

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Návrh synchronního stroje s permanentními magnety**

**vedoucí práce: Ing. Karel Hruška  
autor: Bc. Martin Sokol**

**2012**

## **Prohlášení**

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

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

V Plzni dne 18.5.2012

Jméno příjmení

.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Karlu Hruškovi, za odborné vedení diplomové práce a za věcné připomínky s myšlenkami, jež vždy pomáhaly zlepšit úroveň práce a v neposlední řadě za jeho trpělivost. Zvláštní a veliký dík patří Ing. Jakubu Tallovi za jeho velice cenné rady a připomínky v průběhu zpracovávání aplikací v programu MATLAB.



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin SOKOL**  
Osobní číslo: **E09N0063K**  
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Název tématu: **Návrh synchronního stroje s permanentními magnety**  
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Parametry stroje:  $P = 60\text{kW}$ ,  $n = 400\text{ot/min}$ ,  $U_f = 240\text{V}$ ,  $m = 3$ ,  $\cos \phi = 0,8$ , IP66, ICW 37.
2. Proveďte elektromagnetický návrh stroje. Porovnejte varianty s různým počtem drážek na pól a fázi. Nakreslete schéma vinutí a srovnejte průběhy napětí dle Görgesova diagramu.
3. Stanovte základní parametry stroje plus ztráty. Ztráty uvažujte i v magnetech.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran  
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:

1. Hrabovcová, V. : Moderné el. stroje, ŽU v Žilině, 2001
2. Reece, A.B.J. : Finite element methods in el. power engineering, Oxford university press, 2000
3. Salminen, P. : Fractional slot permanent magnet synchronous motor for low speed applications (u ved. prace)
4. Hanselman, D. : Brushless permanent magnet motor design, Sec. Edition, The writer's Collective, 2003
5. Výzkumné zprávy a články z konferencí dle pokynů vedoucího práce

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Karel Hruška**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce:

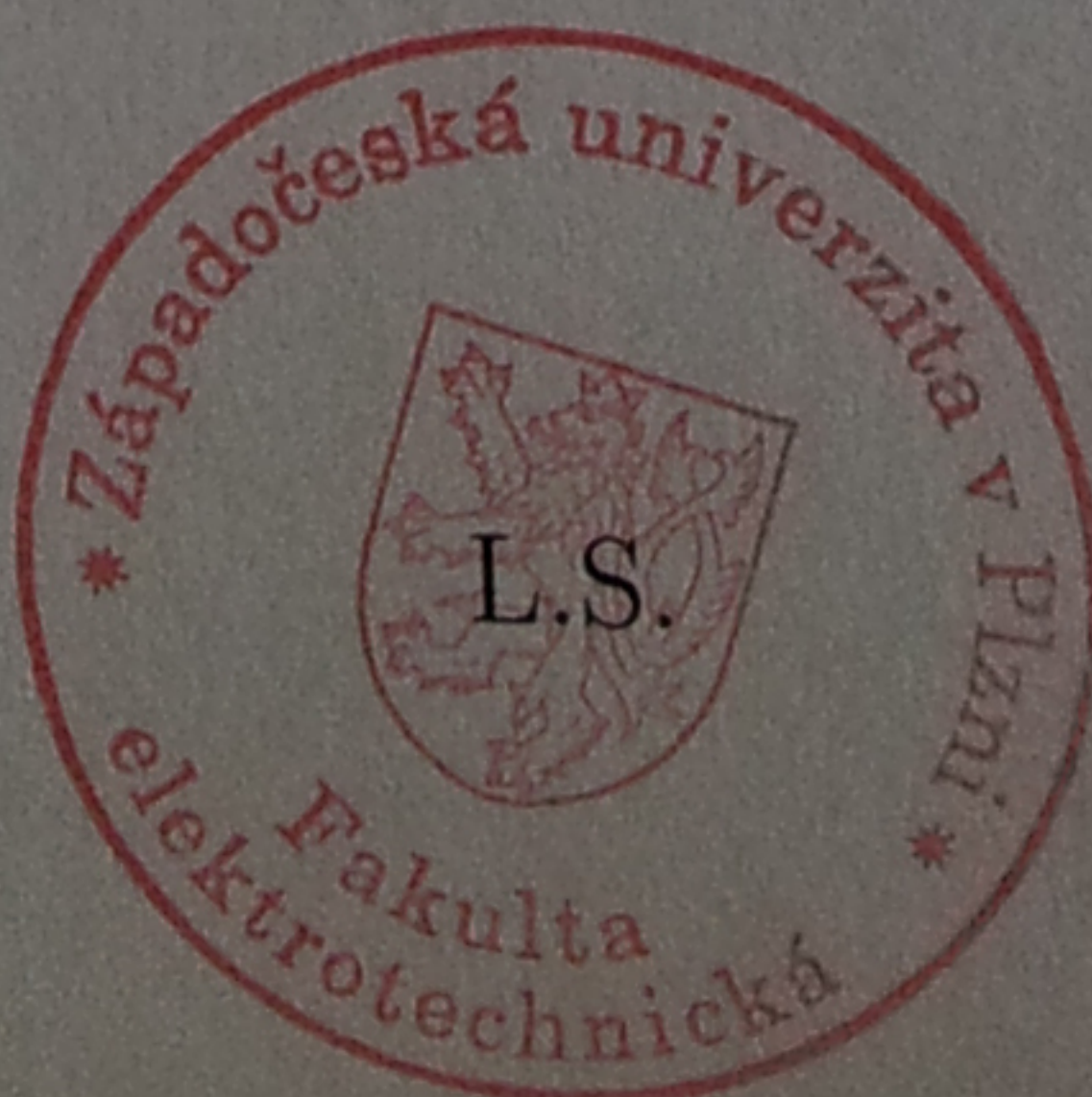
**17. října 2011**

Termín odevzdání diplomové práce:

**11. května 2012**

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan



Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.

vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011



## **Anotace**

Předkládaná diplomová práce obsahuje návrh synchronního motoru s permanentními magnety, který je následně analyzován v programu FEMM a MATLAB. Použitý materiál pro permanentní magnety je NdFeB. V diplomové práci je uveden komplexní elektromagnetický návrh stroje, výpočet velikosti magnetů, výpočet základních parametrů stroje (odpory, indukčnosti, účinnosti) a je proveden zjednodušený tepelný výpočet. V práci jsou porovnána napětí dle zadání. Všechny náčrtky a rozměrové výkresy jsou kresleny v programu QCAD.

## **Klíčová slova**

Synchronní stroj, motor s permanentními magnety, magnetická indukce, intenzita magnetického pole, moment motoru, NdFeB, výška magnetu, šířka magnetu, QCAD, MATLAB, FEMM.

## **Abstract**

This diploma thesis contains a design of synchronous motor with permanent magnets and its analysis in the FEMM application and MATLAB application. The material used for permanent magnets is NdFeB. A complex electromagnetic machine design, calculation of the magnets size, calculation of basic machine parameters (such as resistance, inductance, efficiency) and simplified thermal calculations are shown in thesis. Voltage comparison according to main goals of thesis is also specified. All sketches and dimensional drawings are drawn in QCAD.

## **Key words**

Synchronous motor, motor with permanent magnets, flux density, magnetic field strength, torque, Neodym Iron Bor, high of magnet, width of magnet, QCAD, MATLAB, Finite Element Method Magnetics.

## Obsah

<b>OBSAH .....</b>	<b>7</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ .....</b>	<b>9</b>
<b>1 SYNCHRONNÍ STROJE .....</b>	<b>13</b>
<b>2 SYNCHRONNÍ MOTOR S PERMANENTNÍMI MAGNETY .....</b>	<b>15</b>
2.1 STATORY MOTORŮ S PERMANENTNÍMI MAGNETY .....	15
2.2 ROTORY MOTORŮ S PERMANENTNÍMI MAGNETY .....	15
2.3 ZPŮSOBY MONTÁŽE PM NA ROTORY SYNCHRONNÍCH STROJŮ .....	16
2.4 ZPŮSOBY MAGNETIZACE MATERIÁLŮ PRO PÓLY ROTORU .....	16
<b>3 VÝHODY A NEVÝHODY SYNCHRONNÍCH MOTORŮ S PM.....</b>	<b>17</b>
<b>4 POUŽITÍ SYNCHRONNÍCH STROJŮ S PM .....</b>	<b>18</b>
<b>5 ELEKTROMAGNETICKÝ NÁVRH SYNCHRONNÍHO MOTORU S PM .....</b>	<b>19</b>
5.1 ZÁKLADNÍ PARAMETRY STROJE .....	19
5.2 VÝPOČET HLAVNÍCH PARAMETRŮ STROJE .....	19
5.3 NÁVRH VINUTÍ STATORU .....	21
5.4 NÁVRH DRÁŽEK STATORU .....	25
5.5 NÁVRH PERMANENTNÍCH MAGNETŮ ROTORU .....	27
5.6 VÝPOČET ODPORU VINUTÍ .....	36
5.7 VÝPOČET ROZPTYLOVÉ INDUKČNOSTI VINUTÍ .....	36
5.8 STANOVENÍ ZTRÁT A ÚČINNOSTI MOTORU .....	38
5.9 TEPELNÝ VÝPOČET MOTORU .....	40
<b>6 POROVNÁNÍ RŮZNÝCH VARIANTAMI SYNCHRONNÍCH MOTORŮ .....</b>	<b>42</b>
<b>7 ANALÝZA SYNCHRONNÍHO MOTORU S PM POMOCÍ FEMM .....</b>	<b>46</b>
7.1 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ (MKP).....	46
7.2 VYHODNOCENÍ PRŮBĚHŮ NAPĚTÍ STROJE POMOCÍ FEMM .....	47
7.3 VYHODNOCENÍ MAGNETICKÝCH INDUKČÍ STROJE POMOCÍ FEMM.....	56
<b>8 POROVNÁNÍ GÖRGESOVÝCH DIAGRAMŮ .....</b>	<b>60</b>
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>63</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA.....</b>	<b>65</b>
<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>66</b>



## Úvod

Vývoj elektrických strojů vždy patřil k jednomu z nejprogresivnějších odvětví elektrotechniky a i v dnešní době postupuje rozvoj těchto zařízení rychle vpřed. Zatímco dříve byl výzkum hnán kupředu především požadavky na vyšší účinnost, menší rozměry a vyšší spolehlivost strojů, v dnešní době k těmto již tradičním vlastnostem přibyla i další hlediska. Především se jedná o snížení nákladů při výrobě a provozu elektrických strojů, jejich elektromagnetická kompatibilita a jejich snadná regulace při použití ve velkém množství aplikací. Díky obrovskému pokroku ve výzkumech elektrotechnických materiálů a díky vyššímu zapojení výpočetní techniky při návrzích elektrických strojů, jsme dnes schopni vyrábět speciální motory, které přesně odpovídají požadavkům daného zařízení nebo způsobu jejich použití. Synchronní stroje jsou toho dobrým příkladem. Dříve se tyto stroje používaly hlavně jako třífázové synchronní generátory velkých výkonů. Byly poháněny parní nebo vodní turbínou a v elektrárnách sloužily k výrobě elektrické energie. Rotor byl vždy složen z elektromagnetů a budícího vinutí. S dalším rozvojem elektrotechniky se začaly více prosazovat i jako motory a pokrok ve výzkumu permanentních magnetů (PM) umožnil nahradit elektromagnety právě magnety permanentními.

Hlavním cílem této diplomové práce je podrobný návrh synchronního motoru s permanentními magnety. Konkrétně se jedná o třífázový motor o výkonu 60 kW s magnety umístěnými na povrchu rotoru. Na začátku bude podrobněji vysvětlen princip synchronních strojů a jejich rozdělení. Dále zde budou uvedeny některé aplikace, ve kterých se dnes tyto motory prakticky využívají a samozřejmě budou shrnuty jejich výhody a nevýhody. Tato práce samozřejmě neobsahuje veškeré informace, nezaobírá se detailnějším rozbořením problematiky jednotlivých částí návrhu a nejsou zde také vysvětleny všechny pojmy. Proto je na konci uvedena odborná literatura a další podklady, ve kterých je možno nalézt tato doplňující data.



## Seznam symbolů

$a_1 [mm]$	Izolace jednoho dílčího vodiče
$a_2 [mm]$	Izolace jedné vrstvy vinutí
$a_3 [mm]$	Šířka technologické mezery
$a_4 [mm]$	Vložka mezi vrstvami cívek
$a_5 [mm]$	Mezera mezi cívkou a koncovým klínem
$a_6 [mm]$	Výška klínu statorové drážky
$a_7 [mm]$	Výška hlavy statorového zubu
$2a [-]$	Počet paralelních větví
$2u [-]$	Počet vrstev vinutí
$A [Am^{-1}]$	Lineární proudová hustota
$b_{d1} [mm]$	Šířka drážky statoru
$b_m [mm]$	Šířka magnetu
$b_{v1} [mm]$	Šířka jednoho dílčího vodiče
$b_{z1} [mm]$	Šířka zubu statorového plechu
$b_{z(1/2)} [mm]$	Šířka zubu statoru v jeho polovině
$b_{z1,2,3} [mm]$	Šířka v částech zubu statorového plechu
$B_{j1} [T]$	Magnetická indukce jha statoru
$B_m = [T]$	Magnetická indukce v magnetu
$B_{z1} [T]$	Magnetická indukce v zubu statoru
$B_{z1} \uparrow [T]$	Zdánlivá mag. indukce v částech zubu
$B_{z1,2,3SKUT} [T]$	Skutečná mag. indukce v částech zubu
$B_\delta [T]$	Indukce ve vzduchové mezeře
$c [-]$	jmenovatel v $q$
$C \left[ \frac{VA}{m^3 ot./min} \right]$	Essonův činitel
$D_1 [m]$	Vnitřní průměr statoru
$D_2 [m]$	Vnější průměr rotoru
$D_e [m]$	Vnější průměr statoru
$D_i [m]$	Vnitřní průměr rotoru
$F_{m1}, F_{m2} [A]$	Magnetická napětí polí
$h_c [mm]$	Výška jedné cívky
$h_d [mm]$	Výška statorové drážky
$h_{j1} [mm]$	Výška statorového jha
$h_m [mm]$	Odhadovaná výška magnetu
$h_{mSKUT} [mm]$	Skutečná výška magnetu
$h_{v1} [mm]$	Výška jednoho dílčího vodiče



$H_c [kA/m]$	Koercivita magnetu
$H_{js} [Am^{-1}]$	Magnetická intenzita ve statorovém jhu
$H_{jr} [Am^{-1}]$	Magnetická intenzita v rotorovém jhu
$H_m [Am^{-1}]$	Magnetická intenzita v magnetech
$H_{z1,2,3} [Am^{-1}]$	Magnetická intenzita v částech zubu statoru
$H_\delta [Am^{-1}]$	Magnetická intenzita ve vzduchové mezeře
$I_C [A]$	Cívkový proud
$I_d [A]$	Drážkový proud
$I_{d/2} [A]$	Proud v jedné vrstvě drážky
$I_{Nf} [A]$	Jmenovitý proud
$I_\mu [A]$	Magnetizační proud
$J_{CU} [A/mm^2]$	Proudová hustota mědi
$k_b [-]$	Činitel tvaru pole, konstanta mech. ztrát
$k_{cn} [-]$	Carterův činitel pro n. krok
$k_{dj}, k_{dz} [-]$	Činitelé uvažující zvětšení ztrát plechů
$k_E [-]$	Činitel induk. nap./ jmen. nap.
$k_{Fe} [-]$	Činitel plnění železa
$k_{p1,2,3} [-]$	Činitel odlehčení v částech zubu statoru
$k_{vv} [-]$	Činitel vinutí pro v. harmonickou
$k_{rv} [-]$	Činitel rozlohy pro v. harmonickou
$k_{yv} [-]$	Činitel zkrácení kroku pro v. harmonickou
$k_{wb} [-]$	Činitel využití drážky
$k_\beta, k_\beta' [-]$	Činitelé, závislé na kroku vinutí
$K [-]$	Počet cívek statorového vinutí
$l_1 [m]$	Vnitřní délka statoru
$l_\epsilon [mm]$	Délka čela statorového vinutí
$l_{js} [mm]$	Délka střední indukční siločáry statorového jha
$l_{jr} [mm]$	Délka střední indukční siločáry rotorového jha
$l_{z1} [mm]$	Střední délka závitu statorového vinutí
$L [H]$	Indukčnost synchronního stroje
$m [-]$	Počet fází stroje
$m^{\uparrow} [-]$	Matematický počet fází
$m_{j1} [kg]$	Hmotnost jha statoru
$m_{r2} [kg]$	Hmotnost rotoru
$m_{z1} [kg]$	Hmotnost zubů statoru
$M [Nm]$	Točivý moment
$M_N [Nm]$	Jmenovitý moment
$n [ot/min]$	jmenovité otáčky



$N_{C/f}[-]$	Počet cívek na fázi
$N_{C/SK}[-]$	Počet cívek na skupinu
$N_S[-]$	Počet závitů v sérii
$N_{SK}[-]$	Počet skupin cívek
$P[W]$	Jmenovitý výkon
$P_i[VA]$	Vnitřní elektromagnetický výkon
$q[-]$	Počet drážek na pól
$q_0[-]$	čítatel v $q$
$Q[-]$	Počet statorových drážek
$Q_p[-]$	Počet drážek na jeden pól
$R_{1(n)}[\Omega]$	Odpor statorového vinutí při teplotě $n$
$S_{Cul}[\text{mm}^2]$	Obsah mědi vodičů ve statorové drážce
$S_d[\text{mm}^2]$	Obsah statorové drážky
$S_{CH}[\text{m}^2]$	Celková ochlazovaná plocha stroje
$S_N[VA]$	Zdánlivý výkon
$S_{v1}[\text{mm}^2]$	Průřez jednoho dílčího vodiče
$t_{d1}[\text{mm}]$	Drážková rozteč statoru
$t_{d1,2,3}[\text{mm}]$	Drážková rozteč v částech zubu statoru
$t_{p1}[\text{mm}]$	Pólová rozteč statoru
$U_f[V]$	Fázové napětí
$U_{mjs}[A]$	Magnetické napětí ve statorovém jhu
$U_{mjr}[A]$	Magnetické napětí v rotorovém jhu
$U_{mm}[A]$	Magnetické napětí v magnetu
$U_{mz}[A]$	Magnetické napětí v zubu statoru
$U_{m\delta}[A]$	Magnetické napětí vzduchové mezery
$U_s[V]$	Sdružené napětí
$V_d[-]$	Počet vodičů v drážce statoru
$V_{d/2}[-]$	Počet vodičů v jedné vrstvě statorové drážky
$X_d[\Omega]$	Synchronní reaktance v osách „d, q“
$X_m[\Omega]$	Magnetizační reaktance
$X_{\sigma 1}[\Omega]$	Rozptylová reaktance jedné fáze
$y_{1d}[-]$	Cívkový krok
$\alpha\left[\frac{W}{m^2 K^2}\right]$	Součinitel přestupu tepla
$\alpha_\delta[-]$	Činitel pólového krytí
$\beta[-]$	Činitel zkrácení kroku vinutí
$\beta[\text{rad}]$	Zátěžný úhel
$\delta[\text{mm}]$	Velikost vzduchové mezery



$\delta$ [mm]	Velikost vzduchové mezery s uvažováním drážkování
$\delta_{\max}$ [mm]	Maximální velikost vzduchové mezery
$\Delta P$ [-]	Měrné ztráty v železe
$\Delta P_C$ [W]	Celkové ztráty motoru
$\Delta P_{Cu}$ [W]	Jouleovy ztráty v mědi
$\Delta P_d$ [W]	Přídavné ztráty
$\Delta P_{Fe}$ [W]	Celkové ztráty v železe
$\Delta P_{jFe}$ [W]	Ztráty ve jhu statoru
$\Delta P_{mag.}$ [W]	Ztráty v permanentních magnetech
$\Delta P_{mech.}$ [W]	Mechanické ztráty
$\Delta P_{zFe}$ [W]	Ztráty v zubové části statoru
$\Phi$ [Wb]	Magnetický tok ve statoru
$\Phi_d$ [Wb]	Magnetický tok v drážce statoru
$\Phi_z$ [Wb]	Magnetický tok v zubu statoru
$\cos \varphi$ [-]	Účinník
$\eta$ [-]	Účinnost
$\lambda_z$ [-]	Činitel magnetické vodivosti rozptylu čel
$\lambda_{dif}$ [-]	Činitel magnetického diferenčního rozptylu
$\lambda_{dh}$ [-]	Činitel magnetické vodivosti drážkového rozptylu
$\mu_0$ [ $Hm^{-1}$ ]	Permeabilita vakua
$\mu_r$ [-]	Relativní permeabilita magnetu
$\rho_{vn}$ [ $\Omega m^{-1}$ ]	Rezistivita vodiče vinutí při teplotě $n$
$\rho_{Fe}$ [ $kg/m^3$ ]	Hustota elektrotechnických plechů statoru
$\nu_{H2O}$ [ $^{\circ}C$ ]	Teplota chladicí vody
$\nu_v$ [ $^{\circ}C$ ]	Výsledné oteplení stroje
$\gamma_n$ [-]	Konstanta Carterova činitele pro $n$ . krok
$\omega_s$ [ $rad/s$ ]	synchronní rychlost



# 1 Synchronní stroje

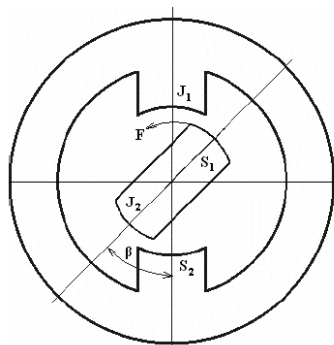
Jako každý točivý elektrický stroj, se i ten synchronní skládá ze dvou částí a to ze statoru a z rotoru. Stator je tvořen statorovými plechy, ve kterých je uloženo vinutí. Toto vinutí je nejčastěji připojeno k třífázové střídavé síti a při průchodu elektrického proudu se v něm začne tvořit točivé magnetické pole. Synchronní stroje s PM jsou prakticky vždy napájeny ze střídače. Hlavními parametry, které toto pole určují, jsou počet pólů stroje a frekvence procházejícího proudu vinutím. Jak je patrné, rychlost otáčení stroje je přímo závislá na frekvenci. Tuto rychlost magnetického pole statoru označujeme jako „synchronní rychlost  $\omega_s$ “ a její velikost je dána vztahem:

$$\omega_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{2 \cdot p} [\text{rad} / \text{s}] \quad (1.1)$$

Kde  $f$  je frekvence napájecího proudu a  $p$  je počet pólů stroje.

U synchronních generátorů může být rotor dvojího typu, konkrétně válcový hladký nebo s vyniklými póly. Hladký rotor se používá především u turboalternátorů a turbomotorů. Vyjádřené póly najdeme hlavně u strojů pracujících při nižších otáčkách. Tyto póly jsou tvořeny buď elektromagnety společně s budícím vinutím nebo permanentními magnety. Synchronní motory s PM mají i jiná provedení, které budou blíže rozebrány v kapitole 2.2. [4]

Při průchodu stejnosměrného proudu budícím vynutím nebo působením permanentních magnetů se vytvoří na rotoru stacionární magnetické pole. Vzájemnou interakcí mezi točivým polem statoru a stacionárním polem rotoru vznikne silové působení statoru na rotor, tedy moment. Synchronní stroj může pracovat pouze v synchronních otáčkách. Z toho vyplývá, že pokud stroj zatížíme, tak se rotor bude snažit kopírovat synchronní otáčky dané rychlostí otáčení magnetického točivého pole statoru. Snížení nebo zvýšení zatížení stroje nemá vliv na synchronní otáčky, ale na magnetické pole ve stroji, které se vůči sobě posunou o takzvaný zátěžný úhel  $\beta$ .



Obr. 1.1 Motorický režim synchronního stroje[15]



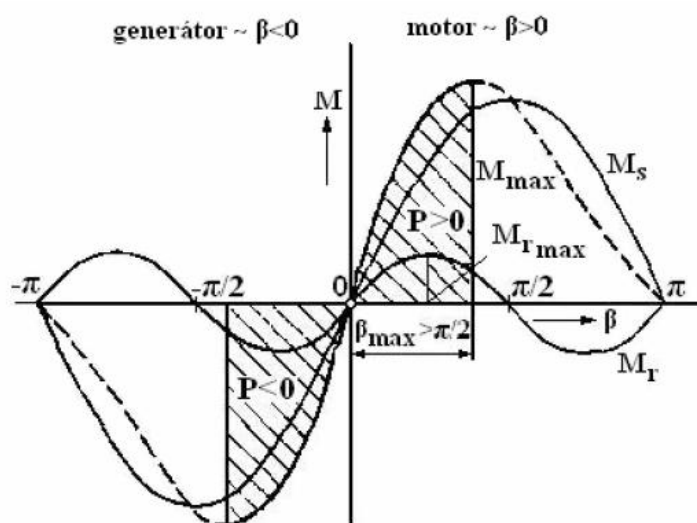
Podle velikosti úhlu  $\beta$  rozlišujeme tři pracovní režimy stroje. Pokud je  $\beta=0$ , synchronní stroj má nulové zatížení a magnetické pole statoru a rotoru se vzájemně vruší, tedy nevzniká moment. Je-li zátěžný úhel  $\beta>0$ , synchronní stroj se chová jako motor a magnetické pole rotoru je za magnetickým polem statoru opožděno právě o tento úhel (viz. Obr. 1.2). Naopak, pokud statorové magnetické pole předbíhá magnetické pole rotorové, synchronní stroj pracuje v generátorickém režimu a zátěžný úhel má velikost  $\beta<0$ .

Velikost momentu, který vznikne vzájemným působením magnetických polí statoru a rotoru, zjistíme ze vztahu:

$$M \approx F_{m1} \cdot F_{m2} \cdot \sin \beta [Nm] \quad (1.2)$$

Kde  $F_{m1}$  a  $F_{m2}$  jsou magnetická napětí polí stroje a  $\beta$  je úhel vzájemného posunutí těchto polí.

Při provozu synchronního stroje je velikost zátěžného úhlu klíčová, protože pokud překročí tento úhel hodnotu  $\beta_{max}$ , stroj takzvaně vypadne ze synchronizmu (viz. Obr. 1.2) a tím může dojít k jeho poškození.



Obr. 1.2 Momentová charakteristika synchronního stroje [15]



## 2 Synchronní motor s permanentními magnety

Cílem této práce je návrh synchronního motoru s permanentními magnety, proto bude v dalších kapitolách popisován tento konkrétní typ stroje.

### 2.1 Statory motorů s permanentními magnety

Stator motoru s PM je standardně vyroben z elektrotechnických plechů složených do segmentů. Při jeho konstrukci se může použít celá řada typů drážek a vinutí. V dnešní době již nejsme limitováni jednotlivými normalizovanými typy razidel. Moderní strojírenské obráběcí stroje jsou schopné vytvořit drážky statoru přesně dle zadání projektanta s přesností na desetiny milimetru. To nám dává vysokou flexibilitu při návrhu statoru stroje a možnost zvolit drážky přesně na míru konkrétního motoru. Rovněž i vodiče pro třífázové vinutí uložené ve statoru nám dnes firmy dodají v rozměrech, které požadujeme. Díky tomu nejsme při projektování nuceni ke kompromisům a můžeme drážky i vinutí navrhnout s větší přesností a tedy i s menší odchylkou.

