

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Různá konstrukční provedení rotoru u strojů s PM

Autor: Jan Jakeš
Vedoucí práce: Ing. Lukáš Veg

2019

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

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

Jméno a příjmení: **Jan JAKEŠ**
Osobní číslo: **E16B0015P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Různá konstrukční provedení rotoru u strojů s PM**
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 :

Řešitel bakalářské práce má za úkol zpracovat řešení o jednotlivých možnostech uložení PM na rotoru a zhodnotit vliv jednotlivých konstrukčních uspořádání na účinnost a vznikající tepelné ztráty.

1. Popište možnosti uložení PM na rotoru, jejich výhody a nevýhody.
2. Rozepište druhy používaných materiálů PM.
3. Proveďte zhodnocení a popište výhody a nevýhody jednotlivých řešení.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. PYRHONEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valéria HRABOVCOVÁ. Design of Rotating Electrical Machines. Second Edition. United Kingdom: Wiley, 2014. ISBN 978-1-118-58157-5.
2. HANSELMAN, Duane C. Brushless permanent magnet motor design. 2nd ed. Cranston, R.I.: The Writers' Collective, c2003, xvi, 392 p. ISBN 19-321-3363-1.
3. HIRUŠKA, Karel (Akademický rok 2014/2015). Vybrané partie elektrických strojů [2014] Západočeská univerzita v Plzni.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Lukáš Veg
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: 5. října 2018
Termín odevzdání bakalářské práce: 13. června 2019


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




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou/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/diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 11.6.2019

Jan Jakeš

Obsah

SEZNAM ZKRATEK	I
ANOTACE.....	IV
ABSTRACT	V
ÚVOD.....	1
1 MAGNETISMUS	2
1.1 VELIČINY POPISUJÍCÍ MAGNETICKÉ POLE	3
1.2 VLIV MATERIÁLŮ NA MAGNETICKÉ POLE	4
1.3 ZOBRAZENÍ VLASTNOSTÍ MAGNETICKÝCH MATERIÁLŮ.....	4
2 PERMANENTNÍ MAGNETY	5
2.1 MAXIMÁLNÍ ENERGETICKÝ SOUČIN (BH _{MAX}).....	7
2.2 MAGNETY ALNiCo	7
2.3 FERITOVÉ MAGNETY	8
2.4 SAMARIUM - KOBALTOVÉ MAGNETY	9
2.5 NEODYMOVÉ MAGNETY	9
2.6 KOMPOZITNÍ MAGNETY	11
3 POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH MATERIÁLŮ PRO PM.....	11
4 STROJE S PERMANENTNÍMI MAGNETY	14
4.1 STEJNOSMĚRNÉ STROJE S PM.....	14
4.1.1 VÁLCOVÉ MOTORY	15
4.1.2 DISKOVÉ MOTORY	16
4.1.3 INVERZNÍ KONSTRUKCE	16
4.2 SYNCHRONNÍ STROJE S PM.....	18
4.2.1 ZÁKLADNÍ DĚLENÍ	18
4.2.2 POVRCHOVÉ ULOŽENÍ PM	19
4.2.3 VNITŘNÍ ULOŽENÍ PM	22
4.3 POROVNÁNÍ ULOŽENÍ PM	22
5 VÝPOČET ROZMĚRŮ PM.....	25
5.1 VÝPOČET ROZMĚRŮ PRO POVRCHOVÉ ULOŽENÍ	25
5.2 VÝPOČET ROZMĚRŮ PRO VNITŘNÍ V ULOŽENÍ.....	28
5.3 VÝPOČET ROZMĚRŮ PRO RADIÁLNÍ ULOŽENÍ	31
5.4 VÝPOČET ROZMĚRŮ PRO TANGENCIÁLNÍ ULOŽENÍ.....	32
6 ZTRÁTY V ROTORU A TEPLO V NĚM VZNIKLÉ	35
6.1 TEPLO A JEHO PŘENOS.....	35
6.2 ZTRÁTY V PERMANENTNÍCH MAGNETECH.....	36
6.3 ZTRÁTY VE JHU ROTORU	37
6.4 SIMULACE TEPLA V ROTORU	37
6.4.1 POVRCHOVÉ ULOŽENÍ PM	38
6.4.2 POVRCHOVÉ ZAPUŠTĚNÉ ULOŽENÍ PM	39
6.4.3 POVRCHOVÉ ULOŽENÍ PM S PÓLOVÝMI NÁSTAVCI	40
6.4.4 VNITŘNÍ "V" ULOŽENÍ PM.....	41
6.4.5 VNITŘNÍ TANGENCIÁLNÍ ULOŽENÍ PM.....	42
6.4.6 VNITŘNÍ RADIÁLNÍ ULOŽENÍ PM	43

ZÁVĚR.....	46
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	48
PŘÍLOHY	50

Seznam symbolů a zkratk

ANSYS.....	Analysis system
B	Magnetická indukce [T]
B_{j1}	Magnetická indukce ve jhu statoru [T]
B_z	Magnetická indukce v zubech statoru [T]
B_{j2}	Magnetická indukce ve jhu rotoru [T]
BH_{max}	Maximální energetický součin [kJ/m^3]
B_m	Indukce magnetů [T]
B_r	Remanentní magnetizace [T]
B_δ	Magnetická indukce ve vzduchové mezeře [T]
b_m	šířka magnetu [mm]
$\cos\varphi$	Účinitel [-]
D_e	Vnější průměr stroje [m]
D_1	Vnitřní průměr statoru [m]
D_2	Průměr rotoru [m]
F.....	Odstředivá síla [N/m]
F_m	Magnetomotorické napětí [A]
H_c	Koercivita [kA/m]
H_{j1}	Intenzita magnetického pole v jhu statoru [A/m]
H_z	Intenzita magnetického pole v zubech statoru [A/m]
H_{j2}	Intenzita magnetického pole v jhu rotoru [A/m]
H_δ	Intenzita magnetického pole ve vzduchové mezeře [A/m]
H_m	Intenzita magnetického pole PM [A/m]
h_m	výška magnetu [mm]
IPM.....	Interior permanent magnets
H.....	Intenzita magnetického pole [A/m]
k_c	Carterův činitel [-]
k_{Fej}	korekční činitel pro jho rotoru[-]

l_e	Skutečná délka stroje [m]
l_{j1}	Délka střední siločáry jha statoru [m]
l_{j2}	Skutečná délka stroje [m]
l_m	délka magnetu [mm]
l_p	délka střední siločáry pólového nástavce [mm]
M_e	Elektromagnetický moment [Nm]
M_n	Nominální moment [Nm]
M_{zab}	Záběrný moment [Nm]
m	počet fází [-]
m_{Fe}	Hmotnost železa jedné kruhové výseče [kg]
m_{Fej2}	Hmotnost rotorového jha [kg]
m_{PM}	Hmotnost magnetů [kg]
n_n	Jmenovité otáčky [ot/min]
r_{out}	vnější poloměr rotoru [m]
r_{in}	vnitřní poloměr rotoru [m]
SPM.....	Surface permanent magnets
S_r	Obsah mezikruží [m^2]
S_{Fe}	Obsah jedné kruhové výseče rotorového jha [m^2]
S_{PM}	Obsah magnetu ve výseči rotorového jha [m^2]
PM.....	Permanentní magnet/y
P_{Fe}	Hustota železa [kg/m^3]
P_{PM}	Hustota magnetu [kg/m^3]
P_n	Jmenovitý výkon [kW]
U_s	Jmenovité napětí [V]
U_{ib}	Indukované napětí z budiče [V]
V_{PM}	Objem permanentního magnetu [m^3]
V_r	objem rotoru [m^3]
x_d	Reaktance v podélné větvi [Ω]
x_q	Reaktance v příčné větvi [Ω]
α	Součinitel přestupu tepla [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
β	Zátěžový úhel [$^\circ$]
γ_c	Konstanta Carterova činitele [-]
γ_t	Tepelná konduktivita [$W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$]

ΔP_{PM}	Ztráty v permanentních magnetech [W]
ΔP_{Fej2}	Ztráty v rotorovém jhu [W]
Δp	měrné ztráty v 1 kg železa při indukci 1 T a frekvenci 100 Hz [W/kg]
ΔU_{j1}	Úbytek napětí ve statorovém jhu [A]
ΔU_{hz}	Úbytek napětí v zubu statoru [A]
ΔU_{j2}	Úbytek napětí v rotorovém jhu [A]
ΔU_p	Úbytek napětí v pólovém návstavci [A]
ΔU_{δ}	Úbytek napětí ve vzduchové mezeře [A]
$\Delta \vartheta$	Oteplení [°C]
$\Delta \vartheta$	Oteplení [°C]
δ	Šířka vzduchové mezery [mm]
ϑ	Teplota uvažované části [°C]
ϑ_v	Teplota okolního prostředí [°C]
η	Účinnost [-]
μ_r	Relativní permeabilita [-]
μ_0	Permeabilita vakua [H/m]
ρ_{PM}	Měrný odpor magnetu [$\Omega \cdot m$]
φ	Magnetický tok [Wb]
ω	Úhlová rychlost [rad/s]
ω_s	Synchronní úhlová rychlost [rad/s]
$2p$	Počet pólů

Anotace

Předkládaná bakalářská práce se zabývá různými konstrukčními provedeními rotorů s permanentními magnety na synchronním stroji, vlastnostmi jednotlivých konstrukčních provedení a porovnání použitelných materiálů permanentních magnetů. V práci bylo vytvořeno šest modelů rotoru, každý pro jiné upořádání magnetů a provedena simulace vzniku tepla v této části stroje pomocí programu ANSYS. V závěru je provedeno vyhodnocení jednotlivých řešení.

Klíčová slova

Permanentní magnety, synchronní stroj, různá konstrukční provedení rotoru, teplo vzniklé v rotoru, ANSYS, povrchové uložení PM, vnitřně uložené PM, porovnání PM

Abstract

The present bachelor thesis deals with various constructional designs of permanent magnet rotors on a synchronous machine, properties of individual constructional designs and comparison of usable materials of permanent magnets. Six rotor models, each for a different magnet arrangement, were created and a simulation of heat generation in this part of the machine was performed using ANSYS. In conclusion, the evaluation of individual solutions is done.

Key words

Permanent magnets, synchronous machine, various rotor designs, rotor heat, ANSYS, surface PM, internally PM, comparison of PM

Úvod

Předkládaná práce se zabývá různými konstrukčními provedeními permanentních magnetů na rotorech elektrických strojů a vlivu těchto provedení na teplo vzniklé v rotoru. Nejprve je nutno říci, že už samotná volba materiálu, z kterého budou vyrobeny použité permanentní magnety, je také velice důležitá, jelikož každý materiál má své specifické vlastnosti a tím i velký vliv při návrhu stroje. Vlastnosti současně používaných a nabízených materiálů pro permanentní magnety jsou popsány v druhé kapitole této práce a jejich vzájemné porovnání v kapitole třetí. Z ní vychází, že vhodným materiálem jsou materiály na bázi vzácných zemin, ovšem za cenu vyšších pořizovacích nákladů.

Ve čtvrté kapitole jsou shrnuty jednotlivé řešení uložení permanentních magnetů na rotorech strojů, synchronních i stejnosměrných. Tento konstrukční prvek výrazně ovlivňuje chování celého stroje, jelikož různá uložení vytvářejí různě silné magnetické pole, které následně interaguje s magnetickým polem statoru.

V páté kapitole jsou navrženy tyto uspořádání magnetů pro synchronní stroj o výkonu 60 kW, spočteny jejich rozměry a následně v další kapitole spočteny ztráty v jednotlivých částí rotoru. A v programu ANSYS nasimulováno rozložení a velikost tepla v rotoru, pro určená uložení magnetů. Přičemž permanentní magnety jsou zvoleny neodymové. A pro všechna řešení je uvažován stejný stator.

Vliv tepla na účinnost a bezpečnost stroje je velký a výpočet celkového oteplení stroje velmi komplikovaná záležitost. Pak je zde také skutečnost, že například neodymové permanentní magnety jsou velice náchylné na teplotu, v některých případech ztrácí své magnetické vlastnosti už při 80 °C. I když teplo vzniklé v rotoru s permanentními magnety není tak velké, jako tepelné ztráty vzniklé ve statoru a zvláště jeho vinutí, je to důležitá hodnota, kterou při celkovém návrhu stroje nelze opomenout. Ze simulací uvidíme, které řešení je nejlepší.

1. Magnetismus

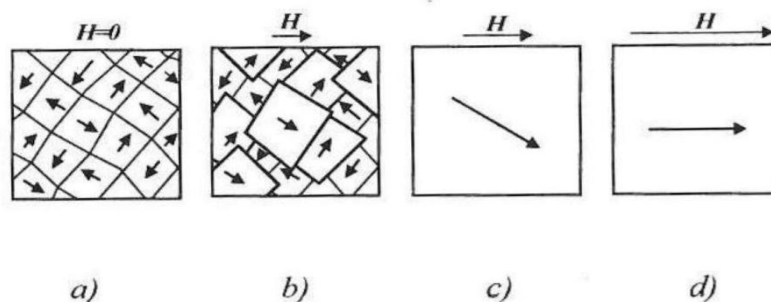
Přítomnost magnetického pole se projevuje magnetickými jevy a účinky. Ty jsou dobře pozorovatelné hlavně silovými účinky na své okolí a to zejména na feromagnetické materiály. Teorie, objasňující fyzikální podstatu magnetického pole, byla vytvořena na základě poznatků o jevech, souvisejících s průtokem elektrického proudu ve vodiči a teorie o struktuře hmoty.

O magnetických vlastnostech rozhoduje to jak jsou v určité látce uspořádány magnetické momenty. Výsledný magnetický moment atomu je roven:

$$m = \sum m_{\text{orb}} + \sum m_{\text{spin}}$$

Pokud jsou tyto elementární magnetické momenty (spinový a orbitální) elektronů v atomech orientovány nahodile, pak dochází k jejich vykompenzování a určitá látka není zdrojem magnetického pole. Čím více je těchto jednotlivých magnetických momentů elektronů orientováno souhlasně, tím více je daná látka magnetická. Zmagnetováním nemagnetických látek vnějším magnetickým polem lze vysvětlit ovlivněním pohybu elektronů a tím pádem i orientace jejich elementárních magnetických momentů silovým působením vnějšího magnetického pole. Když přestane působit vnější magnetické pole, tak se v ideálním případě obnoví původní stav pohybu elektronů v atomech a tím i původní nahodilá orientace magnetických momentů. Látka bude opět nemagnetická.

V některých případech chceme aby se výchozí stav pohybu elektronů po odstranění látky z vnějšího magnetického pole neobnovil vůbec, nebo jen částečně a materiál zůstal zmagnetován. Magnetické pole zmagnetované látky se může zmenšit nebo úplně vymizet také v důsledku jejího ohřevu, roztavení, nebo působením určitého ionizujícího záření. [2]



Obr. 1.1: Proces pohybu domén ve feromagnetických materiálech a) bez přiloženého mag. pole; b,c,d) po přiložení pole intenzity H, která se zvyšuje

1.1. Veličiny popisující magnetické pole

Magnetický tok (Φ) - Je to vektorová veličina vyjadřující počet siločar magnetického pole procházejícího danou plochou, která je kolmá na směr siločar.

Vztah pro výpočet: $\Phi = B \cdot S$ [Wb; T, m²]

Intenzita magnetického pole (H) - Je vektorová fyzikální veličina, vyjadřující mohutnost magnetického pole, v závislosti např. na velikosti elektrického proudu protékajícího vodičem cívky a nezávisle na parametrech prostředí, ve kterém je magnetické pole vytvářeno.

Vztahy pro výpočet: $H = Fm/l$ [Am⁻¹ ; A, m]

$$H = B / \mu \text{ [Am}^{-1} \text{ ; T, Hm}^{-1}\text{]}$$

Magnetická indukce (B) - Je vektorová fyzikální veličina, která vyjadřuje počet siločar magnetického pole procházejících jednotkovou plochou (m²), kolmou na směr siločar, tzn. na hustotu siločar daného magnetického pole.

Vztah pro výpočet: $B = \mu \cdot H$ [T; Hm⁻¹, Am⁻¹]

Permeabilita prostředí (μ) - Jinak také prostupnost prostředí. Je to skalární fyzikální veličina, která vyjadřuje magnetickou polarizovatelnost prostředí, ve kterém je magnetické pole vytvářeno.

Vztahy pro výpočet: $\mu = B / H$; $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$ [H.m⁻¹; T/Am⁻¹]

- Permeabilita vakua (μ_0) - Je magnetická indukční konstanta vakua.

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} = 1,256637 \cdot 10^{-6} \text{ T/Am}^{-1}$$

- Relativní (poměrná) permeabilita (μ_r) - Tato veličina vyjadřuje, kolikrát je určité prostředí magneticky polarizovatelnější, než vakuum. Tato veličina je bezrozměrná.

Vztah pro výpočet: $\mu_r = \mu / \mu_0$ [2]

1.2. Vliv materiálů na magnetické pole

Diamagnetické ($\mu < 1$)

Skládají se z diamagnetických atomů. Tyto materiály magnetické pole mírně zeslabují. A zároveň jsou z magnetického pole slabě vypuzovány. Mezi tyto materiály patří například uhlík, voda, zlato, měď atd.

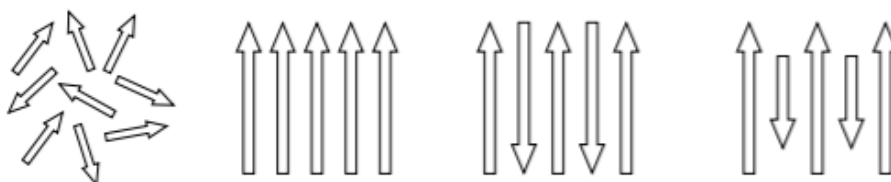
Paramagnetické ($\mu > 1$)

Skládají se z paramagnetických atomů. Tyto materiály magnetické pole mírně zesilují. A zároveň jsou slabě vtahovány do magnetického pole. V případě že se nacházejí v blízkosti magnetu, tak přitahují menší kovové předměty. Tyto materiály není možné trvale zmagnetovat. Patří mezi ně například hliník, vápník, kyslík, platina atd. [3]

Feromagnetické ($\mu \gg 1$)

Řádově je μ $100 \div 10000$. Jsou také složeny z paramagnetických atomů, ale jejich uspořádání je takové, že velmi značně zesilují magnetické pole. Tyto materiály jsou nemagnetické. Jdou však lehce zmagnetovat, vlivem vnějšího magnetického pole. Překročíme-li při ohřevu látky tzv. Curieovu teplotu, změní se feromagnetická látka v paramagnetickou a pokud byla zmagnetována, dojde k odsmagnetování. Jsou to např. kobalt (Co), železo (Fe), nikl (Ni) a jejich slitiny. [2]

Paramagnetický, feromagnetický, antiferomagnetický a ferimagnetický materiál:



Obr. 1.2: uspořádání magnetických momentů v různých materiálech [2]

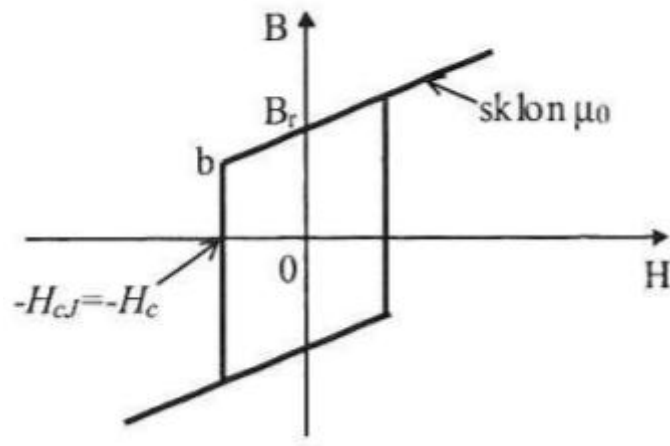
1.3. Zobrazení vlastností magnetických materiálů

Nejčastěji používáme dvě základní a nejčastěji používané metody, pro zobrazování a hodnocení magnetických parametrů materiálů. A to jsou magnetizační křivky a hysteresní smyčky. Je to z toho důvodu, že se v praxi nejčastěji používají feromagnetické materiály a jejich vlastnosti jsou velice závislé na intenzitě magnetického pole.

1. Magnetizační křivky - křivky prvotní magnetizace, vyjadřuje závislost magnetické indukce (B) na hodnotě intenzity magnetického pole (H), která se mění.

A to u materiálu, který ještě nebyl nikdy magnetován.

