

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Synchronní stroje s permanentními magnety

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Radek TESÁREK**
Osobní číslo: **E10B0400P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Synchronní stroje s permanentními magnety**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Popište princip synchronních strojů s permanentními magnety.
2. Vytvořte přehled možných uložení permanentních magnetů u synchronních strojů.
3. Vytvořte přehled materiálů permanentních magnetů používaných pro konstrukce synchronních strojů.
4. Na dodaném stroji proveďte měření charakteristických veličin PMSM.



Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

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

Seznam odborné literatury:

1. **BARTOŠ, V.: Elektrické stroje.**
2. **HRABOVCOVÁ, V.: Moderné elektrické stroje**
3. **HANSELMAN, D. C.: Brushless Permanent Magnet Motor Design**
4. **VIDLIČKA, M.: Permanentní magnety**

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Karel Hruška, Ph.D.

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2012**

Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2013**

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan



Prof. Ing. Václav Kús, CSc.

vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Anotace

Touto prací bych chtěl shrnout konstrukci synchronního stroje s permanentními magnety, jeho princip a také přiblížit materiály, ze kterých se permanentní magnety vyrábějí. Teoretické předpoklady, poté ověřím praktickým měřením a zpracováním jeho výsledků.

Klíčová slova

Synchronní stroj s PM, permanentní magnet, magnetický materiál, stator, rotor

Annotation

In this work , I would like to summarize constructions the Permanent Magnet Synchronous Motor, its principle and materials from witch they are produced the permanent magnet. Theoretical supposition , then I verify practical measurements and processing of the results.

Key words

Synchronous motor permanent magnet, permanent magnet, magnetic material, stator, rotor

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 6.6.2013

Radek Tesárek

Poděkování

Chtěl bych poděkovat mému vedoucímu Ing. Karlovi Hruškovi, Ph.D. za jeho vstřícný přístup, cenné rady v průběhu zpracování BP a také ochotu při měření a konzultacích.

Obsah:

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD.....	11
1. PRINCIP SYNCHRONNÍCH STROJŮ S PERMANENTNÍMI MAGNETY	12
1.1. OBECNÝ PRINCIP SYNCHRONNÍCH STROJŮ	12
1.2. KONSTRUKČNÍ PŘEVODENÍ SYNCHRONNÍCH STROJŮ	13
1.2.1. Turbostroje	13
1.2.2. Stroje s vyniklými póly (hydrostroje)	13
1.3. REAKTANCE SYNCHRONNÍCH STROJŮ	14
1.4. STATOROVÉ VINUTÍ SYNCHRONNÍHO STROJE	15
1.4.1. Činitel vinutí	15
1.4.2. Indukované napětí	15
1.5. NÁHRADNÍ SCHÉMA SYNCHRONNÍHO STROJE	16
1.6. SYNCHRONNÍ STROJ S PM	17
1.6.1. Vytvoření momentu synchronního stroje s PM	17
1.7. FÁZOROVÝ DIAGRAM SYNCHRONNÍHO STROJE S PM	20
2. ULOŽENÍ PERMANENTNÍCH MAGNETŮ U SYNCHRONNÍCH STROJŮ	21
2.1. VÁLCOVÉ STROJE	21
2.1.1. Povrchové uspořádání	21
2.1.2. Vnitřní uspořádání	21
2.2. DISKOVÉ MOTORY	22
2.2.1. Uspořádání se statorem uprostřed	23
2.2.2. Uspořádání s rotorem uprostřed a dvojdiskové uspořádání	23
2.2.3. Tvar magnetů diskových motorů	23
2.3. KONKRÉTNÍ PŘÍKLADY ULOŽENÍ PM V SYNCHRONNÍM STROJI	24
2.3.1. Permanentní magnety uloženy na rotoru	24
2.3.2. Druhy vinutí statoru u PMSM.....	25
3. MATERIÁLY PM POUŽÍVANÉ PRO SYNCHRONNÍ STROJE	26
3.1. MAGNETISMUS	26
3.2. MAGNETICKÉ POLE.....	26
3.3. DŮLEŽITÉ FYZIKÁLNÍ VELIČINY POPISUJÍCÍ MAGNETICKÉ POLE	27
3.4. ROZDĚLENÍ MAGNETICKÝCH MATERIÁLŮ PODLE POMĚRNÉ PERMEABILITY	28
3.4.1. Diamagnetické	28
3.4.2. Paramagnetické	28
3.4.3. Feromagnetické.....	28
3.4.3.1. Antiferomagnetické.....	28
3.4.3.2. Feromagnetické.....	28
3.5. MAGNETICKÉ MOMENTY RŮZNÝCH TYPŮ MAGNETŮ	29
3.6. VLASTNOSTI MATERIÁLŮ	29
3.6.1. Hysteresní smyčka	29
3.7. MAGNETICKÁ TVRDOST MATERIÁLŮ	29
3.7.1. Magneticky měkké materiály.....	30

3.7.2. Magneticky tvrdé materiály	30
3.8. MATERIÁLY PM	31
3.8.1. Materiály na bázi slitin.....	31
3.8.2. Ferity	32
3.8.3. Materiály ze vzácných zemin.....	33
3.8.3.1. Samarium – kobaltové PM (Sm-Co).....	33
3.8.3.2. Neodym – železo – bór (NdFeB).....	33
3.8.3.3. Vlastnosti PM ze vzácných zemin	34
4. MĚŘENÍ NA SYNCHRONNÍM STROJI S PM	35
4.1. MĚŘENÍ NAPRÁZDNO	35
4.1.1. Schéma zapojení	35
4.1.2. Naměřené hodnoty	36
4.1.3. Průběh indukovaného napětí.....	36
4.1.4. Charakteristika naprázdno	37
4.2. MĚŘENÍ NAKRÁTKO.....	37
4.2.1. Schéma zapojení	37
4.2.2. Naměřené hodnoty	38
4.2.3. Průběh proudů	38
4.2.4. Charakteristika nakrátko	39
4.3. MĚŘENÍ PŘI ZATÍŽENÍ	39
4.3.1. Schéma zapojení	40
4.3.2. Průběh napětí a proudu	40
4.3.3. Naměřené hodnoty	40
4.4. SEZNAM POUŽITÝCH PŘÍSTROJŮ.....	41
4.5. VYPOČTENÉ PARAMETRY STROJE	41
5. ZÁVĚR.....	44
6. LITERATURA	45

Seznam symbolů a zkratk

ω_s	.....	rychlost točivého pole
f	.....	frekvence
p	.....	počet pólů
M	.....	točivý moment
β	.....	zátěžný úhel
F	.....	magnetické napětí
M_m	.....	moment motoru
M_z	.....	moment zátěže
X_{hl}	.....	hlavní reaktance synchronního stroje
C_d	.....	činitel
X_{ad}	.....	podélná reaktance v ose d
X_{aq}	.....	příčná reaktance v ose q
X_σ	.....	rozptylová reaktance
k_v	.....	činitel vinutí
k_y	.....	činitel kroku
k_r	.....	činitel rozlohy
m'	.....	matematický počet fází
U_i	.....	indukované napětí
t_p	.....	pólová rozteč
N_s	.....	počet závitů
v	.....	rychlost
Φ	.....	magnetický tok
Z_d	.....	podélná impedance
PMSM	.....	anglická zkratka pro synchronní stroj s permanentními magnety
PM	.....	permanentní magnet
x_d	.....	poměrná podélná impedance
x_q	.....	poměrná příčná reaktance
ϑ	.....	zátěžný úhel pro stroje s vnitřním uspořádáním PM
μ_0	.....	permeabilita vakua
μ_r	.....	relativní permeabilita
N	.....	severní pól
S	.....	jižní pól
T_c	.....	Curieho teplota
H	.....	intenzita magnetického pole

B.....	magnetická indukce
B_r	remanentní indukce
H_c	koercitivní intenzita
$(B \cdot H_{max})$	maximální magnetický součin
Al-Ni-Co.....	slitina hliníku, niklu a kobaltu
$BaFe_{12}O_{19}$	keramický oxid barya
$SrFe_{12}O_{19}$	keramický oxid stroncia
Sm-Co.....	PM na bázi samaria a kobaltu
NdFeB.....	PM na bázi neodymu, železa a bóru
n.....	otáčky stroje za minutu
$\emptyset U_{i0}$	průměr indukovaného napětí naprázdno
I_k	proud nakrátko
k_u	konstanta napětí
k_I	konstanta proudu
ω	úhlová rychlost
L_d	podélná indukčnost stroje
Z_n	impedance při jmenovitém proudu a napětí
r_a	poměrná hodnota odporu
R_a	odpor vinutí
Z.....	impedance při zatížení

Úvod

Jak již bylo mnohokrát napsáno, tak synchronní stroje jsou v dnešní době velmi využívané. Hlavní využití je v elektrárnách jako synchronní generátory, které tvoří hlavní součást napájení elektrizační soustavy. Tyto stroje jsou klasické generátory, které mají na statoru třífázové vinutí a na rotoru většinou buzení zajištěno stejnosměrným proudem. Dříve se tyto stroje nepoužívaly jako pohony, z důvodu nedostatečného zajištění jejich řízení. V dnešní době polovodičových měničů je řízení velmi efektivní. Právě to je důvod, že se PMSM používají jako trakční pohony. Vyrábí se od několika stovek wattů použitých například elektro kolech, přes 45kW PMSM v tramvaji 15T For City, až po 1MW motory pro vysokorychlostní vlaky AGV. V jiných aplikacích je nutno využívat otočení o určitý úhel, ne tedy o celé otáčky, a právě proto se PMSM využívají jako servopohony.

1. Princip synchronních strojů s permanentními magnety

1.1. Obecný princip synchronního stroje

Synchronní stroje stejně jako ostatní točivé stroje využívají princip elektromagnetické indukce. Synchronní oproti asynchronním mají stejně rychlé točivé pole rotoru i statoru. Jedno točivé pole je tvořeno statorovým 3.fázovým vinutím a rotorové pole je obvykle vytvářeno stejnosměrně buzeným rotorem.

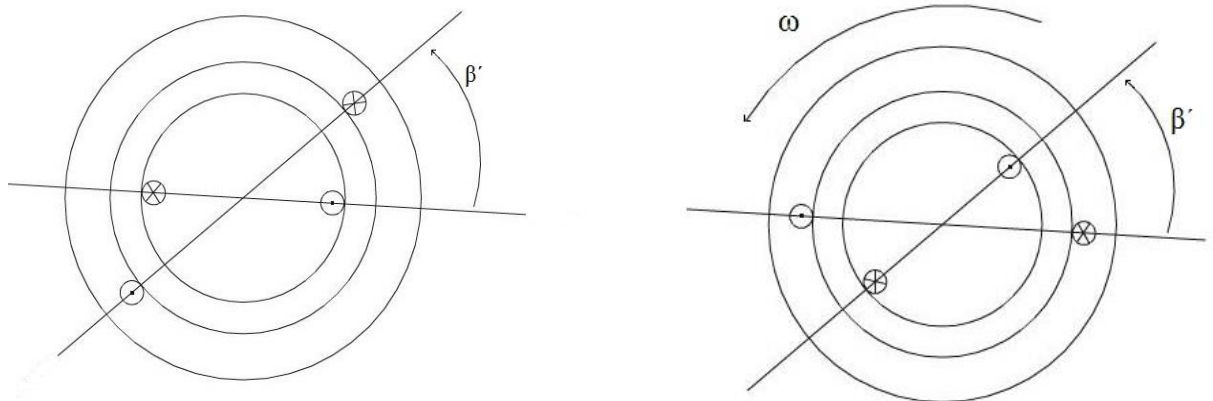
$$\text{Synchronní rychlost točivého pole : } \omega_S = \frac{2 \pi f}{p} \quad (1/1)$$

Tyto 2 pole spolu zabírají a vytváří točivý moment.

$$\mathbf{M} \approx \mathbf{F}_1 \times \mathbf{F}_2 \quad \text{kde } M \approx F_1 \cdot F_2 \sin \beta' \quad (1/2, 1/3)$$

β' je úhel sevřený magnetickými napětími \mathbf{F}_1 a \mathbf{F}_2 . Tímto vidíme, že musí být stejná rychlost točivého pole rotoru i statoru, jinak by se úhel β' měnil a to znamená, že by neplatilo $\beta' = \text{konst.}$ To by vedlo k tomu, že by střední hodnota momentu byla nulová.

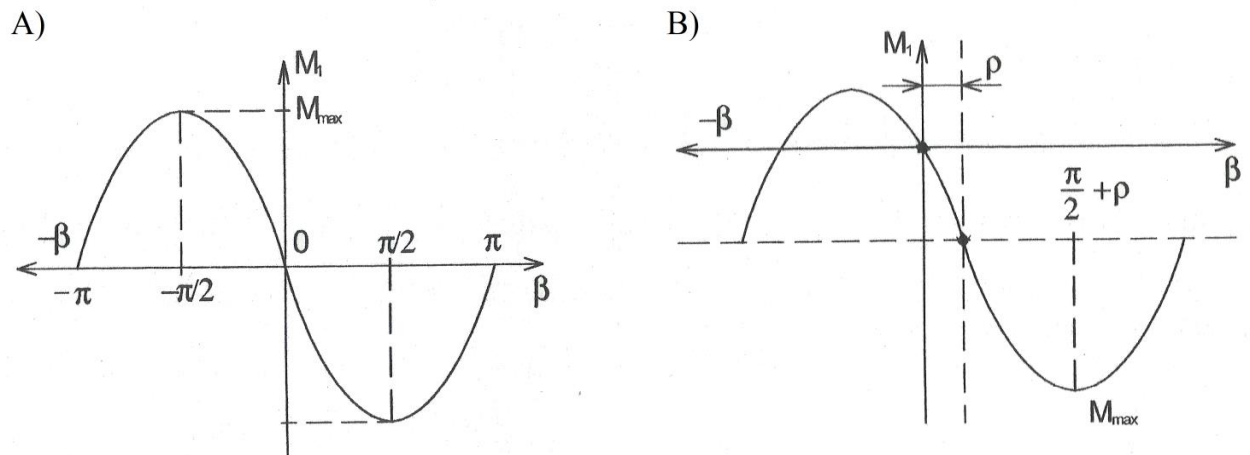
Na obrázku 1.1. můžeme vidět že pole rotoru se zpožďuje za polem statoru o úhel β' , v tomto případě je stroj v režimu motor. Z obrázku 1.2. je patrné, že pole statoru se naopak opožďuje oproti rotoru o úhel β' a tudíž je synchronní stroj v režimu generátor. [1]



Obr.: 1.1. Synchronní stroj v režimu motor [1] Obr.: 1.2. Synchronní stroj v režimu generátor [2]

Synchronní stroj má svou mez zatěžování. Při překročení velikosti zátěžného úhlu β' stroj vypadne ze synchronismu. U motoru to může být způsobeno velkou zátěží na hřídeli, to znamená menší moment motoru než moment zátěže $M_m < M_z$. U generátorů vypadnutí ze synchronismu může nastat při protočení poháněcí turbíny do nadsynchronních otáček. Z obrázku 1.3. vidíme průběh momentu synchronního stroje, až do meze stability v závislosti na zátěžném úhlu β' . [1]

Běžně se uvádí v režimu generátor zátěžný úhel $\beta > 0$ a moment $M_i < 0$. V motorickém režimu se uvádí: $M_i > 0$ a zátěžný úhel $\beta < 0$. [6]



Obr.:1.3. Průběh momentu synchronního stroje A) pro $R_a = 0$ B) pro $R_a \neq 0$ [3]

1.2. Konstrukční provedení synchronních strojů

Synchronní stroje lze rozdělit do dvou základních skupin. A to stroje s hladkým rotorem neboli turbostroje, nebo stroje s vyniklými póly.

