



Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

# DIPLOMOVÁ PRÁCE

Optimalizace tvaru a směru magnetizace permanentních magnetů

Autor práce: Bc. Monika Křivánková  
Vedoucí práce: Ing. Karel Hruška, Ph.D.

Plzeň 2015

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2014/2015

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Monika KŘIVÁNKOVÁ**  
Osobní číslo: **E13N0156P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**  
Název tématu: **Optimalizace tvaru a směru magnetizace permanentních magnetů**  
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. Provedte návrh synchronního stroje s permanentními magnety a připravte jeho model za pomoci metody konečných prvků.
2. Provedte optimalizaci tvaru a směru magnetizace permanentních magnetů ve stroji pro použití stroje jako synchronního stroje s permanentními magnety.
3. Provedte optimalizaci tvaru a směru magnetizace permanentních magnetů ve stroji pro použití stroje jako elektroniky komutovaného stejnosměrného stroje.
4. Provedte zhodnocení výsledků.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**

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

Seznam odborné literatury:

1. BAŠTA, J.; CHLÁDEK, J.; MAYER, I.: Teorie elektrických strojů.
2. KOPYLOV, I. P. a kol.: Stavba elektrických strojů.
3. HANSELMAN, D. C.: Brushless Permanent Magnet Motor Design.

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Karel Hruška, Ph.D.**

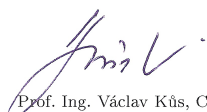
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2014**

Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2015**

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



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

# Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá optimalizací tvaru a směru magnetizace permanentních magnetů ve stroji pro použití stroje jako synchronního nebo stroje stejnosměrného elektricky komutovaného. Optimalizace různých tvarů a směrů magnetizace je provedena pomocí metody konečných prvků v programu FEMM. Pro zpracování hodnot byl použit program MS Excel a následné vykreslení průběhů jako indukovaných napětí, magnetické indukce ve vzduchové mezeře, spektrální analýza, byly provedeny pomocí programu MATLAB, přičemž zdrojové kódy pro jednotlivé průběhy byly poskytnuty vedoucím této diplomové práce. Všechny varianty jsou na konci této diplomové práce porovnány z hlediska nejlepšího tvaru indukovaného napětí, průběhu magn. indukce ve vzduchové mezeře, obsahu vyšších harmonických složek a následně jsou jednotlivé varianty doporučeny pro použití ve stroji synchronním nebo stroji stejnosměrném elektricky komutovaném.

## Klíčová slova

permanentní magnet, indukované napětí, magnetická indukce ve vzduchové mezeře, amplitudové spektrum

# Abstract

Křivánková, Monika. *Optimization of Shape and Magnetization Direction of Permanent Magnets* [*Optimalizace tvaru a směru magnetizace permanentních magnetů*]. Pilsen, 2015. Master thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Electromechanics and Power Electronics. Supervisor: Karel Hruška

---

This thesis is concerned with optimising the shape and magnetisation direction of the permanent-magnet for use as synchronous or electronically commutated machine. Optimisation of different shapes and directions of magnetisation is performed by using the finite element analysis, in a program called FEMM. MS Excel was used for processing the values and a mathematical program known as MATLAB was used to perform waveforms. These included waveforms such as, induced voltage, magnetic flux density in an air gap and spectral analysis, using source codes provided by my supervisor. All options are compared at the end of this thesis, namely, the best shape of induced voltage, magnetic flux density in the air gap, the harmonic distortion (THD) and subsequently individual variants recommended for use, either, in synchronous machines or electrically commutated machines.

## Keywords

permanent magnet, induced voltage, magnetic flux density in the air gap, amplitude spectrum

## Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 7. května 2015

Bc. Monika Křivánková

.....

Podpis

## Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Karlovi Hruškovi PhD. za věcné rady a připomínky.

# Obsah

Seznam obrázků	viii
Seznam symbolů a zkratek	ix
<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Elektromagnetický návrh motoru s PM</b>	<b>3</b>
2.1 Zadané parametry stroje . . . . .	3
2.2 Výpočet základních hodnot stroje . . . . .	3
2.3 Návrh vinutí statoru . . . . .	5
2.4 Návrh drážky . . . . .	7
2.5 Návrh permanentních magnetů . . . . .	8
2.6 Výpočet odporu vinutí . . . . .	13
2.7 Výpočet rozptylové indukčnosti vinutí . . . . .	13
2.8 Stanovení ztrát a účinnosti . . . . .	14
<b>3 Analýza motoru v programu FEMM</b>	<b>17</b>
3.1 Definice problému . . . . .	17
3.2 Rotor s povrchovou montáží a paralelní magnetizací magnetů . . . . .	19
3.3 Rotor s povrchovou montáží s paralelními hranami a magnetizací magnetů	22
3.4 Rotor s povrchovou montáží s paralelními hranami a magnetizací magnetů směrem k jednomu bodu . . . . .	25
3.5 Rotor s povrchovou montáží s paralelními hranami a radiální magnetizací magnetů . . . . .	28
3.6 Rotor s povrchovou montáží s bochníkovým tvarem a paralelní magnetizací magnetů . . . . .	31
3.7 Rotor s povrchovou montáží s permanentními magnety s paralelní magne- tizací s nástavci . . . . .	34
<b>4 Výpočet některých dalších hodnot pro porovnání výsledků</b>	<b>37</b>
4.1 Výpočet efektivní hodnoty z časového průběhu indukovaného napětí . . . .	38
4.2 Výpočet efektivní hodnoty z amplitudového spektra indukovaného napětí .	39
4.3 Vnitřní výkon a ztráty jednotlivých variant . . . . .	40



<b>5 Závěr</b>	<b>41</b>
<b>Reference, použitá literatura</b>	<b>43</b>
<b>Přílohy</b>	<b>44</b>
<b>A</b>	<b>44</b>

# Seznam obrázků

1.1	Různé typy uložení magnetů na rotoru [7] . . . . .	2
2.1	Náhradní schéma magnetického obvodu [5] . . . . .	9
3.1	Nadefinovaný model v programu FEMM . . . . .	18
3.2	Detail tvaru PM s hranami kolnými na rotor . . . . .	19
3.3	Zobrazení rozložení magn. pole PM s paralelní magnetizací . . . . .	19
3.4	Indukované napětí ve stroji s paralelní magnetizací magnetů . . . . .	20
3.5	Spektrum indukovaného napětí ve stroji s paralelní magnetizací magnetů . . . . .	20
3.6	Průběh indukce ve vzduchové mezeře ve stroji s paralelní magnetizací magnetů . . . . .	21
3.7	Spektrum magnetické indukce ve vinutí ve stroji s paralelní magnetizací magnetů . . . . .	21
3.8	Detail PM s paralelními hranami a magnetizací magnetů . . . . .	22
3.9	Rozložení pole ve stroji s paralelními hranami a magnetizací magnetů . . . . .	22
3.10	Indukované napětí ve stroji s paralelními hranami a magnetizací magnetů . . . . .	23
3.11	Spektrum indukovaného napětí s paralelními hranami a magnetizací magnetů . . . . .	23
3.12	Průběh indukce ve vzduchové mezeře s paralelními hranami a magnetizací magnetů . . . . .	24
3.13	Spektrum magnetické indukce ve vinutí s paralelními hranami a magnetizací magnetů . . . . .	24
3.14	Detail definice modelu pro jiný směr magnetizace . . . . .	25
3.15	Rozložení magnetického pole v magnetech s magnetizací k jednomu bodu . . . . .	25
3.16	Indukované napětí ve stroji s magnetizací k jednomu bodu . . . . .	26
3.17	Spektrum indukovaného napětí ve stroji s magnetizací k jednomu bodu . . . . .	26
3.18	Průběh indukce ve vzduchové mezeře ve stroji s magnetizací k jednomu bodu . . . . .	27
3.19	Spektrum magnetické indukce ve vinutí ve stroji s magnetizací k jednomu bodu . . . . .	27
3.20	Detail definice modelu pro radiální směr magnetizace . . . . .	28
3.21	Rozložení magnetického pole v PM s radiální magnetizací . . . . .	28
3.22	Indukované napětí ve stroji s radiální magnetizací PM . . . . .	29
3.23	Spektrum indukovaného napětí . . . . .	29

3.24	Průběh indukce ve vzduchové mezeře . . . . .	30
3.25	Spektrum magnetické indukce ve vinutí . . . . .	30
3.26	Detail bochníkového tvaru PM . . . . .	31
3.27	Rozložení magn. pole v motoru s bochníkovým tvarem magnetů . . . . .	31
3.28	Indukované napětí ve stroji s bochníkovým tvarem magnetů . . . . .	32
3.29	Spektrum indukovaného napětí s bochníkovým tvarem magnetů . . . . .	32
3.30	Průběh indukce ve vzduchové mezeře . . . . .	33
3.31	Spektrum magnetické indukce ve vinutí . . . . .	33
3.32	Detail PM s nástavci . . . . .	34
3.33	Rozložení pole u stroje s PM s nástavci . . . . .	34
3.34	Indukované napětí ve stroji s PM s nástavci . . . . .	35
3.35	Spektrum indukovaného napětí stroje s PM s nástavci . . . . .	35
3.36	Průběh indukce ve vzduchové mezeře stroje s PM s nástavci . . . . .	36
3.37	Spektrum magnetické indukce ve vinutí ve stroji s PM s nástavci . . . . .	36
5.1	Porovnání jednotlivých variant z hlediska indukovaného napětí . . . . .	41
5.2	Porovnání jednotlivých variant z hlediska magnetické indukce ve vzduch. mezeře . . . . .	41
A.1	Katalogový list permanentního magnetu N38SH . . . . .	44

# Seznam symbolů a zkratek

$2a$		Počet paralelních větví
$2u$		Počet vrstev vinutí
$A$	[A/m]	Lineární proudová hustota
$b_{d1}$	[mm]	Šířka drážky statoru
$b_m$	[mm]	Šířka magnetu
$b_{z1}$	[mm]	Šířka zubu statorového plechu
$B_{j1}$	[T]	Magnetická indukce v jhu statoru
$B_m$	[T]	Magnetická indukce v magnetu
$B_{z1}$	[T]	Magnetická indukce v zubu statoru
$B_\delta$	[T]	Magnetická indukce ve vzduchové mezeře
$C$	$\left[ \frac{VA}{m^3 \cdot ot/min} \right]$	Essonův činitel
$D_1$	[m]	Vnitřní průměr statoru
$D_2$	[m]	Vnější průměr rotoru
$D_e$	[m]	Vnější průměr statoru
$d_v$	[mm]	Průměr vodiče
$h_d$	[mm]	Výška statorové drážky
$h_{j1}$	[mm]	Výška statorového jha
$h_m$	[mm]	Odhadnutá výška magnetu
$h_{ms}$	[mm]	Skutečná výška magnetu
$H_c$	[kA/m]	Koercitivita magnetu
$H_{j1}$	[A/m]	Magnetická intenzita ve statorovém jhu
$H_{j2}$	[A/m]	Magnetická intenzita v rotorovém jhu
$H_m$	[A/m]	Magnetická intenzita v magnetech
$H_{z1}$	[A/m]	Magnetická intenzita v zubu statoru
$H_\delta$	[A/m]	Magnetická intenzita ve vzduchové mezeře
$I_c$	[A]	Proud procházející strojem
$I_d$	[A]	Proud drážkou
$I_n$	[A]	Jmenovitý proud
$J_{Cu}$	[A/mm <sup>2</sup> ]	Proudová hustota mědi
$k_B$		Činitel tvaru pole
$k_{cn}$		Carterův činitel pro n krok

$k_d$		Činitel využití drážky
$k_{Fe}$		Činitel plnění železa
$k_{n1}$		Činitel vinutí pro n.harmonickou
$k_v$		Činitel vinutí
$K$		Počet cívek statorového vinutí
$l$	[m]	Délka statoru
$l_c$	[mm]	Délka čela statorového vinutí
$l_{j1}$	[mm]	Délka střední indukční siločáry statorového jhu
$l_{j2}$	[mm]	Délka střední indukční siločáry rotorového jhu
$l_{z1}$	[mm]	Střední délka závitů statorového vinutí
$m$		Počet fází stroje
$m'$		Matematický počet fází stroje
$n$	[ot/min]	Jmenovité otáčky
$N_{c/f}$		Počet cívek na fázi
$N_{sk}$		Počet cívek na skupinu
$N_s$		Počet závitů v sérii
$P$	[W]	Jmenovitý výkon
$P_i$	[ot/min]	Vnitřní elektromagnetický výkon
$S$	[VA]	Zdánlivý výkon
$q$		Počet drážek na pól
$Q$		Počet statorových drážek
$q$		Počet drážek na jeden pól
$R_{20}$	[ $\Omega$ ]	Odpor statorového vinutí při 20°C
$S_{Cu}$	[mm <sup>2</sup> ]	Obsah mědi vodičů ve statorové drážce
$S_d$	[mm <sup>2</sup> ]	Obsah statorové drážky
$S_{1Cu}$	[mm <sup>2</sup> ]	Průřez jednoho vodiče
$t_{d1}$	[mm]	Drážková rozteč statoru
$t_{p1}$	[mm]	Pólová rozteč statoru
$U_{j1}$	[A]	Magnetické napětí ve statorovém jhu
$U_{j2}$	[A]	Magnetické napětí v rotorovém jhu
$U_m$	[A]	Magnetické napětí v magnetu
$U_s$	[V]	Sdružené napětí
$U_z$	[A]	Magnetické napětí v zubu statoru
$U_\delta$	[A]	Magnetické napětí ve vzduchové mezeře
$V_c$		Počet vodičů v jedné vrstvě statorové drážky
$V_d$		Počet vodičů v drážce statoru
$y_{1d}$		Cívkový krok
$\alpha_\delta$		Činitel pólového krytí

$\beta$		Činitel zkrácení kroku vinutí
$\delta$	[mm]	Velikost vzduchové mezery
$\delta'$	[mm]	Velikost vzduchové mezery s uvažováním drážkování
$\Delta P$	[W]	Celkové ztráty motoru
$\Delta P_{j1}$	[W]	Jouleovy ztráty
$\Delta P_{Fej}$	[W]	Ztráty v jhu statoru
$\Delta P_{Fesz}$	[W]	Ztráty v zubech
$\Delta P_{mech}$	[W]	Mechanické ztráty
$\Delta P_{pm}$	[W]	Ztráty v permanentních magnetech
$\Delta P_p$	[W]	Přídavné ztráty
$\Phi$	[Wb]	Magnetický tok ve statoru
$\Phi_z$	[Wb]	Magnetický tok v zubu statoru
$\cos\varphi$		Účinitel
$\eta$		Účinnost stroje
$\lambda_c$		Činitel magnetické vodivosti drážkového rozptylu
$\lambda_d$		Činitel magnetické vodivosti rozptylu čel
$\lambda_{dif}$		Činitel magnetického diferenčního rozptylu
$\mu_0$	[H/m]	Permeabilita vakua
$\mu_r$	[H/m]	Relativní permeabilita magnetu
$\gamma_n$		Konstanta Carterova činitele pro n. krok
$\rho_{Fe}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Hustota elektrotechnických plechů statoru
$\rho_{20}$	[Ω/m]	Rezistivita vodiče při 20°C

