

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Momenty asynchronních strojů

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2016/2017

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

Jméno a příjmení: **Luděk MAREK**
Osobní číslo: **E14B0039P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Momenty asynchronních strojů**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Popište momenty vznikající v asynchronních strojích.
2. Diskutujte možnosti potlačení parazitních momentů stroje vhodným uspořádáním magnetického obvodu.
3. Uveďte přehled možností výpočtů momentů, zejména pomocí metody konečných prvků.
4. Provedte pro vybraná uspořádání magnetického obvodu výpočty a zhodnoťte obdržené výsledky.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

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

Seznam odborné literatury:

1. Heller B., Hamata V.: **Přídavná pole, síly a ztráty v asynchronním stroji.** Nakladatelství ČSAV, Praha 1961.
2. Petrov G. N.: **Elektrické stroje.** Nakladatelství ČSAV, Praha 1982.
3. Bianchi N.: **Electrical machine analysis using finite elements.** Taylor & Francis, Boca Raton 2005.


Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jan Laksar


Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2017**


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




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zabývá popsáním momentů, které vznikají v asynchronním stroji. Popisuje také jejich vliv na funkci stroje a možné způsoby potlačení parazitních momentů. Dále jsou zde uvedeny metody pro výpočet momentů.

Cílem této bakalářské práce je vypočítat momenty pro dvě různá uspořádání stroje dvěma odlišnými metodami v programu FEMM.

Klíčová slova

asynchronní stroj, moment, magnetomotorické napětí, metoda konečných prvků, rotor, stator, drážka, vinutí

Abstract

The thesis deals with description moments generated in the asynchronous machine. It also describes how the parasitic moments can affect on the machine and how can they be suppressed. Then follows different methods for computing moments.

The main aim of this thesis is to calculate moments for two different arrangement of the machine with two methods in program FEMM.

Key words

asynchronous machine, torque, magnetomotoric force, finite element method, rotor, stator, slot, winding

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 7.6.2017

Luděk Marek

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Laksarovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1. ASYNCHRONNÍ STROJ	12
1.1 KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ	12
1.2 PRINCIP FUNKCE.....	15
1.3 MOMENTOVÁ CHARAKTERISTIKA.....	16
2. MOMENTY V ASYNCHRONNÍM STROJI	19
2.1 ODVOZENÍ MOMENTU.....	19
2.2 VLIV VYŠŠÍCH HARMONICKÝCH NA PRÁCI ASYNCHRONNÍHO STROJE	22
2.2.1 <i>Vliv drážkování statoru a rotoru</i>	23
2.2.2 <i>Vliv nesinusového rozložení magnetomotorického napětí</i>	26
2.3 POTLAČENÍ VYŠŠÍCH HARMONICKÝCH	27
3. METODY POUŽÍVANÉ K VÝPOČTU MOMENTU	29
3.1 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ	29
3.2 MAXWELLŮV TENZOR	30
4. VÝPOČET MOMENTŮ	31
4.1 SIMULACE MOTORU 1	31
4.2 SIMULACE MOTORU 2.....	36
4.3 POROVNÁNÍ DOPOČTENÝCH HODNOT S TEORETICKÝMI ÚDAJI.....	40
ZÁVĚR	41
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	42
PŘÍLOHY	43

Úvod

Asynchronní stroje jsou v dnešní době nejpoužívanější stroje a to především ve funkci jako motor. Dříve se používaly v aplikacích, kde nebylo požadováno měnit rychlost. Tam, kde se vyžadovala změna rychlosti, se používaly stejnosměrné motory, které mají oproti asynchronním motorům složitější konstrukci a tím i větší nároky na údržbu. S vývojem polovodičové techniky se tato neschopnost regulace otáček asynchronních motorů změnila a nyní se pro plynulou regulaci otáček používají polovodičové měniče kmitočtů. Tím se rozšířila možnost jejich využití a v dnešní době se používají v nejrůznějších aplikacích jako čerpadla, obráběcí stroje, kompresory a v mnoha dalších.

Hlavním cílem této bakalářské práce je vypočítat momenty pro dvě různá uspořádání stroje, dvěma způsoby a to za použití Maxwellova tenzoru a pomocí změny energie uložené ve vzduchové mezeře. Text práce je rozdělen do čtyř částí. V první části bude popsán princip, různé konstrukce a vlastnosti asynchronních strojů. Druhá část se bude zabývat popisem momentů, které ve stroji mohou vznikat. Dále zde budou uvedena různá doporučení pro potlačení parazitních momentů, které mají na funkci stroje nepříznivý vliv. Třetí část bude obsahovat popis metod, které se mohou používat k výpočtu momentů a to metodu konečných prvků, která se s vývojem počítačové techniky stala velmi oblíbenou a užívá se v nejrůznějších oborech. Poté zde bude uveden možný výpočet za využití Maxwellova tenzoru. Čtvrtá část se bude zabývat samotným výpočtem momentu pro daná uspořádání stroje v programu FEMM. Výsledky získané oběma metodami budou následně vzájemně porovnány.

Seznam symbolů a zkratek

a	počet paralelních větví [-]
$B(\alpha, t)$	prostorový průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře [T]
B	magnetická indukce [T]
D	průměr rotoru [m]
$d\mathbf{F}$	vektor síly [N]
dS	element plochy [m ²]
f	frekvence [Hz]
f_1	frekvence statoru [Hz]
F_1	magnetomotorické napětí statoru [A]
f_2	frekvence rotoru [Hz]
F_2	magnetomotorická napětí rotoru [A]
F_c	celkové magnetomotorické napětí [A]
H	intenzita magnetického pole [A/m]
\mathbf{H}	vektor intenzity magnetického pole [A/m]
H_{\max}	maximální intenzita magnetického pole [A/m]
H_{str}	střední hodnota intenzity magnetického pole [A/m]
I_2	proud kotvy [A]
I_{Im}	imaginární složka proudu [A]
I_m	maximální hodnota proudu [A]
I_{Re}	reálná složka proudu [A]
k	libovolné kladné číslo [-]
k_{v2}	činitel vinutí rotoru [-]
l	délka stroje [m]
m	počet fází / počet tyčí na jednu vlnu harmonické [-]
M	točivý moment [N·m]
M_{\max}	moment zvratu [N·m]
M_n	jmenovitý moment [N·m]
M_z	zátěžný moment [N·m]
\mathbf{n}	normálový vektor
n	otáčky rotoru [ot/min]
N_2	počet závitů v rotoru [-]

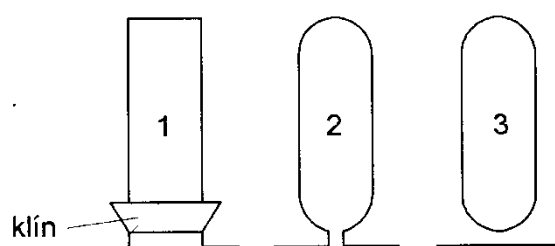
n_s	otáčky pole [ot/min]
p	počet pólpárů [-]
P	výkon stroje [W]
Q_1	počet drážek statoru [-]
Q_2	počet drážek rotoru [-]
S	plocha [m ²]
s	skluz [% , -]
s_{max}	skluz zvratu [% , -]
s_n	jmenovitý skluz [% , -]
t	čas [s]
U_2	indukované napětí v rotoru [V]
V	objem vzduchové mezery [m ³]
W	energie magnetického pole ve vzduchové mezeře [J]
α	prostorová souřadnice po obvodu vzduchové mezery [°]
β	prostorový úhel [°]
δ	velikost vzduchové mezery [m]
θ	elektrický úhel [rad]
θ_m	mechanický úhel [rad]
μ	permeabilita [H/m]
μ_0	permeabilita vakua [H/m]
μ_{FE}	permeabilita železa [H/m]
μ_r	relativní permeabilita [H/m]
v	řád harmonické [-]
Φ	magnetický tok [Wb]
φ_2	časový úhel [°]
ω	úhlová rychlost [rad/s]
π	Ludolfovo číslo