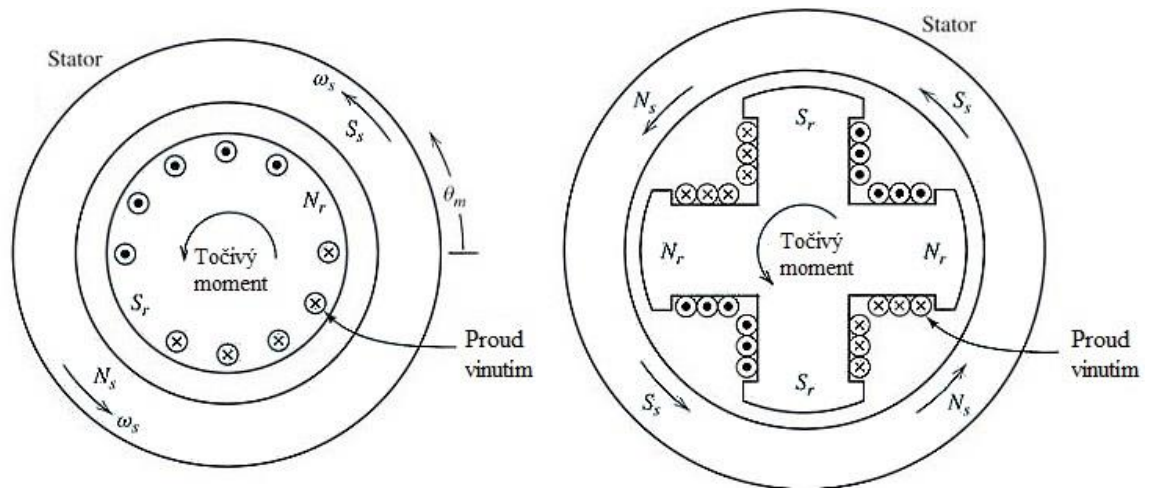
1.2.1 Turbostroje

Nejčastěji používané jako turboalternátory, mají obvykle počet pólů $2p = 2$ nebo $2p = 4$. Jeho vzduchovou mezeru můžeme považovat za konstantní po celém obvodu, i když skutečný turboalternátor má vlivem různého drážkování rotoru proměnlivou vzduchovou mezeru, ale můžeme to zanedbat. Rychlost otáčení pro stroj $2p=2$ při frekvenci 50 Hz je 3000 ot./min. Rotor se vyrábí do maximálního průměru 1,2 m kvůli velkým odstředivým silám, které vznikají při rychlostech 3000 ot./min. [1]

Rotor válcového stroje může být vyroben z vodivého materiálu – masivní oceli, to umožní i při nenabuzení rotoru vznik asynchronního momentu. Toto je použito například při asynchronním rozběhu synchronního stroje. Je-li rotor vyroben z izolovaných plechů, tento moment nevzniká. [6]

1.2.2 Stroje s vyniklými póly (hydrostroje)

Jsou to stroje s vícepólovým uspořádáním $2p \geq 4$. Z provedení plyne proměnná vzduchová mezera $\delta \neq \text{konst}$. Díky proměnné vzduchové mezeře vzniká další složka momentu, která se nazývá reluktanční a je nezávislá na budícím proudu. Závislá je pouze na geometrii rotoru. Tyto stroje mají cívky s budícím vinutím zasazeno na pólech, na jejichž koncích jsou připevněny pólové nástavce. Póly se vyrábějí z dynamoplechů, nebo z ocelolitiny, kde jen pólové nástavce jsou z dynamoplechů. Stroje jsou pomaloběžné, dostatečná frekvence se zajistí právě vyšším počtem pólů. [1], [6]



Obr.: 1.4. a) Turbostroj - 2 pólový

b) Stroj s vyniklými póly - 4 pólový [4]

1.3. Reaktance synchronních strojů

U strojů s vyniklými póly lze rozložit pole do dvou os. Osu označenou d do osy pólu tj. podélná osa a osu q , která je ve středu mezipólové rozteče tj. příčná osa. Tyto pole je rozloženo jako B_d a B_q a stejným způsobem můžeme rozložit i proud, jenž uvedené pole budí a to na složky I_d a I_q . [1]

Reaktanci synchronního stroje můžeme nazvat reaktance reakce kotvy a to je odpovídající reaktance hlavnímu magnetickému toku. Lze ji vyjádřit jako [1]

$$X_{h1} = \frac{4m}{\pi} \mu_0 f(N_s k_v)^2 \frac{t_p l_e}{\delta'' p} \quad (1/4)$$

Velikost hlavního magnetického toku je závislá na magnetickém odporu, který toku stojí v cestě, a proto u stroje s vyniklými póly je hodnota reaktance rozdílná pro osy d a q . Náleží pouze základním harmonickým těchto toků. [1]

$$\text{Pro osu } d: X_{ad} = C_{d1} X_{h1} \quad (1/5)$$

$$\text{Pro osu } q: X_{aq} = C_{q1} X_{h1} \quad (1/6)$$

Další zavedené reaktance budou odpovídat celkovému toku a také rozptylu statoru. Dostaneme tudíž podélnou X_d a příčnou X_q synchronní reaktanci. [1]

$$\text{Podélná synchronní reaktance: } X_d = X_{ad} + X_\sigma \quad (1/7)$$

$$\text{Příčná synchronní reaktance: } X_q = X_{aq} + X_\sigma \quad (1/8)$$

Při zanedbání činného odporu lze reaktance synchronního stroje vypočítat jako:

$$X_d = \frac{U_{ib}}{I_k} \quad (1/9)$$

1.4. Statorové vinutí synchronního stroje.

Synchronní stroje mají velmi podobné statorové vinutí jako stroje asynchronní. Čily vinutí uloženo v drážkách v železném magnetickém obvodu. Tato vinutí mohou být odvozena od stejnosměrných vinutí, která mohou být uzavřená, což jsou vlastně stejnosměrná vinutí, které jsou na vhodných místech napojena na vývody. Další typ stejnosměrných jsou vinutí rozstříhaná, což jsou vinutí, která jsou rozstříhána a na jiných místech zase pospojována. Jiný typ je výhradně střídavý a nazývá se skupinové vinutí. Nejčastěji se používá třífázové vinutí. [1]

1.4.1 Činitel vinutí

Činitel vinutí je důležitá veličina, která se zavádí u střídavých vinutí. Lze definovat jako:

$$k_v = \frac{\sum_l \bar{U}_l}{\sum_l U_l} \quad (1/10)$$

$\sum_l \bar{U}_l$ je geometrický součet napětí všech vodičů v určité fázi, $\sum_l U_l$ je algebraický součet napětí těch stejných vodičů. Činitel vinutí vlastně charakterizuje snížení výsledného napětí pro určité uspořádání vinutí. Je to způsobeno vlivem natočení fázorů napětí cívkových stran. Vždy musí vycházet menší než 1. $k_v < 1$. Činitel vinutí se skládá ze dvou dílčích činitelů. A to z činitele kroku k_y a činitele rozlohy k_r . [1]

$$k_v = k_y k_r \quad (1/11)$$

Činitel kroku určuje velikost napětí jedné cívky, můžeme také říci, že chceme-li maximální napětí na cívce, měla by se její šířka blížit pólové rozteči. Elektrický úhel $\beta_c = \pi$ [1]

$$k_y = \frac{U_c}{2U_{1v}} = \frac{\sin\beta_c}{2} = \frac{\cos\gamma}{2} \quad (1/12)$$

Činitel rozlohy zase určí snížení napětí cívek vlivem jeho natočení po obvodu stroje. β_c je středový úhel cívky. Úhel β je rozložení vodičů fáze v případě, že napěťový polygon vinutí se blíží kružnici. Činitel rozlohy v tomto případě představuje poměr délky tětiny ku oblouku pro jednu fázi. [1]

$$\beta = \frac{2\pi}{m'} \quad (1/13)$$

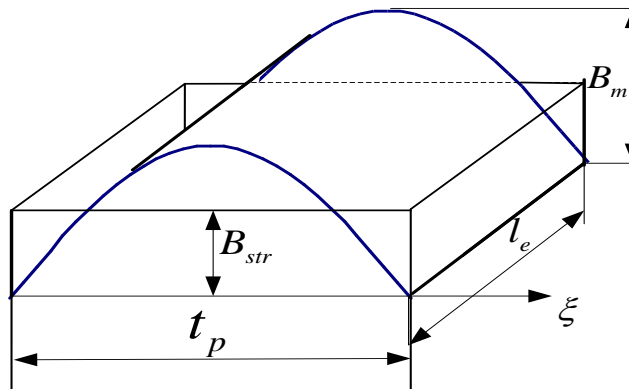
m' je matematický počet fází, který nemusí nutně souhlasit s opravdovým počtem fází m .

$$k_r = \frac{2}{\beta} \sin \frac{\beta}{2} = \frac{m'}{\pi} \sin \frac{\pi}{m'} \quad (1/14)$$

1.4.2 Indukované napětí

Předpoklad je ten, že vodiče se pohybují kolmo k indukčním čarám. Tím pádem platí nejjednodušší vztah: $U_i = Blv$ (1/15)

Pro rychlost platí: $v = \frac{2t_p}{T} = 2t_p f$ (1/16)[1]



Efektivní hodnota indukovaného napětí jednoho závitu:

$$U_{i1V} = \frac{B_m}{\sqrt{2}} 2t_p l f l_e \quad (1/17)$$

Obr.:1.5. Tvar pole ve vzduchové mezeře [5]

Místo indukce zavedeme magnetický tok Φ : $\Phi = B_{str} l_e t_p = \frac{2}{\pi} B_m l_e t_p$ (1/18)

Tedy: $U_{i1V} = 2,22\Phi f$ (1/19)

Výsledný výraz pro tři fáze: $U_{if} = 4,44N_s \Phi f k_r$ (1/20)

Pro zkrácený krok se místo činitele rozlohy k_r použije v rovnici činitel vinutí k_v . Dále se mohou ve stroji vyskytovat vyšší harmonické, které deformují ideální pole. Vyšší harmonické představují stroj, který má větší počet pólpárů, proto musíme výslednou rovnici upravit o napětí s kmitočty: νf_1 tedy platí: [1]

$$U_{i\nu} = 4,44 N_s \Phi_\nu \nu f_1 k_{\nu v} \quad (1/21)$$

1.5 Náhradní schéma synchronního stroje

V tomto případě budeme uvažovat motor s hladkým rotorem. Buzené napětí \bar{U}_{ib} je natočeno proti proudu \bar{I}_b o úhel $\pi/2$. Proud \bar{I}_b trvale leží v podélné ose stroje. Napětí \bar{U}_{ib} tedy leží v ose příčné q. Ve stavu naprázdno se toto napětí indukuje do statoru prostřednictvím reaktance X_{ad} . Když je stroj zatížen, toto napětí již nelze ve stroji nikde naměřit. Je to tedy fiktivní napětí, úměrné budicímu proudu, při zanedbání sycení, nebo při linearizaci magnetizační charakteristiky. Při zanedbání rozptylové reaktance můžeme zavést náhradní schéma obr.: 1.6. [1]

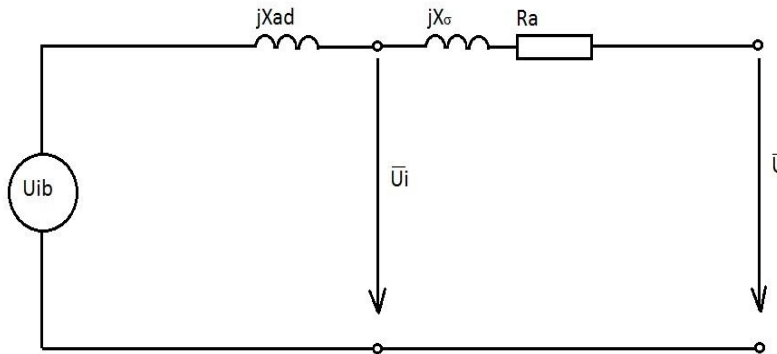
$$\bar{U} - \bar{Z}_d \bar{I} = \bar{U}_{ib} \quad (1/22)$$

$$\bar{Z}_d = R_a + jX_d \quad , \quad X_d = X_{ad} + X_\sigma \quad (1/23, 1/24)$$

$$\bar{I} = \frac{\bar{U} - \bar{U}_{ib}}{\bar{Z}_d} \quad (1/25)$$

Z náhradního schématu je vidět, že má stroj reaktanci X_d při U_{ib} , tedy i při nulovém I_b . Obvykle platí $X_{ad} > X_\sigma$.

$$\text{Vnitřní indukované napětí: } \bar{U}_i = \bar{U} - (R_a + jX_\sigma)\bar{I} \quad (1/26)$$



Obr.: 1.6. Náhradní schéma synchronního stroje s hladkým rotorem [6]

1.6 Synchronní stroj s PM

Principiálně jsou PMSM stejné jako klasické synchronní stroje. Hlavním rozdílem mezi klasickými synchronními stroji a synchronními stroji s permanentními magnety je buzení. Permanentní magnety vytvářejí své vlastní a konstantní magnetické pole. PMSM tedy nepotřebují stejnosměrné buzení z vnějšího zdroje, a tím pádem ani není potřeba přivádět přes kluzné kontakty (kroužky) buzení do rotoru čímž se zmenšují ztráty. Na druhou stranu zde odpadá možnost regulace buzení.

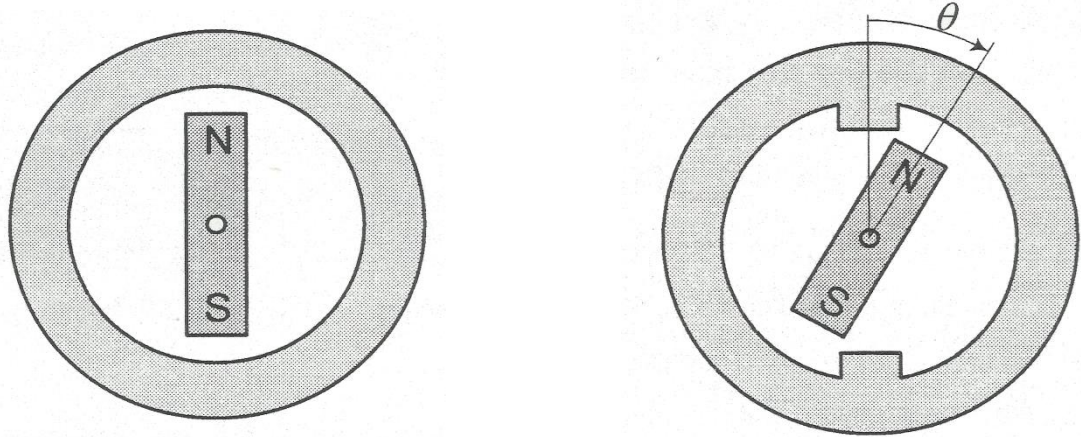
Existují různé konstrukce uložení permanentních magnetů. Každý typ uložení má své specifické vlastnosti, kterým se věnuje druhá kapitola.