2. Hysteresní smyčky (křivky) - ty vyjadřují závislost hodnoty magnetické indukce (B) na intenzitě magnetického pole (H), která mění. Při opakované a protisměrné magnetizaci určitého feromagnetického materiálu. Obecně platí, že čím je tato křivka užší, tím je materiál magneticky měkčí a naopak.



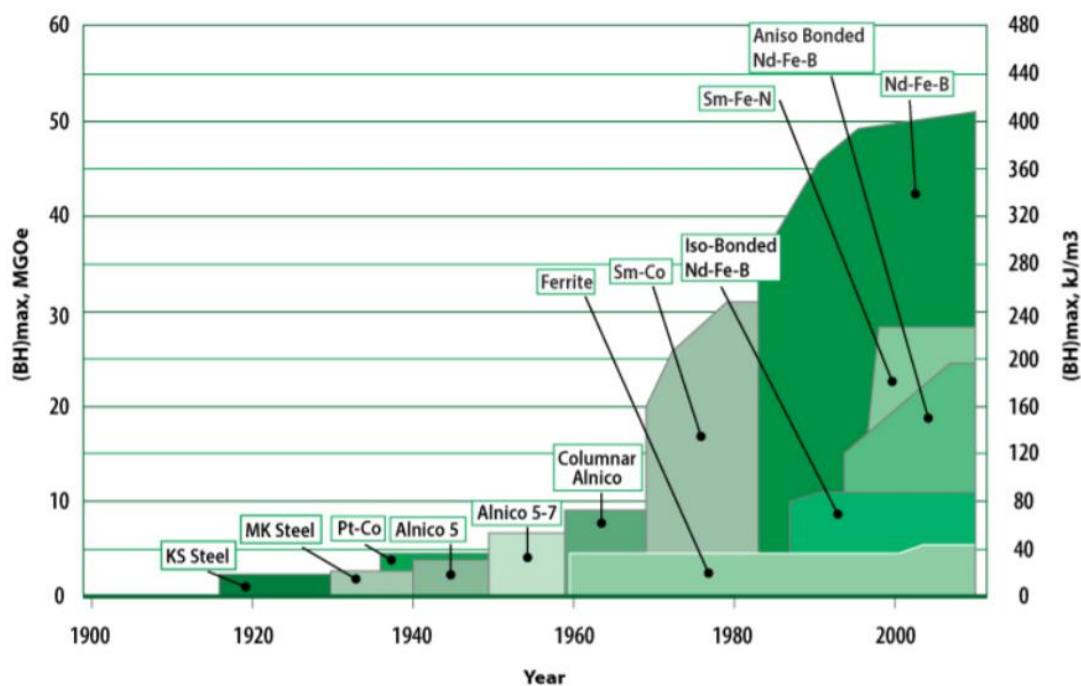
Obr. 1.3: Hysterezní smyčka ideálního PM $B = f(H)$ převzato z[1]

2. Permanentní magnety

Jsou to feromagnetické materiály. Konkrétní velikost a tvar hysterezní smyčky, pak závisí na každém materiálu. Většinou se jedná o magneticky tvrdé materiály, takže mají širokou hysterezní smyčku. Její tvar také souvisí s teplotou magnetu při magnetování. Z toho vyplývá, že permanentní magnety mají takové vlastnosti, že je u nich velice obtížné

natáčení Weissových domén a tím pádem proces magnetizace, či demagnetizace.

Vývoj permanentních magnetů začal někdy začátkem 20. století. Kromě přírodního magnetitu (Fe_3O_4), se začalo s produkcí například karbonu, wolframových ocelí, nebo kobaltu. Tyto materiály pro permanentní magnety byly na dlouho jedinými. V 30. letech 20. století nastal průlom s objevením slitiny AlNiCo. Poté byly v 50. letech minulého století představeny ferity. Ty se pro jejich levnost používají dodnes. Dalším výrazným krokem v před bylo když byly v 60. letech vynalezeny slitiny na bázi vzácných zemin a kobaltu. Nejvýznamnější byly SmCo_5 a $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$, které byly dále vyvíjeny a vylepšovány. Po objevení těchto materiálů byl dalším významným nálezem objev permanentních magnetů ze slitiny neodymu, železa a bóru (NdFeB), v roce 1983. Základem těchto materiálů je slitina $\text{Nd}_{15}\text{Fe}_{77}\text{B}_8$.

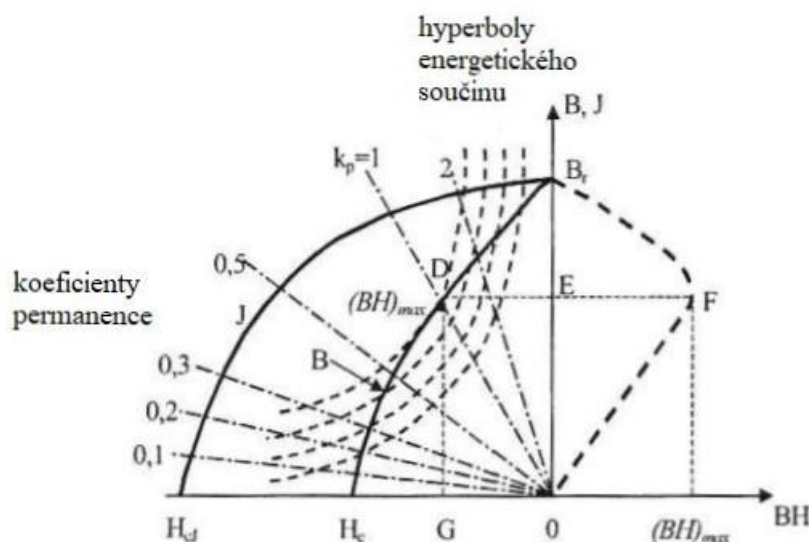


Obr. 2.1: Vývoj materiálů pro PM, převzato z [14]

V současné době se nejrychleji rozvíjí vývoj permanentních magnetů s vázanými polymery. Všechny základní typy magnetů mohou být vyráběny s příměsí polymeru. V těchto materiálech jsou skombinovány nejlepší vlastnosti z materiálů ze vzácných zemin, feritových materiálů a vhodných pryskyřic. [4]

2.1. Maximální energetický součin (BH_{\max})

Můžeme ho najít na demagnetizační křivce. Demagnetizační křivka je vlastně 2. kvadrant hysterezní smyčky. Je to energetický součin $(BH)_{\max}$. Je to důležitý kvalitativní ukazatel PM. Říká nám jak je materiál odolný vůči demagnetizaci. Jinak tento součin znamená, jakou maximální možnou vnější energii je schopen vytvořit jednotkový objem daného PM.



Obr. 2.2: Demagnetizační charakteristika, převzato z [1]

2.2. Magnety AlNiCo

Tyto materiály se vyrábějí sléváním, spékáním, nebo práškovou metalurgií. Jejich typické složení bývá Fe 50%, Co 25%, Ni 14%, Al 8% a Cu/Nd/Si 3%. U těchto materiálů je lepší používat jako výrobní postup slévání, dosáhneme tak o 25% lepší magnetické vlastnosti, než u spékání. AlNiCo magnety jsou celkem dobře tepelně odolné, používají se při teplotách 300 °C a vyšších. Také mají dobrou odolnost vůči korozi. Oproti například Neodymovým. Je u nich ale velký problém s výrobou, protože se jeho odlitky při chladnutí srážejí a zmenšují, takže je obtížné dosáhnout požadovaných rozměrů. Jsou magneticky velice tvrdé a tím i extrémně mechanicky tvrdé a křehké.

Vyznačují se velkou remanentní indukci (1,2 T), nízkou koercivitou (cca. 50 kA/m) a malým energetickým součinem 40 - 80 kJ/m³. Jejich demagnetizační křivka má poměrně velký sklon ($3 \mu_0$), takže vyžadují stabilizaci. [1] [4]

Používají se jako permanentní magnety v měřicích přístrojích či elektrických strojích.

2.3. Ferritové magnety

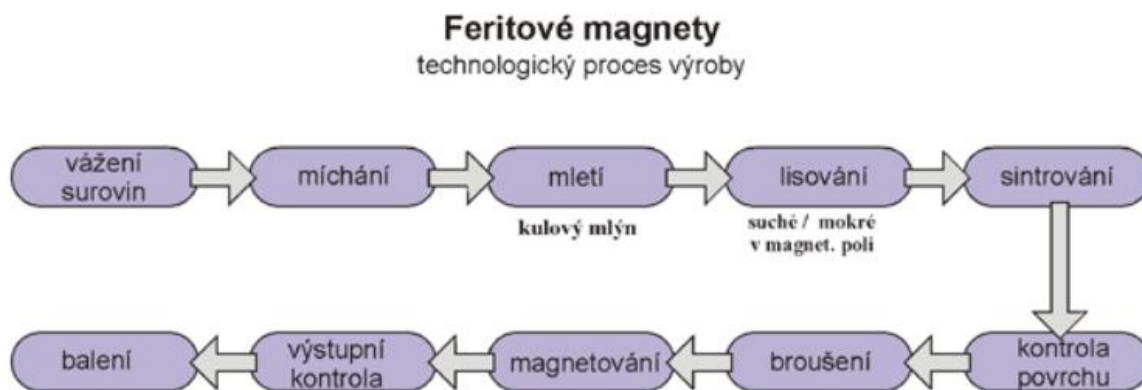
Na trhu se pohybují už více jak 60 let a stále jsou jedním z dominantních materiálů pro výrobu PM. Je to hlavně kvůli jejich nízké ceně. Jsou vyráběny práškovou metalurgií. Někdy se jim také říká keramické magnety, jelikož jsou vyrobené z keramických oxidů.

Zjednodušený proces práškové metalurgie:

- Prášky oxidů Fe a Ba, popř. Sr se smíchají a kalcinují v oxidační atmosféře při teplotách 1200 - 1300 °C.
- Poté se ferity drtí na zrna o velikosti 1 - 2 μm .
- K dosažení požadované pórovitosti (0,2 - 0,3%), se polotovary lisují tlakem 10 až 30 MPa inertního plynu. To se děje za přítomnosti magnetického pole.
- Pak se prášek vypaluje při 1200 - 1500 °C.

Nejčastěji používané varianty ferritů jsou ferrity s příměsí stroncia (18%) nebo baria (21%). Mají nižší remanentní indukci a energetický součin, než AlNiCo materiály, ale jejich koercivita je vyšší. Můžou odolávat větším demagnetizačním polím. Mají téměř ideální tvar hysterezní smyčky. Sklon demagnetizační křivky je totiž asi $1,05\mu_0$, což se blíží k ideálu. Remanentní indukce se pohybuje okolo 0,4 T a koercivita H_c 150 - 250 kA/m. Díky tomu mají menší délku než AlNiCo. Při vytvoření stejného budící magnetické napětí. $(BH)_{\text{max}}$ se většinou pohybuje okolo 36 kJ/m³.

Jsou velice odolné, využívají se např. při výrobě součástí pro reproduktory, motory a generátory v automobilovém průmyslu. [1] [4] [7]



Obr. 2.3 Technologický proces výroby feritových magnetů, převzato z [17]

2.4. Samarium - Kobaltové magnety

Jsou to permanentní magnety na bázi vzácných zemin, nejčastěji používané slitiny jsou SmCo_5 , nebo $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$, tato sloučenina byla objevena později, než první typ. Vyrábějí se práškovou metalurgií. Maximální dosažitelné hodnoty remanentní indukce jsou 1,05 T koercivita je velká, až 640 kA/m, někdy i 720kA/m. Maximální energetický součin je 210 kJ/m³. Tyto hodnoty záleží na tom jaký poměr surovin pro daný magnet zvolíme. Teplotní odolnost je velice dobrá, mohou být použity do teplot 250 °C. Také mají velkou odolnost proti korozi. Jsou ale velice křehké. Pro první zmiňovanou slitinu (SmCo_5) platí, že se velice snadno a rychle nasytí, má totiž malou koercivitu, cca. 150 kA/m. Dochází tu snadno k natáčení magnetických domén. Druhá slitina ($\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$) se při magnetizaci chová úplně jinak, Blochovy stěny jsou totiž orientovány podél hranic krystalových domén a jejich natáčení je velice obtížné. Takže při nízkých intenzitách není materiál vůbec zmagnetizován.

Samarium - Kobaltové PM se používají tam kde se vyžadují malé rozměry magnetů, kvůli jejich vysoké ceně. Používají se například v malých krokových motorech, systémy pro určování polohy, sluchátka, reproduktory atd. [1] [4] [7]

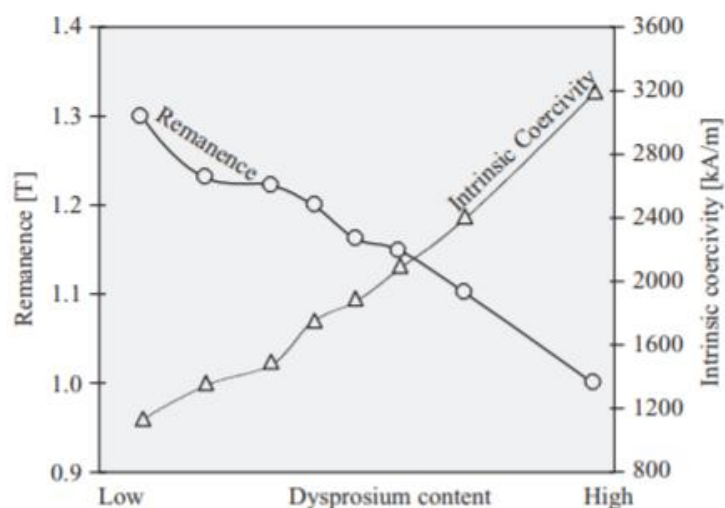
2.5. Neodymové magnety

Jsou také vyráběny práškovou metalurgií. Kvůli jejich tvrdosti se opracovávají diamantovým náradím a vždy před magnetizací. Nejčastěji používané slitiny jsou

$\text{Nd}_{15}\text{Fe}_{77}\text{B}_8$ a $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Tento materiál má při pokojové teplotě nejvyšší energetický součin ze všech materiálů používaných na výrobu PM. Je to 250 kJ/m^3 , má také velkou remanentní indukci $B_r = 1,2 \text{ T}$ a vysokou koercivitu cca. 800 kA/m . Tyto vlastnosti umožňují snížení velikosti magnetu například oproti feritovým magnetům. Není však vhodný pro velké pracovní teploty. Nad $80 \text{ }^\circ\text{C}$ ztrácí své magnetické vlastnosti. Ale tuto hodnotu lze zvýšit tak, že se pracovní teplota může pohybovat až u $180 \text{ }^\circ\text{C}$. A to pomocí legovacích prvků ze vzácných zemin. Neodymové magnety velice snadno korodují, proto se jejich povrch pokovuje a to třeba niklem, zinkem, zlatem, nebo pryskyřicí. Nejsou tak křehké jako třeba samariové, nebo feritové magnety.

Velký vliv na vlastnosti neodymového PM má také obsah dysprosia a také způsob lisování. Pokud zvýšíme obsah dysprosia, zvýší se tím vnitřní koercivita, ale na druhou stranu klesne remanence. Dysprosium je dražší než neodym, takže chceme-li magnety s vyšší vnitřní koercivitou, budou dražší, než když budeme požadovat magnety s velkou remanencí. Viz. obr....

Neodymové PM se používají například v záznamových hlavách harddisků, mikrofonech, sluchátkách. Používají se kde nejsou namáhány na tah. Mohou se použít i v točivých elektrických strojích, zde je nutné použít vhodnou slitinu NdFeB s vhodnými příměsemi, aby magnet vydržel vyšší teploty. [1] [4]



Obr. 2.4: Vliv obsahu dysprosia na remanenci a vnitřní koercivitu, převzato z [4]

2.6. Kompozitní magnety

Jsou to magnety ze vzácných zemin, nebo feritů, které obsahují určité množství plastu. Mají dobrou odolnost vůči běžným rozpouštědlům, automobilovým kapalinám a korozi. Také usnadňují obrábění magnetů. Mohou být dobře ohebné. Vyrábějí se většinou dvěma způsoby. A to buďto jako lepené magnety, nebo jako vstříkované.

Lepené magnety se vyrábí lisováním a lepením slitiny rozemleté na prášek pod velkým tlakem. Touto metodou lze dosáhnout jen omezených geometrických tvarů. Lepení se provádí pomocí epoxidových materiálů. Např. termoplastické syntetické pryskyřice. Rozsah pracovních teplot je -40 až 165 °C.

Vstříkované magnety se vyrábí, lisováním magnetického materiálu rozdrčeného na malá zrna a k němu vstříkované směsi plastu. Na to se používají termoelastomery, nylon, polyamidy atd. Touto metodou už můžeme vytvořit i komplikovanější tvary magnetů. Pracovní teplota se pohybuje v rozmezí -40 až 180 °C.

Používají se například jako těsnění v ledničkách, či sprchách. Nebo v mikromotorech, reproduktorech, zabezpečovacích zařízeních.

Maximální dosahované hodnoty, pro materiál NdFeB - NB12: $H_c = 840 \text{ kA/m}$; $B_r = 0,78 \text{ T}$; $(BH)_{\max} = 81 - 97,5 \text{ kJ/m}^3$. [8] [9]

3. Porovnání jednotlivých materiálů pro PM

Po permanentních magnetech chceme většinou co největší výkon, za co nejvýhodnější cenu. Na trhu je mnoho možností, které můžeme zvolit a často musíme při výběru materiálu udělat kompromis, který pro nás bude nejlepší.

Tab. 3.1 Magnetické vlastnosti některých materiálů PM. Upraveno z [7]

Materiál	B_r (T)	H_c (kAm⁻¹)	$(BH)_{max}$ (kJ·m⁻³)
ferit barnatý BaO·6Fe ₂ O ₃	0,43	170	36
ferit strontnatý SrO·6 Fe ₂ O ₃	0,42	250	36
AlNiCo 8Al+13Ni+24Co+3CuFe izotropní	1,28	51	44
Alnico 7Al+15Ni+35Co+4Cu+5TiFe orient.	1,05	120	72
NdFeB - NB12 kompozitní magnet	0,78	840	97
SmCo ₅ sloučenina vzácných zemin	0,87	640	144
Nd ₂ Fe ₁₄ B sloučenina vzácných zemin	1,23	880	290

Z této tabulky je patrné, že nejlepší magnetické vlastnosti mají PM z NdFeB.

Tab. 3.2 Teplotní závislost některých PM. Upraveno z [1]

	Metalurgické změny [°C]	Curieova teplota [°C]	Pracovní teplota [°C]
AlNiCo 5	550	890	300
Ferity	1080	450	300
SmCo5	300	700	250
Sm2Co17	350	800	250
NdFeB	200	310	180

Teploty metalurgických změn jsou vždy vyšší než pracovní teploty magnetů. Nechceme totiž aby v magnetech docházelo k těmto změnám při provozu. Takže například u PM z NdFeB je pracovní teplota maximálně 180 °C a to při využití speciální slitiny k tomu určené. U SmCo bývá pracovní teplota 250 °C. Z toho plyne, že ač jeden materiál má na vrch oproti ostatním co se týče magnetických vlastností, tak už nemusí mít tak dobré teplotní vlastnosti.

Dalším a nejdůležitějším aspektem při výběru je cena. Přibližná cena magnetů je znázorněna v tabulce 1.3. Z ní můžeme vidět, že nejlevnější jsou Flexibilní magnety, které se používají například jako těsnění. Pak následují ferity, proto jsou také pořád nejrozšířenějším materiálem pro výrobu PM. Nejdražší jsou Samariové magnety, které ale nemají tak dobré magnetické vlastnosti jako Neodymové. Ty jsou cca o polovinu levnější, ale stále je to celkem vysoká cena. Cena magnetů samozřejmě roste z jejich objemem (váhou). Ale nejdůležitější ukazatel pro cenu bývá objem a samozřejmě tvar a způsob zpracování magnetu.

Ceny v tabulce jsou pouze orientační. Také zde není uvažována žádná speciální povrchová,

či jiná úprava materiálů, speciální tvary, nebo zvláštní způsoby magnetování. Tyto úkony totiž cenu magnetů zpravidla zvyšují.

Tab. 3.3 Ceny jednotlivých materiálů pro PM [10]

Material	BHmax	Relative Cost	
		(\$/kg)	(\$/BHmax)
Flexible	1	\$1,76	\$0,80
Ceramic	3	\$4,40	\$0,67
Alnico	5	\$44,00	\$4,00
SmCo	25	\$154,00	\$2,80
NdFeB	40	\$77,00	\$0,88

Takovéto srovnání může být zavádějící i z toho hlediska, že všechny magnetické materiály na výrobu PM nemají stejnou hustotu.