1. Asynchronní stroj

Asynchronní stroje, též nazývány jako indukční stroje, jsou střídavé točivé stroje nejčastěji v provedení jako třífázové. Pro menší výkony se používají i v provedení jako jednofázové. Mohou pracovat buďto jako motor či generátor. Nejčastěji se používají jako motory v čerpadlech, kompresorech, výtazích a v mnoha dalších aplikacích. Nahradily stejnosměrné motory především kvůli jednoduché konstrukci a malým nárokům na údržbu. S vývojem polovodičové techniky se odstranila jejich hlavní nevýhoda a to řízení rychlosti, které se nyní může provádět pomocí měničů kmitočtů. Jen málokdy se používají jako generátor (např. malé vodní elektrárny).

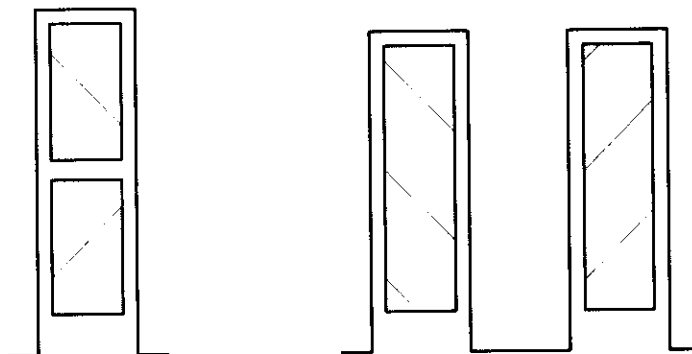
1.1 Konstrukční uspořádání

Asynchronní stroje se skládají ze statoru a rotoru. Stator bývá tvořen nosnou kastrou z litiny či hliníku, ve které je umístěn magnetický obvod. Magnetický obvod je sestaven z dynamoplechů ve tvaru mezikruží. Tyto jednotlivé plechy jsou legovány křemíkem a vzájemně od sebe odizolovány, aby bylo zamezeno vzniku vířivých proudů, a tím se snížily ztráty. Magnetický obvod je na kostru uchycen pomocí lišt či svorníky. Statorové plechy obsahují na vnitřním obvodě drážky, do kterých se ukládá vinutí. Drážky mohou být otevřené, polouzavřené nebo uzavřené (*Obr. 1.1*). Otevřené drážky se používají u větších strojů, kvůli lepší izolaci cívek v přípravcích mimo stroj. V místě otevření vznikají nehomogenity magnetického pole, dochází zde k poklesu magnetické indukce ve vzduchové mezeře a i k většímu zvlnění momentu. Částečně lze tyto nehomogenity potlačit zvýšením vzduchové mezery mezi státorem a rotorem. Polouzavřené drážky se používají pro střední a malé výkony. Jejich výhodou společně s možností volby malé vzduchové mezery je to, že zbytečně nezvětšují magnetizační proud odebíraný ze sítě. Uzavřené drážky se používají pro speciální použití, protože snižují proud potřebný k vytvoření magnetického pole. [1]



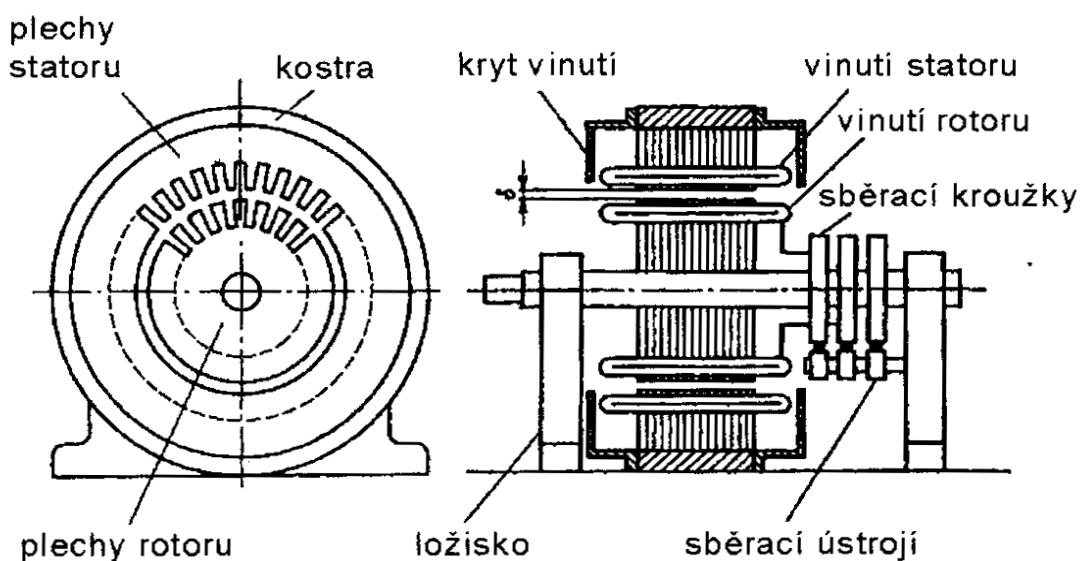
Obr. 1.1 Drážky rotoru (1 otevřená, 2 polouzavřená, 3 uzavřená) [1]

Vinutí uložené do drážek může být jednovrstvé či dvouvrstvé (Obr. 1.2). To je dáno počtem cívkových stran v jedné drážce. Nejvíce používané je vinutí dvouvrstvé se zkráceným krokem, které nejlépe dokáže potlačit vliv vyšších harmonických, a tím omezit hlučnost, chvění a přídatné ztráty stroje.



