

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Moderní materiály a konstrukce magnetických obvodů
elektrických strojů**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Daniel JAROLÍM**
Osobní číslo: **E13B0088K**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Moderní materiály a konstrukce magnetických obvodů elektrických strojů**
Zadávací 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. Popište magnetické obvody elektrických strojů.
2. Uveďte přehled materiálů a konstrukci magnetických obvodů elektrických strojů.
3. Popište výrobu vybraných magnetických obvodů pro elektrické stroje.
4. Zhodnoťte využití a možnosti moderních materiálů v budoucnu.



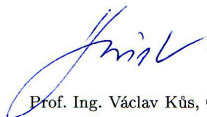
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

1. Pyrhönen, J., Jokinen, T., Hrabovcová, V.: Design of rotation electrical machines. John Wiley & Sons, Ltd, 2008.
2. Bartoš, V.: Elektrické stroje, Plzeň 2004
3. elektronické informační zdroje (IEEE)
4. Kopylov, I., P.: Stavba elektrických strojů. SNTL/MIR, 1988.
5. Kulkarni, S.V., Khaparde S.A., Transformer Engineering, Design and Practise. CRC Press 2004.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Zíka**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky
Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2013**
Termín odevzdání bakalářské práce: **9. června 2014**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Bakalářská práce řeší vývoj magnetických materiálů a magnetických obvodů. Je rozdělena na pět hlavních kapitol. V první části se pojednává o základních vlastnostech magnetických materiálů, popisu magnetického obvodu a jeho vývoji. Dále práce rozvádí běžné druhy magnetických materiálů, magnetických obvodů a porovnává jejich vlastnosti a možnosti využití. Následuje vize směru, kterým se elektrické stroje budou v dalších letech ubírat a v závěru je shrnutí práce s rozborem různých variant. Samozřejmě nechybí seznam použitých zdrojů a přílohy s podklady.

Klíčová slova

Magnetické materiály, feromagnetické materiály, elektrické stroje, magnetické obvody, elektrotechnické plechy, účinnost elektrických strojů, moderní magnetické materiály.

Abstract

The bachelor thesis deals with the development of magnetic materials and magnetic circuits. It is divided in five major chapters. The first part deals with the basic properties of magnetic materials, magnetic circuit and describe its development. The work also elaborates usual types of magnetic materials, magnetic circuits and compares their properties and uses. The following is the vision of the direction in which the electric machines will be in the next years to come and in the end is a summary of work in analyzing the different options. Of course there is a list of sources and attachments with the documents.

Key words

Magnetic materials, ferromagnetic materials, electrical machines, magnetic circuits, electrical sheets, the efficiency of electrical machinery, modern magnetic materials.

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, je legální.

.....
podpis

V Táboře dne 2.6.2014.

Daniel Jarolím

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Jiřímu Zítkovi za efektivní vedení, časovou flexibilitu a důležité rady, které mi pomohli při řešení práce.

Obsah

OBSAH	1
ÚVOD	3
1 TEORETICKÁ ČÁST	4
1.1 VLASTNOSTI MAGNETICKÝCH MATERIÁLŮ	4
1.2 TYPY MAGNETICKÝCH MATERIÁLŮ	7
1.3 VÝVOJ MAGNETICKÉHO OBVODU ELEKTRICKÝCH STROJŮ	8
1.4 PRINCIP MAGNETICKÉHO OBVODU	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA. 0
1.5 KONSTRUKCE A POPIS MAGNETICKÉHO OBVODU	1 CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
2 MAGNETICKÉ MATERIÁLY	13
2.1 MAGNETICKY MĚKKÉ MATERIÁLY PRO MAGNETICKÉ OBVODY ELEKTRICKÝCH STROJŮ	13
2.1.1 <i>Plechý a pásy z elektrotechnické oceli (slitiny FeSi)</i>	13
2.1.1.1 <i>Dělení plechů pro elektrotechniku</i>	14
2.1.1.2 <i>Výroba plechů z elektrotechnické oceli</i>	16
2.1.1.3 <i>Výroba orientovaných transformátorových plechů</i>	17
2.1.1.4 <i>Výroba orientovaných dynamových plechů</i>	17
2.1.2 <i>Železo a nízkouhlíkové oceli</i>	18
2.1.3 <i>Slitiny FeNi</i>	19
2.1.4 <i>Slitiny FeCo</i>	19
2.1.5 <i>Magneticky měkké ferity</i>	20
2.2 MAGNETICKY TVRDÉ MATERIÁLY PRO MAGNETICKÉ OBVODY ELEKTRICKÝCH STROJŮ	20
2.2.1 <i>Vlastnosti magneticky tvrdých materiálů</i>	21
2.2.1.1 <i>Magnetický obvod</i>	21
2.2.1.2 <i>Způsoby magnetování</i>	21
2.2.1.3 <i>Magnetická anizotropie</i>	22
2.2.1.4 <i>Curieova teplota</i>	22
2.2.1.5 <i>Povrchová úprava magnetů</i>	22
2.2.2 <i>Rozdělení magneticky tvrdých materiálů</i>	23
2.2.2.1 <i>Kompaktní kovové materiály</i>	23
2.2.2.2 <i>Práškové kovové materiály</i>	24
2.2.2.3 <i>Magneticky tvrdé ferity</i>	24
2.3 MODERNÍ MATERIÁLY A TECHNOLOGIE PRO ELEKTRICKÉ STROJE	25
2.3.1 <i>Ultratenké plechy</i>	25
2.3.2 <i>Práškové železo</i>	26
2.3.3 <i>Magneticky tvrdé materiály na bázi kovů vzácných zemin</i>	27
2.3.4 <i>Amorfní kovy (magnetická kovová skla)</i>	27
2.3.4.1 <i>Srovnání amorfních kovů s kovovými materiály</i>	28
2.3.4.2 <i>Výroba kovových skel</i>	29
2.4 PŘÍKLAD EKONOMICKÉHO VÝZNAMU MATERIÁLŮ PRO ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY	31
3 MAGNETICKÉ OBVODY ELEKTRICKÝCH STROJŮ	32
3.1 STEJNOSMĚRNÝ ELEKTRICKÝ STROJ	32
3.2 ASYNCHRONNÍ STROJ	33
3.3 TRANSFORMÁTOR	34
3.3.1 <i>Konstrukční uspořádání</i>	35
3.4 SYNCHRONNÍ STROJ	36
3.5 KROKOVÝ MOTOR	37
3.6 RELUKTANČNÍ MOTOR	38

4	VÝROBA MAGNETICKÝCH OBVODŮ	40
4.1	STATOROVÝ SVAZEK	40
4.2	PÓLY	42
4.3	ROTORY ASYNCHRONNÍCH A KOTVY STEJNOSMĚRNÝCH STROJŮ	44
5	STÁVAJÍCÍ A BUDOUCÍ VÝVOJ.....	47
5.1	ZVYŠOVÁNÍ ÚČINNOSTI ELEKTRICKÝCH MOTORŮ.....	47
5.2	PŘÍKLAD INOVACE MOTORŮ – SYNCHRONNÍ MOTORY DINEO LSRPM	49
6	ZÁVĚR	51
7	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	52
8	PŘÍLOHY.....	53

Úvod

V dnešní době si již nikdo nedovede představit svět bez elektřiny a elektrických strojů kolem nás. Málokdo se však zabývá otázkami „Kdy vznikl první elektrický stroj? Jak vypadal? Co je základem každého elektrického stroje? Z jakých materiálů se skládá a proč?“ Tyto otázky mi dali podnět pro vznik mé práce a ve shrnutí se snažím nastínit ucelený obrázek o „srdci“ každého elektrického stroje a materiálu, ze kterého je vyroben.

Zásadní otázkou při výrobě elektrického stroje je energetická náročnost vlastního jádra, chcete-li magnetického obvodu. Nyní již není problém vyrobit stroj pro jakoukoliv činnost, ale již delší dobu se zabýváme otázkou úspory energie. Ceny energií se každým rokem zvyšují, životní prostředí se více „zatěžuje“ a nároky každého člověka rostou. Začátkem nového tisíciletí je zásadní otázkou, jak „přežít“ tyto neúměrně se zvyšující požadavky? Tyto znepokojivé podněty mě vedly ke snaze pochopit, jakým způsobem lze zlepšovat magnetické obvody a jakým směrem se vyvíjejí.

Ve své bakalářské práci se zabývám materiály a magnetickými obvody elektrických strojů na stejnosměrný a střídavý proud. Zaměřuji se na jejich hlavní přednosti, výrobu, použití a vývoj. Osobně zastávám názor, že v dnešní době je účinnost elektrických strojů na výborné úrovni a lepší využití najdeme pouze v lepších materiálech, jejich technologii zpracování a kombinaci konstrukcí různých magnetických obvodů.

1 Teoretická část

1.1 Vlastnosti magnetických materiálů

Magnetické pole v materiálu nebo magnetické pole zavedené do látky, můžeme hodnotit dvojitým účinkem:

- a) **SILOVÝM** – např. jakou silou je stáčena magnetka z libovolného směru do směru pole. Síla připadající na jednotku pole ($N \cdot Wb^{-1}$) je intenzita H magnetického pole ($A \cdot m^{-1}$) [1].
- b) **INDUKČNÍM** – tj. kolik voltů se naindukuje do jednoho závitu drátu cívky při změně pole procházejícího plochou závitu za jednu sekundu. Čáry vyznačující směr pole se v tomto případě nazývají indukční linie. Počet indukčních linií procházejících jednotkou průřezu S kolmého na tyto linie (hustota linií) se nazývá magnetická indukce B ($Wb \cdot m^{-2}$) [1].

Převodní součinitel η_0 mezi B a H (tedy mezi indukčními a silovými účinky) se nazývá permeabilita vakua:

$$\mu_0 = \frac{B_0}{H}, \quad \eta_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} (H \cdot m^{-1})$$

Každá siločára, vnucená ovinutou cívkou do prstencového jádra materiálu, v něm seřadí magnetické dipóly do určitého počtu κ_m řetězců - κ_m je tzv. magnetická susceptibilita.

Celkové magnetické pole Φ v magnetickém materiálu bude tedy dáno počtem B_0 indukčních linií vyslaných do materiálu, jakoby do vakua:

$$\Phi_0 = B_0 \cdot S = \eta_0 \cdot H \cdot S$$

kde S je plocha průřezu sloupku magnetického materiálu.

Počtem indukčních linií vytvořených seřazenými řetězci:

$$\Phi_m = \kappa_m \cdot \eta_0 \cdot H \cdot S$$

$$\Phi = \Phi_m \cdot \Phi_0 = \eta_0 \cdot H \cdot S + \kappa_m \cdot \eta_0 \cdot H \cdot S$$

$$\Phi = (1 + \kappa_m) \cdot \eta_0 \cdot H \cdot S$$

a jeho hustota:

$$B = \Phi \cdot S^{-1}$$

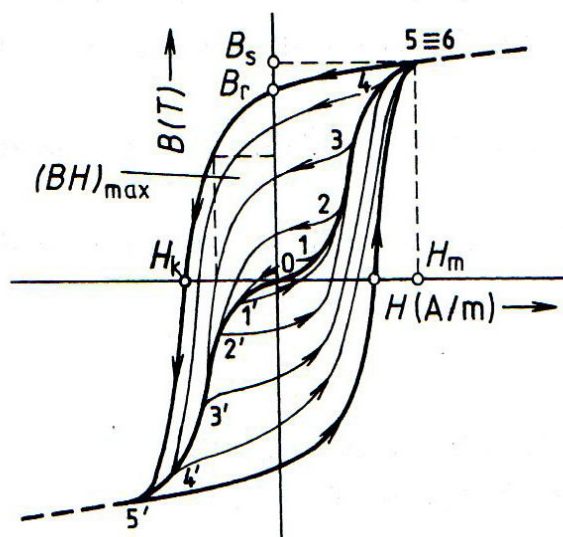
$$B = (1 + \kappa_m) \cdot \eta_0 \cdot H$$

Hodnota $1 + \kappa_m = \eta_r$ představuje zvýšení počtu indukčních linií v magnetické látce vzhledem k vakuu a nazývá se relativní permeabilita magnetické látky (z angl. permeability – propustnost) [1].

Hustota celkového magnetického pole $B = \eta_r \cdot \eta_0 \cdot H \Rightarrow B = \eta \cdot H$, kde η je permeabilita magnetické látky.

Pro těleso magnetizované střídavým proudem s rostoucí amplitudou je závislost indukce na intenzitě vyjádřena graficky na obr. 1.1. Amplituda intenzity H se zvyšuje z bodu 0 v obou směrech do bodů 1, 1', 2, 2' atd. Je zde vidět, že při snižování intenzity H se indukce B

nesnižuje po křivce růstu, ale poněkud pomaleji. Tento jev se nazývá hystereze. Na grafu se projevuje jako hysterezní smyčka [1].



Obr. 1.1 Závislost magnetické indukce B na intenzitě H magnetického pole při magnetizaci tělesa střídavým proudem s rostoucí amplitudou [1].

Špičky jednotlivých hysterezních křivek jsou body magnetizační křivky látky.

Význačné body na hysterezní smyčce vypovídají o vlastnostech magnetických materiálů, poskytující parametry potřebné pro posouzení vhodnosti použití těchto materiálů (obr. 1.1):

B_s - sytná indukce, při níž jsou v látce všechny magnetické dipóly již natočeny do směru pole,

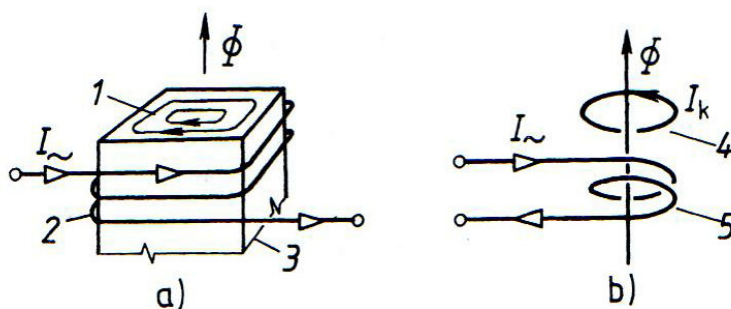
B_r - remanentní indukce daná zbytkovou orientací pole, odstraní-li se magnetizující intenzita H ,

H_k - koercitivita materiálu, tj. intenzita pole potřebná ke zrušení remanentní indukce B_r ,

H_m - maximální hodnota intenzity magnetizujícího pole.

Lze tedy určit také plochu hysterezní křivky, tj. měřítko hysterezních ztrát v látce. Jednotkou je $J \cdot m^{-3}$. Faktor kvality magnetu = míru pro energii potřebnou k odmagnetování permanentního magnetu $(B \cdot H)_{\max}$ (maximální součin indukce a intenzity v demagnetizační větvi hysterezní smyčky).

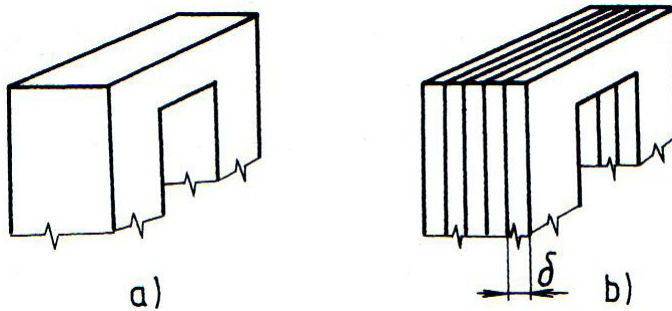
V magnetických materiálech dochází vedle hysterezních ztrát ještě ke ztrátám vířivými proudy. Tzv. Foucaultovy proudy, vznikají při střídavé magnetizaci transformátorového jádra budicím vinutí (obr. 1.2). Ztráty vířivými proudy jsou vykládány jako ztráty v myšleném zkratovém vinutí - I_k je zkratový proud. Jde o ztráty Joulovým teplem v jádru transformátoru (=jádro se silně zahřívá). Vířivé proudy jsou úměrné druhé mocnině tloušťky δ plechu a druhé mocnině frekvence proudu. Proto se místo plného jádra používá laminované jádro („listění“) – obr. 1.3. Skládáním plechů (listů) se značně zvýší odpor jádra pro vířivé proudy [1].



Obr. 1.2 Vznik vířivých

proudů v jádru transformátoru:

a) realita, **b)** fyzikální model 1- vířivé proudy uvnitř neděleného jádra, 2-budicí vinutí, 3-jádro, 4- myšlené zkratové vinutí, 5- budicí vinutí [1].



Obr. 1.3 Způsob laminace transformátorového jádra:
a) plné jádro, **b)** jádro sestavené z plechů o tloušťce δ [1].