Tab. 3.4 Hustota některých materiálů pro PM [13]

Materiál	Hustota [g/cm ³]
NdFeB	7,5
Ferity	4,9 - 5
Lepený NdFeB	5,1
SmCo	8,2 - 8,5
AlNiCo	7,1 - 7,3

Závěr je takový, že z tohoto zjednodušeného pohledu nejlépe vycházejí Neodymové magnety, ovšem nesmíme zapomínat na již zmíněné nevýhody těchto magnetů a samozřejmě rozmanitost funkcí a prostředí ve kterých PM používáme. Proto je výběr materiálu PM velice specifický.

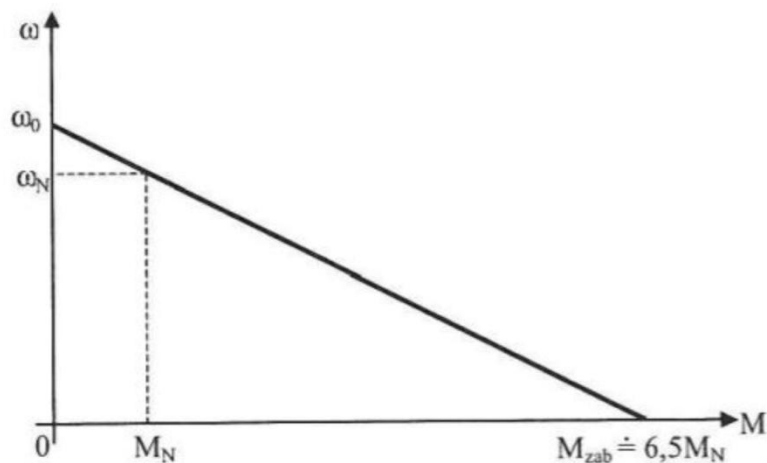
4. Stroje s permanentními magnety

Použití permanentních magnetů je možné jak u střídavých tak u stejnosměrných elektrických strojů. Střídavé stroje jsou pak vždy synchronní. Také je důležité říct, že PM se nepoužívají jen na rotorech. Můžeme též nalézt elektrické stroje, které mají PM umístěné na statoru a tím pádem nemají statorové vinutí a buzen je pouze rotor, např. u DC strojů. U synchronních strojů se ovšem permanentní magnety umísťují výhradně na rotor. Umístíme-li PM na rotor stroje, odpadne nám budící vinutí na rotoru, kroužky a stejnosměrné napájení budícího vinutí v případě kroužkového rotoru. U DC strojů se tímto zbavíme budícího vinutí, komutátor a uhlíky nám ovšem ve stroji zůstanou. Bavíme-li se o bezkaráčových motorech, kartáče zde odpadají.

Stroje s permanentními magnety mají široké spektrum možností využití. Používají se jako stejnosměrné motory, synchronní motory či generátory, jako krokové motory, lineární, či reluktanční krokové motory, bezkaráčové stejnosměrné motory atd.

Použití permanentních magnetů nám přináší určité výhody, jako třeba zmenšení tepelných ztrát, zvětšení účinnosti stroje, zmenšení rozměrů stroje, což může někdy být i nežádoucí, dále lepší chlazení atd. Avšak jsou tu i nevýhody, jako prodražení výroby, ať už kvůli cenám magnetů, nebo kvůli někdy komplikovanější výrobě. U některých magnetů ne tak vysoké pracovní teploty a riziko jejich demagnetizace atd.

4.1. Stejnosměrné stroje s PM



Obr. 4.1 Mechanická charakteristika stejnosměrného motoru s PM [1]

U stejnosměrných strojů se permanentní magnety umísťují buď na rotor nebo na stator, tím odpadne jedno z vinutí. Komutátor a kartáče a jejich funkce však zůstává u těchto strojů často zachována. Akorát u speciálních bez kartáčových motorů tomu tak není. Stejnosměrný motor s PM můžeme s přihlédnutím k určitým okolnostem (zanedbání přechodového odporu, demagnetizační účinek reakce kotvy a momentu ztrát) považovat za lineární.

Motor musí být konstruován na 6 až 7 násobek jmenovitého proudu, pozor si musíme dát hlavně na správné navržení komutátoru a kartáčů. Aby jsme zamezili přílišnému jiskření. Budeme-li brát v potaz i reakci kotvy, může se nám stát, že se AlNiCo magnety začnou demagnetizovat. To samé by platilo i pro NdFeB magnety.

4.1.1. Válcové motory

Nejčastěji používaná konstrukce jsou právě válcové motory. Zde se permanentní magnety umísťují na stator. Konstrukce malých stejnosměrných motorů se liší od konstrukce větších a výkonnějších motorů. Do malých motorů můžeme použít již zmagnetizované PM a až poté je upevnit na stator. U velkých motorů nemůžeme montovat na stator zmagnetizované magnety. Magnetizace probíhá až po namontování a to pomocí magnetizačního vinutí. Které nemusí mít velký průřez, protože ho nepoužíváme pořád. Tyto velké stroje mají také komutační vinutí pro zlepšení komutace, takže konstrukce je víceméně stejná jako u klasických stejnosměrných motorů. Póly těchto strojů mají pólové nástavce, které jsou z ocele o vysoké permeabilitě, proto aby reakce kotvy nezatěžovala PM, jelikož ty mají malou permeabilitu. [1]



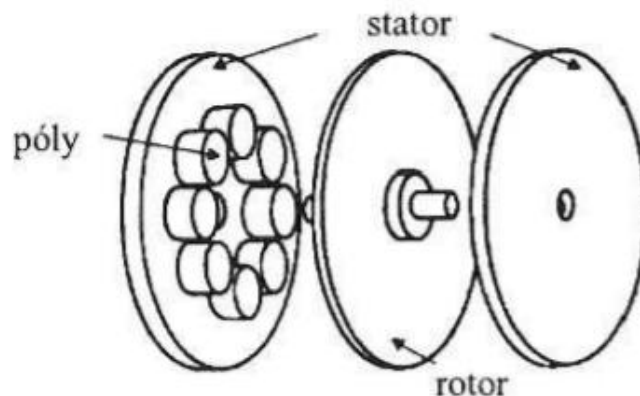
Obr. 4.2 Vodivé cesty pro magnetický tok reakce kotvy, převzato z [1]

Malé stejnosměrné motory (do 1kW) se zpravidla konstruují s permanentními magnety ze vzácných zemin. A to hlavně kvůli ušetření místa a zmenšení celkové velikosti motoru. Permanentní magnety ze vzácných zemin jsou však dražší, proto byly vyvinuty konstrukce, které potřebují menší množství magnetického materiálu na vyvinutí určitého výkonu. Jsou to konstrukce s diskovým rotorem a inverzní konstrukce. [1]

4.1.2. Diskové motory

Rotor má diskový tvar a je z nevodivého magnetického materiálu, na obou stranách má nalisované vinutí kotvy a vinutí komutátoru. Rotor je umístěn mezi dvě části statoru, na kterých jsou permanentní magnety. Stator je z feromagnetického materiálu. Někdy se používá konstrukce kdy jsou permanentní magnety jen na jedné části statoru a druhá slouží jen pro uzavření magnetické cesty.

Tato konstrukce má velmi malý moment setrvačnosti, tím pádem i dobrou odezvu na řídicí impulzy. Používá se spíše pro malé motory. [1]

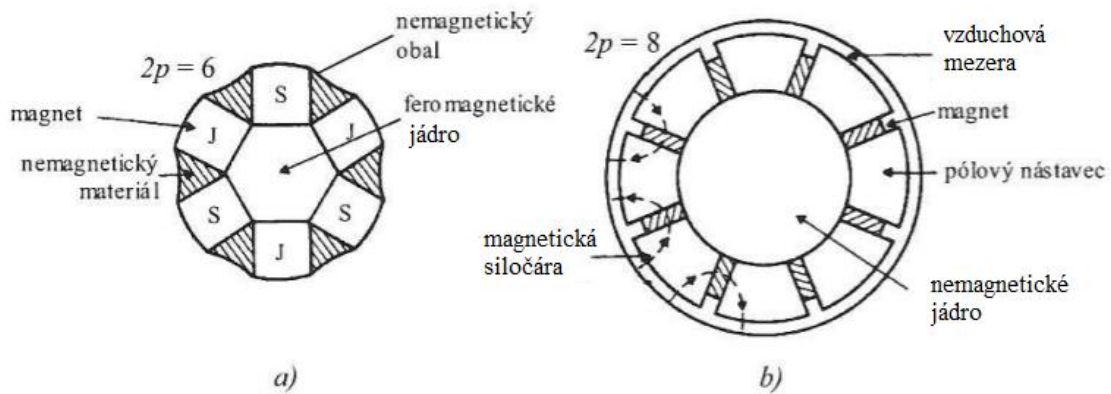


Obr. 4.3 Motor s diskovým rotorem a lisovaným vinutím, převzato z [1]

4.1.3. Inverzní konstrukce

Byla vyvinutá pro motory s SmCo PM. Tento motor má kotvu na statoru, kde je umístěno vinutí a komutátor. Budící póly jsou umístěné na rotoru. Kartáče se umísťují na hřídel

rotoru, to dost komplikuje konstrukci, protože kartáče musí být připojeny na stejnosměrný zdroj. Takže potřebujeme ještě přídatné sběrací kartáče, které se dotýkají sběracích kroužků na hřídeli. Tím jsme ale vytvořili čtyři kontakty v obvodu kotvy oproti dvou v klasickém provedení, nebo v diskovém provedení.



Obr. 4.4 Uspořádání rotoru s PM se statickou kotvou, převzato z [1]

Konfigurace rotoru a) je vhodná pro dlouhé a úzké rotory s malým počtem pólů. Celý rotor je ještě stáhnutý nemagnetickou bandáží, kvůli mechanické pevnosti a ochraně magnetů.

Konfigurace b) má radiálně uložené magnety. Magnetický tok vstupuje kolmo do vzduchové mezery, jak je zřejmé z obrázku. S tím že magnetické účinky dvou sousedních pólů se vždy sčítají, což vede k vyšší magnetické indukci ve vzduchové mezeře. Pólové nástavce a hřídel jsou z nemagnetického materiálu.

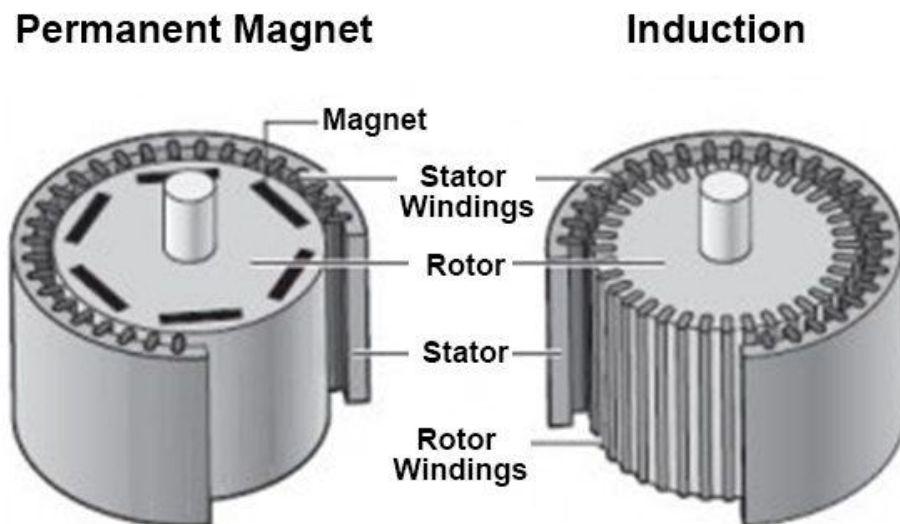
Pomocí této inverzní konstrukce můžeme dosáhnout toho, že nám odpadnou kartáče. Tím získáme bezkartáčové motory. Které ovšem už musí být napájeny z měniče, který střídavě přepíná tři satorové cívky (které jsou v klasickém provedení připojeny na lamely komutátoru) což předtím zajišťovaly kartáče.

Obecně inverzní konstrukce má tu výhodu, že díky tomu, že na rotoru nemá cívky, tak zde nevznikají žádné odporové ztráty a není problém z odvodem tepla z rotoru. A tím, že je kotva na statoru, tak lépe odvádí teplo vzniklé v jejím vinutí a v železe jednodušeji, než u klasické konstrukce. [1]

V další kapitole si na synchronních strojích ukážeme jednotlivé řešení rozložení permanentních magnetů na rotorech strojů.

4.2. Synchronní stroje s PM

Synchronní stroje mívají permanentní magnety uloženy z pravidla na rotoru. Kde nahrazují rotorové vinutí. Stator má trojfázové vinutí, které je prostorově a elektricky posunuto o 120° a napájeno trojfázovým napětím.



Obr. 4.5 Rozdíly mezi rotorem s PM a vinutým rotorem, převzato z [11]

Točivý moment je zde vytvářen přímou reakcí magnetického pole magnetů a magnetického pole statoru, generovaného v zubech statoru pomocí statorového vinutí. Zatímco u stroje s vinutým rotorem musíme konstantní magnetické pole vytvořit v rotoru pomocí stejnosměrného buzení. Vyrábějí se v rozsahu od stovek wattů až po desítky kW.

4.2.1. Základní dělení

Zaměříme-li se na pouze na užití PM na rotorech strojů. To jakým způsobem a kde umístíme permanentní magnety bude mít velký vliv na celkové chování stroje. Máme dva základní typy uložení.

- 1) Vnější rotor
- 2) Vnitřní rotor

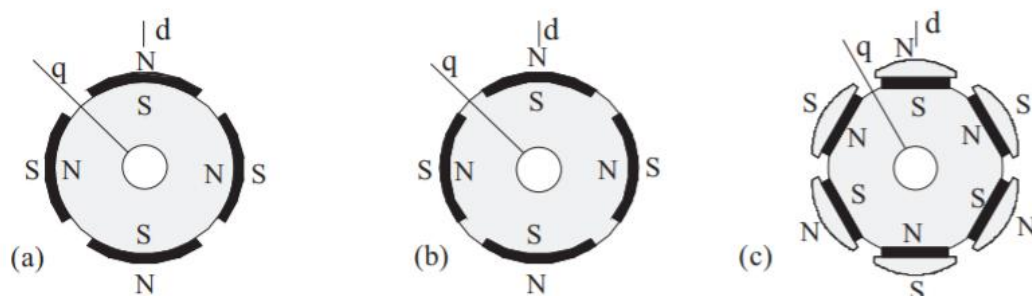
U obou typů rotorů pak rozlišujeme kde jsou uloženy permanentní magnety, z toho plyne následující rozdělení. S tím že u vnějších rotorů se používá z pravidla řešení SPM.

- SPM (surface permanent magnets) - PM jsou namontovány na povrchu rotoru
- IPM (interior permanent magnets) - PM jsou uloženy uvnitř rotoru

4.2.2. Povrchové uložení PM

Vnitřní rotor

Umisťování PM na povrch rotoru má své výhody i nevýhody. Hlavní nevýhoda oproti IPM, je, že na vytvoření požadovaného točivého momentu, jsou rozměry magnetů větší a tím se motor prodražuje. Nevýhody jsou také mechanické, jelikož se magnety musí na rotor uchycovat lepidly, kompozitními páskami, nebo ještě s pomocí bandáží. Lepidla musí být schopna udržet magnety při určité teplotě a při určité odstředivé síle. Chceme-li tento typ rotoru použít pro vysoko otáčkové aplikace, pak je velmi složitá výroba. Musíme totiž zajistit stabilitu a pevnost magnetů. Výhody jsou takové, že u tohoto řešení v rotoru dochází k minimálním ztrátám magnetického toku, jelikož magnetické pole vytvořeno permanentními magnety působí přímo ve vzduchové mezeře.



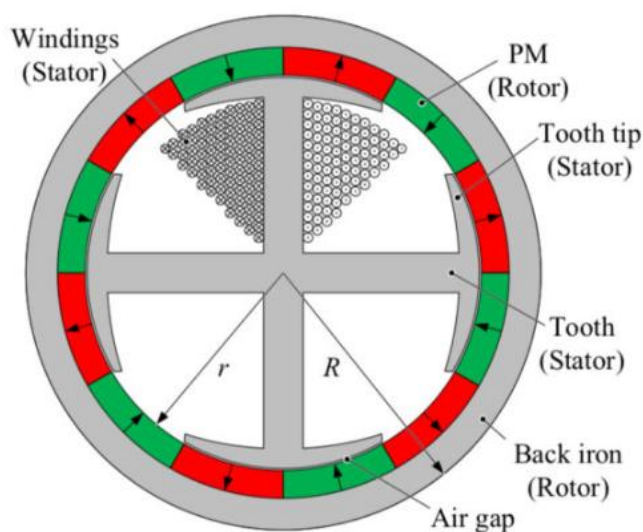
Obr. 4.6 Druhy uložení magnetů na rotoru, převzato z [4]

Na obrázku 4.2 jsou zobrazeny uspořádání, které odpovídají vnitřnímu uložení rotoru. Obr. 4.2 (a) znázorňuje PM uložené na povrchu rotoru. (b) PM zapuštěné do povrchu rotoru. (c) PM s pólovými nástavci.

Konstrukce PM na kterých jsou pólové nástavce se chová podobně jako když jsou magnety uloženy uvnitř rotoru. Vytváří se zde také určitý reluktanční moment.

SPM mají tu výhodu, že nedochází k tak velkým ztrátám magnetického toku, na rozdíl od magnetů uložených uvnitř rotoru (IPM). Řešení s magnety na povrchu rotoru a rotorem uloženým uvnitř statoru je nejčastější variantou motorů s PM. Na druhou stranu jsou povrchové magnety vystaveny mechanickému a magnetickému namáhání a také na ně působí ztráty vířivými proudy. Což může v některých případech způsobit až demagnetizaci zejména NdFeB magnetů. SPM dokážou vytvořit velký točivý moment (větší než IPM). [4]

Vnější rotor

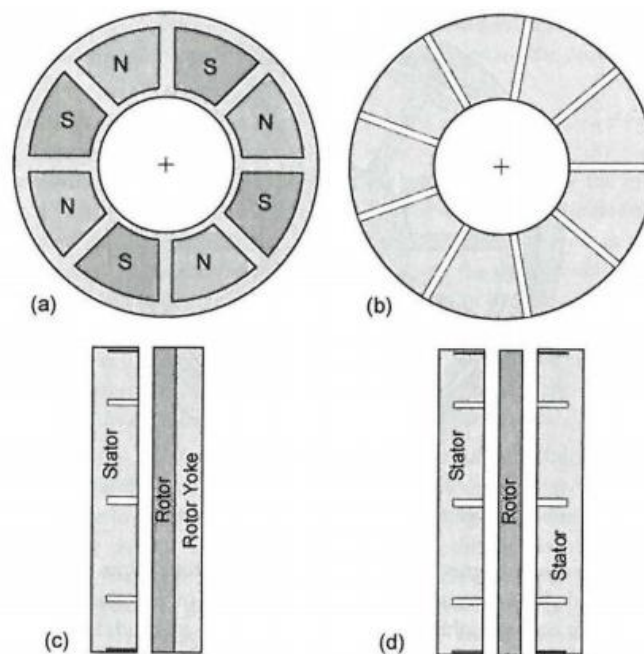


Obr. 4.7 Vnější rotor s PM, převzato z [12]

U strojů s vnějším rotorem je velice obtížné odvádění tepla. Jelikož je stator a vinutí uvnitř stroje, teplo vzniklé ve vinutí statoru, není chlazeno okolní konstrukcí jako u klasického provedení. A je velice obtížné zavádět do motoru kapalinové chlazení. Tyto motory dosahují většího točivého momentu při menších otáčkách, jelikož magnety jsou na rotoru, jehož průměr je větší než u vnitřního. Proto má motor také velkou setrvačnost. Má tedy větší povrch magnetů a tím vytvoří i větší magnetické pole. Aby nedocházelo ke kývání motoru, musí mít mechanické uložení dva stupně volnosti. Permanentní magnety se na rotor přidělávají ve formě jednoho lepeného kruhu.