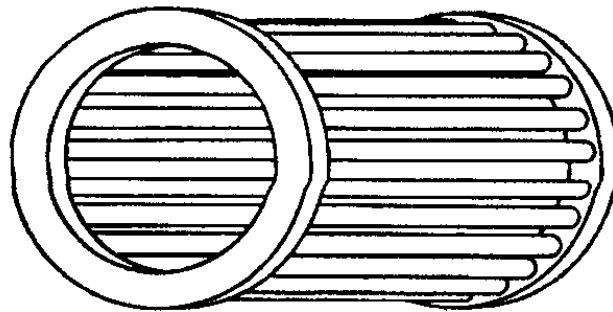
Obr. 1.2 Vlevo dvouvrstvé, Vpravo jednovrstvé vinutí [1]

Rotory se používají dvojího typu. První typ je rotor s kotvou kroužkovou (Obr. 1.3). Motory s touto kotvou vznikly hlavně kvůli potlačení rázového proudu, ovšem tím částečně zanikla výhoda jednoduchosti konstrukce. V rotorových drážkách je uloženo vinutí, které má začátky spojené do uzlu (zapojení do hvězdy) a konce vinutí jsou přivedeny ke kroužkům, na které dosedají kartáče. Přes tyto kartáče se připojují další zařízení, nejčastěji spouštěcí odpory k usnadnění rozběhu motoru. Ve většině případů se kroužky používají pouze k rozběhu a po roztočení stroje se vyzkratují. Kartáče se poté odpojí. Od statorového vinutí se obvykle liší počtem drážek. Což má opět lepší vliv na potlačení vyšších harmonických složek v magnetickém poli. [1]

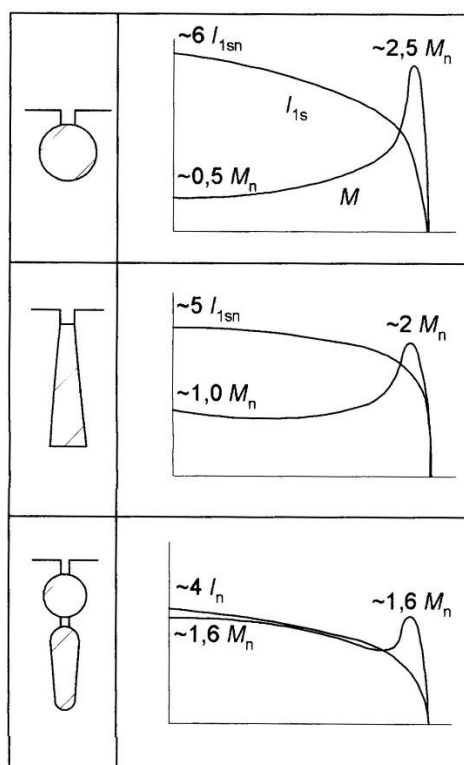


Obr. 1.3 Motor s kotvou kroužkovou [1]

Druhý typ je rotor s kotvou nakrátko, označován také jako klecový rotor (*Obr. 1.4*). Skládá se z hliníkových popřípadě měděných či mosazných tyčí, které jsou zkratovány na konci zkratovacími kruhy. Drážky jsou většinou polouzavřené a různého tvaru, čímž se dosahuje různých momentových charakteristik (*Obr. 1.5*).



Obr. 1.4 Kotva klecová [1]



Obr. 1.5 Momentové charakteristiky - ze shora jednoduchá, vírová, dvojitá klec [1]

1.2 Princip funkce

V kotvě rotoru se indukují vícefázové proudy a napětí vlivem statorového pole. Tyto proudy a napětí vytváří společně elektromagnetický moment.

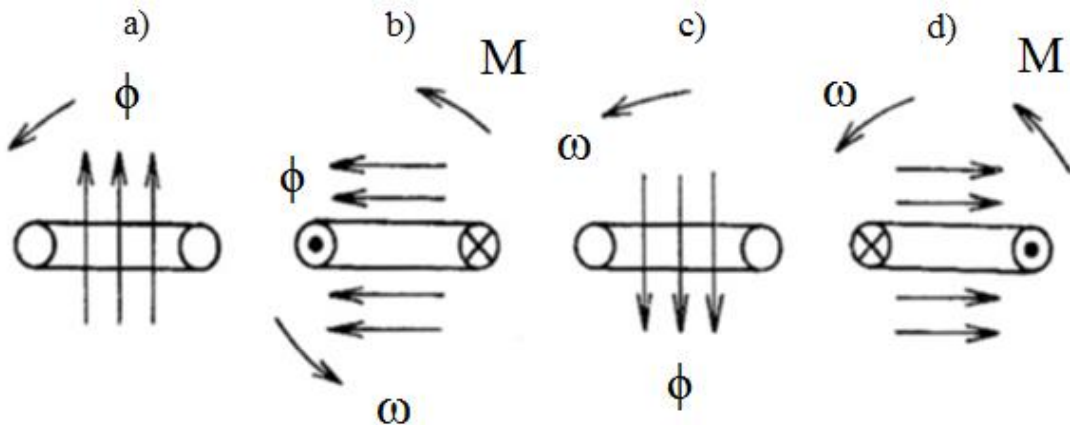
$$M \sim \phi \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 \cdot \sin \beta \quad (1.1)$$

Princip činnosti asynchronního stroje lze vysvětlit na jednoduchém příkladu. Uzavřená vodivá smyčka umístěná do rotujícího homogenního pole (Obr. 1.6), které se otáčí proti směru hodinových ručiček, má v určitý okamžik magnetický tok ϕ , procházející skrz smyčku, maximální. V této pozici je změna toku nulová ($d\phi / dt = 0$), indukované napětí je nulové a také proud procházející smyčkou je roven nule. Pole pohybující se vzhledem ke smyčce, zmenšuje vzájemnou interakci mezi nimi a tím se podle Lencova pravidla indukuje ve smyčce napětí a současně s tím se proud ve smyčce snaží zachovat směr uvedený na Obr. 1.6 b). V této poloze je β (úhel mezi osami toku ϕ a proudem I_2) rovno 90° a φ_2 (fázový posuv mezi U_2 a I_2) se rovná 0° , což podle rovnice (1.1) znamená, že je moment v této pozici maximální a magnetické pole a moment mají stejný směr. Dalším otáčením se magnetický tok zmenšuje a tím i moment, teprve když se pole natočí, jak je naznačeno na Obr. 1.6 c), je opět moment nulový. Dalším otáčením pole začne magnetický tok nabývat kladných hodnot a zvětšuje se a tím i moment. Indukované napětí a proud kotvy vzrůstají až do svého maxima Obr. 1.6 d), na rozdíl od Obr. 1.6 b) mají opačný smysl. Moment má stejný směr, a pokud je smyčce dovoleno otáčet se podle své osy, tak se roztočí ve směru působení momentu. Indukční stroje jsou schopny se takto samy roztočit, což patří mezi jejich hlavní výhodu. Takto se smyčka snaží dohnat točivé magnetické pole, a kdyby se jí to podařilo, tak by byla vůči magnetickému poli v klidu. V tomto případě by změna magnetického toku a tím i moment byly nulové. Tento případ ovšem nikdy nenastane, protože na stroj působí zátěžný moment nebo při chodu naprázdno působí na stroj mechanické ztráty. Rozdíl skutečné rychlosti smyčky (rotoru) a synchronní rychlosti pole (statoru) se označuje jako skluz, který se udává častěji v procentech a bývá od 1 – 10%, podle velikosti odporu rotoru. [2]

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 \quad (1.2)$$

Rychlost otáčení pole je závislá na frekvenci a počtu pólů statoru.