1.6.1 Vytvoření momentu PMSM

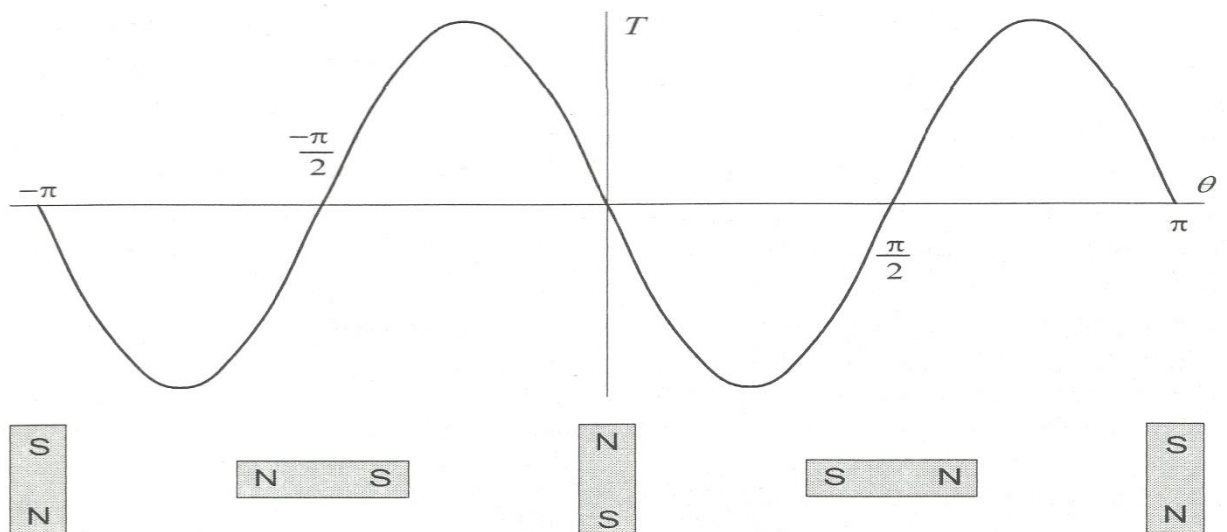
Vycházíme z jednoduché úvahy, že magnety jsou přitahovány železem nebo jiným magnetickým materiálem a dále z poznatku, že stejné magnetické póly se odpuzují. Permanentní magnet tedy umístíme do středu železného kroužku, což je vidět na obrázku 1.7. Stator tvoří železný kruh a rotor tvoří permanentní magnet. V tomto uspořádání rotor nemá žádnou klidovou polohu. [2]

Na obrázku 1.8. je stejný permanentní magnet, ale železný kroužek se liší v tom, že má dva póly. Na obou koncích magnetů působí stejně velké, ale opačně orientované radiální síly. Magnet bude mít nyní tendenci se dostávat do klidové polohy. To znamená, že pomalu otáčející se magnety budou působit silou, aby se dostali k pólům statoru. [2]

K tomu dochází proto, že přitažlivá síla mezi magnetem a železem se zvyšuje, snižuje-li se fyzická vzdálenost mezi nimi. Pokud se magnet může volně otáčet, tak tato síla je částečně v tangenciálním směru a moment je znázorněn na obrázku 1.9. v závislosti na poloze. Polohy, kde jsou moment nebo síla nulová se nazývají aretací. [2]



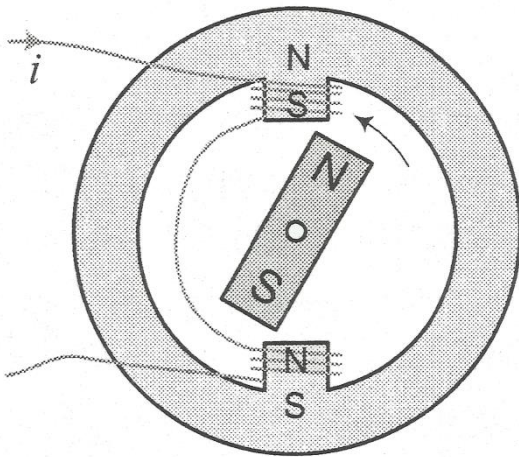
Obr.: 1.7. Magnet umístěný uvnitř kovového kroužku [7] Obr.:1.8.Kroužek se dvěma póly [8]



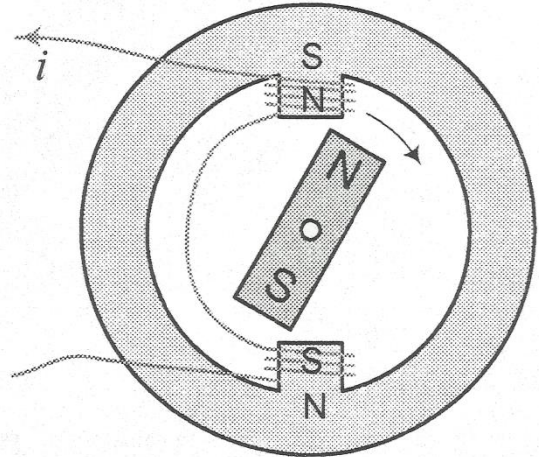
Obr.: 1.9. Točivý moment magnetu , uložený podle obrázku 1.8. [9]

Dále budeme uvažovat vodivou cívku připevněnou k pólům. Ke znázornění nám poslouží obrázek 1.10. Začne-li protékat cívkami proud, začnou působit jako elektromagnety. Protéká-li proud ve správném směru, tak vznikne přitažlivá síla mezi tyčovým permanentním magnetem a elektromagnetem a vzniká jiný typ momentu, formálně nazývaný vzájemné vyrovnání nebo vzájemný moment. Je to moment, který právě ve střídavých strojích s permanentními magnety tvoří práci. Používá se termín vzájemný moment, protože vzájemná přitažlivost mezi PM a elektromagnetem produkuje točivý moment. [2]

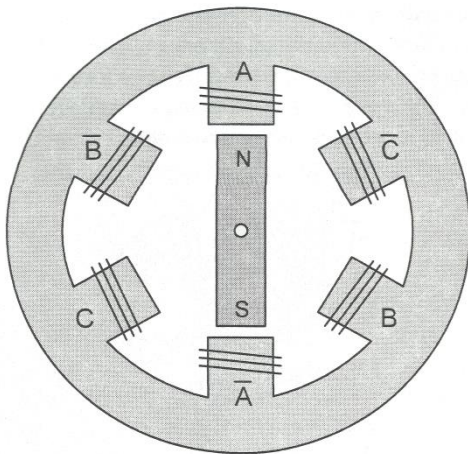
Tento moment se může také nazývat jako odporový točivý moment, protože v případě opačného napájení se začnou póly přitahovat v opačném směru, což je zobrazeno na obrázku 1.11. Z obrázku je vidět, že se tyčový PM musí přeorientovat k opačnému pólu. Chceme-li aby tyčový PM nepřetržitě zabíral s více než jednou sadou cívek, tak je zobrazeno na obrázku 1.12. musíme uvažovat třífázové napájení motoru s označením A, B, C. Vytvořením elektromagnetických pólů na statoru je zajištěno přitahování nebo odpuzování tyčového permanentního magnetu. Rotor tedy sleduje pole vytvořené statorem. To je vlastně základní princip synchronního stroje. [2]



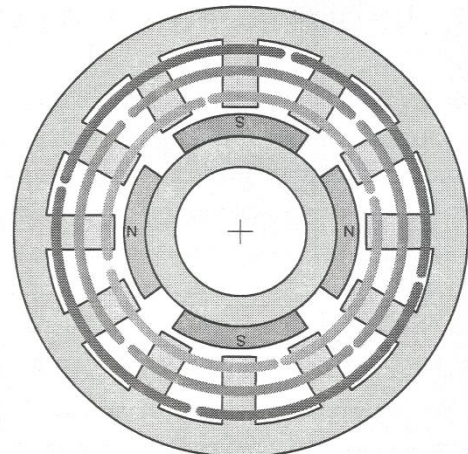
Obr.:1.10. Vznik momentu pod napájenými cívkami [10]



Obr.:1.11. Přeorientování PM z důvodu změny napájení [11]



Obr.:1.12. Třífázový stator s fázemi A, B, C [12]



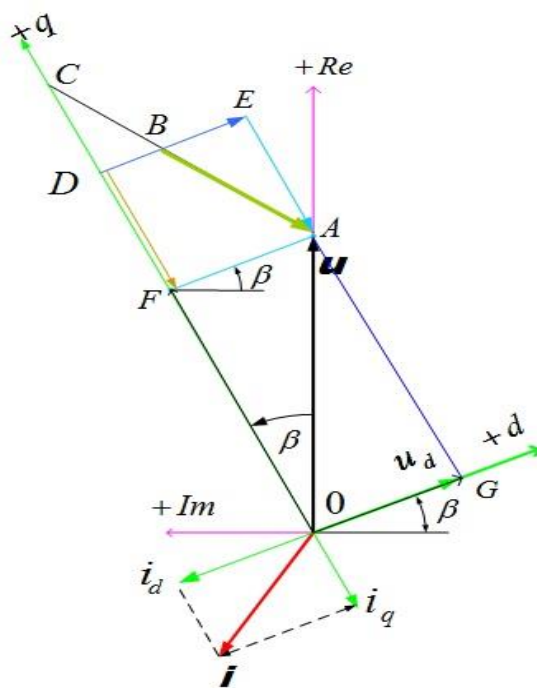
Obr.:1.13. Rozložené fáze a mg. oblouky [13]

Na obrázku 1.12. je vyobrazen motor se dvěma póly magnetu a třemi fázemi statoru. Jdou ale samozřejmě vytvořit i stroje s libovolným sudým počtem pólů rotoru a libovolným počtem fází větším nebo rovným 2. Dvou a třífázové ovšem převládají. U rotoru jsou to obvykle 2 nebo 4 póly, ovšem vyrábí se i motory až s 50 póly. Větší počet magnetických pólů znamená větší točivý moment. Na druhou stranu to znamená, čím více pólů, tím méně místa pro každý jednotlivý pól. Optimální počet pólů je komplexní funkcí geometrie motoru a vlastností materiálu. V mnoha případech se z ekonomického důvodu používá nižší počet

magnetických pólů. Na obrázku 1.12. je na statoru solenoidní vinutí a to znamená, že každé vinutí je oddělené. Častěji se však používají překrývající se fáze, jak je ukázáno na obrázku 1.13. Dále se používá na rotoru jiný typ magnetu. A to buď s magnetickými oblouky, nebo magnetické části vložené do rotoru. Na obrázku je fáze B a C rozložena do vrchní části vinutí A. [2]

1.7 Fázorový diagram synchronního stroje s PM

Fázorové diagramy jsou různé pro různé konstrukční uspořádání. Je to dáno vlastnostmi PM, protože PM jsou pro jiná magnetická pole nevodivá. Zde uvedeny diagramy budou odpovídat přebuzenému generátoru a přebuzenému motoru. [3]



$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_{ib} + j x_q \mathbf{i}_q + j x_d \mathbf{i}_d + (r_a \mathbf{i}) \quad (1/27)$$

$$\overline{CA} = j x_q \mathbf{i}$$

$$\overline{BA} = j x_d \mathbf{i}$$

$$\overline{DE} = j x_q \mathbf{i}_q$$

$$\overline{EA} = j x_d \mathbf{i}_d$$

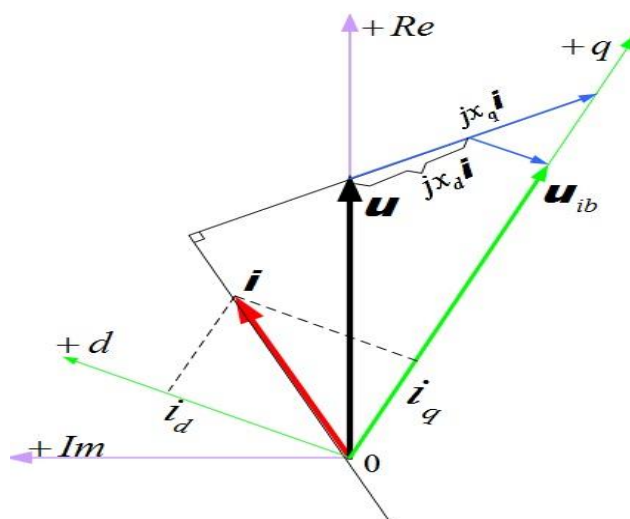
$$\overline{OD} = \mathbf{u}_{ib}$$

$$\overline{OG} = \mathbf{u}_d$$

$$\overline{OF} = u \cdot \cos \beta \cdot e^{j\beta} = \mathbf{u}_q$$

$$\overline{FA} = \overline{DE} = u \cdot \cos \beta \cdot e^{j(\frac{\pi}{2} + \beta)}$$

Obr.: 1.14. Fázorový diagram přebuzeného synchronního generátoru s PM [14]



Obr.: 1.15. Fázorový diagram přebuzeného synchronního motoru s PM [15]

2. Uložení permanentních magnetů u synchronních strojů

Způsobů uložení PM existuje velké množství. Závisí to na mnoha faktorech jako například způsob použití, určitý výkon při stanovených rozměrech. Rozhodujícím faktorem však v praxi v mnoha případech je cena. Velké náklady jsou vynaloženy na materiály, ze kterých se vyrábí permanentní magnety, a proto není neobvyklé z důvodů přijatelných nákladů na celkový stroj zvolení levnější konstrukce i když to vede k nižším výkonům. [4]

Synchronní stroje s PM můžeme z hlediska konstrukce rozdělit do dvou základních skupin. Jsou to stroje s válcovým uspořádáním a diskové stroje. Tyto základní uspořádání se dále dělí na konkrétní uchycení PM.

2.1. Válcové stroje

U tohoto typu strojů můžeme dále rozdělit uspořádání PM na povrchové (obvodové) nebo vnitřní (skryté). Podle uspořádání lze stroj přiblížit jako klasický synchronní stroj se stejnosměrným buzením.

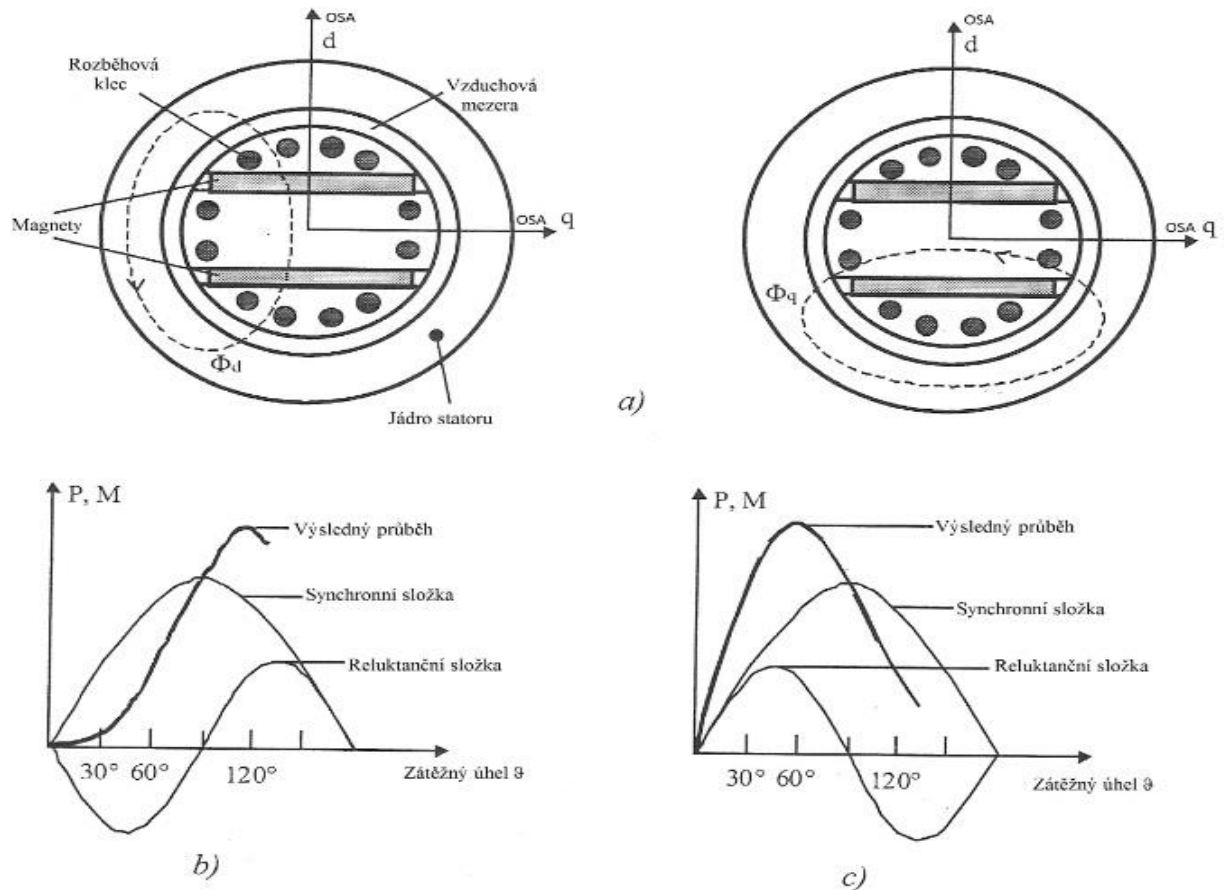
2.1.1. Povrchové uspořádání

Uspořádání povrchové (obvodové) si lze představit jako stroj s hladkým rotorem, protože je vzduchová mezera velká a vliv reakce kotvy na tok pólu je slabý. Na povrchu rotoru je umístěn PM, který představuje ve vzduchové mezeře materiál, který má permeabilitu μ_0 , čili jako vzduch. Avšak podle kvality a použitého druhu PM se dostává velikost μ_{rM} na 1,02 až 1,10. Tato velikost stále postačuje pro předpoklad homogenní vzduchové mezery. Z toho plynou i reaktance v podélné i příčné větvi stejné, tedy $X_d=X_q$. Budeme-li přeci jenom chtít odlišit reaktanci v ose d, kde je umístěn PM, který má skutečnou permeabilitu μ_{rM} od osy q, kde je vzduchová mezera s permeabilitou μ_0 , tak nám vyjde, že $X_d > X_q$. Vyjde nám tedy stejný moment jako je u stroje s hladkým rotorem. [4]

$$M_e = 3 \frac{1}{\omega_s} \left(\frac{U_s U_{ib}}{X_d} \sin \vartheta + U_s^2 \frac{X_d - X_q}{2X_d X_q} \sin 2\vartheta \right) \quad (2/1)$$