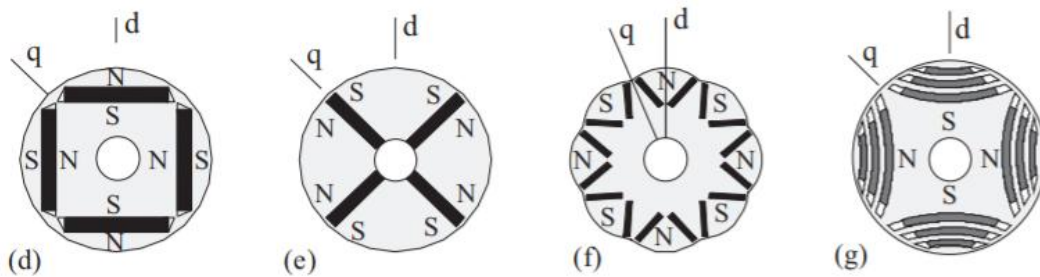
Další použití

Dále se SPM používají například u axiálních motorů, nebo i u lineárních motorů. Například u axiálních motorů se toto využívá velice často. Nazývají se takto, protože magnetický tok mezi rotorem a státorem jde v axiálním směru a vinutí je orientováno v radiálním směru. Na rozdíl od radiálních motorů, kde je tomu naopak. Axiální motor je znázorněn na obr. 4.4. Zde je vidět, že může mít dvě provedení, buďto má jeden stator a jeden rotor, nebo má dva statory a mezi nimi rotor. Tomuto uspořádání se proto někdy říká „palačinkový motor“. Častěji se využívá varianta s dvěma statory, jelikož je stabilnější. Tyto motory se používají hlavně v pohonech disketových jednotek. Jinak tyto stroje nenalézají širší využití v praxi. Je to i kvůli tomu, že je velice náročné navinout statorové vinutí. [15]



Obr. 4.8 Axiální motor: a) rotor, b) stator, c) uspořádání 1 rotor a 1 stator, d) uspořádání 1 rotor a 2 statory, převzato z [15]

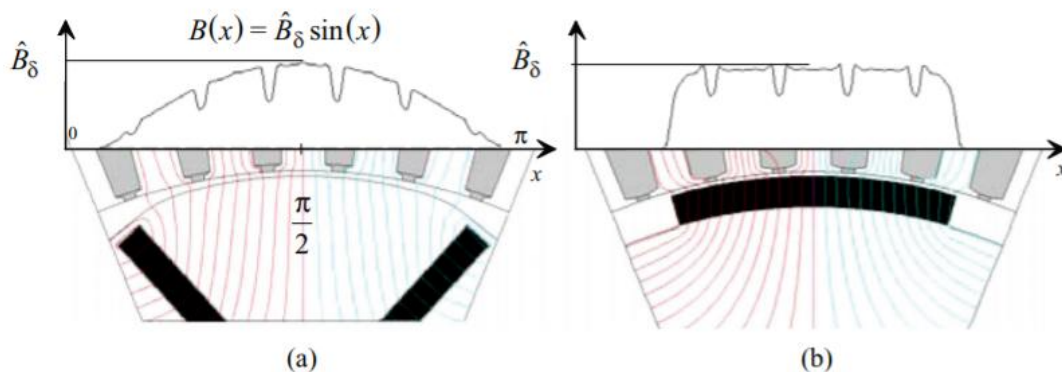
4.2.3. Vnitřní uložení PM



Obr. 4.9 Některé varianty vnitřně uložených PM na rotoru, převzato z [4]

Úplné vložení PM do železa rotoru znamená velké ztráty magnetického toku, vytvořeného magnety. Bývá to cca čtvrtina toku. Je-li hřídel stroje z feromagnetického materiálu, pak se část toku uzavírá i přes ní. To se může omezit použitím neferomagnetického materiálu hřídele. Na druhou stranu jsou magnety mechanicky i magneticky chráněny před okolím. Také nám tato konstrukce dovoluje použít na jeden pól dva magnety, čímž dosáhneme poměrně velké hustoty magnetického toku v chodu na prázdno. Tyto rotory se používají pro vysoko otáčkové aplikace, působení odstředivých sil zde nehraje tak velkou roli jako u SPM. Stroje s těmito rotory vykazují určitý reluktanční moment. Synchronní indukčnost je větší v ose q nežli v ose d . S tímto pak pracují zvláštní typy strojů, reluktanční stroje. [4] [15]

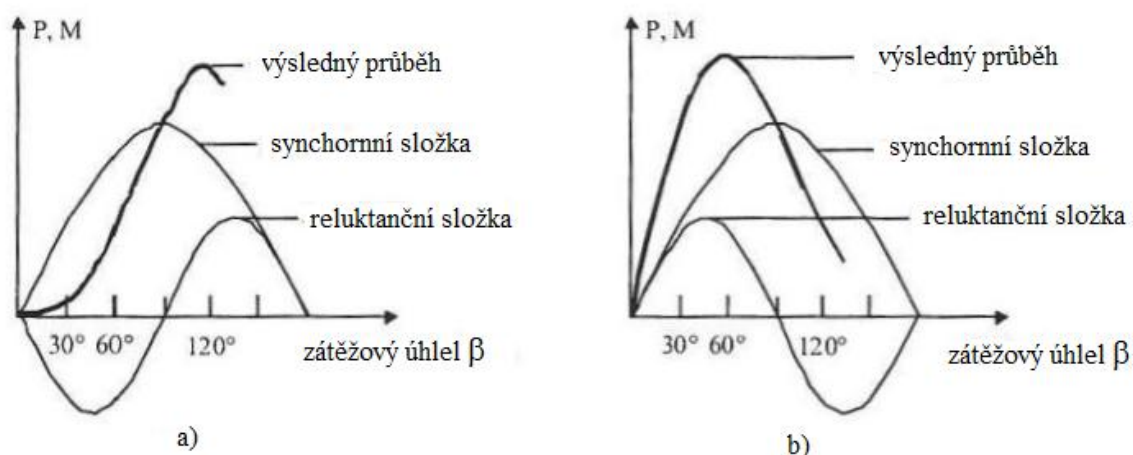
4.3. Porovnání uložení PM



Obr. 4.10 Porovnání průběhů magnetické indukce ve vzduchové mezeře, bez zatížení. (a) IRM s "V" uložením a proměnnou vzduchovou mezerou a (b) SRM s konstantní vzduchovou mezerou, převzato z [4]

Z obrázku můžeme vidět, že u SPM je hustota magnetického toku v oblasti která je přímo nad magnetem téměř konstantní a nulová jinde. Kdežto u IRM, kde je na jedno pól použito dvou magnetů, je hustota magnetického toku více podobná funkci sinus.

Obrázky nejsou úplně přesné a nejsou na nich vidět ztráty magnetického toku, které se u SRM objevují například na hranách magnetů (bývá to 5 až 20%). Takže se musí dbát na správnou šířku permanentního magnetu. Jak už bylo zmíněno u IRM jsou ztráty toku ještě větší. Největší točivý moment dodá stroj, který má vyniklé permanentní magnety na povrchu rotoru. Zde není síla magnetu ničím omezena. Na druhou stranu jsou magnety náchylnější na magnetické a mechanické namáhání a vznikají v nich ztráty vířivými proudy. Kdežto magnety umístěny uvnitř rotoru jsou před těmito vlivy chráněny. [4]



Obr. 4.11 Momentová char. synchronního stroje s PM:

- a) vnitřně uložené PM, $M = f(\beta)$, $X_d < X_q$, b) povrchově uložené PM, $M = f(\beta)$, $X_d > X_q$,
převzato z [1]

Povrchové uspořádání PM můžeme považovat za hladký rotor. Je to tím, že vzduchová mezera je celkem velká, takže vliv reakce kotvy na magnetický tok pólu je velice slabý. Jelikož PM mají permeabilitu téměř jedna ($\mu_{rM} = 1,02 - 1,10$), ideálně rovnou μ_0 , tak můžeme vzduchovou mezeru pokládat za homogenní prostor. Tím pádem se v ideálním případě reaktance příčné a podélné větve rovnají $X_d = X_q$. Ve skutečnosti tomu však tak není právě kvůli tomu, že permeabilita PM se přesně nerovná μ_0 . Takže $X_d/X_q = \mu_{rM}$, z toho je vidět, že $X_d > X_q$.

Vztah pro elektromagnetický moment motoru, je pak stejný jako pro klasický synchronní motor s budícím vinutí :

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

ω_s je synchronní rychlost, U_s svorkové napětí, U_{ib} indukované napětí z budiče a β zátěžový úhel.

Vnitřní uložení PM na rotoru se považuje za typ s vyjádřenými póly. Celkový moment vychází ze stejné rovnice jako předchozí, s tím, že $X_q > X_d$ a proto je druhá složka vztahu záporná. Druhá harmonická je tím pádem v protifázi s první. Takže výsledný průběh má své maximum v $\pi/2$. Zatímco u stroje s povrchovými PM je maximum v $\beta < \pi/2$. Reaktance v příčné větvi je větší než v podélné proto, že magnetický tok v ose d (příčné větvi) musí dvakrát přejít přes materiál PM, což je skoro stejné jako kdyby procházely vzduchovou mezerou. Oproti tomu v ose q prochází jen přes magneticky měkký a dobře magneticky vodivý železný materiál.

Povrchové permanentní magnety jsou častějším řešením. Hlavně také pro to, že na vytvoření stejného výkonu, je zde zapotřebí méně magnetického materiálu, než u vnitřních magnetů. [1] [4] [16]

5. Výpočet rozměrů PM

Jelikož se v této práci chceme zaměřit na tepelné ztráty a oteplení rotoru, nebudeme počítat s kompletně celým motorem. Vypočteme si rozměry permanentních magnetů použitých pro jednotlivá uložení, dle stejného postupu. Hodnoty k tomu potřebné vezmeme jednak z katalogových hodnot magnetů a rotorových plechů. Za druhé, hodnoty satorových veličin z již vypočteného motoru. Tím pádem máme všechny potřebné veličiny pro výpočet rozměrů permanentních magnetů. Jako materiál permanentních magnetů zvolím NdFeB. Jehož vlastnosti jsou v příloženém katalogovém listu.

Parametry synchronního motoru:

Jmenovitý výkon: $P_n = 60 \text{ kW}$

účinník: $\cos\varphi = 0,85$

Jmenovité napětí: $U_s = 400 \text{ V}$

účinnost: $\eta = 0,95$

Jmenovité otáčky: $n_n = 1000 \text{ ot/min}$

Počet fází: $m = 3$

Počet pólů: $2p = 12$

indukce ve vzduchové mezeře: $B_\delta = 1 \text{ T}$

Mechanické rozměry:

Vnitřní průmět statoru: $D_1 = 0,2 \text{ m}$

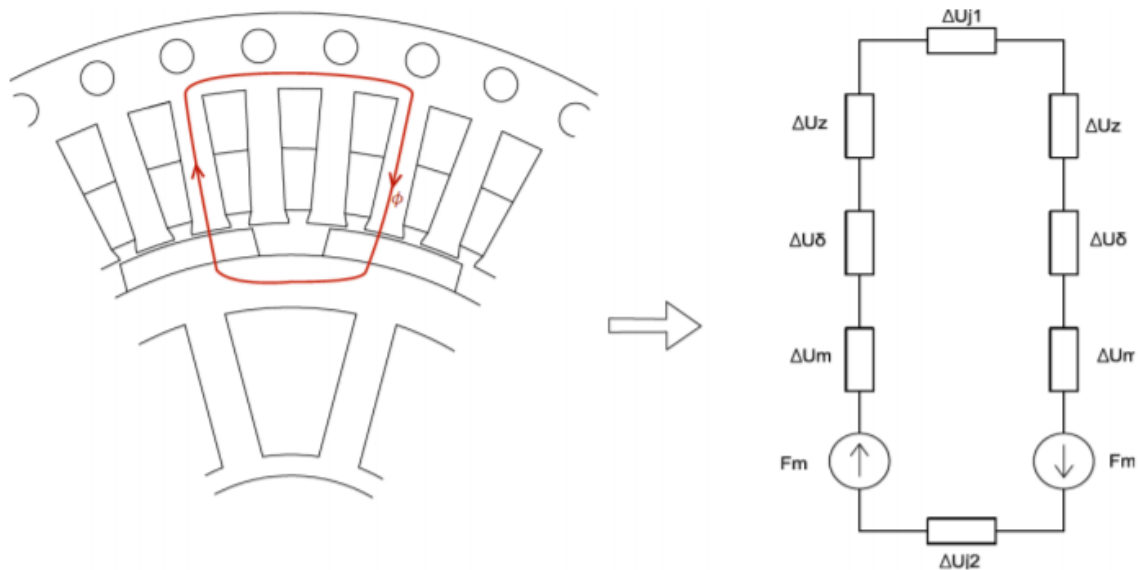
Průměr rotoru: $D_2 = 0,198 \text{ m}$

skutečná délka stroje: $l_e = 0,235 \text{ m}$

Vnější průměr stroje: $D_e = 0,3 \text{ m}$

5.1. Výpočet rozměrů pro povrchové uložení

Výpočet vychází z náhradního schéma magnetického obvodu synchronního stroje. Postup výpočtu je odvozen z [4]. Permanentní magnety jsou zde znázorněny jako zdroj magnetomotorického napětí F_m s úbytkem napětí ΔU_m . Tento výpočet bude platit pro všechny tři namodelované rotory s vnějším uložení magnetů.



Obr. 5.1 Náhradní schéma magnetického obvodu synchronního stroje s povrchovými PM, převzato z [5]

Před začátkem výpočtu musíme znát parametry permanentních magnetů a magnetického obvodu.

Permanentní magnety:

Koercivita magnetu: $H_c = 907 \text{ kA/m}$

Relativní permeabilita: $\mu_r = 1,05$

koeficient poklesu teploty: $\alpha = -0,12 \text{ \%/}^\circ\text{C}$

teplotní odolnost: 150°C

Magnetický obvod:

Indukce ve jhu satoru $B_{j1} = 1,4 \text{ T} \rightarrow H_{j1} = 404 \text{ A/m}$

Indukce v zubech satoru $B_z = 1,8 \text{ T} \rightarrow H_z = 10400 \text{ A/m}$

Indukce ve jhu rotoru $B_{j2} = 1,4 \text{ T} \rightarrow H_{j2} = 404 \text{ A/m}$

Tyto hodnoty byly určeny z katalogu...

Intenzita magnetického pole ve vzduchové mezeře:

$$H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 795774,7 \text{ A/m} \quad (5.1.1)$$

Délka střední siločáry jha satoru:

$$l_{j1} = \frac{\pi \cdot (D_e - h_{j1})}{2p} = \frac{\pi \cdot (0,3 - 0,012)}{12} = 0,0755 \text{ m} \quad (5.1.2)$$

Úbytek napětí ve satorovém jhu:

$$\Delta U_{j1} = H_{j1} \cdot l_{j1} = 404 \cdot 0,0755 = 30,5 \text{ A} \quad (5.1.3)$$

Úbytek napětí v zubu statoru:

$$\Delta U_{hz} = H_z \cdot h_z = 10400 \cdot 0,032 = 322,8 \text{ A} \quad (5.1.4)$$

Délka střední siločáry jha rotoru:

$$l_{j2} = \frac{\pi \cdot (\frac{D_e}{2})}{2p} = \frac{\pi \cdot (\frac{0,3}{2})}{12} = 0,0393 \text{ m} \quad (5.1.5)$$

Úbytek napětí ve rotorovém jhu:

$$\Delta U_{j2} = H_{j2} \cdot l_{j2} = 404 \cdot 0,0393 = 15,9 \text{ A} \quad (5.1.6)$$

Dále musíme si vyjádřit Carterův činitel k_c a spočítat konstantu Carterova činitele γ , abychom mohli vypočítat úbytek napětí ve vzduchové mezeře.

$$\gamma = \frac{(\frac{b_0}{\delta})^2}{5 + \frac{b_0}{\delta}} = \frac{(\frac{4,5}{0,8})^2}{5 + \frac{4,5}{0,8}} = 2,98 \quad (5.1.7)$$

$$k_c = \frac{t_{d1}}{t_{d1} - \gamma \cdot \delta} = \frac{13,9}{13,9 - 2,98 \cdot 0,98} = 1,29 \quad (5.1.8)$$

Hodnota vzduchové mezery vychází po přepočtení:

$$\delta' = k_c \cdot \delta = 1,29 \cdot 0,8 = 0,96 \text{ mm} \quad (5.1.9)$$

Poté spočítáme úbytek napětí ve vzduchové mezeře, s novou hodnotou vzduchové mezery:

$$\Delta U_{\delta} = H_{\delta} \cdot \delta' = 795774,5 \cdot 0,00096 = 767,6 \text{ A} \quad (5.1.10)$$

Jelikož jsou PM ve vzduchové mezeře, budeme jejich indukci uvažovat stejnou, tedy $B_m = 1 \text{ T}$.

Intenzita magnetického pole PM:

$$H_m = \frac{B_m}{\mu_r \cdot \mu_0} = \frac{1}{1,05 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} = 757880,7 \text{ A/m} \quad (5.1.11)$$

Nyní si spočítáme první předběžnou hodnotu výšky PM:

$$h_{m1} = \frac{2 \cdot \Delta U_{\delta} + 2 \cdot \Delta U_z + \Delta U_{j2} + \Delta U_{j1}}{2 \cdot (H_c - H_m)} = \frac{2 \cdot 767,6 + 2 \cdot 322,8 + 15,9 + 30,5}{2 \cdot (907000 - 757880,7)} = 7,53 \quad (5.1.12)$$

Nyní provedeme další iteraci. Tento postup budeme opakovat tolikrát, až neuvídíme kolem

jaké hodnoty se výška magnetu pohybuje.

$$\delta' = h_{m1} + \delta \quad (5.1.13)$$

$$\gamma' = \frac{\left(\frac{b_0}{\delta'}\right)^2}{5 + \frac{b_0}{\delta'}} \quad (5.1.14)$$

$$k_c' = \frac{t_{d1}}{t_{d1} - \gamma' \cdot \delta} \quad (5.1.14)$$

$$\delta'' = k_c' \cdot \delta \quad (5.1.15)$$

Přepočtenou hodnotu vzduchové mezery, po první iteraci následně dosadíme do vzorce pro výpočet úbytku napětí ve vzduchové mezeře a pokračujeme ve výpočtu.

Už po provedení tří iterací vyšla hodnota výšky PM cca 6,8 mm.

Ted' zbývá dopočítat už jen šířku PM, tu odvodíme ze vztahu:

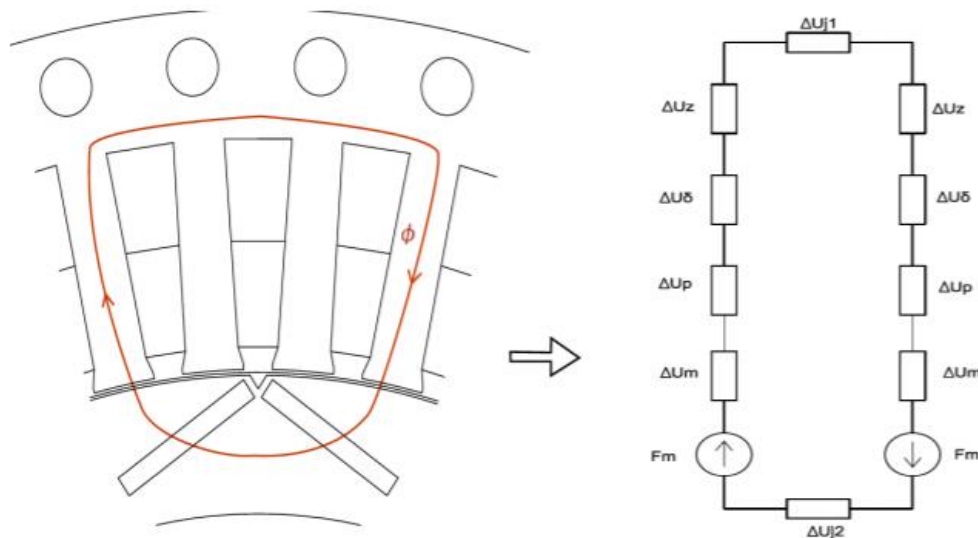
$$\varphi = B \cdot S \rightarrow b_m = \frac{\varphi}{B_\delta \cdot l_e} = \frac{0,007808}{1 \cdot 0,235} = 0,0332 \text{ m} \quad (5.1.16)$$

Permanentní magnet má tedy pro toto uložení následující rozměry:

$$h_m \times b_m \times l_m = 6,8 \times 33 \times 235 \text{ mm}$$

5.2. Výpočet rozměrů pro vnitřní V uložení

V tomto případě máme na jeden pól dva permanentní magnety, z toho vyplývá že magnety stačí dimenzovat na poloviční magnetický tok. Rozměry magnetů by nám měli vyjít přibližně poloviční oproti venkovnímu uložení. Proto snížíme i indukci magnetů na $B_m = 0,7 \text{ T}$.