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (1.3)$$



Obr. 1.6 Princip působení pole na smyčku [2]

Indukované napětí v rotoru je dáno vztahem

$$U_2 = 4,44 \cdot f_2 \cdot N_2 \cdot k_{v2} \cdot \phi \quad , \quad (1.4)$$

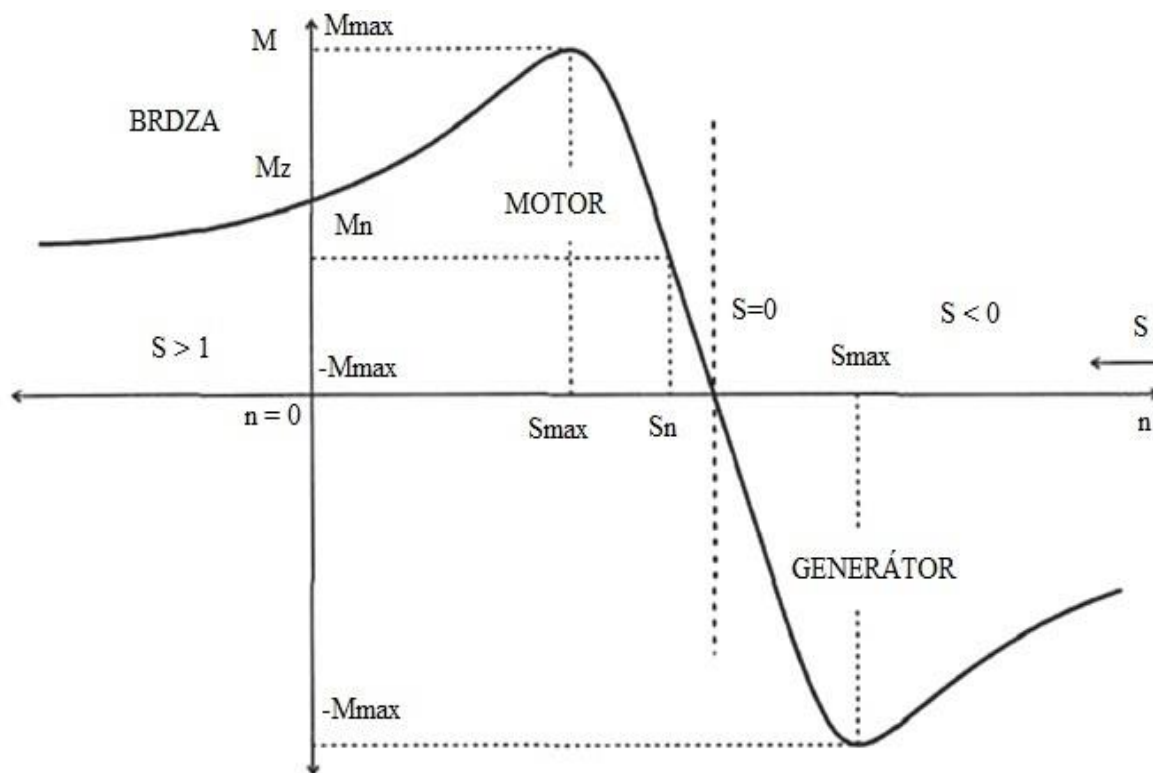
kde pro frekvenci indukovaného napětí platí

$$f_2 = s \cdot f_1 \quad . \quad (1.5)$$

1.3 Momentová charakteristika

Momentová charakteristika (Obr. 1.7) patří mezi nejdůležitější charakteristiky motoru. Vyjadřuje závislost momentu na otáčkách stroje. Na momentu je také přímo závislý výkon stroje. [3]

$$P = M \cdot \omega \quad (1.6)$$



Obr. 1.7 Momentová charakteristika stroje [4]

Je rozdělena do třech pracovních režimů – brzda, motor a generátor. V režimu brzda je skluz větší než jedna a otáčky rotoru jsou opačného směru, než je směr otáčení magnetického pole statoru. V režimu motor nabývá skluz hodnot od 1 do 0. Motor se začíná rozbíhat, když je skluz roven jedné. Skluzu roven nule motor nikdy nedosáhne, neboť by to znamenalo, že nepohání žádnou zátěž a nemá žádné mechanické ztráty, jedná se o teoretickou hodnotu. V režimu generátor skluz dosahuje záporných hodnot. Stroj v této oblasti dosahuje nadsynchronních otáček (nadsynchronní brzda).

Oblast mezi M_z a M_{max} je tzv. nestabilní oblast. V této oblasti se motor pohybuje pouze při rozběhu a to za podmínky, že zátěžný moment musí být menší než moment stroje, jinak by se motor nerozbehl. Lineární část mezi maximálními momenty v režimu motor a generátor je tzv. stabilní část. V této části dochází při zvýšení zátěže a tím i skluzu ke snížení otáček a zvýšení momentu a proudu motoru.

Momentovou charakteristiku lze získat ze zjednodušeného Klosova vztahu

$$\frac{M}{M_{max}} = \frac{2}{\frac{s}{s_{max}} + \frac{s_{max}}{s}} \quad , \quad (1.7)$$

kde moment zvratu a skluz zvratu se mohou dopočítat ze štítkových hodnot stroje.

2. Momenty v asynchronním stroji

Během 19. století, kdy se začaly asynchronní motory používat v průmyslu, se objevily problémy spojené s vlastnostmi stroje, které byly nejvíce ovlivňovány počtem drážek ve statoru a rotoru. To například omezovalo motor tím, že nemohl dosáhnout jeho jmenovitých otáček a byl více hlučný, čímž se stal pro provoz nepoužitelným. [5]

2.1 Odvození momentu

Magnetické pole vznikající mezi státorem a rotorem ve vzduchové mezeře se může rozložit na řadu harmonických, které jsou způsobeny např. drážkováním a tím nerovnoměrným rozložením vzduchové mezery. Pole, která jsou vyvolána jednotlivými harmonickými, ovlivňují rotor stroje a tím vytvářejí přídavné momenty nejvíce se projevující při proměnlivé rychlosti rotoru (rozběh). Výsledný moment je poté dán součtem momentů od jednotlivých harmonických. Následující rovnice jsou přebrány z literatury [5,6]. Obecnou rovnicí pro moment mezi státorem a rotorem lze psát ve tvaru

$$M = -\frac{\partial W}{\partial \theta_m} . \quad (2.1)$$

Pro pochopení vzniku jednotlivých momentů bude dále předpokládáno, že stroj je nedrážkovaný, má rovnoměrnou vzduchovou mezeru s $\mu = 1$ a zároveň magnetický obvod stroje má vysokou permeabilitu $\mu_r \gg 1$ (železo). Pokud se intenzita magnetického pole a magnetická indukce mění pouze ve směru vnějšího obvodu rotoru, platí pro energii magnetického pole následující vztah

$$W = \frac{V}{2\pi} \int_0^{2\pi} H(\alpha, t) \cdot B(\alpha, t) d\alpha . \quad (2.2)$$

Dosazením do rovnice (2.1) dostaneme pro moment

$$M = -\frac{1}{2 \cdot \mu_0} \cdot V \cdot \frac{\partial}{\partial \theta_m} \cdot \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [B(\alpha, t)]^2 d\alpha . \quad (2.3)$$

Magnetickou indukci můžeme nahradit, za již zmíněného předpokladu vysoké permeability železa, pomocí rovnice

$$B = \mu \cdot H \quad . \quad (2.4)$$

Pro moment poté platí

$$M = -\frac{1}{2} \cdot \mu_0 \cdot V \cdot \frac{\partial}{\partial \theta_m} \cdot \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [H(\alpha, t)]^2 d\alpha \quad . \quad (2.5)$$

Jestliže je intenzita podél vzduchové mezery rozložena sinusově, pak platí pro okamžik t