1.2 Typy magnetických materiálů

Pro potřeby elektrotechniky byly vyvinuty dvě velké skupiny magnetických materiálů: magneticky měkké a magneticky tvrdé.

a) Magneticky měkké materiály splňují tyto požadavky [1,5]:

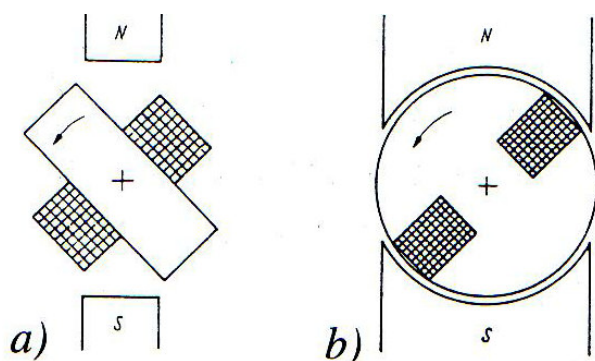
- mají malou koercitivitu
- v jejich činnosti se objevuje střídavý proud
- lze je snadno přemagnetovat (mají měkké vazby držící magnetické dipóly v rovnovážných polohách)
- mají vysokou indukci při nízkém budícím poli (napětí indukované v závitě magnetizující cívky musí být co největší při malé změně pole)
- mají nepatrné ztráty energie, a to jak ztráty hysterezní, tak ztráty způsobené vířivými proudy
- rychle dosáhne maximální hodnoty napětí (malá koercitivita)
- příklady: křemíková ocel, slitiny železa s niklem, čisté železo, kobaltová ocel, práškové magneticky měkké materiály, magneticky měkké ferity, slinované kovové prášky a amorfní slitiny

b) Magneticky tvrdé materiály splňují tyto požadavky [1,5]:

- mají vysokou koercitivitu
- v jejich činnosti se objevuje vysoké stejnosměrné magnetické pole, které má za následek vysokou indukci ve vzduchové mezeře
- příklady: kalená uhlíková ocel, ALNI, ALNICO, magneticky tvrdé ferity

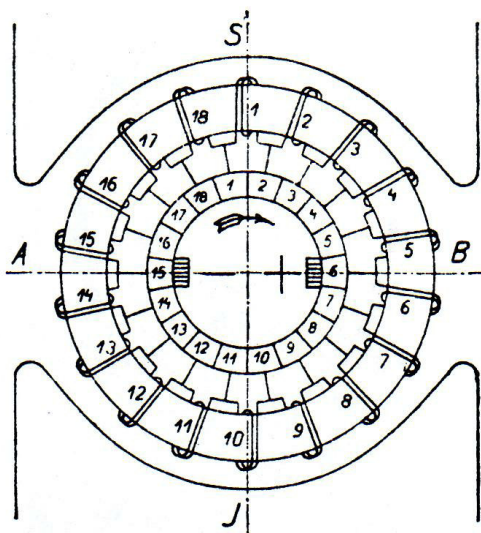
1.3 Vývoj magnetického obvodu elektrických strojů

Z historického hlediska předcházelo výrobě prvního elektrického stroje mnoho experimentálních pokusů s magnetickým obvodem. První prakticky použitelný stejnosměrný stroj navrhl Werner von Siemens (rok 1856), který si uvědomil, že je třeba lépe vyřešit magnetický obvod stroje. Cívku, do níž se indukuje napětí, navinul na železné jádro, které se otáčelo mezi póly permanentního magnetu (obr. 1.4 a). Tím zmenšil rozptylové magnetické pole, docílil podstatně větších změn magnetického toku spřaženého s cívkou a tedy (u dynama) většího indukovaného napětí. Tento účinek ještě podstatně zvětšil vhodným tvarem rotujícího jádra (kotva tvaru „dvojitého T“ na obr. 1.4 b). V roce 1867 učinil Siemens další významný objev – tzv. dynamoelektrický princip. K pochopení jeho podstaty je dobré poznamenat, že až do té doby se magnetický obvod stejnosměrného stroje budil permanentními magnety. Aby byla možná regulace (u dynam regulace napětí, u motorů regulace otáček), byl permanentní magnet nahrazen elektromagnetem napájeným z baterie – stroj s cizím buzením [2].



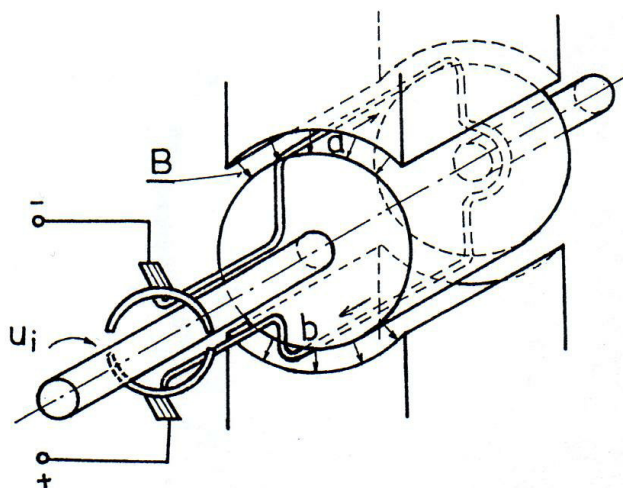
Obr. 1.4 Siemensovo řešení magnetického obvodu stejnosměrného stroje z roku 1856: **a)** princip, **b)** kotva tvaru „dvojitého T“ [2].

Dalším mezníkem ve vývoji stejnosměrných strojů bylo provedení rotoru (kotvy) ve tvaru prstence, zhotoveného se svinutého železného drátu. Na tomto prstenci byla navinuta cívka, z níž byly vyvedeny odbočky k lamelám komutátoru, obr. 1.5. Autorem této konstrukce z roku 1860 byl Ital Antonio Pacinotti. Jeho myšlenku později využil Belgičan Zéne Théophile Gramme. Pro rotor tohoto stroje se ujalo označení Grammova kotva nebo Grammův prsteneček. Nevýhodou prstencového vinutí bylo, že se aktivně uplatňovala vrstva vodičů na vnějším obvodu Grammova prstence. Vrstva na vnitřní části prstence byla magneticky odstíněna, neindukovalo se do ní napětí a nebyla tedy využita (ohmické úbytky a malá účinnost stroje) [2].



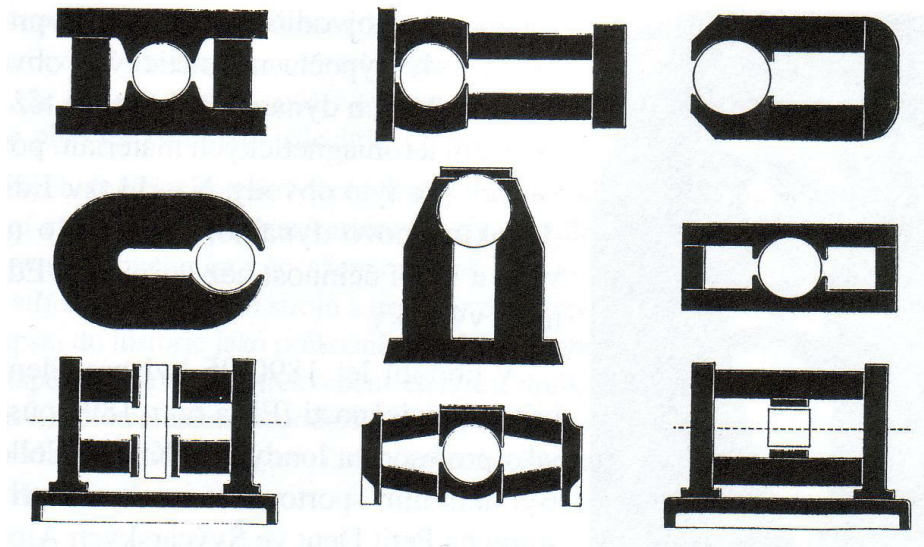
Obr. 1.5 Princip stejnosměrného stroje s Grammovým prstencem [2].

Nedostatky stejnosměrného stroje s Grammovým prstencem odstranil Fridrich von Hefner-Alteneck, který zavedl bubnové vinutí. Firma Westinghouse pak začala vyrábět drážkované kotvy, složené z plechů. U bubnového vinutí jsou aktivní obě strany cívek. Leží na vnějším povrchu kotvy, přičemž jedna strana cívky je pod severním pólem statoru a její druhá strana leží pod jižním pólem. Tento typ vinutí je používán doposud. Na obr. 1.6 je vyznačen princip dvupólového stejnosměrného stroje s bubnovým vinutím [2].



Obr. 1.6 Princip dvupólového stejnosměrného stroje s komutátorem [2].

Koncem 19. Století bylo vyvinuto mnoho variant konstrukčního provedení stejnosměrných strojů. Na obr. 1.7 jsou zobrazeny různé způsoby uspořádání jejich magnetických obvodů. Některé z nich jsou zřejmě nevýhodné pro svůj velký magnetický rozptyl [2].



Obr. 1.7 Různá provedení magnetického obvodu stejnosměrných strojů z konce 19. století [2].

Do této doby byly elektrotechniky opomíjeny fyzikální zákony a vycházeli z různých přibližných formulí. Nepřehlednost matematického zápisu bránila v aplikaci na optimalizovaný návrh stroje. Jedním z prvních tvůrců teorie elektrických strojů byl John Hopkinson. Získal patent na trojvodičový stejnosměrný rozvod (ekonomicky byl výhodnější než do té doby používaný dvojvodičový rozvod). Vypracoval metody výpočtu magnetických obvodů stejnosměrných dynam a zabýval se též výzkumem feromagnetických materiálů používaných pro tyto obvody. S Hopkinsonovým jménem je spojena důležitá formule, jež má v teorii magnetických obvodů analogický význam jako Ohmův zákon v elektrických obvodech – Hopkinsonův zákon [2]:

$$U_m = \Phi \sum_i Rm_i$$

U_m ... magnetomotorické napětí

Φ ... magnetický indukční tok

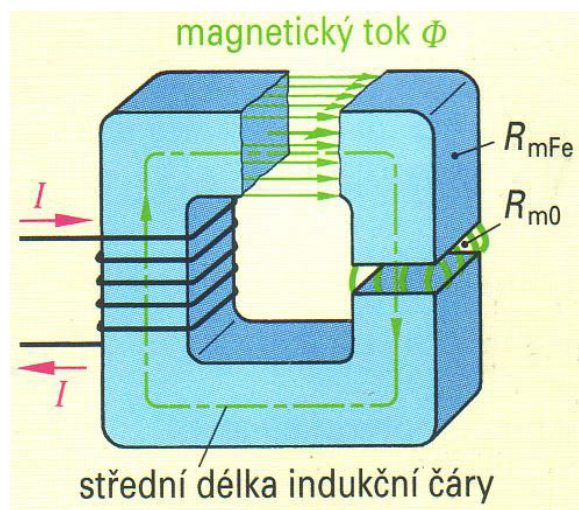
Rm_i ... magnetický odpor

1.4 Princip magnetického obvodu

Magnetickým obvodem nazýváme dráhu magnetického toku, která má takové vlastnosti, že jí prochází značná část toku a jen nepatrná část jde mimo tuto dráhu jako tzv. rozptylový tok. Proto magnetický obvod zhotovujeme z feromagnetických materiálů s velkou permeabilitou μ_r , tj. s malým odporem pro magnetický tok. Magnetický tok v magnetickém

obvodu může být vytvořen buď proudem, nebo permanentními magnety. Pro naše zaměření se budeme zabývat magnetickými obvody vytvořené proudem [3].

V praxi se vyskytují magnetické obvody uzavřené (s žádnou nebo malou vzduchovou mezerou) nebo otevřené (přerušené vzduchovou mezerou). Magnetický obvod uzavřený představuje např. magnetický obvod transformátoru, přerušený magnetický obvod je např. magnetický obvod točivého elektrického stroje. Při přerušeném magnetickém obvodu vstupuje magnetický tok do rozhraní dvou prostředí, feromagnetikum – vzduch [3].



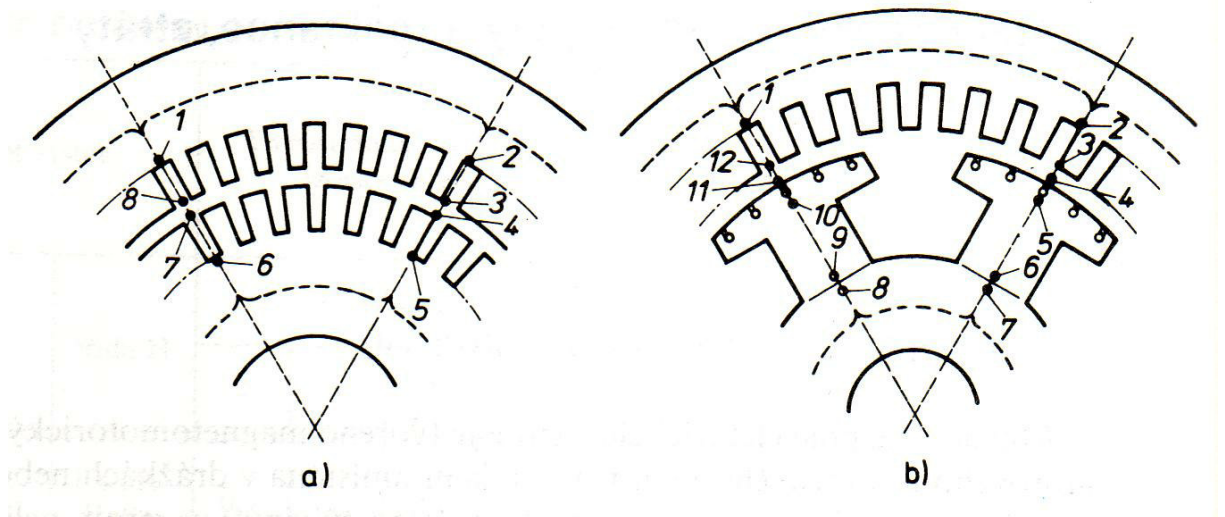
Obr. 1.8 Magnetický obvod se vzduchovou mezerou s popisem [3]:

R_{mFe} ... magnetický odpor železa,

R_{m0} ... magnetický odpor vzduchu.

1.5 Konstrukce a popis magnetického obvodu

Magnetický obvod elektrického stroje se rozdělí na řadu jednotlivých částí, z nichž každá má poměrně jednoduchý tvar a je z materiálu s jistou magnetizační charakteristikou. Předpokládá se rovněž, že v jednotlivých částech je znám hlavní směr indukčních čar magnetického toku. Ve strojích s rozloženým vinutím na statoru i rotoru, např. ve strojích asynchronních jsou to části (obr. 1.8 a): **1-2-** jho statoru, **2-3** a **1-8-** zuby statoru, **4-5** a **6-7-** zuby rotoru, **3-4** a **7-8-** vzduchová mezeru, **5-6-** jho rotoru. Ve strojích s vyjádřenými póly, např. v synchronních strojích (obr. 1.8 b), jsou to části: **1-2-** jho statoru, **2-3** a **1-12-** zuby statoru, **3-4** a **12-11-** vzduchová mezeru, **4-6** a **9-11-** póly, **7-8-** jho rotoru [4].



Obr. 1.9 Magnetický obvod elektrického stroje [4]:

a) s rozloženými vinutími, **b)** s vyniklými póly.

Magnetické pole je tvořeno magnetomotorickým napětím statorového a rotorového vinutí, která jsou umístěna v drážkách nebo na jádrech vyniklých pólů. Magnetické pole ve stroji se dělí na hlavní a rozptylové. Jako hlavní magnetické pole chápeme pole, jehož indukční čáry jsou spřaženy se závity statorového i rotorového vinutí. Naproti tomu indukční čáry pole rozptylového jsou spřaženy se závity jednoho vinutí – statorového nebo rotorového [4].

Indukční čáry hlavního pole se uzavírají částmi magnetického obvodu statoru a rotoru a protínají vzduchovou mezeru. V příčném řezu jsou indukční čáry magnetického toku rozloženy v sektoru, který zaujímá $1/2p$ -tou část celého příčného řezu. Na obrázku obr. 1.8 a je tento sektor u strojů s vinutím statoru i rotoru uloženým v drážkách, na obr. 1.8 b u strojů s vyniklými póly na rotoru. Čárkovaně je zakreslena střední čára magnetického toku jedné pólové dvojice [4].

2 Magnetické materiály

2.1 Magneticky měkké materiály pro magnetické obvody el. strojů

Části magnetického obvodu elektrických strojů se vyrábějí buď z tenkých ocelových plechů pro elektrotechniku (=elektrotechnické plechy) nebo z lité oceli (odlitky), případně z dalších magnetických materiálů. Tenké plechy pro elektrotechniku se vyrábějí pokud možno z nejčistší oceli nebo z elektrooceli. Některé plechy se válcují pouze za tepla, jiné v kombinaci za tepla a za studena. Pro magnetické obvody elektrických strojů se používají materiály magneticky měkké s úzkou hysterezní křivkou [4].

V elektrotechnickém průmyslu se převážně používají anizotropní plechy válcované za studena, které mají ve směru válcování větší permeabilitu a menší ztráty v polích s malou intenzitou než plechy válcované za tepla. U anizotropních plechů jsou magnetické vlastnosti ve směru válcování stejné a ve směru kolmém různé [4].

2.1.1 Plechy a pásy z elektrotechnické oceli (slitiny FeSi)

Základní surovinou na výrobu elektrotechnických plechů je železo, protože mohou být syceny až do $B_s = 2,15 T$. Koercitivita, permeabilita a hysterezní ztráty jsou silně ovlivněny chemickou čistotou, krystalovými poruchami, vnitřním pnutím a nežádoucími prvky podporující stárnutí (kyslík, dusík, uhlík) [4].