### 2.2 Rotory motorů s permanentními magnety

U synchronního motoru s PM nejsou použity elektromagnety, ani budící vinutí na rotoru. Permanentní magnety vytvářejí statické magnetické pole, bez nutnosti průchodu stejnosměrného proudu. Magnety se dají umístit buď na povrch rotoru, nebo do rotorového jha. Tyto dva způsoby jsou v dnešní době nejčastější, ale ve speciálních aplikacích mohou být PM umístěny například pod póly rotoru nebo mohou být různě prostorově natočené (radiálně, axiálně, tangenciálně). [3]

Samostatnou skupinu pak tvoří takzvané diskové synchronní motory. Jejich hlavní výhodou je krátká axiální délka, díky které mají velmi nízký moment setrvačnosti, a tedy jsou schopné velmi rychle reagovat na řídicí signály. Tyto motory mají speciální konstrukční uspořádání, permanentní magnety jsou nejčastěji přilepeny na kotouči, což umožňuje mít uprostřed stroje nejen rotor, ale také stator, nebo dokonce takzvané dvojdiskové uspořádání, kdy je stator uprostřed a z krajních stran jsou umístěny dva rotory. [3]

Obecně se dá říci, že rotory s PM jsou oproti klasickým rotorům s elektromagnety lehčí, a to zejména díky absenci rotorového vinutí a skutečnosti, že pro něho není třeba tvořit na rotoru drážky. Samotný magnetický obvod rotoru je pak tvořen pouze jhem rotoru. To umožňuje projektantovi navrhnout v rotoru různé odlehčující otvory, které nejen že snižují



množství použitého materiálu (a tím i cenu stroje), ale také pozitivně ovlivňují setrvačnost stroje a zkracují jeho odezvu na řídicí impulzy.

### 2.3 Způsoby montáže PM na rotory synchronních strojů

Dnes se již výhradně používají PM ze vzácných zemin. Protože jsou velice křehké, dají se na rotor pouze přilepit. Lepené magnety se následně zafixují sklotextitovou páskou nebo skelnou bandáží. To chrání PM proti uvolnění, protože hlavně při vysokých otáčkách motoru vznikají zvýšené odstředivé síly, které by mohly magnety z rotoru vytrhnout a tím poškodit celý stroj. Diskový synchronní motor má permanentní magnety rovněž lepené ke kotouči ať už rotoru nebo statoru, ale jejich tvar i uchycení mají jistá specifika, která se řídí především ekonomickými a konstrukčními možnostmi a proto se optimalizují pro každý typ motoru zvlášť. Při konstrukci tohoto konkrétního synchronního motoru jsem zvolil povrchové uspořádání permanentních magnetů na rotoru a proto další směřování obsahu diplomové práce a výpočty se budou ubírat tímto směrem. Podrobnější informace k problematice uchycení PM u diskových motorů najdete například zde [3].

### 2.4 Způsoby magnetizace materiálů pro póly rotoru

Samotnou magnetizaci materiálů, použitých pro výrobu PM rotoru, lze provést dvěma způsoby. Buď se PM zmagnetují mimo stroj a na rotor se vkládají již s technologicky vytvořenými magnetickými póly, nebo se na rotor přilepí samotný neaktivní materiál a zmagnetizuje se až následně. Ani jeden z těchto způsobů není ideální, protože v prvním z nich se projevují především přitažné magnetické síly, které při rychlém přitažení magnetu na rotor mohou PM roztříštit, zatímco při druhém způsobu musíme vinutí přizpůsobit pozdější magnetizaci PM. To je také spojené s nutností vyrobit speciální přípravek, který provede magnetizaci pólů rotoru. Dá se proto obecně říci, že pro výrobu velkého počtu strojů se vyplatí investovat do vývoje a zhotovení speciálního magnetizačního přípravku, zatímco pro malosériovou nebo kusovou výrobu se vyplatí koupit již připravené magnety a ty se zvýšenou opatrností a technickou náročností uchytit na rotor motoru. [5]



### 3 Výhody a nevýhody synchronních motorů s PM

Hlavní výhodou synchronních motorů s PM oproti klasickým motorům s elektromagnety je absence budícího vinutí v rotoru stroje. Díky tomu není také třeba zdroj stejnosměrného budícího proudu a také odpadají komplikace jeho přívodu k elektromagnetům rotoru. V permanentních magnetech také nevznikají ztráty jako v budícím vinutí, což zvyšuje celkovou účinnost stroje. Na druhou stranu v PM vznikají ztráty vířivými proudy z časových a prostorových harmonických.

Bohužel mají synchronní motory s PM také několik nevýhod, mezi ty hlavní patří vyšší cena, technologická náročnost, ale například i stav, kdy dojde k odmagnetování motoru při jeho přehřátí. Stručný přehled výhod a nevýhod synchronních strojů s PM by mohl vypadat asi takto:

Výhody:

- Absence budícího vynutí a zdroje ss proudu
- Vyšší účinnost motoru
- Menší rozměry a celková nižší hmotnost stroje
- Vyšší momentová přetížitelnost
- Nižší moment setrvačnosti a rychlejší odezva na řídicí impulzy
- Nižší ztráty stroje
- Vyšší flexibilita uplatnění v průmyslu

Nevýhody:

- Vyšší pořizovací cena
- Vyšší technologická náročnost při návrhu i výrobě stroje
- Odmagnetování motoru při silném proudovém rázu ve statoru stroje
- Stroj je trvale buzený a nelze ho odbudit, pokud se točí, má vždy nějaké svorkové napětí (problém v některých aplikacích)



## 4 Použití synchronních strojů s PM

Jak již bylo napsáno v úvodu této práce, stroje s PM magnety mají v dnešní době celou řadu uplatnění a díky jejich rozvoji se počet aplikací, ve kterých jsou obsaženy, neustále zvyšuje. Stejně jako klasické synchronní stroje mohou i ty s permanentními magnety pracovat v motorickém i generátorickém režimu, což je v tomto směru nijak neomezuje. Asi nejjednodušší aplikací, kterou lze realizovat, je obyčejná náhrada klasického synchronního stroje s budícím vynutím za stroj s permanentními magnety. To může být vyžadováno zejména kvůli úspoře prostoru, ve kterém má být stroj provozován, ale také třeba nároky na rychlejší reakci stroje na řídicí impulzy. Nejlepší uplatnění tyto motory nacházejí v systémech, které pracují dlouhodobě při konstantních otáčkách a se stejným zátěžným momentem. Jako příklad lze uvést například vodní čerpadla, kompresory nebo pohony pro automatické výrobní linky. Své kvality synchronní stroje také uplatňují při výrobě energie z obnovitelných zdrojů. Jako generátory je můžeme nalézt například u větrných elektráren. Velmi významné zastoupení mají také v dopravní technice. Můžeme je nalézt například u hybridních automobilů, kde fungují jako dynamo, ale také jako hlavní hnací prvky. Takovéto synchronní stroje s PM používají ve svých vozech například firmy Toyota nebo Lexus. Rovněž se používají v kolejové dopravní technice. Zde se hlavně využívá jejich schopnosti dávat vysoký zátěžný moment i při nízkých otáčkách stroje, což potřebují hlavně tramvaje. Obrovskou výhodou strojů s PM v tramvajových vozech jsou také jejich malé rozměry, což významně usnadňuje jejich konstrukci, zvyšuje užitečný prostor a ve finále poskytuje vyšší komfort cestujícím. Jejich nevýhodou při aplikaci v tramvajových vozech je zde již zmíněné trvalé buzení při provozu. Synchronní stroje s permanentními magnety můžeme také nalézt u trakčních pohonů vlaků nebo pohonu lodí. V této oblasti v čím dál tím větší míře nahrazují asynchronní nebo stejnosměrné stroje. [3], [5], [9], [2]



## 5 Elektromagnetický návrh synchronního motoru s PM

### 5.1 Základní parametry stroje

Zadané parametry:

Jmenovitý výkon	$P = 60 \text{ kW}$
Jmenovité otáčky	$n = 400 \text{ otáček/min}$
Fázové napětí	$U_f = 240 \text{ V}$
Počet fází	$m = 3$
Účinnost	$\cos \varphi = 0,8$
Krytí motoru	IP 66
Druh chlazení motoru	ICW 37

### 5.2 Výpočet hlavních parametrů stroje

Pro návrh synchronního motoru jsem zvolil postup uvedený v publikaci [1]. Protože návrh stroje s PM má jistá specifika, nelze všechny vztahy, tabulky a grafy z tohoto zdroje použít.

Protože počet pólů stroje nebyl zadán, volím motor se 40 póly a tedy:

$$2p = 40 \quad (5.1)$$

Frekvence je potom dána vztahem:

$$f = \frac{p \cdot n}{60} = \frac{20 \cdot 400}{60} = 133,33 \text{ Hz} \quad (5.2)$$

Sdružené napětí vychází z napětí fázového:

$$U_s = \sqrt{3} \cdot U_f = \sqrt{3} \cdot 240 = 415,7 \text{ V} \quad (5.3)$$

Jmenovitý moment motoru:

$$M_N = \frac{30 \cdot P}{\pi \cdot n} = \frac{30 \cdot 60000}{\pi \cdot 400} = 1432,2 \text{ Nm} \quad (5.4)$$

Nyní si stanovím odhadovanou účinnost stroje, kterou budu používat při dalších výpočtech. Pokud by byla zvolena příliš vysoko nebo naopak nízko, během dalších výpočtů bude zkorigována:

$$\eta = 0,9 \quad (5.5)$$



Zdánlivý výkon vyjadřuje poměr jmenovitého výkonu ku součinu odhadované účinnosti a účinníku motoru:

$$S_N = \frac{P}{\cos \varphi \cdot \eta} = \frac{60000}{0,8 \cdot 0,9} = 83333,3 \text{ VA} \quad (5.6)$$

Z výpočtů sdruženého napětí a zdánlivého výkonu můžeme stanovit jmenovitý proud jedné fáze:

$$I_{Nf} = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_s} = \frac{83333,33}{\sqrt{3} \cdot 415,7} = 115,7 \text{ A} \quad (5.7)$$

Nyní je třeba stanovit počet drážek na pól a fázi. Při návrhu je nutné dodržet dvě podmínky a to, že jmenovatel  $c$  nesmí být dělitelný počtem fází  $m$  a jeho hodnota musí být menší než počet pólových dvojic  $p$ . V zadání této diplomové práce je ve 2. bodu porovnat různé varianty strojů s různými hodnotami  $q$ . Jako referenční počet drážek na pól a fázi volím:

$$q = \frac{q_0}{c} = \frac{1}{2} = 0,5 \quad (5.8)$$

Z toho plynoucí celkový počet drážek statoru:

$$Q = 2p \cdot m \cdot q = 40 \cdot 3 \cdot 0,5 = 60 \quad (5.9)$$

Činitel pólového krytí se vypočítá jako poměr:

$$\alpha_s = \frac{2}{\pi} = 0,64 \quad (5.10)$$

Činitel tvaru pole volím [1]:

$$k_b = 1,11 \quad (5.11)$$

Lineární proudová hustota statoru je zvolena dle [1]:

$$A = 52000 \text{ Am}^{-1} \quad (5.12)$$

Indukci ve vzduchové mezeře předpokládáme:

$$B_s = 1 \text{ T} \quad (5.13)$$

Nyní je třeba vypočítat vnitřní průměr statoru. Při návrhu tohoto motoru nelze použít standardní postup uvedený v [1], ale musí se postupovat přes výpočet Essonova činitele:

$$C = \frac{\pi^2}{60} \cdot \alpha_s \cdot B_s \cdot A \cdot k_{v1} \cdot k_B = \frac{\pi^2}{60} \cdot 0,64 \cdot 1 \cdot 52000 \cdot 0,8660 \cdot 1,11 = 5235,15 \frac{\text{VA}}{\text{m}^3 \text{ ot. / min}} \quad (5.14)$$

Činitel vinutí pro první harmonickou  $k_{v1}$  zjistíme z [2] a jeho hodnota je:

$$k_{v1} = 0,8660 \quad (5.15)$$

Činitel  $k_E$  je poměr indukovaného napětí ku jmenovitému napětí a jeho velikost volíme:



$$k_E = 0,95 \quad (5.16)$$

Vnitřní elektromagnetický výkon:

$$P_i = S_N \cdot k_E = 83333,3 \cdot 0,95 = 79166,67 \text{ VA} \quad (5.17)$$

Protože rozměry motoru nebyly v zadání nikterak specifikovány, stroj nemusíme dimenzovat podle velikosti. Z toho důvodu můžeme uvažovat, že vnitřní průměr statoru se přibližně rovná vnitřní délce statoru, tedy  $D_1 = l_1$ . Nyní již známe všechny potřebné veličiny a můžeme psát:

$$D_1 = \sqrt{\frac{P_i}{C \cdot n \cdot l_1}} \quad (5.18)$$

Po matematické úpravě vzorce (5.18) obdržíme vztah pro výpočet vnitřních rozměrů statoru:

$$D_1 = \sqrt[3]{\frac{P_i}{C \cdot n}} = \sqrt[3]{\frac{79166,67}{5235,15 \cdot 400}} = 0,336 \text{ m} = 336 \text{ mm} \quad (5.19)$$

Vnitřní délka statoru:

$$l_1 = D_1 = 0,336 \text{ m} = 336 \text{ mm} \quad (5.20)$$

Drážková rozteč statoru:

$$t_{d1} = \frac{\pi \cdot D_1}{Q} = \frac{\pi \cdot 336}{60} = 17,6 \text{ mm} \quad (5.21)$$

Pólová rozteč statoru:

$$t_{p1} = \frac{\pi \cdot D_1}{2p} = \frac{\pi \cdot 336}{40} = 26,3 \text{ mm} \quad (5.22)$$

Velikost vzduchové mezery se opět u synchronního motoru s PM nedá určit postupem uvedeným v [1] a proto jí po konzultaci s vedoucím práce volím:

$$\delta = 0,8 \text{ mm} \quad (5.23)$$

Nyní již můžeme vypočítat poslední z hlavních parametrů stroje a to průměr rotoru:

$$D_2 = D_1 - 2 \cdot \delta = 0,336 - 2 \cdot 0,8 \cdot 10^{-3} = 0,3344 \text{ m} = 334,4 \text{ mm} \quad (5.24)$$

### 5.3 Návrh vinutí statoru

Pro návrh motoru s PM jsem zvolil zlomkové zubové vinutí, které se v poslední době u synchronních strojů dostává do popředí zájmu. Je to hlavně kvůli několika výhodám, které tento typ vinutí poskytuje. Patří mezi ně vysoké hustoty výkonu, vysoká účinnost, krátká čela vinutí, vysoký činitel využití drážky v kombinaci se segmentovou konstrukcí statoru. Vinutí



volím vkládané, kvůli snadnější montáži do statoru motoru. Dále již volím jednotlivé parametry vinutí a to konkrétně:

Počet vrstev vinutí:

$$2u = 2 \quad (5.25)$$

Počet paralelních větví:

$$2a = 2 \quad (5.26)$$

Cívkový krok volím jednotkový, tedy:

$$y_{1d} = 1 \quad (5.27)$$

Celkový počet cívek statorového vinutí:

$$K = u \cdot Q = 1 \cdot 60 = 60 \quad (5.28)$$

Pokud celkový počet cívek  $K$  vydělím počtem fází  $m$ , získám počet cívek připadajících na jednu fázi:

$$N_{C/f} = \frac{K}{m} = \frac{60}{3} = 20 \quad (5.29)$$

Pro další výpočty stanovím takzvaný matematický počet fází:

$$m' = 6 \quad (5.30)$$

Počet skupin cívek:

$$N_{SK} = a \cdot m' = 1 \cdot 6 = 6 \quad (5.31)$$

Počet cívek na skupinu:

$$N_{C/SK} = \frac{K}{N_{SK}} = \frac{60}{6} = 10 \quad (5.32)$$

Celkový počet závitů v sérii je dán vztahem:

$$N_s = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot A}{N_{SK} \cdot I_{Nf}} = \frac{\pi \cdot 336 \cdot 52}{6 \cdot 115,7} = 78,91 \rightarrow 80 \quad (5.33)$$

Počet vodičů v drážce statoru musí být sudé číslo, vzhledem ke zvolenému dvouvrstvému vinutí statoru. Není možné zkonstruovat motor s různým počtem vodičů v jednotlivých vrstvách. Proto:

$$V_d = \frac{a \cdot N_s}{q \cdot p} = \frac{1 \cdot 80}{0,5 \cdot 20} = 8 \quad (5.34)$$

Počet vodičů v jedné vrstvě drážky:

$$V_{d/2} = \frac{V_d}{2} = \frac{8}{2} = 4 \quad (5.35)$$



Počet drážek na jeden pól je dán poměrem celkového počtu drážek ku počtu pólů stroje:

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{60}{40} = \frac{3}{2} = 1,5 \quad (5.36)$$

Jak již bylo zmíněné výše, činitel vinutí pro 1. harmonickou má hodnotu dle [2]:

$$k_{v1} = 0,8660 \quad (5.15)$$

Činitel vinutí pro 5. harmonickou se určí dle[1] a to z hodnot činitele zkrácení kroku:

$$k_{y5} = \sin\left(v \cdot \left(\frac{y_{1d}}{Q_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right)\right) = \sin\left(5 \cdot \left(\frac{1}{1,5} \cdot \frac{\pi}{2}\right)\right) = -0,8660 \quad (5.37)$$

a činitele rozlohy, který je dán vztahem:

$$k_{r5} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m \cdot v}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m \cdot q \cdot v}\right)} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot 3 \cdot 5}\right)}{0,5 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m \cdot 0,5 \cdot 5}\right)} = 1,0055 \quad (5.38)$$

Jejich vzájemným vynásobením získám hledaný činitel vinutí pro 5. harmonickou:

$$k_{v5} = k_{y5} \cdot k_{r5} = -0,8660 \cdot 1,0055 = -0,8708 \quad (5.39)$$

Obdobně spočítám činitel vinutí pro 7. harmonickou:

$$k_{v7} = k_{y7} \cdot k_{r7} = 0,8660 \cdot 1,0028 = 0,8685 \quad (5.40)$$

kde:

činitel zkrácení kroku:

$$k_{y7} = \sin\left(v \cdot \left(\frac{y_{1d}}{Q_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right)\right) = \sin\left(7 \cdot \left(\frac{1}{1,5} \cdot \frac{\pi}{2}\right)\right) = 0,8660 \quad (5.41)$$

Činitel rozlohy:

$$k_{r5} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m \cdot v}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m \cdot q \cdot v}\right)} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot 3 \cdot 7}\right)}{0,5 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m \cdot 0,5 \cdot 7}\right)} = 1,0028 \quad (5.42)$$

Proud procházející jednou cívkou je přímo závislý především na lineární proudové hustotě:

$$I_C = \pi \cdot D_1 \cdot A = \pi \cdot 0,336 \cdot 52000 = 54800,4 \text{ A} \quad (5.43)$$

Proud procházející drážkou:

$$I_d = \frac{I_C}{Q} = \frac{54800,4}{60} = 913,3 \text{ A} \quad (5.44)$$

Poloviční proud  $I_d$  je roven proudu procházejícímu jednou vrstvou drážky:

$$I_{d/2} = \frac{I_d}{2} = 456,7 \text{ A} \quad (5.45)$$



Pro kontrolu zkusíme znovu přepočítat počet vodičů v jedné vrstvě drážky, tentokrát z poměru proudu v jedné vrstvě drážky a proudu fázového:

$$V_{d/2} = \frac{I_{d/2}}{I_{Nf}} = \frac{456,7}{115,7} = 3,9 \Rightarrow 4 \quad (5.46)$$

Proudová hustota mědi dle [1]:

$$J_{CU} = 7 \text{ A/mm}^2 \quad (5.47)$$

Průřez jednoho dílčího vodiče:

$$S_{v1} = \frac{I_{Nf}}{J_{CU}} = \frac{115,7}{7} = 16,5 \text{ mm}^2 \quad (5.48)$$

Rozměry vodičů přizpůsobují velikosti drážky statoru, která je vypočtená v kapitole 5.3. Pro lepší přehled je uvádím již nyní a podrobněji se jimi budu zabývat v následující kapitole.

Výška jednoho dílčího vodiče:

$$h_{v1} = 3,2 \text{ mm} \quad (5.49)$$

Šířka jednoho dílčího vodiče:

$$b_{v1} = 5 \text{ mm} \quad (5.50)$$

Na závěr této kapitoly předkládám Tingleyho schéma pro první tři póly stroje. Jednotlivé fáze jsou označeny barevně, polarity proudů v jednotlivých drážkách jsou označeny symboly (+) a (-). Schéma vychází ze vztahu (5.8) a bližší informace o jeho tvorbě naleznete například zde [6], [7] nebo [8].

ČÍSLO FÁZE	1. FÁZE	3. FÁZE	2. FÁZE
ČÍSLO PÓLU	A	C'	B
	A'	C	B'
1.	1(+)		3(+)
	2(-)		4(-)
2.		5(+)	
		6(-)	
3.	7(+)		9(+)
	8(-)		10(-)

Tab. 5.1 Tingleyho schéma pro motor o parametrech  $2p=40, m=3, q=1/2$



## 5.4 Návrh drážek statoru

Drážku volím jednoduchou, otevřenou, obdélníkového tvaru. Tento typ drážky bude nejvíce vyhovovat vkládanému dvouvrstvému vinutí jak početně, tak hlavně konstrukčně. Stator bude vyroben z elektrotechnických plechových pásů typu M350-50A (ISO 10106).

Předpokládaná magnetická indukce v zubu bude mít hodnotu:

$$B_{z1} = 1,8T \quad (5.51)$$

Magnetická indukce jha statoru:

$$B_{j1} = 1,4T \quad (5.52)$$

Hodnoty magnetických indukcí byly zvoleny s ohledem na výsledky práce [2] a dle doporučení vedoucího práce.

Činitel plnění železa pro tento motor uvažuji o velikosti:

$$k_{Fe} = 0,97 \quad (5.53)$$

Šířka zubu statorového plechu vychází ze zvolených magnetických intenzit a je dána vztahem:

$$b_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_d}{B_{z1} \cdot k_{FE}} = \frac{1 \cdot 17,6}{1,8 \cdot 0,97} = 10,1mm \quad (5.54)$$

Šířka drážky:

$$b_{d1} = \frac{\pi \cdot D_1}{Q} - b_{z1} = \frac{\pi \cdot 336}{60} - 10,1 = 7,5mm \quad (5.55)$$

Jak již bylo napsáno v předchozí kapitole, rozměry vodičů přizpůsobuji drážce. Nyní když mám dle vztahu (5.55) spočtenou šířku drážky, mohu do ní navrhnout vodič i s izolací. Opět zde nepoužívám postup dle [1], protože dnešní materiály jsou již na jiné úrovni.

Materiály izolací volím dle konzultací s vedoucím práce.

Izolace jednoho dílčího vodiče bude z Kaptonu a její tloušťka:

$$a_1 = 0,18mm \quad (5.56)$$

Izolace jedné vrstvy vinutí bude tvořena z Mika pásky o tloušťce:

$$a_2 = 0,78mm \quad (5.57)$$

Šířku technologické mezery mezi vinutím a drážkou volím:

$$a_3 = 0,2mm \quad (5.58)$$

Drážka bude vyložena slídovým papírem a šířku vodiče vkládaného do drážky volím  $b_{v1} = 5mm$ .



Vložka mezi dvěma vrstvami cívek vinutí bude vyrobena z laminátu a její šířka bude:

$$a_4 = 1,5mm \quad (5.59)$$

Výška jedné cívky složené z vodičů:

$$h_c = (2 \cdot a_1 + h_{v1}) \cdot V_{d/2} + 2 \cdot a_2 = (2 \cdot 0,18 + 3,2) \cdot 4 + 2 \cdot 0,78 = 15,8mm \quad (5.60)$$

Mezera mezi cívkou a koncovým klínem vinutí bude mít rozměr:

$$a_5 = 0,2mm \quad (5.61)$$

Výška klínu statorové drážky:

$$a_6 = 1,5mm \quad (5.62)$$

Výška hlavy statorového zubu:

$$a_7 = 0,3mm \quad (5.63)$$

Nyní již známe všechny potřebné hodnoty pro výpočet výšky statorové drážky. Ze známé šířky  $b_{v1}$  a průřezu  $S_{v1}$  vodiče stanovíme jeho výšku  $h_{v1} = 3,2mm$ , a poté můžeme psát:

$$h_d = 2 \times h_c + a_4 + a_5 + a_6 + a_7 = 2 \times 15,8 + 1,5 + 0,2 + 1,5 + 0,3 = 35,1mm \Rightarrow 36mm \quad (5.64)$$

Magnetický tok ve statoru:

$$\Phi = \alpha_\delta \cdot t_{p1} \cdot l_1 \cdot B_\delta = 0,64 \cdot 26,3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,336 \cdot 1 = 0,00563 \text{ Wb} \quad (5.65)$$

Z magnetického toku můžeme spočítat výšku statorového jha:

$$h_{j1} = \frac{\Phi}{2 \cdot B_{j1} \cdot k_{FE} \cdot l_1} = \frac{0,00563}{2 \cdot 1,4 \cdot 0,97 \cdot 0,336} = 0,00617m = 6,2mm \quad (5.66)$$

Pro výpočet vnějšího průměru jha statoru musíme kromě průměru jha, statorové drážky a výšky jha uvažovat také ventilační kanály statoru. Protože tepelný výpočet není součástí této práce, volím je dle doporučení vedoucího práce kruhové o poloměru  $r_{vk} = 5mm$  a šířku jha nad nimi  $10mm$ .

$$D_e = 2 \cdot (h_d + h_{j1}) + D_1 + 2 \cdot (10 + r_{vk}) = 2 \cdot (36 + 6,2) + 336 + 2 \cdot (10 + 5) = 450,2mm = 0,4502m \quad (5.67)$$

Magnetický tok v drážce statoru:

$$\Phi_d = B_\delta \cdot l_1 \cdot t_d = 1 \cdot 0,336 \cdot 17,6 \cdot 10^{-3} = 0,00589 \text{ Wb} \quad (5.68)$$

Magnetický tok v zubu statoru:

$$\Phi_z = b_{z1} \cdot k_{FE} \cdot B_{z1} \cdot l_1 = 10,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97 \cdot 1,8 \cdot 0,336 = 0,00589 \text{ Wb} \quad (5.69)$$

Obsah statorové drážky spočtu jednoduše z její šířky a délky a jako obsah obdélníku:

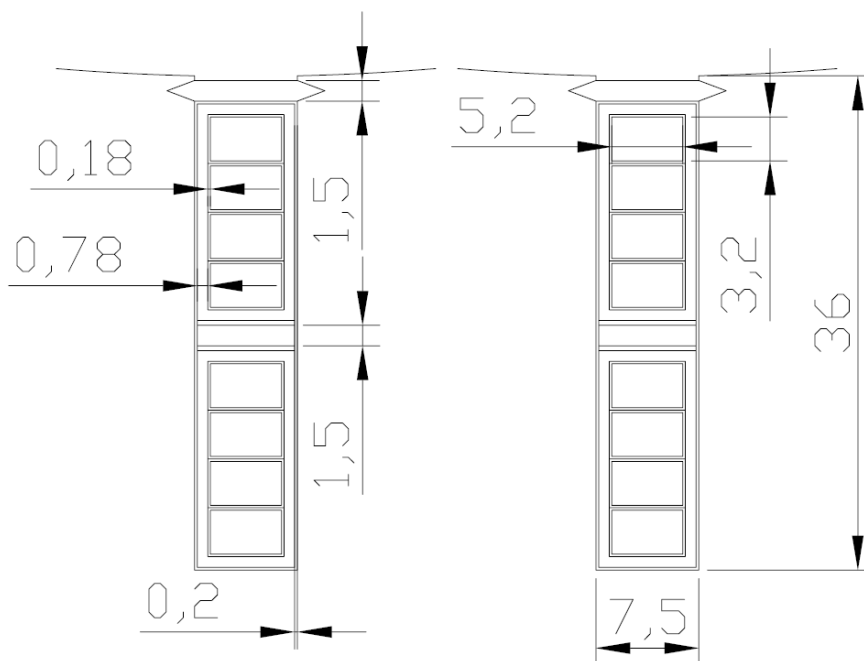
$$S_d = h_d \cdot b_{d1} = 36 \cdot 7,5 = 270 \text{ mm}^2 \quad (5.69)$$

Obsah mědi vodičů ve statorové drážce:

$$S_{Cu1} = h_{v1} \cdot b_{v1} \cdot 2 \cdot V_{d/2} = 3,2 \cdot 5 \cdot 2 \cdot 4 = 128 \text{ mm}^2 \quad (5.70)$$

Činitel využití drážky vyjadřuje poměr mezi obsahem mědi vodičů a celkovým obsahem drážky statoru:

$$k_{wb} = \frac{S_{Cu1}}{S_d} = \frac{128}{270} = 0,47 \quad (5.71)$$

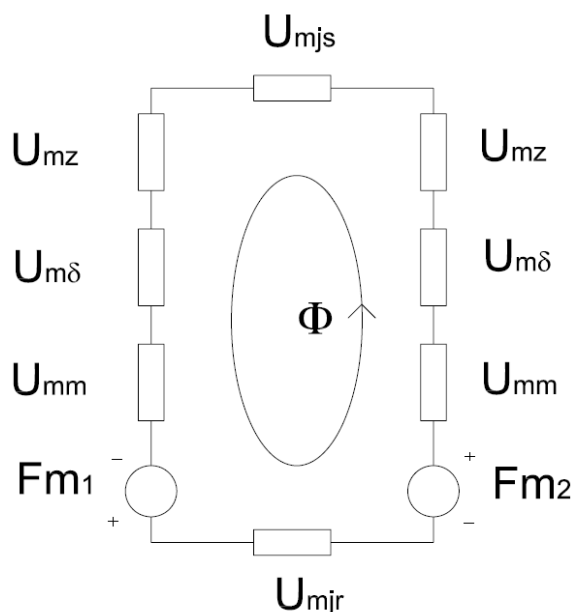


Obr. 5.1 Grafické znázornění drážky statoru s vyznačenými hlavními rozměry

## 5.5 Návrh permanentních magnetů rotoru

Jak již bylo řečeno v předchozích kapitolách, tento synchronní motor nemá na rotoru budící vinutí, ale permanentní magnety. Existuje několik způsobů výpočtu velikosti PM. Například v publikaci [9] je popsán postup výpočtu přes velikost indukce ve vzduchové mezeře, která je přímo úměrná remanentní indukci magnetů na rotoru. Po konzultaci s vedoucím práce ale bude při dalších výpočtech použit postup, při kterém nejprve sestavím magnetický obvod, identifikuji jednotlivé části tohoto obvodu a následně přes Carterovy činitele určím v několika krocích rozměry magnetů.