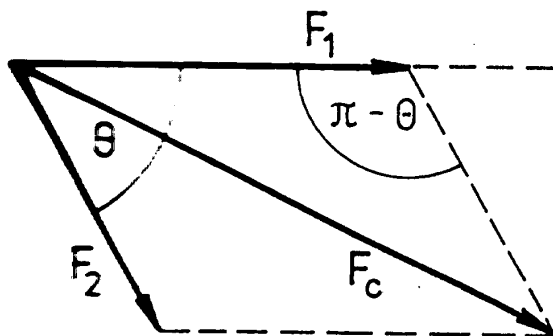
$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [H(\alpha, t)]^2 d\alpha = H_{str}^2 = \frac{1}{2} \cdot H_{max}^2 \quad , \quad (2.6)$$

kde maximální intenzita magnetického pole je vytvořena celkovým magnetomotorickým napětím a je dána vztahem

$$F_c = H_{max} \cdot \delta \quad . \quad (2.7)$$

Celkové magnetomotorické napětí lze odvodit z jednotlivých magnetomotorických napětí (Obr. 2.1), aplikací kosinové věty

$$F_c^2 = F_1^2 + F_2^2 + 2 \cdot F_1 \cdot F_2 \cdot \cos \theta \quad . \quad (2.8)$$



Obr. 2.1 Odvození celkového magnetomotorického napětí [6]

Pro převod mezi elektrickými úhly θ a mechanickými úhly θ_m platí následující vztah

$$\theta_m = p \cdot \theta . \quad (2.9)$$

Dosazením rovnice (2.6) a (2.8) do rovnice (2.5) dostaneme pro moment

$$M = -\frac{p}{2} \cdot \frac{\mu_0 \cdot V}{\delta^2} \cdot F_1 \cdot F_2 \cdot \sin \theta . \quad (2.10)$$

Dosadíme-li za objem vzduchové mezery

$$V = \pi \cdot D \cdot l \cdot \delta , \quad (2.11)$$

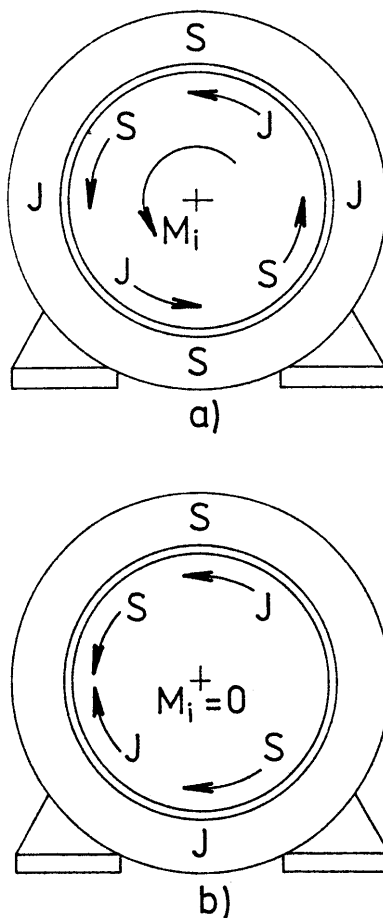
dostaneme pro výsledný moment vztah ve tvaru

$$M = -p \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\mu_0 \cdot D \cdot l}{\delta} \cdot F_1 \cdot F_2 \cdot \sin \theta . \quad (2.12)$$

Záporné znaménko momentu stanovuje, že moment způsobuje zmenšování úhlu θ mezi magnetomotorickými napětími F_1 a F_2 . [6]

Jak je vidět z rovnice (2.12) moment bude maximální při natočení magnetomotorických napětí F_1 a F_2 o úhel $\theta = 90^\circ$. [6]

Na Obr. 2.2 a) je příklad pro situaci, kdy je počet pólů statoru a rotoru stejný (čtyři póly). Vlivem přitažlivosti pólů, které mají odlišnou polaritu, se vytvoří moment naznačený ve směru šipky. Je-li na statoru a rotoru odlišný počet pólů Obr. 2.2 b), pak jednotlivé síly pólů (přitažlivé, odpudivé) působí proti sobě a tím nevzniká žádný moment. [6]



Obr. 2.2 Moment elektrického stroje a) se stejným počtem pólů b) s různým počtem pólů [6]

Z tohoto příkladu je možné usoudit, že pro vytvoření točivého momentu musí mít elektrické stroje stejný počet pólů na statoru a rotoru. [6]

2.2 Vliv vyšších harmonických na práci asynchronního stroje

Vyšší harmonické ve stroji vznikají tím, že ve skutečnosti napětí na svorkách zdroje a proudy ve vinutí nemají přesný tvar sinusovky. To způsobuje, že magnetická indukce ve vzduchové mezeře se nemění sinusově, ale obsahuje řadu vyšších harmonických. [7]

Příčinou vzniku těchto harmonických bývá nejčastěji:

- 1) Drážkování statoru a rotoru.
- 2) Nesinusové prostorové rozložení magnetomotorického napětí.

3) Nerovnoměrné nasycení zubů rotoru a statoru.

První dvě příčiny jsou pro správný chod stroje významnější, poslední nemá takový vliv.[7]

2.2.1 Vliv drážkování statoru a rotoru

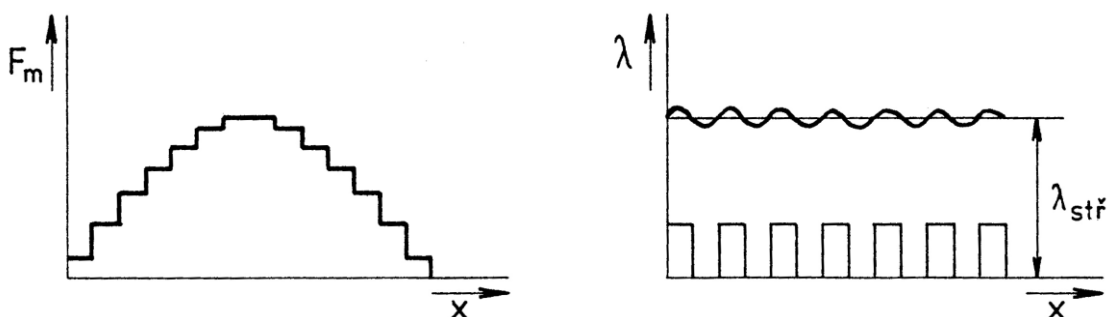
Vlivem prostorového rozložení vinutí a ukládáním ho ve formě cívek do drážek, vznikají vyšší harmonické prostorové. Tyto harmonické vytvářejí stupňovitý průběh magnetomotorického napětí v důsledku rozložení vinutí do drážek a také změnu vodivosti drážek podél obvodu v důsledku drážkování statoru a rotoru (Obr. 2.3). Pro trojfázové vinutí způsobí tento stupňovitý prostorový průběh vznik lichých harmonických. Na vzniku točivého pole se podílí pouze harmonické řádu

$$v = 6c \pm 1 . \quad (2.13)$$

Synchronní otáčky od jednotlivých harmonických jsou dány

$$n_{1v} = \frac{n_1}{v} . \quad (2.14)$$

Vlivem těchto harmonických vznikají celá spektra harmonických magnetických polí, kde jejich synchronní rychlost je v -krát menší než má pracovní harmonická a jejich amplitudy se zmenšují v souvislosti se zvětšujícím řádem harmonické. [6]



Obr. 2.3 Stupňovitý průběh magnetomotorického napětí (vlevo), vodivost podél drážek (vpravo) [6]

Účinky vyšších harmonických se přičítají k pracovní (základní) harmonické a tím mohou výrazně deformovat momentovou charakteristiku a tak ovlivnit celkové chování stroje.