Elektrotechnické plechy jako takové jsou vyráběny z křemíkové oceli (Fe + 0,5 až 4,5 % Si). Legující příměs křemík má rozhodující vliv na magnetické, elektrické a mechanické vlastnosti materiálu. Ocel s malým obsahem křemíku má menší poměrnou permeabilitu a větší měrné ztráty. Ocel s vysokým obsahem křemíku má menší ztráty vířivými proudy a ztráty hysterezní a vysokou poměrnou permeabilitu v polích s malou a střední intenzitou. Přísada křemíku zmenšuje měrnou hustotu a zvětšuje rezistivitu oceli. Oceli s obsahem křemíku 0,8 až 1,8 % mají hustotu $7\,800\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a rezistivitu $0,25\cdot 10^{-6}\ \Omega\cdot\text{m}$. Pro ocel s obsahem křemíku 3,8 až 4,8 % jsou tyto hodnoty $7\,550\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a $0,5\cdot 10^{-6}\ \Omega\cdot\text{m}$. S větší příměsí křemíku narůstají i obtíže při zpracování. Materiál se pak stává křehkým a lámavým [4].

Nejvýraznějším efektem, který zlepšuje magnetické vlastnosti pásů z křemíkové oceli je krystalografická orientace zrn označovaná jako textura. Dosahuje se jí pomocí tváření a válcování. Elektrotechnické pásy se vyrábějí jako izotropní (s malou texturou) a anizotropní. Směr válcování je shodný se směrem snadné magnetizace. Elektrotechnické křemíkové oceli se dělí podle tváření a textury [4]:

- válcované za tepla, izotropní: obsah křemíku (3,5 až 4,6 %). Používají se pro jádra sdělovacích transformátorů se zaručenou permeabilitou při malé intenzitě magnetického pole a pro jádra nízkofrekvenčních tlumivek.
- válcované za studena, izotropní: obsah křemíku okolo 2,5 %. Používají se zejména pro točivé stroje.
- válcované za studena, anizotropní: obsah křemíku cca 3 %. Vyrábějí se ve tvaru tenkých pásů a mají orientovanou strukturu. Povrch je často potažen izolační vrstvou. Používají se pro elektromagnetické stroje netočivé, točivé a přístroje.

Pro zmenšení ztrát vířivými proudy se plechy izolují lakem nebo mají už z výroby tepelně stálou izolační vrstvu.

Pro části magnetického obvodu pracující v neproměnných magnetických polích se používá ocel o obsahu uhlíku do 0,04 %, ale i uhlíková ocel a litina.

Plechý značky 1211 o tloušťce 0,5 nebo 1,0 mm se používají pro výrobu hlavních pólů stejnosměrných strojů. Pro póly synchronních strojů se používají plechy o tloušťce 1 až 2 mm a i plechy tlustší [4].

Tlustší ocelové plechy se používají pro výrobu svařovaných koster stejnosměrných strojů a rotorových těles synchronních strojů. Tloušťka těchto plechů se pohybuje v rozmezí od 1,5 do 12 mm. Magnetické vlastnosti jsou stejné jako u oceli na odlitky [4].

2.1.1.1 Dělení plechů pro elektrotechniku

Podle normy GOST 21427.0-75 se plechy pro elektrotechniku dělí na 38 značek. Plechy se dodávají ve svitcích a pásech, případně v tabulích a jsou určeny pro zhotovení magnetických obvodů elektrických strojů a přístrojů [4].

Označení plechů podle předešlé normy je složeno ze čtyř číslic. První číslice označuje třídu oceli podle vnitřní struktury a druhu válcování. Druhá číslice vyjadřuje obsah křemíku, třetí značí skupinu podle základní normální charakteristiky. Čtvrtá číslice pak značí pořadové číslo typu oceli [4].

Anizotropní plechy (válcované za studena)	3311, 3412, 3413, 3414, 3415, 3416, 3404, 3405, 3406
Izotropní plechy (válcované za studena)	2011, 2012, 2013, 2111, 2112, 2211, 2212, 2311, 2312, 2411, 2412
Izotropní plechy (válcované za tepla)	1211, 1212, 1213, 1311, 1312, 1313, 1411, 1412, 1413, 1511, 1512, 1513, 1514, 1521, 1561, 1562, 1571, 1572

Tabulka č. 1.: Označení plechů podle normy GOST 21427.

Plechý pro elektrotechniku se dále dělí podle vnitřní struktury a podle druhu válcování na tři třídy [4]:

- 1 – izotropní plechy válcované za tepla,
- 2 – izotropní plechy válcované za studena,
- 3 – anizotropní plechy válcované za studena s žebrovou strukturou.

Podle obsahu křemíku se plechy dělí na šest skupin [4]:

- 0 – do 0,4 % Si včetně (ocel nelegovaná),
- 1 – 0,4 až 0,8 % Si,
- 2 – 0,8 až 1,8 % Si,
- 3 – 1,8 až 2,8 % Si,
- 4 – 2,8 až 3,8 % Si,
- 5 – 3,8 až 4,8 % Si.

Podle normální charakteristiky se ocel člení na 5 skupin [4]:

0 – měrné ztráty při indukci 1,7 T a frekvenci 50 Hz ($p_{1,7/50}$),

1 – měrné ztráty při indukci 1,5 T a frekvenci 50 Hz ($p_{1,5/50}$),

2 – měrné ztráty při indukci 1 T a frekvenci 400 Hz ($p_{1,0/400}$),

6 – magnetická indukce ve stálých magnetických polích při intenzitě pole $0,5 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} (B_{0,4})$,

7 – magnetická indukce v magnetických polích při intenzitě pole $10 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} (B_{10})$.

Plechý se výrobci elektrických strojů dodávají tepelně zpracované. Podle stavu povrchu se plechy vyrábějí mořené (T) a nemořené (NT). Povrch plechů musí být hladký, bez povrchové rzi a bez nečistot, které brání nanesení potřebné izolační vrstvy [4].

Plechý dodávané ve svitcích a pásech se vyrábějí o tloušťkách 0,28; 0,30; 0,35; 0,50 mm a šířkách 170, 180, 190, 200, 240, 250, 300, 325, 360, 400, 465, 500, 750, 860 a 1 000 mm. Mezní úchytky tloušťky plechu, šířky svitku nebo pásu jsou dány příslušnou rozměrovou normou [4].

Izotropní plechy válcované za studena se vyrábějí ve svitcích a pásech a mají izolaci tepelně stálou (TE), tepelně nestálou (E) a plechy bez ochranné vrstvy (BP). Izotropní plechy mají tloušťky 0,35; 0,5 a 0,65 mm a svitky mají šířky 500, 530, 600, 670, 750, 860 a 1 000 mm [4].

2.1.1.2 Výroba plechů z elektrotechnické oceli

První plechy z křemíkové oceli našli uplatnění pro elektrické stroje až počátkem 19. století, kdy se podařilo snížit obsah uhlíku na 0,1 % (uhlík je jednou z hlavních příčin stárnutí plechů). Pro plech na točivé stroje byl stanoven maximální obsah křemíku na 3,5 % a pro transformátory plech s největším obsahem 4,6 % Si. V roce 1933 nastal nový obrat v těchto materiálech. Američan N. P. Goss dosáhl novou výrobní technologií podstatného snížení ztrát plechů v jednom směru (ve směru jejich válcování), které se děje za studena. Tyto plechy se nazývají plechy s orientovaným zrnem, s orientovanou texturou nebo krátce orientované

plechy. Oproti plechům neorientovaným, válcovaným za tepla, dosahovali menších ztrát, mnohem větší permeabilitě a vyznačovali se velkou indukcí při poměrně slabém magnetickém poli. Největší rozmach výroby nastal po roce 1945 [6].

2.1.1.3 Výroba orientovaných transformátorových plechů

V době koncem 19. století se s růstem technické úrovně elektrotechnického průmyslu a se stále zvyšujícími požadavky na vlastnosti elektrotechnických materiálů se přešlo od tabulí válcovaných za tepla na pásy válcované za studena ve svitcích.

Základní technologie výroby: tavení v siemens – martinské nebo obloukové peci, lití ingotů, ohřev ingotů na válcovací teplotu, válcování pásu tloušťky cca 2,5 mm za tepla, čištění povrchu pásu, válcování zastudena na tloušťku 0,65 mm, mezižhání při 925°C až 985°C po dobu 5 minut v ochranné atmosféře za účelem rekrystalizace, válcování za studena na konečnou tloušťku (0,3 nebo 0,36 mm). Tepelné zpracování při 785°C až 845°C po dobu 3 až 5 minut v ochranném plynu za účelem oduhličení, nanesení žáruvzdorného anorganického povlaku k zabránění slevování a k odsíření, konečné žhání svitků při 1177°C a výdrž několik hodin ve vodíku pro sekundární rekrystalizaci a rafinaci, rovnání za tepla – ohřev na 760°C až 815°C v ochranném plynu, odstranění pnutí a vyrovnání pásu, nanesení izolačního povlaku [6].

Tento stručný popis odpovídá obecnému zpracování křemíkové oceli, která je dána vlastnostmi pro různé použití oceli. Podle toho by měla odpovídat i čistota. Všechny mezikroky se zintenzivňují a hledají se nové cesty ke zlepšení a zjednodušení. Mimořádně důležitým krokem je tvorba ochranných žáruvzdorných, popřípadě izolačních povlaků. Od izolační vrstvy se dále požaduje, aby byla co nejtenčí, měla vysoký odpor, dobře přilnula k plechu, měla antikorozivní účinky, nereagovala chemicky s transformátorovým olejem a dovozovala ohřevu bez ztráty svých vlastností [6].

2.1.1.4 Výroba orientovaných dynamových plechů

Dynamové plechy užívané ke stavbě elektrických strojů točivých činí cca 80% z celkové výroby elektrotechnické oceli. V porovnání s plechy pro transformátory se dá říci, že úsilí věnované vývoji plechů dynamových bylo značně menší.

Základní technologie výroby: zatepla válcované pásy se převálcují zastudena. Pásy se pak žíhají průběžně v oduhlíčující atmosféře. Výhodou je, že ve válcovně za tepla se vyrobí skutečný pás (dříve svařované tabule). V metalurgické peci se zvýší čistota oceli a další omezení obsahu uhlíku během tepelného zpracování, při čemž se dosáhne vhodné struktury. Metalurgický pochod určuje výchozí čistotu oceli, tedy podmínky pro dosažení žádaných vlastností dynamových plechů během další výroby. Jakost oceli se dá ovlivnit druhem výrobního agregátu a volbou výrobního postupu. Válcování zatepla vyžaduje odstranění vad povrchu. Válcovací teplota leží mezi 1200°C – 1320°C a je určena konstrukcí válcovacího zařízení. Doválcovávání probíhá při teplotách 800°C – 850°C. Vyšší a nižší teploty zhoršují zpracovatelnost pásů zastudena. V konečné fázi probíhá válcování za studena na požadovanou tloušťku a následné tepelné zpracování. Elektrická izolace se nanáší na lince vybavené pro odmašťování pásu a nanášení izolační vrstvy a sušení [6].

2.1.2 Železo a nízkouhlíkové oceli

Tyto materiály, hlavně oceli s nízkým obsahem uhlíku, jsou využívány pro konstrukce magnetických obvodů transformátorů a elektrických motorů s malým výkonem, malými nároky na účinnost a malou životností (jednoučelová zařízení, hračky atd.). V USA v roce 2000 tvořili 57 % spotřeby elektrotechnických ocelí. Je u nich kladen hlavní důraz na nízký obsah prvků zvyšujících koercivitu a měrné ztráty a snižující maximální permeabilitu. Například železo čistoty 99,99% má relativní permeabilitu $\mu_{\max} = 10^5$ a $p_{1,5/50} = 0,08 \text{ W/kg}$, ale u Fe čistoty 99,96% je μ_{\max} pouze $5 \cdot 10^3$ a $p_{1,5/50}$ stoupne na 2,12 W/kg [8].

Nízkouhlíkové oceli jsou vyráběny ve formě pásů nebo plechů, ze kterých se vystřihují a skládají magnetické obvody elektrických zařízení. Plechy jsou vyráběny kombinací válcování za tepla a za studena a vždy jsou vystaveny oduhlíčujícímu žíhání v atmosféře $H_2 + N_2$. Standartní výrobek s obsahem 0,05%C, 0,40%Mn, 0,12%P, a 0,025%S má $\mu_{\max} = 10^3$, $H_c = 100 \text{ A/m}$ a $p_{1,5/50} = 9 \text{ W/kg}$. Již se vyrábějí oceli s obsahem uhlíku 0,015% a se zvýšeným obsahem Mn až 0,8% u kterých klesnou měrné ztráty na 4,5 W/kg. Zlepšení magnetických vlastností je příkládáno zvýšení metalurgické čistoty kovu a zvětšení velikosti krystalových zrn, jako důsledku vhodné technologie zpracování. Tím jsou odstraněny

překážky v pohybu Blochových stěn, klesá H_c a zmenšuje se plocha hysterezní smyčky, zatímco permeabilita roste [8].

2.1.3 Slitiny FeNi

Železo s niklem tvoří soustavu dokonale rozpustnou v tekuté a tuhé fázi a jejich atomy se mohou libovolně nahrazovat v uzlových polohách krystalové mřížky. Tvoří celou řadu průmyslově využívaných slitin s rozličnými vlastnostmi:

Slitiny s 30%Ni mají Curierovu teplotu mezi 40-200°C, jejich permeabilita v této oblasti s rostoucí teplotou prudce klesá a používají se pro teplotní kompenzace obvodů permanentních magnetů [8].

Slitiny s 35-40%Ni jsou charakteristické tím, že jejich permeabilita nezávisí na H až do velkých intenzit pole. Používají se pro pulzní trafo a relé [8].

Slitiny s 45-50%Ni mají největší sytnou indukci (1,6T) z uváděné skupiny. Vhodným termomechanickým a termomagnetickým zpracováním se dají vyvolat pravoúhlá či úzká hysterezní smyčka se stálým sklonem až do 8kA/m [8].

Slitiny s 50-65%Ni slouží po vhodném zpracování (termomechanické nebo termomagnetické) jako materiály s pravoúhlou smyčkou nebo materiály s malou koercivitou a vysokou pulzní permeabilitou [8].

Slitiny s 70-81%Ni (Permalloy) se velmi často legují dalšími prvky (Mo, Mn, Cu, Nb, Ti) tak, aby anizotropie a tvarová magnetostrikce byly současně nulové. Je to tedy ideální magneticky měkký materiál s malou koercivitou a velkou permeabilitou. Permalloye se používají pro přenos signálů s malou amplitudou v transformátorech a cívkách pro sdělovací elektrotechniku a magnetických systémech měřicích přístrojů [8].

2.1.4 Slitiny FeCo

Přidáním Co do Fe roste magnetizace v nasycení a maxima dosahuje při 35%Co ($B_s = 2,43T$). Energie krystalové anizotropie má minimum při 35%Co, ale vzhledem k mechanickým vlastnostem je tato slitina obtížně tvářitelná a proto je nejpoužívanější slitina 49Co49Fe2V. Vanad zvyšuje rezistivitu a zlepšuje tvárnost. Slitiny FeCo mají vysokou

Curieovu teplotu. Používají se tam, kde vysoká cena Co není limitující (např. pro práci za vysokých teplot, v konstrukci generátorů o nízké hmotnosti pro letadla). Příklady: Permenduru (FeCo2%V) a Supermenduru (vysoká čistota FeCo2%V) [8].

2.1.5 Magneticky měkké ferity

Mají obecný vzorec $MeOFe_2O_3$, kde Me znamená dvojmocný kov (Ni, Zn, Mn, Mg, Co, Cd). Jsou to velice stabilní iontové sloučeniny s vysokou resistivitou a malou sytnou magnetizací. Porovnání vlastností feritů a kovových magnetických látek je v **tabulce**. Významný rozdíl mezi kovy a ferity je v rezistivitě a sytné magnetizaci. Feritové součástky se vyrábějí slinováním směsi oxidů a pojiva. Ferity jsou křehké, tvrdé a prakticky neobrobitelné. Používají se k výrobě součástek vysokofrekvenční techniky, pro transformátory atd. [8].

Materiál	J_s (T)	η_i (-)	T_c (°C)	σ (S/m)
KOVY	0,6 - 2,43	$500 - 3 \cdot 10^5$	250 - 900	$10^7 - 10^5$
FERITY	0,2 - 0,5	$10 - 10^4$	100 - 500	$10 - 10^{-11}$

Tabulka č. 2.: Porovnání magnetických a elektrických vlastností feritů a kovů.