Obr. 5.2. Náhradní schéma magnetického obvodu synchronního stroje pro uložení "V", převzato z [5]

Jelikož uvažujeme pro všechny konstrukční řešení stejný stator, budou hodnoty úbytků magnetických napětí statoru stejné jako v předchozím případě:

$$\Delta U_{\delta} = 767,6 \text{ A}$$

$$\Delta U_{j1} = 30,5 \text{ A}$$

$$\Delta U_z = 332,8 \text{ A}$$

Pro návrh jsem zvolil následující hodnoty úhlů mezi magnety. Detail magnetů je v příloze.

úhel γ je závislý na počtu pólů: $\gamma = 30^\circ$

$$\xi = 140^\circ$$

$$\varepsilon = 110^\circ$$

Spočítáme si délku segmentu jednoho magnetu $k_1 + b_m + k_2$.

$$k_1 + b_m + k_2 = \frac{D_e}{2 \sin \beta} \cdot \sin \frac{\gamma}{2} = \frac{0,099}{\sin 110^\circ} \cdot \sin 15^\circ = 0,0273 \text{ m} \quad (5.2.1)$$

Úhel β je zde úhel pomocného trojúhelníku $180^\circ = (\gamma/2) + (\varepsilon/2) \cdot \beta$

Šířka magnetu:

$$b_m = \frac{\varphi}{2 \cdot B_m \cdot l_e} = \frac{0,007808}{2 \cdot 0,7 \cdot 0,235} = 0,024 \text{ m} \quad (5.2.2)$$

Nyní můžeme zvolit zbylé rozměry:

$$k_1 = 0,0025 \text{ m}$$

$$k_2 = 0,0008 \text{ m}$$

Spočítáme délku střední siločáry pólového nástavce:

$$l_p = \operatorname{tg}33^\circ \cdot \left(\frac{b_m}{2}\right) = \operatorname{tg}33^\circ \cdot \left(\frac{0,024}{2}\right) = 0,0078 \text{ m} \quad (5.2.3)$$

Úbytek napětí v pólovém nastavci:

$$\Delta U_p = H_{j2} \cdot l_p = 404 \cdot 0,00693 = 2,8 \text{ A} \quad (5.2.3)$$

Délka střední siločáry jha rotoru:

$$l_{j2} = \frac{\pi \cdot (D_2 - h_{j2})}{24} = \frac{\pi \cdot (0,198 - 0,012)}{24} = 0,0243 \text{ m} \quad (5.2.4)$$

Nyní můžeme spočítat úbytek napětí v rotorovém jhu:

$$\Delta U_{j2} = H_{j2} \cdot l_{j2} = 404 \cdot 0,0243 = 9,8 \text{ A} \quad (5.2.5)$$

Tím, že jsem snížili magnetickou indukci v magnetu, musím spočítat novou hodnotu intenzity magnetického pole v PM:

$$H_m = \frac{B_m}{\mu_r \cdot \mu_0} = \frac{0,7}{1,05 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} = 530516,5 \text{ A/m} \quad (5.2.6)$$

Nyní máme všechny hodnoty pro vypočtení výšky PM:

$$h_{m1} = \frac{2 \cdot \Delta U_\delta + 2 \cdot \Delta U_z + 2 \cdot \Delta U_p + \Delta U_{j2} + \Delta U_{j1}}{2 \cdot (H_c - H_m)} = \frac{2 \cdot 767,6 + 2 \cdot 332,8 + 2 \cdot 2,8 + 9,8 + 30,5}{2 \cdot (907000 - 530516,5)} = 0,003 \text{ m} \quad (5.2.7)$$

Opět znovu po třech iteracích, kdy přepočítáváme hodnotu vzduchové mezery nám výška magnetu vyjde 2,8 mm.

Konečné rozměry PM tedy jsou:

$$h_m \times b_m \times l_m = 2,8 \times 24 \times 235 \text{ mm}$$

Výpočet odstředivé síly působící na jeden pól rotoru:

Tento výpočet provádím z důvodu namáhání krčků a ověřuji, jestli není překročeno povolené namáhání konstrukční oceli. Kdyby bylo, mohlo by dojít k deformaci rotoru v oblasti krčků. Nejprve si spočítáme hmotnost této kruhové výseče (pólu) a hmotnost magnetů odpovídající jednomu pólu.

Obsah jedné kruhové výseče:

$$S = S_{Fe} - S_{PM} = \frac{(r_r^2 - r_t^2) \cdot \pi}{12} - b_m \cdot h_m \cdot 2 = \frac{(0,099^2 - 0,077^2) \cdot \pi}{12} - 0,024 \cdot 0,0028 \cdot 2 = 8,79 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Hmotnost železa jedné kruhové výseče:

$$m_{Fe} = S \cdot l_e \cdot P_{Fe} = 8,79 \cdot 10^{-4} \cdot 0,235 \cdot 7650 = 1,58 \text{ kg}$$

Hmotnost magnetů:

$$m_{PM} = S_{PM} \cdot l_e \cdot P_{PM} = 0,024 \cdot 0,0028 \cdot 2 \cdot 0,235 \cdot 7500 = 0,237 \text{ kg}$$

Odstředivá síla:

$$F = (m_{PM} + m_{Fe}) \cdot \omega^2 \cdot r_p = (0,237 + 1,58) \cdot 104,7^2 \cdot 0,095 = 1892,2 \text{ N/m}$$

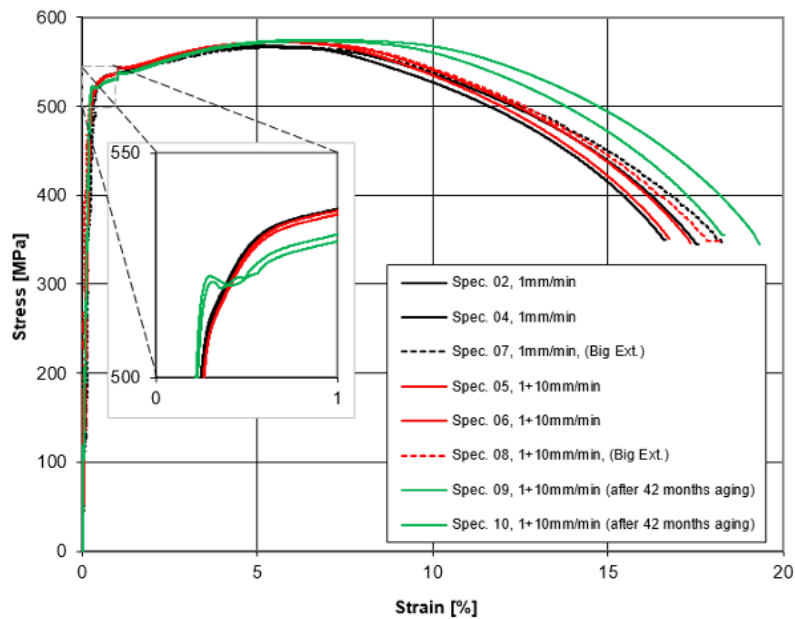
Plocha krčků:

$$S_k = 2 \cdot k_f \cdot l_e = 2 \cdot 0,0025 \cdot 0,235 = 1,175 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Napětí v tlaku na krčky jedné pólové výseče:

$$\sigma_d = \frac{F}{S_k} = \frac{2329,6}{1,175 \cdot 10^{-3}} = 1,61 \text{ MPa}$$

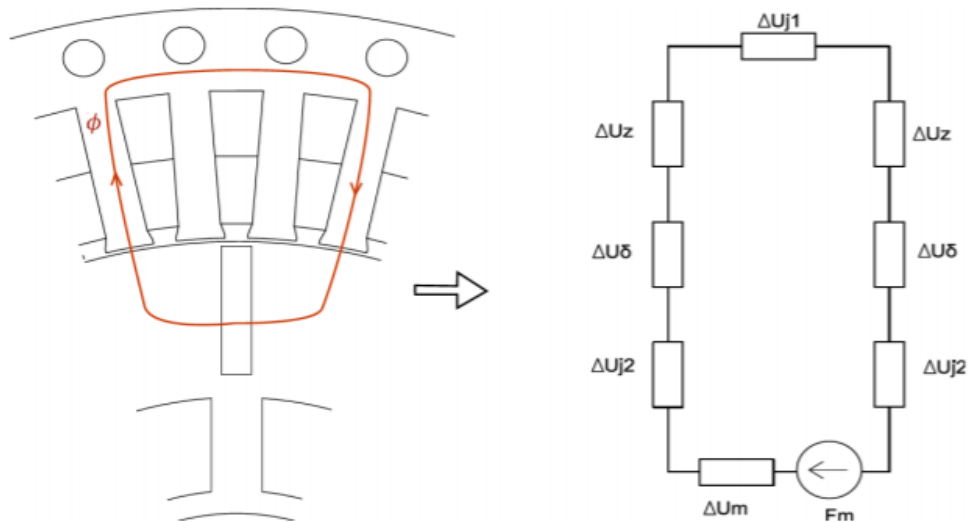
Dle tahového diagramu (obr. 5.3.) je vidět, že tato hodnota je velice malá, takže deformace rotoru nehrozí.



Obr. 5.3. Tahový diagram oceli, převzato z [19]

5.3. Výpočet rozměrů pro radiální uložení

V tomto uložení magnetický tok prochází jen jedním permanentním magnetem, na rozdíl od dvou předchozích uložení. Hodnotu magnetické indukce PM pro toto uložení volím 0,6 T. Hodnoty úbytků magnetických napětí statoru a úbytek napětí ve vzduchové mezeře je opět stejný, jako v předchozím případě.



Obr. 5.4. Náhradní schéma magnetického obvodu synchronního stroje pro radiální uložení, převzato z [5]

Šířka magnetu:

$$b_m = \frac{\varphi}{2 \cdot B_m \cdot l_e} = \frac{0,007808}{2 \cdot 0,6 \cdot 0,235} = 0,028 \text{ m} \quad (5.3.1)$$

Zvolím odsazení magnetu od vnějšího povrchu rotoru: $k = 1 \text{ mm}$

Délka střední siločáry jhu rotoru:

$$l_{j2} = \frac{\pi \cdot (b_m + k)}{12} = \frac{\pi \cdot (0,028 + 0,001)}{12} = 0,0076 \text{ m} \quad (5.3.2)$$

Úbytek napětí ve jhu rotoru

$$\Delta U_{j2} = H_{j2} \cdot l_{j2} = 404 \cdot 0,0076 = 3,07 \text{ A} \quad (5.3.3)$$

Intenzita magnetického pole magnetu:

$$H_m = \frac{B_m}{\mu_r \cdot \mu_0} = \frac{0,6}{1,05 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} = 454728,4 \text{ A/m} \quad (5.3.4)$$

Výška magnetu:

$$h_{m1} = \frac{2 \cdot \Delta U_{\delta} + 2 \cdot \Delta U_z + \Delta U_{j2} + \Delta U_{j1}}{(H_c - H_m)} = \frac{2 \cdot 767,6 + 2 \cdot 332,8 + 3,07 + 30,5}{(907000 - 454728,4)} = 0,005 \text{ m} \quad (5.3.5)$$

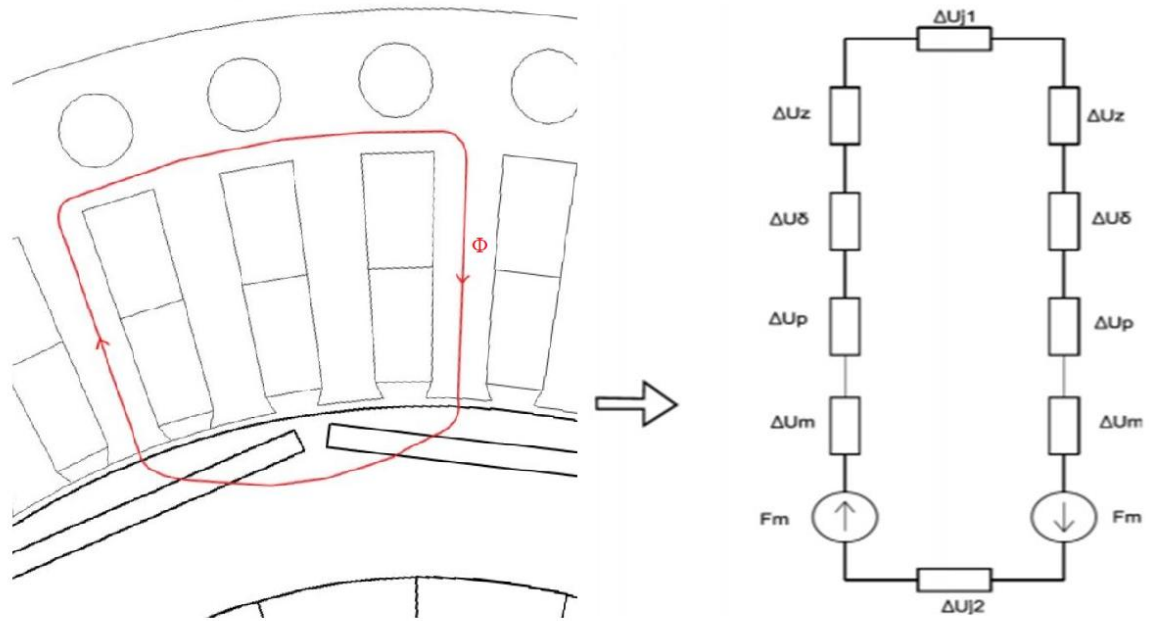
Po provedení iterací vyjde výsledná výška magnetu 4,5 mm.

Konečné rozměry PM jsou:

$$h_m \times b_m \times l_m = 4,5 \times 28 \times 235 \text{ mm}$$

5.4. Výpočet rozměrů pro tangenciální uložení

Pro toto uložení platí stejné náhradní magnetické schéma jako pro uložení V. Ale uložení magnetů je jiné. Za prvé si musíme dopředu určit rozměry h , k a h_m .



Obr. 5.5 Náhradní schéma magnetického obvodu synchronního stroje pro tangenciální uložení

$$h = 1,5 \text{ mm}$$

$$k = 1,5 \text{ mm}$$

$$h_m = 2,5 \text{ mm}$$

Délka tětiny pro polovinu pólové rozteče:

$$\frac{t}{2} = \frac{D_2}{2} \cdot \sin \frac{\gamma}{2} = \frac{0,198}{2} \cdot \sin 15^\circ = 0,0256 \text{ m} \quad (5.4.1)$$

Platí že:

$$t = 2 \cdot t_0 + b_m \quad (5.4.2)$$

t_0 je odvěsna pomocného trojúhelníku a spočítám jí následovně:

$$t_0 = \left[h + h_m + \frac{k}{\sin \frac{\gamma}{2}} \right] \cdot \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} = \left[0,0015 + 0,0025 + \frac{0,0015}{\sin 15^\circ} \right] \cdot \operatorname{tg} 15^\circ = 0,00262 \text{ m} \quad (5.4.3)$$

Šířku PM vyjádřím z rovnice 5.4.2

$$b_m = 2 \cdot \frac{t}{2} - 2 \cdot t_0 = 2 \cdot 0,0256 - 2 \cdot 0,00262 = 0,046 \text{ m} \quad (5.4.4)$$

Indukce v PM:

$$B_m = \frac{\varphi}{b_m \cdot l_e} = \frac{0,007808}{0,046 \cdot 0,235} = 0,74 \text{ T} \quad (5.4.5)$$

Intenzita magnetického pole PM:

$$H_m = \frac{B_m}{\mu_r \cdot \mu_0} = \frac{0,74}{1,05 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} = 564297,9 \text{ A/m} \quad (5.4.6)$$

Dále určíme délku střední siločáry pólového nástavce:

$$l_p = 0,005 \text{ m}$$

Úbytek napětí v pólovém nástavci:

$$\Delta U_p = H_{j2} \cdot l_p = 404 \cdot 0,005 = 2,02 \text{ A} \quad (5.4.7)$$

Poté délku střední siločáry jha rotoru:

$$l_{j2} = \frac{\pi \cdot 2 \cdot \left(\frac{b_m}{2} + t_0\right)}{2,4} = \frac{\pi \cdot 2 \cdot (0,023 + 0,00262)}{2,4} = 0,067 \text{ m} \quad (5.4.8)$$

Úbytek napětí v rotorovém jhu:

$$\Delta U_{j2} = H_{j2} \cdot l_p = 404 \cdot 0,067 = 27,2 \text{ A} \quad (5.4.9)$$

Výška magnetu:

$$h_{m1} = \frac{2 \cdot \Delta U_\delta + 2 \cdot \Delta U_z + 2 \cdot \Delta U_p + \Delta U_{j2} + \Delta U_{j1}}{2 \cdot (H_c - H_m)} = \frac{2 \cdot 767,6 + 2 \cdot 332,8 + 2 \cdot 2,02 + 27,2 + 30,5}{2 \cdot (907000 - 564297,9)} = 0,0033 \text{ m}$$

Po provedení tří iterací vyjde výška PM 3 mm. (5.4.10)

Konečné rozměry PM jsou:

$$h_m \times b_m \times l_m = 3 \times 46 \times 235 \text{ mm}$$

Výpočet odstředivé síly působící na jeden pól rotoru:

Ověření, že není překročeno mezní namáhání oceli.

Obsah jedné kruhové výseče:

$$S = S_{Fe} - S_{PM} = \frac{(r_r^2 - r_i^2) \cdot \pi}{12} - b_m \cdot h_m = \frac{(0,099^2 - 0,077^2) \cdot \pi}{12} - 0,046 \cdot 0,003 = 8,76 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Hmotnost železa jedné kruhové výseče:

$$m_{Fe} = S \cdot l_e \cdot P_{Fe} = 8,76 \cdot 10^{-4} \cdot 0,235 \cdot 7650 = 1,57 \text{ kg}$$

Hmotnost magnetů:

$$m_{PM} = S_{PM} \cdot l_e \cdot P_{PM} = 0,046 \cdot 0,003 \cdot 0,235 \cdot 7500 = 0,243 \text{ kg}$$

Odstředivá síla:

$$F = (m_{PM} + m_{Fe}) \cdot \omega^2 \cdot r_p = (0,243 + 1,57) \cdot 104,7^2 \cdot 0,096 = 1898,5 \text{ N/m}$$

Plocha krčků:

$$S_k = 2 \cdot k_r \cdot l_c = 2 \cdot 0,0025 \cdot 0,235 = 1,175 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Napětí v tlaku na krčky jedné pólové výseče:

$$\sigma_d = \frac{F}{S_k} = \frac{1898,5}{1,175 \cdot 10^{-3}} = 1,62 \text{ MPa}$$

Dle tahového diagramu (obr. 5.3.) je opět vidět, že deformace rotoru nehrozí.

6. Ztráty v rotoru a teplo v něm vzniklé

V této kapitole se budeme věnovat ztrátám v permanentních magnetech a ztrátám v železe rotoru, přičemž se nebudeme věnovat ztrátám statorovým ani mechanickým. Následně provedeme teplotní simulaci v programu ANSYS, pro všechny zvolené konstrukční provedení rotorů s PM.

6.1. Tepelo a jeho přenos

Účelem provádění tepelných výpočtů, či tepelných simulací je zjistit hodnotu oteplení jednotlivých částí stroje. Nejkritičtější jsou při tom ty části, které jsou v přímém kontaktu s izolací. Izolace bývá nejzranitelnějším místem stroje, při jejím poškození může dojít až ke zničení stroje, proto musí být dostatečně dimenzovaná, tak aby nedošlo k překročení její tepelné odolnosti.

Teplota

Stav určitého místa, nebo součásti, který lze zjistit pomocí teplotního čidla. Například teploměr, termistor, nebo termočlánek.

Oteplení

$$\Delta\vartheta = \vartheta + \vartheta_v$$

ϑ je teplota uvažované části elektrického stroje

ϑ_v je teplota okolního prostředí

Je to rozdíl teplot, vyjádřený teplotou nad teplotou okolí, kterou předepisuje ČSN na hodnotu 40 °C. Teplota vinutí se zjišťuje pomocí přírůstků elektrického odporu. Při určování oteplení nějaké části stroje, se teplota okolí udává $\vartheta_0 = 0$, z toho získaná hodnota oteplení $\Delta\vartheta$ se porovná s teplotní odolností izolace.

Teplo se šíří třemi způsoby: vedením, přestupem a sáláním tepla.