2.1.2. Vnitřní uspořádání

Tento typ uspořádání, kde jsou rotoru vnitřně uložené PM, lze přirovnat k typu stroje, který odpovídá stroji s vyniklými póly. Při hledání rozdílu oproti stroji, který má povrchové uspořádání PM vyjde, že je $X_q > X_d$ z čehož plyne, že je druhá složka vzorce (2/1) záporná. To má za následek, že její druhá harmonická začíná v protifázi oproti první harmonické složce momentu. Maximum součtu obou složek je až za $\pi/2$, což je velká změna oproti stroji s povrchově uloženými PM, který má $X_d > X_q$ a jeho maximum momentu nabývá při zátěžném úhlu $\vartheta < \pi/2$. Průběh momentu uvidíme společně s průřezem stroje s vnitřně uloženými PM na obr.:2.1. Za všimnutí stojí rozběhové vinutí, které vlastně tvoří klec nakrátko jako u asynchronního motoru. [4]



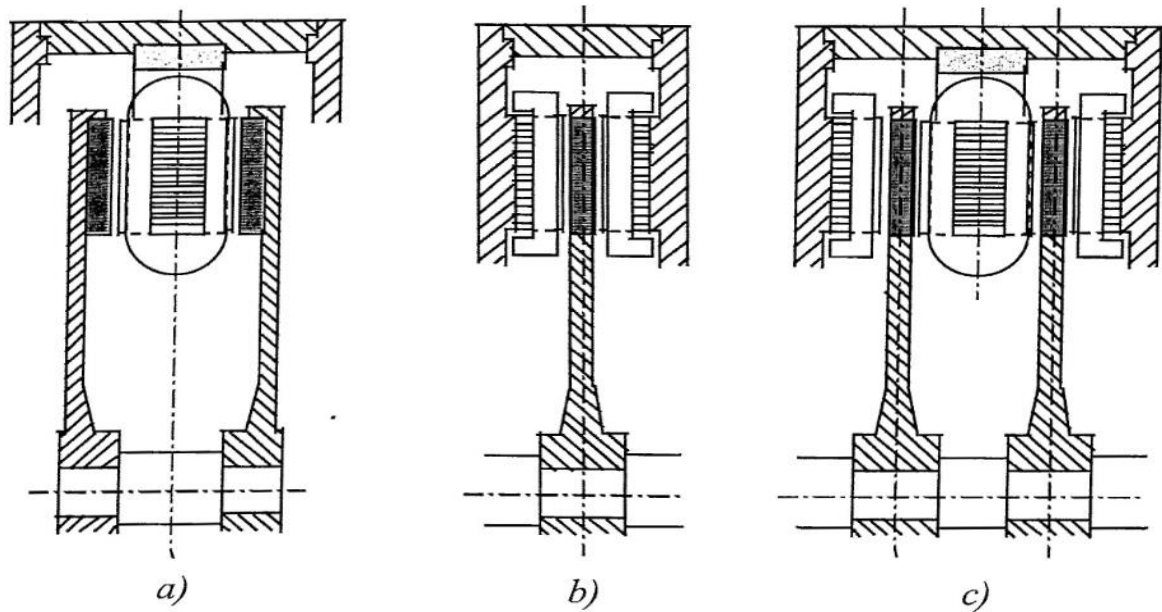
Obr.: 2.1. a) Rotor s vnitřním uložením PM b) $M=f(\vartheta)$ pro $X_d < X_q$ c) $M=f(\vartheta)$ pro $X_d > X_q$ [16]

Položíme-li si otázku proč uspořádání PM způsobí $X_q > X_d$, vysvětlení je právě z obrázku 2.1.a) kde vidíme vlnu magnetického napětí reakce kotvy která má svoji amplitudu přesně v ose d. Toto odpovídá obrázku, který je napravo. Magnetická siločára musí překonávat dvakrát cestu přes PM, který má malou hodnotu permeability $\mu_{rM} \cong \mu_0$, což je skoro stejné jako by překonával dvakrát vzduchovou mezeru. Posune-li vlna magnetického napětí reakce kotvy svou amplitudu naopak do osy q (na obrázku vpravo), tak se magnetická siločára rotoru uzavře jen přes magneticky měkký železný materiál, což je materiál, který má velikou magnetickou vodivost. S tímto souvisí o hodně větší permeabilita než μ_0 . Lze psát $\mu_{rM} \gg \mu_0$ a z toho plyne právě $X_q > X_d$. Zobrazeno je to na obrázku 2.1.b). Obrázek 2.1.c) je charakteristika pro povrchové uspořádání PM. [4]

2.2. Diskové motory

Synchronní motory, které mají diskovou konstrukci jsou většinou stroje s nižšími výkony. Tato konstrukce využívá krátkou axiální osu motoru a také malý moment setrvačnosti z čehož plyne rychlá odezva na řídicí impulzy. Na rozdíl od stejnosměrných motorů není rychlost omezena žádnými kartáči. PM z mechanického hlediska jsou taková tělesa, která chrání proti odstředivým silám na vnějším obvodu disku. To znamená, že se používají pro velmi velké rychlosti. Diskové stroje lze rozdělit do tří základních konstrukčních uspořádání. Ve všech typech těchto uspořádání jsou aktivní plochy v radiálním směru. Aktivní jsou stator, rotor nebo oba členy z obou stran. Rozdělit tedy můžeme na 1.) Uspořádání se státorem uprostřed, aktivním z obou stran, 2.) Uspořádání s rotorem uprostřed, aktivním z obou stran

3.) Uspořádání dvojdiskové se statorem uprostřed a na okrajích. [4]



Obr.: 2.2. Konstrukční uspořádání synchronních diskových motorů [17]
 a) se statorem uprostřed b) s rotorem uprostřed c) dvojdiskové uspořádání

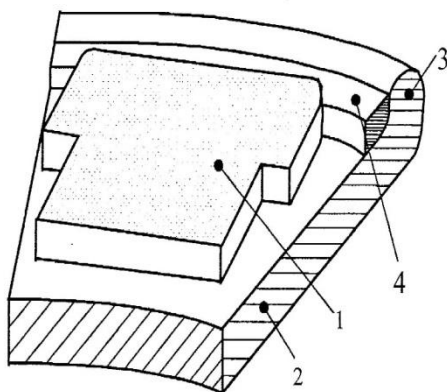
2.2.1. Uspořádání se statorem uprostřed

Toto uspořádání má z obou stran PM uložené na rotačních diskách. Disky slouží také k uzavření magnetického toku, čily, musí být z magneticky měkkého materiálu. [4]

2.2.2. Uspořádání s rotorem uprostřed a dvojdiskové uspořádání.

U tohoto uspořádání se vyžadují rotory z nemagnetického materiálu, kde se dají použít třeba hliník nebo skleněná vlákna. Ty jsou neutrální jak magneticky tak elektricky. Chycení proti odstředivým silám zajišťuje bandáž z uhlíkového vlákna. Na kotouče připevňujeme PM pomocí lepidel, což má dobré vlastnosti i při vysokých rychlostech. [4]

2.2.3. Tvar magnetů diskových motorů



Tvar magnetu je jeden z důležitých parametrů jak z výrobního hlediska, tak z hlediska vlastností stroje. Chceme-li, aby zůstal koeficient pólového krytí s narůstajícím poloměrem konstantní, měl by mít PM klínový, lichoběžníkový nebo dvojestupňový tvar, jak je vidět na obrázku 2.3. jehož šířka se mění úměrně s poloměrem. Z výrobního a ekonomického hlediska je méně náročný tvar pravoúhlý. V tomto případě musíme počítat střední koeficient pólového krytí, který bývá okolo 0,8. To znamená, že pro určitou amplitudu magnetické indukce použijeme radši širší magnet než vyšší. [4]

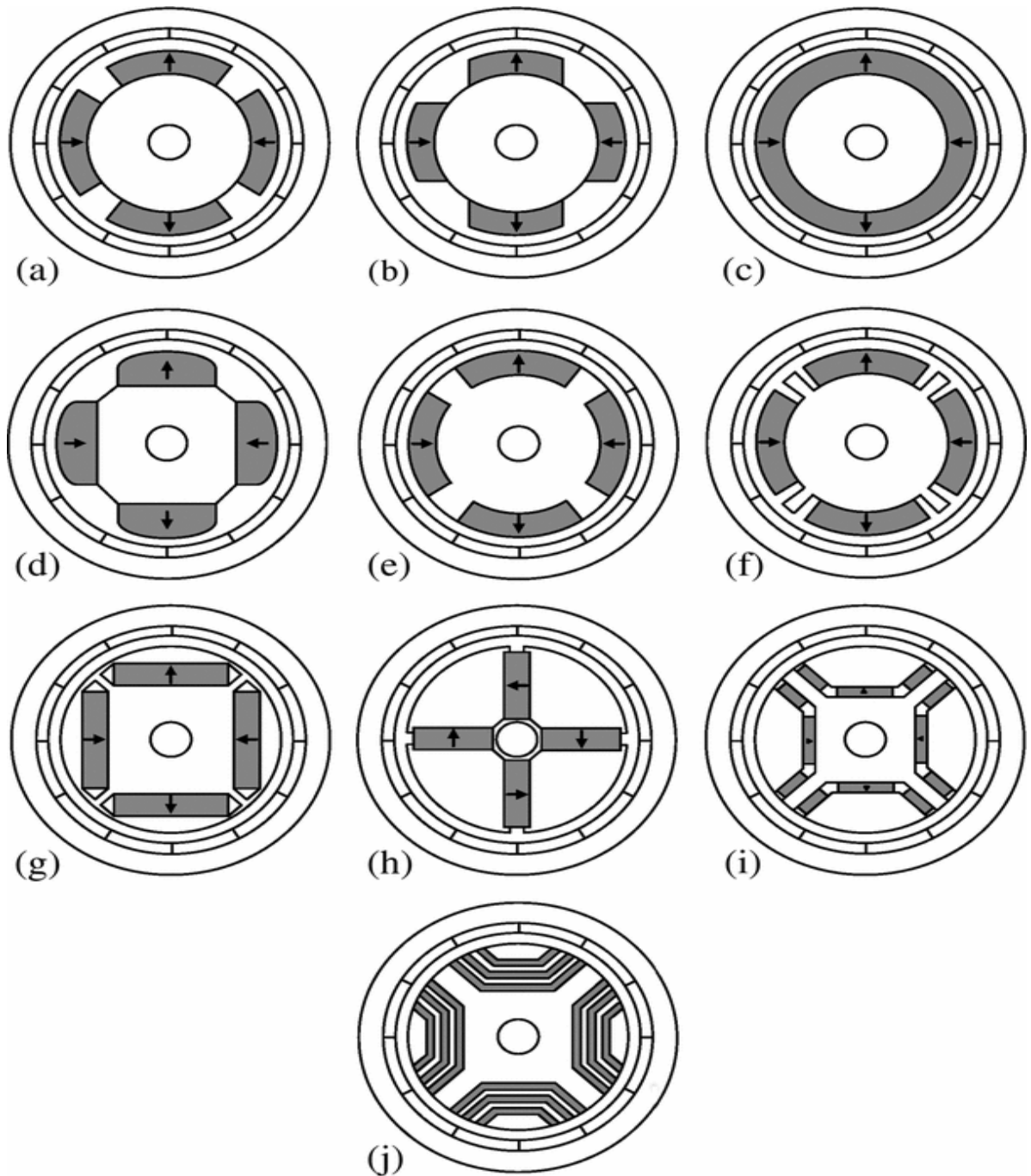
Obr.:2.3. Uložení magnetu na disku [18]

Od výšky magnetu se odráží velikost reaktance a tím i vlastnosti stroje. Vyšší magnety znamenají menší magnetizační reaktanci stroje a vyšší maximální moment. Protože platí vztah $\mu_{rM} \cong \mu_0$ závisí velikost vzduchové mezery na výšce magnetu. [4]

2.3. Konkrétní příklady uložení PM v synchronním stroji.

2.3.1. Permanentní magnety uloženy na rotoru.

Na následujícím obrázku bude několik druhů uložení permanentních magnetů.



Obr. 2.4. Vyobrazení uložení PM na rotoru [19]

Každá z těchto struktur uložení PM má své výhody a také nevýhody. Například uspořádání e) a d) má robustnější konstrukci než a) a b), zato se ušetří na materiálu. Jak již bylo výše uvedeno, záleží na konkrétních požadavcích. Povrchově uložené magnety jsou odolné proti rušení statorovými vyššími harmonickými. Naopak vnitřně uložené magnety mají výhodu toho, že mají nejnižší ztráty vířivými proudy. [7]

Na obr. 2.4. a) je vyobrazeno uspořádání s přisazenými magnety Obr. 2.4. b) také uspořádání s přisazenými magnety s paralelními hranami. Kruhový magnet je zobrazen na obr. 2.4. c). Rotor je vyroben z jednoho kusu magnetu. Velkou výhodou této konstrukce je nízká cena magnetu. S nízkou cenou je však spjat i nízký výkon. [5], [7]

Obrázek 2.4. d) ukazuje typ magnetu, který má bochníkový tvar. Na obr. 2.4. e) a f) jsou magnety jako povrchové vložky. U obr. e) je mezera mezi magnety vyplněna elektrotechnickou ocelí. Účelem této oceli je přidání reluktanční složky momentu na výstup motoru. Je-li motor správně nastaven, je možné dosáhnout významného zlepšení výkonu motoru. [5], [7]

Obr.2.4. g) již zobrazuje uložení vnitřní po obvodu. Oblíbená forma vnitřního uložení v rotoru je vyobrazena na obr. 2.4. h) PM jsou uloženy kolmo ke vzduchové mezeře. Magnetický tok směřuje do vzduchové mezery skrz elektrotechnickou ocel. Tato konstrukce se používá, když chceme vyšší výkon při použití levnějších feritových magnetů. [5], [7]

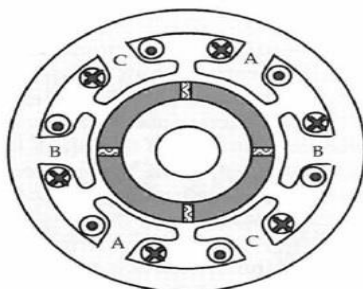
Vnitřní uložení s více segmenty je na obr. 2.4. i) a vícevrstvé uspořádání je na obr. 2.4. j)

2.3.2. Druhy vinutí statoru u PMSM

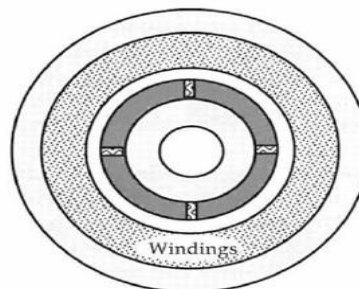
V této konstrukci na obrázku 2.5. je zobrazeno solenoidní vinutí. Nevýhodou je, že ne každá fáze vinutí zasahuje současně všechny magnety, což vede ke snížení výkonu. [5]

Konstrukce znázorněna na obrázku 2.6. neobsahuje drážky pro vinutí na statoru. Tato konstrukce má také několik nevýhod. Jedna z nich je ta, že i když je více místa pro vinutí, nemůže být podstatně zvýšen příkon, protože tepelná vodivost mezi vinutím a železem statoru je snížena. Tím pádem je obtížné odstranit teplo z vinutí. [5]

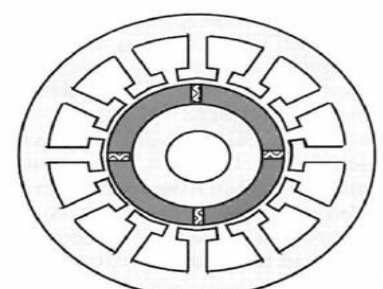
Obrázek 2.7. je konstrukce s plochou strukturou kde nejsou pravoúhlé sloty a nemají otvory. Zuby statoru jsou připojeny přímo nebo jsou přemostěny na vnitřním poloměru a konce jsou na vnitřním poloměru jha. [5]



Obr.:2.5.