Momenty, které vznikají vlivem vyšších prostorových harmonických, se dělí na asynchronní, synchronní a vibrační momenty. [7]

2.2.1.1 Asynchronní momenty

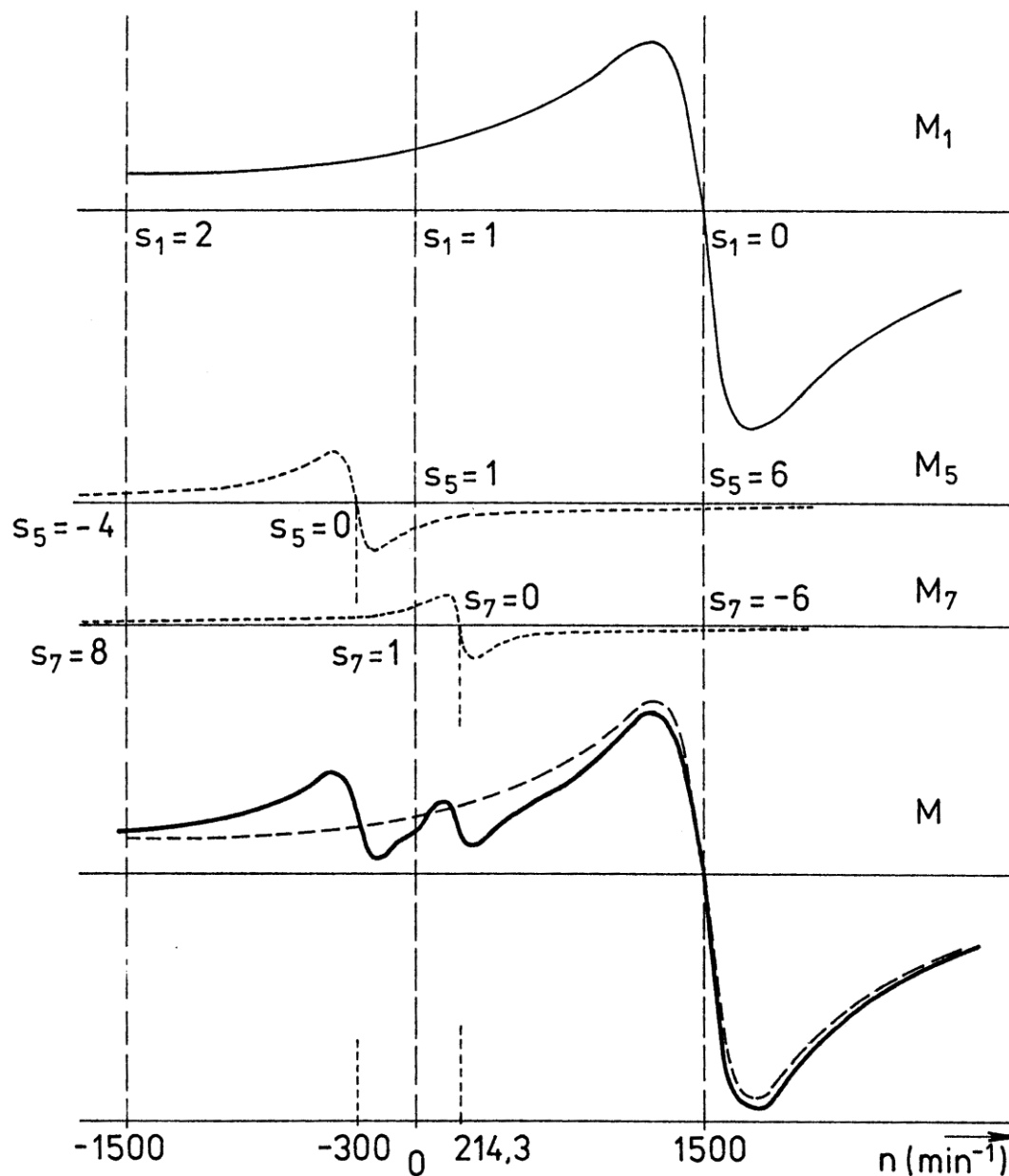
Asynchronní momenty vznikají, jestliže určitá statorová harmonická vybudí takové vyšší harmonické pole, které vytvoří proud v rotoru, který vyvolá harmonické pole stejného řádu. Tyto harmonické vytvářejí spolu výsledné točivé pole (pole vyšší harmonické), které vytvoří spolu s proudy v rotoru točivý moment (asynchronní). [7]

Točivý moment může působit ve směru točení rotoru (motor) v případě, že rychlost rotoru je menší než rychlost pole vyšších harmonických. Nebo naopak může působit proti točení rotoru (generátor) za podmínky, že je rychlost rotoru větší, než je pole vyšších harmonických. Rotor se také může otáčet opačným směrem, než má harmonické pole (brzda). [7]

Výsledný moment je dán součtem momentu první harmonické a momentů vytvořených od vyšších harmonických. Na provoz stroje mají ovšem vliv pouze ty momenty od vyšších harmonických, které jsou nejvíce vyjádřeny. [7]

Na Obr. 2.4 je příklad, jaký vliv mají asynchronní momenty (5. a 7. harmonické) na výslednou momentovou charakteristiku. Jak je vidět ve výsledném momentu vznikají sedla, která způsobují to, že motor nedosáhne svých jmenovitých parametrů. Také dochází k poklesu momentu při rozběhu i v brzdě oblasti motoru. [6,7]

Asynchronní momenty mohou být potlačeny tím, že se potlačí vyšší harmonické pole. [7]



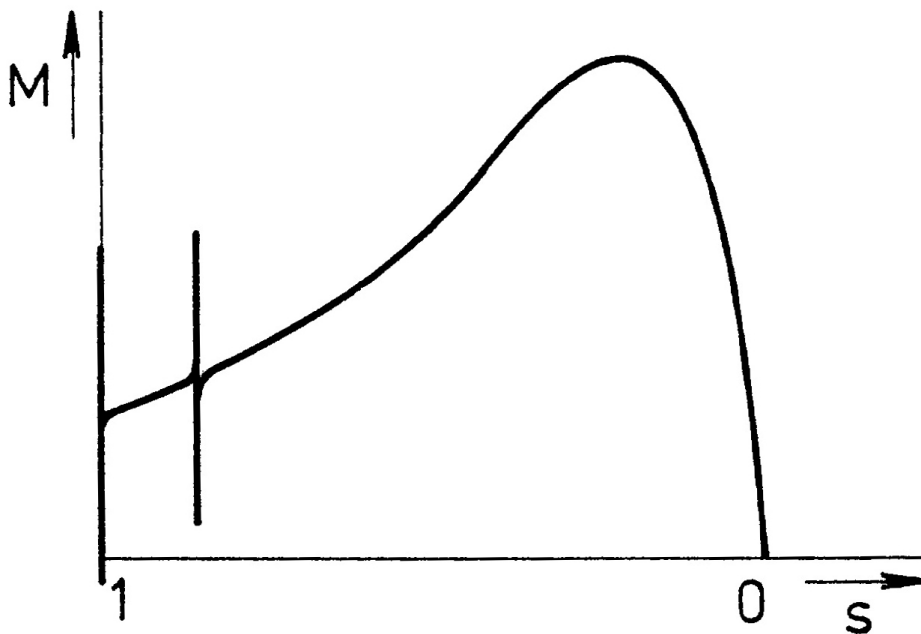
Obr. 2.4 Asynchronní momenty a jejich vliv na momentovou charakteristiku stroje [6]