Obr. 5.2 Náhradní schéma magnetického obvodu motoru

Na Obr. 5.2 je nakresleno náhradní schéma magnetického obvodu.  $F_{m1}$  a  $F_{m2}$  jsou magnetická napětí dvou sousedních PM. Úbytky magnetického napětí v magnetech jsou značeny  $U_{mm}$ , ve vzduchové mezeře  $U_{m\delta}$ , v zubech statoru  $U_{mz}$  a úbytky magnetických napětí ve jhách stroje mají označení  $U_{mjs}$  a  $U_{mjr}$ . Jak je již na obrázku naznačeno, magnetický tok  $\Phi$  vytvořený v permanentních magnetech proudí přes vzduchovou mezeru do zubů statoru. Zde pokračuje přes tělo jha do dalšího zubu opět přes vzduchovou mezeru až do jha rotorového. A takto se celý proces opakuje. Principiálně je schéma velice podobné elektrickému obvodu, kde PM představují zdroje magnetického napětí a úbytky magnetických napětí jednotlivé úbytky napětí v obvodu elektrickém. Celým obvodem místo elektrického proudu protéká magnetický tok  $\Phi$ .

Po vyřešení tohoto obvodu budu moci stanovit rozměry magnetů, ale nejprve musím zvolit jejich vhodný typ. Permanentní magnety ze vzácných zemin volím NdFeB a to konkrétně typ N35UH [10]. Teplotní odolnost těchto PM je  $180^{\circ}\text{C}$  a další jejich parametry jsou uvedené v příloze.

Koercivita magnetu N35UH:

$$H_c = 903 \text{ kA/m} \quad (5.72)$$

Relativní permeabilita magnetu N35UH:

$$\mu_r = 1,05 \quad (5.73)$$

Magnetickou indukci jha rotoru uvažují stejnou jako magnetickou indukci jha statoru, tedy:

$$B_{jr1} = 1,4T \quad (5.74)$$

Permeabilita vakua:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1} \quad (5.75)$$

Nyní si rozdělíme zuby statoru na několik částí, které budeme podrobněji zkoumat, konkrétně na hlavu, střed a patu. Tento krok provádíme z důvodu různých magnetických indukcí a intenzit v různých částech zubu. Nejprve spočteme jednotlivé drážkové rozteče.

Drážková rozteč hlavy zubu statoru:

$$t_{d1} = \frac{\pi \cdot D_1}{Q} = \frac{\pi \cdot 336}{60} = 17,6 \text{ mm} \quad (5.76)$$

Drážková rozteč ve středu zubu statoru

$$t_{d2} = \frac{\pi \cdot (D_1 + h_d)}{Q} = \frac{\pi \cdot (336 + 36)}{60} = 19,4 \text{ mm} \quad (5.77)$$

Drážková rozteč paty zubu statoru

$$t_{d3} = \frac{\pi \cdot (D_1 + 2 \cdot h_d)}{Q} = \frac{\pi \cdot (336 + 2 \cdot 36)}{60} = 21,3 \text{ mm} \quad (5.78)$$

Z drážkových roztečí můžeme spočítat, jak se statorový zub postupně rozšiřuje.

Šířka hlavy zubu statoru:

$$b_{z1} = t_{d1} - b_{d1} = 17,6 - 7,5 = 10,1 \text{ mm} \quad (5.79)$$

Šířka ve středu zubu statoru:

$$b_{z2} = t_{d2} - b_{d1} = 19,4 - 7,5 = 11,9 \text{ mm} \quad (5.80)$$

Šířka paty zubu statoru:

$$b_{z3} = t_{d3} - b_{d1} = 21,3 - 7,5 = 13,8 \text{ mm} \quad (5.81)$$

Dalším krokem při výpočtu rozměrů permanentních magnetů bude stanovení indukčností v jednotlivých částech statorového zubu. K tomu použijeme následující matematický vztah.

Zdánlivá indukce v hlavě zubu statoru:

$$B_{z1}' = \frac{B_\delta \cdot t_{d1}}{b_{z1} \cdot k_{FE}} = \frac{1 \cdot 17,6}{10,1 \cdot 0,97} = 1,8T \quad (5.82)$$

Zdánlivá indukce ve středu zubu statoru:

$$B_{z2}' = \frac{B_\delta \cdot t_{d2}}{b_{z2} \cdot k_{FE}} = \frac{1 \cdot 19,4}{11,9 \cdot 0,97} = 1,68T \quad (5.83)$$

Zdánlivá indukce v patě zubu statoru



$$B_{z3}' = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d3}}{b_{z3} \cdot k_{FE}} = \frac{1 \cdot 21,3}{13,8 \cdot 0,97} = 1,59T \quad (5.84)$$

Nyní spočteme činitele odlehčení, které jsou nutné pro stanovení skutečné indukce ve statorových zubech.

Činitel odlehčení v hlavě zubu statoru:

$$k_{p11} = \frac{t_{d1}}{b_{z1} \cdot k_{FE}} - 1 = \frac{17,6}{10,1 \cdot 0,97} - 1 = 0,80 \quad (5.85)$$

Činitel odlehčení ve středu zubu statoru:

$$k_{p12} = \frac{t_{d2}}{b_{z2} \cdot k_{FE}} - 1 = \frac{19,4}{11,9 \cdot 0,97} - 1 = 0,68 \quad (5.86)$$

Činitel odlehčení v patě zubu statoru:

$$k_{p13} = \frac{t_{d3}}{b_{z3} \cdot k_{FE}} - 1 = \frac{21,3}{13,8 \cdot 0,97} - 1 = 0,59 \quad (5.87)$$

Skutečné indukce ve statorových zubech budeme později porovnávat s hodnotami, které získáme analýzou PM v programu FEMM.

Skutečná hodnota indukce v hlavě zubu:

$$B_{z1SKUT} = B_{z1}' \cdot k_{p11} = 1,8 \cdot 0,80 = 1,44T \quad (5.88)$$

Skutečná hodnota indukce ve středu zubu:

$$B_{z2SKUT} = B_{z2}' \cdot k_{p11} = 1,68 \cdot 0,68 = 1,14T \quad (5.89)$$

Skutečná hodnota indukce v patě zubu:

$$B_{z3SKUT} = B_{z3}' \cdot k_{p11} = 1,59 \cdot 0,59 = 0,94T \quad (5.90)$$

Pro určení magnetických intenzit v statorových zubech jsem zvolil zdroj [1] a stejné hodnoty jsem použil i při pozdější analýze v programu FEMM. V přílohách na konci diplomové práce je uveden katalogový list plechu M350-50A.

Magnetická intenzita v hlavě zubu statoru:

$$H_{z1} = 3190Am^{-1} \quad (5.91)$$

Magnetická intenzita ve středu zubu statoru:

$$H_{z2} = 1440Am^{-1} \quad (5.92)$$

Magnetická intenzita v patě zubu statoru:

$$H_{z3} = 890Am^{-1} \quad (5.93)$$

Nyní již můžeme stanovit první úbytek napětí v magnetickém obvodu na *Obr. 5.2*.

Magnetické napětí v zubu statoru:

$$U_{mz} = \frac{H_{z1} \cdot h_d}{3} + \frac{H_{z2} \cdot h_d}{3} + \frac{H_{z3} \cdot h_d}{3} =$$

$$\frac{3190 \cdot 36 \cdot 10^{-3}}{3} + \frac{1440 \cdot 36 \cdot 10^{-3}}{3} + \frac{890 \cdot 36 \cdot 10^{-3}}{3} = 66,24A \quad (5.94)$$

Magnetickou intenzitu ve statorovém jhu opět odečteme z tabulky ze zdroje [1]:

$$H_{js} = 410 Am^{-1} \quad (5.95)$$

Pro výpočet délky střední indukční siločáry statorového jha bohužel nemůžeme použít vztahy uvedené [1] nebo [10], neboť ani jeden z autorů neuvažuje stator s již spočítanými chladicími otvory. Matematický vzorec, který můžeme při výpočtu požit:

$$l_{js} = \frac{(D_1 + 2 \cdot h_d + h_{j1}) \cdot \pi}{2p} = \frac{(336 + 2 \cdot 36 + 6,2) \cdot \pi}{40} = 32,49 \text{ mm} \quad (5.96)$$

Ze známé délky střední indukční siločáry a magnetické intenzity statorového jha získáme magnetické napětí ve statorovém jhu:

$$U_{mjs} = H_{js} \cdot l_{js} = 410 \cdot 32,49 \cdot 10^{-3} = 13,32A \quad (5.97)$$

Nyní si musíme zvolit předběžnou výšku magnetu na rotoru. V několika následujících interakčních krocích budeme tento odhad dalšími výpočty pomocí Carterova činitele zpřesňovat. Pokud nebude na začátku náš kvalifikovaný odhad příliš přesný, ke správné hodnotě výšky PM se dopracujeme větším počtem interakčních kroků. Pokud se námi zvolená výška magnetu bude lišit od skutečnosti o řád a výše, z výpočtů bude patrné, že jsme udělali chybu a celý postup budeme nuceni opakovat s jiným kvalifikovaným odhadem. Pro začátek volím magnet o velikosti:

$$h_m = 5mm \quad (5.98)$$

Magnetická intenzita ve vzduchové mezeře:

$$H_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 796178,34 Am^{-1} \quad (5.99)$$

## 1. INTERAKČNÍ KROK

Výpočet Carterova činitele pro stator se dá provést dvěma způsoby, které jsou uvedené v [1]. Buď použijeme empirický vztah, nebo pro výpočet použijeme postup, při kterém stanovujeme konstantu Carterova činitele  $\gamma$ . První způsob je poččetně snadnější, ale hodnoty Carterova činitele vycházejí o něco vyšší a výpočet je méně přesný. Z toho důvodu volím druhý postup:



$$k_{c1} = \frac{t_d}{t_d - \delta \cdot \gamma} = \frac{17,6}{17,6 - 0,8 \cdot 6,12} = 1,386 \quad (5.100)$$

kde konstanta Carterova činitele:

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{b_{d1}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{d1}}{\delta}} = \frac{\left(\frac{7,5}{0,8}\right)^2}{5 + \frac{7,5}{0,8}} = 6,12 \quad (5.101)$$

Dalším krokem je pomocí vztahu (5.100) vypočítat velikost vzduchové mezery s uvažováním drážkování:

$$\delta' = \frac{k_{c1}}{\delta} = \frac{1,386}{0,8} = 1,109 \text{ mm} \quad (5.102)$$

Magnetické napětí vzduchové mezery:

$$U_{m\delta} = \frac{H_{\delta}}{\delta'} = \frac{796178,34}{1,109 \cdot 10^{-3}} = 883,06 \text{ A} \quad (5.103)$$

Magnetickou indukci v magnetech můžeme uvažovat stejnou jako magnetickou indukci ve vzduchové mezeře, jak uvádí ve své práci [2], proto:

$$B_m = 1T \quad (5.104)$$

Z magnetické indukce a katalogového listu PM N35UH můžeme spočítat magnetickou intenzitu v magnetech:

$$H_m = \frac{B_r}{\mu_r \cdot \mu_0} = \frac{1}{1,05 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 758265,09 \text{ Am}^{-1} \quad (5.105)$$

Magnetické napětí v magnetech:

$$U_{mm} = H_m \cdot h_m = 758265,09 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 3791,33 \text{ A} \quad (5.106)$$

Magnetická intenzita v rotorovém jhu je opět odečtena z tabulek ze zdroje [1]:

$$H_{jr} = 1230 \text{ Am}^{-1} \quad (5.107)$$

Délka střední indukční siločáry rotorového jha je definována vztahem:

$$l_{jr} = \frac{\pi \cdot (D_1 - 2 \cdot \delta - h_m)}{2p} = \frac{\pi \cdot (336 - 2 \cdot 0,8 - 5)}{40} = 25,83 \text{ mm} \quad (5.108)$$

Magnetické napětí v rotorovém jhu:

$$U_{mjr} = \frac{H_{jr}}{l_{jr}} = \frac{1230}{25,83 \cdot 10^{-3}} = 31,77 \text{ A} \quad (5.109)$$

Nyní můžeme předběžně spočítat skutečnou výpočtovou výšku magnetu v prvním interakčním kroku:

$$h_{m1} = \frac{U_{m\delta} + U_{mz} + \frac{U_{mjs}}{2} + \frac{U_{mjr}}{2}}{H_c - H_m} =$$

$$\frac{883,06 + 66,24 + \frac{13,32}{2} + \frac{31,77}{2}}{903 \cdot 10^3 - 758265,0895} = 0,0067\text{m} = 6,71\text{mm} \quad (5.110)$$

Jak je vidět, oproti prvnímu odhadu (5.98) se tato hodnota významně liší. Použijeme jí pro přepočítání vzduchové mezery ve 2. interakčním kroku a celý postup zopakujeme.

## 2. INTERAKČNÍ KROK

Přepočítání vzduchové mezery:

$$\delta'' = h_{m1} + \delta = 6,71 + 0,8 = 7,51\text{mm} \quad (5.111)$$

Přepočítání Carterova činitele:

$$k_{c12} = \frac{t_d}{t_d - \delta'' \cdot \gamma_2} = \frac{17,6}{17,6 - 7,51 \cdot 0,166} = 1,077 \quad (5.112)$$

Konstanta Carterova činitele

$$\gamma_2 = \frac{\left(\frac{b_{d1}}{\delta''}\right)^2}{5 + \frac{b_{d1}}{\delta''}} = \frac{\left(\frac{7,5}{7,51}\right)^2}{5 + \frac{7,5}{7,51}} = 0,166 \quad (5.113)$$

Zpřesněná vzduchová mezera:

$$\delta_2'' = k_{c12} \cdot \delta = 1,077 \cdot 0,8 = 0,861\text{mm} \quad (5.114)$$

Magnetické napětí vzduchové mezery:

$$U_{m\delta 2} = \frac{B_\delta}{\mu_0} \cdot \delta_2'' = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0,861 \cdot 10^{-3} = 685,72\text{A} \quad (5.115)$$

Skutečná výpočtová výška magnetu:

$$h_{m2} = \frac{U_{m\delta 2} + U_{mz} + \frac{U_{mjs}}{2} + \frac{U_{mjr}}{2}}{H_c - H_m} =$$

$$\frac{685,72 + 66,24 + \frac{13,32}{2} + \frac{31,77}{2}}{903 \cdot 10^3 - 758265,0895} = 0,00535\text{m} = 5,35\text{mm} \quad (5.116)$$

Ve druhém interakčním kroku se výška magnetu velice přiblížila původnímu odhadu. Tuto výšku opět použijeme pro přepočítání vzduchové mezery ve 3. interakčním kroku.



### 3. INTERAKČNÍ KROK

Přepočít vzduchové mezery:

$$\delta'' = h_{m2} + \delta = 5,35 + 0,8 = 6,15 \text{ mm} \quad (5.117)$$

Přepočít Carterova činitele:

$$k_{c13} = \frac{t_d}{t_d - \delta'' \cdot \gamma_3} = \frac{17,6}{17,6 - 6,15 \cdot 0,239} = 1,091 \quad (5.118)$$

Konstanta Carterova činitele:

$$\gamma_3 = \frac{\left(\frac{b_{d1}}{\delta''}\right)^2}{5 + \frac{b_{d1}}{\delta''}} = \frac{\left(\frac{7,5}{6,15}\right)^2}{5 + \frac{7,5}{6,15}} = 0,239 \quad (5.119)$$

Zpřesněná vzduchová mezera:

$$\delta_3'' = k_{c13} \cdot \delta = 1,091 \cdot 0,8 = 0,873 \text{ mm} \quad (5.120)$$

Magnetické napětí vzduchové mezery:

$$U_{m\delta 3} = \frac{B_\delta}{\mu_0} \cdot \delta_3'' = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0,873 \cdot 10^{-3} = 695,20 \text{ A} \quad (5.121)$$

Skutečná výpočtová výška magnetu:

$$h_{m3} = \frac{U_{m\delta 3} + U_{mz} + \frac{U_{mjs}}{2} + \frac{U_{mjr}}{2}}{H_c - H_m} = \frac{695,20 + 66,24 + \frac{13,32}{2} + \frac{31,77}{2}}{903 \cdot 10^3 - 758265,0895} = 0,00542 \text{ m} = 5,42 \text{ mm} \quad (5.122)$$

Jak je vidět z předchozího výpočtu skutečná výpočtová výška magnetu opět mírně vzrostla, což znamená, že jsme již našli její maximální a minimální hodnotu v jednotlivých interakčních krocích. Provedeme 4. interakční krok, na základě kterého zpřesníme výpočet a určíme konečnou velikost magnetu.

### 4. INTERAKČNÍ KROK

Přepočít vzduchové mezery:

$$\delta''' = h_{m3} + \delta = 5,42 + 0,8 = 6,22 \text{ mm} \quad (5.123)$$

Přepočít Carterova činitele:

$$k_{c14} = \frac{t_d}{t_d - \delta''' \cdot \gamma_4} = \frac{17,6}{17,6 - 6,22 \cdot 0,235} = 1,091 \quad (5.124)$$

Konstanta Carterova činitele:

$$\gamma_4 = \frac{\left(\frac{b_{d1}}{\delta''''}\right)^2}{5 + \frac{b_{d1}}{\delta''''}} = \frac{\left(\frac{7,5}{6,22}\right)^2}{5 + \frac{7,5}{6,22}} = 0,235 \quad (5.125)$$

Zpřesněná vzduchová mezera:

$$\delta_4'''' = k_{c14} \cdot \delta = 1,091 \cdot 0,8 = 0,872 \text{ mm} \quad (5.126)$$

Magnetické napětí vzduchové mezery:

$$U_{m\delta 4} = \frac{B_\delta}{\mu_0} \cdot \delta_4'''' = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0,872 \cdot 10^{-3} = 694,66 \text{ A} \quad (5.127)$$

Skutečná výpočtová výška magnetu:

$$h_{m4} = \frac{U_{m\delta 4} + U_{mz} + \frac{U_{mjs}}{2} + \frac{U_{mjr}}{2}}{H_c - H_m} = \quad (5.128)$$

$$\frac{694,66 + 66,24 + \frac{13,32}{2} + \frac{31,77}{2}}{903 \cdot 10^3 - 758265,0895} = 0,00541 \text{ m} = 5,41 \text{ mm}$$

Skutečná výška magnetu osazeného na rotoru bude mít zaokrouhlenou hodnotu:

$$h_{mSKUT.} = 5,4 \text{ mm} \quad (5.129)$$

Pro všechny další výpočty budu také nadále uvažovat hodnotu Carterova činitele ze čtvrtého interakčního kroku, který nejvíce odpovídá skutečné výšce magnetu osazeného na rotoru.

Šířku magnetu osazeného na rotoru získáme z předpokladu, že magnetická indukce v magnetu je rovna magnetické indukci ve vzduchové mezeře, tedy  $IT$ . Tím pádem bude oběma částmi procházet stejný magnetický tok  $\Phi$  a úpravou vztahu (5.130) získáme hledanou šířku magnetu:

$$B_m = B_\delta \rightarrow \frac{\Phi}{\Phi_m} = 1 = \frac{\alpha_\delta \cdot B_\delta \cdot t_p \cdot l_1}{B_m \cdot b_m \cdot l_1} = \frac{\alpha_\delta \cdot t_p}{b_m} \rightarrow \quad (5.130)$$

$$\rightarrow b_m = \alpha_\delta \cdot t_p = 0,64 \cdot 26,3 = 16,8 \text{ mm}$$

Výsledná velikost jednoho magnetu umístěného na rotoru tedy bude 5,4 mm výška a 16,8 mm šířka. Počet magnetů na rotoru, je roven počtu pólů stroje tedy 40 ( $2p=40$ ).



## 5.6 Výpočet odporu vinutí

Postup pro výpočet a hodnoty jednotlivých veličin odporu vinutí volím dle zdroje [1].  
Rezistivita vodiče vinutí při 20°C:

$$\rho_{v20} = \frac{1}{57} \cdot 10^{-6} = 1,75439 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}^{-1} \quad (5.131)$$

Výpočet délky čela statorového vinutí volím jiný, než je uveden v [1], z důvodu použití zubového vinutí. Toto vinutí má podstatně menší čela a vlastně jeho jediným omezením jsou mechanické možnosti ohybu vodičů. Střed ohybu volím dle doporučení vedoucího práce 5mm od kraje statorového plechu:

$$l_{\varepsilon} = \frac{\pi \cdot t_d}{2} + 5 = \frac{\pi \cdot 17,6}{2} + 5 = 32,59 \text{ mm} \quad (5.132)$$

Střední délka závitů statorového vinutí:

$$l_{z1} = 2 \cdot (l_1 + l_{\varepsilon}) = 2 \cdot (336 + 32,59) = 736,42 \text{ mm} \quad (5.133)$$

Odpor statorového vinutí při 20°C získáme ze vztahu:

$$R_{1(20)} = \frac{\rho_v \cdot N_s \cdot l_{z1}}{n_p \cdot S_v \cdot a} = \frac{1,75439 \cdot 10^{-8} \cdot 80 \cdot 736,42 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 16,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1} = 0,0617 \Omega \quad (5.134)$$

Rezistivita vodiče vinutí při 160°C:

$$\rho_{v160} = \frac{1}{41} \cdot 10^{-6} = 2,43902 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}^{-1} \quad (5.135)$$

Odpor statorového vinutí při 160°C potom bude analogií (5.134):

$$R_{1(160)} = \frac{\rho_v \cdot N_s \cdot l_{z1}}{n_p \cdot S_v \cdot a} = \frac{2,43902 \cdot 10^{-8} \cdot 80 \cdot 736,42 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 16,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1} = 0,0858 \Omega \quad (5.136)$$

Vypočtené hodnoty odpovídají předpokladům i závěrům u obdobných prací. Výsledky z této kapitoly budeme dále potřebovat v kapitole, která se bude zabývat účinností a ztrátami ve stroji.

## 5.7 Výpočet rozptylové indukčnosti vinutí

Pro výpočet rozptylové indukčnosti vinutí stroje budeme muset vypočítat hodnoty rozptylových reaktancí a činitelů magnetických vodivostí. Výpočet je opět převzat ze zdroje [1].

Zkrácení kroku vinutí je poměrem cívkového kroku a počtu drážek na pól:

$$\beta = \frac{y_{1d}}{Q_p} = \frac{1}{1,5} = 0,67 \quad (5.137)$$

Činitelé, závisící na kroku vinutí, nutné k výpočtu činitele magnetické vodivosti drážkového rozptylu následně určíme ze vztahů:

$$k_{\beta}' = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot \beta) = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot 0,67) = 0,75 \quad (5.138)$$

$$k_{\beta} = 0,25 \times (1 + 3 \times k_{\beta}') = 0,25 \times (1 + 3 \times 0,75) = 0,81 \quad (5.139)$$

Činitel magnetické vodivosti drážkového rozptylu:

$$\lambda_{dh} = \frac{2 \cdot h_c}{3 \cdot b_{d1}} \cdot k_{\beta} + \frac{a_5 + a_6 + a_7}{b_{d1}} \cdot k_{\beta}' + \frac{a_4}{4 \cdot b_{d1}} =$$

$$\frac{2 \cdot 15,8}{3 \cdot 7,5} \cdot 0,81 + \frac{0,2 + 1,5 + 0,3}{7,5} \cdot 0,75 + \frac{1,5}{4 \cdot 7,5} = 1,39 \quad (5.140)$$

Činitel magnetické vodivosti rozptylu čel:

$$\lambda_{\epsilon} = 0,34 \cdot \frac{0,5}{l_1} \cdot (l_{\epsilon} - 0,64 \cdot \beta \cdot t_p) =$$

$$0,34 \cdot \frac{0,5}{0,336} \cdot (32,59 \cdot 10^{-3} - 0,64 \cdot 0,67 \cdot 26,3 \cdot 10^{-3}) = 0,01081 \quad (5.141)$$

Střední velikost vzduchové mezery:

$$\delta' = \delta \cdot k_{c14} = 0,8 \cdot 1,091 = 0,87 \text{ mm} \quad (5.142)$$

Činitel magnetického diferenčního rozptylu je poté možno vypočíst dle:

$$\lambda_{dif} = \frac{0,03 \cdot (t_p \cdot \alpha_{\delta})}{(\delta' + h_{mSKUT}) \cdot k_{c14} \cdot q} =$$

$$\frac{0,03 \cdot (26,3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,64)}{(0,87 \cdot 10^{-3} + 5,4 \cdot 10^{-3}) \cdot 1,091 \cdot 0,5} = 0,14709 \quad (5.143)$$

Když již známe všechny činitele magnetických rozptylů, můžeme přistoupit k výpočtu rozptylové reaktance jedné fáze, která je vyjádřena matematickým vztahem:

$$X_{\sigma 1} = 15,8 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_s}{100}\right)^2 \cdot \frac{l_1}{p \cdot q} \cdot (\lambda_{dh} + \lambda_{\epsilon} + \lambda_{dif}) =$$

$$15,8 \cdot \frac{133,33}{100} \cdot \left(\frac{79}{100}\right)^2 \cdot \frac{0,336}{20 \cdot 0,5} \cdot (1,39 + 0,01081 + 0,14709) = 0,794 \Omega \quad (5.144)$$

Vzduchová mezera zvětšená o tloušťku magnetu:

$$\delta_1 = (\delta + h_{mSKUT}) \cdot k_{c14} = (0,8 + 5,4) \cdot 1,091 = 6,76 \text{ mm} \quad (5.145)$$

Výpočet synchronní reaktance není možné provést dle postupu [1] pro synchronní stroje. V tomto případě musíme postupovat přes identifikaci magnetizačního proudu a magnetizačního napětí v obvodu, jak je naznačeno ve stejné publikaci, ale pro výpočet asynchronního stroje.