Vedení tepla

Probíhá uvnitř látky a je charakterizováno měrnou tepelnou vodivostí λ [W/°C . m]. Tato vlastnost je uvedena ve fyzikálních tabulkách, při jejím určování je nutno rozlišovat jde li o látky homogenní či nikoliv. U nehomogenních látek, jako je ovíjená izolace, či plechové svazky, je tepelná vodivost ovlivněna technologií výrobního a pracovního postupu.

Přestup tepla

Šíření tepla z povrchu ochlazovaného tělesa do okolního, nejčastěji proudícího prostředí. Je charakterizován součinitelem přestupu tepla α [W/m² . °C]. Je závislý na fyzikálních

vlastnostech chladicího prostředí, na jeho rychlosti a charakteru proudění, na tlaku a kvalitě povrchu ochlazovaného tělesa.

U volného ofukovaného povrchu přibližně platí:

$$\text{pro } v < 5\text{m/s} \quad \alpha = 6 + 4,2 \cdot v$$

$$\text{pro } v > 5\text{m/s} \quad \alpha = 7,5 \cdot v^{0,78}$$

Sálání

Vyzařování tepla z povrchu ochlazovaného tělesa do okolí. Uplatňuje se tu odraz tepla ze sousedních povrchů, sálání se uplatňuje především při vyšších teplotách. To znamená, že se s ním moc často u točivých elektrických strojů nepočítá. [18]

6.2. Ztráty v permanentních magnetech

Tyto ztráty jsou způsobeny vlivem pulzující magnetické indukce ve vzduchové mezeře. V magnetech se totiž vytváří (indukují) vířivé proudy, které vyvolá právě pulzace indukce. Obecně platí, že tyto vířivé proudy se objevují hlavně u vnějšího uložení PM. Vlivem těchto ztrát se magnet zahřívá a my musíme dbát na to aby se neohřál na větší teplotu než je jeho pracovní, jelikož pak magnet ztrácí své vlastnosti. Neodymové magnety jsou na teplotu obzvláště citlivé.

Vztah pro ztráty pro vnější uložení PM:

$$\Delta P_{PM} \approx \frac{V_{PM} \cdot b_{PM}^2 \cdot B_m^2 \cdot \omega^2}{12 \cdot \rho_{PM}} = \frac{5,27 \cdot 10^{-5} \cdot 0,033^2 \cdot 1^2 \cdot 104,72^2}{12 \cdot 180 \cdot 10^{-8}} = 29,16 \text{ W} \quad (6.1)$$

Ztráty v PM dle uložení:

Uložení PM	Povrchové	Vnitřní V	Radiální	Tangenciální
V_{PM} [m ³]	$5,270 \cdot 10^{-5}$	$3,158 \cdot 10^{-5}$	$2,961 \cdot 10^{-5}$	$3,243 \cdot 10^{-5}$
ΔP_{PM} [W]	29,16	4,52	4,24	19,07

Tab. 6.1. Ztráty v PM

Ztráty uvedené v tabulce odpovídají vždy ztrátám v magnetech na jeden pól. Pro výpočet ztrát magnetů jsem použil vzorec (6.1.), kde se mění vždy rozměry magnetů a magnetická indukce. Největší ztráty vyšli u povrchově uložených magnetů, což jsem očekával. Zde se totiž uplatní ztráty vířivými proudy. Tyto hodnoty jsou vždy ztráty na jeden pól stroje. Oproti ztrátám v železe pro rotorové jho jsou tyto ztráty o řád nižší.

6.3. Ztráty ve jhu rotoru

Spočítáme je z rozměrů rotoru a z katalogových hodnot pro příslušné plechy. V katalogu jsou pro zjednodušení výpočtu uvedeny hodnoty ztrátových čísel Δp , které udávají měrné ztráty na 1 kg plechů při určité magnetické indukci a napájecí frekvenci. Hustota plechů je $7,65 \text{ g/cm}^3$.

Výpočet pro povrchové uložení PM

Určíme si obsah mezikruží:

$$S_r = (r_{rout}^2 - r_{rin}^2) \cdot \pi = (0,0914^2 - 0,077^2) \cdot \pi = 7,62 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (6.2)$$

Objem rotorového jha:

$$V_r = S_r \cdot l_e = 7,62 \cdot 10^{-3} \cdot 0,235 = 1,79 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (6.3)$$

Hmotnost rotorového jha:

$$m_{Fej2} = V_r \cdot \rho_{Fe} = 1,79 \cdot 10^{-3} \cdot 7650 = 13,7 \text{ kg} \quad (6.4)$$

Ztráty v železe pro rotorové jho:

$$\Delta P_{Fej2} = k_{Fej} \cdot m_{Fej2} \cdot \Delta p \cdot \left(\frac{B_{j2}}{1}\right)^2 = 1,5 \cdot 13,7 \cdot 3,43 \cdot \left(\frac{1,4}{1}\right)^2 = 138,2 \text{ W}$$

k_{fej} je korekční činitel pro jho synchronního stroje podle [4]. (6.5)

Ztráty v rotorovém jhu dle uložení:

Uložení PM	Povrchové	Povrch. s pól. nastavci	Povrch. zapuštěné	Vnitřní V	Radiální	Tangenciální
m_{Fej2} [kg]	13,7	18,5	17,0	18,97	27,3	18,9
ΔP_{Fej2} [W]	138,2	187,1	171,7	191,3	275,1	190,5

Tab. 6.2. Ztráty ve jhu rotoru pro jednotlivá uložení

Tyto ztráty jsem počítal podle vzorce (6.5.), pro každé uspořádání je přepočtena hmotnost rotorového jha a následně jeho ztráty. Z tabulky je patrné, že největších ztrát dosahuje radiální uložení.

6.4. Simulace rozložení tepla v rotoru

K vytvoření této simulace jsem v programu SolidWorks vytvořil 3D modely rotorů, každý z jiným uložení PM. Následně jsem tyto modely naimportoval do programu ANSYS. Tento program využívá k řešení a analyzování složitých geometrií metodu konečných prvků (MKP). Kde síť těchto prvků (mesh) je vygenerována programem, my můžeme například určit velikost jednotlivých prvků a tím i jejich konečný počet. Dále byly

nadefinovány okrajové podmínky a přiřazeny odpovídající materiály k jednotlivým částem rotoru.

Ještě je třeba dopočítat součinitel přestupu tepla do vzduchové mezery α :

Nejprve spočteme obvodovou rychlost rotoru:

$$v = n \cdot \frac{\pi \cdot D_2}{60} = 1000 \cdot \frac{\pi \cdot 0,198}{60} = 10,367 \text{ m/s}$$

Poté zvolím α_0 dle [6]:

$$\alpha_0 = 33 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Součinitel přestupu tepla

$$\alpha = \alpha_0 \cdot (1 + 0,1 \cdot v) = 33 \cdot (1 + 0,1 \cdot 10,367) = 67,21 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

6.4.1. Povrchové uložení PM

Nyní známe všechny potřebné hodnoty pro zadání simulace. Teplotu okolního vzduchu uvažujeme 40 °C. Součinitel přestupu tepla do okolí $\alpha = 67,21 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ je uvažován pro účely porovnání jednotlivých řešení, ve všech případech stejný. Stejně tak použité materiály. Jako NdFeB magnety, u nich nás zajímá jejich tepelná konduktivita $\gamma_t = 7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$. Dále nastavíme tepelnou konduktivitu hřídele na $\gamma_t = 60 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$, u které neuvažujeme žádné chlazení. Protože rotorové plechy jsou mezi sebou izolovány, takže nemají ve všech směrech stejné vlastnosti, musíme pro ně hodnoty nastavit následovně:

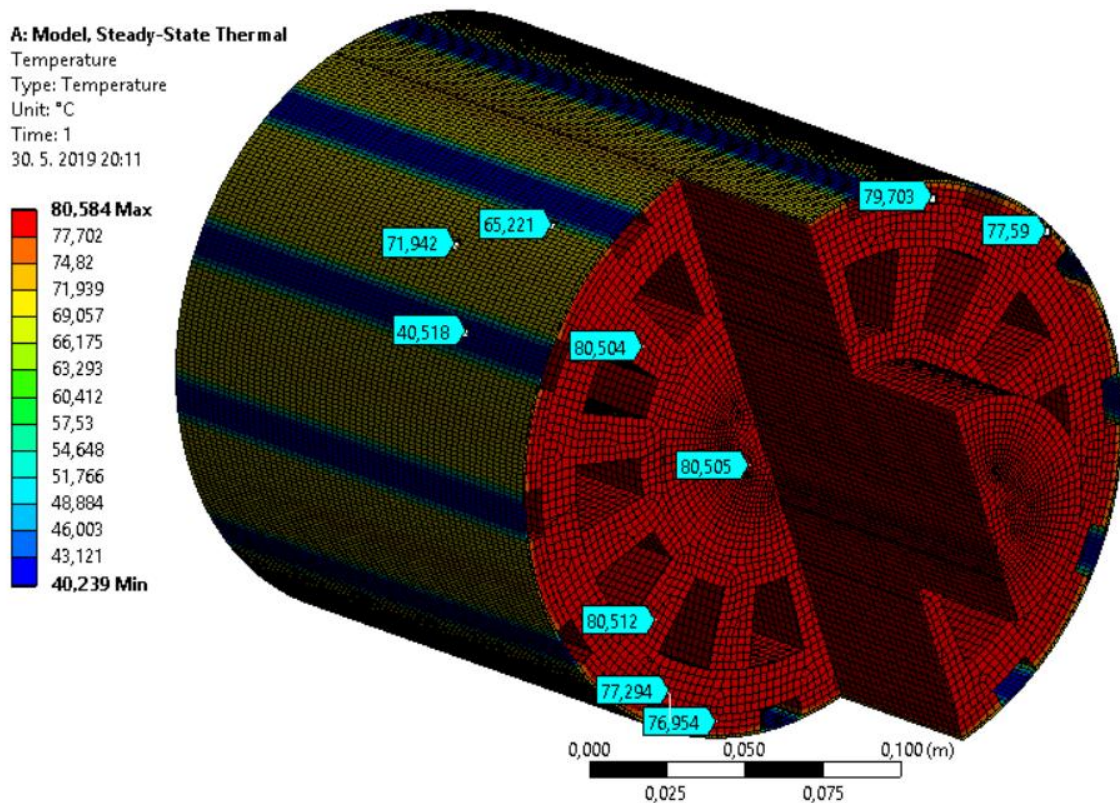
$$\text{Směr osy X : } \gamma_t = 45 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}.$$

$$\text{Směr osy Y : } \gamma_t = 45 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}.$$

$$\text{Směr osy Z : } \gamma_t = 1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}.$$

Bandáž je ze skelných vláken o tepelné konduktivitě $\gamma_t = 0,398 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$.

Celkové objemové ztráty v magnetech vyšli $\Delta P_{\text{PM}} = 5,5015 \cdot 10^5 \text{ W/m}^3$. A celkové ztráty v rotorovém jhu byly $\Delta P_{\text{Fej2}} = 77194 \text{ W/m}^3$.

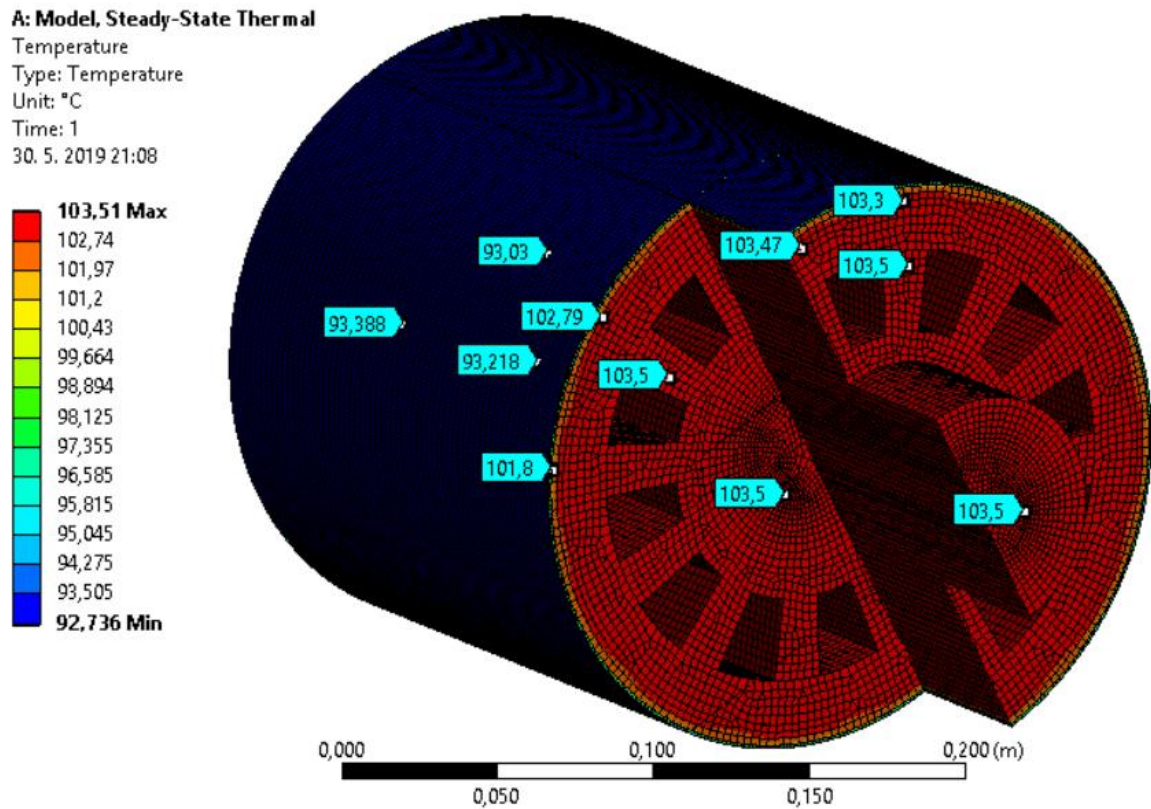


Obr. 6.1. Rozložení teploty pro povrchové uložení PM

Ze simulace je vidět, že rotor se vlivem ztrát v rotorovém jhu a magnetech prohřál téměř celý na 80,58 °C. Bandáž obepínající rotor je v místech, kde se dotýká magnetů zahřátá na teplotu cca. 72 °C a na místech kde se magnetů nedotýká, je výrazně chladnější (cca. 41 °C).

6.4.2. Povrchové zapuštěné uložení PM

Materiály a jejich vlastnosti jsou stejné jako v předchozím případě, včetně okrajových podmínek. Rozměry magnetů také zůstávají stejné, tím pádem i jejich ztráty. Ovšem jho rotoru je jinak velké, takže ztráty v něm budou odlišné: $\Delta P_{Fej2} = 81525 \text{ W/m}^3$.

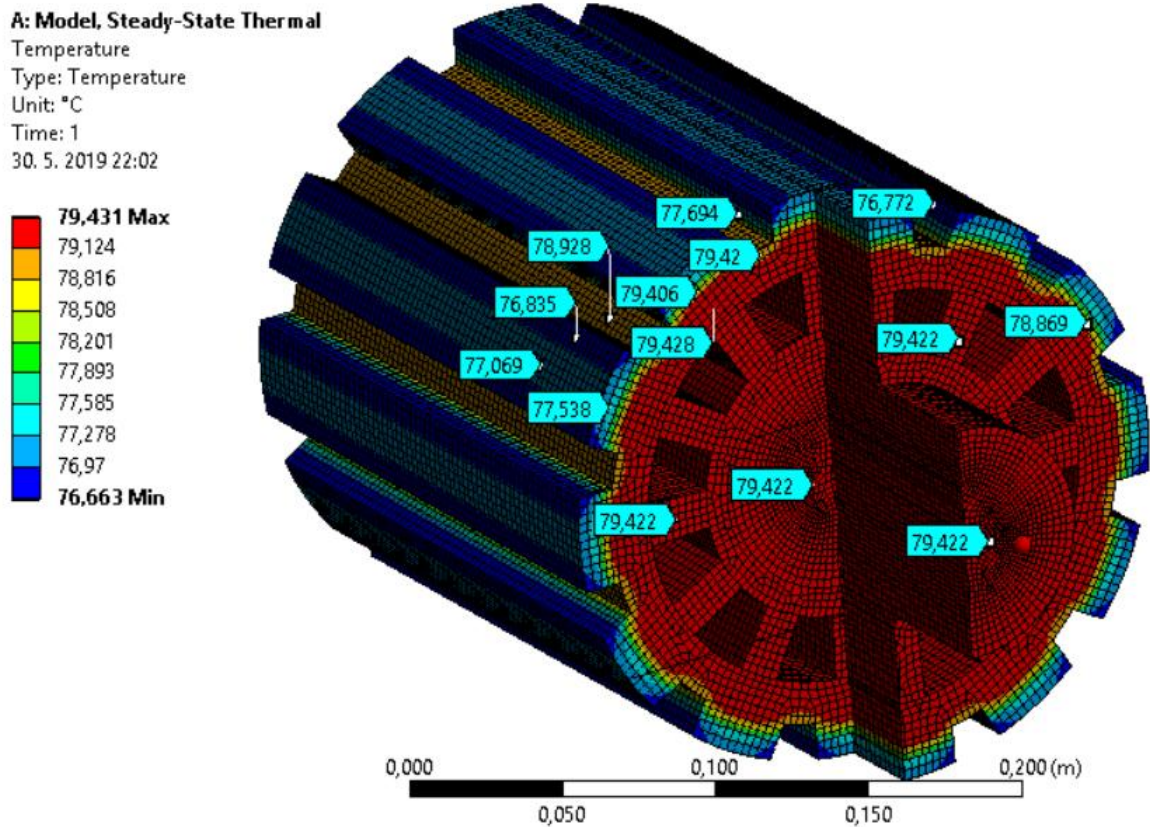


Obr. 6.2. Rozložení teploty pro povrchové zapuštěné uložení PM

Z této simulace je vidět, že oproti předchozímu případu se teplota výrazně zvýšila a to tak, že minimální teplota (92,7 °C) je vyšší než maximální u předchozího. Teplota v magnetech, jhu a hřídeli je u těchto dvou uložení téměř stejná, to je nejspíš způsobeno tím, že je rotor ovinut bandáží, která má malou tepelnou konduktivitu (vodivost).

6.4.3. Povrchové uložení PM s pólovými nástavci

Toto konstrukční provedení je již bez bandáže, takže se dá předpokládat odlišné rozložení tepla. Rozměry magnetů jsou opět stejné. Ztráty v rotorovém jhu jsou:
 $\Delta P_{\text{Fej2}} = 84931 \text{ W/m}^3$.



Obr. 6.3. Rozložení teploty pro povrchové uložení PM s pólovými nástavci

V případě povrchového uložení s pólovými nástavci je z obrázku 6.3. vidět, že ze všech povrchových řešení vychází s nejmenší teplotou. Magnety jsou lépe chlazeny, když na nich není bandáž. Teplo z magnetů je odváděno do pólových nástavců, které mají lepší tepelnou vodivost než vzduch.

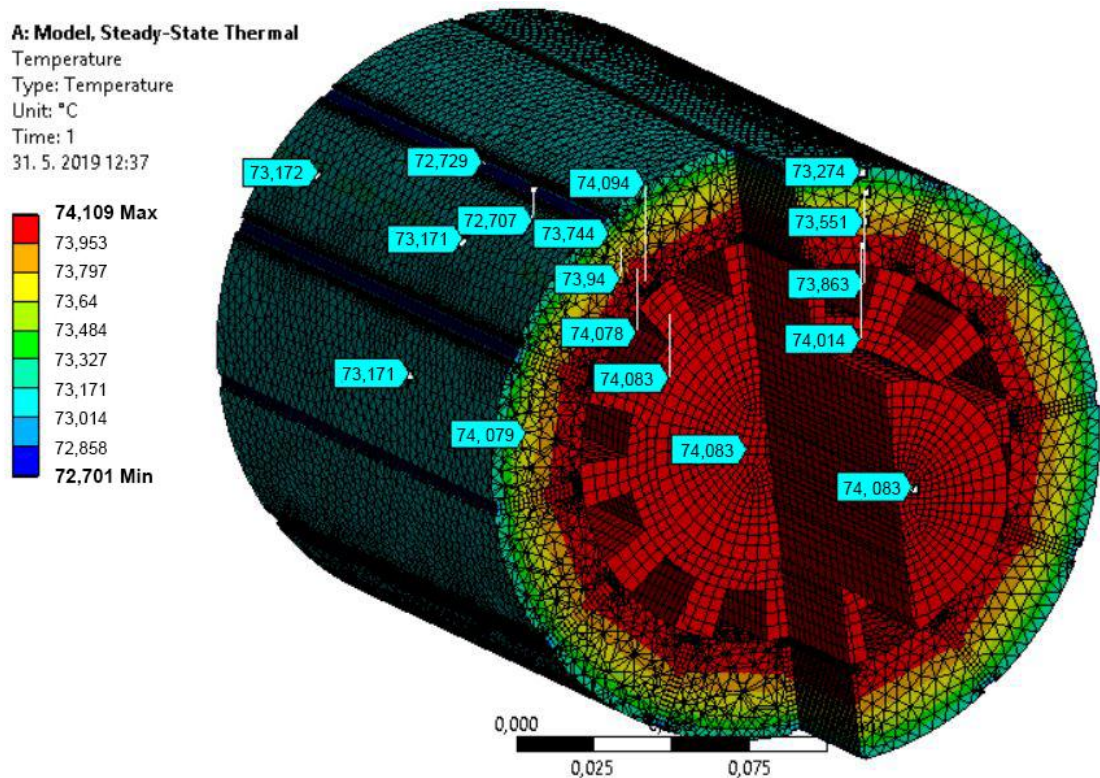
6.4.4. Vnitřní "V" uložení PM

V tomto případě se už změnil i rozměr magnetů a tím i jejich ztráty. Ztráty v magnetech tedy vyšly: $\Delta P_{PM} = 2,8622 \cdot 10^5 \text{ W/m}^3$. Ztráty v rotorovém jhu: $\Delta P_{Fej2} = 77146 \text{ W/m}^3$. Ze simulace na obrázku 6.4. můžeme vidět, že rozdíl minimální a maximální teploty je jen cca 0,8 °C. Maximální teplota je 71,3 °C, to je nejméně ze všech konstrukčních provedení. Teplo je opět odváděno přímo do vzduchové mezery, není zde bandáž, takže teplotu nebrání.