2.2 Magneticky tvrdé materiály pro magnetické obvody elektrických strojů

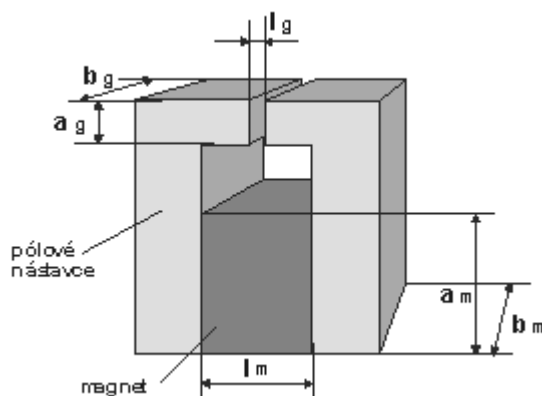
Magneticky tvrdých materiálů se používá v technické praxi k výrobě trvalých (permanentních) magnetů, které slouží k vytváření magnetického pole bez přítomnosti elektrického proudu (na rozdíl od elektromagnetů). Fyzikálním základem uvedených vlastností je zpravidla defektní struktura, znesnadňující přemagnetování. Jinou možností je použití jednodomérových částic, v nichž směr spontánní magnetizace a s tím související směr magnetických momentů lze změnit pouze účinkem velmi silného vnějšího magnetického pole. U těchto materiálů vyžadujeme vysoké hodnoty koercitivní intenzity, remanence i energetického součinu $(BH)_{\max}$. Tento požadavek splňují např. oceli s velkým vnitřním pnutím. Proto se pro kalené magnety používají oceli s martenzitickou strukturou, která je však nestabilní při stárnutí, čímž dochází ke ztrátě potřebných magnetických vlastností. Do této skupiny patří dále vytvrditelné slitiny netvářitelné, vytvrditelné slitiny tvářitelné, práškové materiály, ferity a sloučeniny na bázi kobalt – vzácné zeminy [9].

2.2.1 Vlastnosti magneticky tvrdých materiálů

Trvalý magnet je zpravidla charakterizován těmito základními parametry: koercitivitou H_c , remanencí B_r a maximálním součinem $(BH)_{\max}$. Koercitivita H_c (A/m) je taková intenzita magnetického pole, která působí proti směru spontánní magnetizace, až dosáhne celkové indukce v materiálu $B = 0$. Parametr H_c je mírou odolnosti magnetu proti odmagnetování (vnějším polem i vlastní demagnetizací). Remanence B_r (T) je hodnota magnetické indukce, která se ustálí po zmagnetování v uzavřeném obvodu magnetu bez působení vnějšího magnetického pole. Maximální součin $(BH)_{\max}$ ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$), někdy též nazývaný maximální energetický součin, je úměrný magnetické energii, uložené v magnetu optimálního tvaru [9].

2.2.1.1 Magnetický obvod

Trvalý magnet se často používá v magnetickém obvodu (obr. 2.1), složeném z magnetu a z pólových nástavců z magneticky měkkého materiálu, nejčastěji železa. Dosahuje se tím optimálního tvarování pólů a vzduchové mezery [9].



Obr. 2.1 Složený magnetický obvod [9].

2.2.1.2 Způsoby magnetování

Aby trvalý magnet plnil svou funkci, je nutno jej po vyrobení zmagnetovat. Intenzita magnetovacího pole by měla dosáhnout minimálně 3-násobku koercivity daného materiálu. Materiály s menší hodnotou H_c lze magnetovat až po sestavení celého obvodu. Tím lze totiž

dosáhnout optimalizace pracovního bodu magnetu. Magnety s velkou koercitivitou je snazší magnetovat samostatně, protože není nutno konstruovat speciální přípravky a eliminovat síly, které při magnetování vznikají. Pro magnetování trvalých magnetů se používají většinou speciální magnetizéry na principu elektromagnetu, jehož cívky jsou napájeny pulzním proudem velké hodnoty, získané vybitím baterie kondenzátorů nebo ze speciálně navrženého pulzního zdroje. Někdy je potřeba, aby všechny magnety měly shodně nastaveny pracovní bod. Toho se dosahuje opakovaným působením vzrůstajícího magnetického pole opačné polarity k magnetovacímu poli po zmagnetování [9].

2.2.1.3 Magnetická anizotropie

Každý typ magneticky tvrdého materiálu má své fyzikální hranice parametrů, jichž může dosáhnout. Pokud je požadován např. větší součin $(BH)_{\max}$, je nutno zvolit jiný typ materiálu. Přesto je možno v řadě případů dosáhnout lepších parametrů u stejného nebo podobného materiálu, a to zavedením magnetické anizotropie. Ta může být vytvořena v průběhu výroby magnetů různými způsoby, nejčastěji působením silného magnetického pole nebo mechanického napětí jistého směru. Výsledkem je usměrněná (anizotropní) struktura materiálu a následně také anizotropní magnetické vlastnosti. Zatímco podél hlavní osy (nebo roviny) magnetování jsou parametry trvalého magnetu výrazně vyšší než u izotropního ekvivalentu, v kolmých směrech (rovinách) je situace opačná. Aby bylo plně využito vlastností anizotropního magnetu, musí být magnetován ve směru hlavní osy [9].

2.2.1.4 Curieova teplota

Magnetizace veškerých feromagnetických materiálů se vzrůstající teplotou klesá až k nule, totéž platí i pro trvalé magnety. Teplotní závislost je charakterizována Curieovou teplotou T_c . Při použití trvalých magnetů je třeba dbát na to, aby se pracovní teplota nepřiblížila T_c , bezpečná „vzdálenost“ je cca do 0,4 násobku T_c [9].

2.2.1.5 Povrchová úprava magnetů

Bez povrchové úpravy: trvalé magnety jsou zpravidla dodávány bez povrchové úpravy. Řada druhů má totiž dobrou až vynikající korozní odolnost. Navíc jsou magnety většinou určeny pro vnitřní zabudování do strojů a přístrojů. Povrchové úpravě v místech pólů pak

brání konečně i to, že při sestavování magnetického obvodu by povrchová vrstva vytvářela magnetický odpor [9].

Lak: některé druhy zejména kovových magnetů podléhají v menší míře korozi. Pokud pracují magnety v normálních podmínkách, stačí pro jejich ochranu běžný syntetický lak, práškový lak nebo nitrolak [9].

Galvanické pokovení: pro použití některých typů magnetů (Fe-Nd-B, Alnico) v náročných podmínkách, např. ve vlhkém, teplém prostředí či ve vodě, je nutná protikorozní ochrana pokovením. Tato vrstva musí mít velmi dobrou ořezuvzdornost, přilnavost k povrchu a zachovává přesné rozměry. Nejčastěji se provádí galvanické niklování. Možné jsou ale i jiné metalické povlaky [9].

2.2.2 Rozdělení magneticky tvrdých materiálů

Z hlediska technologie výroby a jejich praktického použití.

2.2.2.1 Kompaktní kovové materiály

Jsou tvárné, lité a slinuté výrobky z čistých kovů a slitin. Jsou elektricky dobře vodivé a z magnetického hlediska bez vnitřních vzduchových mezer.

Tvárné oceli a slitiny

Z množství tvárných magnetických materiálů nejsou zahrnuty chromové, wolframové, kobaltové, molybdenové, manganové oceli, jelikož jejich použití jako výlučně magnetických materiálů je malé. Pro speciální účely použití jsou určeny magnety z barevných kovů, které vynikají zpracovatelností za studena: Cunife, Cunico, Vicalloy [9].

Označení	Složení	B_r (T)	H_c (kA/m)	$(BH)_{\max}$ (kJ/m ³)
Cunife	Cu-Ni-Fe	0,5 - 0,7	20 - 40	3 - 5
Cunico	Cu-Ni-Co	0,3 - 0,5	36 - 56	3,6 - 4
Vicalloy	Co-Fe-V	0,9 - 1,0	20 - 40	4 - 14

Tabulka č. 3.: Magnetické vlastnosti vybraných slitin.

Lité magnety

Technologie výroby odléváním je nutná pro vysokou mechanickou tvrdost a obtížnou obrobiteľnosť výrobků. Jedná se zejména o slitiny Al-Ni-Fe (Alni) a Al-Ni-Co-Fe (Alnico). Stav těchto materiálů je na vysoké úrovni vzhledem k dlouhé tradici výroby a stálému vývoji, takže dosahují vysokých hodnot $(BH)_{\max}$ při úspoře Ni a Co. Z hlediska opracování odlitků jsou výhodné slitiny Alni, které ve vyžíhaném stavu jsou obrobiteľné soustružením noži nebo vrtáky z tvrdokovů [9].

Označení	Složení	B_r (T)	H_c (kA/m)	$(BH)_{\max}$ (kJ/m ³)
Alni	Fe-Al-Ni-Cu	0,5 - 0,7	32 - 44	0,9 - 1,4
Alnico	Fe-Al-Ni-Co-Cu	0,5 - 1,4	44 - 110	7 - 34
Ticonal	Fe-Al-Ni-Co-Cu-Ti	0,7 - 1,1	135 - 155	24 - 55

Tabulka č. 4.: Magnetické vlastnosti slitin Alnico (na bázi železa).

Slinuté magnety

Sestávají ponejvíce z práškových materiálů podobného složení jako lité magnety. Slinovací postup je u menších tvarů magnetů hospodárnější než slévání [9].

2.2.2.2 Práškové kovové materiály

Vyrábějí se z kovových prášků lisováním za přítomnosti různých pojiv nebo slinovacího postupu. Kovové práškové magnety se používají např. pro trvalé magnety. Umožňují dosáhnout velké rozměrové přesnosti a téměř zcela odstraňují pracné obrábění. Jsou to např. spékané (sintrované) kovové magnety (typu Al-Ni a Al-Ni-Co), pro něž jsou výchozí materiály Fe, Ni a Co. Hliník se přidává v podobě práškové předslitiny se železem, niklem nebo mědí. Velmi progresivní metodou je výroba magnetů z velmi jemných prášků, když rozměr zrna je srovnatelný s velikostí Weissovy domény. Podrobněji se zmíním v další kapitole Moderní materiály a technologie pro elektrické stroje [9, 10].

2.2.2.3 Magneticky tvrdé ferity

Od magneticky tvrdých feritů požadujeme velkou remanenci, velkou koercivitu a vysoké hodnoty maximálního energetického součinu. Příčinou velké koercivity je krystalová a

tvárová anizotropie těchto feritů, která vzniká lisováním dobře kalcinované směsi prášků v magnetickém poli. Obdrží se tím anizotropní (orientované) ferity, u nichž směr snadné magnetizace souhlasí se směrem magnetického pole, které na hmotu působí při lisování [9].

Na rozdíl od práškových materiálů jsou ferity dokonale homogenní, kompaktní hmotou s vysokým měrným elektrickým odporem a s malými ztrátami vířivými proudy. Způsob výroby feritů se podobá výrobě keramických látek: výchozí směs prášků se míchá homogenizuje za mokra v kulových mlýnech, v kalolisu se odstraní ze směsi kapalina, směs se suší při teplotě nad 100°C, prosívá, žíhá - kalcinuje, znovu rozemele, práškový materiál se lisuje na hydraulických nebo vakuových protlačovacích lisech do různých tvarů, surové výrobky se suší a pak vypalují v průběžných tunelových pecích [9].

2.3 Moderní materiály a technologie pro elektrické stroje

2.3.1 Ultratenké plechy

Běžná tloušťka plechů magneticky izotropních, válcovaných zastudena, a finálně žíhaných je 0,5 mm. Magneticky orientované plechy, válcované zastudena, se vyrábějí v tloušťkách 0,35 mm, 0,3 mm, 0,27 mm, 0,2 mm, 0,18 mm. Přičemž pro kmitočet 50 Hz nastává minimum celkových ztrát při tloušťce asi 0,27 mm (se čtvercem klesající tloušťky klesají i vířivé, ale mírně rostou ztráty hysterezní) [7].

Ultratenkými plechy se v současnosti rozumí plechy z různých slitin o tloušťce 0,1 mm a méně. Pokud mají tloušťku pod 80 μm , obvykle jsou vyráběny nikoli válcováním, ale stříkáním roztaveného kovu do tvaru nekonečného pásu a tato technologie tudíž plynule přechází do technologií amorfních kovů, popsanych v další kapitole. Vyrábějí se téměř výlučně v podobě vinutých toroidních jader. Jiné mechanické zpracování je s ohledem na malou tloušťku technologicky velmi obtížné. V současnosti existují jádra, použitelná asi do 5 až 10 kHz při indukci kolem 0,9T, ale nejsou běžná. Vývoj těchto materiálů ještě zdaleka není ukončen [7].

2.3.2 Práškové železo

Patří do zvláštní podskupiny práškových kovových materiálů. Tvoří jí magnety z jemných prášků, sestávajících nejvíce z jemnozrnných, chemickou cestou získaných prášků Fe nebo slitin Fe [9].

Smyslem a cílem těchto technologií je získání co nejmenších částecek kovu a tím dosažení extrémně malých vířivých ztrát (víme, že vířivé ztráty jsou přímo úměrné druhé mocnině lineárních rozměrů kovové částice). Základní surovinou je buď čisté železo, nebo jeho různé slitiny. Použití slitin není u těchto technologií nutnou podmínkou. Smyslem slitin je totiž především zvýšení elektrického odporu, tudíž snížení vířivých ztrát, které je však často doprovázeno zhoršením ostatních magnetických vlastností. U čistého práškového železa se vířivé ztráty omezují pouze zmenšováním částic [7].

Jednou z používaných výrobních technologií práškového železa je protiproudé rozstříkávání taveniny a vody dvěma tryskami mířícími proti sobě. Výsledkem je vznik částecek přibližně kulového tvaru, o průměru technologicky říditelném v rozsahu 3 až 30 μm . Částice mají polykrystalický amorfní charakter. Povrch částic je dodatečně obalován velmi tenkou vrstvou pojiva (řádově 1 μm). Takto je práškový materiál v podobě polotovaru dodáván na trh. Pojivo současně tvoří ochranu proti korozi během distribuce a skladování. U cílového zpracovatele se z materiálu lisují jádra do forem požadovaného tvaru. Po lisování se pojivo tepelně vytvrzuje. Nevýhodou je velmi malá výsledná permeabilita, způsobená přítomností nemagnetických mezer mezi jednotlivými železnými zrny. Volně upěchovaný prášek má relativní permeabilitu asi 10, jádro lisované tlakem 3 až 5 t/cm^2 dosahuje permeability nanejvýš 50 až 80. Z toho důvodu materiál není vhodný k výrobě transformátorů. Vzduchová mezera zde zcela zbytečně zvyšuje magnetizační proud transformátoru na neúnosnou velikost [7].

Přítomnost ekvivalentní mezery nevádí u statorů synchronních strojů, na rotoru buzených permanentními magnety ze vzácných zemin. Tyto magnety mají extrémně velkou koercitivitu H_c , proto snadno překlenou i velkou přídavnou ekvivalentní mezeru práškového statoru. Stator vysokootáčkového nebo mnohápólového stroje je totiž namáhán magnetickým polem o vysokém kmitočtu. Pak v něm vznikají velké vířivé ztráty. Je-li však stator vylisován z práškového železa, budou v něm vířivé ztráty malé [7].

2.3.3 Magneticky tvrdé materiály na bázi kovů vzácných zemin

Do nové generace magneticky tvrdých materiálů patří slitiny kobaltu s kovy vzácných zemin typu RCo_5 , kde R představuje nejčastěji lantanoid např. Sm, Pr, Nd atd. Základní typy těchto materiálů mají chemické složení $SmCo_5$, Sm_2Co_{17} . Krystalová struktura je hexagonální s vysokou krystalovou anizotropií. Sloučeniny jsou velmi tvrdé a křehké. Magnety se vyrábějí práškovou technologií. Dosahované výsledky jsou vynikající, např. u slitiny $SmCo_5$ jsou $B_r = 0,9T$, $H_c = 800kA/m$, $(BH)_{max} = 250kJ/m^3$. Tyto magnety umožňují značnou miniaturizaci rozměrů, protože dosáhnout stejné přídržné síly při mnohem menších rozměrech než např. feritové magnety. Širšímu uplatnění brání zejména vysoká cena surovin, ale i technologie zpracování je velmi náročná [10].

Trvalé magnety na bázi kovů vzácných zemin mají řadu využití v aplikacích, kde je potřeba vyvinout silnou magnetickou interakci (přídržnou sílu) nebo tam, kde záleží na malých rozměrech. Jsou to např. rotory a statory motorů, lineární motory, magnetické spojky a brzdy, magnetické separátory, systémy proti zlodějům v obchodech [10].

Složení	B_r (T)	H_c (kA/m)	$(BH)_{max}$ (kJ/m ³)
$SmCo_5$ 160/175	0,9 - 0,925	680 - 710	160 - 170
Sm_2Co_{17}	1,03 - 1,06	720 - 790	190 - 215
Fe-Nd-B 210/160	1,05 - 1,12	780 - 850	210 - 240

Tabulka č. 5.: Magnetické vlastnosti materiálů (na bázi kovů vzácných zemin).

2.3.4 Amorfni kovy (magnetická kovová skla)

Tyto materiály nemají krystalickou strukturu (nemají hranice zrn) jako běžné kovové materiály, zachovávají si však vzhled kovů a mají charakteristické fyzikální, mechanické a chemické vlastnosti, kterými předčí kovové krystalické materiály podobného složení. To je dáno absencí hranice zrn, která vede ke snadnější magnetizaci a tím i snížením wattových ztrát (W/kg) [10].

Chemické složení: Fe, Co, Ni + 10-30% (B, C, P, Si ...)

Složení	B_r (T)	H_c (kA/m)	μ_{\max}
$Fe_{80}B_{20}$	1,8	6,4	$1 \cdot 10^5$
$Fe_{40}Ni_{40}P_{14}B_6$	0,5	0,8	$4 \cdot 10^5$
$Co_{74}Fe_6B_{20}$	1,2	3,0	$3 \cdot 10^5$

Tabulka č. 6.: Magnetické vlastnosti vybraných kovových skel.

K přemagnetování kovového skla stačí magnetické pole o intenzitě $3 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-1}$ (stejně jako u špičkových permalloyů. Je to způsobeno nepřítomností hranice zrn) [10].