K výpočtu synchronní reaktance je nutné určit magnetizační napětí obvodu a to podle:



$$F_m = 2 \cdot (U_{m\delta} + U_{mz} + U_{mm}) + U_{mjs} + U_{mjr} =$$

$$2 \cdot (883,06 + 66,24 + 3791,33) + 13,32 + 31,77 = 9526,33A \quad (5.146)$$

Magnetizační proud je dán vztahem:

$$I_\mu = \frac{p \cdot F_m}{0,9 \cdot m \cdot N_s \cdot k_{v1}} = \frac{20 \cdot 9526,33}{0,9 \cdot 3 \cdot 80 \cdot 0,8660} = 1018,55A \quad (5.147)$$

Synchronní reaktance:

$$X_d = \frac{k_E \cdot U_f}{I_\mu} = \frac{0,95 \cdot 240}{1018,55} = 0,224\Omega \quad (5.148)$$

Následně můžeme vypočítat hledanou indukčnost synchronního motoru s PM:

$$L = \frac{X_d}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{0,224}{2 \cdot \pi \cdot 133,33} = 0,0011037H = 0,2673mH \quad (5.149)$$

## 5.8 Stanovení ztrát a účinnosti motoru

Jouleovy ztráty vnikají jak v mědi a železe stroje, tak i v permanentních magnetech. Reprezentují vlastně tepelné ztráty motoru, které jsou způsobeny průchodem proudu, který ho zahřívá. Mezi další ztráty, které mají vliv na celkovou účinnost synchronního stroje, patří ztráty přídatné, v permanentních magnetech a mechanické. V této kapitole postupně vypočítáme tyto ztráty a stanovíme účinnost, s jakou bude navrhovaný motor pracovat.

Nyní si nadefinujeme několik hodnot, které použijeme v následujících výpočtech. Činitelé uvažující zvětšení ztrát v důsledku zkratování jednotlivých plechů vlivem otřepů a změn jejich struktury při lisování.[1]:

$$k_{dj} = 1,5 \quad (5.150)$$

$$k_{dz} = 2 \quad (5.151)$$

Hodnotu hustoty elektrotechnických plechů M350-50A vyčteme z jeho datových listů[13]:

$$\rho_{Fe} = 7850kg/m^3 \quad (5.152)$$

Šířka zubu v jeho polovině:

$$b_{z(1/2)} = \frac{\pi \cdot (D_1 + h_d)}{Q} - b_{d1} =$$

$$\frac{\pi \cdot (0,336 + 36 \cdot 10^{-3})}{60} - 7,5 \cdot 10^{-3} = 0,0119m = 11,9mm \quad (5.153)$$

Dalším krokem bude výpočet hmotností jednotlivých částí stroje. Pro větší přehlednost uvádím jejich výpočty pohromadě a až následně je použiji při řešení ztrát jednotlivých částí motoru.

Hmotnost zubů statoru:

$$m_{z1} = \rho_{Fe} \cdot l_1 \cdot k_{Fe} \cdot h_d \cdot b_{z(1/2)} \cdot Q = \quad (5.154)$$

$$7850 \cdot 0,336 \cdot 0,97 \cdot 36 \cdot 10^{-3} \cdot 0,0119 \cdot 60 = 65,93 \text{ kg}$$

Při výpočtu hmotnosti statorového jha a rotorového jha, nesmíme zapomenout uvažovat chladicí kanály, proto nelze použít vztah z publikace [1]. Podrobněji se chlazení stroje věnuji v následující kapitole **5.9**.

Hmotnost jha statoru:

$$m_{j1} = (\pi \cdot (D_e - D_1)^2 - Q \cdot \pi \cdot r_{vk1}^2) \rho_{Fe} \cdot l_1 \cdot k_{Fe} = \quad (5.155)$$

$$(\pi \cdot (0,450 - 0,336)^2 - 60 \cdot \pi \cdot 0,005^2) \cdot 7850 \cdot 0,336 \cdot 0,97 = 92,98 \text{ kg}$$

Hmotnost rotoru:

$$m_{r2} = (\pi \cdot (D_2 - D_i)^2 - 2p \cdot \pi \cdot r_{vk2}^2) \rho_{Fe} \cdot l_1 = \quad (5.156)$$

$$(\pi \cdot (0,334 - 0,0,1405)^2 - 40 \cdot \pi \cdot 0,005^2) \cdot 7850 \cdot 0,336 = 283,85 \text{ kg}$$

Nyní již máme určené vše potřebné ke stanovení všech druhů ztrát, které se v synchronním stroji s PM vyskytují.

Jouleovy ztráty v mědi, jsou vlastně ztráty, které vznikají ve statorovém vinutí, protože rotor budící vinutí nemá. Jsou přímo úměrné jmenovitému proudu a odporu vinutí:

$$\Delta P_{Cu} = m \cdot R_1 \cdot I_{nf}^2 = 3 \cdot 0,0617 \cdot 115,7^2 = 2480,77 \text{ W} \quad (5.157)$$

Měrné ztráty v železe:

$$\Delta P = 1,39 \quad (5.158)$$

Ztráty v zubové části statoru:

$$\Delta P_{zFe} = k_{dz} \cdot \Delta P \cdot B_{z1}^2 \cdot \sqrt[3]{\frac{f}{50}} \cdot m_{z1} = \quad (5.159)$$

$$2 \cdot 1,39 \cdot 1,8^2 \cdot \sqrt[3]{\frac{133,33}{50}} \cdot 65,93 = 2125,37 \text{ W}$$

Ztráty ve jhu statoru:

$$\Delta P_{jFe} = k_{dj} \cdot \Delta P \cdot B_{j1}^2 \cdot \sqrt[3]{\frac{f}{50}} \cdot m_{j1} = \quad (5.160)$$

$$1,5 \cdot 1,39 \cdot 1,4^2 \cdot \sqrt[3]{\frac{133,33}{50}} \cdot 92,98 = 1359,97 \text{ W}$$

Součtem ztrát v zubech a ztrát ve jhu statoru získáme celkové ztráty vznikající v železe:

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{zFe} + \Delta P_{jFe} = 2125,37 + 1359,97 = 3485,34 \text{ W} \quad (5.161)$$

Konstanta nutná pro výpočet mechanických ztrát se dle [1] volí mezi hodnotami 1-3, pro tento návrh volím:

$$k_b = 1 \quad (5.162)$$

Mechanické ztráty:

$$\Delta P_{mech.} = 3 \cdot \frac{k_b \cdot m_{r2} \cdot n}{100 \cdot \pi} = 3 \cdot \frac{1 \cdot 283,85 \cdot 400}{100 \cdot \pi} = 1084,76W \quad (5.163)$$

Přídavné ztráty můžeme dostatečně přesně odhadnout ze jmenovitého výkonu stroje a jejich velikost je:

$$\Delta P_d = 0,005 \cdot P = 0,005 \cdot 60000 = 300W \quad (5.164)$$

Nakonec zbývají určit ztráty v permanentních magnetech rotoru. Existuje několik podrobných výpočtů, pro jejich stanovení, které jsou uvedeny například zde [9], ale obecně se dá říci, že jejich velikost zhruba odpovídá 2/3 ztrát v mědi. Proto:

$$\Delta P_{mag.} = \frac{2}{3} \cdot \Delta P_{Cu} = \frac{2}{3} \cdot 2480,77 = 1653,85W \quad (5.165)$$

Celkové ztráty motoru jsou prostým součtem všech dílčích ztrát synchronního stroje:

$$\begin{aligned} \Delta P_C &= \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_d + \Delta P_{mech.} + \Delta P_{mag.} = \\ &2480,77 + 3485,34 + 300 + 1084,76 + 1653,85 = 9004,71W \end{aligned} \quad (5.166)$$

Ze známých ztrát a zadaného jmenovitého výkonu již můžeme stanovit celkovou účinnost synchronního motoru s PM:

$$\eta = \frac{P}{P + \Delta P_C} = \frac{60000}{60000 + 9004,71} = 0,87 \rightarrow \eta \times 100 = 87\% \quad (5.167)$$

Vypočtená účinnost stroje odpovídá běžně provozovaným motorům a je jen o málo nižší než byla odhadovaná účinnost dle (5.5).

## 5.9 Tepelný výpočet motoru

Protože tepelný výpočet stroje nebyl součástí zadání, jeho provedení zde uvedu pouze obecně. Chladicí kanály jha statoru jsem stanovil o poloměru  $r_{vk1} = 5mm$  jak sem již uvedl dříve v kapitole 5.3. Chladicí kanály rotorového jha jsem zvolil rovněž o poloměru  $r_{vk2} = 5mm$ . Tyto kanály jsem umístil pod PM, protože zde nejméně ovlivňují magnetický tok stroje, jak ukazuje obrázek *Obr. 7.19*.

Součinitel přestupu tepla závisí na množství, na složení a na rychlosti proudění chladicího média, v našem případě vody. Jeho hodnoty se pohybují od 100 – 10000 ( $W/m^2K^2$ ). V návrhu volím:

$$\alpha = 400 \frac{W}{m^2K^2} \quad (5.168)$$



Teplota chladicí vody zvolena:

$$v_{H_2O} = 40^\circ C \quad (5.169)$$

Celková ochlazovaná plocha stroje:

$$S_{CH} = \frac{\pi \cdot D_e}{2} \cdot l_1 = \frac{\pi \cdot 0,4502}{2} \cdot 0,336 = 0,2371 \text{m}^2 \quad (5.170)$$

Výsledná teplota uvnitř stroje je pak dána matematickým vztahem:

$$v_V = v_{H_2O} + \frac{\Delta P_C}{\alpha \cdot S_{CH}} = 40 + \frac{9004,71}{400 \cdot 0,2371} = 134,93^\circ C \quad (5.171)$$

Stroj lze při uvedené teplotě provozovat, neboť jí odpovídá dimenzování teplotní odolnosti izolace vinutí a permanentních magnetů.

Podrobnější tepelný výpočet stroje je uveden například zde [9].

## 6 Porovnání různých variantami synchronních motorů

V této kapitole budou popsány změny hlavních parametrů motoru v závislosti na různé hodnotě počtu drážek na pól, tedy  $q$ . Dle zadání vedoucího práce budu porovnávat hodnoty motorů s počtem drážek na pól  $q=3/8$ ,  $q=2/5$  a  $q=1/4$  s referenčním strojem, který byl spočítán v předchozím návrhu, tedy s  $q=1/2$ . Všechny vzorce použité při výpočtech jsou popsány v předchozích kapitolách, proto již nebudou znovu vypisovány nebo číselně doplňovány, ale bude na ně uveden pouze číselný odkaz.

Prvním krokem, který musíme na začátku provést, je definování několika referenčních parametrů:

- Základní zadané parametry stroje uvedené v kapitole 5.1 jsou shodné pro všechny varianty stroje.
- Počet pólů dle vztahu (5.1) a frekvence dle vztahu (5.2) jsou rovněž stejné pro všechny typy motorů.
- Vnitřní průměr statoru byl zvolen pro všechny varianty strojů stejný, tedy  $D_1=336\text{mm}$ , dle vzorce (5.18).

Nyní již můžeme přistoupit k jednotlivým srovnáním. Jako první veličina zde bude uvedena hodnota vnitřní délky statorového jha  $l_1$ . V předchozím návrhu jsme její velikost předpokládali přibližně shodnou s vnitřním průměrem statoru  $D_1$  (5.20). Jak ukázali výpočty dle vztahu (5.18) při konstantním  $D_1$ , se její hodnota prakticky nemění a statorové jho se zkrátí nanejvýše o  $1\text{mm}$ . Co se týče vnějšího průměru statoru stroje  $D_e$ , tak jeho velikost se mění také pouze minimálně a to v řádu několika  $\text{mm}$  v závislosti na výšce statorových drážek, které jsou uvedeny Tab. 6.4

Co se již ale významně mění, je celkový počet drážek statoru, který je dán vztahem (5.9). Jednotlivé počty drážek pro různé velikosti  $q$  ukazuje následující tabulka Tab. 6.1.

Tab. 6.1 Závislost počtu drážek statoru na počtu drážek na pól

Počet drážek na pól	$q=1/2$	$q=3/8$	$q=2/5$	$q=1/4$	Číslo vzorce
Počet drážek statoru	60	45	48	30	(5.9)

S různým počtem drážek statoru souvisí také různé hodnoty drážkové rozteče, její závislost najdeme ve vztahu (5.21). Na drážkové rozteči také přímo závisí velikosti čel statorového vinutí stroje, matematický vztah, který tento fakt dokládá je (5.132).

V další tabulce *Tab. 6.2* je uvedeno, jak se změní parametry statorového vinutí. Počet vrstev vinutí (5.25), počet paralelních větví (5.26) a cívkový krok (5.27) ponechávám beze změn.

*Tab. 6.2 Závislost statorového vinutí na počtu drážek na pól*

Počet drážek na pól	$q=1/2$	$q=3/8$	$q=2/5$	$q=1/4$	Číslo vzorce
Počet cívek stat. vinutí	60	45	48	30	(5.28)
Počet cívek na jednu fázi	20	15	16	10	(5.29)
Počet skupin cívek	6	6	6	6	(5.31)
Počet cívek na skupinu	10	7,5	8	5	(5.32)
Celk. počet závitů v sérii	80	90	80	80	(5.33)
Počet vodičů v drážce	8	12	10	16	(5.34)
Výška jednoho vodiče	3,2 mm	2,2 mm	2,4 mm	1,4 mm	(5.49)
Šířka jednoho vodiče	5 mm	7,5 mm	7 mm	12 mm	(5.50)

Jak je vidět v tabulce *Tab. 6.2*, počet drážek na pól má na vinutí stroje naprosto zásadní vliv. Prakticky jediný parametr statorového vinutí, který se nemění, je počet skupin cívek. Celkový počet závitů v sérii v druhé variantě ( $q=3/8$ ) jsem byl nucen zvýšit pomocí lineární proudové hustoty  $A$ , abych mohl dodržet sudý počet vodičů v drážce, aniž bych použil „hrubé“ zaokrouhlení. Vodiče v drážce mají ve všech variantách stejný průřez dle (5.48) a tudíž se mění jen jejich rozměry. Jak již bylo popsáno v kapitole 5.4, šířku vodiče přizpůsobují drážce statoru, výšku statorové drážky stanovují dle výšky vodičů a izolace. Tingleyho schémata statorového vinutí pro zbylé varianty strojů jsou uvedeny v příloze.

Tabulka *Tab. 6.3* obsahuje činitele vinutí vyšších harmonických v závislosti na změně parametru  $q$ .

*Tab. 6.3 Závislost činitelů vinutí na počtu drážek na pól*

Počet drážek na pól	$q=1/2$	$q=3/8$	$q=2/5$	$q=1/4$	Číslo vzorce
Činitel vinutí pro 1.harm.	0,8660	0,9850	0,9960	0,8660	(5.15)
Činitel vinutí pro 5.harm.	-0,8708	0,6500	0,2613	-0,8902	(5.39)
Činitel vinutí pro 7.harm.	0,8685	-0,3440	0,2601	0,8783	(5.40)

Jak je vidět, činitele vyšších harmonických se v jednotlivých variantách stroje významně liší. Uvedené hodnoty mají vliv na délku stroje (5.20), která vychází z výpočtu Essonova činitele (5.14) a na skladbu harmonických složek v momentu.

V následující tabulce jsou uvedeny rozměry statorových drážek pro jednotlivé varianty strojů s různým počtem drážek na pól a jeho vlivem na celkový činitel využití drážky.

*Tab. 6.4 Velikosti statorových drážek v závislosti na počtu drážek na pól*

Počet drážek na pól	$q=1/2$	$q=3/8$	$q=2/5$	$q=1/4$	Číslo vzorce
Výška statorové drážky	36 mm	38 mm	35 mm	35 mm	(5.64)



Šířka statorové drážky	7,5 mm	10 mm	9,4 mm	15 mm	(5.55)
Obsah drážky	270,2 mm <sup>2</sup>	380,7 mm <sup>2</sup>	328,7 mm <sup>2</sup>	525,9 mm <sup>2</sup>	(5.69)
Činitel využití drážky	0,47	0,52	0,50	0,50	(5.71)

Jak je z tabulky *Tab. 6.4* patrné rozměry drážek se mění podobně jako vinutí, ale počet drážek na pól  $q$  nemá zásadní vliv na činitel využití drážky. Jeho mírné zvýšení ve druhé variantě ( $q=3/8$ ) je způsobeno navýšením počtu závitů v sérii stroje.

V další kroku se zaměříme na závislost parametru  $q$  na magnetický obvod synchronního motoru. Především nás bude zajímat jeho vliv při určování skutečné indukce v zubu statoru a na celkové rozměry magnetů rotoru. Výsledky jsou shrnuty v tabulce *Tab. 6.5*.

*Tab. 6.5 Vliv počtu drážek na pól na magnetický obvod synchronního stroje*

Počet drážek na pól	$q=1/2$	$q=3/8$	$q=2/5$	$q=1/4$	Číslo vzorce
Skut. induk. v hl. zubu	1,44 T	1,44 T	1,44 T	1,44 T	(5.88)
Skut. induk. v střed. zubu	1,14 T	1,13 T	1,15 T	1,15 T	(5.89)
Skut. induk. v pat. zubu	0,94 T	0,92 T	0,95 T	0,95 T	(5.90)
Výška PM	5,4 mm	5,5 mm	5,5 mm	5,7 mm	(5.129)
Šířka PM	16,8 mm	16,8 mm	16,8 mm	16,8 mm	(5.130)

Výsledky tabulky *Tab. 6.5* odpovídají předpokladům. Nepatrné odchylky indukci v jednotlivých částech statorového zubu jsou způsobeny různou drážkovou roztečí, která již zde byla zmiňována. Počet drážek na pól má rovněž nepatrný vliv na výšku magnetu, šířku magnetu neovlivňuje vůbec.

V následující tabulce *Tab. 6.6* jsou porovnány jednotlivé varianty synchronního stroje s PM z hlediska odporu statorového vinutí.

*Tab. 6.6 Vliv počtu drážek na pól na odpor vinutí statoru synchronního stroje*

Počet drážek na pól	$q=1/2$	$q=3/8$	$q=2/5$	$q=1/4$	Číslo vzorce
Odpor stat. vinutí 20°C	0,0617 Ohm	0,0722 Ohm	0,0628 Ohm	0,0662 Ohm	(5.134)
Odpor stat. vinutí 160°C	0,0858 Ohm	0,1003 Ohm	0,0873 Ohm	0,0921 Ohm	(5.136)

Z výsledků uvedených v tabulce *Tab. 6.6* můžeme konstatovat, že hodnota  $q$  nemá na odpory statorového vinutí výraznější vliv. Nepatrné rozdíly ve všech variantách jsou způsobeny odlišnými velikostmi čel statorového vinutí, v případě druhé varianty ( $q=3/8$ ) navíc vyšším počtem závitů v sérii.

V další tabulce *Tab. 6.7* je uvedeno, jak se změní rozptylové reaktance a celková indukčnost stroje v závislosti na počtu drážek na pól  $q$ .

*Tab. 6.7 Závislost indukce a reaktancí na počtu drážek na pól*

Počet drážek na pól	$q=1/2$	$q=3/8$	$q=2/5$	$q=1/4$	Číslo vzorce
Rozptyl. reaktance fáze	0,794 Ohm	1,363 Ohm	0,930 Ohm	1,419 Ohm	(5.144)
Synchronní reaktance	0,224 Ohm	0,284 Ohm	0,256 Ohm	0,220 Ohm	(5.148)

Indukčnost stroje	0,2673 mH	0,3394 mH	0,3059 mH	0,2631 mH	(5.149)
-------------------	-----------	-----------	-----------	-----------	---------

Různé varianty strojů s PM se liší jak ve velikosti jednotlivých reaktancí, tak v celkové indukčnosti. Velkou roli v tom hraje především rozptylová reaktance jedné fáze, která je velice závislá na několika parametrech, které jsou ovlivňovány počtem drážek na pól a fázi  $q$ . Jedná se především o šířku drážky a výšku cívky (Činitel magnetické vodivosti drážkového rozptylu), velikosti čel vinutí (Činitel magnetické vodivosti rozptylu čel) a samozřejmě samotný počet drážek na pól a fázi  $q$ . Indukčnost stroje je pak na rozptylových reaktancích přímo závislá.

Posledním krokem, při porovnávání jednotlivých variant synchronních strojů je dle jejich celkové účinnosti. V poslední tabulce *Tab. 6.8* jsou uvedeny ztráty v jednotlivých částech stroje a jejich součet, tedy celkové ztráty stroje. Na závěr je porovnána účinnost jednotlivých variant.

*Tab. 6.8 Ztráty a účinnost jednotlivých variant synchronních strojů s PM*

Počet drážek na pól	$q=1/2$	$q=3/8$	$q=2/5$	$q=1/4$	Číslo vzorce
Ztráty v mědi	2480,77 W	2899,99 W	2522,42 W	2661,99 W	(5.157)
Ztráty v železe	3485,34 W	3781,73 W	2708,48 W	2761,17 W	(5.161)
Mechanické ztráty	1084,76 W	1091,79 W	1088,12 W	1085,74 W	(5.163)
Přídavné ztráty	300 W	300 W	300 W	300 W	(5.164)
Ztráty v magnetech	1653,85 W	1933,33 W	1681,61 W	1774,66 W	(5.165)
Celkové ztráty	9004,71 W	10006,85 W	8300,63 W	8583,57 W	(5.166)
Účinnost stroje	87 %	85,7%	87,8%	87,5%	(5.167)

Jak je z výsledků v tabulce *Tab. 6.8* patrné, největší vliv na celkovou účinnost stroje mají Jouleovy ztráty v mědi a z nich odvozené ztráty v magnetech. Z toho důvodu je druhá varianta ( $q=3/8$ ) nejméně účinná (má vyšší počet závitů v sérii, ve kterých vznikají větší ztráty). Různé hodnoty ztrát v železe jsou způsobeny různým počtem a velikostí statorových zubů. Přídavné ztráty jsou vzhledem ke stejnému jmenovitému výkonu také stejné u všech variant. Mechanické ztráty synchronního stroje jsou také u všech variant v podstatě totožné, protože jsou závislé hlavně na počtu otáček a hmotnosti rotoru.

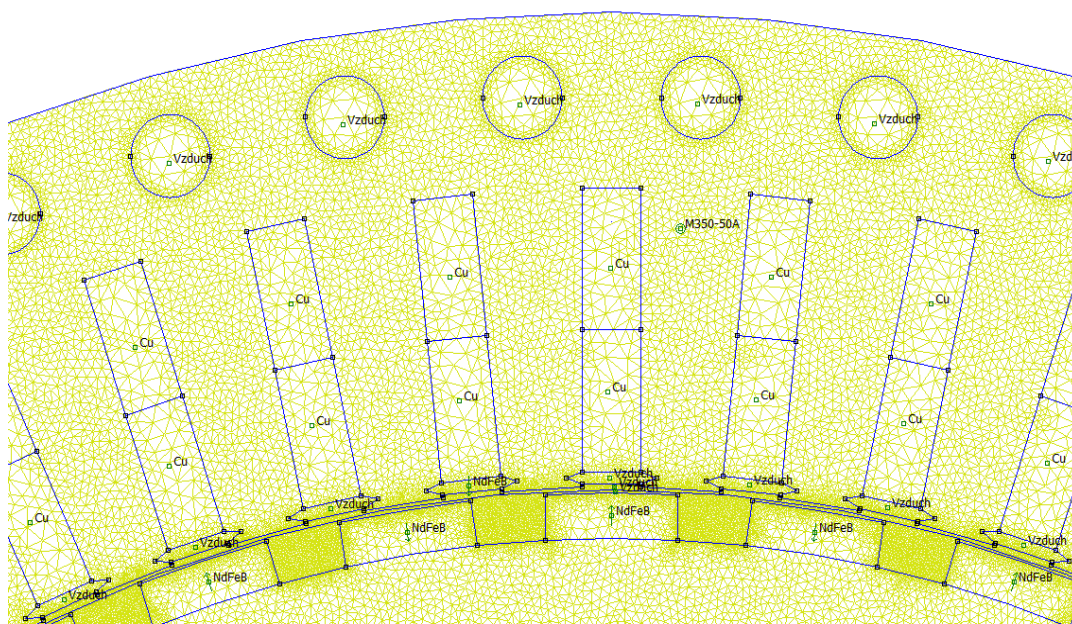
Dá se tedy říci, že třetí ( $q=2/5$ ) a čtvrtá ( $q=1/4$ ) varianta je nejučinnější. Druhá varianta ( $q=3/8$ ) má pro tento typ motoru nevhodně zvolené vinutí, které nás nutí k určitým, již zde zmíněným, kompromisům. První varianta ( $q=1/2$ ) má jen o málo nižší účinnost než nejučinnější čtvrtá varianta ( $q=1/4$ ), což je způsobeno větším počtem zubů a celkově masivnějším statorem.

Protože tepelný výpočet byl proveden pouze obecně, nebudu jednotlivé typy strojů z tohoto hlediska mezi sebou porovnávat.

## 7 Analýza synchronního motoru s PM pomocí FEMM

### 7.1 Metoda konečných prvků (MKP)

K analýze magnetických polí synchronního stroje byl použit program FEMM verze 4.2 (Finite Element Method Magnetics), s jehož pomocí bylo možno zobrazit průběhy magnetického napětí. Program využívá metodu konečných prvků k namodelování daného problému a k vytvoření modelu, který je dále řešen pomocí počítače. Nejprve jsem nakreslil v programu QCAD dva druhy 2D modelů motorů (viz přílohy). Jednotlivým částem stroje jsem nadefinoval materiálové vlastnosti, nadefinoval protékající satorové proudy a použité permanentní magnety. Nakonec jsem nastavil okrajovou podmínku úlohy a nastavil počet elementů (tzv. síť „mesh“) na přiměřenou hodnotu, jak ukazuje obrázek *Obr. 7.1*. Takto vytvořený model jsem podrobil matematické analýze a její ukázkou je možné vidět na obrázku *Obr. 7.2*.