# 1

## Úvod

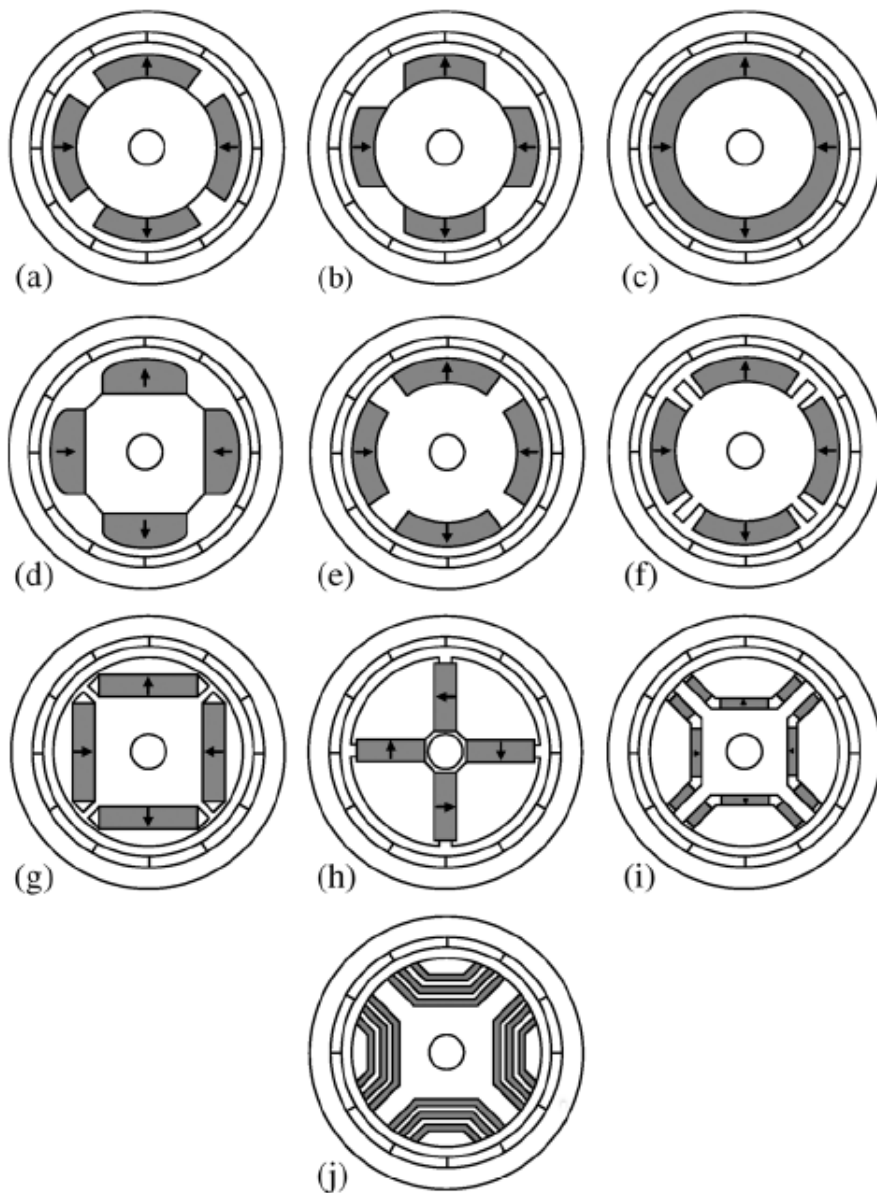
Stroje obecně se skládají ze dvou částí - z rotoru a statoru. Základem statoru synchronního stroje je kostra, ve které je umístěn indukt, který je tvořen plechovým svazkem a vinutím, které je připojeno ke střídavé síti. Při průchodu proudem vinutím se vytváří točivé magnetické pole, jehož rychlost je stejná jako otáčivá rychlost rotoru:

$$n = \frac{60f}{p} \quad (1.1)$$

Uvnitř statoru synchronního stroje s PM je rotor, který je tvořen hřídelem, magnetickým jhem a nese permanentní magnety, které jsou ze speciálních slitin, tzv. vzácných zemin. Nejčastěji se jedná o SmCo (samarium-kobalt) nebo o NdFeB (neodym-železo-bor). Magnetická indukce těchto magnetů je od 0,8 do 1,2 T, což je vyšší hodnota než u obyčejných feritů, které mají indukci 0,3 až 0,4 T. Permanentní magnety jsou tedy zdrojem velkého magnetického toku a tím je umožněno zmenšení výsledního objemu stroje. Magnety se na rotor upevňují lepením a existují dva druhy výroby rotoru. Magnety se zmagnetují buď před samotným nalepením a nebo se mohou magnetovat přímo ve stroji. První způsob se provádí při malosériové výrobě, avšak v důsledku působení magnetických sil je usazování magnetů na rotor komplikované. Pro druhý způsob výroby je potřeba přizpůsobení vinutí, kdy za pomoci pole vinutí dochází ke zmagnetování magnetů.

Hlavní výhoda synchronních strojů s permanentními magnety spočívá v tom, že není potřeba budícího vinutí v rotoru stroje, což znamená, že odpadá i nutnost zdroje stejnosměrného budícího proudu. Další výhodou je, že celkový objem, hmotnost a moment setrvačnosti stroje je menší. Je možná i velká momentová přetížitelnost a účinnost stroje je vysoká. Cena strojů s permanentními magnety je vyšší a konstrukce složitější.

Na obr. 1.1 jsou uvedeny některé možnosti konstrukčního řešení rotoru s PM. V této diplomové práci je analyzován případ a) povrchově montované magnety, b) povrchově montované magnety s paralelními hranami, c) prstencový magnet (jeden kus), d) bochánkový tvar magnetů. Navíc je použit ještě typ, navíc jsou nad magnety přidány pólové nástavce. Ostatní typy konstrukce na obrázku 1.1 jsou pro uložení magnetů uvnitř rotoru.



**Obr. 1.1:** Různé typy uložení magnetů na rotoru [7]



## 2

# Elektromagnetický návrh motoru s PM

Elektromagnetickým návrhem se rozumí určení hlavních rozměrů stroje, návrh vinutí induktu včetně návrhu drážky, odporu a rozptylové reaktance vinutí, dále návrh magnetického obvodu jako velikost vzduchové mezery, dimenzování magnetického obvodu a v neposlední řadě také ztráty [4].

## 2.1 Zadané parametry stroje

Jmenovitý výkon	$P = 35$	kW
Jmenovité otáčky	$n = 9000$	ot/min
Sdružené napětí	$U_s = 400$	V
Počet pólů	$2p = 4$	
Účinnost	$\eta = 95$	%
Účíník	$\cos\varphi = 1$	
Činitel	$k_E = 0,95$	
Vnější průměr statoru	$D_e = 180$	mm

## 2.2 Výpočet základních hodnot stroje

Zdánlivý výkon je poměr jmenovitého výkonu ku součinu účinnosti a účíníku:

$$S = \frac{P}{\cos\varphi \cdot \eta} = \frac{35000}{1 \cdot 0,95} = 36842 \text{ [VA]} \quad (2.1)$$

Vnitřní výkon je pak:

$$S_i = \frac{P}{\cos\varphi \cdot \eta} \cdot k_E = \frac{35000}{1 \cdot 0,95} \cdot 0,95 = 35000 \text{ [VA]} \quad (2.2)$$

Proud jedné fáze:

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_s} = \frac{36842}{\sqrt{3} \cdot 400} = 53 \text{ [A]} \quad (2.3)$$

Frekvence je dána vztahem:

$$f = \frac{p \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot 9000}{60} = 300 \text{ [Hz]} \quad (2.4)$$

Dále je potřeba stanovit počet drážek na pól a fázi. Je nutné dodržet dvě hlavní podmínky. Jmenovatel  $c$  nesmí být dělitelný počtem fází  $m$  a musí být menší než je počet pólových dvojic  $p$ .

Zvoleno:

$$q = \frac{1}{2} \quad (2.5)$$

a z toho:

$$Q = 2p \cdot m \cdot q = 4 \cdot 3 \cdot \frac{1}{2} = 6 \quad (2.6)$$

Činitel pólového krytí:

$$\alpha_\delta = \frac{2}{\pi} = 0,64 \quad (2.7)$$

Činitel tvaru pole:

$$k_B = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11 \quad (2.8)$$

Lineární proudová hustota je zvolena: 110793 A/m

Činitel vinutí pro 1. harmonickou se spočte jako součin činitele zkácení kroku a činitele rozlohy:

$$k_{v1} = \sin\left(\beta \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi}{m'}\right)}{n \cdot \sin\left(\frac{\pi}{m' \cdot n}\right)} \quad (2.9)$$

kde  $\beta$  je poměrné zkrácení kroku vinutí:

$$\beta = \frac{y_{1d}}{Q_p} \quad (2.10)$$

Počet drážek na pól:

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{6}{4} = 1,5 \quad (2.11)$$

volím  $y_{1d} = 1$  a po dosazení  $\beta = 0,6\bar{6}$

Nyní lze dosadit do vztahu pro výpočet činitele vinutí pro 1. harmonickou:

$$k_{v1} = \sin\left(v \cdot \beta \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{\sin \cdot v \cdot \left(\frac{\pi}{m'}\right)}{n \cdot \sin \cdot v \cdot \left(\frac{\pi}{m' \cdot n}\right)} = \sin\left(0,6\bar{6} \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi}{6}\right)}{1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6 \cdot 1}\right)} = 0,8660 \quad (2.12)$$

Nyní se vypočte Essonův činitel:

$$\begin{aligned} C &= \frac{\pi}{60} \cdot \alpha_{\delta} \cdot B_{\delta} \cdot A \cdot k_{v1} \cdot k_B = \\ &= \frac{\pi}{60} \cdot 0,64 \cdot 0,8 \cdot 108 \cdot 10^3 \cdot 0,83 \cdot 1,11 = 8,7 \left[ \frac{\text{kVA}}{\text{m}^3 \cdot \text{ot}/\text{min}} \right] \end{aligned} \quad (2.13)$$

Protože při návrhu jsem omezena rozměry motoru, je třeba stroj nadimenzovat tak, aby byl vnější průměr statoru 180 mm. Vnitřní průměr statoru byl zvolen 55 mm. Velikost vzduchové mezery byla zvolena  $\delta = 1$  mm. A z výkonové rovnice můžu tedy spočítat délku stroje, která je dána vztahem:

$$l = \frac{S_i}{C \cdot D_1^2 \cdot n} = \frac{35000}{8744 \cdot 0,055^2 \cdot 9000} = 147 \text{ [mm]} \quad (2.14)$$

Drážková rozteč statoru:

$$t_{d1} = \frac{\pi \cdot D_1}{Q} = \frac{\pi \cdot 0,25}{6} = 28,8 \text{ [mm]} \quad (2.15)$$

Pólová rozteč statoru:

$$t_{p1} = \frac{\pi \cdot D_1}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,055}{4} = 43,2 \text{ [mm]} \quad (2.16)$$

Průměr rotoru:

$$D_2 = D_1 - 2 \cdot \delta = 0,055 - 2 \cdot 0,001 = 53 \text{ [mm]} \quad (2.17)$$

## 2.3 Návrh vinutí statoru

Pro návrh motoru s PM je zvoleno zubové vinutí, které má několik výhod jako je vysoká účinnost, krátká čela vinutí, vysoký činitel využití drážky.

Počet vrstev vinutí:

$$2u = 2 \quad (2.18)$$

Počet paralelních větví:

$$2a = 2 \quad (2.19)$$

Cívkový krok je jednotkový, tzn.:

$$y_{1d} = 1 \quad (2.20)$$

Celkový počet cívek statorového vinutí:

$$K = u \cdot Q = 1 \cdot 6 = 6 \quad (2.21)$$

Počet cívek na fázi:

$$N_{c/f} = \frac{K}{m} = \frac{6}{3} = 2 \quad (2.22)$$

Matematický počet fází:

$$m' = 6 \quad (2.23)$$

Počet skupin cívek:

$$N_{sk} = a \cdot m' = 1 \cdot 6 = 6 \quad (2.24)$$

Počet cívek na skupinu:

$$N_{c/sk} = \frac{K}{N_{sk}} = \frac{6}{6} = 1 \quad (2.25)$$

Proud procházející strojem:

$$I_c = \pi \cdot D_1 \cdot A = \pi \cdot 0,055 \cdot 108000 = 18661 \text{ [A]} \quad (2.26)$$

Proud procházející jednou drážkou:

$$I_d = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot A}{Q} = \frac{\pi \cdot 0,055 \cdot 108000}{6} = 3111 \text{ [A]} \quad (2.27)$$

Počet vodičů v drážce:

$$V_d = \frac{I_d}{I_n} = \frac{18661}{53,2} \doteq 60 \quad (2.28)$$

Počet vodičů v jedné vrstvě drážky:

$$V_c = \frac{V_d}{2u} = \frac{58}{2} \doteq 30 \quad (2.29)$$

Celkový počet závitů v sérii:

$$N_s = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot A}{N_{sk} \cdot I_n} = \frac{\pi \cdot 0,055 \cdot 108000}{6 \cdot 53} \doteq 60 \quad (2.30)$$

Počet drážek na pól:

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{6}{4} = 1,5 \quad (2.31)$$

Činitel vinutí pro n. harmonickou (z výpočtu výše):

$$\begin{aligned} k_{v1} &= 0,8660 \\ k_{v5} &= -0,8708 \\ k_{v7} &= 0,8685 \end{aligned} \quad (2.32)$$

## 2.4 Návrh drážky

Zuby budou konstantní šířky, tedy obdélníkové. Hodnota magnetické indukce v hlavě zuby:  $B_z = 1,10 \text{ T}$

Hodnota magnetické indukce ve vzduchové mezeře:  $B_\delta = 0,8 \text{ T}$

Činitel plnění železa:  $k_{Fe} = 0,97$

Celkový magnetický tok:

$$\begin{aligned}\phi &= \frac{U_i}{4 \cdot k_B \cdot N_s \cdot k_{v1} \cdot f} = \frac{k_E \cdot \frac{U_s}{\sqrt{3}}}{4 \cdot k_B \cdot N_s \cdot k_{v1} \cdot f} = \\ &= \frac{0,95 \cdot \frac{400}{\sqrt{3}}}{4 \cdot 1,1 \cdot 60 \cdot 0,866 \cdot 300} = 3,2 \text{ [mWb]}\end{aligned}\quad (2.33)$$

Magnetický tok v jhu:

$$\phi_j = \frac{1}{2} \cdot \phi = \frac{1}{2} \cdot 0,00325 = 1,6 \text{ [mWb]}\quad (2.34)$$

Magnetický tok v zubech se uvažuje stejný jako celkový magn. tok:

$$\phi_z = 3,2 \text{ [mWb]}\quad (2.35)$$

Velikost drážkové rozteče na průměru  $D_1$ :

$$t_{d1} = \frac{\pi \cdot D_1}{Q} = \frac{\pi \cdot 0,055}{6} = 28,8 \text{ [mm]}\quad (2.36)$$

Šířka zuby:

$$b_{z1} = \frac{B_\delta \cdot t_{d1}}{B_z \cdot k_{Fe}} = \frac{0,8 \cdot 0,0288}{1,10 \cdot 0,97} = 21,6 \text{ [mm]}\quad (2.37)$$

Výška statorového jha:

$$h_{j1} = \frac{\phi_j}{B_j \cdot k_{Fe} \cdot l} = \frac{2,79}{0,83 \cdot 0,97 \cdot 0,25} = 11,4 \text{ [mm]}\quad (2.38)$$

Předběžná hloubka drážky: mm

$$h_d = \frac{D_e - D_1}{2} - h_{j1} = \frac{0,18 - 0,055}{2} - 11,4 = 51,1 \text{ [mm]}\quad (2.39)$$

Šířka drážky  $b_1$ :

$$\begin{aligned}b_1 &= \frac{\pi \cdot (D_1 + 2 \cdot h_0 - b_0) - Q \cdot b_{z1}}{Q - \pi} = \\ &= \frac{\pi \cdot (0,055 + 2 \cdot 0,001 - 0,007) - 6 \cdot 0,216}{6 - \pi} = 9 \text{ [mm]}\end{aligned}\quad (2.40)$$

Šířka drážky  $b_2$ :

$$b_2 = \frac{\pi \cdot (D_1 + 2 \cdot h_d)}{Q} - b_{z1} = \frac{\pi \cdot (0,055 + 2 \cdot 0,0511)}{6} - 0,0216 = 60,7 \text{ [mm]}\quad (2.41)$$

kde  $b_0$  je otevření drážky, které volím  $b_0 = 7$  mm a výška horní části drážky  $h_0$ , kterou volím  $h_0 = 1$  mm.

Potom aktivní hloubka drážky je:

$$\begin{aligned} h_2 &= h_d - \left( h_0 + \frac{b_2 - b_0}{2} \right) = \\ &= 0,0511 - \left( 0,001 + \frac{0,0283 - 0,007}{2} \right) = 44,3 \text{ [mm]} \end{aligned} \quad (2.42)$$

A celková hloubka drážky:

$$h_d = h_1 + h_0 + \frac{b_2 - b_0}{2} = 0,0511 + 0,001 + \frac{0,0283 - 0,007}{2} = 51,1 \text{ [mm]} \quad (2.43)$$

Plocha pro vinutí:

$$S_d = \frac{b_1 + b_2}{2} \cdot h_1 = \frac{0,009 + 0,0607}{2} \cdot h_2 = 1545 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (2.44)$$

Plocha jednoho vodiče:

$$S_{Cu1} = \frac{I_N}{J} = \frac{53}{4,5} = 12 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (2.45)$$

a průřez vodiče tedy bude:  $d_v = 3,9$  mm

kde  $J = 4,43$  A/mm<sup>2</sup> je proudová hustota ve vodiči.

Celková plocha všech vodičů:

$$S_{Cu} = \frac{\pi \cdot d_v^2 \cdot V_D}{4} = \frac{\pi \cdot 3,9^2 \cdot 60}{4} = 717 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (2.46)$$

Činitel plnění drážky se potom určí ze vztahu:

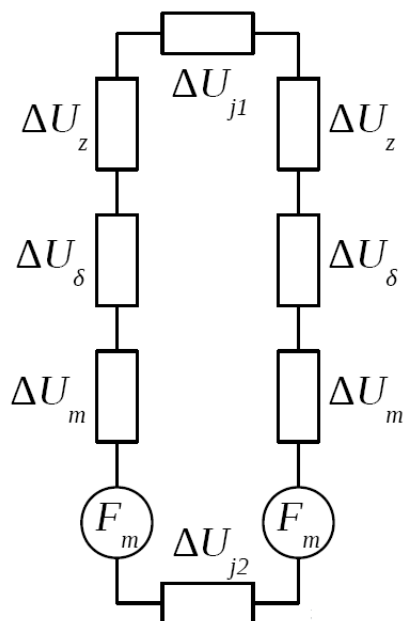
$$k_d = \frac{S_{Cu}}{S_d} = \frac{717}{1545} = 0,46 \quad (2.47)$$

## 2.5 Návrh permanentních magnetů

Výpočet permanentních magnetů vychází z výpočtu magnetického obvodu stroje. Náhradní schéma magnetického obvodu je uvedeno na obr. 2.1.