Magnetická skla používáme k výrobě jádra transformátorů, kdy využíváme výhod: snížení tloušťky, větší rezistivity, menší ztráty (hysterezní i vířivými proudy). Celkové ztráty jsou 5x nižší než u klasických materiálů! Samozřejmě má i nevýhody, mezi které patří omezená časová i teplotní stabilita (časem přechod do krystalického stavu) [10].

2.3.3.1 Srovnání amorfních kovů s kovovými materiály

Přednosti a charakteristické vlastnosti amorfních materiálů oproti klasickým kovovým materiálům spočívají ve [10]:

- vysoké tvrdosti: křemíková ocel je v důsledku příměsi Si křehčí. U magnetických skel se výsledkem lepší účinnosti magnetizace docílí snížením počtu metaloidů a snížením nepravidelnosti struktury.
- vyšší poměr pevnost/hmotnost.
- vyšší mez pevnosti a kluzu: vysoká hodnota meze kluzu kovových skel souvisí s tím, že je v nich velmi nízká pohyblivost dislokací. Kovová skla jsou při tahovém zatížení plasticky nestabilní. Naproti tomu snášejí velké plastické deformace v ohybu, smyku a tlaku.
- vysoká odolnost proti korozi: na povrchu kovových skel se vytváří ochranný oxidický film (pomáhá ho vytvářet chrom v materiálu), který je rezistentní vůči korozi. Tento film je mnohem účinnější než u nerez ocelí (korozivzdorných ocelí).
- vysoká rezistivita.

Další předností kovových skel jsou jejich vysoké mechanické vlastnosti, což značně omezuje opotřebení povrchu materiálu. Mimo to vykazují vysokou rychlost šíření vln a mají také vynikající clonící účinek [10].

Parametr	Křemíková ocel	Kovové sklo
Proud	2,5 A	0,12 A
Wattové ztráty	112 W	14 W
Ztráta v mědi	210 W	166 W
Celková ztráta	322 W	180 W
Úspory energie	0	1250 kWh/rok
Tepla	100 °C	70 °C

Tabulka č. 7.: Porovnání údajů pro dva typy transformátorů (15kVA).

Lze konstatovat, že magnetické vlastnosti těchto materiálů jsou v současnosti podstatně lepší než vlastnosti orientovaných, zastudena válcovaných plechů tl. 0,3mm. Jejich další použití v oblasti energetiky na kmitočtu 50 Hz bude záležet na ekonomických ukazatelích. U aplikací ve výkonové elektronice, v kmitočtové oblasti 20 kHz, bude záležet na jejich vlastnostech v porovnání s ferity. V současnosti dosahují amorfní kovy ztrátového čísla 1 až 4 W/kg při 1T a 10 kHz, případně až 70 W/kg při 1T a 100 kHz. Současné trendy naznačují, že oblast nad 30 kHz zůstane pravděpodobně trvalou doménou feritových materiálů [7].

2.3.3.2 Výroba kovových skel

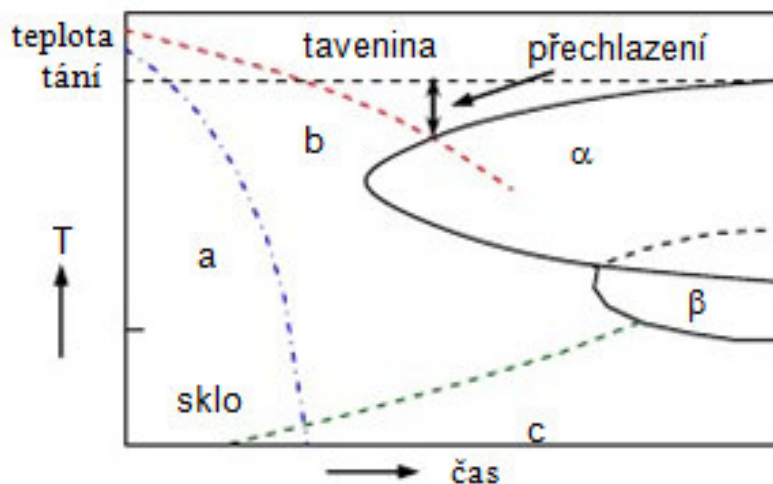
Hlavní podstatou přípravy je dosažení velké rychlosti ochlazování, která je podmínkou pro získání amorfní struktury. Základní požadavky jsou [10]:

1. rozšíření oblasti existence tuhého roztoku
2. zjemnění precipitátů („nerozpustné sraženiny“)
3. potlačení difuzních procesů při ochlazování (metastabilní krystalická fáze)
4. při překročení určité úrovně rychlosti ochlazování není dostatek času k dosažení krystalické struktury, takže se zachová struktura taveniny – kovová skla

Způsoby výroby = rychlé ochlazování tavenin.

Například je rychlost chlazení metodou RSP (Rapid Solidification Processing) 10^4 až $10^6 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$; konvenční chlazení je 10^3 až $10^0 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ [10].

- technika založená na výrobě velmi tenkého pásu, vznikajícího při styku roztaveného kovu s chladícím rychle rotujícím měděným bubnem. Obvodová rychlost bubnu je přibližně 100 km/h pro pásek tloušťky do $80 \mu\text{m}$, šířky 1 – 150 mm
- technika umožňující „atomizaci“ částic kovu pomocí rychle přiváděného proudu inertního plynu („jet“ technika).
- technika založená na rozstříkávání taveniny dopadající na rotující disk za vzniku velmi jemných částic
- ochlazování tenké povrchově nastavené vrstvy samotného materiálu (laserový ohřev)



Obr. 2.2 TTT diagram (schematicky) [10].

α – stabilní krystalická fáze

β – metastabilní krystalická fáze

a rychlé ochlazování (tvorba skla)

b pomalé ochlazování (krystalizace)

c ohřev skla (krystalizace)

T ... teplota krystalizace pro danou rychlost ohřevu

Nevýhodou kovových skel je teplotní nestabilita. Při ohřevu nad určitou teplotu dochází ke krystalizaci a tím i ke ztrátě vlastností. Teplota je závislá na typu slitiny, obvykle nepřesahuje 300°C [10].

2.4 Příklad ekonomického významu materiálů pro elektrizační soustavy

Rozvoj soustav světových i naší elektrizační soustavy znamená stále rostoucí nároky na objem i technickou úroveň transformátorů. Přírůstek celkového výkonu transformátorů vychází také ze známé ekonomické úvahy, že na každý instalovaný MVA zdrojů (alternátorů v elektrárnách) připadá zhruba čtyřnásobný instalovaný výkon transformátorů v elektrizační soustavě, nepočítáme-li transformátory u velkých odběratelů. Cestou od elektrárny je ke spotřebiči je elektrická energie několikrát (průměrně 4krát) transformována. Z toho je vidět, jak ekonomicky exponovanými body jsou v elektrizační soustavě právě transformátory. S ohledem na perspektivu do roku 1980 vypadal odhad v roce 1961 tak, že se celkový transformační výkon za každých 6 let přibližně zdvojnásobí, což podle starších studií znamenalo potřebu instalovaného výkonu transformátorů v roce 1980 asi desetinásobek výkonu z roku 1961. Technické kvalitativní hledisko žádalo stavbu velkých jednotek 40 MVA a více, zlepšenou hospodárnost provozu a zvýšení provozní spolehlivosti [6].

Byly porovnány dva stejné transformátory 70/10 kV, z nichž první byl postaven v roce 1936 s plechy zatepla válcovanými a druhý v roce 1960 s plechy orientovanými [6].

Rok	Ztráty Fe (kW)	Ztráty Cu (kW)	Váha Fe (tun)	Váha Cu (tun)
1936	55	140	19	6,5
1960	25	100	14	5

Tabulka č. 8.: Porovnání údajů pro dva typy transformátorů z různých let výroby.

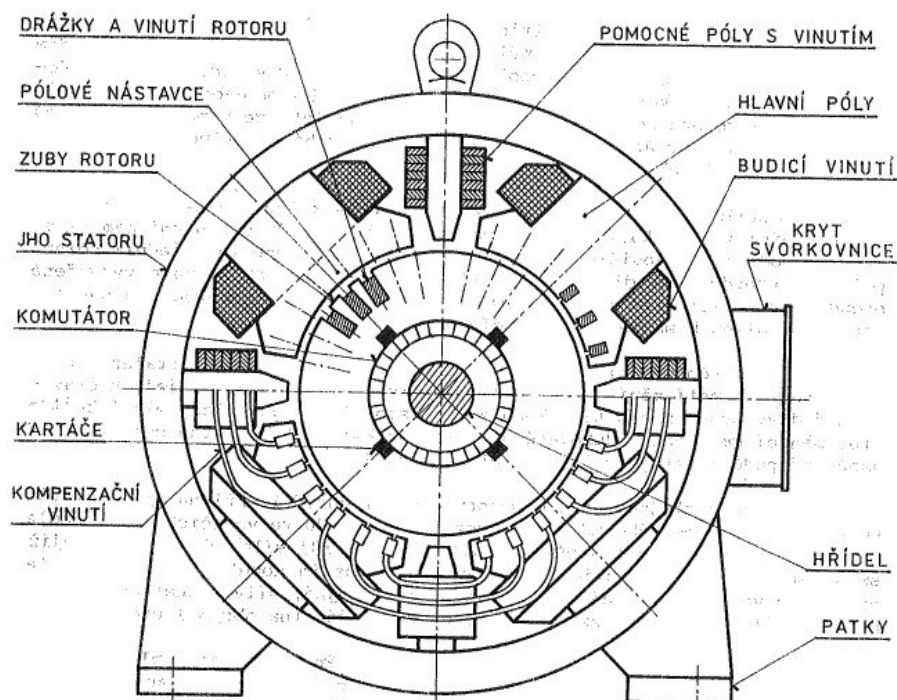
3 Magnetické obvody elektrických strojů

3.1 Stejnoseměrný elektrický stroj

Konstrukce stejnosměrných motorů se neliší od konstrukce dynam. Každé dynamo může pracovat jako motor a každý motor může pracovat jako dynamo.

Mezi hlavní části stroje patří [3]:

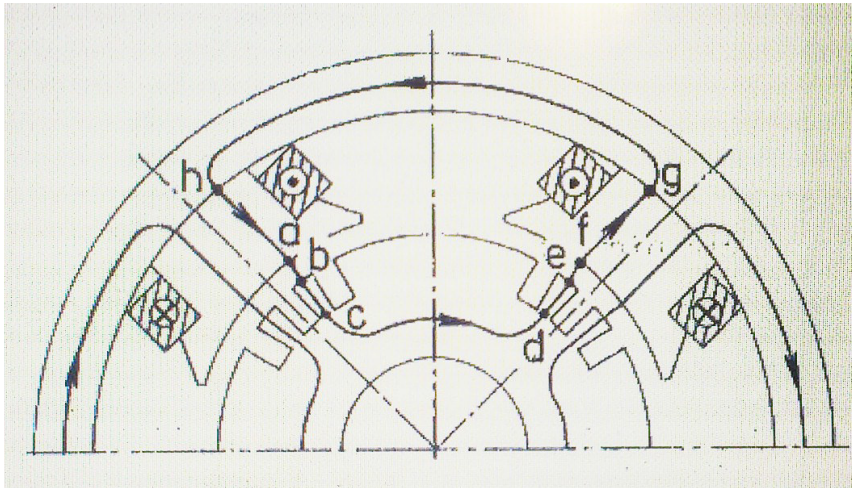
- Část, ve které se budí magnetický tok, tj. kostra s magnety zvanými též póly, ať už hlavními nebo pomocnými. Hlavní póly jsou zakončeny pólovými nástavci. Tato část se nazývá stator. Na statoru používáme jako zdroj magnetického pole budicí vinutí nebo permanentní magnety.
- Část, ve které se indukují střídavé napětí se nazývá rotor nebo kotva a je vyrobena z masivního materiálu.
- Část, ve které se indukované napětí usměrňuje se nazývá komutátor. Komutátor je pevně spojený s kotvou. Na komutátor dosedají kartáče pro přívod nebo odvod proudu. Jedná se o mechanický měnič (mechanický usměrňovač nebo mechanický střídač).
- Ostatní části: ložiskové štíty, ložiska, ventilátor, držáky kartáčů apod.



Magnetický obvod stroje tvoří železo kostry pólů, pólových nástavců, vzduchová mezera a železo kotvy.

Obr. 3.1 Příčný řez SS strojem [11].

Na detailnějším obrázku (obr. 3.2) si můžeme přiblížit magnetický obvod stejnosměrného stroje, kterým se uzavírá hlavní magnetický tok [11].



Obr. 3.2 Magnetický obvod stejnosměrného stroje s popisem:
a vzduchová mezera (2x),
b zub rotoru (2x), **c** jho rotoru, **d** hlavní pól a pólový nástavec (2x),
e jho statoru [11].

3.2 Asynchronní stroj

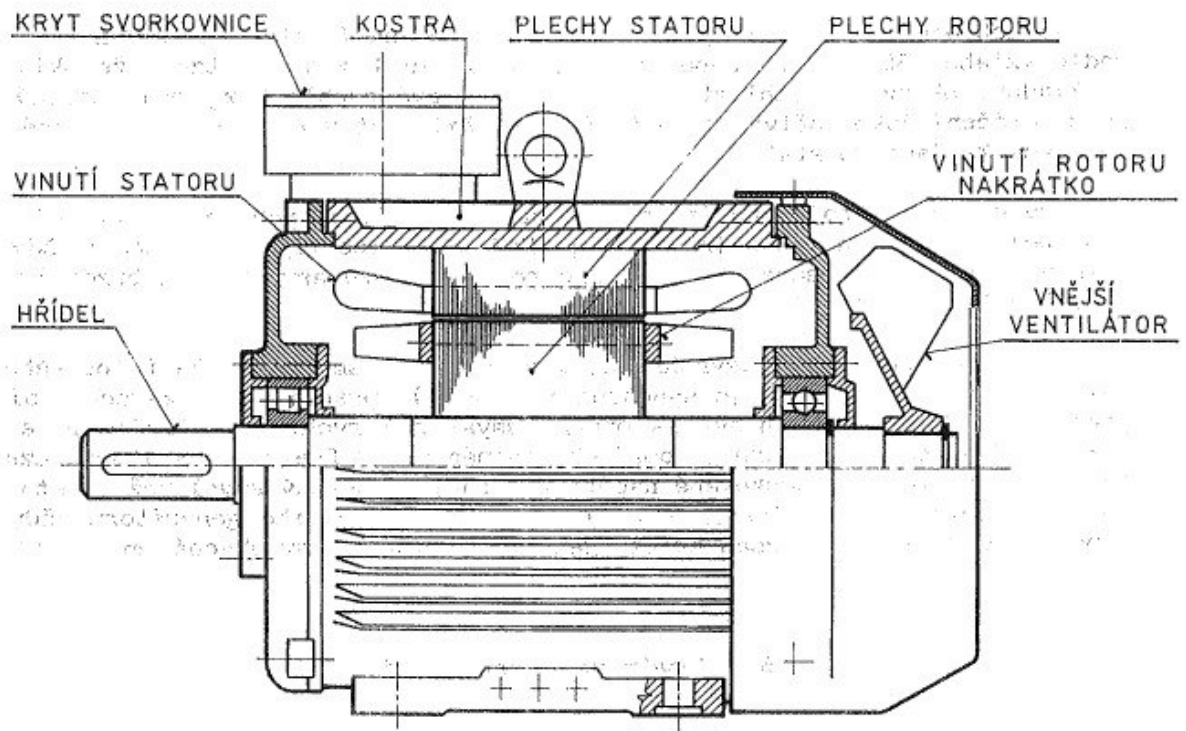
Asynchronní stroje se nejčastěji používají k pohonům, a pak se nazývají asynchronní motory. Asynchronní motor je nejpoužívanější, nejlevnější a přitom nejjednodušší elektrický stroj točivý. Jsou také označovány jako indukční motory (proud v rotoru je vyvolán indukcí) [3].

Asynchronní motor se skládá z:

- Pevné části – statoru
- Pohyblivé části – rotoru

Stator se skládá z kostry, která může být odlitá nebo svařovaná a dvou ložiskových štítů. Do kostry statoru jsou zalisovány navzájem izolované plechy s drážkami – magnetický obvod statoru. Do těchto drážek se ukládá obvykle trojfázové vinutí [3].

Na hřídeli rotoru jsou nalisovány rotorové plechy s drážkami, které tvoří druhou část magnetického obvodu. Rotor se otáčí v ložiskách, které jsou upevněny v ložiskových štítech statoru. Rotorové vinutí je realizováno dvojím způsobem (klec nakrátko a kroužkový rotor). Mezi statorem a rotorem je vzduchová mezera 0,3 – 1 mm [3].



Obr. 3.3 Asynchronní motor s kotvou nakrátko [11].

3.3 Transformátor

Transformátor je jedním z nejdůležitějších strojů. Základní funkcí je měnit daný výkon transformátoru jednoho napětí na napětí druhé. Tím se mění i proud, přičemž přenesený výkon transformátoru zůstává přibližně stejný. To umožňuje v energetických systémech přenášet veliké výkony z elektráren ke spotřebiteli při vysokých napětích a malých proudech, tj. při malých průřezích vodiče. A opačně, u spotřebitele, vysoké napětí, které ohrožuje lidský život, mění na napětí provozní [3].