Ztráty v magnetech jsou v tomto případě: $\Delta P_{PM} = 5,8804 \cdot 10^5 \text{ W/m}^3$. Ztráty v rotorovém jhu jsou: $\Delta P_{Fej2} = 77144 \text{ W/m}^3$. Rozložení teploty je podobné jako u uložení "V", také je zde velmi malý rozdíl maximální a minimální teploty. Maximální teplota: 83,78 °C, minimální: 82,63 °C. Ztráty v magnetech jsou v tomto případě nejvyšší, ze všech uspořádání. A rotor je druhý nejteplejší.

6.4.6. Vnitřní radiální uložení PM

Jak je vidět ze simulace na obrázku 6.6, maximální teplota je zde 74,1 °C a minimální teplota 72,7 °C. Ztráty v magnetech vyšly: $\Delta P_{PM} = 1,2891 \cdot 10^5 \text{ W/m}^3$. Ztráty v rotorovém jhu: $\Delta P_{Fej2} = 77672 \text{ W/m}^3$. Rozdíl maximální a minimální teploty je cca 1,4 °C, což je víc než v předchozích případech vnitřně uložených magnetů. Ačkoli jsou ztráty v magnetech menší, než u uložení "V", rotor má vyšší teplotu.



Obr. 6.6. Rozložení teploty pro vnitřní radiální uložení PM

Tab. 6.3 Celkové ztráty a teplota v rotoru

Uložení PM	Povrchové	Povrch. s pól. nástavci	Povrch. zapuštěné	Vnitřní V	Radiální	Tangenciální
ΔP_{PM} [W/m ³]	$5,5015 \cdot 10^5$	$5,5015 \cdot 10^5$	$5,5015 \cdot 10^5$	$2,8622 \cdot 10^5$	$1,2891 \cdot 10^5$	$5,8804 \cdot 10^5$
ΔP_{Fej2} [W/m ³]	77194	84931	81525	77146	77672	77144
Max. teplota [°C]	80,58	79,43	103,51	71,3	74,1	83,78
Min. teplota [°C]	40,24	76,66	92,736	70,5	72,7	82,63

Pro všechny povrchové konstrukční provedení jsou uvažovány stejné rozměry PM, pro vnitřní uložení, jsou pro každé jiné. Objem rotorového jha je pro každé provedení také jiný viz. tabulka 6.2.

Tab. 6.4 Celkový objem a váha PM

Uložení PM	Povrchové	Vnitřní V	Radiální	Tangenciální
V_{PM} [m ³]	$5,270 \cdot 10^{-5}$	$3,158 \cdot 10^{-5}$	$2,961 \cdot 10^{-5}$	$3,243 \cdot 10^{-5}$
m_{PM} [kg]	4,743	2,842	2,665	2,919

Ve všech případech jsem uvažovali stejný vnější průměr rotoru, stejný průměr hřídele a stejné materiály magnetů, plechů i hřídele. Poté jsme uvažovali následující okrajové podmínky:

Teplota okolního vzduchu 40 °C.

Součinitel přestupu tepla do okolí $\alpha = 67,21 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

Tepelná vodivost magnetů $\gamma_t = 7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$.

Tepelná vodivost hřídele $\gamma_t = 60 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ (neuvažujeme žádné chlazení)

Tepelná vodivost plechů:

Směr osy X : $\gamma_t = 45 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$.

Směr osy Y : $\gamma_t = 45 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$.

Směr osy Z : $\gamma_t = 1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$.

Bandáž, ze skelných vláken o tepelné vodivosti $\gamma_t = 0,398 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$.

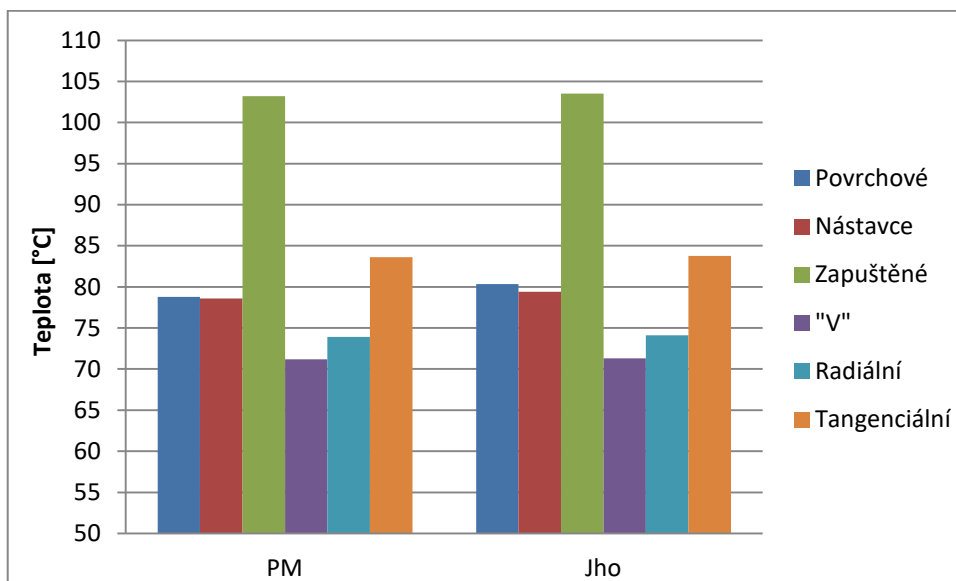
Tab. 6.5 Teploty v PM a jhu pro jednotlivá uložení

Uložení PM	Povrchové	Povrch. s pól. nástavci	Povrch. zapuštěné	Vnitřní V	Radiální	Tangenciální
Teplota v PM [°C]	78,8	78,6	103,2	71,18	73,9	83,6
Teplota jha [°C]	80,35	79,4	103,5	71,3	74,1	83,78

Teploty jednotlivých částí byly odečteny ze simulací v programu ANSYS pomocí funkce "Probe". Pro každé uložení odečteno cca 10 hodnot pro magnety i pro jho a poté

zprůměrovány. Tyto hodnoty jsou v tab. 6.5. Z ní je vidět, že rozdíl mezi teplotou jha a magnetů je velmi malý.

Graf 6.1 Teploty v jednotlivých částech rotoru



Závěr

Cílem práce bylo zhodnotit a porovnat různé materiály permanentních magnetů, to bylo provedeno v kapitole 2. a 3. Dále porovnání různých uspořádání PM na rotorech strojů s pohledu tepla vzniklého v rotoru, pro tento účel bylo navrženo a spočítáno šest variant rotorů s PM, které byly všechny uvažovány pro synchronní motor o výkonu 60 kW se stejným statorem. Poté byly vytvořeny 3D simulace v programu ANSYS, za účelem zhodnocení jednotlivých řešení.

Všechny tři povrchové uložení PM, mají stejné ztráty v magnetech. Z tabulky 6.3 můžeme vidět, že z těchto uložení se největší teplo se vyvine v rotoru s zapuštěnými PM a naopak nejmenší teplo u uložení PM s pólovými nástavci. To může být zapříčiněno tím, že u zapuštěných je bandáž, která má výrazně horší teplotní vodivost, než kovy a také tím, že u verze s pólovými nástavci dochází ke konvekci tepla do okolí na větší ploše. A také jsou zde na magnetech pólové nástavce z rotorových plechů, ve kterých jsou menší ztráty než v magnetech, takže teplo z magnetů je na obou stranách odváděno nejdříve do plechů. Jak je možné vidět z obrázku 6.1, u třetího povrchového uložení, které má bandáž, je teplota jen o cca 1 °C vyšší než verze s pól. nástavci.

Z vnitřních uložení vychází nejlépe "V" uložení. Všechny tři mají přibližně stejné ztráty v rotorovém jhu, ale ztráty v PM již ne. Největší ztráty v PM má tangenciální uložení, toto uložení je také z pohledu tepla nejhorší (nejvíce zahřáté) a to o cca. 12 °C více, než uložení "V". Jak bylo řečeno v [5], u tangenciálního uspořádání, dochází k přesycování rotorového jha a tím k deformaci průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře, magnetické siločáry procházejí přes magnet dvakrát, kdežto u "V" jen jednou.

Ve finále je z pohledu tepla v rotoru nejlepší uložení "V", s maximální teplotou 71,3 °C za ním radiální uložení s maximální teplotou 74,1 °C, naopak nejhůř je na tom uložení povrchové se zapuštěnými PM s 103,51 °C. Jak víme z předchozích kapitol, vnitřní uložení PM je výhodné z hlediska šetření na množství magnetického materiálu a také toho, že magnety jsou kryty před vnějšími vlivy. Takže tyto výsledky simulací se přiklání k použití jednoho z těchto dvou vnitřních uložení.

Všechny konstrukční provedení dodržely to, že nepřekročily pracovní teplotu permanentních magnetů a to 180 °C. Avšak nesmíme zapomenout na to, že jsem použili určité zjednodušující podmínky a zanedbali jsme například vlivy jako ztráty vytvořené vlivem řízení, či teplotu kterou vyvolá průchod proudu statorovým vinutím, chlazení

hřídele atd. Což by také ovlivnilo výslednou teplotu rotoru.

Každopádně z mnou provedených simulací, vychází výrazně větší teplota jen u povrchového uložení se zapuštěnými magnety, to znamená, že ostatní konstrukční provedení by se z tohoto hlediska teploty mohli při uvažování stejného statoru prohazovat.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] HRABOVCOVÁ V., L. JANOUŠEK, P. RAFAJDUS, a M. LIČKO. Moderné elektrické stroje. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 2000. ISBN 80-7100-809-5.
- [2] SINOMAG s.r.o., Magnety a teorie [online] ©2006 [cit. 15.04.2019] Dostupné z: http://www.sinomag.cz/sinomag.cz/data/sinomag/downloads/Permanentni_magnety.pdf
- [3] ELUC, Elektrotechnika, Magnetické vlastnosti látek. [online]. [cit. 15.04.2019]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/453>
- [4] PYRHONEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valeria HRABOVCOVÁ. *Design of rotating electrical machines*. Second edition. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley, 2014. ISBN 9781118581575.
- [5] HORNÍKOVÁ, Lucie: Návrh synchronního motoru s PM. Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2015.
- [6] KOPYLOV, Igor Petrovič. *Stavba elektrických strojů: celostátní vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [7] Elektrotechnické materiály 1 Publi.cz - platforma pro multimediální eBooky neboli mKnihy [online]. [cit. 20.04.2019]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/353/07.html>
- [8] Bonded and Injection Magnets | AIC Magnetics Shanghai. *AIC Magnetics - Neodymium Magnets, Magnetics, Assemblies* [online]. Copyright © 2013 AIC MAGNETICS SHANGHAI All Rights Reserved [cit. 23.04.2019]. Dostupné z: <http://www.aicmag.com/magnets/bonded-magnets/>
- [9] MMC Magnetic Materials & Components [online]. ©2018 MMC Magnetics Corp. All rights reserved. [cit. 23.04.2019]. Dostupné z: http://www.mmcmagnetics.com/ourproducts/main_Bonded.htm
- [10] Magnet Basics FAQs | Magnet Information | Magnetshop.com. Magnets for Sale | Where to Buy Magnets - MagnetShop.com [online]. Copyright ©2019 [cit. 26.04.2019]. Dostupné z: <https://www.magnetshop.com/resources/magnet-basics.html>
- [11] AC Induction Motors vs. Permanent Magnet Synchronous Motors - Empowering Pumps and Equipment. Empowering Pumps & Equipment - Global Pump Industry News [online]. Copyright © Copyright Empowering Pumps All Rights Reserved [cit. 29.04.2019]. Dostupné z: <http://empoweringpumps.com/ac-induction-motors-versus-permanent-magnet-synchronous-motors-fuji/>
- [12] External rotor motor basics: Design and applications. Motion Control, Encoders, Servo Drives, Controllers | Motion Control Tips [online]. [cit. 30.04.2019] Dostupné z: <https://www.motioncontroltips.com/external-rotor-motor-basics-design->

applications/

- [13] Úvod - SELOS - Experti na magnety. Úvod - SELOS - Experti na magnety [online]. Copyright © 2015 [cit. 02.05.2019]. Dostupné z: <https://www.magnety.cz/>
- [14] Custom Magnet Manufacturer » Magnet Applications [online]. Copyright ©2018 [cit. 02.05.2019]. Dostupné z: <https://www.magnetapplications.com/content/upload/files/Presentation%20-%20Magnetics%202018.pdf>
- [15] HANSELMAN, Duane C. *Brushless permanent magnet motor design*. 2nd ed. Cranston, R.I.: The Writers' Collective, c2003. ISBN 1932133631.
- [16] Lindh, Pia & Pyrhönen, J & Niemelä, Markku. (2003). A COMPARISON BETWEEN SURFACE MAGNETS AND EMBEDDED MAGNETS IN FRACTIONAL SLOT WOUND PM-MOTORS. 10.13140/2.1.2090.7207.
- [17] Specialista na trvalé magnety a magnetické výrobky | ABC MAGNET. Specialista na trvalé magnety a magnetické výrobky | ABC MAGNET [online]. Copyright © 2012 ABC MAGNET s.r.o. [cit. 05.05.2019]. Dostupné z: <https://www.abcmagnet.cz>
- [18] ČERVENÝ J. Stavba elektrických strojů: Skripta k předmětu SES [online]. 2012 [cit. 23.05.2019]. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/>
- [19] L.K.Engineering, Brno | Profesionální technické výpočty | MKP, FEM, FEA. L.K.Engineering, Brno | Profesionální technické výpočty | MKP, FEM, FEA [online]. Copyright © L.K. Engineering, s.r.o. [cit. 28.05.2019]. Dostupné z: <https://www.lke.cz/>

Přílohy

Příloha č 1. - Katalogový list použitých plechů

Typical data for SURA® M330-50A

1 (2)

T	W/kg at 50 Hz	VA/kg at 50 Hz	A/m at 50 Hz	W/kg at 100 Hz	W/kg at 200 Hz	W/kg at 400 Hz	W/kg at 1000 Hz	W/kg at 2500 Hz
0,1	0,03	0,07	27,7	0,05	0,13	0,34	1,64	6,55
0,2	0,09	0,19	36,4	0,20	0,49	1,36	5,71	22,7
0,3	0,18	0,34	42,4	0,43	1,06	2,84	11,7	47,8
0,4	0,28	0,51	47,8	0,71	1,78	4,77	19,7	82,9
0,5	0,41	0,70	52,9	1,04	2,65	7,18	30,1	130
0,6	0,55	0,93	58,3	1,42	3,66	10,1	43,1	194
0,7	0,71	1,20	64,1	1,84	4,83	13,6	59,2	281
0,8	0,89	1,50	71,0	2,32	6,17	17,7	78,2	392
0,9	1,08	1,86	79,7	2,85	7,69	22,5	103	529
1,0	1,29	2,30	91,8	3,43	9,42	28,1	132	697
1,1	1,53	2,86	110	4,08	11,4	34,6	166	
1,2	1,81	3,65	140	4,81	13,6	42,0		
1,3	2,12	5,00	205	5,63	16,0	50,2		
1,4	2,56	8,27	399	6,60	18,7	59,3		
1,5	3,03	19,9	1097	7,71	21,8	69,6		
1,6	3,49	54,7	2925					
1,7	3,84	124	6118					
1,8	4,15	239	10828					

Loss at 1.5 T , 50 Hz, W/kg	3,03
Loss at 1.0 T , 50 Hz, W/kg	1,29
Anisotropy of loss, %	10

Magnetic polarization at 50 Hz	
H = 2500 A/m, T	1,57
H = 5000 A/m, T	1,66
H = 10000 A/m, T	1,77

Coercivity (DC), A/m	40
Relative permeability at 1.5 T	1050
Resistivity, $\mu\Omega\text{cm}$	42

Yield strength, N/mm^2	315
Tensile strength, N/mm^2	455
Young's modulus, RD, N/mm^2	200 000
Young's modulus, TD, N/mm^2	210 000
Hardness HV5 (VPN)	155



Příloha č 2. - Katalogový list použitých PM



N38SH

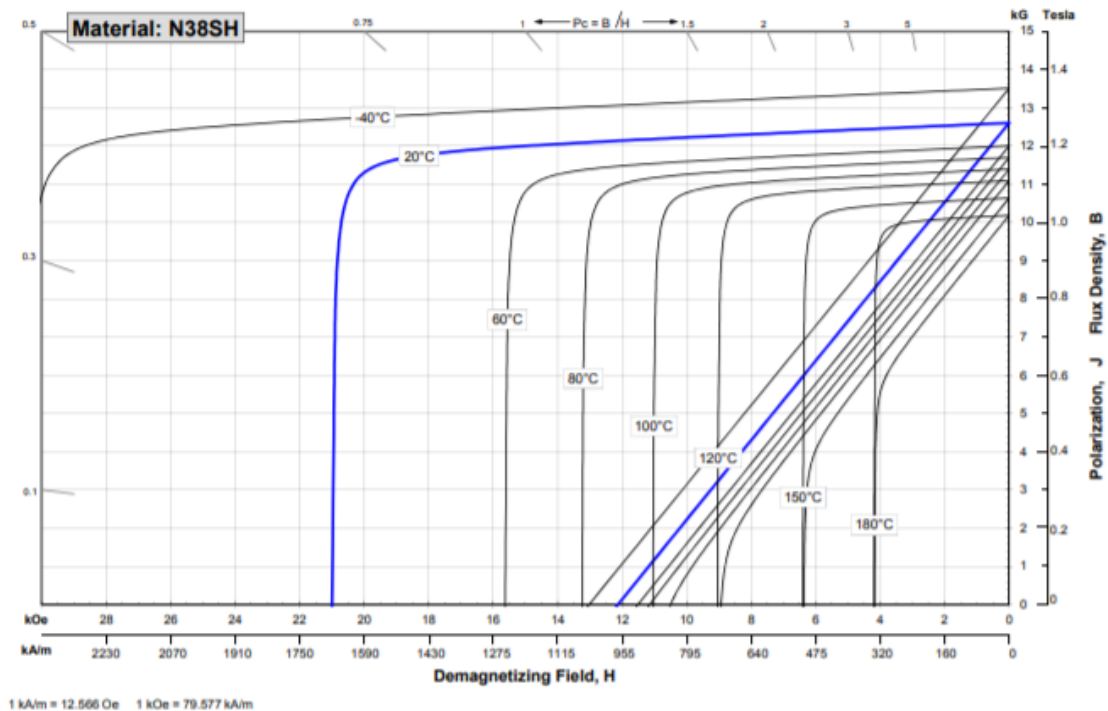
Sintered Neodymium-Iron-Boron Magnets

These are also referred to as "Neo" or NdFeB magnets. They offer a combination of high magnetic output at moderate cost. Please contact Arnold for additional grade information and recommendations for protective coating. Assemblies using these magnets can also be provided.