Při výpočtu se určí nejdříve jednotlivé části tohoto obvodu a pak lze pomocí Carterova činitele určit rozměry magnetů. Počet magnetů je stejný jako počet pólů stroje ( $2p = 4$ ), tzn. 4. Magnetická napětí permanentních magnetů jsou označena  $F_m$ . Úbytky magnetického napětí v magnetech jsou značeny  $\Delta U_m$ , v zubech  $\Delta U_z$  a ve vzduchové mezeře  $\Delta U_\delta$ . Úbytky magnetických napětí ve jhu stroje mají označení  $\Delta U_{j1}$  a  $\Delta U_{j2}$ .

Materiál magnetů volím NdFeB, konkrétně N38SH. Kalataogový list tohoto materiálu PM je uveden v příloze. Zub je konstantní šířky, takže magnetická indukce bude ve všech



**Obr. 2.1:** Náhradní schéma magnetického obvodu [5]

částech zubu stejná.

Magnetická indukce v jhu rotoru bude stejná jako v jhu statoru, tedy  $B_{jr} = 1\text{ T}$ .

Magnetická intenzita se určí ze zdroje [1]:  $H_{z1} = 295\text{ A/m}$

Magnetické napětí v zubu statoru:

$$\Delta U_z = H_{z1} \cdot b_{z1} = 295 \cdot 0,0216 = 15\text{ [A]} \quad (2.48)$$

Indukce v jhu statoru  $B_{j1}$  je 1 T a magnetická intenzita v jhu statoru se odečte z tabulky za zdroje [1]:  $H_{j1} = 116\text{ A/m}$

Délka střední indukční siločáry ve statorovém jhu:

$$l_{j1} = \frac{\pi \cdot (D_e - h_{j1})}{2p} = \frac{\pi \cdot (0,18 - 0,0114)}{4} = 0,132\text{ [m]} \quad (2.49)$$

Magnetické napětí ve statorovém jhu:

$$\Delta U_{j1} = H_{j1} \cdot l_{j1} = 116 \cdot 0,132 = 15,4\text{ [A]} \quad (2.50)$$

Indukce ve vzduchové mezeře:  $B_\delta = 0,8\text{ T}$

Magnetická intenzita ve vzduchové mezeře se spočte ze vztahu:

$$H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} = \frac{0,8}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 636619\text{ [A/m]} \quad (2.51)$$

kde  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  H/m je permeabilita vakua.

Velikost vzduchové mezery  $\delta = 1$  mm. Indukce v magnetech bude stejná jako indukce ve vzduchové mezeře, jelikož průřez a magn. tok výše zmiňovaného magnetického obvodu jsou ve všech místech stejné. Předběžnou výšku permanentního magnetu  $h_m$  volím 1 mm. Následně se výška permanentního magnetu bude zpřesňovat pomocí výpočtu Carterova činitele v několika iteračních krocích.

Magnetická intenzita v magnetech se spočte jako:

$$H_m = \frac{B_m}{\mu_0 \cdot \mu_r} = \frac{0,8}{4\pi 10^{-7} \cdot 1,05} = 606304,5 \text{ [A/m]} \quad (2.52)$$

kde  $\mu_r$  je relativní permeabilita zjištěná z katalogového listu PM N38SH.

Magnetické napětí v magnetech:

$$\Delta U_m = H_m \cdot h_m = 606304,5 \cdot 0,001 = 606,3 \text{ [A]} \quad (2.53)$$

Magnetická indukce jha rotoru bude stejná jako magnetická indukce jha statoru:  $B_{j2} = 1$  T a magnetická intenzita se opět odečte z tabulky ze zdroje [1]:  $H_{j2} = 217$  A/m.

Délka střední indukční siločáry v rotorovém jhu:

$$l_{j2} = \frac{\pi \cdot (D_1 - 2 \cdot \delta - h_m)}{2p} = \frac{\pi \cdot (0,055 - 2 \cdot 0,001 - 0,001)}{4} = 0,0406 \text{ [m]} \quad (2.54)$$

Magnetické napětí v jhu rotoru:

$$\Delta U_{j2} = H_{j2} \cdot l_{j2} = 217 \cdot 0,0406 = 8,8 \text{ [A]} \quad (2.55)$$



Nyní se zvolí předběžná výška magnetu, která bude 1 mm a pomocí iteračních kroků se bude tato hodnota upřesňovat s pomocí Carterova činitele a jeho konstanty  $\gamma_1$ .

### 1. iterace:

Konstanta Carterova činitele:

$$\gamma_1 = \frac{\frac{b_{d1}^2}{\delta}}{5 + \frac{b_{d1}}{\delta}} = \frac{\frac{7,2^2}{1}}{5 + \frac{7,2}{1}} = 4,3 \quad (2.56)$$

Carterův čítel:

$$k_{c1} = \frac{t_d}{t_d - \delta \cdot \gamma} = \frac{28,8}{28,8 - 1 \cdot 4,3} = 1,17 \quad (2.57)$$

Velikost vzduchové mezery s uvažováním drážkování:

$$\delta' = k_c \cdot \delta = 1,17 \cdot 1 = 1,17 \text{ [mm]} \quad (2.58)$$

Magnetické napětí vzduchové mezery:

$$\Delta U_{\delta 1} = H_{\delta} \cdot \delta' = 636619 \cdot 1,17 = 747 \text{ [A]} \quad (2.59)$$

A potom výška magnetu:

$$\begin{aligned} h_{m1} &= \frac{2 \cdot \Delta U_{\delta} + 2 \cdot \Delta U_z + \Delta U_{j1} + \Delta U_{j2}}{2 \cdot (H_c - H_m)} = \\ &= \frac{2 \cdot 747 + 2 \cdot 15 + 15,4 + 8,8}{2 \cdot (947000 - 606304,5)} = 2,3 \text{ [mm]} \end{aligned} \quad (2.60)$$

### 2. iterace:

Přepočet vzduchové mezery:

$$\delta'' = h_{m1} + \delta = 2,3 + 1 = 3,3 \text{ [mm]} \quad (2.61)$$

Konstanta Carterova činitele:

$$\gamma_2 = \frac{\frac{b_{d1}^2}{\delta''}}{5 + \frac{b_{d1}}{\delta''}} = \frac{\frac{7,2^2}{3,3}}{5 + \frac{7,2}{3,2}} = 0,69 \quad (2.62)$$

Carterův čítel:

$$k_{c2} = \frac{t_d}{t_d - \delta'' \cdot \gamma_2} = \frac{28,8}{28,8 - 3,3 \cdot 0,69} = 1 \quad (2.63)$$

Velikost vzduchové mezery s uvažováním drážkování:

$$\delta_2'' = k_{c2} \cdot \delta = 1 \cdot 1 = 1,00 \text{ [mm]} \quad (2.64)$$

Magnetické napětí vzduchové mezery:

$$\Delta U_{\delta 2} = H_{\delta} \cdot \delta_2'' = 636619 \cdot 1,00 = 636,7 \text{ [A]} \quad (2.65)$$

A potom výška magnetu:

$$\begin{aligned} h_{m2} &= \frac{2 \cdot \Delta U_{\delta} + 2 \cdot \Delta U_z + \Delta U_{j1} + \Delta U_{j2}}{2 \cdot (H_c - H_m)} = \\ &= \frac{2 \cdot 636,7 + 2 \cdot 15 + 15,4 + 8,8}{2 \cdot (947000 - 606304,5)} = 1,9 \text{ [mm]} \end{aligned} \quad (2.66)$$

### 3. iterace:

Přepočítání vzduchové mezery:

$$\delta''' = h_{m2} + \delta = 1,9 + 1 = 2,9 \text{ [mm]} \quad (2.67)$$

Konstanta Carterova činitele:

$$\gamma_3 = \frac{\frac{b_{d1}^2}{\delta'''} = \frac{7,2^2}{2,9}}{5 + \frac{b_{d1}}{\delta'''} = 5 + \frac{7,2}{2,9}} = 0,82 \quad (2.68)$$

Carterův činitel:

$$k_{c3} = \frac{t_d}{t_d - \delta''' \cdot \gamma_3} = \frac{28,8}{28,8 - 2,9 \cdot 0,82} = 1 \quad (2.69)$$

Velikost vzduchové mezery s uvažováním drážkování:

$$\delta_3''' = k_{c3} \cdot \delta = 1 \cdot 1 = 1,00 \text{ [mm]} \quad (2.70)$$

Magnetické napětí vzduchové mezery:

$$\Delta U_{\delta 3} = H_{\delta} \cdot \delta_3''' = 636619 \cdot 1,00 = 636,7 \text{ [A]} \quad (2.71)$$

A potom výška magnetu:

$$\begin{aligned} h_{m3} &= \frac{2 \cdot \Delta U_{\delta} + 2 \cdot \Delta U_z + \Delta U_{j1} + \Delta U_{j2}}{2 \cdot (H_c - H_m)} = \\ &= \frac{2 \cdot 636,7 + 2 \cdot 3,5 + 15,4 + 8,8}{2 \cdot (947000 - 606304,5)} = 1,9 \text{ [mm]} \end{aligned} \quad (2.72)$$

Již ve 3. iteračním kroku lze pozorovat, že výška magnetu  $h_m$  se už v podstatě moc nemění. Skutečná výška magnetu je zaokrouhlena na 2 mm.

Šířka magnetu se určí dle vztahu:

$$\alpha \cdot t_{p1} = 0,64 \cdot 0,43 = 27,6 \text{ [mm]} \quad (2.73)$$

## 2.6 Výpočet odporu vinutí

Vzhledem k volbě zubového vinutí, které má menší čela, je omezen ohyb vodičů. Střed ohybu je volen 5 mm od okraje statorových plechů. Rezistivita vodiče vinutí při 20°C podle [1]:  $\rho_{v20} = \frac{1}{57} \cdot 10^{-6} \cdot \Omega/\text{m}$

Výpočet délky čela statorového vinutí se spočte:

$$l_c = \frac{\pi \cdot t_{d1}}{2} + 5 = \frac{\pi \cdot 28,8}{2} + 5 = 50 \text{ [mm]} \quad (2.74)$$

Střední délka závitů statorového vinutí:

$$l_{z1} = 2 \cdot (l + l_c) = 2 \cdot (147 + 50) = 395 \text{ [mm]} \quad (2.75)$$

Odpor statorového vinutí při 20°C:

$$R_{20} = \frac{\rho_{v20} \cdot N_s \cdot l_{z1}}{a \cdot S_{Cu}} = \frac{\frac{1}{57} \cdot 10^{-6} \cdot 60 \cdot 0,395}{1 \cdot 12 \cdot 10^{-6}} = 0,035 \text{ [\Omega]} \quad (2.76)$$

## 2.7 Výpočet rozptylové indukčnosti vinutí

Činitel zkrácení kroku vinutí:

$$\beta = \frac{y_{1d}}{Q_p} = \beta = \frac{1}{1,5} = 0,6\bar{6} \quad (2.77)$$

Činitel závisící na kroku vinutí:

$$\begin{aligned} k'_\beta &= \frac{1}{4} \cdot (1 + 3 \cdot \beta) = \frac{1}{4} \cdot (1 + 3 \cdot 0,6\bar{6}) = 0,75 \\ k_\beta &= \frac{1}{4} \cdot (1 + 3 \cdot k'_\beta) = \frac{1}{4} \cdot (1 + 3 \cdot 0,75) = 0,81 \end{aligned} \quad (2.78)$$

Činitel magnetické vodivosti drážkového rozptylu závisí na tvaru drážky a na uložení vinutí v drážce:

$$\begin{aligned} \lambda_d &= \frac{h_2 \cdot k_\beta}{3b} + \left( 0,785 - \frac{b_0}{2b} + \frac{h_1}{b} + \frac{h_0}{b_0} \right) = \\ &= \frac{0,443 \cdot 0,81}{3 \cdot 0,009} + \left( 0,785 - \frac{0,007}{2 \cdot 0,009} + \frac{0,001}{0,009} + \frac{0,001}{0,007} \right) = 0,78 \end{aligned} \quad (2.79)$$

Činitel magnetické vodivosti rozptylu čel:

$$\begin{aligned} \lambda_c &= 0,34 \cdot \frac{q}{l} \cdot (l_c - 0,64 \cdot \beta \cdot t_p) = \\ &= 0,34 \cdot \frac{0,5}{0,147} \cdot (0,5 - 0,64 \cdot \beta \cdot 0,432) = 0,037 \end{aligned} \quad (2.80)$$

Střední velikost vzduchové mezery:

$$\delta' = \delta \cdot k_{c3} = 0,001 \cdot 1,0001 = 1 \text{ [mm]} \quad (2.81)$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu:

$$\lambda_{dif} = \frac{0,03 \cdot t_{p1} \cdot \alpha}{(\delta' + h_{ms}) \cdot k_{c3} \cdot q} = \frac{0,03 \cdot 0,432 \cdot 0,64}{(0,001 + 0,001) \cdot 1,0001 \cdot 0,5} = 0,83 \quad (2.82)$$

Výpočet rozptylové reaktance jedné fáze:

$$\begin{aligned} X_{\sigma 1} &= 15,8 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_s}{100}\right)^2 \cdot \frac{l}{p \cdot q} \cdot (\lambda_d + \lambda_c + \lambda_{dif}) = \\ &= 15,8 \cdot \frac{300}{100} \cdot \left(\frac{60}{100}\right)^2 \cdot \frac{0,147}{2 \cdot 0,5} \cdot (0,78 + 0,037 + 0,83) = 4,1 \text{ } [\Omega] \end{aligned} \quad (2.83)$$

Magnetizační napětí obvodu:

$$\begin{aligned} F_m &= 2 \cdot (U_\delta + U_z + U_m) \cdot U_{j1} + U_{j2} = \\ &= 2 \cdot (637 + 15 + 606) \cdot 15,4 + 8,8 = 2540 \text{ } [A] \end{aligned} \quad (2.84)$$

Magnetizační proud:

$$I_\mu = \frac{p \cdot F_m}{0,9 \cdot m \cdot N_s \cdot k_{v1}} = \frac{2 \cdot 2540}{0,9 \cdot 3 \cdot 60 \cdot 0,866} = 35,9 \text{ } [A] \quad (2.85)$$

Synchronní reaktance:

$$X_d = \frac{k_E \cdot U}{I_\mu} = \frac{0,95 \cdot 400}{35,9} = 10,6 \text{ } [\Omega] \quad (2.86)$$

Indukčnost motoru:

$$L = \frac{X_d}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{10,6}{2 \cdot \pi \cdot 300} = 5,6 \text{ } [\text{mH}] \quad (2.87)$$

## 2.8 Stanovení ztrát a účinnosti

Ztráty lze dělit na ztráty hlavní a ztráty dodatečné [1]. Jde hlavně o ztráty, které vznikají v mědi, železe i permanentních magnetech, mechanické a přídavné ztráty.

Jouleovy ztráty jsou způsobeny průchodem proudu ve vodičích:

$$\Delta P_{j1} = m \cdot R \cdot I_n^2 = 3 \cdot 0,032 \cdot 53^2 = 283,8 \text{ } [W] \quad (2.88)$$

K výpočtu magnetických ztrát v jhu a zubech statoru je potřeba znát některé další veličiny: hodnota činitele uvažující zvětšení ztrát v důsledku zkratování plechů vlivem otřepů a změny struktury oceli při lisování  $k_{dj} = 1,5$  a  $k_{dz} = 2$  a měrné ztráty plechu M350-50A dány normou EN 10106 zjištěné ze zdroje [6]:  $\Delta p = 1,5$ .

Hmotnost statorového jha:

$$\begin{aligned} m_{j1} &= \rho_{Fe} \cdot l \cdot k_{Fe} \cdot \pi \cdot (D_1 - h_{j1}) = \\ &= 7650 \cdot 0,147 \cdot 0,97 \cdot \pi \cdot (0,055 - 0,0114) = 6,6 \text{ } [\text{kg}] \end{aligned} \quad (2.89)$$

Hmotnost zubů statoru:

$$\begin{aligned} m_{z1} &= \rho_{Fe} \cdot l \cdot k_{Fe} \cdot h_z \cdot b_{d1/2} \cdot Q = \\ &= 7650 \cdot 0,147 \cdot 0,97 \cdot 0,034 \cdot 0,0216 \cdot 6 = 7,2 \text{ [kg]} \end{aligned} \quad (2.90)$$

kde

$$b_{d1/2} = \frac{\pi \cdot (D_1 + h_z)}{Q} - b_z = \frac{\pi \cdot (0,055 + 0,0511)}{6} - 0,0216 = 0,034 \text{ [m]} \quad (2.91)$$

a kde  $\rho_{Fe} = 7650 \text{ kg/m}^3$  je hustota plechů zjištěna rovněž z [6].