Kromě transformace napětí a proudu lze transformovat i počet fází. Tato funkce transformátoru se nejčastěji vyskytuje u transformátorů napájecích usměrňovače [3].

Velikost, hmotnost a cena transformátorů závisejí především na vinutí transformátoru a na magnetickém obvodu. Velké proudy vyžadují větší průřezy vodičů a velikost napětí je dána magnetickým tokem a počtem závitů. Fázový posun má na velikost transformátoru malý vliv. Proto se udává výkon transformátoru ve voltampérech (VA, kVA, MVA) [3].

Transformátory se vyrábějí pro transformaci trojfázového proudu jako trojfázové, pro transformaci jednofázového proudu jako jednofázové. Transformaci trojfázového proudu lze uskutečnit i třemi jednofázovými transformátory, z nichž každý je navržen na třetinu celkového výkonu. Toto řešení se používá např. u největších transformátorů, kde doprava trojfázového transformátoru by z důvodů rozměrů nebyla možná. Jako rezerva pak stačí jeden jednofázový transformátor. Čím je transformátor větší, tím je účinnost lepší a pořizovací cena na 1kVA výkonu menší [3, 11].

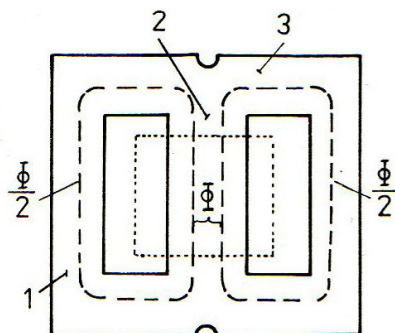
Transformátor, protože je strojem netočivým, je konstrukčně poměrně jednoduchý. Na obsluhu a údržbu je nenáročný a provozně je velmi spolehlivý. Nevýhodou v některých zapojeních je ta skutečnost, že i když z transformátoru připojeného k síti neodebíráme žádný výkon, odebírá transformátor příkon naprázdno [3].

3.3.1 Konstrukční uspořádání

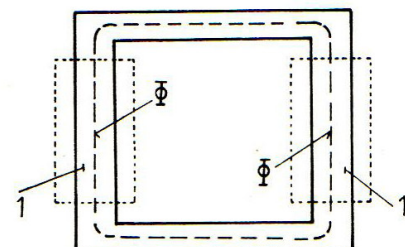
Základními částmi transformátoru je magnetický obvod tvořený transformátorovými plechy a vinutí. Kromě těchto částí se skládá ze součástí sloužících k mechanickému zajištění, izolování a chlazení transformátoru [3].

Magnetický obvod je složen z izolovaných plechů nejčastěji tloušťky 0,35mm s minimálním magnetickým odporem a především bez vzduchové mezery [3].

Jednofázové transformátory mají magnetický obvod uspořádaný podle obr. 3.4 a obr. 3.5 a skládá se z jader a spojek. Na obrázcích (3.4 a 3.5) jsou jádra vyznačena pod čísly 1, 2 a spojky pod číslem 3. Vinutí je vyznačeno tečkami [3].



Obr. 3.4 Magnetický obvod plášťového transformátoru [3].



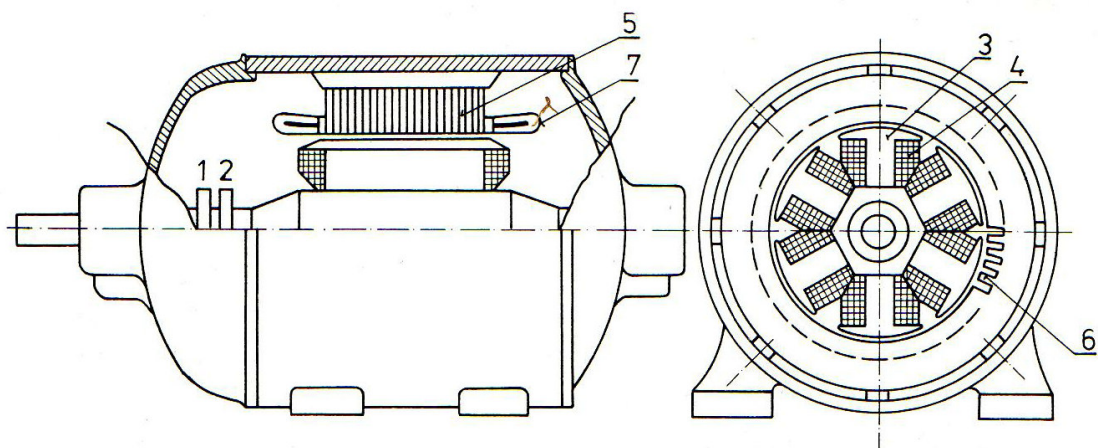
Obr. 3.5 Magnetický obvod jádrového transformátoru [3].

3.4 Synchronní stroj

Synchronní stroj je střídavý elektrický stroj točivý, jehož frekvence svorkového napětí je úměrná otáčkám. Synchronní stroj, který přivedenou mechanickou energii přeměňuje na energii elektrickou, se nazývá generátor a naopak stroj měnící elektrickou energii v mechanickou pracuje jako synchronní motor [3].

Synchronní generátor poháněný vodní turbínou nazýváme hydrogenerátor je pomaloběžný a má rotor s vyniklými póly. Rychloběžný nazýváme turbogenerátory a mají hladký rotor [3].

Synchronní motor se vyznačuje tím, že jeho otáčky se nemění se zatížením, nemění-li se frekvence přiváděného napětí. Moment zátěže musí být však menší než tzv. moment zvratu, při kterém motor vypadne ze synchronního chodu [3].



Obr. 3.6 Generátor s vyniklými póly s popisem: **1, 2** kroužky budicího vinutí, **3** póly s pólovými nástavci, **4** budicí vinutí, **5** železo statoru, **6** statorové plechy, **7** vinutí statoru [3].

Stator synchronního motoru má stejnou konstrukci jako stator asynchronního motoru. Na svazku statorových plechů je uloženo trojfázové vinutí, potřebné k vytvoření točivého pole [3].

Rotor se skládá z železného jádra, buď masivního, nebo složeného ze svazku plechů a budicího vinutí, napájeného přes sběrné kroužky stejnosměrným proudem. Kotva působí jako elektromagnet, který má stejný počet pólů jako stator [3].

Stator opatřen souměrným trojfázovým vinutím, které vytváří točivé magnetické pole. Rotor (vyniklé póly nebo hladký) je opatřen budícím vinutím napájeným stejnosměrným budícím proudem, vytváří kruhové točivé pole. Statorové i rotorové pole se svými nesouhlasnými póly přitahují, přičemž statorové pole táhne rotor. Energie přechází ze statorového vinutí na rotor, kde koná mechanickou práci. Pole rotoru se pohybuje stejnou rychlostí n_1 jako pole statoru (synchronně). Po rozběhu jsou při každém zatížení konstantní otáčky dle rovnice $n_1 = \frac{60 \cdot f}{p}$, kde f je frekvence sítě (ČR má $f=50\text{Hz}$) a p je počet pólpárů (pólových dvojic točivého pole). Překročí-li moment M moment zvratu, vypadne ze synchronismu [3, 11].

Vzniklé točivé pole nedokáže roztočit hmotu rotoru, proto se do pólových nástavců vkládá tzv. tlumič, což je v podstatě klecové vinutí. Rozběh je asynchronní, při dostatečných otáčkách se rotor nabudí a synchronizuje [3].

Je-li synchronní motor provozován s větším než jmenovitým budícím proudem, mluvíme o přebuzeném provozu (synchronní generátor). Motor působí současně jako generátor a dodává do sítě induktivní jalový výkon. Mohou být tedy použity jako kompenzátory fázového posunu. V přebuzeném režimu mohou být použity ke kompenzaci jalového proudu jako kompenzační kondenzátory. V nevybuzeném (málo vybuzeném rotoru) režimu odebírají synchronní motory induktivní jalový výkon ze sítě [3].

Turbomotory mají rychlosti 3000 a 1500 ot/min a nemůže mít vyniklé póly kvůli velkým odstředivým silám. Turbogenerátory jsou poháněny rychloběžnými turbínami [3].

3.5 Krokový motor

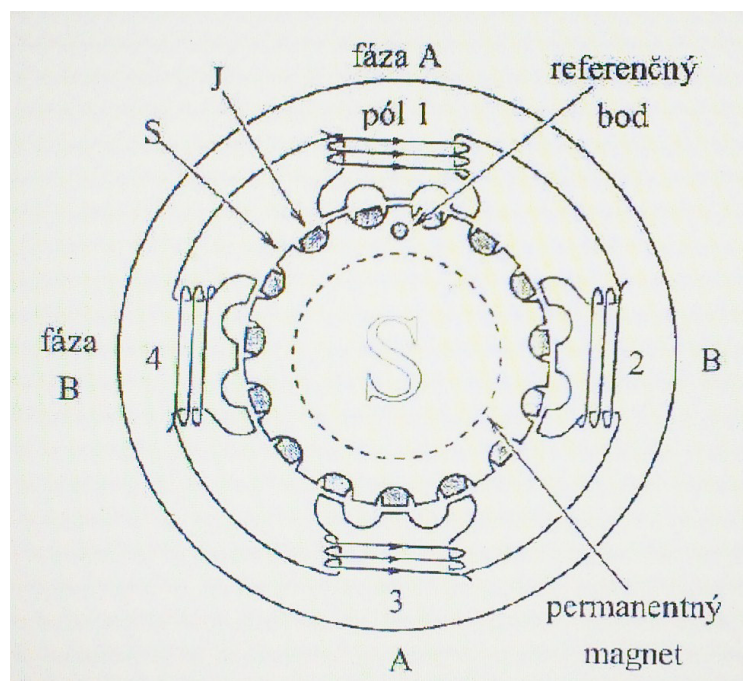
Pro napájení a ovládání je nutný speciální elektrický obvod, který generuje sled napěťových pulzů, ty pak vyvolají krok (natočení) o přesně definovaný mechanický úhel. Změnou sledu impulsů lze měnit smysl otáčení. Vstupní řídicí signál je zpracován řídicí logikou, přiveden do elektronického komutátoru a poté do výstupních budičů [12].

Stator je opatřen několikařozovým vinutím. Rotor může být pasivní (změna magnetické vodivosti po obvodu vzduchové mezery) nebo aktivní (obsahuje permanentní magnety – vytváří pole konstantní velikosti). Toto pole reaguje na statorové pole buzené ovladačem [12].

Dva sousední póly jedné fáze vytvoří tok opačného smyslu. Permanentní magnet rotoru vytváří střídavě S, J. Proudem do příslušné fáze pak otočíme rotor o jednu pozici [12].

Krokové motory můžeme rozdělit na rotační a lineární, které se dále rozdělují na několik základních druhů vzhledem na jejich konstrukci a princip činnosti. Základní rozdělení je na motory s proměnlivou reluktancí, motory s permanentními magnety a hybridní motory [12].

Pro příklad konstrukce přikládám obr. 3.7 kde je znázorněný hybridní typ krokového motoru, který kombinuje princip krokového motoru s permanentním magnetem a krokového motoru s proměnlivou reluktancí. Jeho důležitým znakem je rotor skládající se z válcového permanentního magnetu, který je magnetizovaný podélně. Na obou koncích magnetu se nacházejí rotorové pólové nástavce, které mají po obvodě zuby. Tyto dva pólové nástavce jsou totožné a jsou vůči sobě natočené o jednu polovinu zubového rozestupu rotoru. Pólové nástavce rotoru jsou většinou složeny z křemíkových plechů [12].



Obr. 3.7 Uspořádání dvojfázového hybridního krokového motoru [12].

3.6 Reluktanční motor

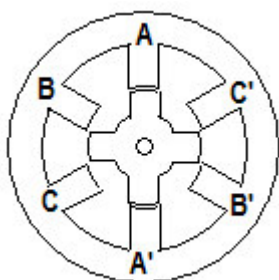
Svazek rotorových plechů klecového rotoru má na obvodu tolik vybrání, kolik má stator pólů. Magnetický tok (indukční čáry) statoru se pak uzavírá přes rotor, a to hlavně přes části oddělené malou vzduchovou mezerou a nikoliv přes vybrání s velkým magnetickým odporem velké vzduchové mezery. Rotor získá vlastní póly a brání se skluzu za otáčkami točivého pole

statoru. Reluktanční („bránící se skluzu“) motor se rozbíhá jako motor s kotvou nakrátko a po rozběhu pracuje jako synchronní motor. Přetížení vede k asynchronnímu běhu se skluzem. Rotor i stator mají vyjádřené póly a jsou vrstvené. Má velmi jednoduché vinutí na statoru. Rotor je bez vinutí a bez magnetů a celý vyvíjený moment je reluktanční [12].

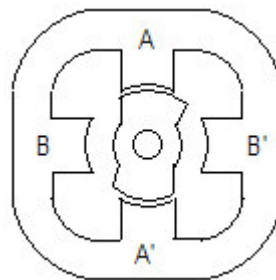
Kvůli vybráním v rotoru jsou v těchto místech velké vzduchové mezery a tedy velký rozptyl magnetického toku. Proto mají reluktanční motory menší účinník a větší odběr proudu než odpovídající asynchronní motory. Jejich účinnost je však menší. Používají se k pohonu strojů s konstantními otáčkami, např. k pohonu tkalcovských stavů [12].

Reluktanční motory můžeme rozdělit na synchronní, spínaný a krokový. Jako příklad chci uvést spínaný reluktanční motor (SRM s variabilní reluktancí), který je považován za úspornou alternativu k asynchronnímu motoru. Jedná se o motor na střídavý proud. Má jednoduchou mechanickou konstrukci a nevyžaduje permanentní magnety pro svou funkci. Počet pólů na statoru závisí na počtu fází motoru. Normálně jsou dva statorové póly na opačných koncích nakonfigurovány tak, aby tvořily jednu fázi. V této konfiguraci, 3-fázový spínaný reluktanční motor má 6 statorových pólů. Počet pólů rotoru je vybrán tak, aby byl odlišný od počtu pólů statoru [13].

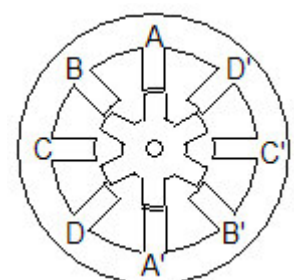
Mechanická konstrukce 6/4 3-fázového spínaného reluktančního motoru je znázorněn na obr. 3.8. Další konfigurace SR motoru, jako 4/2 2-fázového SRM (s nepravidelným rotorem) a 8/6 4-fázový SRM jsou uvedeny na obr. 3.9 a obr. 3.10. [13].



Obr. 3.8 Konstrukce
6/4 3-f SRM [13].



Obr. 3.9 Konstrukce
4/2 2-f SRM [13].



Obr. 3.10 Konstrukce
8/6 4-f SRM [13].

4 Výroba magnetických obvodů

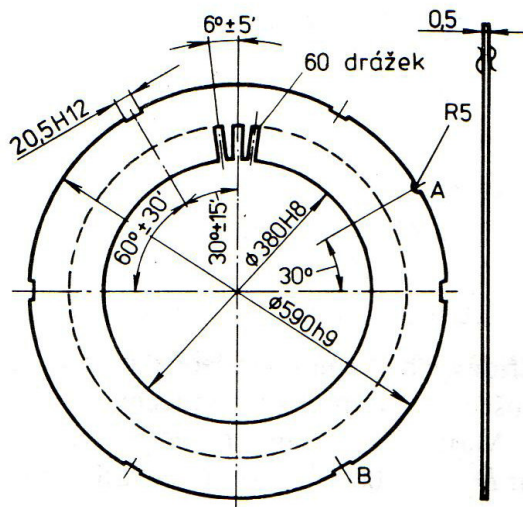
4.1 Statorový svazek

Magnetický obvod statoru střídavých strojů pro všeobecné použití se skládá z plechů pro elektrotechniku o tloušťce 0,5 mm. Jsou to plechy z oceli s vyšším obsahem křemíku, válcované za tepla [4].

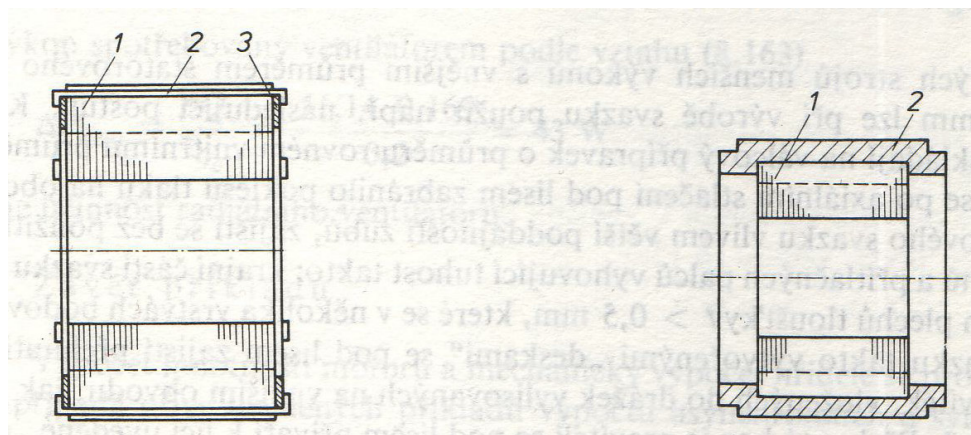
Na vnitřním obvodu plechů se lisují drážky požadovaného tvaru pro uložení statorového vinutí. Rozteče a rozměry jednotlivých zubů se liší o odchylky a dovolené tolerance. Proto se při skládání statoru z kruhových řezů ukládají jednotlivé výlisky do jedné vzájemné polohy, definované vylisováním zářezu A na vnějším obvodu. Po vylisování se plechy z izolačních důvodů odhrotí a ve většině případů se opatří izolačním lakem [4].