Obr.: 2.6.



Obr.:2.7. [20]

3. Materiály permanentních magnetů používaných pro synchronní stroje s PM

3.1. Magnetismus

Tento fyzikální jev se hlavně projevuje silovými účinky. Toto silové působení je na pohybující se nositele elektrického náboje. Důsledek je silové působení na tělesa, která nemusí být nabitá. Nejsilnější silové působení je na feromagnetické látky. Dalšími důsledky magnetismu mohou být změny elektrických, optických, materiálových či termodynamických charakteristik látek, které jsou vystaveny magnetickému působení. K vytvoření magnetismu dochází pohybem elektrického náboje nebo časovou změnou elektrického pole. Magnetické působení je zajištěno magnetickým polem. [8]

3.2. Magnetické pole

Silové účinky magnetismu působí především v blízkosti pólů zdroje magnetického pole.

- 1.) Severní pól, má mezinárodní označení „N“, v případě české literatury se označuje písmenem „S“. Na permanentních magnetech bývá označen barevným pruhem. Dodržuje se dohoda, že v místě severního pólu vystupují siločáry z magnetu.
- 2.) Jižní pól, mezinárodně označován jako „S“, v české literatuře písmenem „J“. Na permanentních magnetech bývá bez označení. Podle dohody v místě jižního pólu siločáry vstupují do magnetu. Vnitřkem magnetu postupují siločáry směrem k severnímu pólu a z něj zas vystupují. Tím se tvoří uzavřené křivky tj. vírové pole. Nejznámější poznatek je ten, že dva nespolečné póly zdrojů magnetického napětí se přitahují a naopak stejné póly se odpuzují. Podle teorie objasňující fyzikální podstatu tohoto mg. pole jsou elektrony nosičem elektrického náboje a při svém pohybu uvnitř atomů vytvářejí elementární magnetické momenty. Jsou-li tyto elementární magnetické momenty uvnitř atomů orientovány úplně nahodile, vzájemně se vykompenzují a tudíž nejsou zdrojem magnetického pole. Jakmile je více elementárních magnetických momentů souhlasně orientováno, tím více je tato látka magnetická. Za normálních podmínek se nemagnetická látka vložená do vnějšího mg. pole zmagnetuje tím, že je vnějším polem ovlivněn pohyb elektronů a tím také orientace elementárních magnetických momentů. Když přestane působit vnější mg. pole v ideálním případě se obnoví původní stav pohybu elektronů a také neuspořádaná orientace elementárních magnetických momentů. To znamená, že látka bude opět nemagnetická. Někdy se stává, že se původní stav neobnoví zcela a tato původně nemagnetická látka zůstává zmagnetována i po ukončení působení vnějšího magnetického pole. Podle stejného principu se dá vysvětlit, proč se ztrácí magnetické pole u látek, které jsou zahřáty, roztaveny nebo při působení ionizujícího záření. Při zvyšování teploty materiálu každý atom osciluje okolo své střední polohy v krystalické mřížce. Tato oscilace narušuje orientaci spinů elementárních magnetických momentů. Z toho plyne, že při zvyšování teploty klesá magnetizace.

Stav, kdy se paralelní uspořádání elementárních momentů v atomu úplně vytratí a momenty se uspořádají úplně nahodile se nazývá Curieho teplota, označovaná jako T_c . Každá látka má svoji Curieho teplotu. Například pro železo je tato teplota 770°C . Většina elektrických strojů má provozní teplotu menší než 150°C to znamená, že je vliv teploty malý. Větší vliv teploty je však u niklu, kde T_c je 348°C , nejvíce však u prvků ze vzácných zemin, kde může být Curieho teplota nižší než je normální pokojová teplota. [9], [4]

3.3. Důležité fyzikální veličiny popisující magnetické pole

1.) Magnetický tok Φ – je to vektorová veličina, která reprezentuje počet siločar magnetického pole procházející danou plochou, jenž je kolmá na směr orientace siločar. V mezinárodní soustavě SI je jednotka této fyzikální veličiny 1 weber [Wb]

Základní matematický vztah je: $\Phi = B \cdot S$ [Wb ; T, m²] (3/1)

2.) Intenzita magnetického pole \mathbf{H} – vektorová veličina, která vyjadřuje mohutnost magnetického pole v závislosti na faktorech, kterými je pole vytvářeno, ale nezávislé na prostředí ve kterém magnetické pole existuje. V soustavě SI je jednotkou 1 ampér na metr [Am⁻¹]

Matematický vztah je: $H = \frac{F_m}{l}$ (3/2)

F_m je magnetomotorické napětí a l je střední délka siločar

$H = \frac{B}{\mu}$ [Am⁻¹ ; T, Hm⁻¹] (3/3)

3.) Magnetická indukce \mathbf{B} – tato vektorová veličina vyjadřuje počet siločar magnetického pole, které prochází jednotkovou plochou. Je to vlastně hustota siločar magnetického pole. Podle SI má tato fyzikální veličina jednotku 1 tesla [T]

Základní matematický vztah: $B = \mu \cdot H$ [T; Hm⁻¹, Am⁻¹] (3/4)

4.) Permeabilita, někdy také nazývána jako propustnost prostředí μ – je to skalární veličina, která vyjadřuje polarizovatelnost prostředí, což je propustnost magnetického pole. Fyzikální jednotka je 1 henry na metr [Hm⁻¹]

Základní matematický vztah: $\mu = \frac{B}{H}$ [Hm⁻¹; T, Am⁻¹] (3/5)

5.) Permeabilita vakua μ_0 – magnetická indukční konstanta vakua

Velikost konstanty: $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$

6.) Poměrná nebo relativní permeabilita, někdy také propustnost prostředí μ_r – tato skalární veličina popisuje relativní magnetickou polarizovatelnost prostředí. Tato veličina vlastně popisuje kolikrát je to určité prostředí polarizovatelnější neboli vodivější než vakuum. Je to bezrozměrná veličina.

$$\text{Základní matematický vztah: } \mu_r = \frac{B}{(\mu_0 \cdot H)} = \frac{\mu}{\mu_0} \quad [-; \text{T, Hm}^{-1}, \text{Am}^{-1}; \text{Hm}^{-1}, \text{Hm}^{-1}] \quad (3/6) \quad [9]$$

3.4. Rozdělení magnetických materiálů podle poměrné permeability μ_r

3.4.1. Diamagnetické

Diamagnetické materiály mají poměrnou permeabilitu nižší než 1 ($\mu_r < 1$). Vnější magnetické pole je prostředím diamagnetických látek mírně zeslabováno. Mezi diamagnetika patří inertní plyny, bromid draselný, voda ($\mu_r = 0,999\ 991$), kuchyňská sůl ($\mu_r = 0,999\ 9984$), měď ($\mu_r = 0,999\ 990$), bizmut ($\mu_r = 0,999\ 848$), rtuť, zinek, olovo, stříbro, zlato, některé plasty, organické látky, supravodiče a další látky. [9]

3.4.2. Paramagnetické

Paramagnetické látky se vyznačují poměrnou permeabilitou větší než 1 ($\mu_r > 1$). Atomy paramagnetik mají ve valenčním pásu obvykle méně než 4 elektrony. Vnější magnetické pole je mírně zesilováno prostředím paramagnetických látek. Mezi paramagnetika patří plynný kyslík ($\mu_r = 1,000\ 001\ 86$), kapalný kyslík ($\mu_r = 1,003\ 620$), hliník ($\mu_r = 1,000\ 023$), platina ($\mu_r = 1,000\ 264$), paládium, vanad, chrom, titan, ebonit, hořčík, sodík, draslík, vzduch, různé přechodné kovy, kovy vzácných zemin, aktinidy a další. [9]

3.4.3. Feromagnetické

Feromagnetické látky mají o hodně větší permeabilitu než 1 ($\mu_r \gg 1$). Řádově je jsou to 100 – 100 000. Atomy těchto feromagnetických látek jsou uspořádány do malých domén. Tyto domény jsou souhlasně zmagnetizovány. Magnetické momenty celých domén se natáčí díky vnějšímu magnetickému poli, a tím ho značně zesilují. Často je toto zesílení doprovázeno i zmagnetizováním těchto materiálů. Feromagnetická látka se stane paramagnetickou tehdy, překročí-li teplota Curieho teplotu. Když je tato látka navíc zmagnetována dojde k jejímu odsmagnetování. Feromagnetika jsou železo, kobalt, nikl, gadolinium a jejich slitiny. Feromagnetické materiály se ještě dále dělí na dva různé typy. [9]

3.4.3.1. Antiferomagnetické

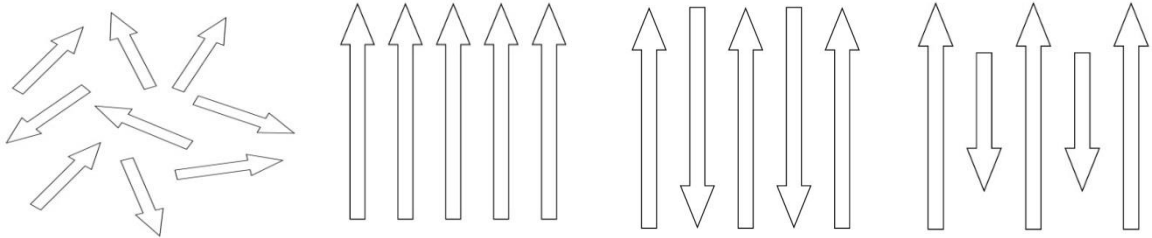
Magnetické momenty jednotlivých atomů jsou sice stejně velké, ale opačně orientované. Mezi antiferomagnetika patří například mangan nebo chrom. [9]

3.4.3.2. Ferimagnetické

Magnetické momenty jednotlivých atomů jsou nestejně veliké a také opačně orientované. Je to zvláštní druh antiferomagnetik. Nejpoužívanější látky jsou ferity, které se vyrábějí práškovou technologií z oxidu železa, a sloučenin dalších kovů nebo vzácných zemin. Tyto látky se vyznačují velkou hodnotou poměrné permeability ($\mu_r = 10^2 \div 10^5$) a také vysoký

měrným elektrickým odporem oproti feromagnetikům. Proto se feromagnetické materiály používají na jádra vysokofrekvenčních cívek. [9]

3.5. Magnetické momenty různých typů materiálů



Obr.:3.1.

Obr.:3.2.

Obr.:3.3.

Obr.:3.4. [21]

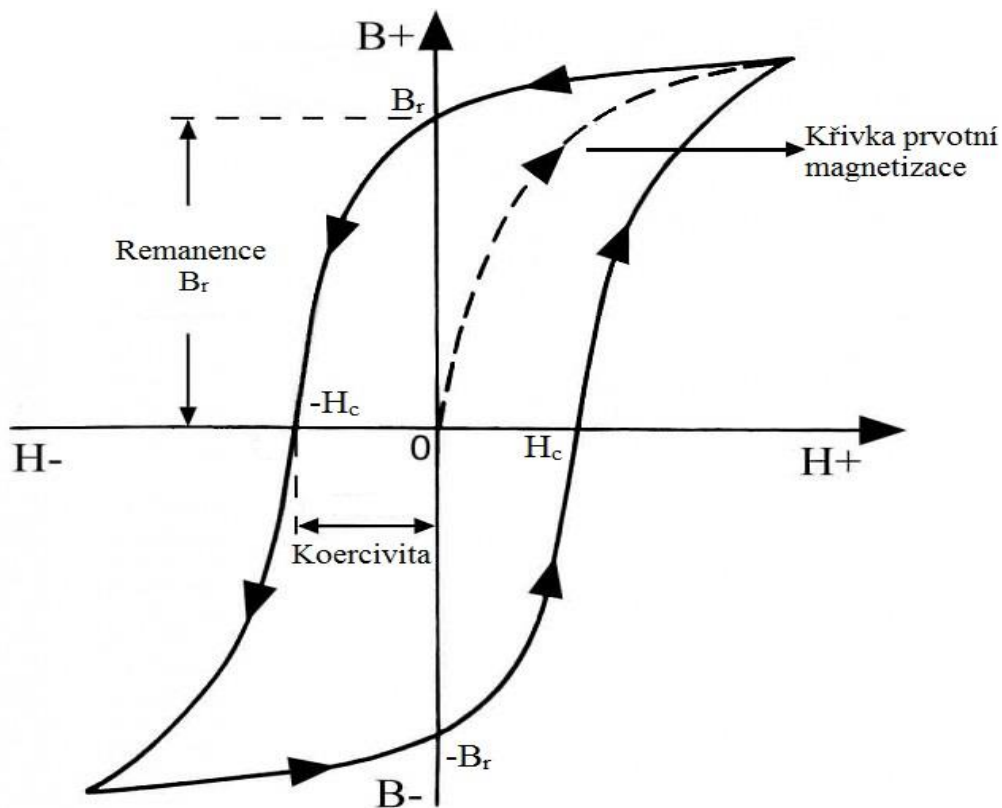
Výše uvedené magnetické momenty jsou: Obr.:3.1. Paramagnetické materiály, kde jsou momenty nahodile orientovány. Na obrázku 3.2. jsou vyobrazeny materiály feromagnetické, které mají shodně orientované magnetické momenty. Obrázek 3.3. zobrazuje materiály antiferomagnetické, jejichž momenty jsou stejně veliké, ale opačně orientované. Na posledním obrázku 3.4. jsou feromagnetické materiály, které mají momenty opačně orientované a zároveň jinak veliké. [9]

3.6. Vlastnosti materiálů

Nejnázornější srovnání vlastností magnetických materiálů je pomocí grafických metod. Především se využívá srovnávání magnetické indukce \mathbf{B} závislé na měnící se hodnotě magnetické intenzity \mathbf{H} .

3.6.1. Hysteresní smyčka

Skládá se z křivky prvotní magnetizace a hysteresních smyček. Křivka prvotní magnetizace je závislost magnetické indukce B na měnící se hodnotě magnetické intenzity H u materiálu, který ještě nebyl vystaven magnetickému poli, je tedy zmagnetizován poprvé. Hysteresní křivky jsou také závislost magnetické indukce na magnetické intenzitě, ale s tím rozdílem, že se jedná o opakovanou a protisměrnou magnetizaci feromagnetického materiálu. Sloučíme-li tyto dvě závislosti dohromady, dostaneme úplnou hysteresní smyčku $\mathbf{B}=\mathbf{f}(\mathbf{H})$. V tomto případě podstupuje materiál celý cyklus přes prvotní magnetizaci a dále od $+H$ do $-H$, kde přitom vykazuje určitou hodnotu remanentní indukce $\pm B_r$. Remanence neboli remanentní magnetická indukce B_r a koercitivní intenzita neboli koercivita H_c , jsou nejdůležitější parametry demagnetizační křivky, vypovídající o vlastnostech permanentního magnetu. Demagnetizační křivka vzniká při snižování intenzity magnetického pole z hodnoty H_{\max} do hodnoty H_{\min} . [9]



Obr.: 3.5. Hysteresní smyčka [22]

3.7. Magnetická tvrdost materiálů

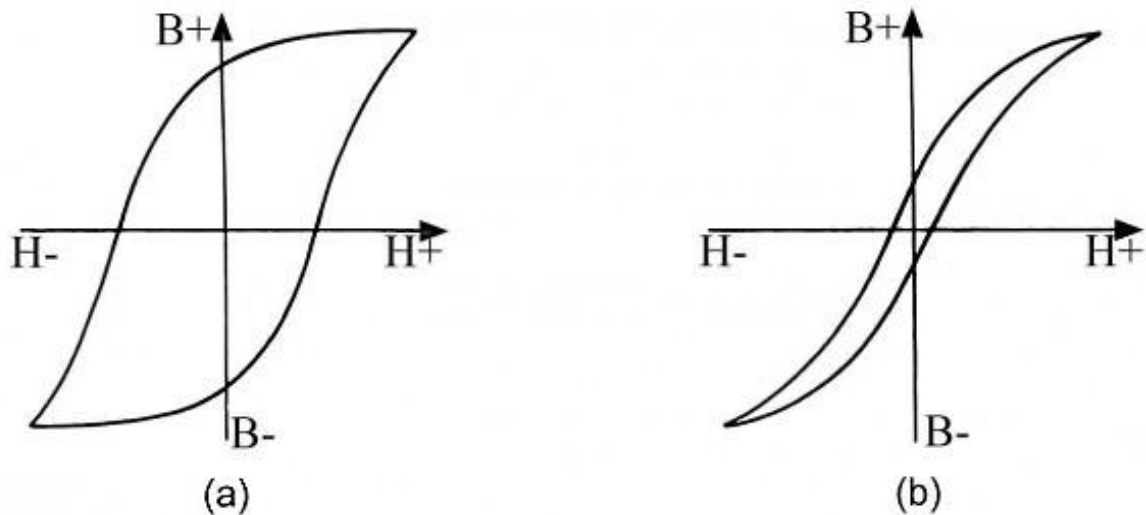
Různé materiály, mají různý tvar hysterezní smyčky. Záleží na složení, ze kterého je materiál vyroben. Nejnápadnější rozdíl v hysterezní smyčce mají magneticky tvrdé a magneticky měkké materiály. Tvrdé materiály mají širokou smyčku, kdežto smyčka měkkých materiálů je o poznání štíhlejší.