Potom ztráty ve jhu statoru:

$$\begin{aligned} \Delta P_{Fej} &= k_{dj} \cdot \Delta p \cdot B_{j1}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{j1} = \\ &= 1,5 \cdot 1,5 \cdot 1^2 \cdot \left(\frac{300}{50}\right)^{1,3} \cdot 6,6 = 152,2 \text{ [W]} \end{aligned} \quad (2.92)$$

Ztráty v železe zubů statoru:

$$\begin{aligned} \Delta P_{Fez} &= k_{dz} \cdot \Delta p \cdot B_{z1}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{z1} = \\ &= 2 \cdot 1,5 \cdot 1,10^2 \cdot \left(\frac{300}{50}\right)^{1,3} \cdot 7,2 = 269,3 \text{ [W]} \end{aligned} \quad (2.93)$$

Ke stanovení mechanických ztrát je nutné znát obvodovou rychlost rotoru:

$$v = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,055 \cdot 9000}{60} = 25,9 \text{ [m/s]} \quad (2.94)$$

Mechanické ztráty:

$$\Delta P_{mech} = v^{2,5} \cdot D_1 \cdot \sqrt{l} = 25,9^{2,5} \cdot 0,055 \cdot \sqrt{0,147} = 72,1 \text{ [W]} \quad (2.95)$$

Přídavné ztráty dle [1] lze odhadnout jako 0,5 % činného výkonu:

$$\Delta P_p = 0,005 \cdot P = 0,005 \cdot 35000 = 175 \text{ [W]} \quad (2.96)$$

A poslední ztráty jsou ztráty v permanentních magnetech, které lze stanovit např. podle [3] jako 2/3 ztrát v mědi:

$$\Delta P_{pm} = \frac{2}{3} \cdot \Delta P_{j1} = \frac{2}{3} \cdot 283,8 = 189,2 \text{ [W]} \quad (2.97)$$

Celkové ztráty synchronního motoru jsou dány jako součet všech dílčích ztrát:

$$\begin{aligned}\Delta P &= \Delta P_{j1} + \Delta P_{Fej} + \Delta P_{Fesz} + \Delta P_{mech} + \Delta P_p + \Delta P_{pm} = \\ &= 283,8 + 152,2 + 269,3 + 72,1 + 175 + 189,2 = 1141,7 \text{ [W]}\end{aligned}\quad (2.98)$$

Ze spočítaných ztrát a lze stanovit účinnost synchronního motoru s PM:

$$\eta = \frac{P}{P + \Delta P} = \frac{35000}{35000 + 1141,7} = 0,968 \quad (2.99)$$

# 3

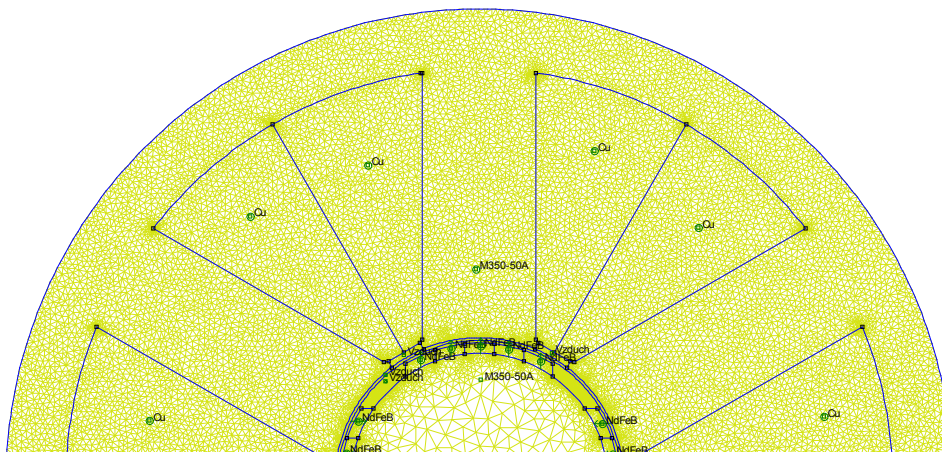
## Analýza motoru v programu FEMM

### 3.1 Definice problému

V programu QCAD byl nakreslen model synchronního motoru s PM. Je zde modelován pouze synchronní stroj a to z důvodu, že synchronní stroj s PM a bezkartáčový stejnosměrný stroj jsou z konstrukčního hlediska shodné. Liší se průběhem indukovaného napětí, které lze upravovat tvarem PM. Proto výsledné rozčlenění na stejnosměrný či synchronní stroj bude záviset právě na výsledcích analýzy magn. pole stroje. Model stroje byl importován v programu FEMM. Jednotlivým částem stroje byly v programu FEMM nadefinovány materiálové vlastnosti:

Drážky byly vyplněny mědí. U plechů M350-50A, které jsou použity u statorového jha byla použita charakteristika z [1], byl zadán činitel plnění  $k_{Fe} = 0,97$  a tloušťka plechů 0,35 mm. Magnety byly nadefinovány s relativní permeabilitou  $\mu_r = 1,05$  a koercitivitou  $H_c = 947$  kA/m. Hloubka problému byla zadána 147 mm a jako poslední byla zadána okrajová podmínka. Magnet je rozdělen na pět menších segmentů a to z důvodu zadávání směru magnetizace v jednotlivých segmentech v programu FEMM zvlášť.

Kromě zobrazení rozložení magnetického pole v programu FEMM v jednotlivých případech je zde dále pomocí programu MATLAB zobrazeno indukované napětí a jeho spektrum, magnetická indukce ve vzduchové mezeře a její spektrum. Skripty, které byly použity pro zobrazení všech průběhů (jak v programu MATLAB, tak v programu FEMM) byly poskytnuty vedoucím této diplomové práce.

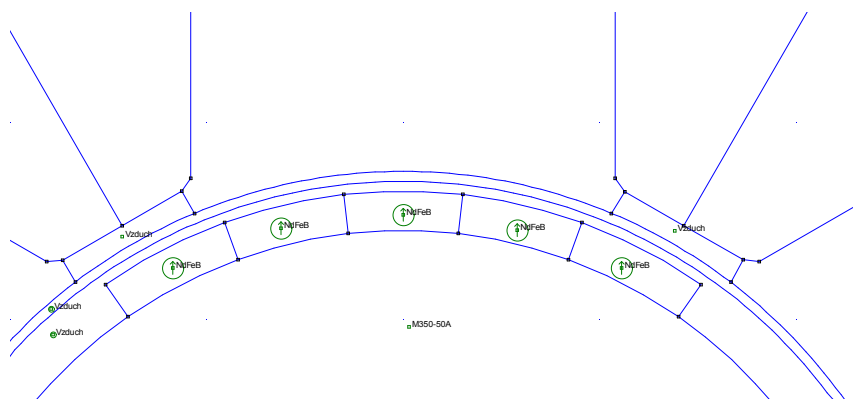


Obr. 3.1: Nadefinovaný model v programu FEMM



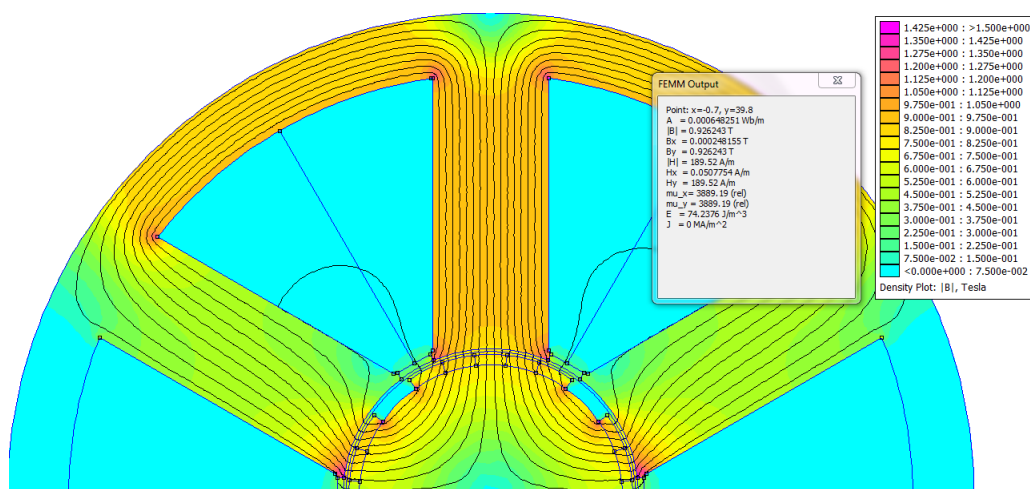
## 3.2 Rotor s povrchovou montáží a paralelní magnetizací magnetů

Jako první uvažovaný případ je zde rotor s povrchovou montáží magnetů k rotoru, kde hrany magnetů jsou kolmé na rotor. V tomto případě byla použita paralelní magnetizace PM.



Obr. 3.2: Detail tvaru PM s hranami kolnými na rotor

Na obr. 3.3 je zobrazena magnetická indukce v zubech, která je oproti původnímu návrhu o něco nižší, jak je vidět z obr.3.3. Stejně tak indukce ve jhu je nižší, v návrhu je hodnota 1T, v modelu stroje je to asi 0,88 T. Je zde vidět, že siločáry magn. pole procházejí z části i drážkou.



Obr. 3.3: Zobrazení rozložení magn. pole PM s paralelní magnetizací

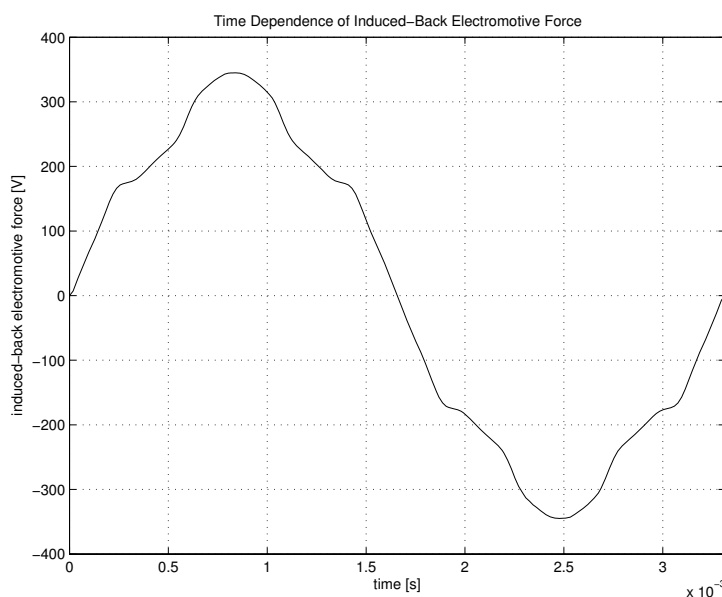
Dále je zde zobrazen průběh indukovaného napětí, který je dán vztahem:

$$u_i = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \cdot N_c \text{ [V]} \quad (3.1)$$

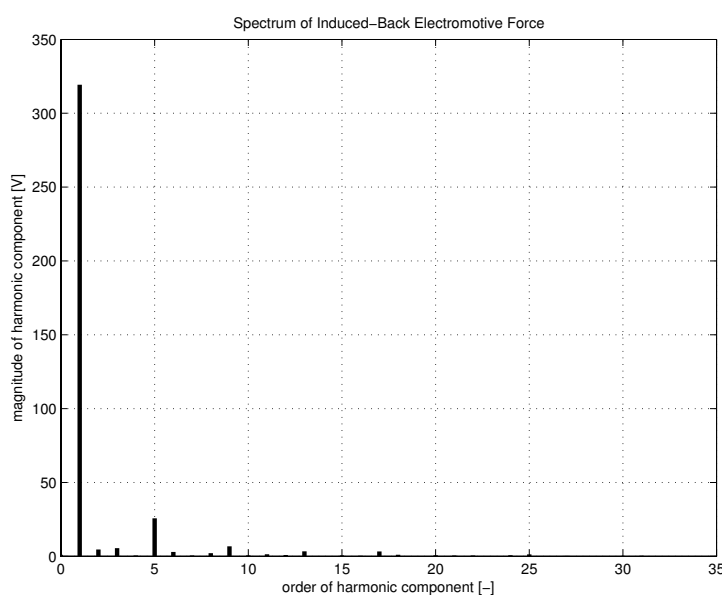
kde  $\Delta t$  se spočte jako:

$$\Delta t = \frac{1}{N \cdot p \cdot n} \text{ [s]} \quad (3.2)$$

kde  $N$  je počet kroků,  $n$  je počet otáček v sekundách a  $p$  je počet pólových dvojic. Za magn. tok  $\Phi$  se dosazuje velikost rozdílu toků v polohách, které se zjišťují v programu FEMM a to tak, že byl spuštěn skript, nastavil se počet kroků (v tomto případě 180), zadaly se souřadnice, které jsou v jedné polovině drážky (dosaženo maximum) a program počítá jednotlivé hodnoty magn. toku cívkami tak, že postupně otáčí rotorem podle zadaného počtu kroků. Výsledné hodnoty toků jsou zapsány do textového souboru, dále zpracovány v programu MS Excel, aby mohly být využity pro další zpracování v programu MATLAB tak, aby mohl být vykreslen průběh indukovaného napětí. Amplituda indukovaného napětí z analýzy je asi 325 V.

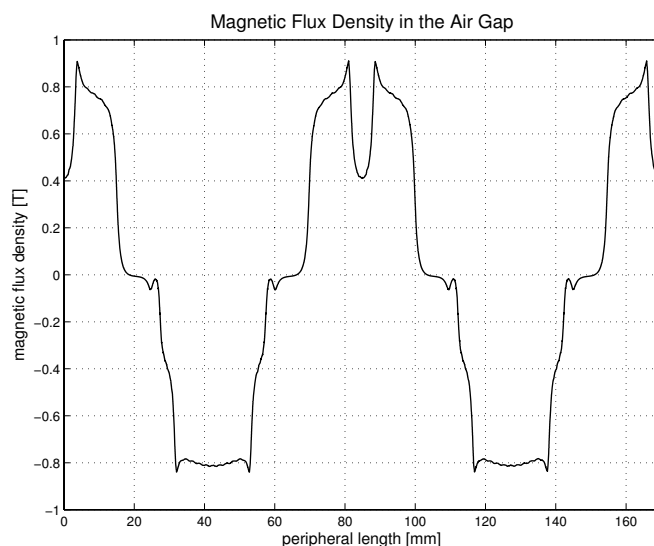


Obr. 3.4: Indukované napětí ve stroji s paralelní magnetizací magnetů



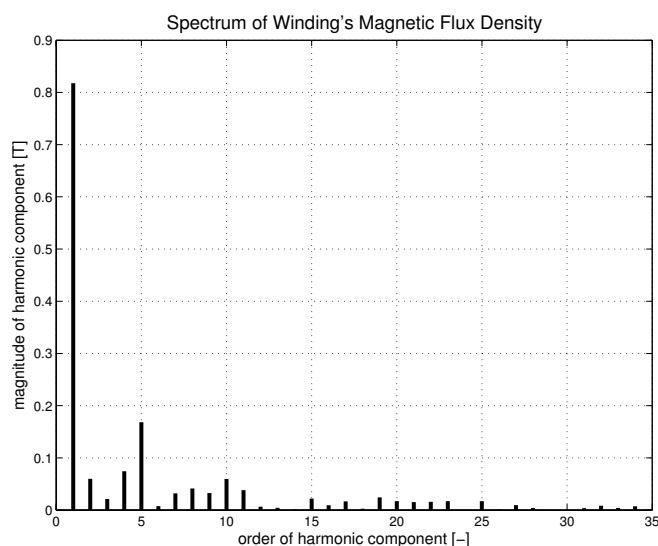
Obr. 3.5: Spektrum indukovaného napětí ve stroji s paralelní magnetizací magnetů

Na dalším obrázku je průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře, kde hodnota magnetické indukce z elektromagnetického návrhu je 0,8 T. Tento průběh byl získán pomocí programu MATLAB, kde bylo potřeba zadat průměr kružnice, ze které se daná indukce v programu bude odečítat (pomocná kružnice ve vzduchové mezeře mezi magnety a statorem). THD (total harmonic distortion) vyšlo v tomto případě 7,5%. Čím více je hodnota THD blíží nule, tím je průběh podobnější sinusovému průběhu.



