$$Q = \frac{\sum \Delta P}{\rho c_p \Delta \vartheta} \quad (4.0.0.2)$$

Každá konstrukce stroje má odlišný systém ventilace. Podle toho, jaký je ventilační systém se stroje dělí podle: provedení stroje (otevřené, uzavřené), majoritního smyslu proudění (radiální, axiální, smíšené), vstupu a výstupu chladicího média (jednostranný vstup – sací ventilace, oboustranný vstup – tlačná ventilace), zdroje tlaku (přírozená, vlastní, cizí).

Na obr. 48 lze vidět převládající směry ventilace a ve všech příkladech je zde otevřený ventilační obvod. Uzavřený systém je uveden na obr. 49. Chladič se zde nachází nahoře v kostře a je zde využit ventilátor axiální. U otevřeného stroje ve vertikální poloze je použito pro napájení ventilátorů samostatného zdroje. Chladicí médium (vzduch) zde vstupuje dole a ohřátý vystupuje nahoře. Horký vzduch je lehčí a šíří se nahoru [2].

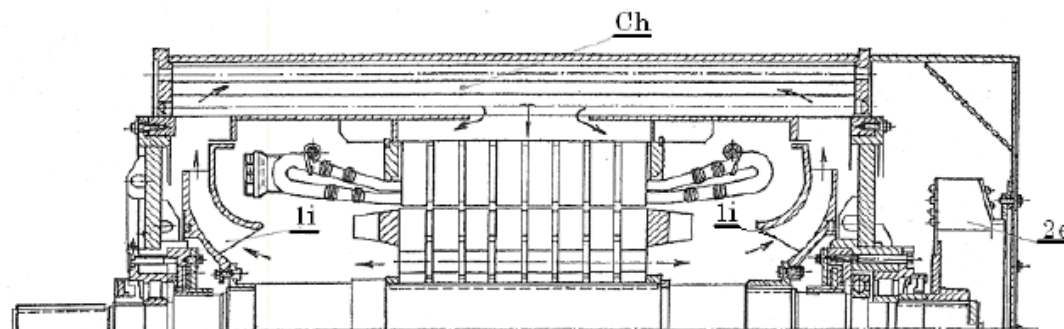


Obr. 48 Otevřený chladicí obvod a převládající směry ventilace, odshora: axiální sací ventilace jednostranná, radiální sací jednostranná, smíšená jednostranná tlačná ventilace [2]



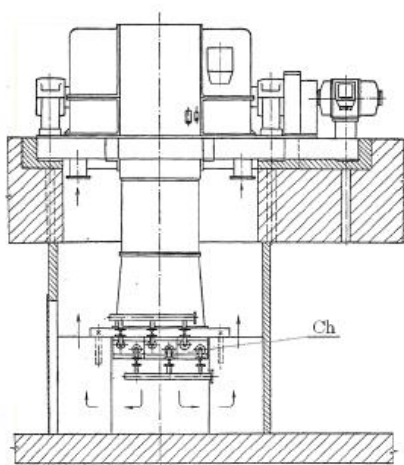
Obr. 49 Způsoby ventilace, vlevo uzavřená cirkulace chladiva s vestavěným chladičem uvnitř stroje, vpravo otevřený stroj ve vertikální poloze [2]

Uzavřený stroj, který má nahoře v kostře zabudovaný tepelný výměník, který je ofukován (Ch) lze vidět na obr. 50. Dvojice ventilátorů v radiálním provedení (1i) způsobuje proudění vzduchu uvnitř stroje. Ve vnějším okruhu je použit jeden ventilátor v radiálním provedení (2e).

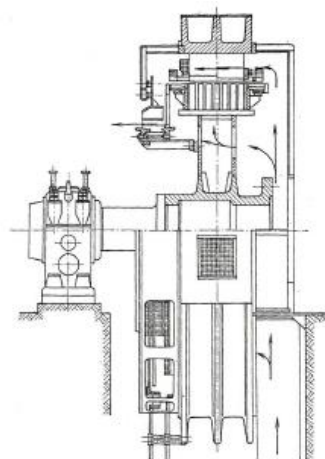


Obr. 50 Uzavřený stroj s vnějším a vnitřním chladícím okruhem [2]

Provedení, kdy má stroj oběh uzavřený a chladič se nachází pod strojem, je znázorněno na obr. 51. Otevřený stroj bez ventilátoru, kdy je k ventilaci využito např. rotorových žeber se nachází na obr. 52.



Obr. 51 Uzavřený oběh s chladičem pod strojem [2]



Obr. 52 Otevřený stroj bez ventilátoru [2]

U ventilačních obvodů má celkový tlak proudícího média tři složky, kterými jsou: statický tlak, dynamický tlak a tlak hydrostatický. Podle Bernoulliovy věty je celkový tlak (součet uvedených tří složek) konstantní.