3.7.1. Magneticky měkké materiály

V těchto materiálech nastane počáteční magnetizace při nízkých hodnotách intenzity H díky pohybu doménových stěn. Pouze při vysokých hodnotách intenzity H natáčející se domény vytvoří přírůstek k magnetizaci, která zmizí hned, jakmile snížíme intenzitu H . Remanence je zde zajištěna díky doménovým stěnám, které se nevrátily do výchozí polohy po snížení intenzity H . [4]

3.7.2. Magneticky tvrdé materiály

Díky složení a zpracování magneticky tvrdých materiálů je struktura jejich krystalů taková, že brání pohybu doménových stěn. Domény zůstávají v nové změněné poloze i po odstranění intenzity H . Díky tomu lze vytvořit vysokou remanenci a koercivitu u permanentních magnetů. Tyto hodnoty jsou několik tisíckrát vyšší než u magneticky měkkých materiálů. [4]



Obr.: 3.6. Hysteresní smyčka materiálů

a) magneticky tvrdých

b) magneticky měkkých [23]

3.8. Materiály PM

Pro vhodný výběr materiálu permanentního magnetu je kromě již několikrát zmíněné ceny hodnota remanence \mathbf{B}_r , koercitivní intenzita \mathbf{H}_c a maximální magnetický součin ($\mathbf{B} \cdot \mathbf{H}_{\max}$). Maximální magnetický součin je nejvyšší možná hodnota součinu magnetické indukce \mathbf{B} a intenzity magnetického pole \mathbf{H} . Čím větší je ($\mathbf{B} \cdot \mathbf{H}_{\max}$), tím menší objem materiálu postačí pro danou aplikaci. ($\mathbf{B} \cdot \mathbf{H}_{\max}$) se udává v jednotkách kJ/m^3 .

3.8.1. Materiály PM na bázi slitin

Chronologicky nejstarší skupinou materiálů využívaných na permanentní magnety jsou právě slitiny. Nejjednodušší používaná slitina byla železo s 1% uhlíku. Její ($\mathbf{B} \cdot \mathbf{H}_{\max}$) se udává cca. $1,6 \text{ kJ/m}^3$ a $H_c = 0,4 \text{ kA/m}$. Další slitina používala dražší ocel s 35% kobaltu a omezeným množstvím chromu a wolframu s ($\mathbf{B} \cdot \mathbf{H}_{\max}$) kolem $7,5 \text{ kJ/m}^3$ a $H_c = 20 \text{ kA/m}$. Pro získání dobrých magnetických a mechanických vlastností se tyto oceli musí zakalit při vysoké teplotě. Důležitou je slitina železa, niklu a hliníku. Tato slitina dosahuje $H_c = 40 \text{ kA/m}$, ale oproti ocelím nižší ($\mathbf{B} \cdot \mathbf{H}_{\max}$) pouze 10 kJ/m^3 . Ovšem přidáním kobaltu Co se dosáhne o mnoho vyšší maximální magnetický součin. Toto jsou známé slitiny (Al-Ni-Co). [4]

Pro dosažení dobrého ($\mathbf{B} \cdot \mathbf{H}_{\max}$) se používá magnetizace ve směru, ve kterém působí magnetické pole v průběhu chladnutí. Obecně se vyžaduje od PM aby působily v jednom směru, takže magnetizace při chladnutí se velmi využívá. Například slitina Alnico 5. [4]

Mechanické vlastnosti slitin Alnico nejsou nijak dobré. Dosažení magnetické tvrdosti je doprovázeno extrémní mechanickou tvrdostí a křehkostí. Odlitky se při chladnutí srážejí a scvrkávají, takže se do konečného tvaru musí stejně brousit. Alnico slitiny se tedy vyznačují vysokou remanentní indukcí, která dosahuje $1,2 \text{ T}$, nízkou hodnotou koercivity 50 kA/m , a poněkud malým ($\mathbf{B} \cdot \mathbf{H}_{\max}$) $40\text{-}80 \text{ kJ/m}^3$. [4]

3.8.2. Ferity

Jsou to velmi cenově výhodné magnety, které jsou na celém světě nejvíce používané. Používají se jednak barnaté ferity a pro aplikaci v elektrických strojích se zejména využívají vysoce koeritivní ferity se stronciem. Feritové materiály se vyrábějí práškovou metalurgií. Materiál se namele na jednotlivé krystaly o velikosti jednotlivých domén a dále prášek zpracovává mokrou nebo suchou cestou a lisuje se pod magnetickým polem. Toto záleží, jestli je materiál buď izotropní, nebo anizotropní. Slisovaný materiál se potom spéká na vzduchu při teplotách 1200-1300°C okolo 2 hodin. Za tuto dobu zmenší svůj objem asi o 15%. [4], [9]

Anizotropní mají dobré magnetické vlastnosti pouze ve směru přednostní osy magnetizace. V magnetickém poli jsou lisovány a tím získají prioritní směr magnetování. Dosahuje 1,5-2x větší hodnotu remanentní indukce než materiály izotropní. Izotropní mají ve všech směrech magnetizace stejné vlastnosti. Lisují se bez přítomnosti vnějšího magnetického pole, z čehož plyne jednodušší magnetizace. Oproti anizotropním jsou cenově výhodnější. [9]

Feritové materiály mají sice nižší hodnotu B_r a $(B \cdot H_{\max})$ než Alnico materiály, ale jejich výhoda je v mnohonásobně vyšší hodnotě H_c . Mohou odolávat vyšším demagnetizačním polím, aniž by se zásadně snížila remanence. [4]

Chemické složení feritů je $BaFe_{12}O_{19}$ nebo $SrFe_{12}O_{19}$. Jsou to keramické oxidy. Poměr Fe_2O_3 a BaO popřípadě SrO je 86% ku 14%. PM z feritů jsou celkem odolné vůči ředidlům, louhům a slabým kyselinám. U silných organických kyselin závisí odolnost na teplotě, koncentraci a době trvání styku. [9]

Mechanické vlastnosti jsou dány tím, že se jedná vlastně o keramické materiály. To znamená, že jsou křehké a citlivé na náraz a ohyb. Jejich mechanická tvrdost vyžaduje při obrábění použití diamantových nástrojů. [9]

Pracovní teplota feritů je od -40°C do 250°C. Při rostoucí teplotě klesá remanence o 0,2% na Kelvin a H_c roste o 0,3% na Kelvin. Toto může znamenat u magnetů s nízkou položeným pracovním bodem i trvalou ztrátu magnetizace, pokud jsou vystaveny nízkým teplotám. [9]

Permanentní magnety z feritů mají B_r kolem 0,38 T a koeritivní intenzitu H_c 150 – 250 kA/m. Díky vysoké hodnotě H_c je vcelku malá požadovaná délka magnetů. Je velká asi jako vzduchová mezera. Požadovaná délka se značí l_M a je závislá na H_c . Jejich součin $l_m \cdot H_c$ musí vytvořit potřebné magnetické napětí. Jejich nízká remanence zase souvisí s plochou permanentního magnetu S_M . Součin remanence a plochy $B_r \cdot S_M$ musí vytvořit magnetický tok v magnetickém obvodu. Alnico materiály oproti feritům vyžadují naopak malou plochu magnetů, ale dlouhé póly. [4]

3.8.3. Materiály ze vzácných zemin

Permanentní magnety ze vzácných zemin jsou výkonnější než ferity nebo slitiny. Chronologicky se jedná o nové materiály vyvinuté v 80. letech 20 století. Založeny jsou na intermetalických sloučeninách z kovů ze vzácných zemin, jako jsou samarium nebo neodym, a přechodových kovů. Jako přechodové kovy se používají kobalt a železo. Existuje několik chemických vzorců PM, které jsou právě závislé na intermetalických fázích SmCo_5 , $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ a $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. V závislosti na tvaru, velikosti, toleranci a počtu se magnety zpracovávají řezáním či lisováním ve směru příčného pole, nazývají se H-materiály, nebo ve směru axiálního pole, jež se nazývají W-materiály. H-materiály mají stejnou koercivitu jako W-materiály, ale vyšší hodnotu remanence. W-materiály naopak lze vyrábět ve velkých počtech, což je odraženo v jeho nižší ceně. [4], [9]

3.8.3.1. Samarium – kobaltové PM (Sm-Co)

Jedná se o sloučeniny železa, niklu a kobaltu s jedním nebo i více prvky vzácných zemin. Nejpoužívanější je právě sloučenina samaria a kobaltu. Tyto magnety se dále dělí podle jejich poměru. Při poměru 1:5 se jedná o SmCo_5 , nebo poměr 2:17 je tedy $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$. [4]

SmCo_5 mají jeden atom vzácného samaria na pět atomů kobaltu. Hmotnost této slitiny je 38% samaria a 62% kobaltu, což je více než 1:5. Maximální magnetický součin ($B \cdot H_{\text{max}}$) je 128-200 kJ/m^3 . Magnet se poměrně jednoduše zmagnetizuje i při nízkých hodnotách magnetizačního pole. [10]

$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ se skládají ze 2 atomů vzácných zemin a 13 až 17 atomů kobaltu. Přechodový kov však obsahuje i železo a měď. Pro lepší tepelné zpracování se přidává i malé množství zirkonu a hafnia. Hmotnost slitiny je kolem 25% samaria a 75% kobaltu a ostatních látek. Maximální magnetický součin ($B \cdot H_{\text{max}}$) 160-260 kJ/m^3 . [10]

3.8.3.2. Neodym – železo – bór (NdFeB)

Magnet tvořený neodymem, železem a bórem. Při pokojové teplotě jsou to nejsilnější komerčně vyráběné magnety, díky maximálnímu energetickému součinu, jehož hodnota ($B \cdot H_{\text{max}}$) je 250 až 512 kJ/m^3 . Sloučenina $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ má tetragonální strukturu, což jí zajišťuje remanenci 1,2 T a koercivitu 800 kA/m. To zajistí malé rozměry magnetu v porovnání například s ferity. Používají se 2 základní způsoby výroby magnetů. Je to prášková metalurgie nebo rychlé tuhnutí. Prášková metalurgie obsahuje následující kroky: příprava slitiny, předemletí, mletí, řízení a nastavení složení, seřazení částic a lisování, spékání (sintrování) a tepelné zpracování, magnetizace. Rychlé tuhnutí neboli lepení se postupuje tím, že se páska s náhodně orientovanými zrny, spojí s polymerem, a pak se vtlačí nebo vstříkne do lepených magnetů. Tyto magnety mají nižší hodnotu magnetického toku. Pro materiály NdFeB jsou problém vysoké teploty. Už při aplikacích nad 100°C ztrácí své vlastnosti. Proto se lepuje například s terbiem či dysprosiem. [4], [11]

3.8.3.3. Vlastnosti PM ze vzácných zemin

Mechanické vlastnosti – PM se vzácných zemin jsou tvrdé a proto se opracovávají diamantovým nářadím. Největší křehkost je u materiálu $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$. Při nárazu dochází k odprýsknutí nebo odštípnutí. [9]

Chemické vlastnosti – všechny materiály ze vzácných zemin jsou kovové materiály. Kyseliny magnety rozpouští, ale jsou odolné proti alkalickým médiím. Na vlhké atmosféře nejméně oxidují SmCo magnety. [9]

Koroze – materiály NdFeB jsou náchylné ke korozi oproti SmCo až 100 – 1000x více. Náchylnost je dána materiálovou strukturou. Volný neodým v mezizrnové oblasti. V novějších sloučeninách je volný reaktivní neodým nahrazen intermetalickými sloučeninami, vnikající při tepelném opracování. Tím se přibližuje materiálu $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$, který je odolný proti korozi. Těmito přísadami se zlepši i jejich tepelná odolnost, vykoupená nižším magnetickým tokem. [9]

Teplota – pracovní teplota se liší podle typu materiálu. NdFeB – je tato teplota 110 – 250°C a SmCo až 350°C [9]

Na teplotě závislé jsou reversibilní ztráty a ireversibilní ztráty. Reversibilní nastávají vždy, když se zvýší teplota, ale po snížení se vrátí do výchozího stavu. Chování materiálů v různých teplotních oblastech se vyjadřuje specifickým teplotním koeficientem T_k . Ireversibilní ztráty jsou z části neodstranitelné. Jejich projev nastane při zvýšení teploty nebo výskytu vnějšího magnetického pole. [9]

Magnetování – pro magnety ze vzácných zemin se musí použít až čtyřikrát větší intenzita magnetického pole oproti feritům. Potřebné jsou k tomu systémy magnetizačních cívek s velkým výkonem. Z diagramů se vybírá velikost intenzity magnetického pole, potřebná k nasycení daného magnetického materiálu. Tím se určí i intenzita potřebná pro první namagnetování. [9]

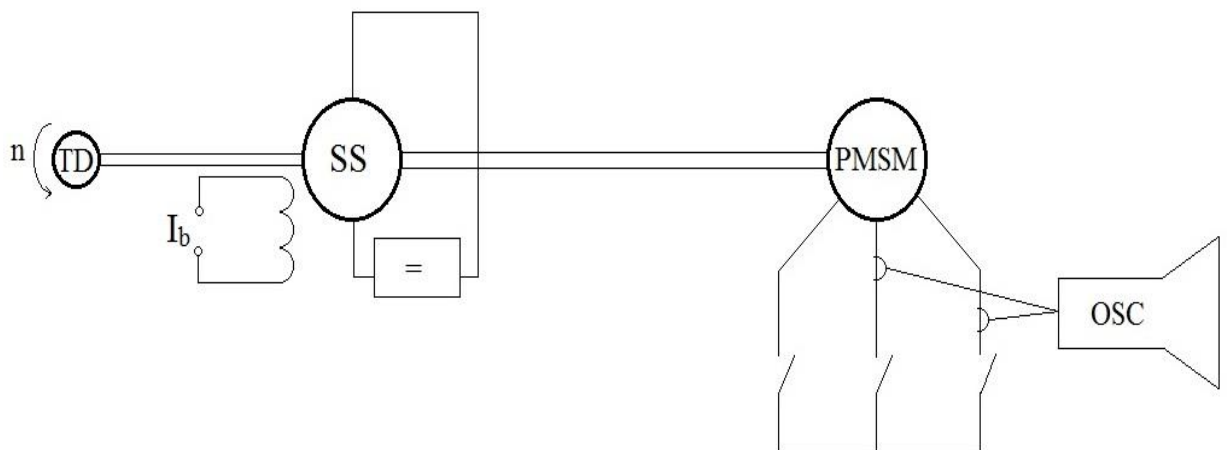
4. Měření na synchronním stroji s PM

Při tomto měření se použilo soustrojí stejnosměrného cize buzeného motoru, tachodynamu a přes mechanickou spojku připojeného synchronního motoru s permanentními magnety. Pro napájení pohánějícího stejnosměrného motoru byla použita dvojice stejnosměrných zdrojů diametral s maximálním napětím 48 V. Tyto zdroje byly doplněny o další stejnosměrný zdroj. Synchronní stroj s PM byl změřen v několika pracovních režimech. A to měření naprázdno, nakrátko a měření při zatížení stroje.

4.1. Měření naprázdno

Měření naprázdno se provádí při nezatíženém vývodu svorkovnice synchronního motoru s PM. Na svorkovnici se připojí buď sada tří střídavých voltmetrů, nebo napěťové sondy osciloskopu. Toto měření se provedlo třemi voltmetry a jako kontrola a kvůli zobrazení průběhů byl připojen i osciloskop.