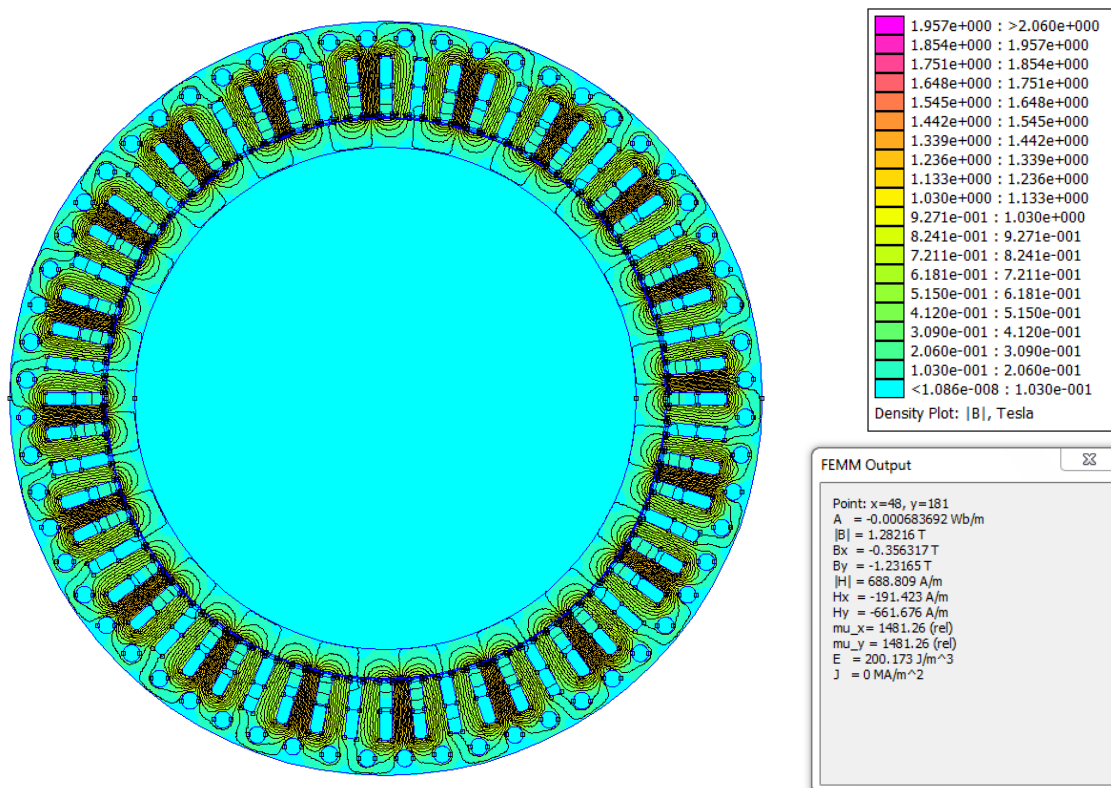


*Obr. 7.1 Ukázka části satoru s nadefinovanou sítí elementů a materiálovými oblastmi v programu FEMM*

Co se týče nadefinování jednotlivých prvků na *Obr. 7.1*, pro železné plechy M350-50A ve satorovém jhu jsem použil charakteristiku uvedenou v tabulce ve zdroji [1]. Magnety jsem nadefinoval jako objekty s parametry relativní permeability ( $\mu_r=1,05$ ) a koercitivitu magnetu ( $H_c=903kA/m$ ). Jejich prostorové natočení a orientaci pólů jsem nechal vygenerovat program FEMM. Velikosti proudů jsem zadal pro každou pozici v drážce satoru manuálně dle Tingleyho schémat uvedených v příloze, jejich velikosti jsou  $A=163,68A$ ,  $B=-81,84A$ ,  $C=-81,84A$ . Drážky jsem vyplnil mědí *Cu*, bez uvažování izolace vodičů. Satorový klín jsem



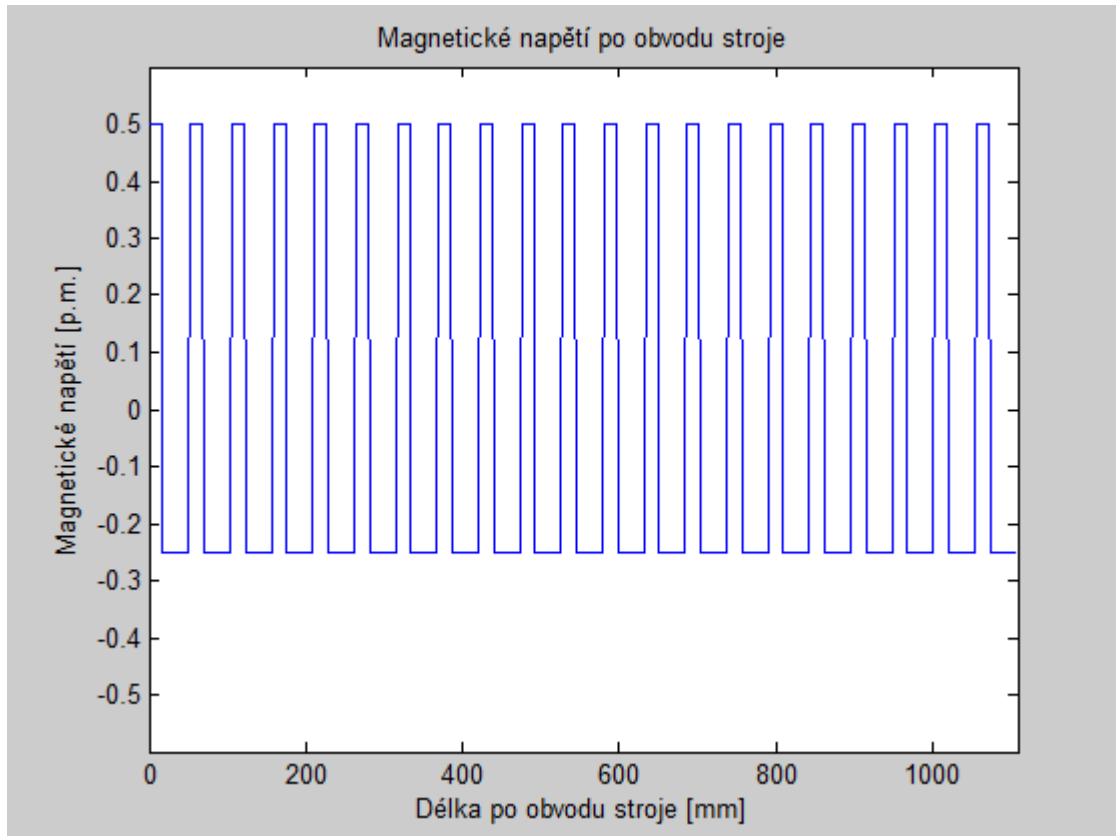
vlastnostmi položil roven vlastnostem vzduchu. Nakonec jsem v programu FEMM nadefinoval vhodnou okrajovou podmínku a spustil analýzu daného problému.



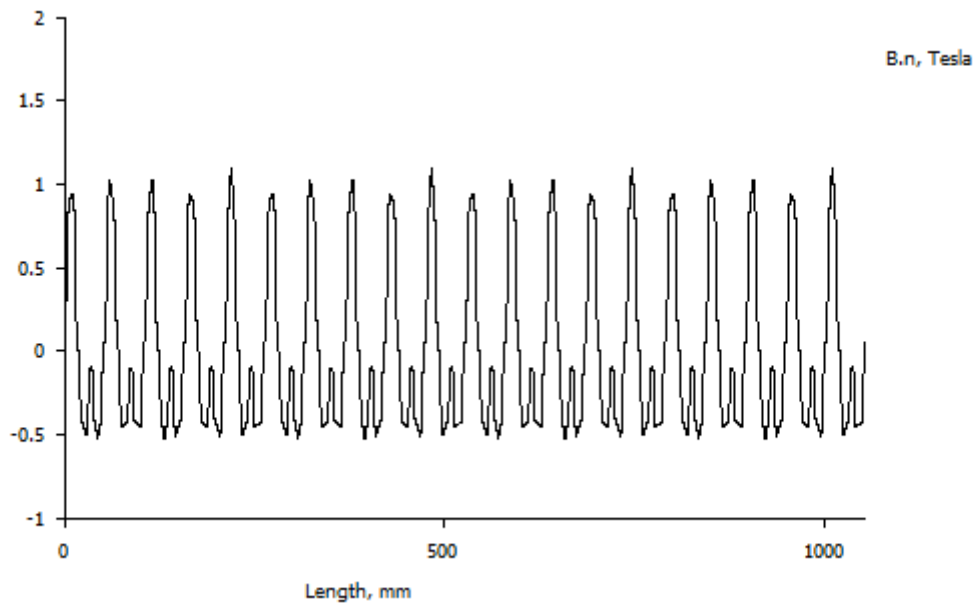
Obr. 7.2 Ukázka finální analýzy magnetického napětí vytvořeného statorovými proudy v programu FEMM

## 7.2 Vyhodnocení průběhů napětí stroje pomocí FEMM

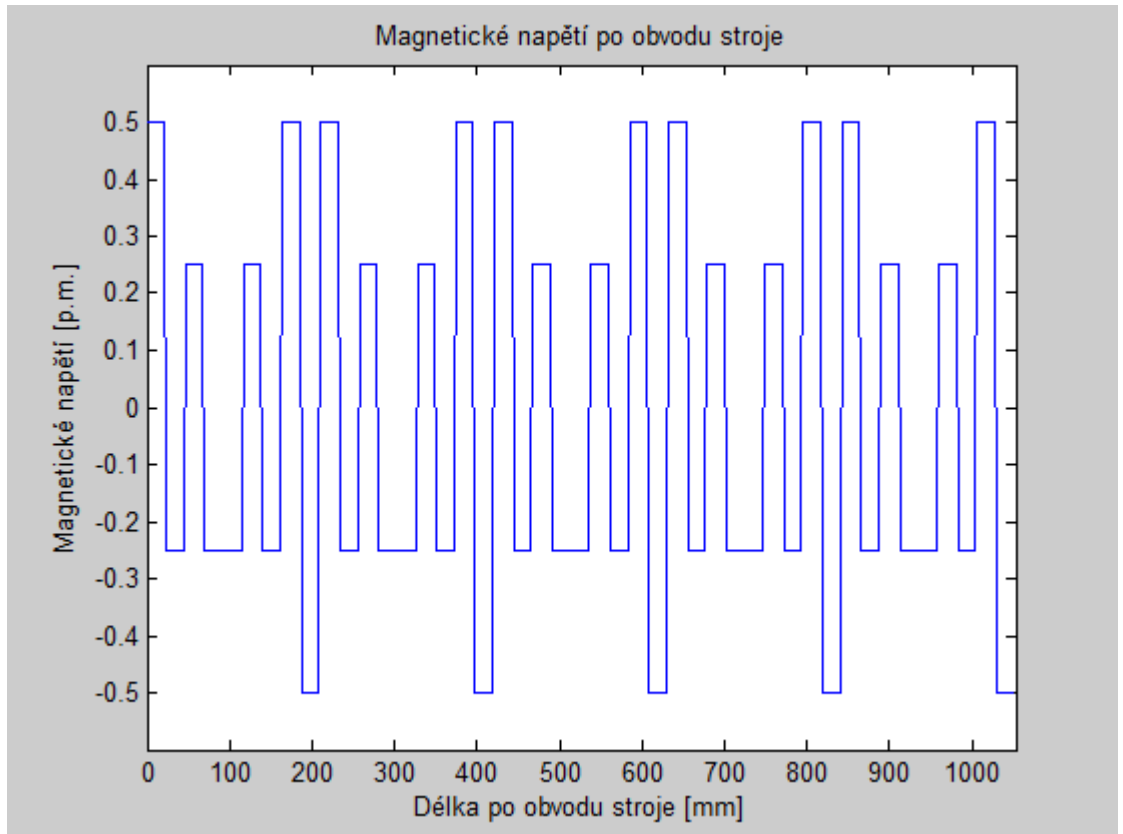
První model obsahoval pouze stator, společně s nadefinovanými proudy. Rotor byl nakreslen pouze jako železný masiv bez PM. Tento model sloužil k vykreslení grafů průběhů magnetických napětí a k vygenerování matice hodnot těchto napětí. Tato matice byla dále zpracována pomocí FFT (Rychlá Fourierova Transformace) a ze získaného grafu byl pomocí matematické funkce THD (Celkové Harmonické Zkreslení) spočítán diferenční rozptyl ve vzduchové mezeře. Výsledné grafy jsou uvedeny níže.



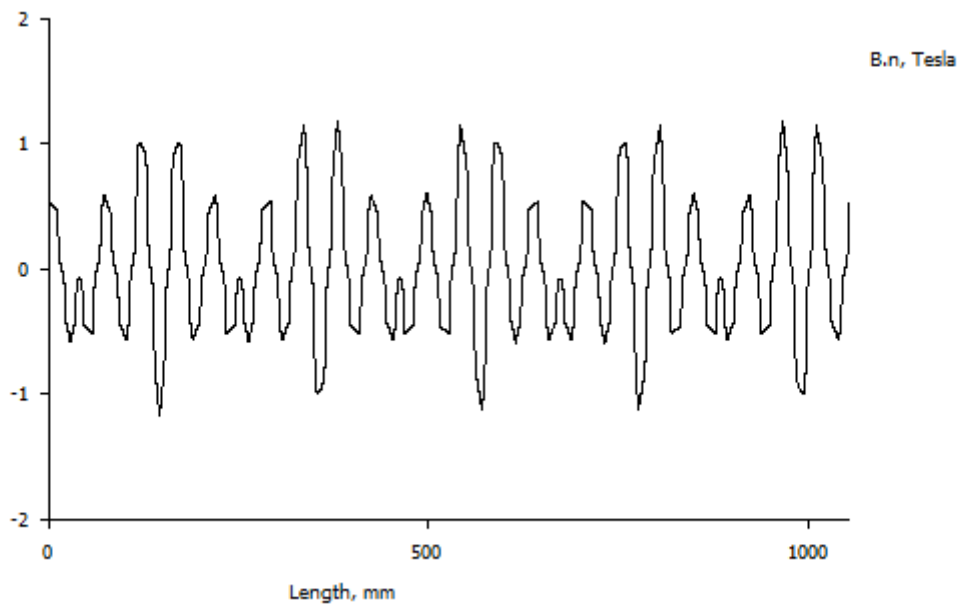
Obr. 7.3 Analýza magnetického napětí v programu MATLAB pro  $q=1/2$



Obr. 7.4 Analýza magnetického napětí v programu FEMM pro  $q=1/2$

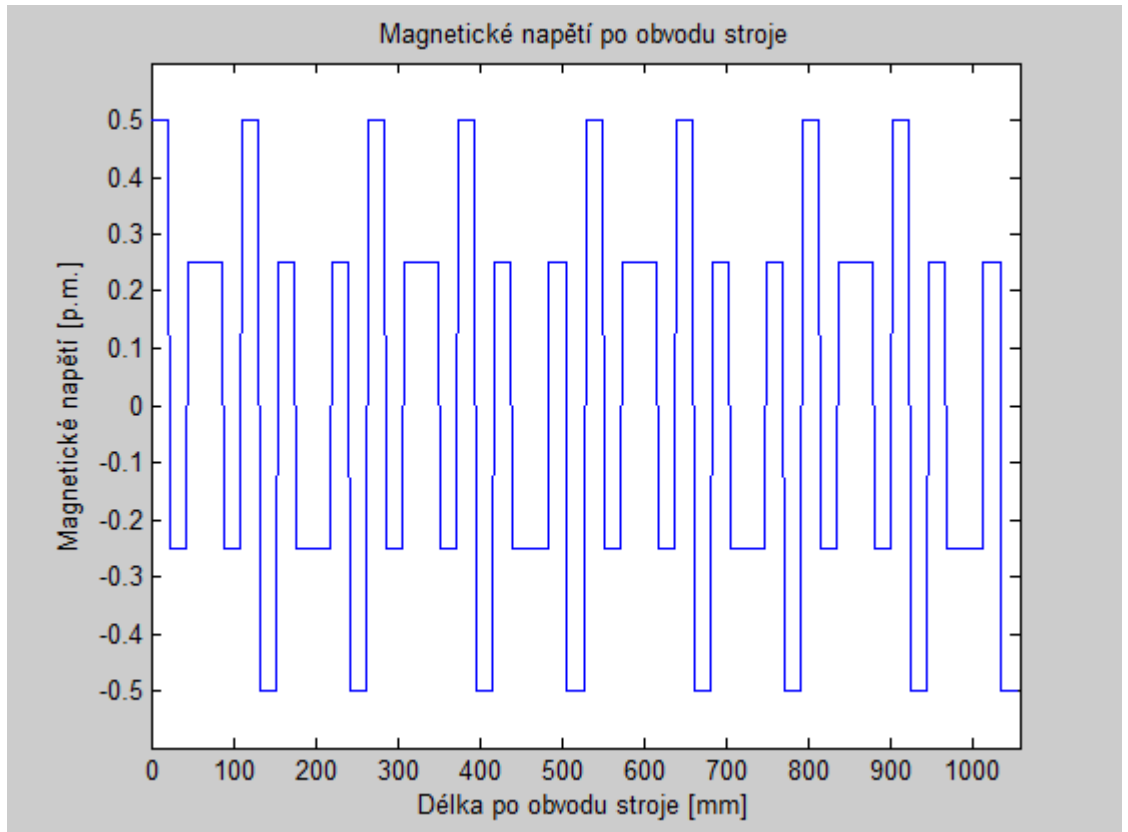


Obr. 7.5 Analýza magnetického napětí v programu MATLAB pro  $q=3/8$

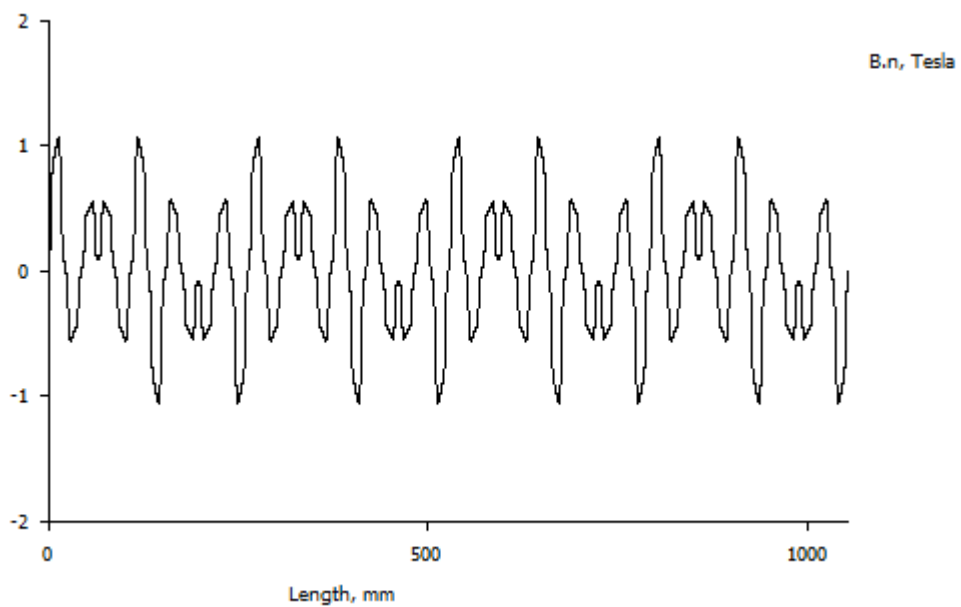


Obr. 7.6 Analýza magnetického napětí v programu FEMM pro  $q=3/8$

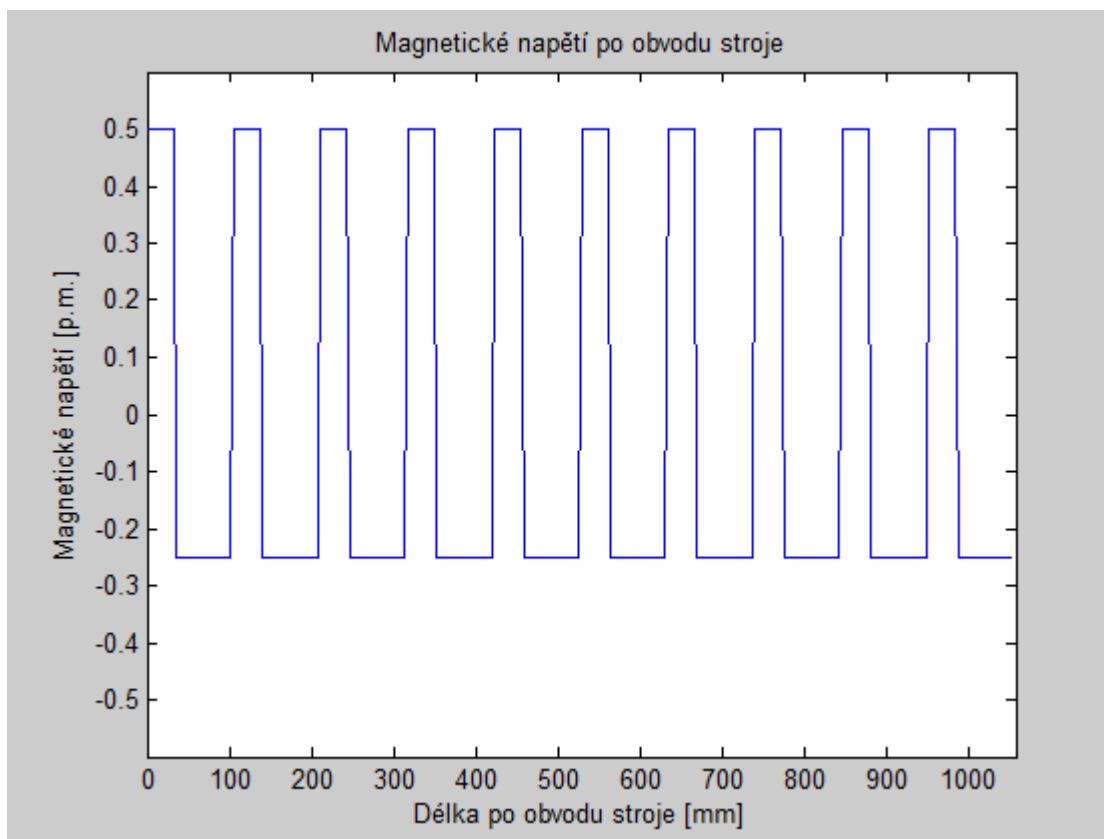




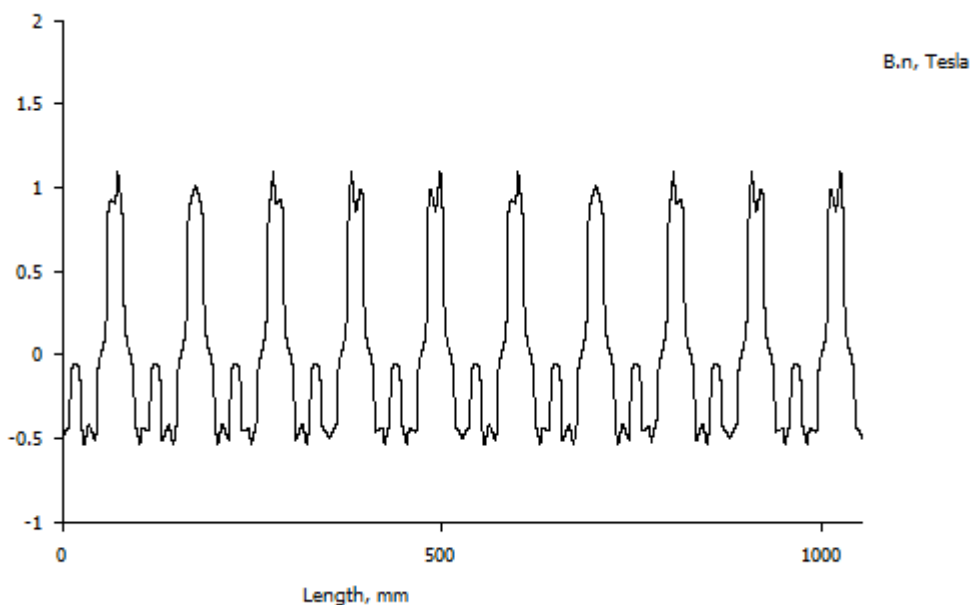
Obr. 7.7 Analýza magnetického napětí v programu MATLAB pro  $q=2/5$



Obr. 7.8 Analýza magnetického napětí v programu FEMM pro  $q=2/5$



Obr. 7.9 Analýza magnetického napětí v programu MATLAB pro  $q=1/4$

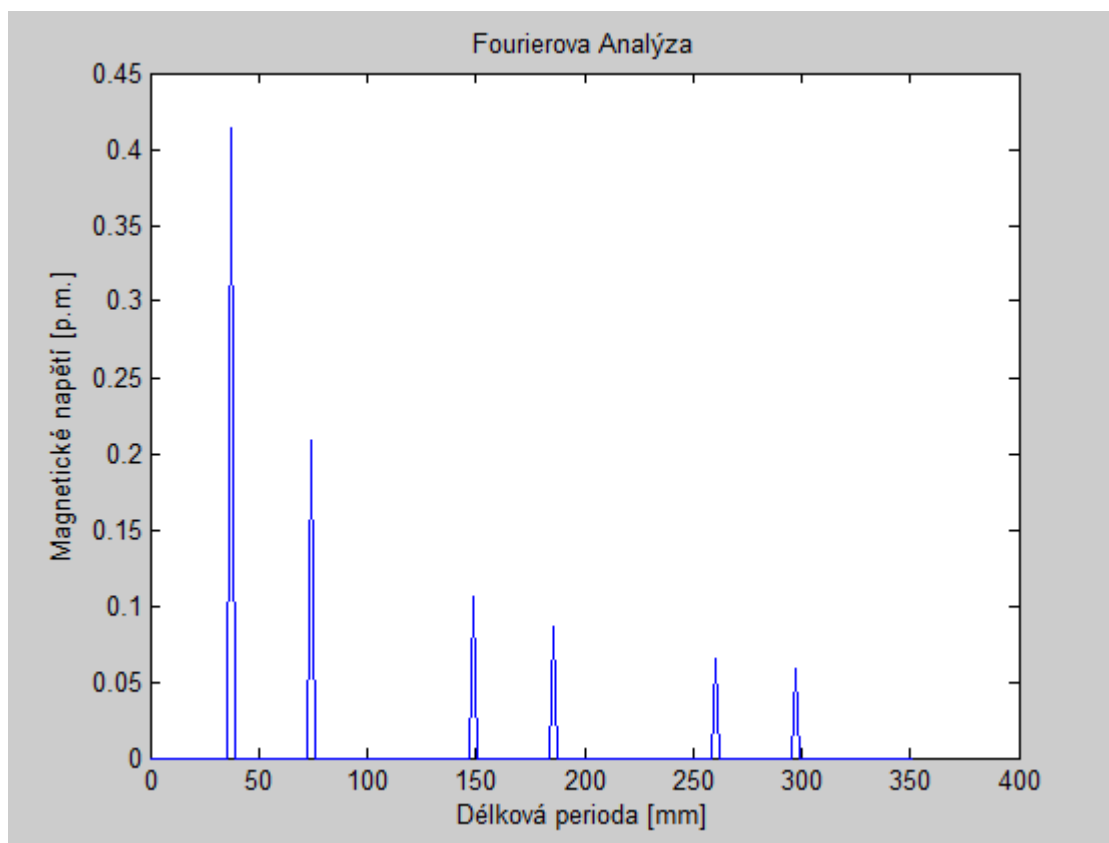


Obr. 7.10 Analýza magnetického napětí v programu FEMM pro  $q=1/4$

Jak je z analýzy jednotlivých grafů patrné, magnetická napětí vykreslená jednotlivými programy mají přibližně stejný tvar. Důvodem, proč se oba průběhy liší je vliv drážkování

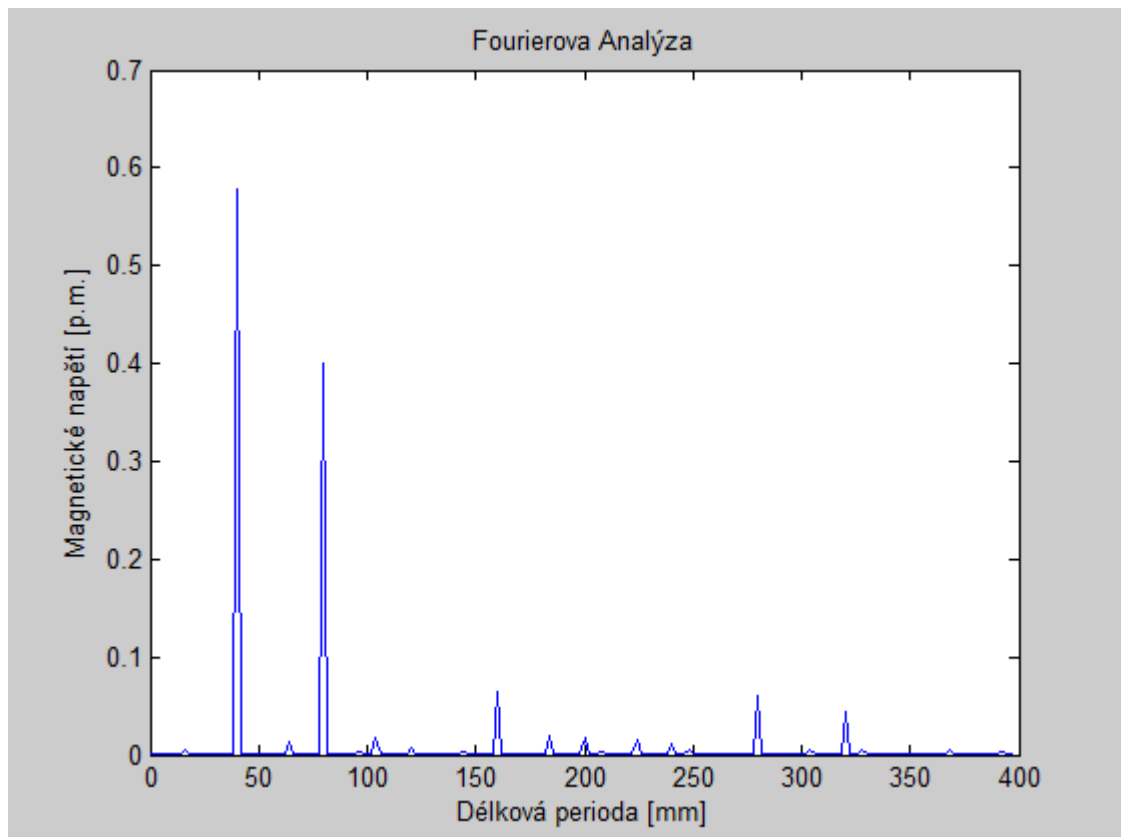
statoru stroje, což vede k dodatečným špičkám v průběhu magnetického pole ve vzduchové mezeře. Amplituda obou průběhů je pak odlišná, neboť výpočet za pomoci Görgešova obrazce uvažuje normalizovanou velikost magnetického pole udanou v poměrných jednotkách, zatímco v případě výstupů z programu FEMM je velikost magnetického pole vztažena k reálné velikosti proudu napájecího stator stroje a tedy není normalizovaná. Z těchto důvodů se velikosti maxim a minim průběhu liší.