**Obr. 3.6:** Průběh indukce ve vzduchové mezeře ve stroji s paralelní magnetizací magnetů

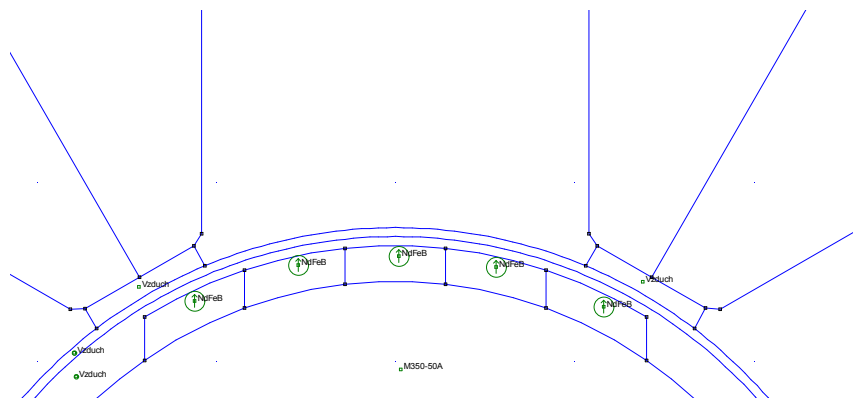
Obr. 3.7 byl získán také pomocí programu MATLAB. Jedná se o zobrazení spektra jednotlivých harmonických složek magnetické indukce ve vinutí. Amplituda indukce je zde rovna 0,82 T, tedy vyšší než bylo v návrhu.



**Obr. 3.7:** Spektrum magnetické indukce ve vinutí ve stroji s paralelní magnetizací magnetů

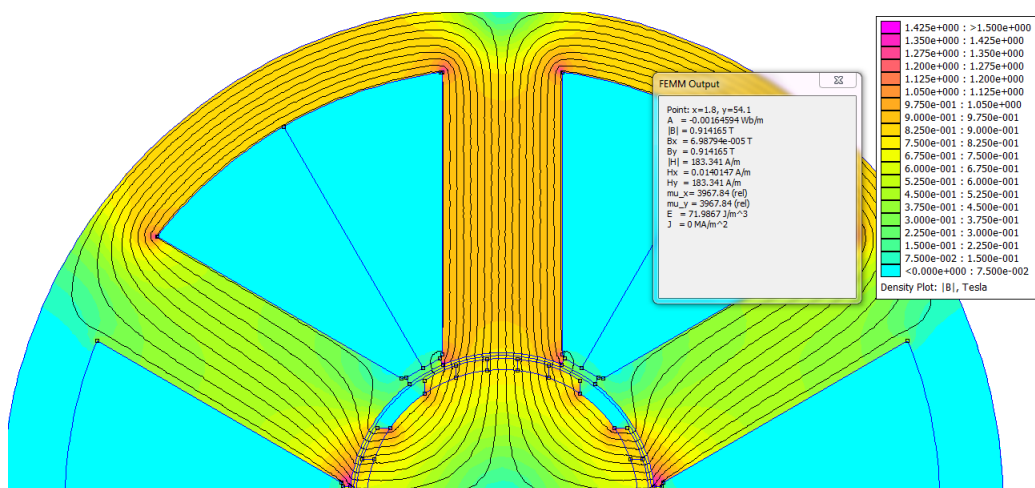
### 3.3 Rotor s povrchovou montáží s paralelními hranami a magnetizací magnetů

Na obr. 3.8 je znázorněn model motoru s PM s paralelními hranami a magnetizací magnetů. Tento tvar použitých magnetů je stejný pro další dva uvažované případy, pouze se mění směr magnetizace jednotlivých segmentů.



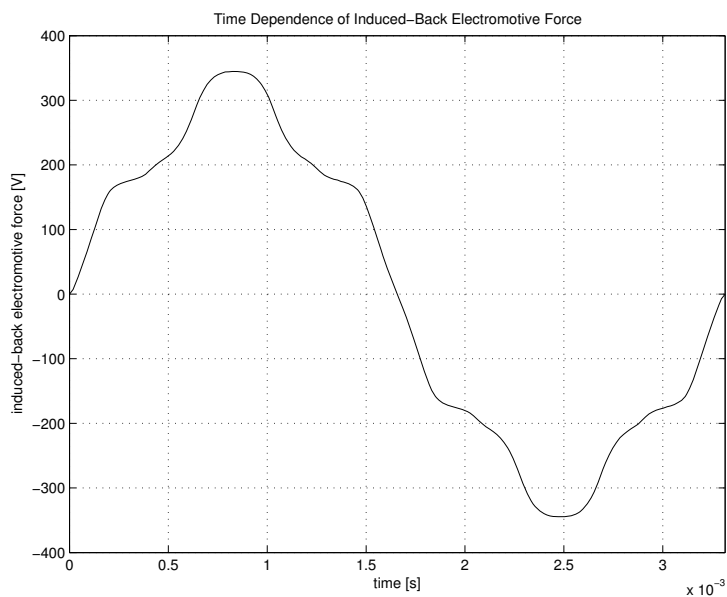
Obr. 3.8: Detail PM s paralelními hranami a magnetizací magnetů

Na obr. 3.9 je zobrazen model s paralelními hranami permanentních magnetů. Je zde vidět hodnota magnetické indukce v zubu statoru.

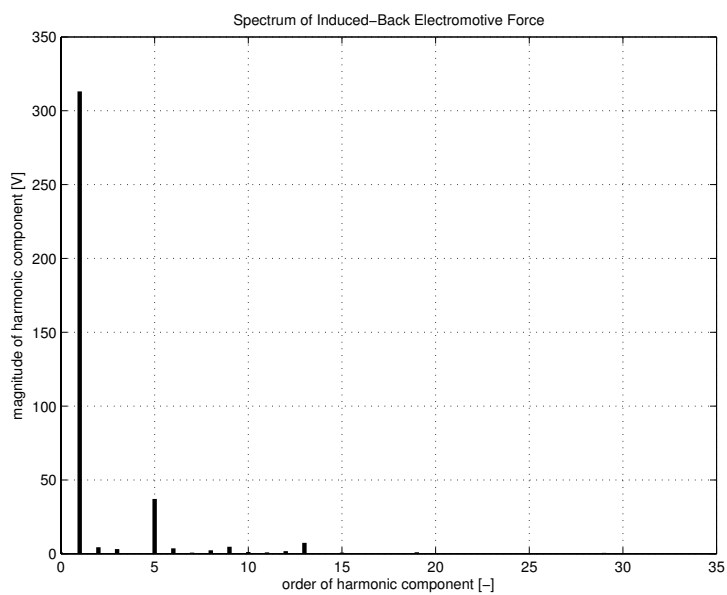


Obr. 3.9: Rozložení pole ve stroji s paralelními hranami a magnetizací magnetů

Indukované napětí na následujícím obrázku je zdeformované a jeho spektrum obsahuje vyšší harmonické, kde některé z nich mají nízkou hodnotu nebo úplně vymizely. Ovšem 5. harmonická složka má ve srovnání s ostatními případy vyšší hodnotu.

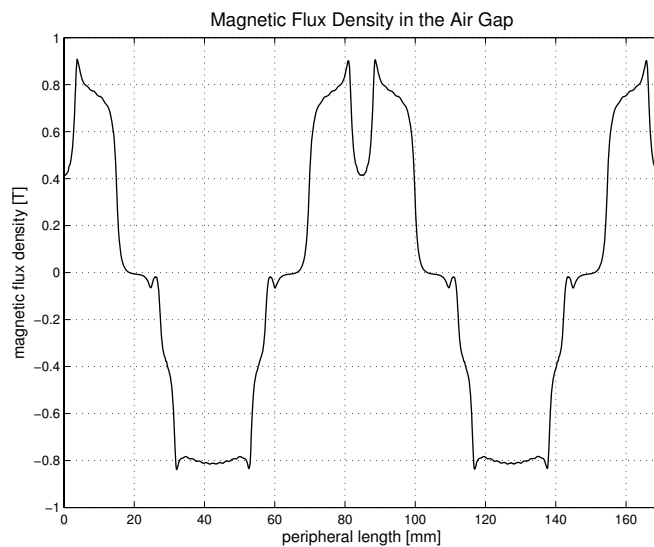


**Obr. 3.10:** Indukované napětí ve stroji s paralelními hranami a magnetizací magnetů

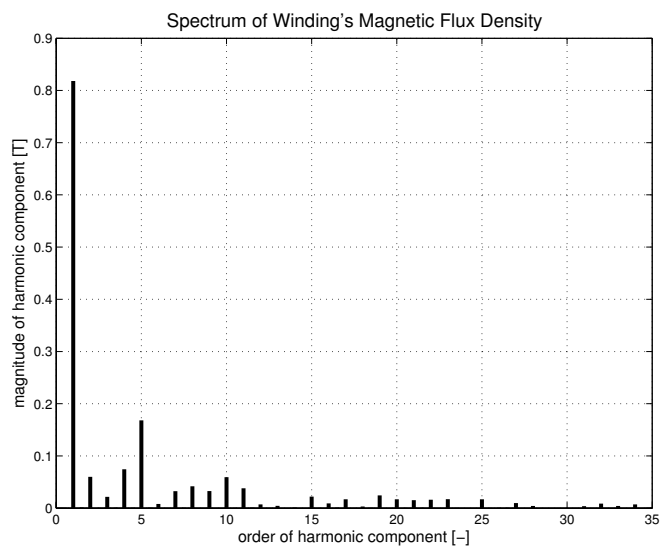


**Obr. 3.11:** Spektrum indukovaného napětí s paralelními hranami a magnetizací magnetů

Průběh indukce je ve vzduchové mezeře je na obr. 3.12. THD = 7,49%.



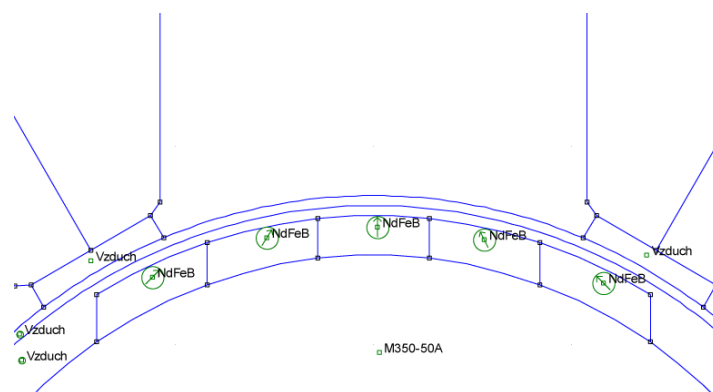
Obr. 3.12: Průběh indukce ve vzduchové mezeře s paralelními hranami a magnetizací magnetů



Obr. 3.13: Spektrum magnetické indukce ve vinutí s paralelními hranami a magnetizací magnetů

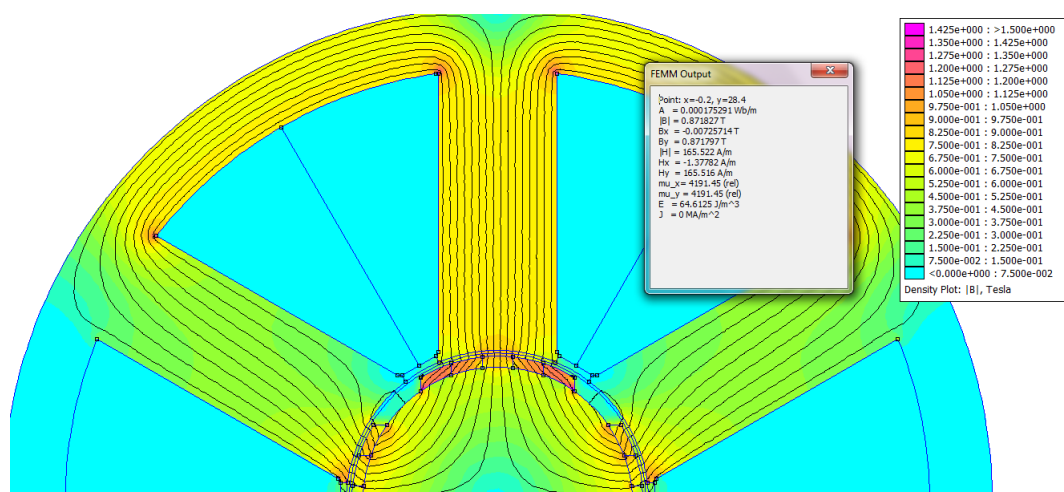
### 3.4 Rotor s povrchovou montáží s paralelními hranami a magnetizací magnetů směrem k jednomu bodu

Směr magnetizace permanentních magnetů byl změněn tak, aby vektor magnetizace všech permanentních magnetů na jednom pólu směřoval k určitému referenčnímu bodu.



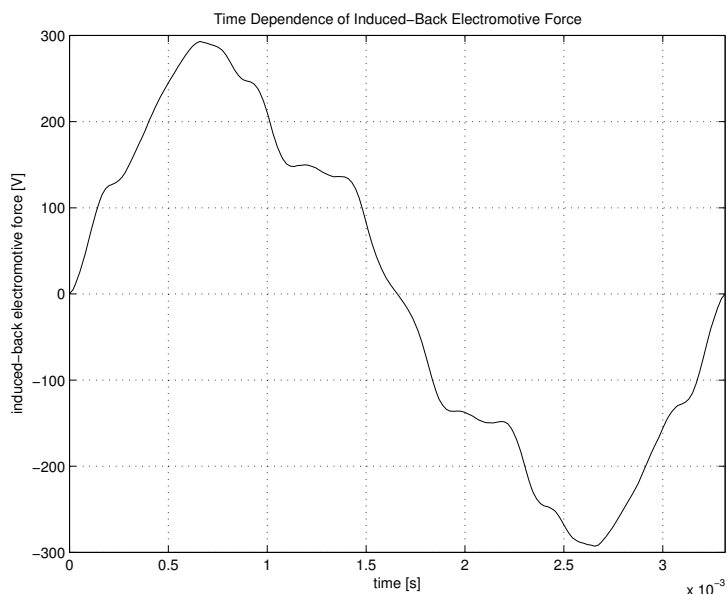
Obr. 3.14: Detail definice modelu pro jiný směr magnetizace

Jak je vidět z obr. 3.15, tak směr magnetizace permanentních magnetů zcela ovlivňuje výsledné rozložení magnetického pole, které se v zubech statoru výrazně zeslabilo a nejsilnější je v kořeni zubu, tzn. tam kam směřují šipky.



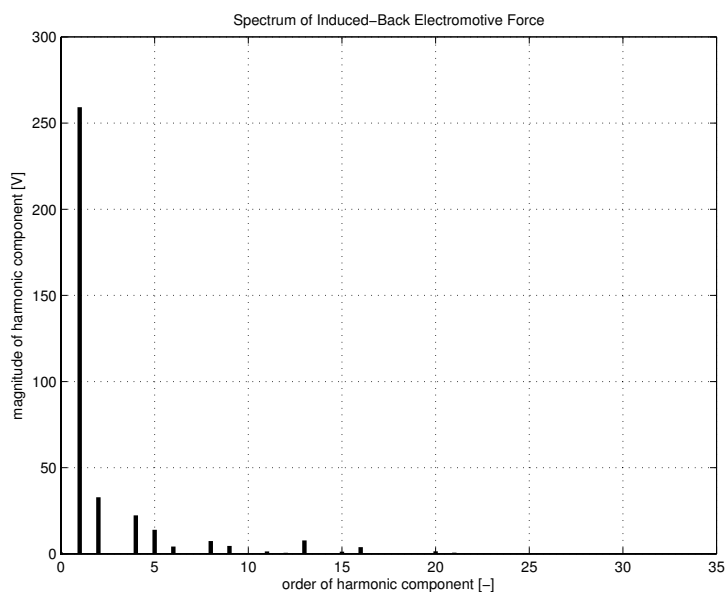
Obr. 3.15: Rozložení magnetického pole v magnetech s magnetizací k jednomu bodu

Průběh magnetického napětí v motoru je poměrně dost zdeformovaný a může za to právě změna směru magnetizace PM (tvar PM je stejný jako v předchozích případech).



**Obr. 3.16:** Indukované napětí ve stroji s magnetizací k jednomu bodu

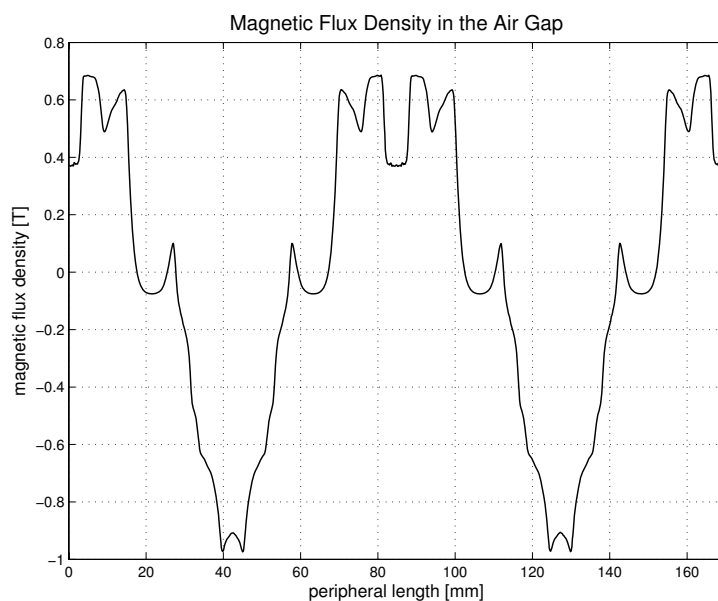
Na obr. 3.17 kde je uvedeno spektrum indukovaného napětí je vidět, že zde není 3.harmonická složka. Počet a velikost jednotlivých harmonických je větší než u ostatních variant. Průběh připomíná obdélníkový průběh, který je vlastně složen z nekonečného počtu harmonických průběhů.