4.1.1. Schéma zapojení



Obr.: 4.1. Schéma zapojení pro měření naprázdno [24]

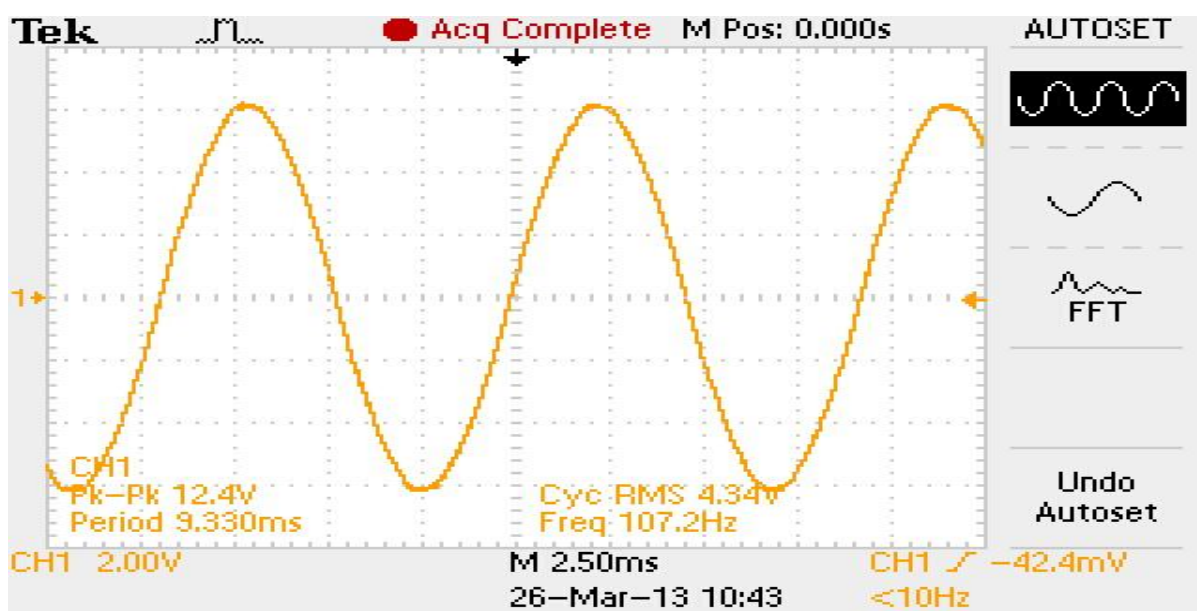
Na schématu je zobrazeno tachodynamo, napájený stejnosměrný moto se zobrazeným cizím buzením, synchronní stroj s PM a na něm připojen osciloskop. Tachodynamo měří napětí a podle převodu 20V/1000ot se musí přepočítat na ot/min.

4.1.2. Naměřené hodnoty

Měření naprázdno				
n[ot/min]	U_{i01} [V]	U_{i02} [V]	U_{i03} [V]	ΦU_{i0} [V]
2100	21,25	29	29	26,42
2000	21	27,5	28	25,50
1900	20	26	26,5	24,17
1800	19	24,5	25	22,83
1700	18	23,5	24	21,83
1600	17	22	22	20,33
1500	16	20,5	20,5	19,00
1400	15	19	19	17,67
1300	14	17,5	17,5	16,33
1200	13	16,5	16,5	15,33
1100	12	15	15	14,00
1000	11	13	13	12,33

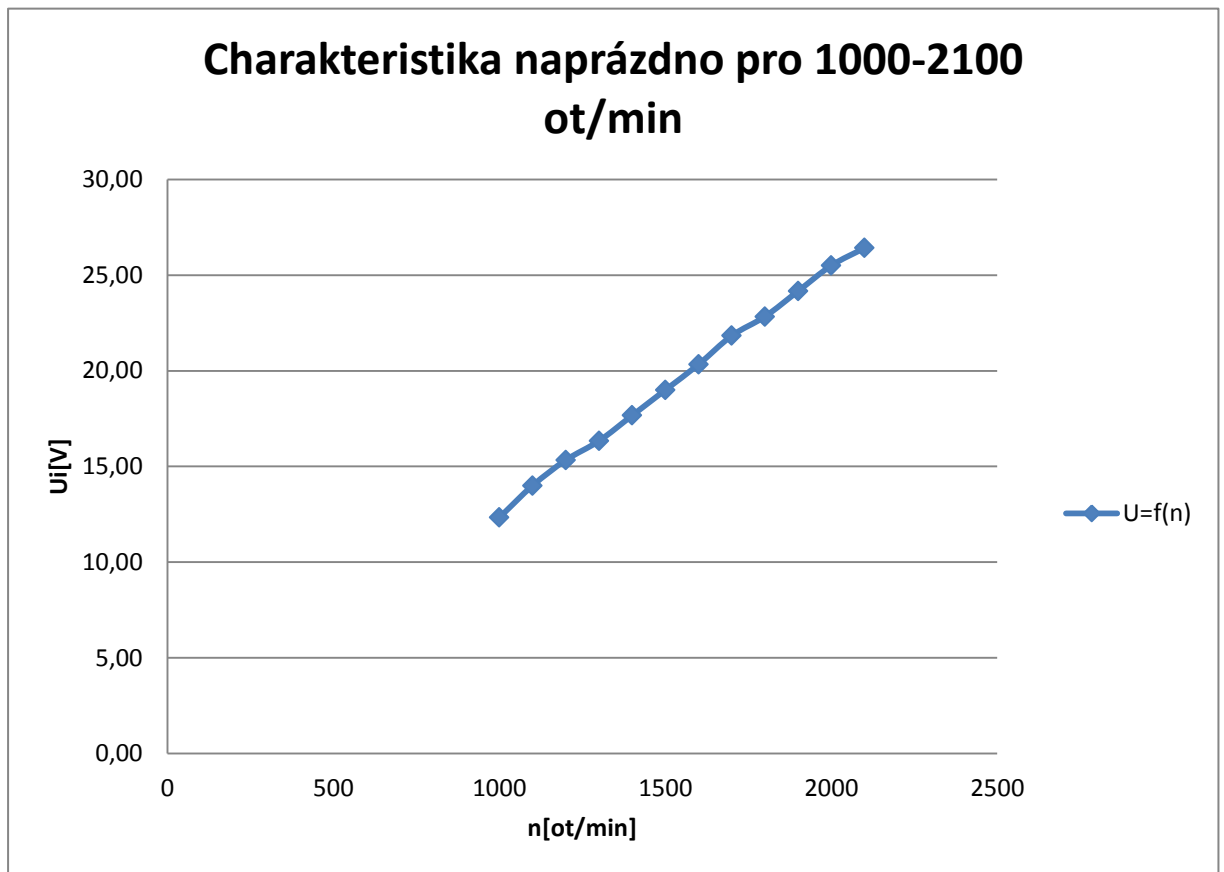
Tab.: 4.1. Naměřené hodnoty naprázdno [1]

4.1.3. Průběh indukovaného napětí synchronního stroje



Obr.: 4.2. Průběh indukovaného napětí [25]

4.1.4. Charakteristika naprázdno

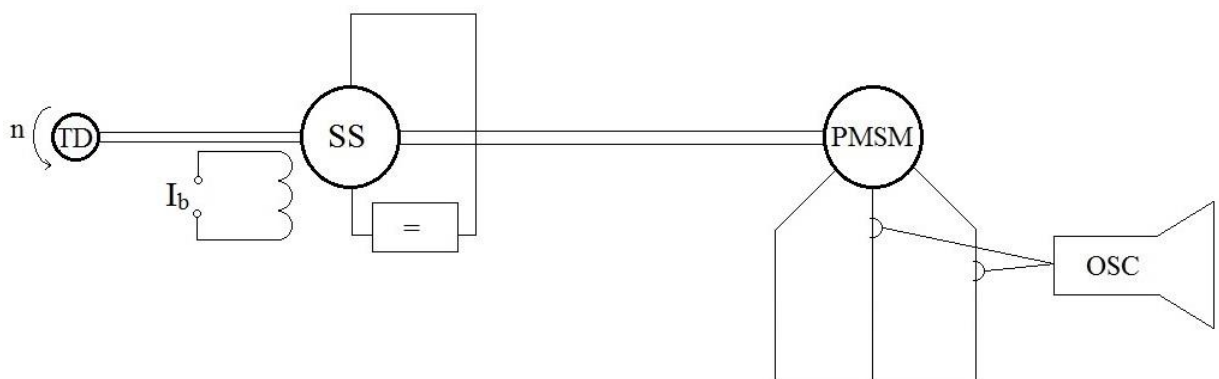


Obr.: 4.3. charakteristika naprázdno [26]

4.2. Měření nakrátko

Měření nakrátko se provádí při zkratované svorkovnici stroje. Měřit lze pomocí ampérmetrů, kterými se měří proud nakrátko, nebo pomocí osciloskopu s proudovými sondami. Toto měření proběhlo pomocí proudových sond.

4.2.1. Schéma měření nakrátko



Obr.: 4.4. Schéma zapojení pro měření nakrátko [27]

Na schématu jsou zobrazeny stejné prvky jako při měření naprázdno.

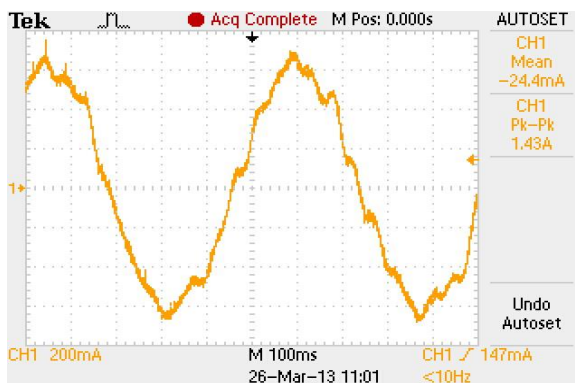
4.2.2. Naměřené hodnoty

Měření nakrátko	
n[ot/min]	I_k [mA]
35,5	495
30	353,5
25	226,3
20	162,3
15	106

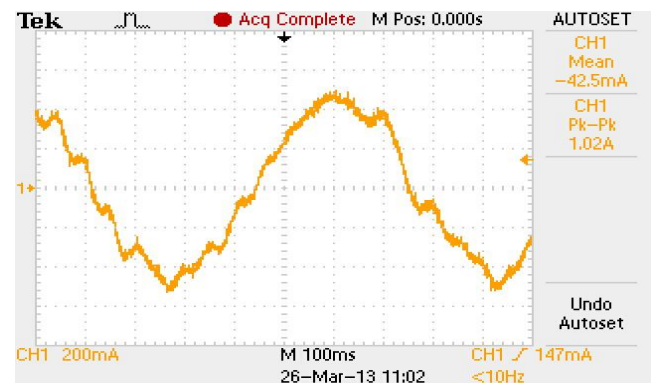
Tab.: 4.2. Naměřené hodnoty nakrátko [2]

4.2.3. Průběh proudu nakrátko

Z následujících průběhů je vidět, že se snižujícími se otáčkami se průběh proudu již zobrazuje špatně. Problém nastal i s vlastním roztočením synchronního stroje z důvodu nedostatečného výkonu stejnosměrného stroje, který pohání hřídel na které je soustrojí připevněno.



Obr.: 4.5. Proud $I_k=700\text{mA}$ [28]



Obr.: 4.6. Proud $I_k=500\text{mA}$ [29]



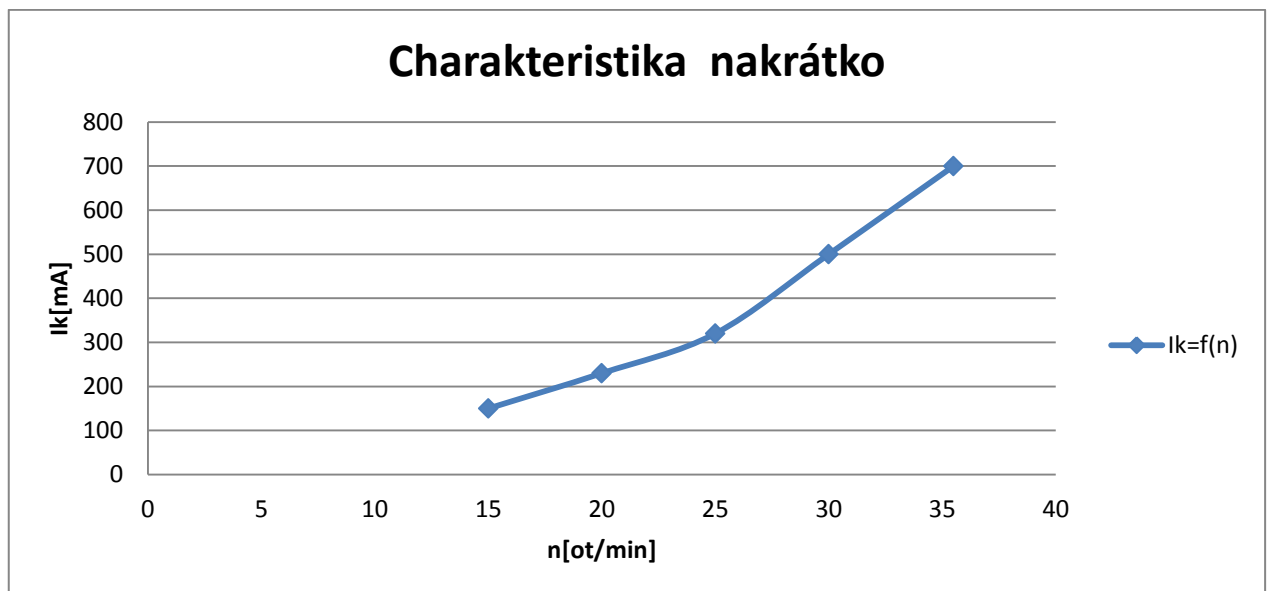
Obr.: 4.7. Proud $I_k=320\text{mA}$



Obr.: 4.8. Proud $I_k=230\text{mA}$

Obr.: 4.9. Proud $I_k=150\text{mA}$ [32]

4.2.4. Charakteristika nakrátko

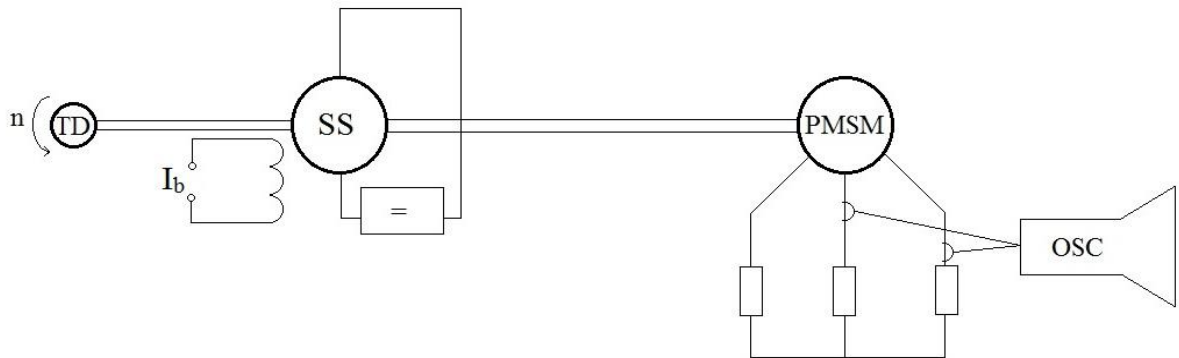


Obr.: 4.10. Charakteristika nakrátko [33]

4.3. Měření při zatížení

Motor byl zatížen třemi rezistory. Každý z rezistorů měl odpor 13Ω . Měření proběhlo při rychlosti 1020 ot/min. Dále se měří průběh generovaného napětí a proudu, který se zobrazí na připojeném osciloskopu.

4.3.1. Schéma zapojení



Obr. 4.11. Schéma zapojení pro měření se zatížením [34]

4.3.2. Naměřené hodnoty

Měření při zatížení			
n[ot/min]	R[Ω]	U[V]	I[A]
1020	13	15,9	1,13

Tab.: 4.3. Hodnoty při zatížení [3]

Odpor vinutí		
U[mV]	I[A]	Rv[mΩ]
581	1	581
581	1	581
583	1	583

Tab.: 4.4. Naměřený a spočítaný odpor vinutí [4]

Odpor vinutí byl změřen ohmovou metodou pomocí zdroje stejnosměrného proudu v podobě baterie.