Statorové svazky velké axiální délky se z ventilačních důvodů rozdělují na pakety, jejichž tloušťka ve směru osy stroje bývá 40 až 60 mm. Mezi pakety jsou ventilačními výztuhami vytvořeny radiální kanály o šířce 10 mm. Ventilační výztuhy nejčastěji používaných profilů, jsou ke krajním plechům paketu obvykle bodově přivařeny [4].

U řadových strojů menších výkonů s vnějším průměrem statorového svazku $D_e \leq 500\text{mm}$ lze při výrobě svazku použít např. následující postup. Kruhové výlisky se skládají na válcový přípravek o průměru rovném vnitřnímu průměru statoru. Aby se po axiálním stlačení pod lisem zabránilo poklesu tlaku na obou koncích statorového svazku vlivem větší poddajnosti zubů, zajistí se bez použití stahovacích kruhů a přítlačných palců vyhovující tuhost takto: krajní části svazku se složí z ocelových plechů tloušťky $t \geq 0,5\text{mm}$, které se v několika vrstvách bodově svaří. Stažení svazku takto vytvořenými „deskami“ se pod lisem zajistí přehnutím ocelových pravítek, vložených do drážek vylisovaných na vnějším obvodu, jak je patrné z obr. 4.2. Přehnuté konce pravítek se pod lisem přivaří k lící uvedené „desky“. Při sériové výrobě strojů se používá následující úprava. Do rybinových drážek B na vnějším obvodu plechů (obr. 4.1) se při stažení svazku pod lisem zalisují pásy plechu, předběžně tvarované do profilu drážky. Přehnuté pásy se ke stahovacím „deskám“ připevní způsobem naznačeným na obr. 4.2 [4].



Obr. 4.1 Příklad výkresu satorového plechu střídavého stroje [4].



Obr. 4.2 Satorový svazek stříd. stroje stažený páskami: **1**-sator. svazek, **2**-páska, **3**-stahovací „deska“ [4].

Obr. 4.3 Sator. svazek malého asyn. motoru zalitý hliníkovou slitinou: **1**-sator. svazek, **2**-hliníkový obal [4].

Stažený satorový svazek se upevní v kostře po navinutí, zaklínování a impregnaci satorového vinutí [4].

U hromadně vyráběných asynchronních motorů malých výkonů (s výškou osy $h \leq 63\text{mm}$) se satorový svazek vkládá do kokily pro tlakové odlití kostry z hliníku nebo jeho slitiny. Kostra musí být konstruována tak, aby po vychladnutí a smrštění odlitku byl svazek spolehlivě zajištěn axiálně i radiálně, jak je patrné z obr. 4.3 [4].

Při průměrech statorových plechů $500 \leq D_e \leq 990\text{mm}$ se statorový svazek vkládá do vývrtu kostry statoru, který je vytvořen buď po celém obvodu kostry, nebo vysoustružen v podélných žebrech, která tvoří nosný systém kostry, jak je naznačeno na obr. 9.5. Svazek je stažen dvěma stahovacími kruhy. Stahovací síly se na jedné straně zachycují na opěrné ploše, vytvořené na žebrech pro opření stahovacího kruhu. Na opačné straně jsou axiální síly zachyceny pery, zapuštěnými do drážek v žebrech. Tlak na zuby statoru se přenáší přítlačnými palci, přivařenými ke krajním plechům svazku [4].

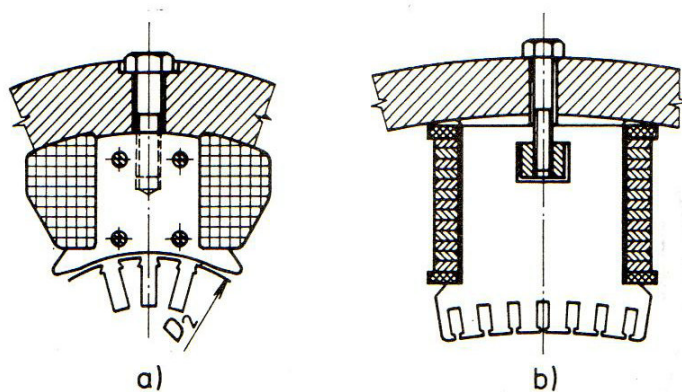
4.2 Póly

Na pólech elektrických strojů je umístěno budící vinutí, které vytváří magnetický tok. Póly s pólovými nástavci zajišťují potřebné prostorové rozložení magnetického pole ve vzduchové mezeře stroje. U stejnosměrných strojů bývají póly umístěny zpravidla na statoru, u synchronních strojů na rotoru. U stejnosměrných strojů jsou na statoru kromě hlavních pólů umístěny pomocné póly, určené pro zlepšení komutace [4].

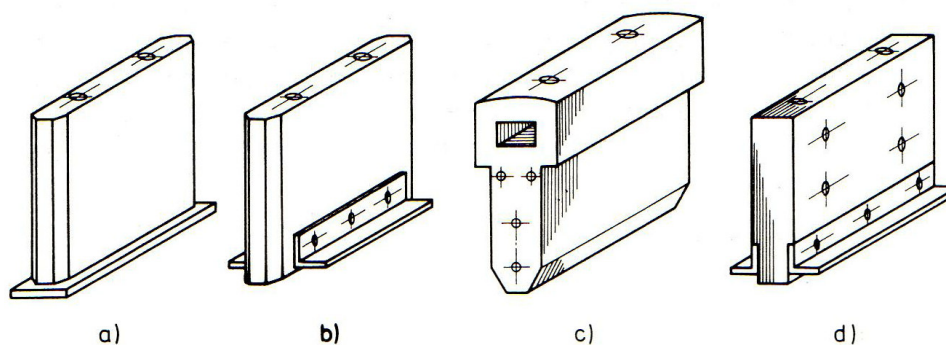
Hlavní póly stejnosměrných strojů bývají převážně listěné, tj. složené z plechů o tloušťce $t=1\text{mm}$, výjimečně mohou být i plné (odlité z oceli na odlitky). Listěné póly se po složení stlačí pod lisem tlakem asi 2 až 2,5 krát 10^6 Pa a stáhnou se svorníkem. Krajní plechy listěného svazku jsou z plechu větší tloušťky. Podle rozměrů pólu se lisují z plechu o tloušťce 4 až 10mm a jejich rozměry bývají o něco menší než u ostatních plechů svazku [4].

Svorníky procházejí vylisovanými otvory a jejich konce se roznýtují nebo zavaří do kuželových zahloubení krajních plechů větší tloušťky. Svorníky jsou rovnoměrně rozloženy po příčném průřezu pólu a jejich nosný průřez je asi 2 až 3% styčné plochy plechů. Ke stažení pólů se použijí nejméně 4 svorníky. Průměr vylisovaných otvorů pro svorníky bývá asi 0,15 až 0,2mm větší než průměr svorníků. Obvykle používané průměry svorníků jsou 6, 8, 10 a 12mm [4].

Póly se ke jhu statoru připevňují šrouby, pro které se do jádra hotového pólu vrtají otvory se závitem, jak naznačuje obr. 4.4a. Závit vyříznutý v jádru listěného pólu není vzhledem k menší mechanické spolehlivosti vhodný pro připevnění pólů náročně namáhaných strojů. Proto se u velkých strojů a strojů s nárazovým zatěžováním póly vyztužují traverzou, procházející jádrem pólu v celé jeho délce. V traverze jsou vyříznuty závity pro připevňovací šrouby, jak je naznačeno na obr. 4.4b [4].



Obr. 4.4 Přípevnění hlavního pólu ke kostře [4].



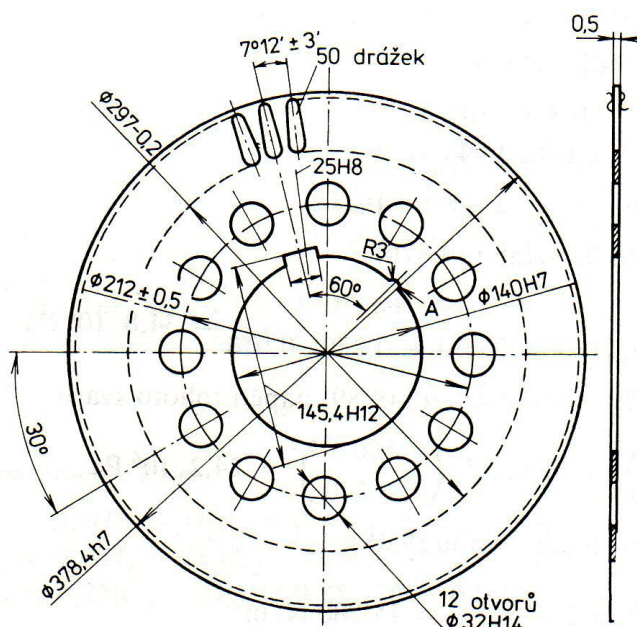
Obr. 4.5 Pomocné (komutační) póly stejnosměrných strojů [4].

V pólových nástavcích hlavních pólů velkých strojů bývají vylisovány drážky pro uložení kompenzačního vinutí, jak je patrné z obr. 4.4b [4].

Pomocné póly stejnosměrných strojů mohou být buď z plného materiálu, nebo listěné. Plné póly se odlévají z oceli na odlitky nebo je lze vyrobit opracováním válcovaných ocelových tyčí. Na obr. 4.5 jsou znázorněna různá konstrukční řešení pomocných pólů. Vinutí se připevňuje obvykle na pól jednoduchou konstrukcí z nemagnetického materiálu, jak je naznačeno na obr. 4.5b, d. U strojů s kompenzačním vinutím se póly směrem ke jhu rozšiřují (obr. 4.5c). Získá se tím větší dosedací plocha pólu na jhu, větší tuhost pólu v tečném směru k obvodu statoru a zmenšení rozptylových magnetických toků. Pomocným pólům listěným se dává přednost před plnými zvláště u strojů s vyššími požadavky na regulační vlastnosti a také u strojů napájených z usměrňovačů [4].

4.3 Rotory asynchronních a kotvy stejnosměrných strojů

Rotorový svazek asynchronních a stejnosměrných strojů je složen z tenkých ocelových plechů pro elektrotechniku, válcovaných za tepla. Pro stroje s vnějším průměrem rotoru do 990mm se používají jednodílné mezikruhové plechy tloušťky $t=0,5\text{mm}$. Vedle rotorových drážek na obvodu jsou v plechu vylisovány také kruhové otvory průměru 15 až 30mm, které ve složeném svazku představují axiální ventilační kanály. Při velké radiální výšce rotorového jha jsou otvory vylisovány ve dvou i více řadách. Na obvodu vrtání plechu je vylisována drážka pro pero, které zajišťuje přenos točivého momentu na hřídeli. Aby se zmenšilo proložení drážek, skládají se jednodílné mezikruhové plechy v rozsahu celého rotorového svazku stále do stejné vzájemné polohy. Umožňuje to buď zmíněná drážka pro pero, nebo zářez vylisovaný na obvodu vnitřního průměru, označený na obr. 4.6 písmenem A, který slouží jako značka pro skládání. Po vylisování se plechy odhrotí a izolují, v současné době převážně lakováním. U malých asynchronních motorů s rotorem nakrátko se v případě vstříkově odlévané klece obvykle upouští od přenosu točivého momentu perem a rotorový svazek se nalisuje s přesahem na vroubkovaný hřídel [4].

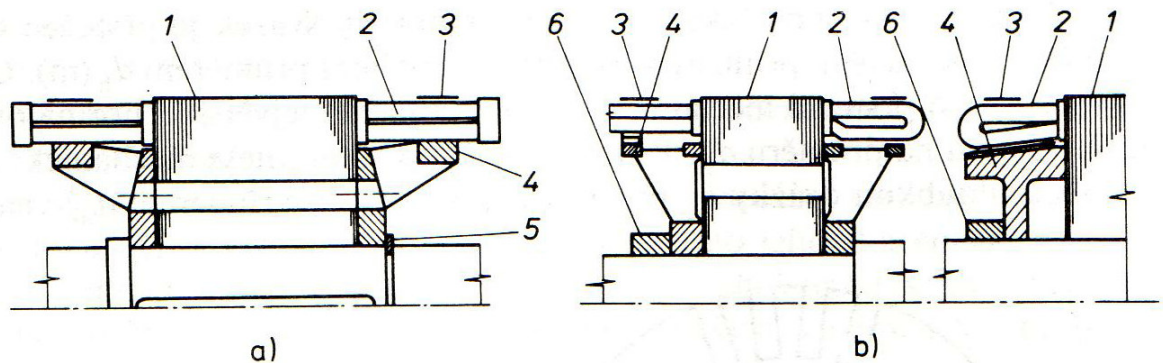


Obr. 4.6 Příklad rotorového plechu asynchronního motoru [4].

Na obr. 4.7 je naznačeno uložení rotorového svazku přímo na hřídel. Tento způsob se používá pro menší stroje stejnosměrné i asynchronní, a to jak pro motory kroužkové, tak také pro motory s klecí (rotorem) nakrátko. Rotorový svazek 1 se po stlačení pod lisem stáhne

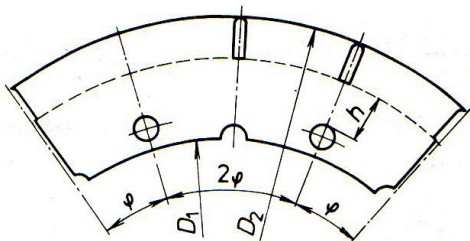
stahovacími kruhy. Čela rotorových cívek 2 se opírají o podpěry vinutí 4. Stahovací kruh je obvykle vytvořen vcelku s podpěrou a vhodně přizpůsoben tvaru čel vinutí [4].

Hotový rotorový svazek nasazený na hřídel musí být axiálně zajištěn proti posunutí. Na jedné straně se opře o osazení hřídele většího průměru, na opačné straně se zajistí přídržným kroužkem, který je buď zalícován do drážky hřídele podle pozice 5 (obr. 4.7a), nebo je nasazen s přesahem podle pozice 6 (obr. 4.7b) [4].



Obr. 4.7 Rotor z celých plechů [4].

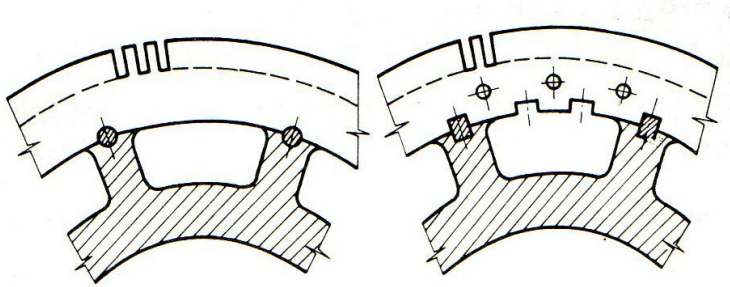
Čela vinutí jsou mechanicky zajištěna proti účinkům odstředivé síly bandáží, označenou 3.



Obr. 4.8 Segment rotorového plechu [4].

Rotorový svazek o průměru větším než 990mm se skládá z mezikruhových segmentů, vylisovaných z tenkých plechů pro elektrotechniku, válcovaných za tepla. Segmenty se při montáži zakládají na stahovací svorníky vylisovanými otvory, jejichž umístění je patrné z obr. 4.8. Rotorový svazek složený ze segmentů se ukládá na rotorovou hvězdičku způsobem naznačeným na obr. 4.9. Tětiva segmentů se s ohledem na šířku plechových pásů nebo tabulí volí co nejdelší, přičemž se ovšem přihlíží k dobrému využití materiálu optimalizací stříhového plánu. Pro spojení rotorové hvězdičky s aktivním věncem na jeho vnitřním průměru bývají v segmentech vylisovány drážky rybinové, drážky pravoúhlého průřezu pro pera nebo půlkruhové drážky pro svorníky. Na každém segmentu musí být nejméně dvě drážky

některého z uvedených tvarů. Zatímco se statorové plechy překládají obvykle o $\frac{1}{2}$ rozteče, používají se u rotorových segmentů nejrůznější způsoby překládání, aby se příliš neuplatňovalo zmenšení mechanické pevnosti věnce ve styčných spárách segmentů. Rotorový svazek se po stlačení stáhne stahovacími kruhy a svorníky, které musí být uspořádány na vnitřním průměru věnce [4].



Obr. 4.9 Kotva stejnosměrného stroje složená ze segmentů [4].

5 Stávající a budoucí vývoj

5.1 Zvyšování účinnosti elektrických motorů

Elektromotorům věnují normy pro energetickou účinnost a předpisy mimořádnou pozornost z důvodu jejich širokého průmyslového využívání a dobře dokumentovaného provedení, výkonu a zkušebních specifikací. Na úrovni motorů bylo dosaženo významných zlepšení účinnosti, avšak nyní již dosahují svých technologických a ekonomických mezí. V poslední době se pozornost soustředí na větší „hnaný systém“ připojený k motoru, kde se očekávají další přínosy v oblasti účinnosti [14].