**Obr. 3.17:** Spektrum indukovaného napětí ve stroji s magnetizací k jednomu bodu

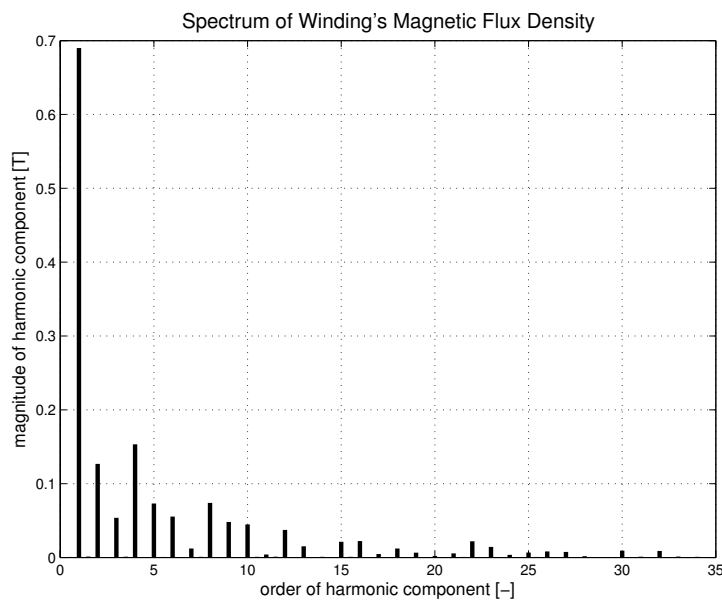


Průběh indukce také není nejlepší, oproti původní hodnotě 0.8 T je hodnota nižší (obr.3.18).



**Obr. 3.18:** Průběh indukce ve vzduchové mezeře ve stroji s magnetizací k jednomu bodu

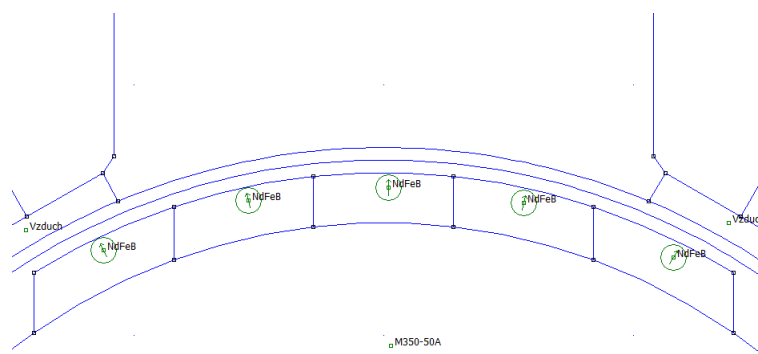
Hodota harmonického zkreslení zde dosahuje hodnoty 13,63%, což je ze všech zmiňovaných případů ta nejhorší možnost.



**Obr. 3.19:** Spektrum magnetické indukce ve vinutí ve stroji s magnetizací k jednomu bodu

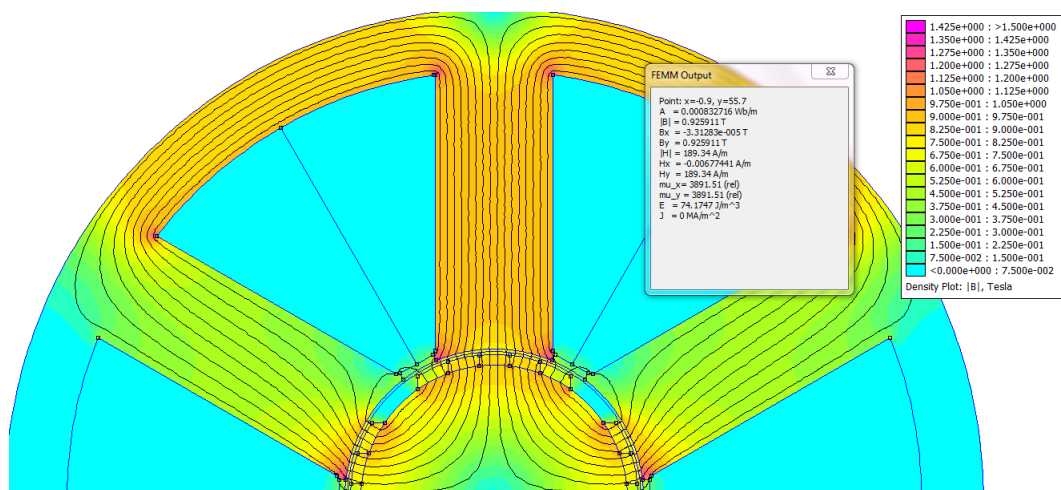
### 3.5 Rotor s povrchovou montáží s paralelními hranami a radiální magnetizací magnetů

Tvar PM je stejný jako v předchozím případě, tedy s paralelními hranami. Ovšem směr magnetizace se změnil na radiální magnetizaci, tzn. že směr magnetizace byl nastaven k ose (od osy) otáčení. Detail magnetizace PM je zobrazen na obrázku 3.20.



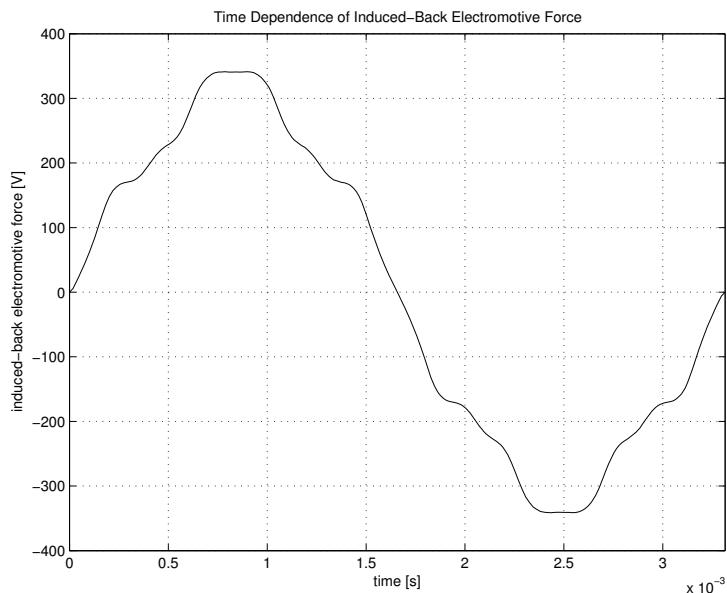
**Obr. 3.20:** Detail definice modelu pro radiální směr magnetizace

Rozložení magnetického pole s hodnotou indukce v zubu staroru je zobrazeno na obr.3.21



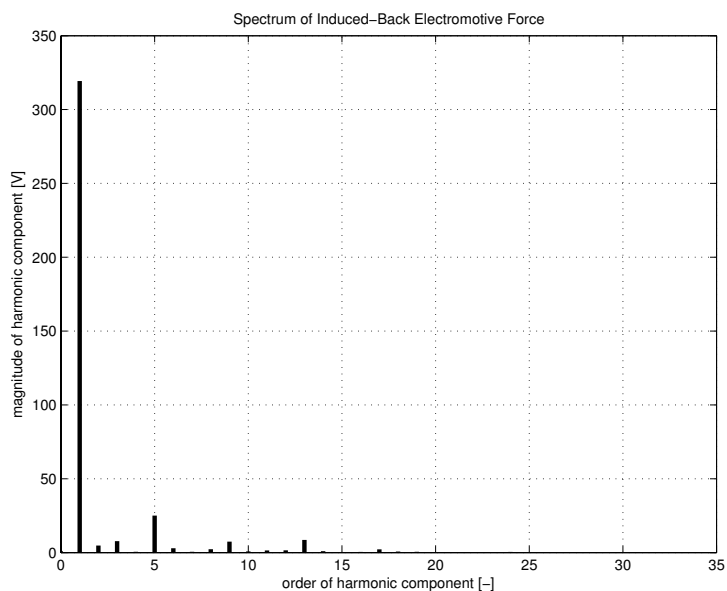
**Obr. 3.21:** Rozložení magnetického pole v PM s radiální magnetizací

Další obrázek zachycuje časově závislý průběh indukovaného napětí v motoru. Tento průběh je podobně zdeformovaný jako průběh u varianty s paralelní magnetizací nebo varianty s paralelními hranami a magnetizací magnetů.



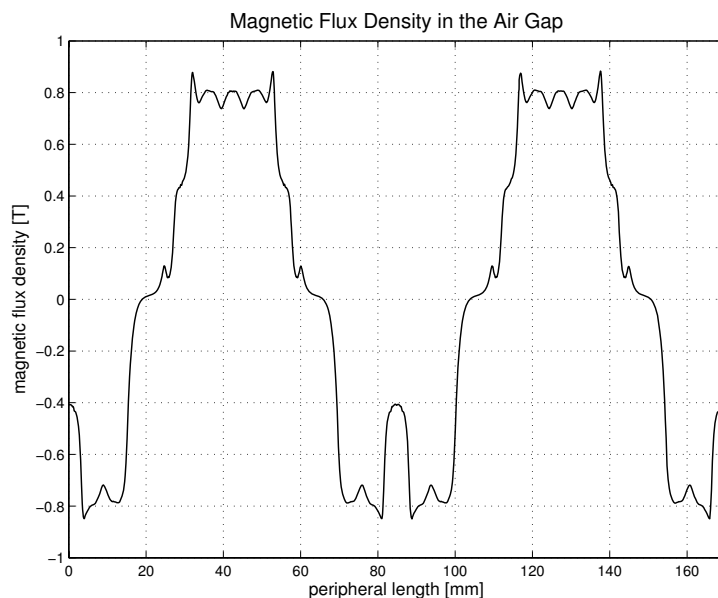
**Obr. 3.22:** Indukované napětí ve stroji s radiální magnetizací PM

Co se týče spektra indukovaného napětí, vyšší harmonické složky zde mají malou hodnotu, nejvíce se projevuje 5.harmonická a některé harmonické složky dokonce vymizí.

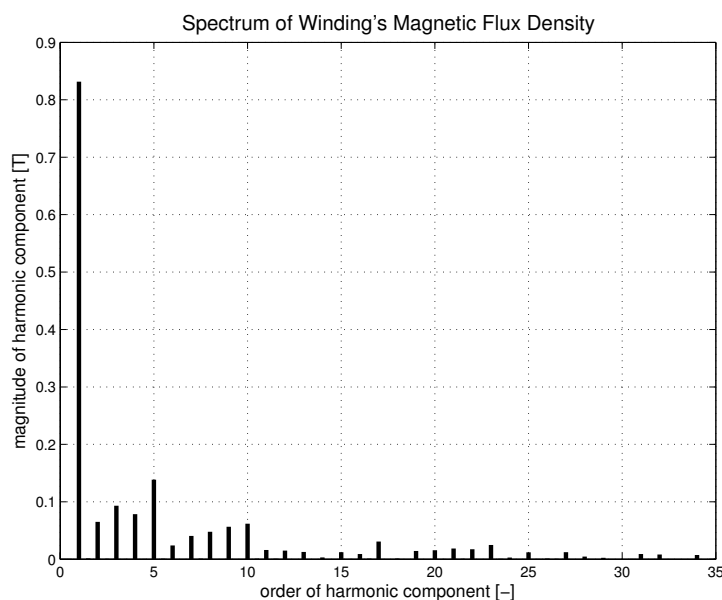


**Obr. 3.23:** Spektrum indukovaného napětí

Půběh indukce ve vzduchové mezeře je zobrazen na obr. 3.24, hodnota indukce odpovídá původní navrhované hodnotě. THD = 7,83%, což je podobná hodnota jako tomu bylo u rotoru s povrchovou montáží s paralelními hranami a magnetizací magnetů, tam byla hodnota THD = 7,49%.



Obr. 3.24: Průběh indukce ve vzduchové mezeře

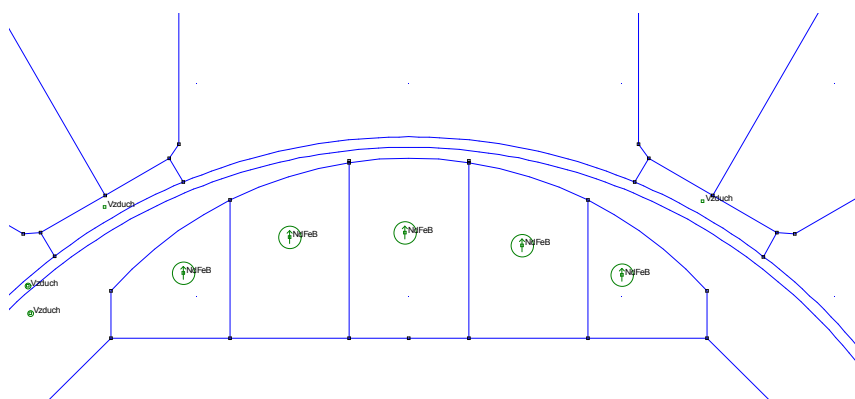


Obr. 3.25: Spektrum magnetické indukce ve vinutí

Pokud tedy uvažujeme stejný tvar magnetů a použijeme radiální a paralelní magnetizaci PM, tak se v těchto případech dosažené výsledky od sebe liší pouze nepatrně.

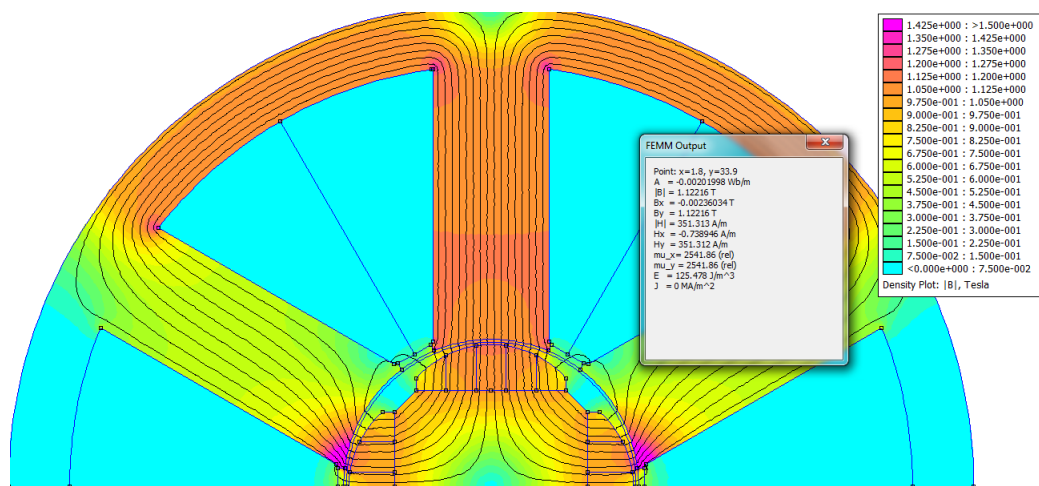
### 3.6 Rotor s povrchovou montáží s bochníkovým tvarem a paralelní magnetizací magnetů

V případě bochníkového tvaru magnetů jsou rozměry magnetů navíc dány jejich rádiusem (v anglické literatuře označováno jako bread-loaf: podle tvaru, který připomíná bochník chleba). Bylo tedy potřeba upravit rádius PM. Pokud by tento rádius magnetu byl zvolen mnohem větší než rádius rotoru, došlo by k tomu, že tvar magnetu by potom byl obdélníkový. Navíc je zde rozdíl od předchozích případů v tom, že zde není vzduchová mezera rovnoměrná, ale její šířka se mění.