4.3.3. Průběh napětí a proudu



Obr.: 4.12. napětí a proud (napětí zobrazeno nižší amplitudou) [35]

4.4. Seznam použitých přístrojů

Přístroj	Označení	Ev.číslo	Parametry
Rezistor	R	1677, 4041, 4042	13Ω
Zdroj ss proudu	Diametral	169953, 169951	24V
Stejnoseměrný zdroj			
Osciloskop	Tectronix	TSD 2024B	
Proudová sonda	Tectronix	A622	1:10
Napěťová sonda	Tectronix		1:10
Voltmetr	V	8798	
SS motor			P=550W, I _n =2A, I _b =0,6 A
Buzení dynama			0,6 A
Multimetr	Range DT 830D		
Synchronní stroj s PM			P=1,41kW, 83V,11A, 3000ot/min

Tab.: 4.5. Použité přístroje [5]

4.5. Vypočtené parametry stroje

$$\text{Napěťová konstanta: } k_u = \frac{U}{n} = \frac{24,17}{1900} \cong 0,0127 \text{ V/ot.min}^{-1} \quad (4/1)$$

$$\text{Proudová konstanta: } k_I = \frac{I}{n} = \frac{0,3535}{30} \cong 0,0117 \text{ A/ot.min}^{-1} \quad (4/2)$$

Z konstanty napětí lze vypočítat napětí při zvolených otáčkách. Pro tento výpočet lze zvolit otáčky třeba 30 ot./min⁻¹, pro které jsou k dispozici přímo naměřené hodnoty proudu.

$$k_u \cdot n = U, \text{ kde } n=30 \Rightarrow 0,0127 \cdot 30 = 0,381 \text{ V}$$

$$\text{Dále vypočteme podélnou impedanci } Z_d. \quad Z_d = \frac{U}{I} = \frac{0,381}{0,3535} = 1,077 \Omega \quad (4/3)$$

Jelikož je již známý odpor vinutí, který je změřen ohmovou metodou, lze vypočítat podélnou reaktanci a pro určitou hodnotu frekvence (otáček) velikost indukčnosti vinutí.

$$Z_d = \sqrt{R_d^2 + X_d^2} \Rightarrow X_d = \sqrt{Z_d^2 - R_d^2} = \sqrt{1,077^2 - 0,5816^2} = 0,906 \Omega \quad (4/4)$$

$$\text{Pro otáčky 30 ot./min je frekvence: } f = \frac{p \cdot n}{60} = \frac{3 \cdot 30}{60} = 1,5 \text{ Hz} \quad (4/5) \Rightarrow$$

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 1,5 = 9,424 \text{ rad.s}^{-1} \quad (4/6)$$

Tedy pro tuto zvolenou frekvenci je podélná indukčnost stroje:

$$L_d = \frac{X_d}{\omega} = \frac{0,906}{9,424} = 96,137 \text{ mH} \quad (4/7)$$

Ze štítkových hodnot vypočítaná poměrná hodnota reaktance a poměrná hodnota odporu.

$$Z_n = \frac{U_n}{I_n} = \frac{83}{11} = 7,5454 \Omega$$

Pro jmenovité otáčky $n = 3000 \text{ ot./min.}$ vypočteme frekvenci: $f = \frac{p \cdot n}{60} = \frac{3 \cdot 3000}{60} = 150 \text{ Hz}$

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 150 = 942,47 \Rightarrow X_d = \omega \cdot L_d = 942,47 \cdot 0,096137 = 90,6 \Omega$$

$$x_d = \frac{X_d}{Z_n} = \frac{90,6}{7,5454} = 12,008 \quad (4/8)$$

$$r_a = \frac{R_a}{Z_n} = \frac{0,5816}{7,5454} = 0,07708 \quad (4/9)$$

Následujícími výpočty ze stavu při zatížení vyšly hodnoty:

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{15,9}{1,13} = 14,07 \Omega$$

Odpor uvažujeme jako připojenou zátěž + odpor vinutí:

$$R = R_z + R_v = 13 + 0,5816 = 13,5816 \Omega \quad (4/10)$$

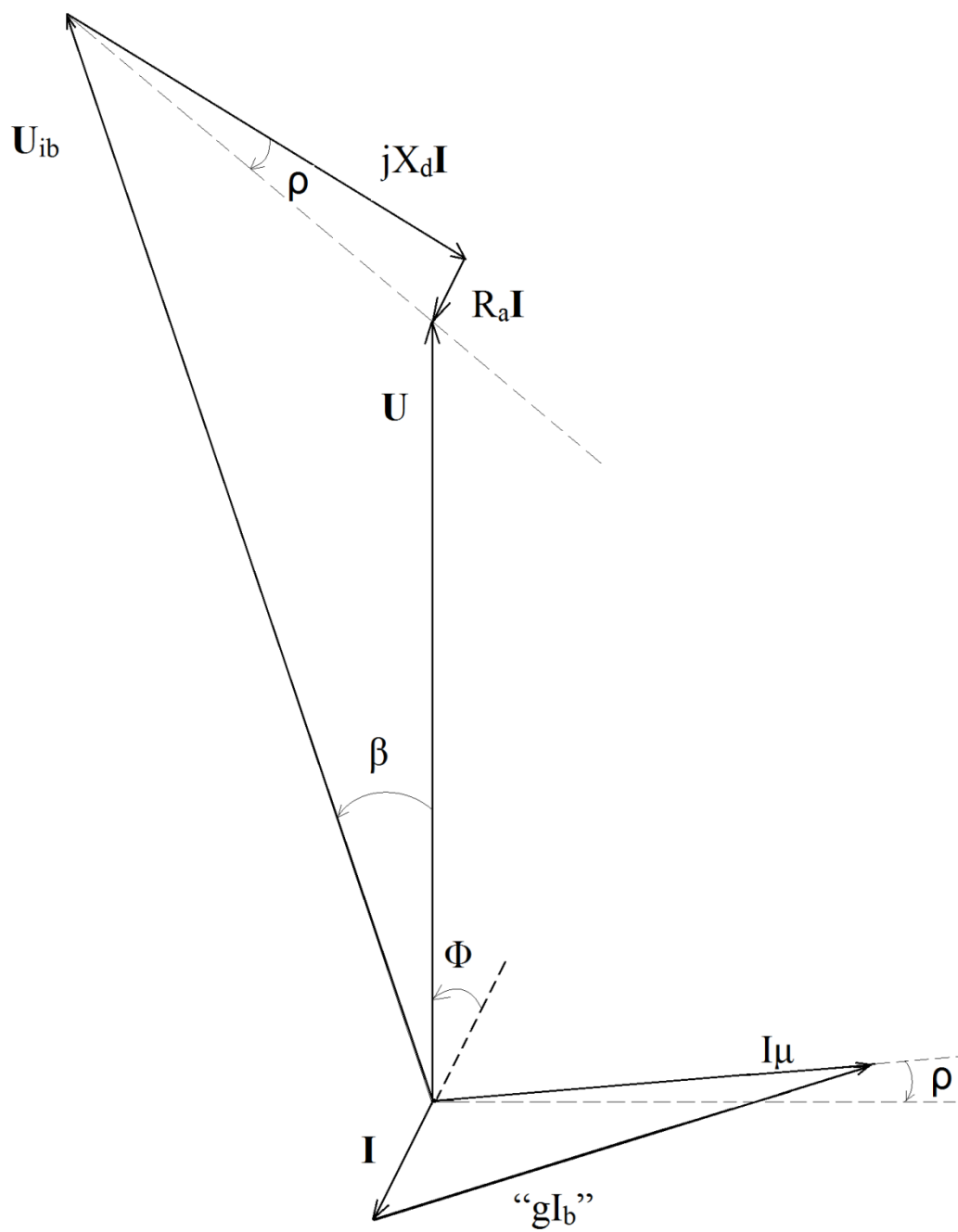
$$\text{Reaktance při zatížení: } X = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{14,07^2 - 13,5816^2} = 3,6749 \Omega$$

Ve složkovém tvaru je velikost impedance:

$$\mathbf{Z} = 13,5816 + j3,6749 \quad \text{nebo ve tvaru s verzorem } \mathbf{Z} = 14,06 \angle 15,14^\circ$$

Položíme-li do osy y reálnou osu, fázorový diagram bude vypadat následujícím způsobem. Je vidět, že stroj má odporově-induktivní zátěž. Fázorový diagram, je znázorněn pro 1020 ot./min. což je frekvence 51 Hz. Stroj je provozován v generátorickém režimu.

Na diagramu je také zobrazen magnetizační proud I_m , který leží posunut od osy x o úhel ρ . Dále proud "gI_b", který znázorňuje fiktivní budící proud.



Obr.: 4.13. Fázorový diagram měřeného stroje [36]

5. Závěr

V první kapitole je několik vzorců vztahujících se k principu činnosti synchronního motoru. Na přiložených obrázcích jsou vidět například základní konstrukční uspořádání, průběhy momentů, náhradní schéma a dále v kapitole 1.6. je série obrázků popisující vznik momentu právě na stroji jenž je osazen permanentními magnety. Závěr první kapitoly se věnuje fázorovým diagramům v určitých pracovních režimech stroje.

Druhá kapitola ukazuje možné uložení permanentních magnetů v synchronních strojích. Rozdělujeme zde dva základní druhy strojů a to stroje válcové a stroje diskové. Oba druhy těchto strojů mají odlišné uložení PM. Válcové pak dále rozdělujeme podle uložení PM na vnitřní a povrchové. Dále je zde na obrázcích vyobrazeno konkrétní uspořádání, kde jsou popsány výhody a nevýhody daných uspořádání.

Celá třetí kapitola je zase věnována permanentním magnetům, konkrétně materiálům, ze kterých jsou vytvořeny. V prvních podkapitolách je zde věnován důraz na obecné vlastnosti magnetických materiálů a obecně magnetismus. Neopomenuta byla také velmi důležitá hysterezní smyčka, na které jsou vyobrazeny důležité body, které vyjadřují vlastnosti materiálů. Na hysterezních smyčkách z obr.: 3.6. je také demonstrována magnetická tvrdost materiálů. Druhá část této kapitoly je věnována konkrétním materiálům. Hlavními jsou materiály na bázi slitin, feritové materiály a nejvýkonnější materiály ze vzácných zemin, z nichž jsou důležité samarium-kobaltové sloučeniny a neodým-železo-bórové.

Poslední, tedy čtvrtá kapitola je věnována praktickému měření na synchronním stroji s permanentními magnety. Při měření byla provedena zkouška naprázdno, nakrátko a při zatížení. Měření proběhlo v laboratoři katedry výkonové elektroniky a elektromechaniky fakulty elektrotechnické, na soustrojí stejnosměrného cize buzeného motoru, tachodynamu a již zmíněného synchronního stroje s PM. Průběhy napětí a proudů byli zaznamenány osciloskopem a jsou součástí této bakalářské práce. Z naměřených hodnot byly poté zhotoveny charakteristiky naprázdno a nakrátko a také vypočteny charakteristické veličiny měřeného stroje. Jsou to podélná impedance, podélná reaktance, indukčnost vinutí stroje, dále poměrné hodnoty impedance a reaktance. Z těchto výsledků následně vznikl fázorový diagram, který je zároveň posledním obrázkem této bakalářské práce.

6.Literatura

- [1] Bartoš V. , *Elektrické stroje I,II* , Vysoká škola strojní a elektrotechnická , Plzeň 1986
- [2] Hanselmann Duane C., *Brushless Permanent – Magnet Motor Design*, University of Maine Orono, Maine, ISBN 0-07-026025-7
- [3] Bartoš V. , *přednášky k předmětu TES I, prezentace synchronní stroje*, Plzeň
- [4] Hrabovcová V. , Janoušek L. , Rafajdus P. , Ličko M., *Moderné elektrické stroje* , Žilinská universita, Žilina 2000, ISBN 80-7100-809-5
- [5] Hanselmann Duane C., *Brushless Permanent – Magnet Motor Design* , University of Maine Orono, Maine, ISBN 1-932133-63-1
- [6] Bartoš V., Červený J., Hruška J., Kotlanová A., Skala B., *Elektrické stroje*, Plzeň 2006, ISBN 80-7043-444-9
- [7] Rahided A., Korakianitis T., *Analytical Magnetic Field Distribution of Slotless Brushless Machines With Insert Permanent Magnets*, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 47, NO. 6, JUNE 2011
- [8] Magnetismus [13.5.2013] [Online],<<http://cs.wikipedia.org/wiki/Magnetismus>>
- [9] Permanentní magnety [13.5.2013] [Online],
<http://www.sinomag.cz/sinomag.cz/data/sinomag/downloads/Permanentni_magnety.pdf>
- [10] Samarium-cobalt magnet [14.5.2013] [Online],
<http://en.wikipedia.org/wiki/Samarium%E2%80%93cobalt_magnet>
- [11] Neodymium magnet [14.5.2013] [Online],
< <http://en.wikipedia.org/wiki/NdFeB>>

Zdroje obrázků:

- [1] Vlastní zdroj, podle předlohy Bartoš V., *Elektrické stroje I,II* , str.: 101
- [2] Vlastní zdroj, podle předlohy Bartoš V., *Elektrické stroje I,II* , str.: 101
- [3] Bartoš V., Červený J., Hruška J., Kotlanová A., Skala B., *Elektrické stroje* , Plzeň 2006
- [4] <http://mediatoget.blogspot.cz/2011/11/synchronous-machine.html> , obr.: 17.17
- [5] Bartoš V. , *přednášky k předmětu TES I* , str.: 42
- [6] Vlastní zdroj , podle předlohy Bartoš V., *Elektrické stroje I,II* , str.: 109
- [7] Hanselmann Duane C. , *Brushless Permanent - Magnet Motor Design* , str.: 6
- [8] Hanselmann Duane C. , *Brushless Permanent - Magnet Motor Design* , str.: 6
- [9] Hanselmann Duane C. , *Brushless Permanent - Magnet Motor Design* , str.: 7
- [10] Hanselmann Duane C. , *Brushless Permanent - Magnet Motor Design* , str.: 7

- [11] Hanselmann Duane C. , *Brushless Permanent - Magnet Motor Design* , str.: 8
- [12] Hanselmann Duane C. , *Brushless Permanent - Magnet Motor Design* , str.: 8
- [13] Hanselmann Duane C. , *Brushless Permanent - Magnet Motor Design* , str.: 10
- [14] Bartoš V. , *přednášky k předmětu TES I* , str.: 71
- [15] Bartoš V. , *přednášky k předmětu TES I* , str.: 72
- [16] Hrabovcová V. , Janoušek L. , Rafajdus P. , Ličko M. , *Moderné elektrické stroje*, str.: 81
- [17] Hrabovcová V. , Janoušek L. , Rafajdus P. , Ličko M. , *Moderné elektrické stroje*, str.: 83
- [18] Hrabovcová V. , Janoušek L. , Rafajdus P. , Ličko M. , *Moderné elektrické stroje*, str.: 84
- [19] <http://xplqa30.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5706366>
- [20] Hanselmann Duane C. , *Brushless Permanent - Magnet Motor Design* , str.: 106
- [21] http://www.sinomag.cz/sinomag.cz/data/sinomag/downloads/Permanentni_magnety.pdf
- [22] <http://www.itacanet.org/basic-electrical-engineering/part-5-magnetic-materials/>
- [23] <http://www.itacanet.org/basic-electrical-engineering/part-5-magnetic-materials/>
- [24] Vlastní zdroj
- [25] Vlastní zdroj
- [26] Vlastní zdroj
- [27] Vlastní zdroj
- [28] Vlastní zdroj
- [29] Vlastní zdroj
- [30] Vlastní zdroj
- [31] Vlastní zdroj
- [32] Vlastní zdroj
- [33] Vlastní zdroj
- [34] Vlastní zdroj
- [35] Vlastní zdroj
- [36] Vlastní zdroj

Tabulky:

- [1] Vlastní zdroj
- [2] Vlastní zdroj
- [3] Vlastní zdroj
- [4] Vlastní zdroj
- [5] Vlastní zdroj