V následujících grafech jsou uvedeny výsledky FFT spočítané a vykreslené v programech MATLAB a FEMM. Rozdílné výsledky velikostí magnetických napětí jsou způsobeny různým způsobem jejich výpočtu. Zatímco MATLAB počítá v poměrných jednotkách, program FEMM uvažuje veličiny v reálné geometrii.

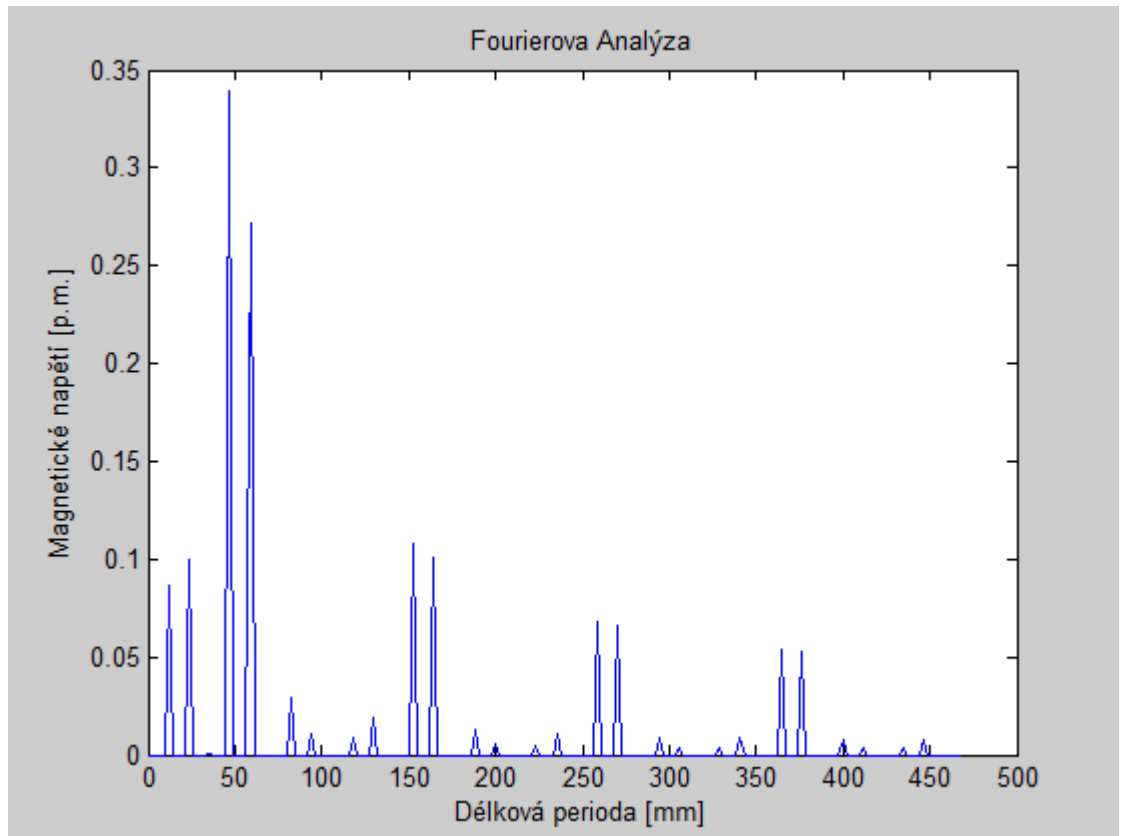


Obr. 7.11 Analýza magnetického napětí v programu MATLAB pro  $q=1/2$

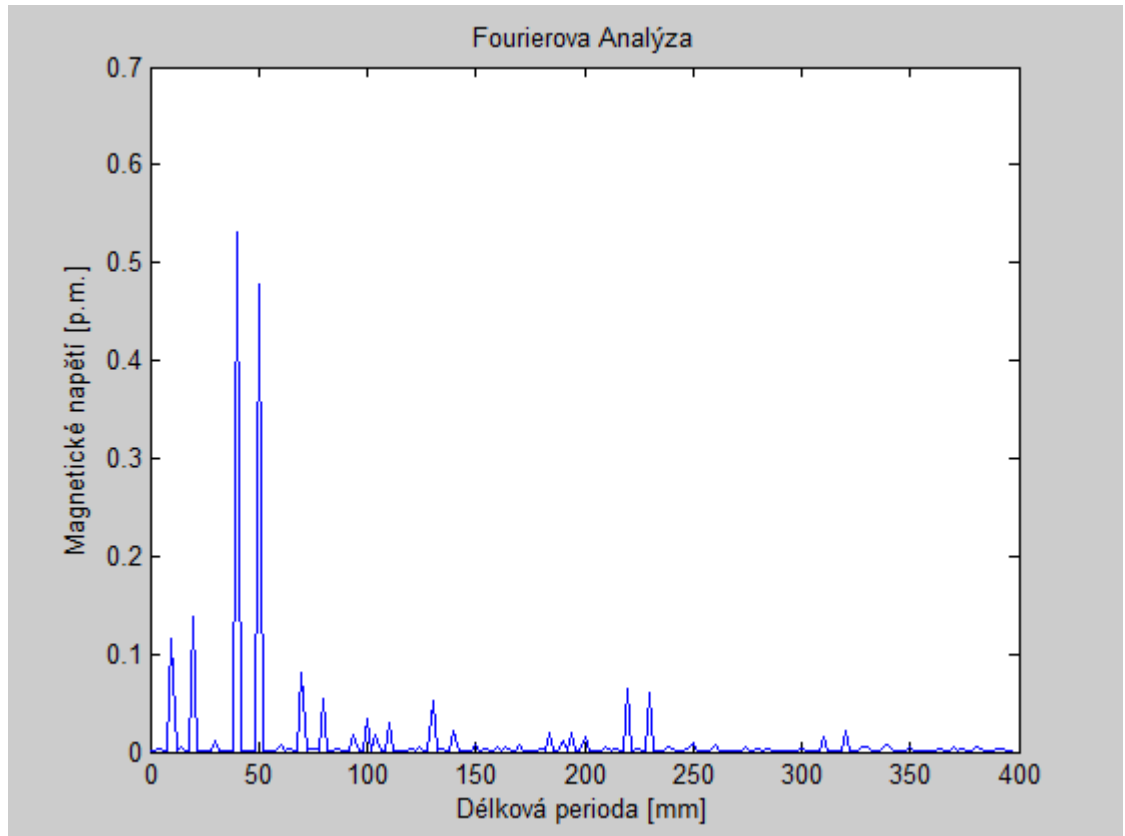




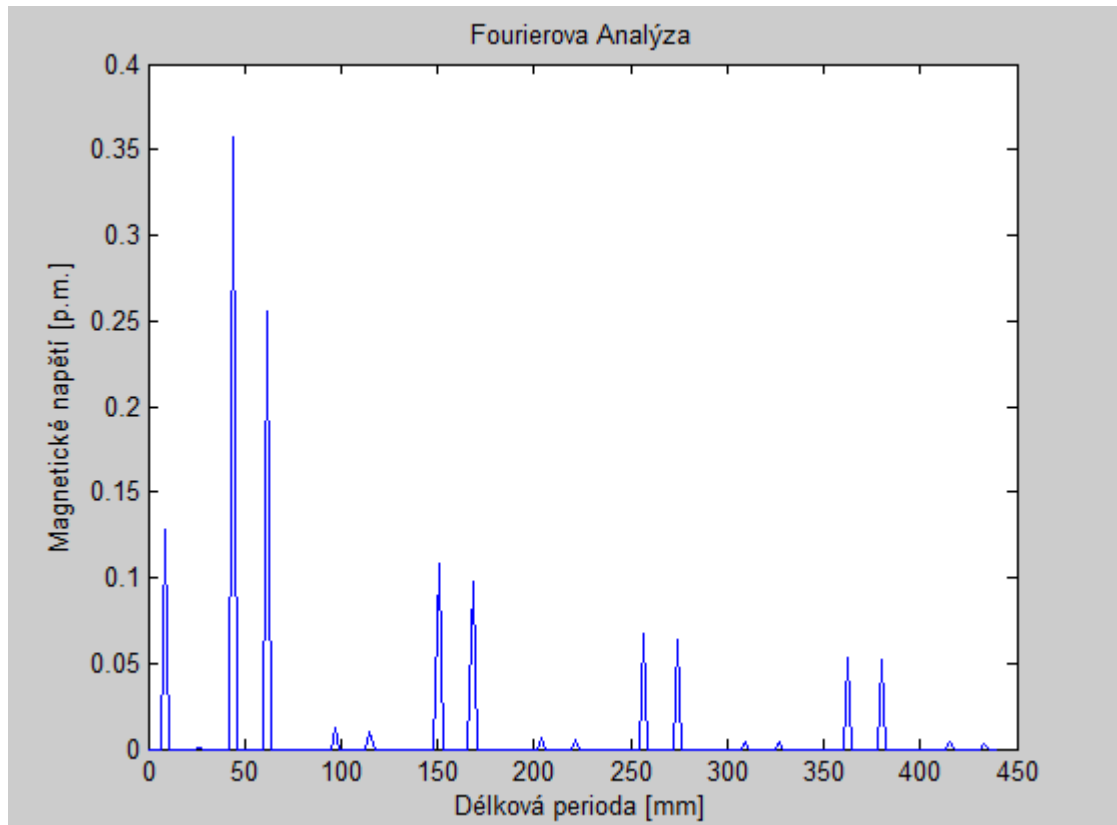
Obr. 7.12 Analýza magnetického napětí v programu FEMM pro  $q=1/2$



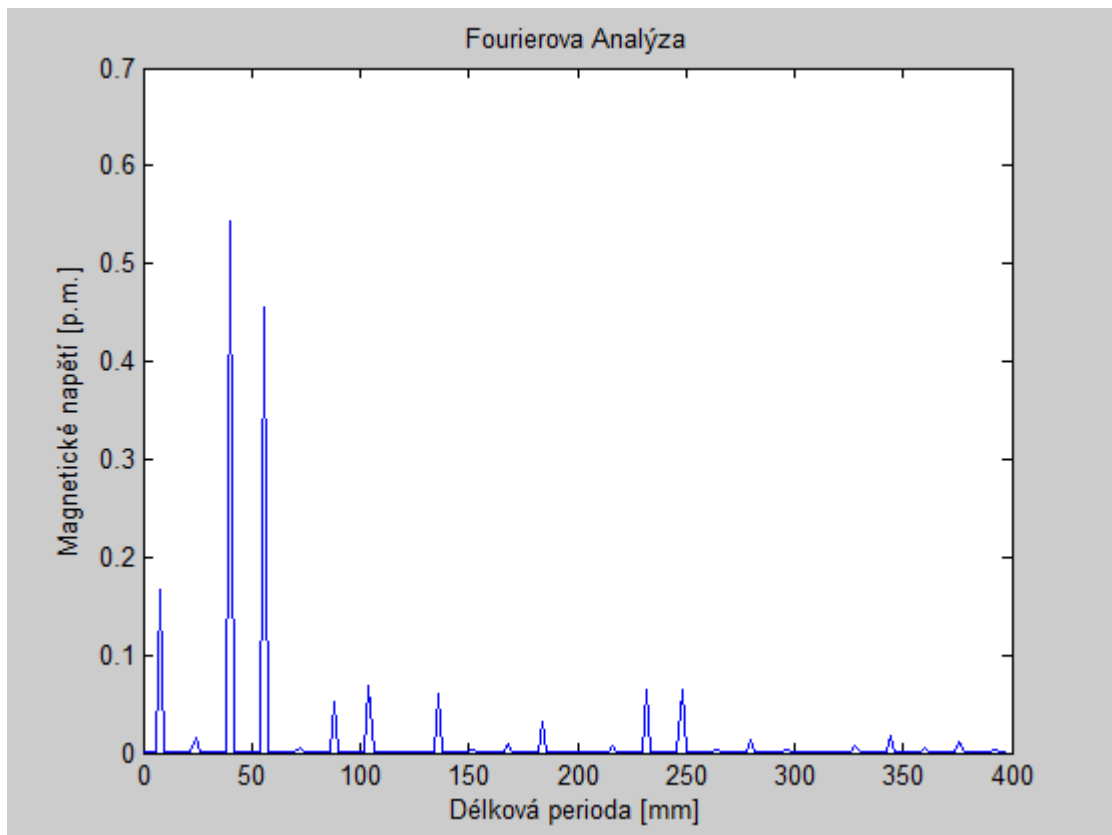
Obr. 7.13 Analýza magnetického napětí v programu MATLAB pro  $q=3/8$



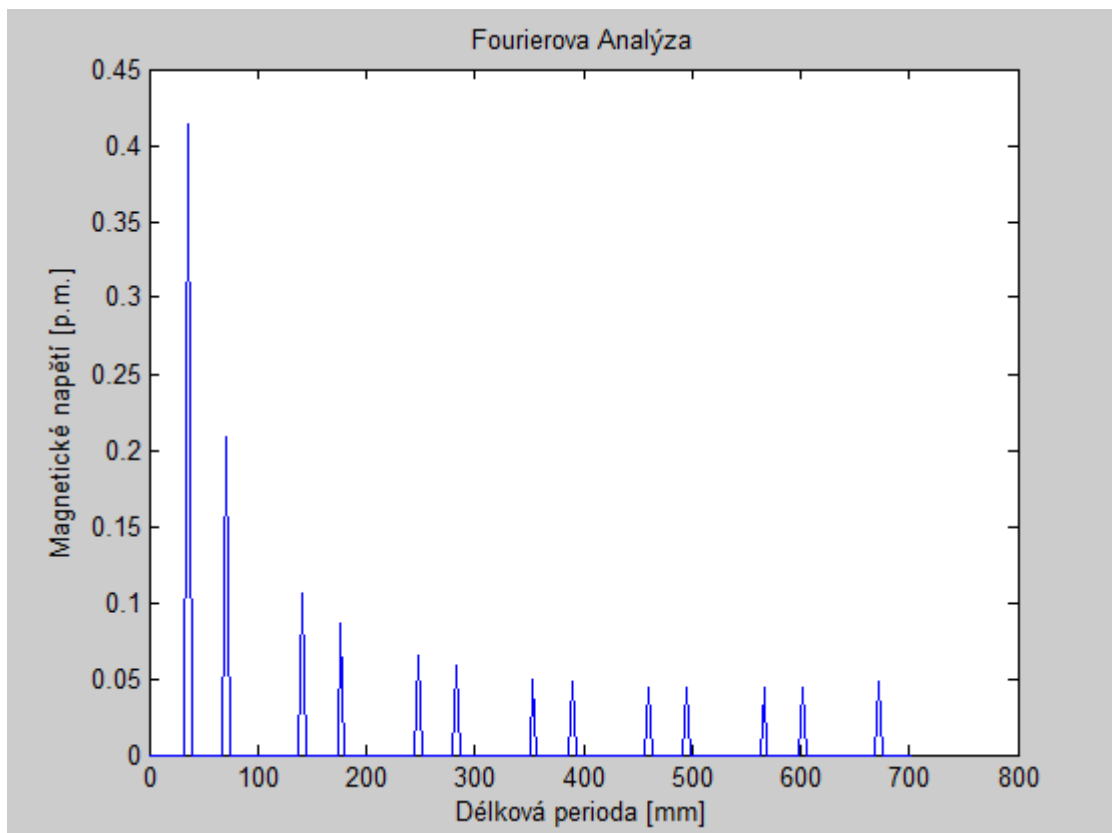
Obr. 7.14 Analýza magnetického napětí v programu FEMM pro  $q=3/8$



Obr. 7.15 Analýza magnetického napětí v programu MATLAB pro  $q=2/5$

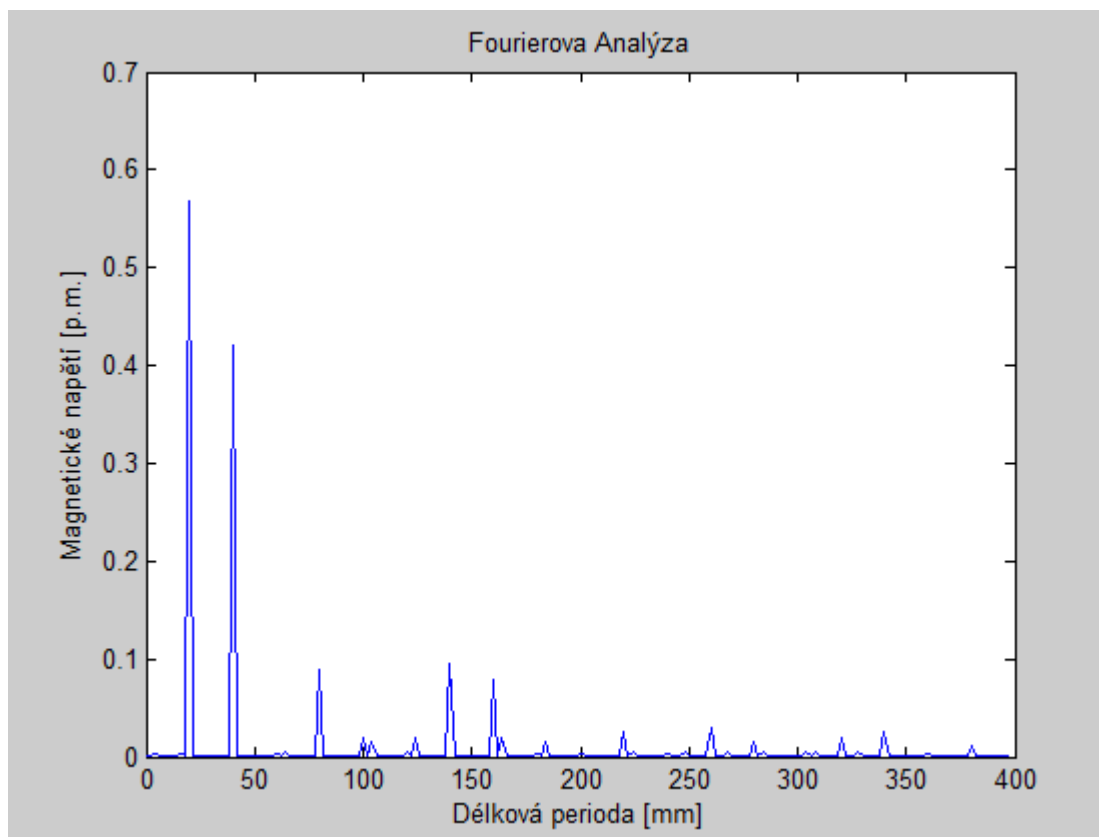


Obr. 7.16 Analýza magnetického napětí v programu FEMM pro  $q=2/5$



Obr. 7.17 Analýza magnetického napětí v programu MATLAB pro  $q=1/4$

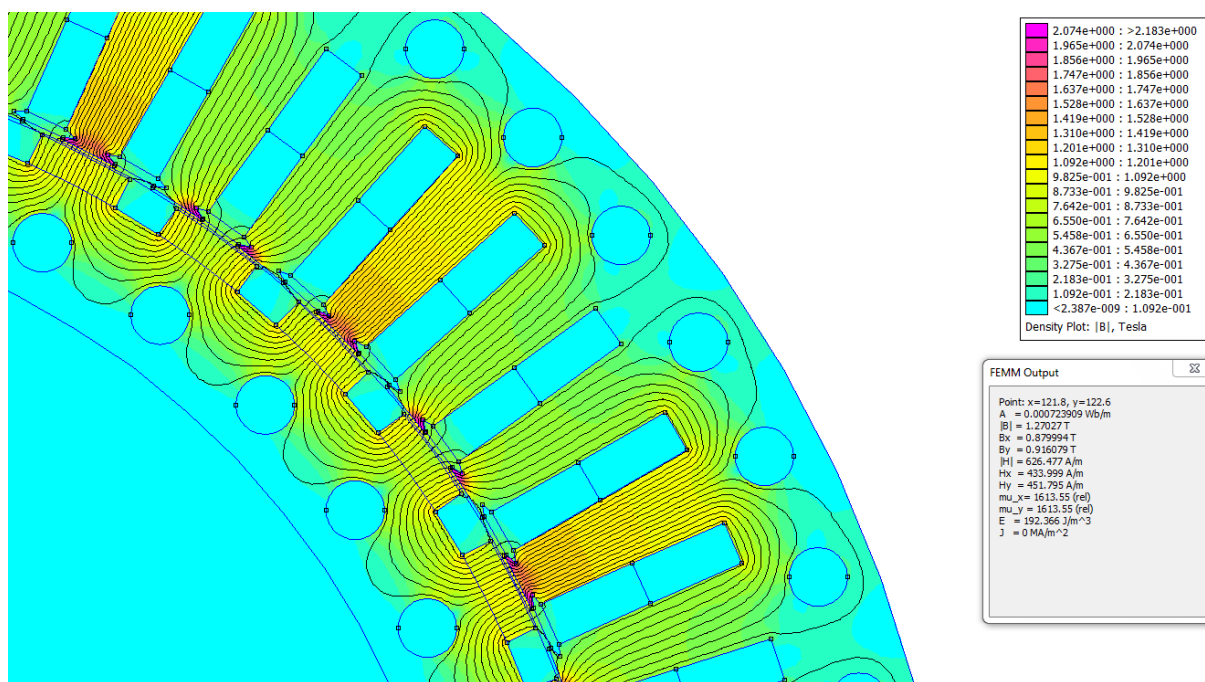




Obr. 7.18 Analýza magnetického napětí v programu FEMM pro  $q=1/4$

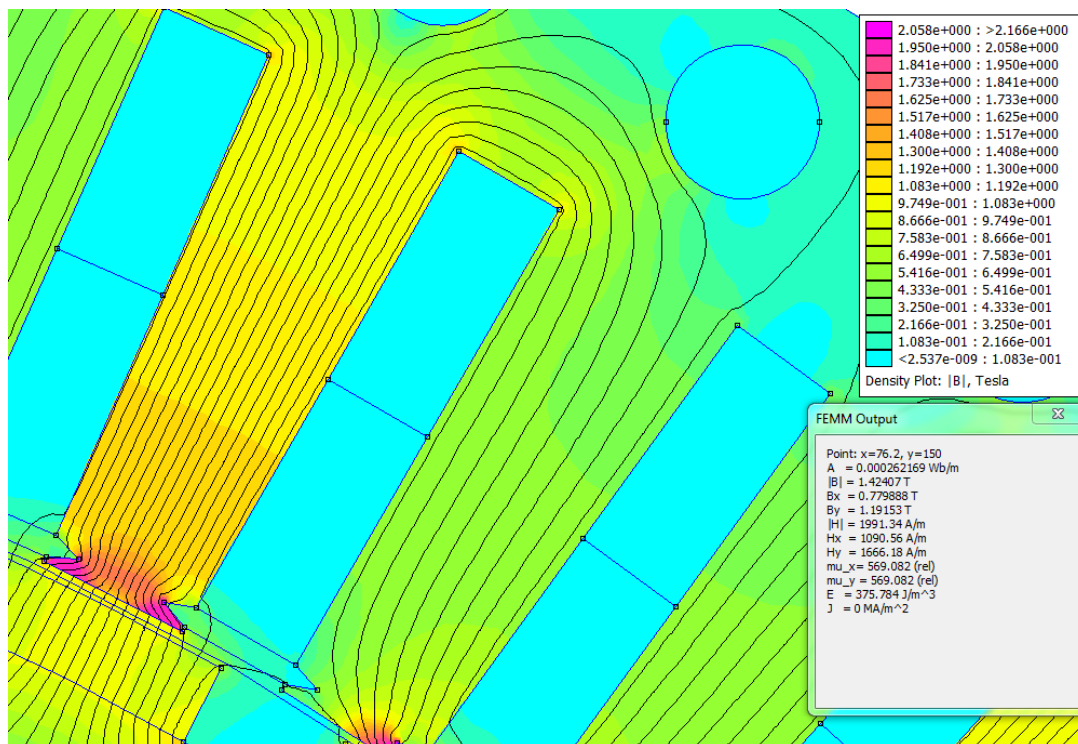
### 7.3 Vyhodnocení magnetických indukcí stroje pomocí FEMM

Druhý z modelů naopak bral v potaz magnetické síly magnetů na rotoru, ale naopak zanedbával proudy statorového vinutí. Tento model složil pouze k porovnání vypočtených magnetických indukcí s magnetickými indukcemi analyzovanými pomocí FEMM, které působí v různých částech. Výsledkem této analýzy mělo být dokázání, že zvolené permanentní magnety jsou dostatečně silné k vytvoření rotorového stacionárního magnetického pole.