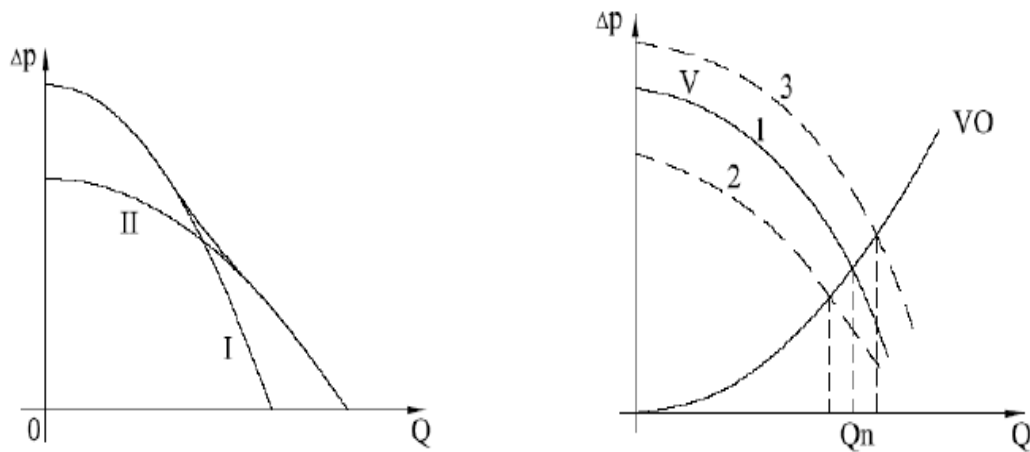
Elektrické stroje mají kromě mechanických a elektrických vlastností také hydraulické odpory, jejichž dva hlavní druhy jsou odpory třením a místní odpory. Při tření proudícího média o stěnu kanálu se jedná o odpory třením. Velikost je stanovena dle součinitele tření. Bere se zde v úvahu také to, jak je kanál dlouhý a také jeho hydraulický průměr. Pro získání součinitele tření je třeba znát, jaká je kvalita proudění a také drsnost povrchu kanálu. Místní odpory souvisí se změnou rychlosti a směrem proudění. Ve ventilačních obvodech je pro získání celkového odporu nutné jejich sériové či paralelní řazení [2].

Ve ventilačních obvodech se používají dva typy ventilátorů, a to radiální nebo axiální. U radiálních prostupuje chladící médium radiálním směrem a je zde využita odstředivost. Axiální (vrtulové) využívají proudění chladícího média směrem axiálním a lopatky připomínají vrtuli. U radiálních je možné dosažení většího tlaku a jsou jednodušší na konstrukci. Axiální však mají vyšší účinnost, protože jsou schopny dodat za nižšího tlaku více chladiva a nacházejí své uplatnění převážně u turboalternátorů. Příklad ventilátorů je na obr. 50.



Obr. 50 Radiální a axiální ventilátor [2]

Lopatky u radiálních jsou buď rovné nebo zahnuté. Pokud jsou lopatky rovné, může být ventilátor použit pro otáčení na obě strany. Z tohoto důvodu se využívají nejvíce. Na obr. 51 je běžná charakteristika radiálního ventilátoru. Větší vnitřní odpor znamená strmější charakteristiku. Správně sestrojený ventilátor se musí svou charakteristikou (V) sejít v bodě jmenovité hodnoty množství chladiva (Q_n) s charakteristikou daného ventilačního obvodu (VO). Pokud ventilátor bude předimenzován, bude docházet ke ztrátám. V opačném případě stroj neuchladí.



Obr. 51 Charakteristiky ventilátoru a obvodu ventilace, vlevo charakteristika pro radiální ventilátor, vpravo určení správného průběhu [2]

Axiální provedení ventilátorů je poněkud složitější a lze jej použít pouze jako jednosměrné. Lopatky tvoří základ ventilátoru a mají aerodynamický tvar. Ventilátor musí pracovat pouze ve stabilní oblasti a závisí na vstupu a výstupu [2].

Závěr

Vývoj elektrických strojů ve světě a v českých zemích a rozdělení elektrických strojů dle několika hledisek bylo rozebráno v kapitole 1. Dle rozdělení podle způsobu pohybu magnetického pole byla následující kapitola 2 věnována elektrickým strojům netočivým a kapitola 3 elektrickým strojům točivým.

Nejpoužívanějším netočivým elektrickým strojem je transformátor, a proto je v práci rozebrán podrobněji než reaktory a tlumivky, o kterých je zde jen krátká zmínka. U transformátorů je popsán jejich význam, oblasti použití, jejich provedení, princip funkce, náhradní schéma, chod transformátoru naprázdno a nakrátko a také jsou zde uvedeny trojfázové transformátory.

U strojů točivých v kapitole 3 jsou vždy popsány oblasti jejich použití, provedení včetně obrázků konstrukčních uspořádání, principy funkce a vlastnosti, a to jak u strojů asynchronních, synchronních a stejnosměrných. Další skupinu točivých strojů tvoří stroje speciální, do kterých se řadí například stroje s permanentními magnety, spínané reluktanční motory, krokové motory a motory lineární, které byly stručně popsány.

Ventilační systémy jsou popsány v kapitole 4, kde jsou uvedeny konkrétní příklady provedení ventilace a také druhy ventilátorů, u kterých jsou stručně charakterizovány jejich vlastnosti, zobrazeno jejich uspořádání a je zde naznačeno, jakým způsobem se podle charakteristiky ventilátoru a ventilačního obvodu navrhne radiální ventilátor.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ČERVENÝ, Josef. *Konstrukce elektrických strojů točivých*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2016. 57 s.
- [2] ČERVENÝ, Josef. *Stavba elektrických strojů*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2016. 150 s.
- [3] BARTOŠ, Václav. *Elektrické stroje*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. 140 s. ISBN 80-7043-444-9.
- [4] CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1958. 714 s.
- [5] BOUDA, Rudolf. *Technologie elektrických strojů netočivých*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1958. 172 s.
- [6] JEZIERSKY, Eugeniusz. *Transformátory*. 1. vyd. Praha: Academia, 1973. 650 s.
- [7] oEnergetice.cz [online]. Poslední změna 10.2.2017. [Cit. 4.6.2019].
Dostupné z: <http://www.oenergetice.cz/elektrina/asynchronni-stroje-konstrukce-princip-funkce-a-rizeni>