Pro střídavé indukční motory byly v různých rozvinutých zemích vypracovány standardy minimální účinnosti MEPS (Minimum Efficiency Performance Standard). Hlavní pozornost byla věnována tomuto typu motoru z důvodu jeho obrovské instalované základny po celém světě. Standardy MEPS pro motory jsou jednou z oblastí, v níž mají globální prvenství USA, přičemž silné pozice zaujímají mimo jiné také Austrálie, Brazílie a Kanada. V poslední době se se stanovením povinnosti MEPS připojila také Evropská unie [14].

V Evropské unii (EU) byla vypracovaná série norem organizace IEC (International Electrotechnical Commission), které pokrývají nejrůznější oblasti střídavých indukčních motorů a dalších typů motorů. Pokrytí výkonového rozsahu motorů bylo v normě IEC 60034-30 rozšířeno na rozsah 0,12-500kW, pro jednotky běžící na síťové frekvenci 50Hz. Vyšší výkony až do 800kW budou mít ploché limity účinnosti. Nyní je zahrnuto více typů motorů: veškeré motory s fixní rychlostí, synchronní motory s vinutým rotorem, jednofázová provedení a téměř všechny typy brzdových motorů, stejně jako synchronní motory s proměnlivou rychlostí a permanentními magnety (PM) s rozsahem rychlostí otáčení 1000-5000 ot./min [14].

Norma IEC 60034-30 definuje pro střídavé indukční motory čtyři mezinárodní třídy účinnosti (International Efficiency – IE): standardní účinnost (IE1), zvýšená účinnost (IE2), vysoká účinnost (IE3) a velmi vysoká účinnost (IE4). Byla navržena ještě vyšší třída IE5, přičemž takto způsobilý komerčně dostupný motor nebyl specifikován ani nebyl dostupný. Nicméně se do budoucna předpokládá tato technologie motorů, která by oproti třídě IE4 dokázala snížit ztráty o 20%. I když střídavé indukční motory byly primární technologií pro

normy účinnosti, je pro tento typ motoru stále těžší splňovat vyšší požadavky IE. Zde přicházejí do hry další typy motorů, jako jsou synchronní motory s permanentními magnety [14].

Nadcházející normy se zaměří na motory napájené ze sítě versus motory napájené měničem VSD (například norma IEC 60034-2-3). Když je v motorovém systému začleněn měnič VSD, je nutno posuzovat harmonické ztráty pohonu a účinnost sinusového filtru. Technické výbory IEC rovněž pracují na dalších topologiích motorů, jako jsou spínané reluktanční motory, elektronicky komutované motory a motory specificky vyrobené pro provoz s měničem VSD, které budou zahrnuty do budoucích norem účinnosti IEC. Nařízení EU č. 640/2009 na základě definic tříd IE implementovalo povinné požadavky na energetickou účinnost v Evropě, podle následujícího časového rozvrhu [14]:

- účinnost IE2 k 16. červnu 2011 pro motory o výkonovém rozsahu 0,75-375kW,
- účinnost IE3 k 1. lednu 2015 pro motory o výkonovém rozsahu 7,5-375kW,
- účinnost IE3 k 1. lednu 2017 pro motory o výkonovém rozsahu 0,75-375kW.

Druhá a třetí fáze tohoto nařízení představují zajímavou vazbu k pohonům s proměnnou rychlostí (VSD). Elektromotory s nejvyšší účinností poskytují největší přínos takovým aplikacím, kde motory běží za téměř konstantních rychlostí a jsou v provozu velký počet hodin za rok. Mezi takové aplikace patří mj. výroba provozního plynu a ventilátory pro oběh vzduchu u elektráren. Nicméně u mnoha ostatních aplikací vyžadují části větších systémů hnaných motory posouzení účinnosti před implementací nebo posouzení z hlediska přepracování návrhu nebo modernizace [14, 15].

Údaje o účinnosti jsou omezené nebo nedostatečné pro nespočet provozovaných průmyslových a komerčních systémů. Složitost a velký počet proměnných přítomných v tak velkých systémech jsou podstatou problému. Další vývojovou oblastí je posuzování a zvyšování výkonu při částečném zatížení (například při zatížení 50% a 25%), ať už jde o motory nebo připojená zařízení [14].

V důsledku těchto norem vyvstávají cenné příležitosti k modernizaci. Konkrétním příkladem je modernizace ventilátorů chladicích věží, které se používají v různých průmyslových a komerčních závodech. John Malinowski ze společnosti Baldor Electric zmiňuje výměnu kombinace neefektivního šnekového redukčního převodu a

dvourychlostního indukčního motoru za synchronní motor s vnitřním permanentním magnetem a přímým pohonem třídy IE4 (obr. 5.1) a měnič VSD, která přinesla 50% úsporu spotřeby elektrické energie a další přínosy. Tato relativně jednoduchá modernizace odstranila nutnost použití redukčního převodu [14].

Malinowski shrnuje perspektivy zvyšování účinnosti motorových systémů: „Již mnoho let provádíme výměnu komponent za účelem modernizace pro vyšší účinnost. Ačkoliv jde o dobrou praxi, přináší to jen mírné úspory.“ Co je zapotřebí, je pohled na kompletní „systém“, od rozvodného transformátoru, přes chytrý startovací motor a pohon, až po mechanické převodní komponenty a poháněnou zátěž. „Optimalizace všech komponent v rámci kompletního systému, stejně jako využívání procesního řízení, může přinášet vysoké procentuálně dvouciferné úspory, zvýšenou produktivitu a zkrácení doby prostojů“ [14].



Obr. 5.1 Motor s vnitřním permanentním magnetem (IPM) [14].

5.2 Příklad inovace motorů – Synchronní motory DINEO LSRPM

LSRPM je nová řada synchronních motorů s permanentními magnety na rotoru využívající patentovanou technologii Leroy-Somer. Inovativní konstrukce magnetů na rotoru zvyšuje účinnost o téměř 10% na hodnotu blízkou 98%. Motor má řádově o 50% menší rozměry. Tento typ je určený pro instalace s trvale vysokou spotřebou elektrické energie. Díky tomu je ve většině případů návratnost investice za výměnu asynchronního motoru za motor LSRPM kratší než jeden rok. Protože motory mají více než 70% podíl na celkové spotřebě elektrické energie v průmyslovém sektoru, nová výrobní řada LSPRM rovněž přispívá k hlavním cílům snižování emisí CO₂ [16].

Parametry LSRPM vycházejí z patentované technologie Leroy-Somer pro rotor s radiálně orientovanými magnety. V důsledku snížení ztrát v rotoru tato technologie umožňuje dosažení účinnosti až 98% a zvýšení poměru mezi výkonem a hmotností motoru. Tato výhoda se neuplatňuje pouze při jmenovitých otáčkách, ale i v oblasti pod jmenovitými otáčkami, což je případ instalací s proměnnými otáčkami. Srovnání s běžnými motory závisí na dané instalaci. V konkrétním případě šroubového kompresoru původně poháněného systémem z proměnnými otáčkami využívající dvupólový asynchronní motor se stupněm krytí IP23, výškou hřídele 315mm a výkonem 280kW dosahuje účinnost při regulaci otáček 92,7%. Řešení DYNEO se synchronním motorem LSRM 280 MD s permanentním magnetem a výkonem 260kW poskytuje účinnost při regulaci otáček 97,6% v rozpětí otáček 0 až 3000 ot./min. Úspora hmotnosti motoru se sníží z 900 na 380kg. Ve srovnání s běžným řešením je doba návratnosti investice kratší než 12 měsíců. Mechanický systém řady LSRPM mají krytí stupně IEC IP55, který je v tomto odvětví nejběžnější [16].

Nízké ztráty v technologii rotoru s magnety značně omezují zahřívání vinutí. Tím se snižuje četnost mazání ložisek a prodlužuje se životnost motoru. Oblasti instalace a použití motorů LSRPM jsou stejně rozsáhlé jako u asynchronních motorů: čerpadla, ventilace, kompresory, dopravníky, protlačovací stroje, zpracovatelské stroje, generátory a mnoho dalších [16].

6 Závěr

Cílem této práce bylo porovnat minulé a současné materiály a konstrukce magnetických obvodů elektrických strojů a určit směr budoucího vývoje.

V práci jsem se co nejvíce snažil popisovat historický vývoj, aby byl poznat znatelný skok, který se v elektrotechnice za poslední století stal. Byl ruku v ruce spojen s experimenty a fantazií fyzikálních vědců, které dnes nahradili počítačové simulace a značně tím urychlili ověřování nových možností. Díky tomu a zlepšováním technologických postupů při výrobě jsme se dostali na účinnost elektrických motorů k 98 % (synchronní motor DINEO LSRPM).

V páté části uvádím popis zavedení plošných standardů účinností pro různé skupiny motorů, které se budou postupně rozšiřovat a už začátkem příštího roku se bude používat účinnost IE3 (vysoká účinnost) pro motory o výkonovém rozsahu 7,5-375kW. Již v dnešní době si na příkladu z kapitoly 5.2 můžeme ukázat, že návratnost větší investice do moderních motorů může být kratší než jeden rok. V tomto případě šlo o použití permanentních magnetů na rotoru (u synchronního stroje), čímž jsme dosáhli 10% zvýšení účinnosti motoru (změnou konstrukce magnetického obvodu). Pro permanentní magnety se nejvíce nabízejí magneticky tvrdé materiály s největší magnetickou indukcí - kovy ze vzácných zemin (magnety z Neodymu).

Co se týká materiálů a dalšího vývoje v netočivých elektrických strojích, příkládám velký význam nástupu amorfních materiálů. Ve srovnání s doposud nejlepší ocelí pro elektrotechniku mají pásy z amorfního materiálu jen třetinové ztráty (Příloha 1.). Přitom se neustále rozšiřuje spektrum amorfních slitin a tento vývoj nám naznačuje, že výzkum těchto slitin je do budoucna velmi perspektivní.

7 Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] WASYLUK, .*Elektrotechnologie*, Scientia, Praha 2004.
- [2] MAYER, Daniel. *Pohledy do minulosti elektrotechniky*, Kopp, České Budějovice 2004.
- [3] VLADAŘ, Jaroslav. *Elektrotechnika a silnoproudá elektronika*, SNTL, Praha 1986.
- [4] KOPYLOV, Igor Petrovič. *Stavba elektrických strojů*, SNTL, Praha 1988.
- [5] JIRÁK, Josef. *Materiály a technická dokumentace*, VUT, Brno 2002.
- [6] BATKA, Vilém. *Elektromagnetismus*, SNTL, Praha 1970.
- [7] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody*, VUT, Brno 2011.
- [8] BOUDA, Václav. *Materiály pro elektrotechniku*, ČVUT, Praha 2000.
- [9] ŠAVEL, Josef. *Elektrotechnologie*, BEN, Praha 2004.
- [10] DRÁPALA, Jaromír. *Elektrotechnické materiály*, Technická univerzita Ostrava 2012.
- [11] MĚŘIČKA, Jiří. *Elektrické stroje* (skripta), ČVUT, Praha 2000.
- [12] HRABOVCOVÁ, Válerie. *Moderné elektrické stroje* (skripta), Žilinská univerzita 2001.
- [13] <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/reluktančni-motor/sr-motor> [2.6.2014].
- [14] <http://www.controlengcesko.com/hlavni-menu/artikuly/artikul/article/novinky-v-oblasti-zvysovani-ucinnosti-motorem-hnanych-systemu/> [2.6.2014].
- [15] <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/motory-s-vysokou-efektivitou> [2.6.2014].
- [16] <http://www.mmspektrum.com/novinka/synchronni-motory-dyneo-lsrpm.html> [2.6.2014].
- [17] HABERLE, Gregor. *Elektrotechnické tabulky*, Europa-Sobotáles, Praha 2006.
- [18] TKOTZ, Klaus. *Příručka pro elektrotechniku*, Europa-Sobotáles, Praha 2006.
- [19] MAYER, Daniel. *Aplikovaný elektromagnetismus*, Kopp, České Budějovice 2012.
- [20] <http://www.power-energo.sk/down/UTXOYEMm5g-5015-leaflet-amorfni-tr.pdf> [2.6.2014].

8 Přílohy

1. Porovnání běžných transformátorů s transformátory s amorfním jádrem od firmy Power-Energo (1 list A4).

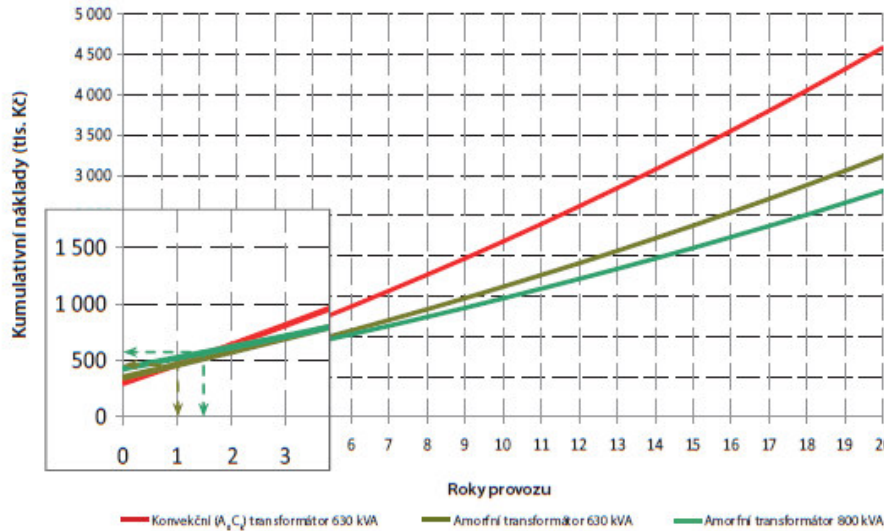
Nejnižší ztráty na trhu

olejové distribuční transformátory ABB

s amorfním jádrem ($U_n = 22$ kV)



Porovnání kumulativních nákladů na provoz transformátorů pro BPS s KGJ 550 kW



Návratnost a úspora oproti konvekčnímu transformátoru

Rok	Am. 630 kVA (tis. Kč)	800 kVA (tis. Kč)
0	-50,0	-130,0
1	-4,8	-55,2
2	60,9	21,4
3	118,5	100,0
4	177,5	180,5
5	238,0	263,1
10	563,8	707,8
15	932,4	1210,9
20	1349,4	1780,2

Porovnání kumulativních nákladů

Rok	konvekční 630 kVA (tis. Kč)	amorfni 630 kVA (tis. Kč)	amorfni 800 kVA (tis. Kč)
0	300,0	350,0	430,0
1	467,8	463,0	523,0
2	639,8	578,8	618,4
3	816,1	697,6	716,1
4	996,8	819,3	816,3
5	1182,0	944,0	918,9
10	2179,9	1616,1	1472,1
15	3308,9	2376,5	2098,0
20	4586,3	3236,9	2806,1

* Pozn.: Uvažovaná doba provozu BPS na 100 % (tj. 550 kW) 8000 h / rok. Předpokládaná výkupní cena pro rok 2013 je 3,55,- Kč / kWh. Uvažovaná průměrná meziroční inflace je 2,5 %. Uvažovaný transformátor 630 kVA s magnetickým jádrem z orientovaných plechů má ztráty A_0C_k (tj. $P_0 = 560$ W, $P_k = 6750$ W).

Vypočítejte si sami spotřebu el. energie transformátoru za 1 rok provozu BPS

1. Transformátor s amorfním jádrem $S_n = 800$ kVA ($P_0 = 325$ W, $P_k = 6000$ W)

$$E = T_p \cdot \left(P_0 + \left(\frac{P}{S} \right)^2 \cdot P_k \right) = 8000 \cdot \left(325 + \left(\frac{550}{800} \right)^2 \cdot 6000 \right) = 8000 \cdot (325 + 2\,825,6) = 25\,288 \text{ kWh}$$

2. Transformátor s jádrem z orientovaných plechů ztráty A_0C_k $S_n = 630$ kVA ($P_0 = 560$ W, $P_k = 6750$ W)

$$E = T_p \cdot \left(P_0 + \left(\frac{P}{S} \right)^2 \cdot P_k \right) = 8000 \cdot \left(560 + \left(\frac{550}{630} \right)^2 \cdot 6750 \right) = 8000 \cdot (560 + 5\,125,8) = 45\,636 \text{ kWh}$$

Úspora za 1 rok
72 235 Kč

Porovnání běžných a ultra redukovaných ztrát se ztrátami transformátoru s amorfním jádrem

S_n [kVA]	$E_{D_k}^*$		$A_0C_k^*$		Amorphous	
	P_0 [W]	P_k [W]	P_0 [W]	P_k [W]	P_0 [W]	P_k [W]
100	320	2150	145	1750	75	1250
250	650	4200	300	3250	130	2100
400	930	6000	430	4600	195	3200
630	1200	8700	560	6750	270	4700
800	1400	10500	650	8400	325	6000
1000	1700	13000	770	10500	350	6550

* Pozn.: Označení ztrát $E_{D_k}^*$ („běžné ztráty“) resp. $A_0C_k^*$ („ultra redukované“) vychází z normy ČSN EN 50464-1