2.2.1.2 Synchronní momenty

Je-li ve spektru statorových a rotorových stejný řád vyšších harmonických, které na sobě nejsou závislé a otáčeli se tyto harmonické stejnou rychlostí (synchronní), pak jejich vzájemným působením vzniká synchronní moment. [7]

Synchronní moment se projeví v momentové charakteristice jako svislá čára (Obr. 2.5). Rotor poté může dosáhnout jmenovitých otáček pouze, pokud má dostatečnou pohybovou energii na překonání brzdného působení od synchronního momentu. [7]

Nejvíce se synchronní momenty projeví při stejném počtu drážek statoru a rotoru, kde při stojícím rotoru se rychlost točivého pole statorových a rotorových harmonických rovnají a tím brání rotoru se roztočit (lepení rotoru). [6]



Obr. 2.5 Synchronní moment [6]

Synchronní momenty se vhodnou volbou drážek statoru a rotoru, popřípadě natočením drážek, mohou téměř úplně potlačit. [6]

2.2.1.3 Vibrační moment

Vyšší harmonické pole, kromě vytváření parazitních momentů (asynchronní, synchronní), vyvolává momenty, které se mění periodicky, a mění směr každou půlperiodu. Tyto momenty způsobují chvění rotoru a ostatních částí stroje. Nejvíce se projevují při mechanické rezonanci s vlastními kmitočty mechanických částí. Dále mohou při nevhodném zvolení počtu drážek statoru a rotoru způsobit vedle vzniku tangenciálních sil, také vznik sil radiálních, které působí mezi státorem a rotorem a jsou časově proměnlivé. Tyto síly způsobují další vibrace stroje. [6,7]

2.2.2 Vliv nesinusového rozložení magnetomotorického napětí

V důsledku uložení vinutí do drážek, které je napájeno sinusovým proudem, vznikají kromě první harmonické, také vyšší harmonická pole. [7]

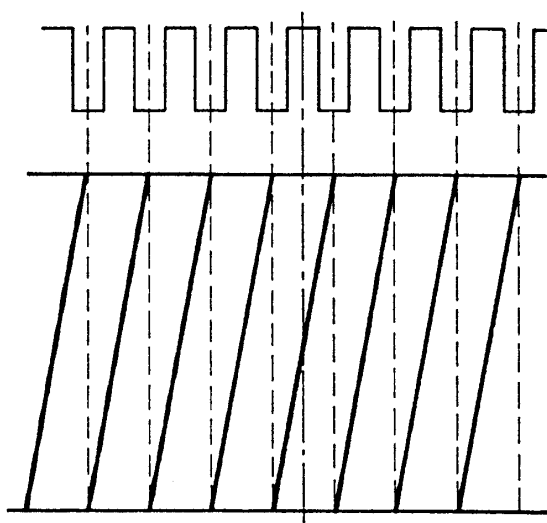
Nesinusové rozložení magnetomotorického napětí vznikne, je-li vinutí napájeno proudem, který se nemění s časem sinusově. Proud lze poté rozložit na první harmonickou a vyšší harmonické. Vinutí je poté jakoby napájeno sinusovým proudem první harmonické a sinusovým proudem vyšších harmonických. Vznikají tedy kromě vyšších harmonických polí, když je vinutí napájeno sinusovým proudem, také další vyšší harmonická pole, která mají stejnou periodu, ovšem pohybují se jinou rychlostí. [7]

2.3 Potlačení vyšších harmonických

Parazitní momenty, které mají na stroj nepříznivý vliv, je nutné z hlediska funkce stroje potlačit co nejvíce. Toho se nejlépe může dosáhnout zkrácením kroku vinutí a počet drážek na pól a fázi nesmí být zlomek, ale musí to být celé číslo. Tím se zajistí, aby křivka magnetomotorického napětí měla tvar sinusoidy. Dalším možným způsobem je zvolit vhodnou volbu počtu drážek statoru, rotoru a pólů, tím se výrazně potlačí asynchronní momenty. Pro zvolení počtu drážek a počtu pólů se doporučuje, aby platilo

$$Q_2 = 1,25 \cdot (Q_1 \pm p). \quad (2.15)$$

Jako velmi účinný způsob k potlačení parazitních momentů se používá zešikmení drážek statoru nebo rotoru a to nejčastěji o jednu drážkovou rozteč statoru či rotoru Obr. 2.6. Tím dojde k potlačení vzniku drážkových harmonických, které způsobují změnu vodivosti podél drážek. [6]



Obr. 2.6 Natočení drážek [6]

Jestliže drážky nejsou natočeny, musí se dodržovat následující vztahy

$$k_1 Q_1 \neq k_2 Q_2 \quad (2.16)$$

$$Q_2 \neq 6pk ,$$

tím dojde k potlačení vzniku synchronních momentů při stojícím rotoru (zabraňuje tzv. lepení rotoru). [7]

Pro další možné potlačení synchronních momentů, tentokrát při otáčejícím se rotoru bychom měli dodržet následující vztah

$$k_2 Q_2 \neq k_1 Q_1 \pm 2p \quad (2.17)$$

$$Q_2 \neq 6pk \pm 2p.$$

Pro potlačení radiálních sil se doporučuje

$$Q_2 \neq 6pk + 1 \quad (2.18)$$

$$Q_2 \neq 6pk \pm 2p \pm 1.$$

Při návrhu asynchronních strojů se používají tabulky, kde jsou doporučené počty drážek statoru a rotoru a to jak při natočených, tak nenatočených drážkách. K tomu jsou použity jak vzorce uvedené výše, tak i další doplňující vzorce. [7]

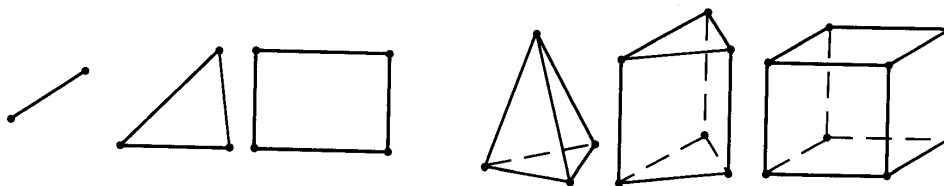
3. Metody používané k výpočtu momentu

3.1 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků je numerická metoda založená na principu diskretizace spojitého kontinua na konečný počet prvků. Zjišťované hodnoty jsou poté získávány z bodů (uzlových), které jsou umístěny ve vzniklé mřížce. Přestože se tato metoda začala vyvíjet od druhé poloviny 20. století, k jejímu využití došlo až s vývojem počítačové techniky. Doba výpočtu určitého objektu závisí na hustotě rozložení vzniklé sítě, čímž se i přímo ovlivňuje množství uzlových bodů. Programy, které používají metodu konečných prvků, jsou např. FEMM (použit v této práci pro výpočet) a Agros2D, vytvořený Západočeskou univerzitou v Plzni. [8]