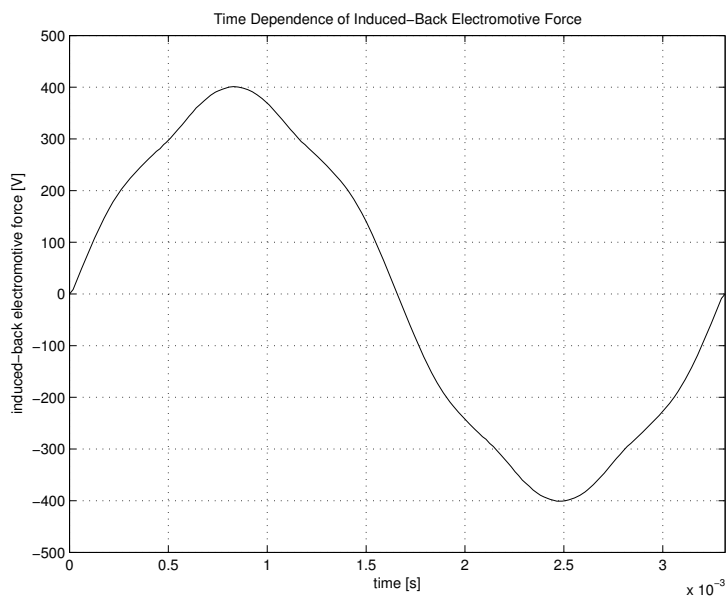
Obr. 3.26: Detail bochníkového tvaru PM

Z rozložení pole na obr.3.27 v tomto případě lze vidět, že hodnota indukce odpovídá ze všech dosud zmiňovaných případů navržených tvarů permanentních magnetů nejlépe.



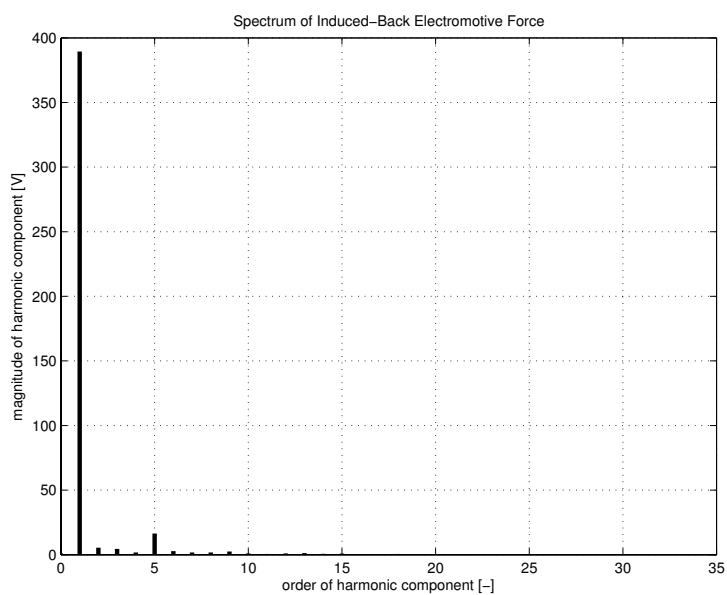
Obr. 3.27: Rozložení magn. pole v motoru s bochníkovým tvarem magnetů

Tvar indukovaného napětí v tomto případě téměř odpovídá harmonickému průběhu. Díky tomu je v porovnání s dalšími zde uvedenými případy tvarů a magnetizace magnetů právě tento průběh nejvhodnějším řešením při návrhu konstrukce synchronního stroje s permanentními magnety.



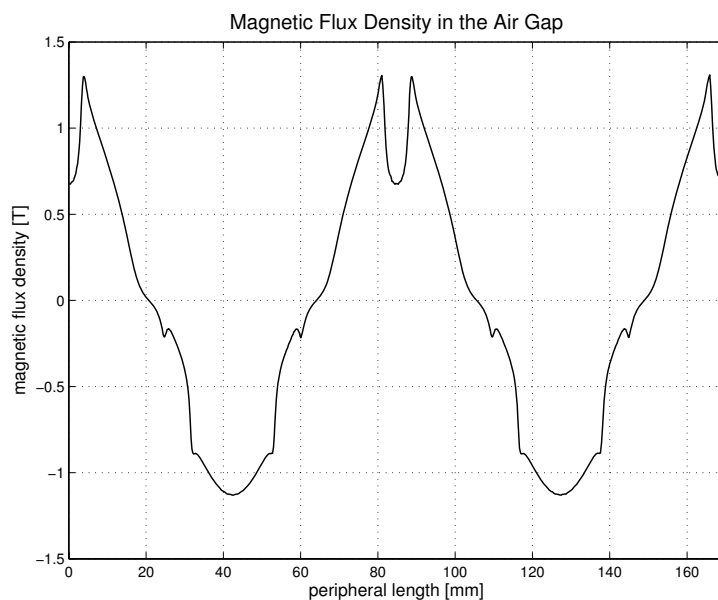
Obr. 3.28: Indukované napětí ve stroji s bočníkovým tvarem magnetů

Co se týče jednotlivých harmonických složek indukovaného napětí, opět zde nejvíce vyniká 5. harmonická, ostatní harmonické složky mají v porovnání s ostatními variantami velice zanedbatelnou hodnotu.

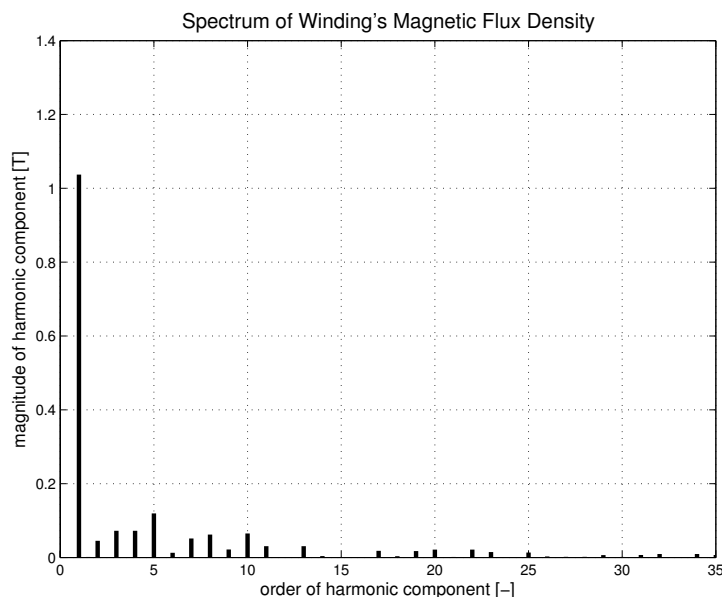


Obr. 3.29: Spektrum indukovaného napětí s bočníkovým tvarem magnetů

Činitel harmonického zkreslení THD vyšel v tomto případě 3,95%, což znamená, že původní průběh je zkreslený ze 3,95%. Jedná se o nejnižší hodnotu THD ze všech zde uvedených případů konstrukce rotorů s PM, tudíž i z tohoto hlediska je tento tvar PM nejvhodnější.



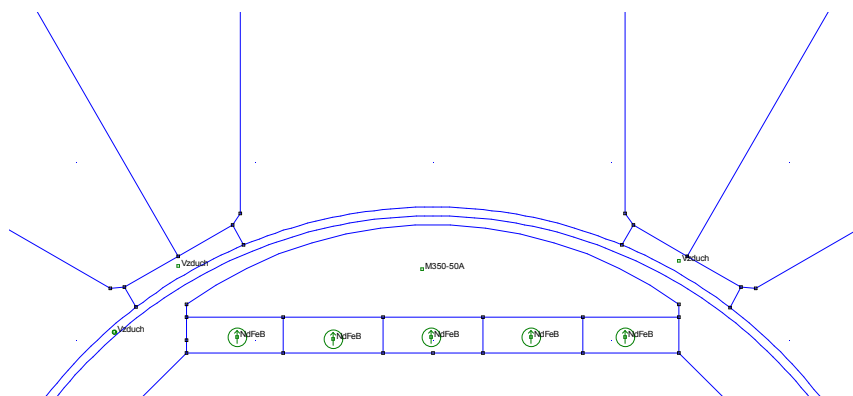
**Obr. 3.30:** Průběh indukce ve vzduchové mezeře



**Obr. 3.31:** Spektrum magnetické indukce ve vinutí

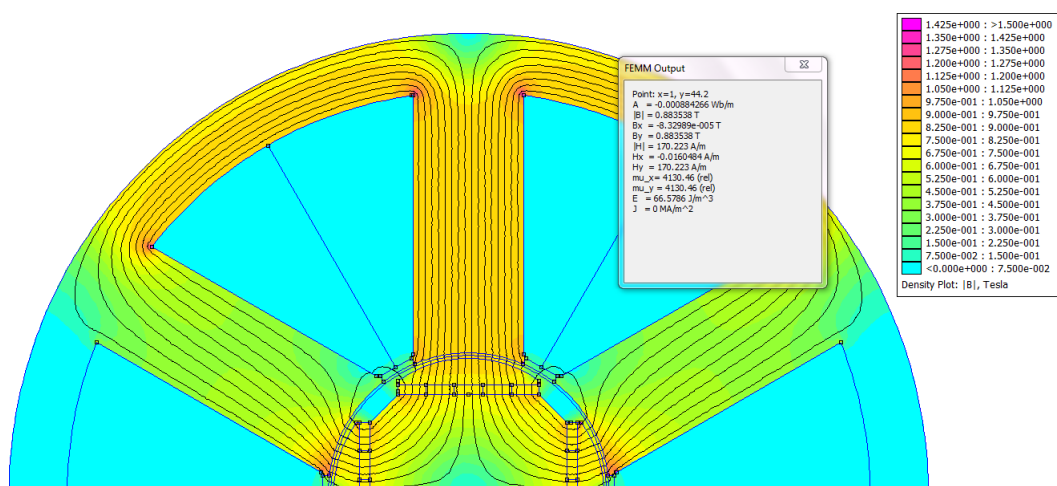
### 3.7 Rotor s povrchovou montáží s permanentními magnety s paralelní magnetizací s nástavci

Tento model obsahuje permanentní magnety s pólovými nástavci, jak ukazuje obr. 3.32.



Obr. 3.32: Detail PM s nástavci

Při definici modelu byl pólovým nástavcům přiřazen stejný materiál jako byl použit u zubů statoru a u rotoru.

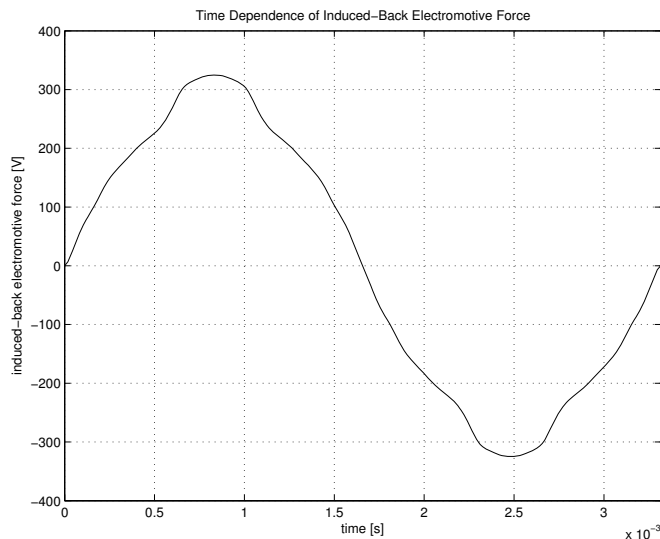


Obr. 3.33: Rozložení pole u stroje s PM s nástavci

Při pohledu na průběh indukovaného napětí ve stroji na obr. 3.34 je patrné, že průběh je o málo horší než průběh, který je u předchozího případu stroje s bochníkovým tvarem magnetů, kde nebyly použity pólové nástavce.

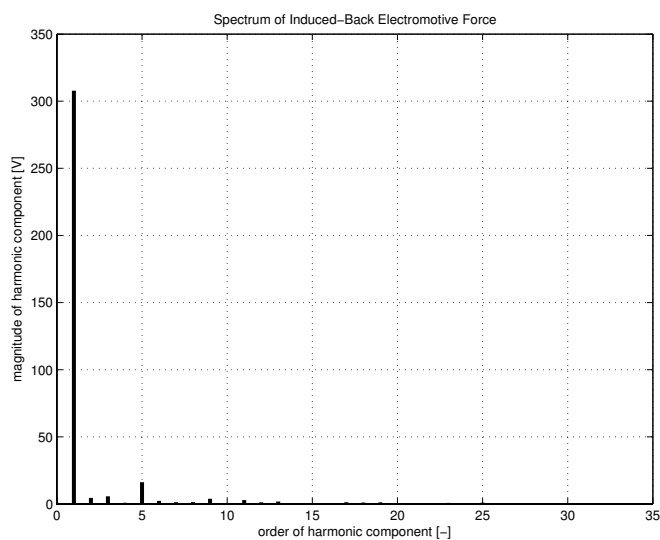


Bez použití nastavců byl průběh indukovaného napětí v předchozím případě téměř podobný harmonickému průběhu, avšak použitím pólových nastavců byl tento průběh více zkreslen.



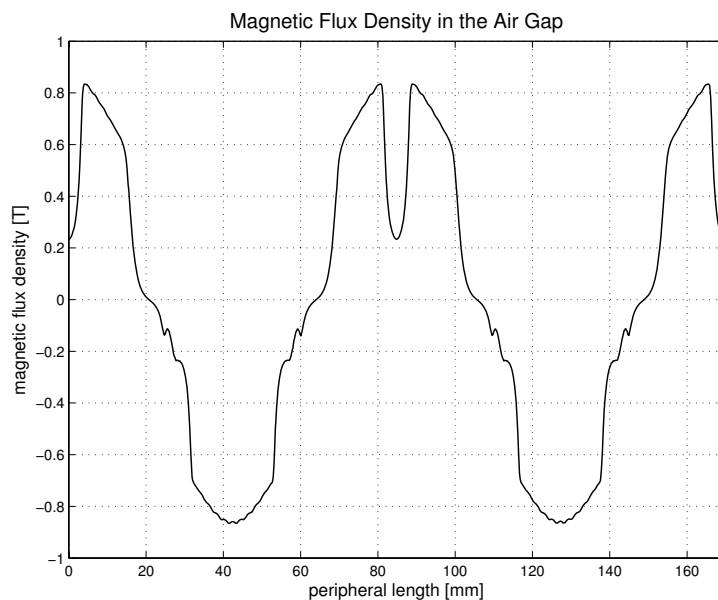
**Obr. 3.34:** Indukované napětí ve stroji s PM s nastavci

Je zde větší výskyt harmonických oproti původním variantám. Nejvíce vyniká 5.harmonická, ale ostatní jsou v porovnání s touto (stejně jako v předchozím případě) zanedbatelné, mají velice nízké hodnoty.

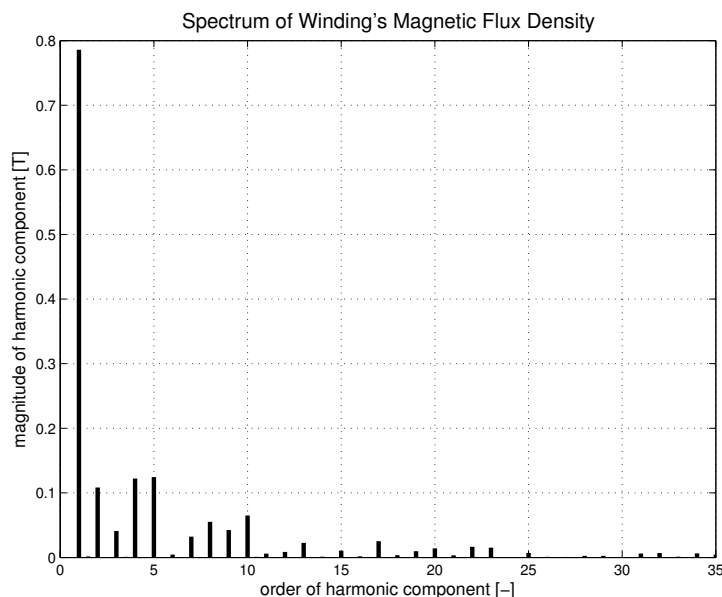


**Obr. 3.35:** Spektrum indukovaného napětí stroje s PM s nastavci

Zkreslení harmonického průběhu zde dosahuje hodnoty 9,14%. I přes zhoršení průběhu indukovaného napětí oproti průběhu v předchozím případě vlivem použití pólových nástavců se jeví tato hodnota THD jako druhá nejlepší ze všech zde uvedených případů. Hodnota indukce ve vzduchové mezeře z následujícího průběhu na obr. 3.36 je jen o málo vyšší než navrhovaná hodnota indukce.



**Obr. 3.36:** Průběh indukce ve vzduchové mezeře stroje s PM s nástavci



**Obr. 3.37:** Spektrum magnetické indukce ve vinutí ve stroji s PM s nástavci

## 4

# Výpočet některých dalších hodnot pro porovnání výsledků

V této kapitole bude jako první krok proveden výpočet efektivních hodnot průběhů indukovaných napětí u jednotlivých variant, které byly modelovány v kapitole 3.

Jako další krok budou tyto hodnoty ověřeny pomocí výpočtu efektivní hodnoty napětí z amplitudového spektra indukovaného napětí, které bylo získáno v programu MATLAB pomocí Fourierovy transformace. Výpočet efektivních hodnot bude sloužit pro pozdější porovnání výkonů a ztrát v jednotlivých variantách.