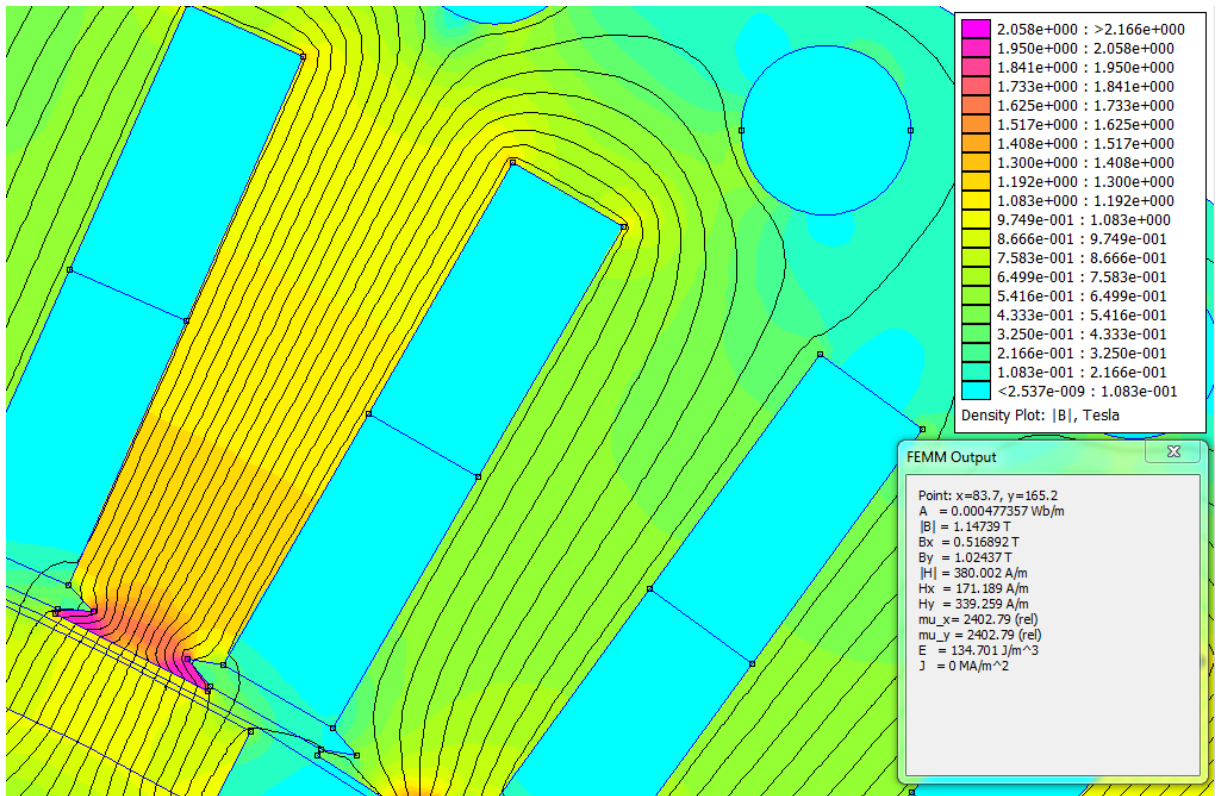


Obr. 7.19 Ukázka finální analýzy magnetického napětí vytvořeného statorovými proudy v programu FEMM

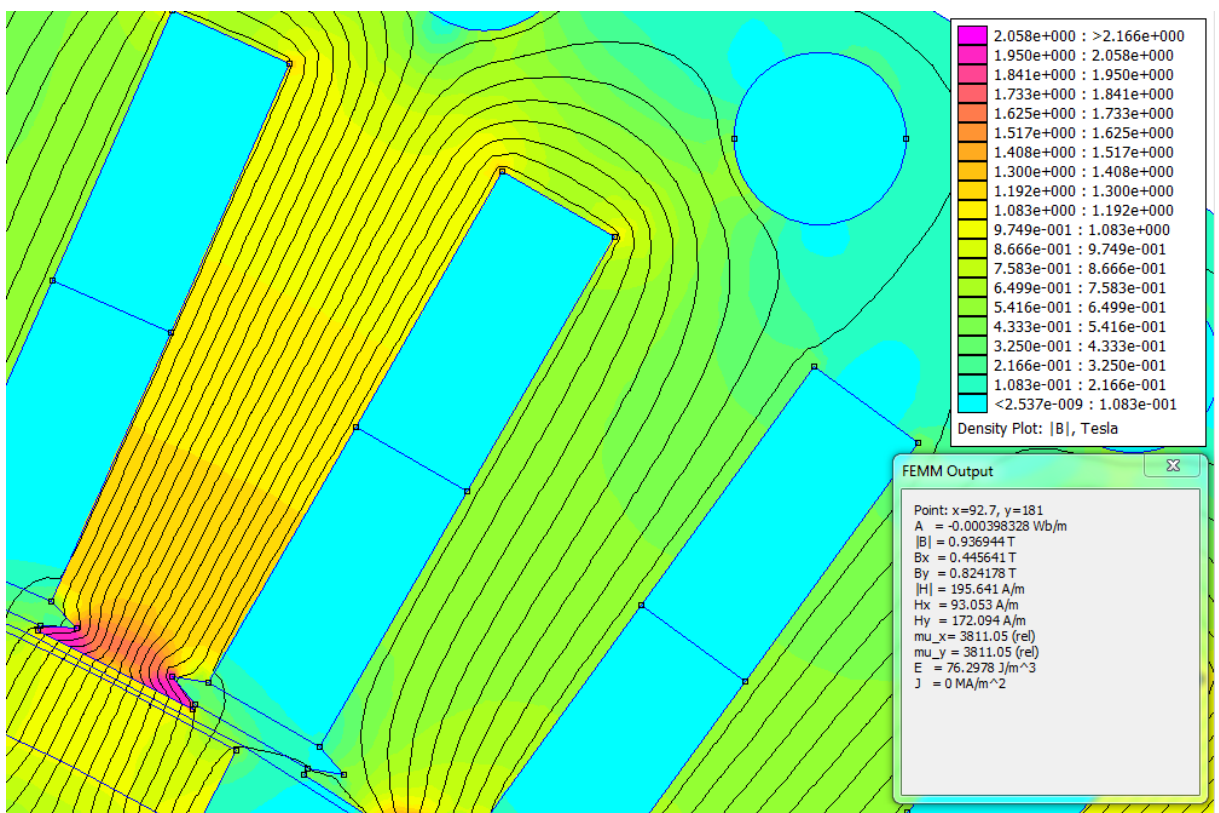
Výsledek ukazuje, že pole je poměrně rovnoměrně rozloženo, jak znázorňuje obrázek Obr. 7.2. Jak bylo předpokládáno při návrhu, nejvíce sycenou částí statoru jsou jeho zuby. Magnetická indukce je největší v hlavě zubu a směrem k jeho patě postupně klesá, jak ukazují následující obrázky.



Obr. 7.20 Magnetická indukce v hlavě statorového zubu



Obr. 7.21 Magnetická indukce ve středu statorového zubu



Obr. 7.22 Magnetická indukce v patě statorového zubu



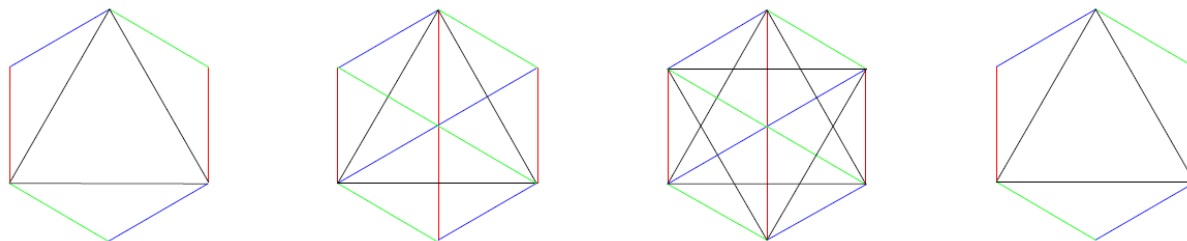
Jho statoru je syceno přibližně na hodnotu 0,77 T, což je výrazně méně, než byl odhad indukce  $B_{j1} = 1,4$  T (5.52). Důvodem tak velkého rozdílu je zvětšení jha statoru o chladicí kanály. Díky tomu se magnetické indukční čáry uzavírají ve větší ploše statorového jha. Pro přesnější odhad by bylo třeba spočítat odlehčovací činitele pro stator. Pokud by i tak byl návrh poddimenzován, tak řešením by bylo dimenzovat jho statoru na vyšší indukci, což by ale zvýšilo rozměry statoru, jeho hmotnost a celkové ztráty.

Jho rotoru dosahuje obdobných výsledků hodnot magnetických indukcí jako jho statorové. Zde se rovněž projevilo jeho zvětšení o chladicí kanály, které jsou umístěny pod magnety, jak ukazuje obrázek (*Obr. 7.19*).

Výsledky magnetických indukcí v jednotlivých variantách synchronních motorů vycházejí obdobně, což je zapříčiněno minimálním vlivem parametru  $q$  (počet drážek na pól) na magnetický obvod, jak bylo popsáno v předchozí kapitole (*Tab. 6.5*).

## 8 Porovnání Görgesových diagramů

Görgesův diagram zobrazuje rozložení magnetického pole ve vzduchové mezeře. V ideálním případě, by pole točivého stroje bez harmonických složek bylo zobrazeno jako kružnice. Ve skutečném stroji pole vytváří stupňovité křivky. Při konstrukci vycházíme z Tingleyho schématu (viz příloha). Barvy vektorů jsou shodné s barevným označením fází, černě je pak zkreslen výsledný Görgesův obrazec.



Obr. 8.1 Görgesovy diagramy pro  $q=1/2$ ,  $q=3/8$ ,  $q=2/5$ ,  $q=1/4$  (zleva)

Nyní vypočteme diferenční rozptyl pro jednotlivé Görgesovy obrazce. Pro určení vzdálenosti mezidrážkových bodů Görgesova obrazce jsem použil program QCAD.

Výpočet diferenčního rozptylu:  $q=1/2$

Poloměr kružnice ideálního magnetického pole:

$$R_{1h} = \frac{m}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot I_d \cdot q \cdot k_{v1} = \frac{3}{\pi} \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot 0,8660 = 0,4134 \quad (8.1)$$

kde:

$$\sqrt{2} \cdot I_d = 1 \quad (8.2)$$

Vzdálenost mezidrážkových bodů Görgesova obrazce:

$$R_{1G} = 0,5 \quad (8.3)$$

Diferenční rozptyl:

$$\tau_{dif} = \frac{R_{1G}^2 - R_{1h}^2}{R_{1h}^2} = \frac{0,5^2 - 0,4134^2}{0,4134^2} = 0,4628 \quad (8.4)$$

Výpočet diferenčního rozptylu:  $q=3/8$

Poloměr kružnice ideálního magnetického pole:

$$R_{1h} = \frac{m}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot I_d \cdot q \cdot k_{v1} = \frac{3}{\pi} \cdot 1 \cdot 0,378 \cdot 0,9850 = 0,3555 \quad (8.5)$$

kde:

$$\sqrt{2} \cdot I_d = 1 \quad (8.6)$$

Vzdálenost mezidrážkových bodů Görgesova obrazce:

$$R_{1G} = 0,5 \quad (8.7)$$

Diferenční rozptyl:

$$\tau_{dif} = \frac{R_{1G}^2 - R_{1h}^2}{R_{1h}^2} = \frac{0,5^2 - 0,3555^2}{0,3555^2} = 0,9782 \quad (8.8)$$

Výpočet diferenčního rozptylu:  $q=2/5$

Poloměr kružnice ideálního magnetického pole:

$$R_{1h} = \frac{m}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot I_d \cdot q \cdot k_{v1} = \frac{3}{\pi} \cdot 1 \cdot 0,4 \cdot 0,9960 = 0,3804 \quad (8.9)$$

kde:

$$\sqrt{2} \cdot I_d = 1 \quad (8.10)$$

Vzdálenost mezidrážkových bodů Görgesova obrazce:

$$R_{1G} = 0,5 \quad (8.11)$$

Diferenční rozptyl:

$$\tau_{dif} = \frac{R_{1G}^2 - R_{1h}^2}{R_{1h}^2} = \frac{0,5^2 - 0,3804^2}{0,3804^2} = 0,7277 \quad (8.12)$$

Výpočet diferenčního rozptylu:  $q=1/4$

Poloměr kružnice ideálního magnetického pole:

$$R_{1h} = \frac{m}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot I_d \cdot q \cdot k_{v1} = \frac{3}{\pi} \cdot 1 \cdot 0,25 \cdot 0,8660 = 0,2067 \quad (8.13)$$

kde:

$$\sqrt{2} \cdot I_d = 1 \quad (8.14)$$

Vzdálenost mezidrážkových bodů Görgesova obrazce:

$$R_{1G} = 0,5 \quad (8.15)$$

Diferenční rozptyl:

$$\tau_{dif} = \frac{R_{1G}^2 - R_{1h}^2}{R_{1h}^2} = \frac{0,5^2 - 0,2067^2}{0,2067^2} = 4,8514 \quad (8.16)$$

Výsledné hodnoty diferenčních rozptylů pro jednotlivé varianty stroje jsou shrnuty v tabulce *Tab. 8.1*, kde je také uvedena hodnota diferenčního rozptylu, která byla analyzována z hodnot z programu FEMM a následně vypočtena programem MATLAB.

*Tab. 8.1 Závislost diferenčního rozptylu na počtu drážek na pól*

Počet drážek na pól	$q=1/2$	$q=3/8$	$q=2/5$	$q=1/4$
Diferenční rozptyl	0,4628	0,9782	0,7277	4,8514
Dif. Rozptyl FEMM	0,5216	1,0197	0,8735	2,1972
Odchylka v procentech	12,7%	4,2%	20,0%	45,3%

Jak je vidět nejmenší diferenční rozptyl má varianta dvě ( $q=3/8$ ), naopak největší varianta čtyři ( $q=1/4$ ). Důvodem proč výsledný diferenční rozptyl je u ( $q=1/4$ ) tak nepříznivý je fakt, že nejvyšší hodnoty nedosahuje první harmonická, což vede ke zkreslení celého průběhu a tedy i analýze v programu FEMM. Výsledné hodnoty diferenčních rozptylů pro zbylé varianty jsou v tolerovatelných mezích pro zvolený typ vinutí.



## Závěr

Úkolem této diplomové práce bylo navrhnout synchronní motor s permanentními magnety. Většina výpočtů se držela postupů uvedených v publikaci [1]. Při návrhu jsem však narazil na několik problémů, které jsem musel řešit podle jiných zdrojů nebo s využitím zkušeností vedoucího diplomové práce.

Při elektromagnetickém návrhu stroje jsem se snažil využít nových konstrukčních řešení (zubové zlomkové vinutí) nebo nových izolačních materiálů (viz kapitola 5.4). Z výsledků je patrné, že bylo dosaženo optimálního rozložení pole v obvodu, respektive objemu stroje. Toho bylo docíleno vhodnou kombinací permanentních magnetů NdFeB na rotoru a zvoleného statorového vinutí. Výpočet velikosti magnetů byl proveden v odpovídajícím počtu interakčních kroků a jejich rozměry odpovídají předpokladům. Analýza v programu FEMM potvrdila velikost magnetické indukce ve vzduchové mezeře o velikosti  $B_{\delta}=IT$  což také odpovídá původně zvolenému parametru. Sycení v jednotlivých částech statorového zubu dle analýzy v programu FEMM se opět shoduje s výpočty elektromagnetického návrhu. Menší hodnota magnetické indukce ve statorovém a rotorovém jhu je způsobena zkreslením výsledku, které vzniklo přidáním chladících kanálů, jak jsem již zmínil v předchozích kapitolách. Nižší celková účinnost stroje je zapříčiněna zjednodušeným návrhem chlazení motoru. Při přesném výpočtu a jeho následném namodelování by bylo možné stanovit vhodnější způsob chlazení, což by nejspíše vedlo ke zmenšení statorového i rotorového jha. Menší stator by znamenal menší Jouleovy ztráty, lehčí rotor by zase vykazoval menší ztráty mechanické.

Dalším splněným bodem diplomové práce bylo porovnání několika variant synchronních motorů s různým počtem drážek na pól  $q$ . Vše je podrobně rozebráno v kapitole 6. Z výsledků můžeme snadno vyčíst, že zatímco pro některé charakteristiky stroje je tento parametr naprosto zásadní (počet drážek  $Q$ , činitel vinutí  $k_v$  nebo rozptylová reaktance  $X_{\sigma l}$ ), na jiné prakticky nemá žádný vliv (magnetický obvod stroje). Při projektování synchronních strojů s PM je tedy nutné se na tuto problematiku více zaměřit, protože počet drážek na pól  $q$  je jeden z prvně volených parametrů a jeho pozdější změna z důvodu jeho nevhodného zvolení by mohla být problematická.

V kapitole 7 jsou srovnány jednotlivé průběhy magnetických napětí, které vyšly analyzováním modelu stroje v programu FEMM. Výsledky se sice liší z výše popsanych důvodů, ale i tak poskytují konkrétní data vhodná jak pro ilustraci, tak i pro pozdější zpracování. V této sekci je také znázorněno rozložení magnetických indukcí a popis

nadefinování daného problému.

V kapitole **8** jsou porovnány výsledky výpočtů diferenčních rozptylů mezi programem FEMM a Görgešovým diagramem. Jak ukazuje *Tab. 8.1* i tomuto parametru je nutné věnovat pozornost, protože vysoký diferenční rozptyl by měl nepříznivý vliv na funkci celého stroje.

Výsledek této diplomové práce názorně ukazuje spojení analytického výpočtu za použití specializovaného SW společně s klasickými numerickými metodami a svými závěry může posloužit při dalším zkoumání této problematiky.

## Použitá literatura

- [1] KOPYLOV, I. P. A KOL.: *Stavba elektrických strojů*. Moskva/Praha, MIR/SNTL, 1988.
- [2] SALMINEN, P.: *Fractional slot permanent magnet synchronous motors for low speed applications. Dissertation, Acta Universitatis Lappeenrantaensis* 198, 2004.
- [3] HRABOVCOVÁ, V.: *Moderné elektrické stroje*. Žilina, 2001, ISBN 80-7100-809-5
- [4] ČERVENÝ, J.: *Materiály z předmětu Stavba elektrických strojů*. FEL ZČU, 2007.
- [5] ZLÁMAL, P.: *Návrh motoru s permanentními magnety*. Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2010.
- [6] CIGANEK, L.: *Stavba elektrických strojů*. Praha, SNTL, 1958.
- [7] JACYZSZYN, V.: *Rozbor vinutí točivých elektrických strojů*. Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2011.
- [8] KŘELOVEC, Z.: *Parametry asynchronního stroje a vliv vinutí*. Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2005.
- [9] HANSELMAN, D.: *Brushless permanent magnet motor design, Second edition*. USA, published by The Writers' collective, 2003, ISBN 1-932133-63-1.
- [10] PETROV, G.N.: *Elektrické stroje 2*. Moskva, SNTL, 1963.
- [11] BROULÍK, Z.: *Vliv sycení jha magnetického obvodu asynchronního motoru na velikost magnetického napětí jha*. Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2011.
- [12] < <http://www.kjmagnetics.com/specs.asp> >
- [13] <<http://www.scribd.com/doc/72785468/162/Non-oriented-fully-annealed-steels>>
- [14] <[http://www.sura.se/Sura/hp\\_products.nsf/vOpendocument/](http://www.sura.se/Sura/hp_products.nsf/vOpendocument/)>
- [15] ERHART, M.: *Návrh synchronního motorku s permanentními magnety*. Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2008.

## Přílohy

### Příloha A – Tingleyho schémata

Tingleyho schéma pro prvních 10 pólů stroje,  $q=1/2$ ,  $2p=40$ ,  $m=3$

ČÍSLO FÁZE	1. FÁZE	3. FÁZE	2. FÁZE
ČÍSLO PÓLU	A	C'	B
	A'	C	B'
1.	1(+)		3(+)
	2(-)		4(-)
2.		5(+)	
		6(-)	
3.	7(+)		9(+)
	8(-)		10(-)
4.		11(+)	
		12(-)	
5.	13(+)		15(+)
	14(-)		16(-)
6.		17(+)	
		18(-)	
7.	19(+)		21(+)
	20(-)		22(-)
8.		23(+)	
		24(-)	
9.	25(+)		27(+)
	26(-)		28(-)
10.		29(+)	
		30(-)	



Tingleyho schéma pro prvních 10 pólů stroje,  $q=3/8$ ,  $2p=40$ ,  $m=3$

ČÍSLO FÁZE	1. FÁZE			3. FÁZE			2. FÁZE		
ČÍSLO PÓLU	A			C'			B		
	A'			C			B'		
1.	1(+)								3(+)
	2(+)								4(-)
2.								5(-)	
								6(-)	
3.							7(+)		
							8(+)		
4.						9(+)			
						10(-)			
5.					11(-)				
					12(-)				
6.				13(+)					
				14(+)					
7.			15(+)						
			16(-)						
8.		17(-)							
		18(-)							
9.	19(+)								21(+)
	20(+)								22(-)
10.								23(-)	
								24(-)	

Tingleyho schéma pro prvních 10 pólů stroje,  $q=2/5$ ,  $2p=40$ ,  $m=3$

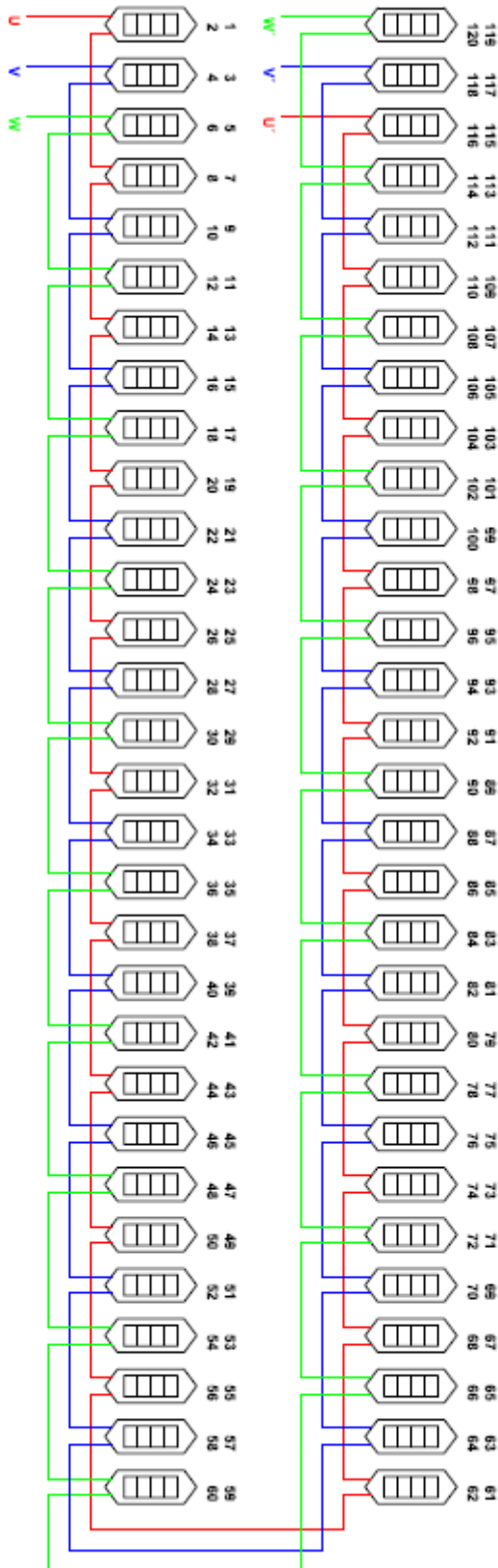
ČÍSLO FÁZE	1. FÁZE		3. FÁZE		2. FÁZE	
ČÍSLO PÓLU	A		C'		B	
	A'		C		B'	
1.	1(+)					3(+)
	2(+)					4(-)
2.					5(-)	
					6(-)	
3.				7(-)		
				8(+)		
4.			9(+)			
			10(+)			
5.		11(+)				
		12(-)				
6.	13(-)					15(-)
	14(-)					16(+)
7.					17(+)	
					18(+)	
8.				19(+)		
				20(-)		
9.			21(-)			
			22(-)			
10.		23(-)				
		24(+)				

Tingleyho schéma pro prvních 10 pólů stroje,  $q=1/4$ ,  $2p=40$ ,  $m=3$

ČÍSLO FÁZE	1. FÁZE	3. FÁZE	2. FÁZE
ČÍSLO PÓLU	A	C'	B
	A'	C	B'
1.	1(+)		
	2(-)		
2.		3(+)	
		4(-)	
3.			5(+)
			6(-)
4.			
5.	7(+)		
	8(-)		
6.		9(+)	
		10(-)	
7.			11(+)
			12(-)
8.			
9.	13(+)		
	14(-)		
10.		15(+)	
		16(-)	

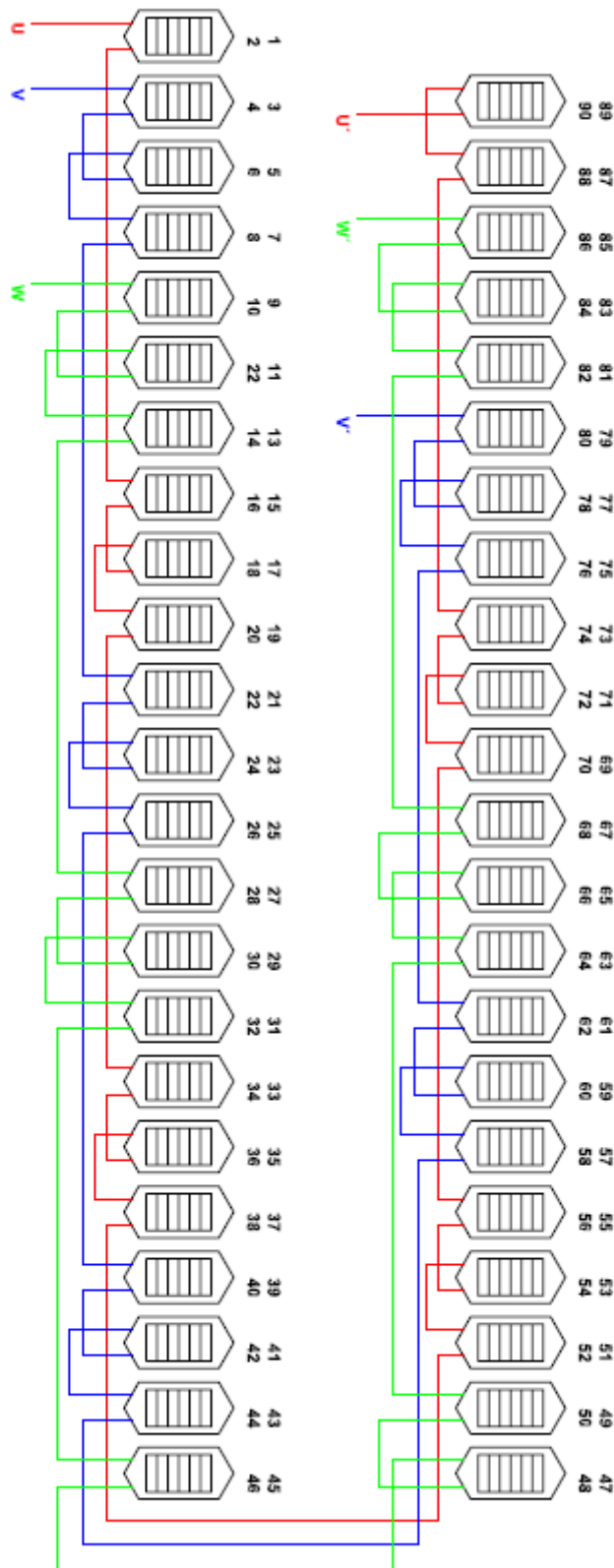
**Příloha B – Schémata vinutí**

Úplné schéma statorového vinutí pro stroj  $q=1/2$ ,  $2p=40$ ,  $m=3$

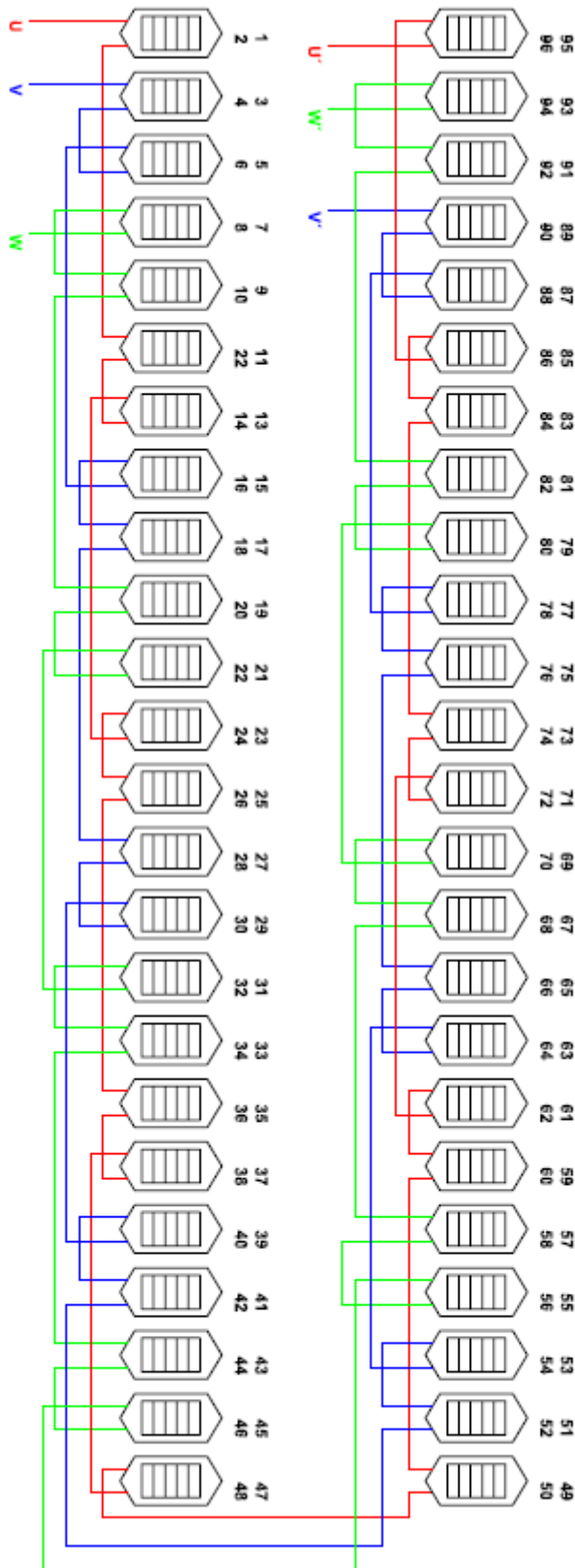




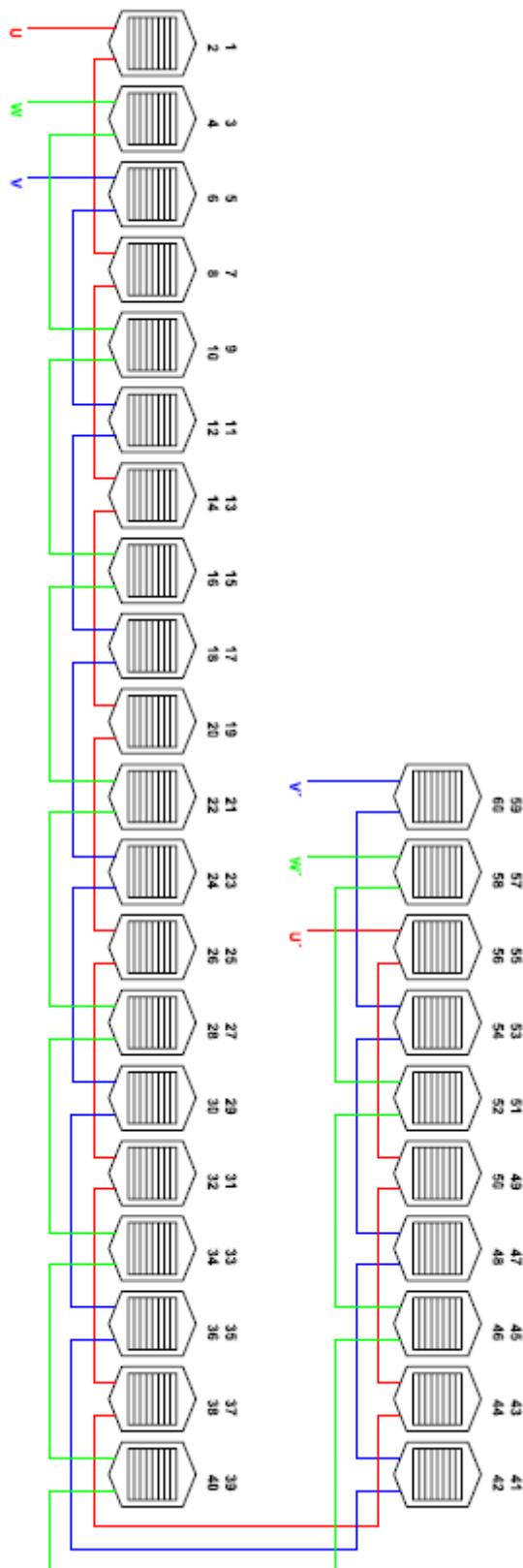
Úplné schéma statorového vinutí pro stroj  $q=3/8$ ,  $2p=40$ ,  $m=3$