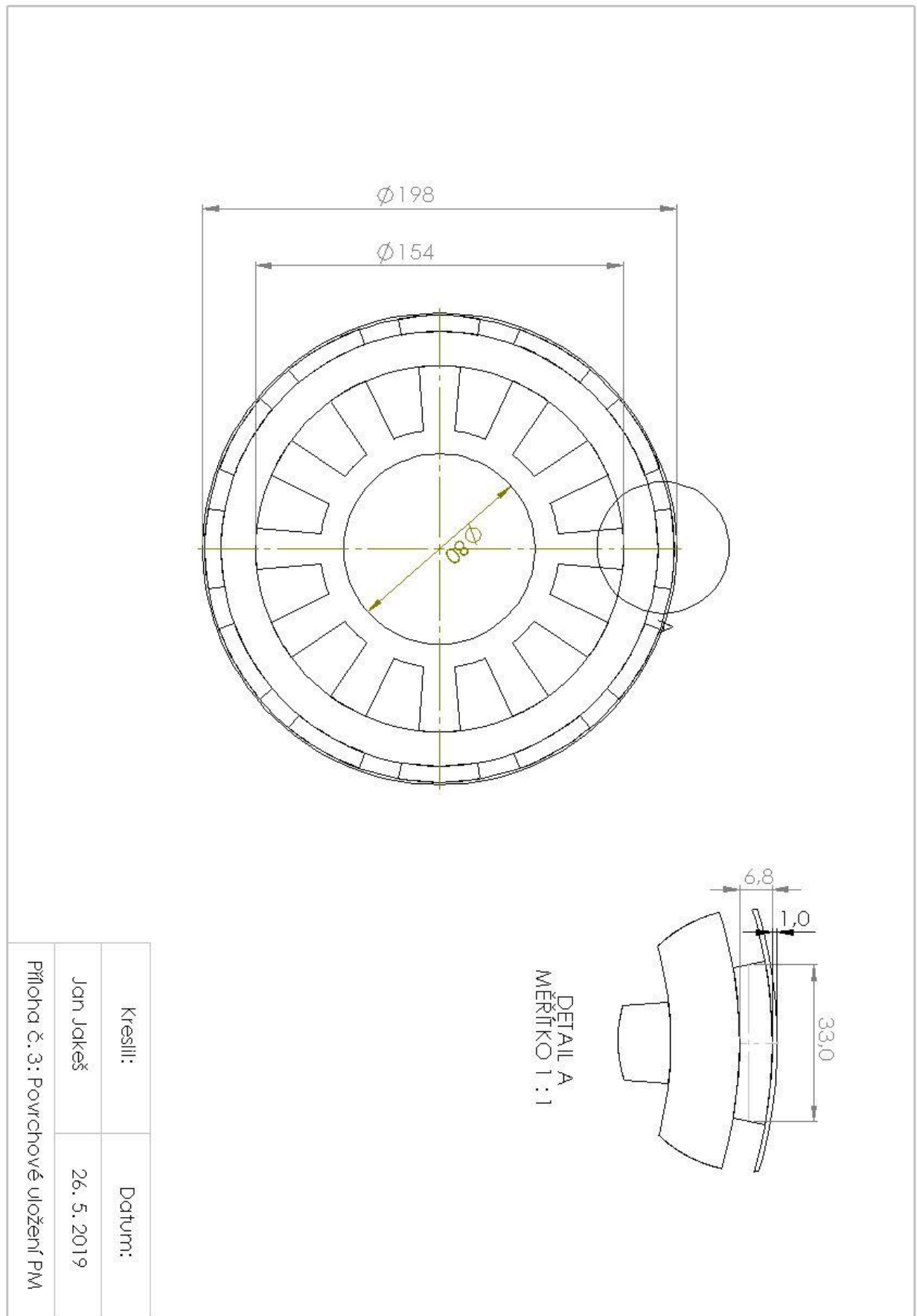
Characteristic	Units	Magnetic Properties		
		min.	nominal	max.
Br , Residual Induction	Gauss	12,200	12,600	13,000
	mT	1220	1260	1300
H_{cB} , Coercivity	Oersteds	11,400	11,900	12,400
	kA/m	907	947	987
H_{cJ} , Intrinsic Coercivity	Oersteds	20,000		
	kA/m	1,592		
BHmax , Maximum Energy Product	MGOe	36	39	41
	kJm ⁻³	287	307	326

Characteristic	Units	Thermal Properties		
		C #	C Δ	
Reversible Temperature Coefficients ⁽¹⁾				
of Induction, α(Br)	%/°C		-0.120	
of Coercivity, α(H _c)	%/°C		-0.535	
Coefficient of Thermal Expansion ⁽²⁾	ΔL/L per °Cx10 ⁻⁶	7.5	-0.1	
Thermal Conductivity	W / (m • K)		7.6	
Specific Heat ⁽³⁾	J / (kg • K)		460	
Curie Temperature, T _c	°C		310	
Other Properties	Flexural Strength	psi	41,300	
		MPa	285	
	Density	g/cm ³		7.5
	Hardness, Vickers	Hv		620
	Electrical Resistivity, ρ	μΩ • cm		180

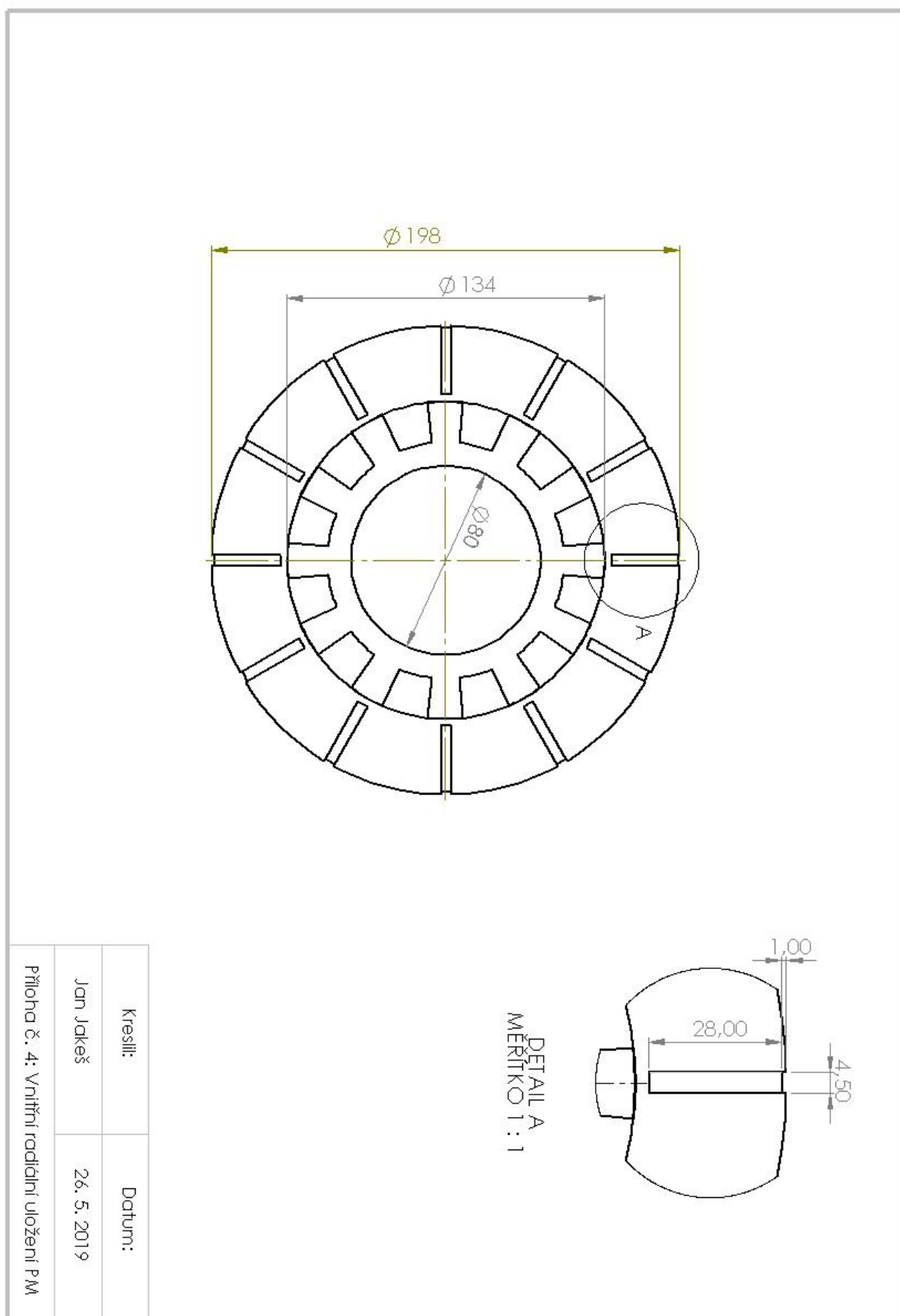
Notes: (1) Coefficients measured between 20 and 150 °C
 (2) Between 20 and 200 °C
 (3) Between 20 and 140 °C



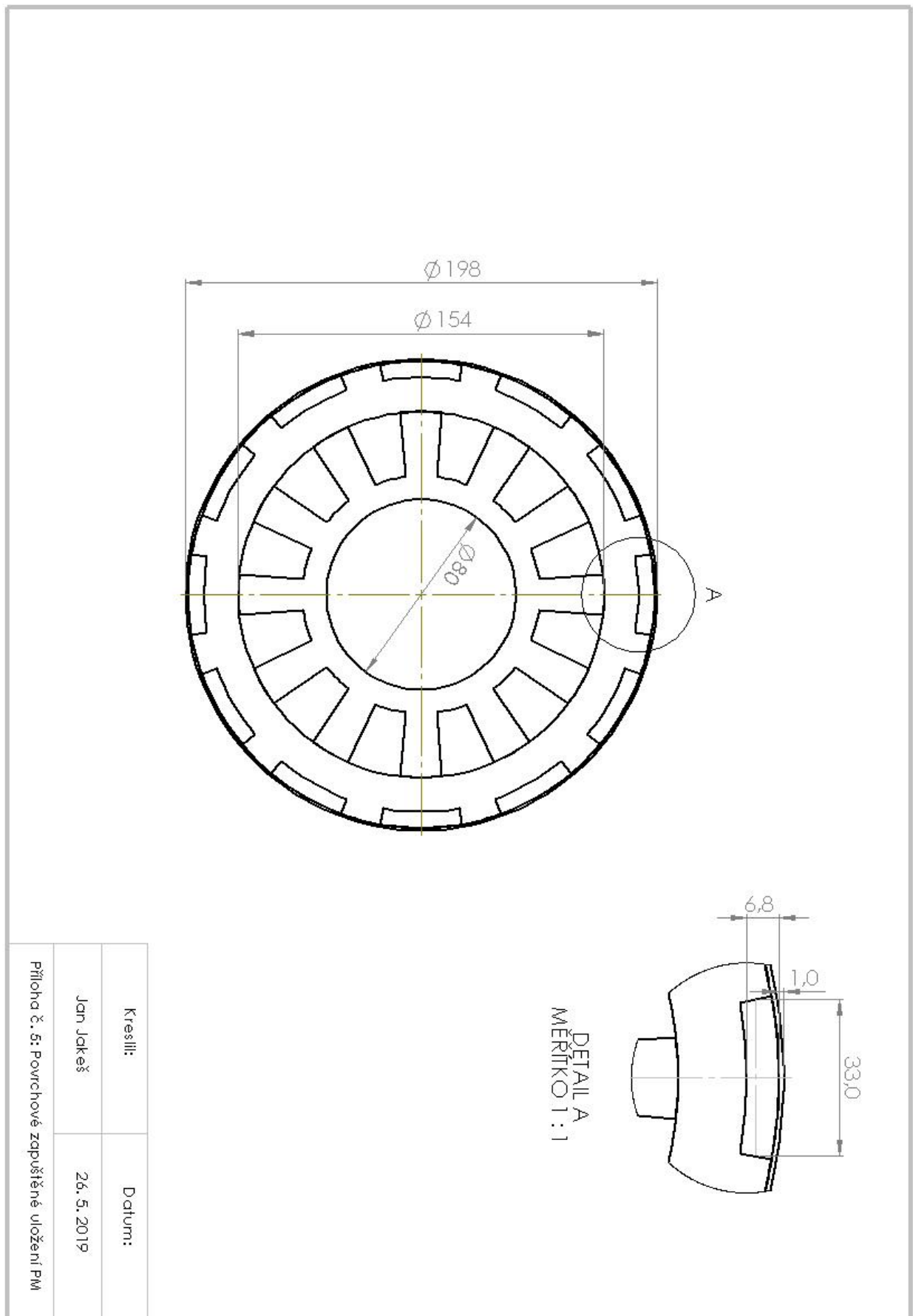
Příloha č. 3 - Příčný řez rotoru s povrchovými PM



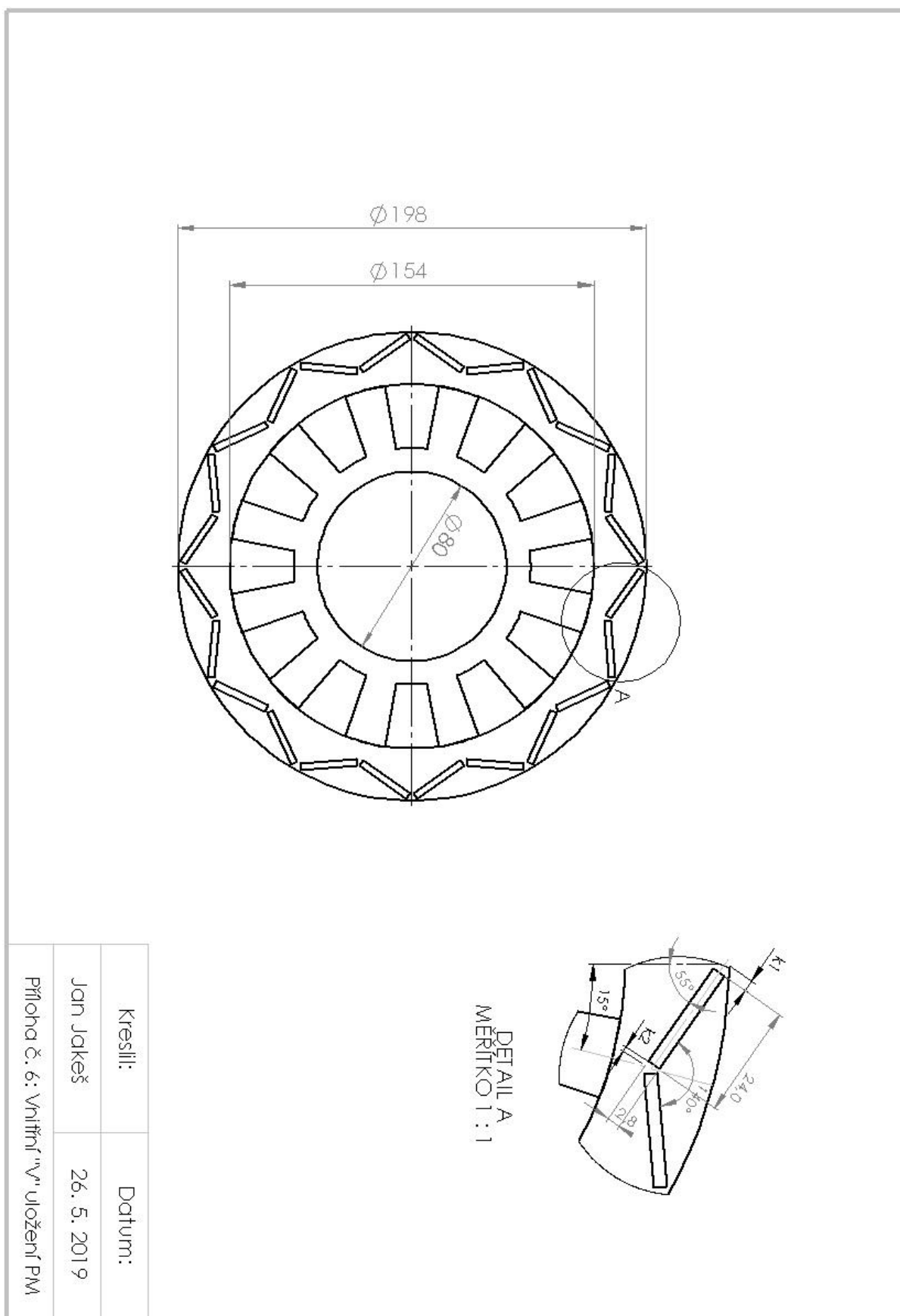
Příloha č. 4 - Příčný řez rotoru s radiálními PM



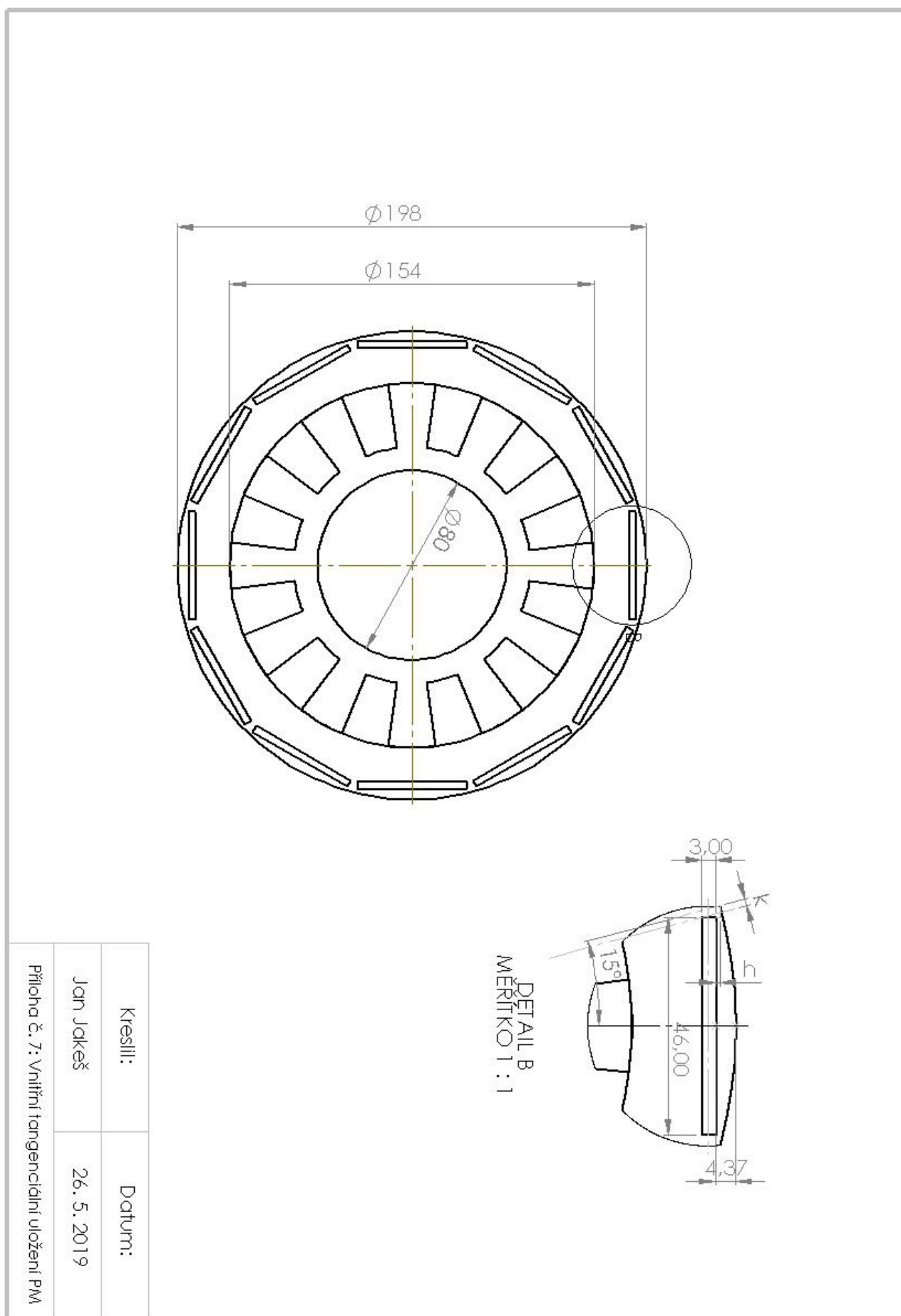
Příloha č. 5 - Příčný řez rotoru se zapuštěnými PM



Příloha č. 6 - Příčný řez rotoru s "V" PM



Příloha č. 7 - Příčný řez rotoru s tangenciálními PM



Příloha č. 8 - Příčný řez rotoru s pólovými nástavci