## 4.1 Výpočet efektivní hodnoty z časového průběhu indukovaného napětí

Hodnota efektivního napětí je spočtena ze vztahu:

$$U_{ief} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T u^2(t) dt} \quad (4.1)$$

Díky skriptu, který byl spuštěn v programu FEMM byly vygenerovány soubory s hodnotami toků, ze kterých se spočetlo indukované napětí ve 180 bodech (přesný postup je uveden v předchozí kapitole).

Jak již bylo uvedeno výše, efektivní hodnota indukovaného napětí se spočte jako odmocnina ze součtu kvadrátů ze všech těchto spočtených 180 hodnot indukovaného napětí, podělených počtem celkových kroků. Poté lze zapsat výsledky jednotlivých efektivních napětí:

Paralelní magnetizace magnetů:

$$U_{ief(A)} = 226,69 \text{ [V]} \quad (4.2)$$

Paralelní hrany a magnetizace magnetů:

$$U_{ief(B)} = 223,12 \text{ [V]} \quad (4.3)$$

Magnetizace magnetů směrem k jednomu bodu:

$$U_{ief(C)} = 185,92 \text{ [V]} \quad (4.4)$$

Radiální magnetizace magnetů:

$$U_{ief(D)} = 226,77 \text{ [V]} \quad (4.5)$$

Bočníkový tvar a paralelní magnetizace magnetů:

$$U_{ief(E)} = 275,70 \text{ [V]} \quad (4.6)$$

Magnety s nástavci a paralelní magnetizace:

$$U_{ief(F)} = 218,07 \text{ [V]} \quad (4.7)$$

## 4.2 Výpočet efektivní hodnoty z amplitudového spektra indukovaného napětí

Podle vztahu uvedeného níže se ověří výpočet efektivních hodnot indukovaného napětí.

$$U_{ief} = \sqrt{U_{ef(1)}^2 + U_{ef(2)}^2 + U_{ef(3)}^2 + \dots + U_{ef(n)}^2} \quad (4.8)$$

kde 1,2,...,n reprezentují jednotlivé harmonické složky

Toto ověření efektivních hodnot bylo spočteno z amplitudového spektra, které bylo získáno programem MATLAB pomocí Fourierovy analýzy. Protože se jedná o amplitudové spektrum, je nutné z maxim napětí jednotlivých harmonických složek získat efektivní hodnoty, jak je uvedeno v následjích vztazích:

$$U_{ief(1)} = \frac{U_{max(1)}}{\sqrt{2}}, U_{ief(2)} = \frac{U_{max(2)}}{\sqrt{2}}, \dots, U_{ief(n)} = \frac{U_{max(n)}}{\sqrt{2}}$$

Paralelní magnetizace magnetů:

$$U_{ief(A)} = 226,69 \text{ [V]}$$

Paralelní hrany a magnetizace magnetů:

$$U_{ief(B)} = 223,12 \text{ [V]}$$

Magnetizace magnetů směrem k jednomu bodu:

$$U_{ief(C)} = 185,92 \text{ [V]}$$

Radiální magnetizace magnetů:

$$U_{ief(D)} = 226,77 \text{ [V]}$$

Bočníkový tvar a paralelní magnetizace magnetů:

$$U_{ief(E)} = 275,70 \text{ [V]}$$

Magnety s nástavci a paralelní magnetizace:

$$U_{ief(F)} = 218,07 \text{ [V]}$$

Výsledky u obou postupů se shodují, jednotlivá efektivní napětí jsou tedy spočtena správně.

### 4.3 Vnitřní výkon a ztráty jednotlivých variant

Z vypočtených hodnot indukovaného efektivního napětí lze stanovit vnitřní výkony jednotlivých variant a to pomocí vztahu:

$$S = m \cdot U_{ief} \cdot I_n \quad (4.9)$$

Po dosažení hodnot indukovaného napětí a fázového proudu:

$$S_A = m \cdot U_{ief(A)} \cdot I_n = 3 \cdot 226,69 \cdot 53,18 = 36166,13 \text{ [VA]} \quad (4.10)$$

$$S_B = m \cdot U_{ief(B)} \cdot I_n = 3 \cdot 223,12 \cdot 53,18 = 35596,56 \text{ [VA]} \quad (4.11)$$

$$S_C = m \cdot U_{ief(C)} \cdot I_n = 3 \cdot 185,92 \cdot 53,18 = 29661,68 \text{ [VA]} \quad (4.12)$$

$$S_D = m \cdot U_{ief(D)} \cdot I_n = 3 \cdot 226,77 \cdot 53,18 = 36178,89 \text{ [VA]} \quad (4.13)$$

$$S_E = m \cdot U_{ief(E)} \cdot I_n = 3 \cdot 275,70 \cdot 53,18 = 43985,18 \text{ [VA]} \quad (4.14)$$

$$S_F = m \cdot U_{ief(F)} \cdot I_n = 3 \cdot 218,07 \cdot 53,18 = 24790,89 \text{ [VA]} \quad (4.15)$$

Z těchto vztahů je vidět, že nejvyšší výkon bude mít ten z případů motoru s PM, který má nejvyšší efektivní hodnotu indukovaného napětí. Naopak, nejnižší hodnota efektivní hodnoty indukovaného napětí bude mít za následek nejnižší výkon.

V závěru této kapitoly je pojednáno o ztrátách v jednotlivých případech A až F. Tyto ztráty jsou způsobeny v důsledku výskytu vyšších harmonických složek. Lze říci, že nejnižší ztráty bude mít ten případ, u kterého mají harmonické složky velice nízké hodnoty amplitud a nejvyšší ztráty bude mít naopak ta varianta, u kterých jsou amplitudy jednotlivých harmonických vyšší než u ostatních případů. Harmonické složky v napětí způsobují přídavné ztráty v motorech, které jsou určeny na začátku této diplomové práce v návrhu stroje.

Jelikož se vůči jednotlivým konstrukcím ztráty v mědi nebudou pro stejnou hodnotu jmenovitého proudu měnit, dojde k odchylkám pouze ve ztrátách v železe. Tyto ztráty porostou úměrně k indukci ve vzduchové mezeře. Nejvyšší účinnost bude mít tedy stroj s permanentními magnety, které jsou magnetované směrem k jednomu referenčnímu bodu. Nejnižší účinnost bude mít stroj s bočníkovým tvarem magnetů a to z důvodu největší indukce ve vzduchové mezeře.

# 5

## Závěr

V závěru této práce budou porovnány jednotlivé varianty tvaru PM z hlediska průběhu indukovaného napětí, efektivní hodnoty indukovaného napětí, THD, velikosti prvních deseti hodnot harmonických složek a také z hlediska zdánlivého výkonu a ztrát, které jsou způsobeny vyššími harmonickými složkami.

Na následujících obrázcích je zobrazeno porovnání některých z výše vyjmenovaných parametrů. Všechny uvedené hodnoty jsou pouze shrnutím výsledků, které byly graficky znázorněny a popsány v kapitole 3 zabývající se analýzou jednotlivých variant tvaru a směru magnetizace permanentních magnetů. Na obr. 5.1 je porovnáváno prvních jedenáct hodnot z amplitudového spektra indukovaného napětí. Jednotlivé hodnoty amplitud jsou udány ve voltech. Jsou zde také uvedeny hodnoty efektivních hodnot indukovaných napětí analyzovaných variant, hodnoty THD a vnitřní výkony.

	Rád harmonické složky [-]											U <sub>ef</sub> [V]	THD [%]	S [VA]
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
Paralelní magnetizace magnetů	0,00	319,33	4,57	5,48	0,57	25,68	2,96	0,51	2,12	6,77	0,62	226,69	0,79	36166,12
Paralelní hrany a magnetizace magnetů	0,00	313,13	4,42	3,16	0,03	37,10	3,68	0,79	2,34	4,79	1,19	223,12	1,54	35596,56
Magnetizace magnetů směrem k jednomu bodu	0,00	259,20	32,83	0,12	22,32	13,94	4,22	0,48	7,41	4,56	0,20	185,92	2,90	29661,68
Radiální magnetizace magnetů	0,00	319,35	4,77	7,75	0,50	25,01	2,95	0,52	2,30	7,41	0,76	226,77	0,85	36178,89
Bochníkový tvar a paralelní magnetizace magnetů	0,00	389,44	5,46	4,53	1,76	16,40	2,78	1,72	1,71	2,53	1,04	275,70	0,23	43985,18
Bochníkový tvar s nástavci a paralelní magnetizace magnetů	0,00	307,81	4,52	5,67	0,88	16,19	2,24	1,32	1,40	3,82	0,23	218,07	0,38	34790,89

Obr. 5.1: Porovnání jednotlivých variant z hlediska indukovaného napětí

	Rád harmonické složky [-]											THD [%]
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Paralelní magnetizace magnetů	0,0002	0,8177	0,0599	0,0212	0,0745	0,1684	0,0075	0,0321	0,0414	0,0326	0,0595	7,50
Paralelní hrany a magnetizace magnetů	0,0003	0,8182	0,0600	0,0217	0,0745	0,1681	0,0080	0,0324	0,0418	0,0327	0,0593	7,49
Magnetizace magnetů směrem k jednomu bodu	0,0003	0,8182	0,0600	0,0217	0,0745	0,1681	0,0080	0,0324	0,0418	0,0327	0,0593	13,63
Radiální magnetizace magnetů	0,0002	0,8315	0,0651	0,0932	0,0786	0,1384	0,0240	0,0406	0,0478	0,0565	0,0619	7,83
Bochníkový tvar a paralelní magnetizace magnetů	0,0007	1,0373	0,0452	0,0723	0,0722	0,1193	0,0127	0,0515	0,0620	0,0218	0,0651	3,95
Bochníkový tvar s nástavci a paralelní magnetizace magnetů	0,0002	0,7860	0,1083	0,0409	0,1222	0,1244	0,0045	0,0322	0,0552	0,0425	0,0649	9,14

Obr. 5.2: Porovnání jednotlivých variant z hlediska magnetické indukce ve vzduch. mezeře

Jako nejvhodnější varianta ze všech uvažovaných se jeví varianta s bochníkovým tvarem magnetů a to z následujících důvodů. Průběh indukovaného napětí je v podstatě nezdeformovaný, hodnota THD vyšla 0,23%, což znamená, že obsah vyšších harmonických složek je velmi malý a tím pádem přídatné ztráty, které jsou závislé na vyšších harmonických složkách budou nejmenší v porovnání s ostatními variantami. Tím lze shrnout i již zmiňovaný zdánlivý výkon, který díky efektivní hodnotě indukovaného napětí 275,70 V vyšel jako nejvyšší hodnota ze všech uvedených variant.

Druhá nejlepší varianta zahrnuje navíc magnety s pólovými nástavci, které zhoršují všechny výše vyjmenované vlastnosti. Tvar indukovaného napětí v motoru je více zdeformovaný než u bochníkových, tudíž má větší poměr vyšších harmonických složek  $THD = 9,1\%$  a tím i o něco větší přídatné ztráty. Efektivní hodnota indukovaného napětí vyšla v tomto případě 218,07 V.

Varianty paralelní magnetizace s radiálními hranami magnetů a radiální magnetizace s paralelními hranami magnetů mají velice podobné výsledky, které se liší jen nepatrně. Efektivní hodnota indukovaného napětí se liší pouze o několik desetit voltů a stejně je to i v případě 5. harmonické složky z amplitudového spektra indukovaného napětí. V těchto případech jde tedy o nepatrné rozdíly, kdy se výsledky dají považovat za téměř totožné.

Další varianta je paralelní magnetizace s paralelními hranami magnetů. Od výsledků předchozích dvou variant se tato moc nemění. Pokles efektivní hodnoty indukovaného napětí je zde oproti předchozím dvěma variantám asi o tři volty. 5. harmonická složka z amplitudového spektra indukovaného napětí je o dost větší a hodnota THD je téměř dvojnásobná.

Jako nejhorší varianta pro synchronní motory vyšla magnetizace magnetů k jednomu bodu, kdy tvar průběhu indukovaného napětí je hodně zdeformovaný a více než harmonický průběh připomíná průběh obdélníkový. Efektivní hodnota indukovaného napětí je 185,92 V a je ze všech uvažovaných variant nejmenší. Tento tvar permanentních magnetů se hodí na použití ve stejnosměrných motorech, protože tvar indukovaného napětí se přibližuje obdélníku, což je jen nekonečný součet vyšších harmonických složek. Pro stejnosměrný stroj je potřeba konstantní velikost napětí.



# Literatura

- [1] Kopylov, Igor Petrovič aj. *Stavba elektrických strojů*. Praha: STNL, 1988. ISBN 04-532-88.
- [2] Bašta, Jan; Chládek, Jaroslav; Mayer, Imrich. *Teorie elektrických strojů*. Praha : SNTL 1968.
- [3] Hanselman, D. *Brushless Permanent Magnet Motor Design*. The Writer's Collective, Cranston, Rhode Island, USA, 2003. ISBN 1-932133-63-1.
- [4] Červený, J. *Stavba elektrických strojů 1 a 2*. Plzeň, Přednáškové texty FEL ZČU, 2013/2014
- [5] Hruška, K. *Teorie elektrických strojů 2*. Plzeň, Přednáškové prezentace FEL ZČU, 2013/2014
- [6] *Norma EN 10106*. [Cit. 15. 4. 2015].  
Dostupné z: <http://www.dnm.cz/en10106.htm>
- [7] Rahideh, Akbar; Korakianitis, Theodosios. *Analytical Magnetic Field Distribution of Slotless Brushless With Inset Permanent Magnets*. [Cit. 20. 4. 2015].  
Dostupné z: <http://xplqa30.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5706366>
- [8] Krishnan, R. *Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives*. Boca Raton: CRC Press/Taylor and Francis, 2010. ISBN 0824753844.

# Příloha A



## N38SH

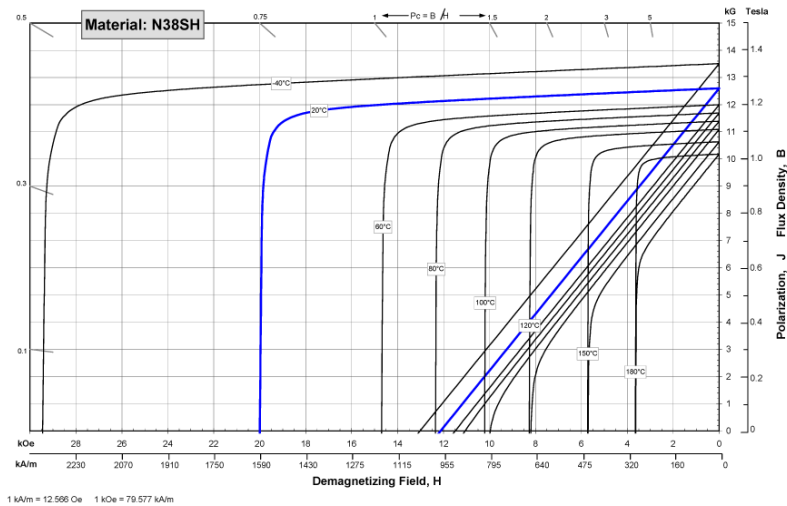
### Sintered Neodymium-Iron-Boron Magnets

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	min.	nominal	max.
<b>Br</b> Residual Induction	Gauss	12,200	12,600	13,000
	mT	1220	1260	1300
<b>H<sub>cb</sub></b> Coercivity	Oersteds	11,400	11,900	12,400
	kA/m	907	947	987
<b>H<sub>ci</sub></b> Intrinsic Coercivity	Oersteds	20,000		
	kA/m	1,592		
<b>BH<sub>max</sub></b> Maximum Energy Product	MGOe	36	39	41
	kJ/m <sup>3</sup>	287	307	326

Characteristic	Units	C #	C.L.
Thermal Properties	Reversible Temperature Coefficients <sup>(1)</sup>		
	of Induction, α(Br)	%/°C	-0.12
	of Coercivity, α(Hc)	%/°C	-0.55
Coefficient of Thermal Expansion <sup>(2)</sup>	ΔL/L per °C x 10 <sup>-6</sup>	7.5	-0.1
Thermal Conductivity	kcal/mh°C	5.3	5.8
Specific Heat <sup>(3)</sup>	cal/g°C		0.11
Curie Temperature, T <sub>c</sub>	°C		310
Other Properties	Flexural Strength	psi	41,300
		MPa	285
	Density	g/cm <sup>3</sup>	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



**Notes** The material data and demagnetization curves shown above represent typical properties that may vary due to product shape and size. Demagnetization curves show nominal Br and minimum Hci. Magnets can be supplied thermally stabilized or magnetically calibrated to customer specifications. Additional grades are available. Please contact the factory for information.

Rev. 140112

© Arnold Magnetic Technologies Corp.  
770 Linden Avenue, Rochester, NY 14625  
Ph: (+1) 585-385-9010

E-mail: info@arnoldmagnetics.com  
www.arnoldmagnetics.com

### Obr. A.1: Katalogový list permanentního magnetu N38SH