Úplné schéma statorového vinutí pro stroj  $q=2/5$ ,  $2p=40$ ,  $m=3$

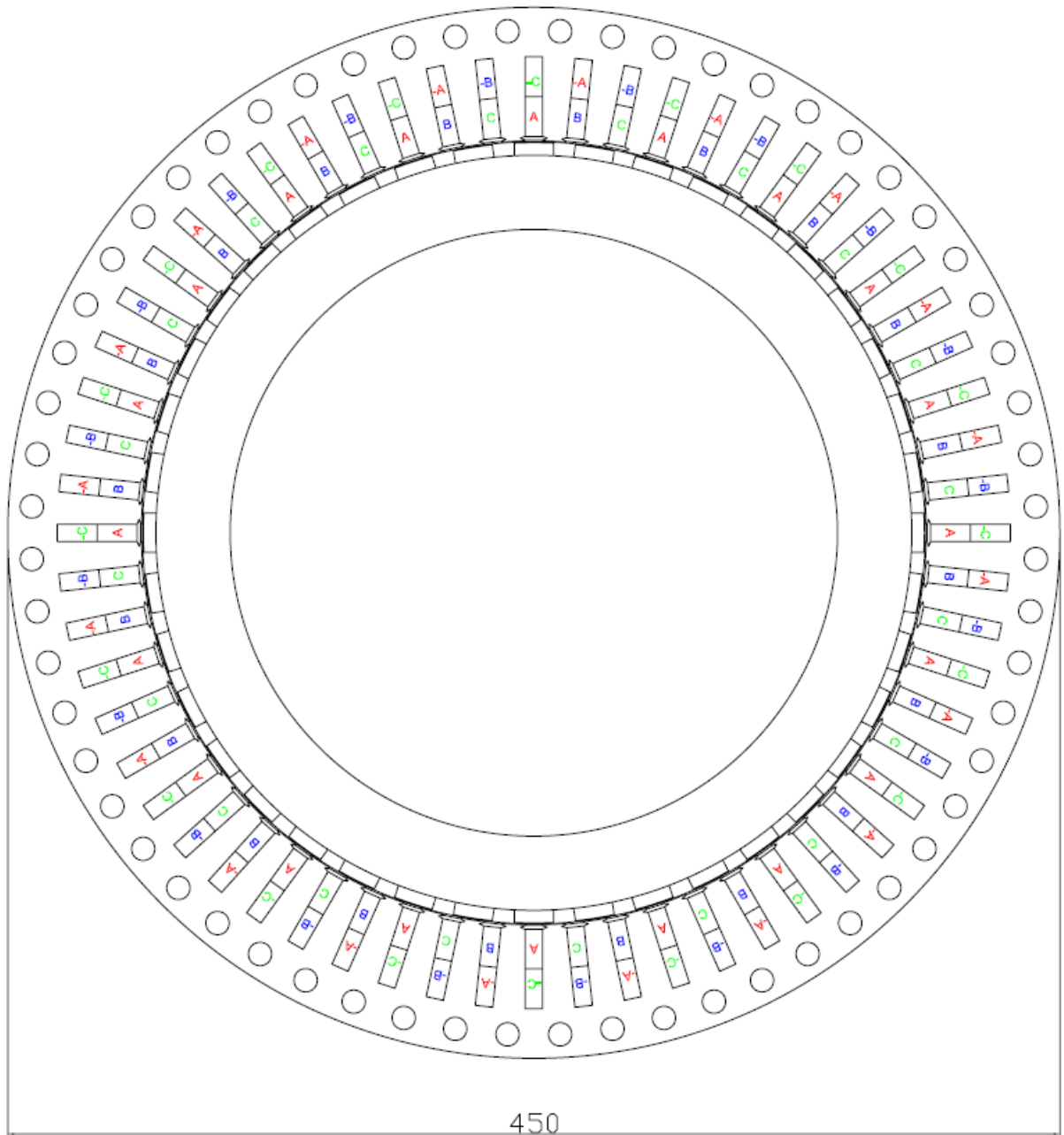


Úplné schéma satorového vinutí pro stroj  $q=1/4$ ,  $2p=40$ ,  $m=3$



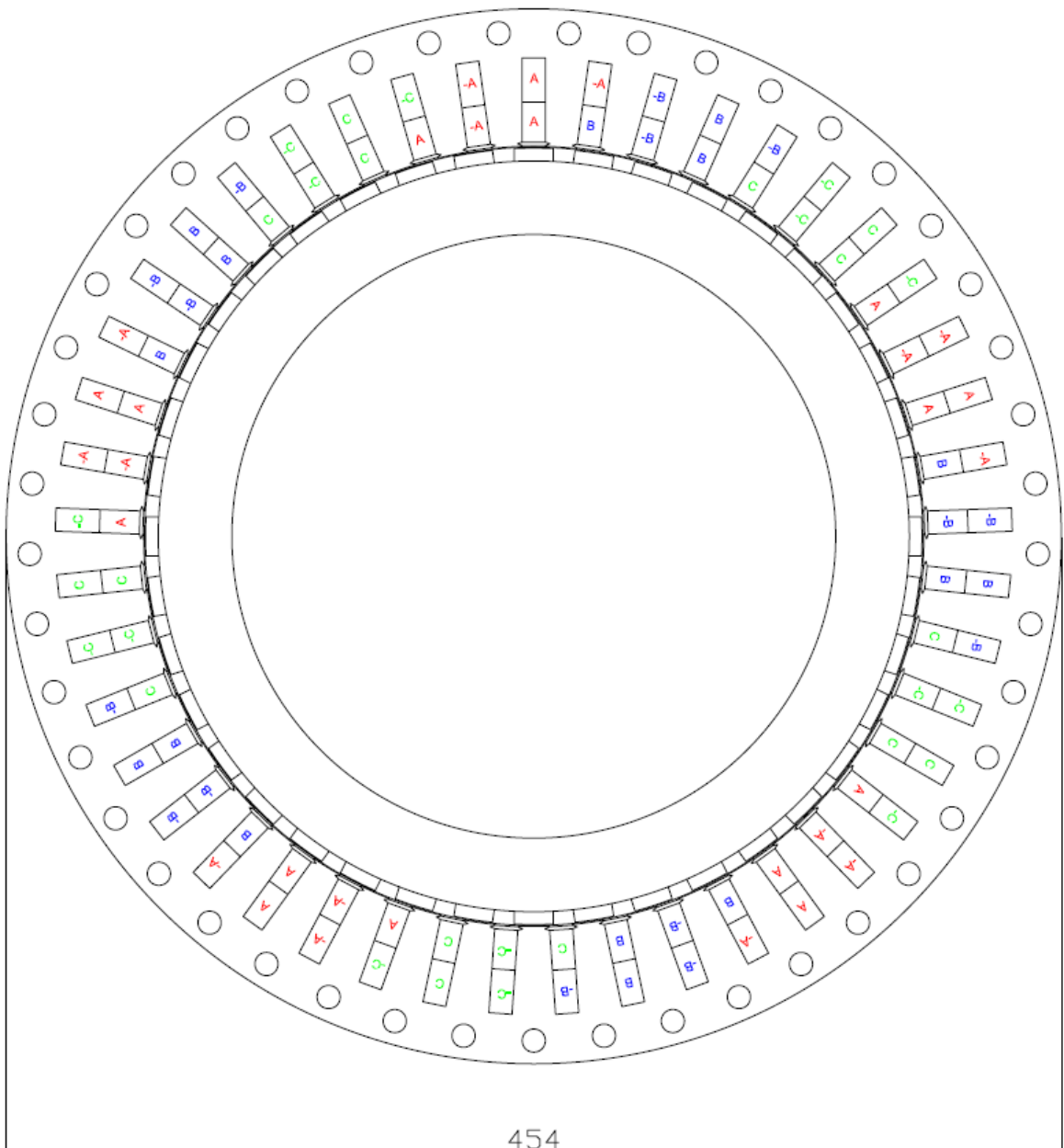
**Příloha C – Schematické znázornění řezů statorů stroje s náčrty rozložení vinutí**

*Schematické znázornění řezu statoru stroje  $q=1/2$ ,  $2p=40$ ,  $m=3$  s náčrtem rozložení vinutí*

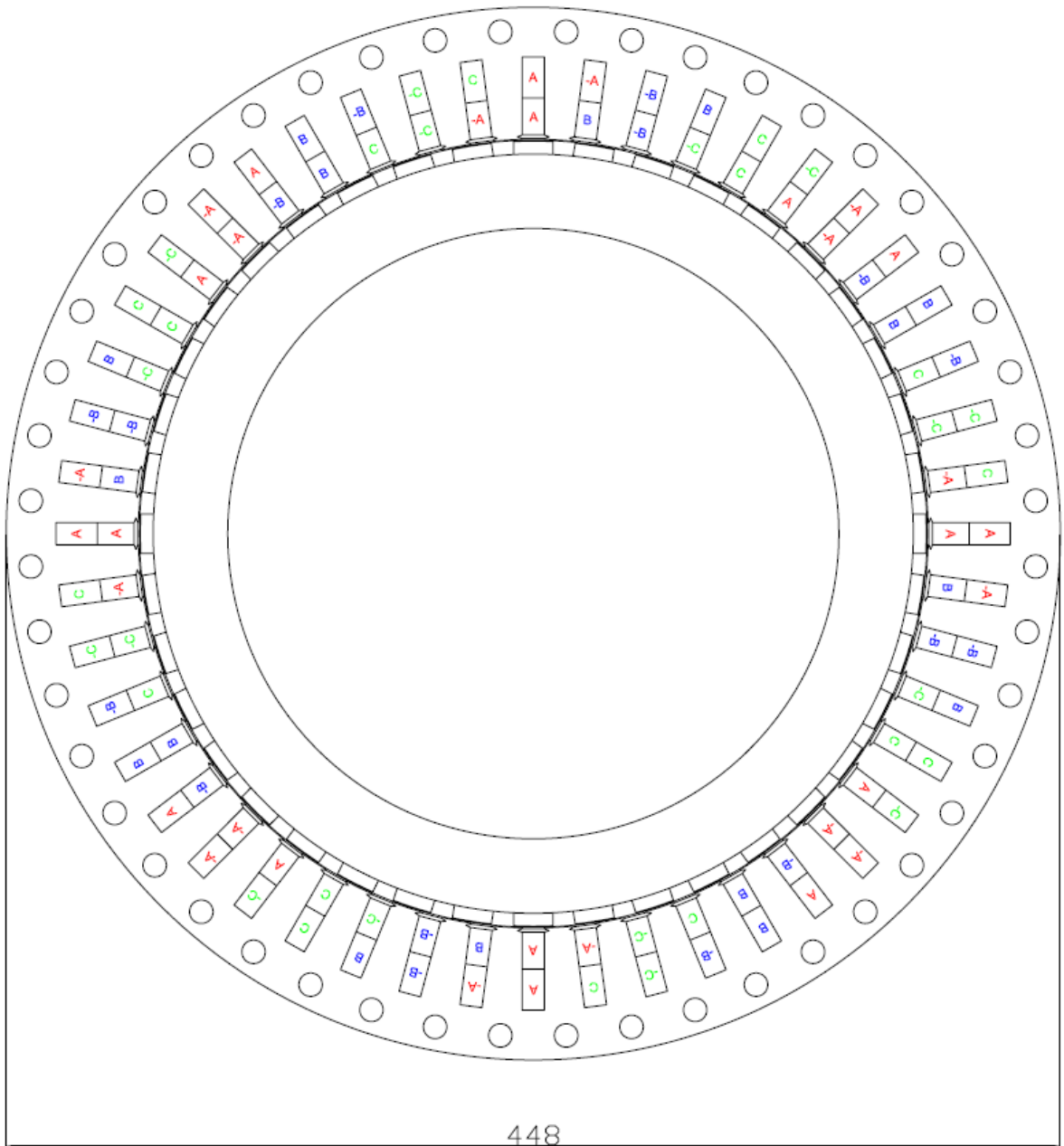




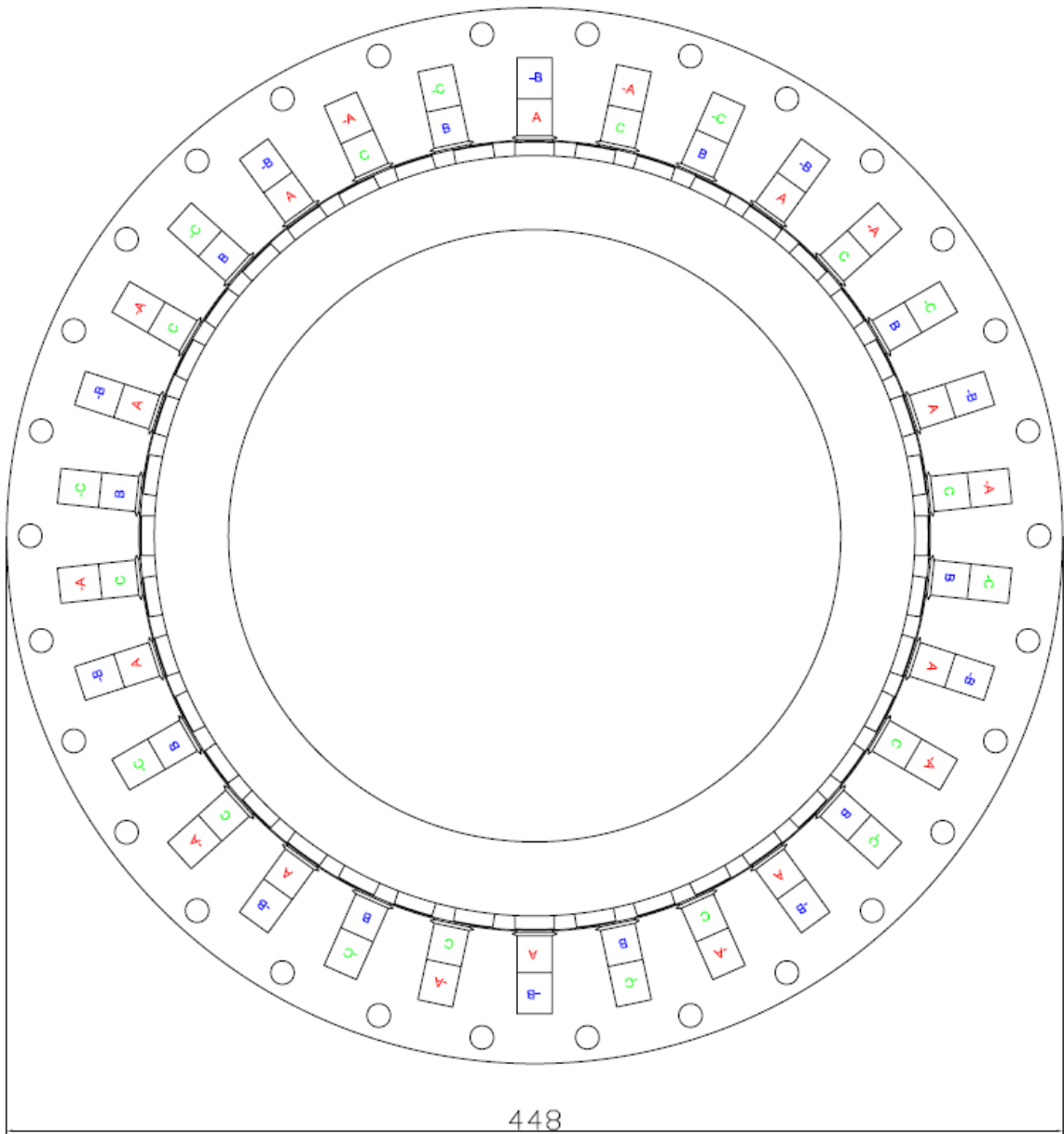
Schematické znázornění řezu statoru stroje  $q=3/8$ ,  $2p=40$ ,  $m=3$  s náčrtem rozložení vinutí



Schematické znázornění řezu statoru stroje  $q=2/5$ ,  $2p=40$ ,  $m=3$  s náčrtem rozložení vinutí



Schematické znázornění řezu statoru stroje  $q=1/4$ ,  $2p=40$ ,  $m=3$  s náčrtem rozložení vinutí



## Příloha D – Katalogový list permanentního magnetu N35UH

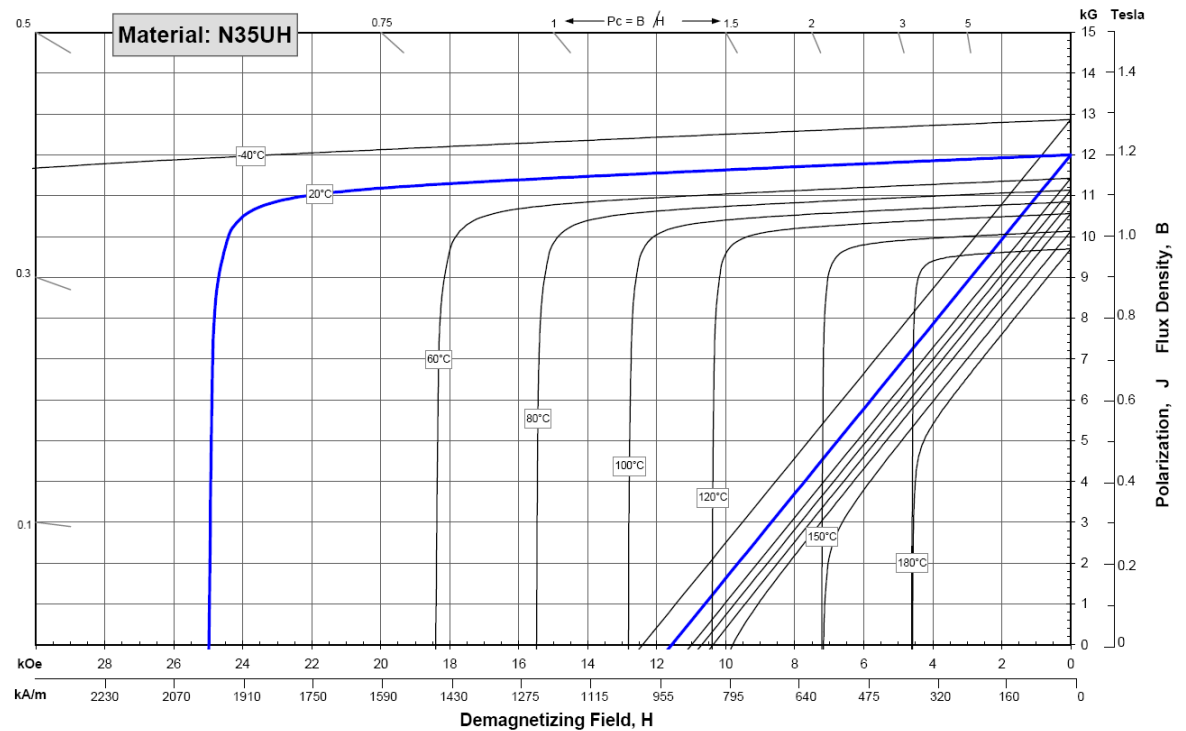
### Sintered Neodymium-Iron-Boron Magnets

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.
<b>Br</b> , Residual Induction	Gauss	11,800	12,000	12,200
	mT	1180	1200	1220
<b>H<sub>cB</sub></b> , Coercivity	Oersteds	11,000	11,350	11,700
	kA/m	875	903	931
<b>H<sub>cJ</sub></b> , Intrinsic Coercivity	Oersteds	25,000		
	kA/m	1,990		
<b>BH<sub>max</sub></b> , Maximum Energy Product	MGOe	33	35	36
	kJ/m <sup>3</sup>	263	275	287

Characteristic	Units	Thermal Properties	
		C //	C ⊥
Reversible Temperature Coefficients <sup>(1)</sup>	of Induction, α(Br)	%/°C	-0.12
	of Coercivity, α(H <sub>cJ</sub> )	%/°C	-0.51
	Coefficient of Thermal Expansion <sup>(2)</sup>	ΔL/L per °C x 10 <sup>-5</sup>	7.5
Thermal Conductivity	kcal/mhr°C	5.3	5.8
Specific Heat <sup>(3)</sup>	cal/g°C		0.11
Curie Temperature, T <sub>c</sub>	°C		375
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 180 °C  
 (2) Between 20 and 200 °C  
 (3) Between 20 and 140 °C



1 kA/m = 12.566 Oe 1 kOe = 79.577 kA/m




Příloha E – Katalogový list statorových plechů M350-50A


**Typical data for SURA® M350-50A**

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	0,02	0,08	36,4	0,06	0,17	0,48	2,02	8,34
0,2	0,09	0,20	48,1	0,24	0,62	1,75	7,15	29,0
0,3	0,18	0,36	56,1	0,50	1,30	3,62	14,7	60,1
0,4	0,30	0,54	63,2	0,81	2,15	6,02	24,6	104
0,5	0,44	0,75	70,2	1,18	3,17	8,96	37,2	162
0,6	0,59	0,99	77,5	1,60	4,36	12,5	53,1	241
0,7	0,76	1,27	85,6	2,08	5,73	16,6	72,7	343
0,8	0,95	1,58	94,8	2,62	7,31	21,5	96,9	474
0,9	1,16	1,94	106	3,21	9,09	27,2	126	638
1,0	1,39	2,39	122	3,88	11,1	33,8	162	840
1,1	1,65	2,96	146	4,61	13,4	41,5	204	1079
1,2	1,95	3,76	185	5,43	16,0	50,4	254	1360
1,3	2,29	5,11	264	6,37	18,9	60,4	312	1679
1,4	2,75	8,40	481	7,53	22,3	72,1	378	2036
1,5	3,29	19,8	1200	8,99	26,6	85,7	456	2316
1,6	4,41	54,1	3025					
1,7	4,77	124	6186					
1,8	5,00	238	10720					

Loss at 1.5 T, 50 Hz, W/kg	3,29
Loss at 1.0 T, 50 Hz, W/kg	1,39
Anisotropy of loss, %	10
<b>Magnetic polarization at 50 Hz</b>	
H = 2500 A/m, T	1,58
H = 5000 A/m, T	1,67
H = 10000 A/m, T	1,78
<b>Coercivity (DC), A/m</b>	
Relative permeability at 1.5 T	1050
Resistivity, $\mu\Omega\text{cm}$	42
<b>Yield strength, N/mm<sup>2</sup></b>	
Tensile strength, N/mm <sup>2</sup>	460
Young's modulus, RD, N/mm <sup>2</sup>	200 000
Young's modulus, TD, N/mm <sup>2</sup>	210 000
Hardness HV5 (VHN)	160



RD represents the rolling direction  
TD represents the transverse direction  
Values for yield strength (0.2 % proof strength)  
and tensile strength are given for the rolling direction  
Values for the transverse direction are approximately 5% higher



**Příloha F – Aplikace pro výpočet stupňovité křivky a FFT v programu MATLAB**

```
td1=17.6;

A = [0;1];
B = [sin(4/3*pi);cos(4/3*pi)];
C = [sin(2/3*pi);cos(2/3*pi)];

A=0.5.*A;
B=0.5.*B;
C=0.5.*C;

figure(1);
plot(A(1),A(2),'Marker','+');
hold on;
plot(B(1),B(2),'Marker','+');
hold on;
plot(C(1),C(2),'Marker','+');

line([A(1),C(1)], [A(2),C(2)]);
line([A(1),B(1)], [A(2),B(2)]);
line([B(1),C(1)], [B(2),C(2)]);
hold off;

% každý prvek v matici je zkopírován 10x
prvni=[A(2),B(2),C(2)]

figure1=figure(2);
axes1 = axes('Parent',figure1);
xlim(axes1, [0 (td1/10*length(prvni))]);
ylim(axes1, [-0.6 0.6]);
box(axes1,'on');
hold(axes1,'all');
plot((0:(td1/10):(td1/10*(length(prvni)-1))), prvni)
xlabel('Délka po obvodu stroje [mm]'), ylabel('Magnetické napětí [p.m.]')
title('Magnetické napětí po obvodu stroje');

prvniFFT1=abs(fft(prvni))/(length(prvni)/2);
prvniFFT1(1)=0.5*prvniFFT1(1);

figure(3);
plot((0:(td1/10*200)/199:td1/10*200), prvniFFT1(1:200));
xlabel('Délková perioda [mm]'), ylabel('Magnetické napětí [p.m.]');%stairs(prvniFFT1);
title('Fourierova Analýza');
```

**Příloha G – Aplikace pro výpočet diferenčního rozptylu a FFT v programu MATLAB**

```
function sokol2;

load Hodnoty05.txt
%>> whos

hodnoty=load('Hodnoty05.txt');

y2=hodnoty(:,2);

harm=abs(fft(y2))/(length(y2)/2);
harm(1)=0.5*harm(1);
figure (4)
plot(0:2:398, harm(1:200));
xlabel('Délková perioda [mm]'), ylabel('Magnetické napětí [p.m.]');%stairs(prvniFFT1);
title('Fourierova Analýza');

sumB2=0;
maxB=0;
for pom=1:length(harm)/2
    sumB2=sumB2+harm(pom)^2;

    if maxB<harm(pom)
        maxB=harm(pom);
        maxPOM=pom;
    end
end

(sumB2-harm(maxPOM)^2)/harm(maxPOM)^2
```