Postup, podle kterého se metoda řídí je následující:

- 1) Diskretizace spojitého kontinua na konečný počet uzlových bodů. V případě jednorozměrného problému je zkoumaná část ve tvaru křivky a síť je tvořena úseky ležícími na této křivce. Řeší-li se dvourozměrný problém, je řešenou oblastí plocha a síť je vytvořena libovolným mnohoúhelníkem, nejčastěji ve tvaru trojúhelníku nebo obdélníku. U trojrozměrných objektů se síť vytvoří v prostoru a je tvořena libovolným čtyřstěnem (Obr. 3.1). [8,9]
- 2) Každý uzlový bod je charakterizován rovnicemi. [8]
- 3) Výběr interpolační funkce pro aproximaci neznámé funkce v každém uzlovém bodě. Nejčastěji se používá lineární interpolace či kvadratická interpolace. Jestliže se zvolí polynom většího řádu, dochází sice k větší přesnosti, ale za cenu složitější interpolační funkce. [9]
- 4) Zavedení okrajových podmínek. [8]
- 5) Výpočet soustavy lineárních rovnic, který může být vypočten přes numerický algoritmus. [8,9]
- 6) Zobrazení výsledku v podobě grafické či s vypsáním hodnot. [8]



Obr. 3.1 Základní elementy tvořící síť [9]

3.2 Maxwellův tenzor

Maxwellův tenzor umožňuje rychlý výpočet elektromagnetické síly působící na určitý objekt umístěný v elektromagnetickém poli. Síla se počítá tak, že se nejprve vybere plocha, která obklopuje objekt, u kterého chceme počítat sílu. Poté se síla získá jako integrál přes tuto velikost plochy, určeného z potenciálu, který popisuje dané pole, ve kterém je objekt umístěn. [9]

Za předpokladu, že známe vektorové pole \mathbf{H} přes plochu S zahrnující objem V , kterým je obklopeno těleso a umístěno v prostředí s permeabilitou μ_0 , tak potom je Maxwellův tenzor, v každé nekonečně malé části plochy dS , dán jako

$$d\mathbf{F} = -\frac{\mu_0}{2}H^2\mathbf{n}dS + \mu_0(\mathbf{H} \cdot \mathbf{n}dS)\mathbf{H} \quad .[9] \quad (3.1)$$

4. Výpočet momentů

Pro výpočet momentů jsem použil program FEMM v4.2 (Finite Element Method Magnetics), který využívá metody konečných prvků. Tento program umožňuje vypočítat energii uloženou ve vzduchové mezeře a zároveň umí vypočítat moment pomocí Maxwellova tenzoru.

Výpočet jsem prováděl pro dvě různá uspořádání magnetického obvodu. Tyto dvě uspořádání se liší počtem drážek, jejich provedením, rozměry a výkonem. U prvního uspořádání, dále označeno jako **motor 1**, jsou drážky polouzavřené a vinutí je jednovrstvé. U druhého uspořádání, dále jako **motor 2**, jsou drážky otevřené a vinutí je zde dvouvrstvé.

Simulace pro oba motory se provádí následujícím způsobem: Importujeme 2D model ve formátu DXF (AutoCAD) do programu FEMM. Definujeme problém v programu. Rotor postupně natáčíme a pro každý nový úhel natočení spustíme výpočet a následně vypočtené hodnoty zapisujeme do tabulky. Po skončení dopočítáme z energie moment pro každé pootočení.

4.1 Simulace motoru 1

Zadané parametry motoru jsou uvedeny v následující tabulce. B-H charakteristika magnetického obvodu pro motor je uvedena v příloze 1.

Tabulka 4.1 Parametry motoru 1

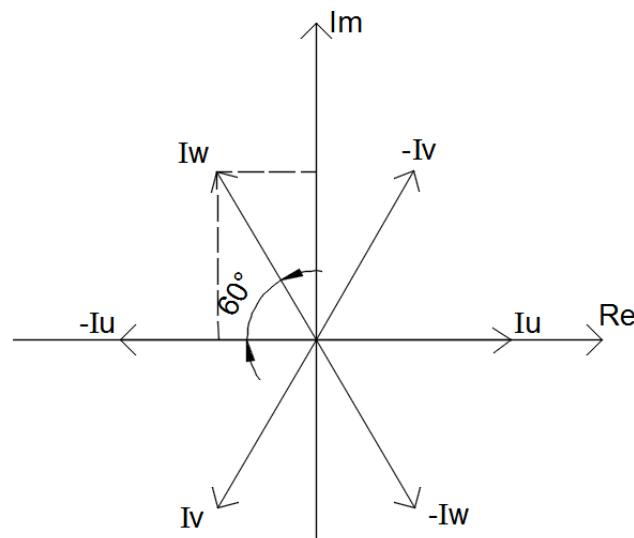
<i>Délka stroje</i>	<i>156 mm</i>
<i>Výkon stroje</i>	<i>3 kW</i>
<i>Napájecí frekvence</i>	<i>50 Hz</i>
<i>Počet fází</i>	<i>3</i>
<i>Počet pólpárů</i>	<i>3</i>
<i>Činitel plnění plechů</i>	<i>0,95</i>
<i>Počet drážek na fázi</i>	<i>2</i>
<i>Klec rotoru</i>	<i>Hliník</i>
<i>Vinutí statoru</i>	<i>Měď</i>
	<i>Jednovrstvé, smyčkové</i>
<i>Počet matematických fází</i>	<i>6</i>
<i>Krok vinutí</i>	<i>6</i>
<i>Počet paralelních větví</i>	<i>1</i>
<i>Počet závitů jedné cívky</i>	<i>34</i>
<i>Proud naprázdno</i>	<i>2,94 A</i>
<i>Jmenovitý proud</i>	<i>6,54 A</i>
<i>Jmenovitý skluz</i>	<i>0,03764</i>

Pro definování problému musíme dopočítat některé hodnoty ze zadaných parametrů. Nejdříve potřebujeme dopočítat rotorovou frekvenci, kterou získáme ze zadaného jmenovitého skluzu jako:

$$f_2 = f_1 \cdot s_n = 50 \cdot 0,0376 = 1,88 \text{ Hz} . \quad (4.1)$$

Proudy v jednotlivých fázích, které prochází vinutím, dopočítáme tak, že proud ve fázi U položíme do reálné osy. Velikost ostatních proudů s fázovým posunem dopočteme z fázorového diagramu (Obr. 4.1) a vyjádříme je v komplexním složkovém tvaru. Soustava je třífázová a jednotlivé proudy jsou vzájemně fázově posunuty o 120° . Velikost fázoru (maximální hodnotu) ze zadané efektivní hodnoty proudu dopočteme jako:

$$I_m = \sqrt{2} \cdot I_n = \sqrt{2} \cdot 6,54 = 9,249 \text{ A} . \quad (4.2)$$



Obr. 4.1 Fázorový diagram proudů

Reálné a imaginární složky proudů v ostatních fázích můžeme dopočítat z trojúhelníku (na Obr. 4.1 znázorněn pro proud I_w).

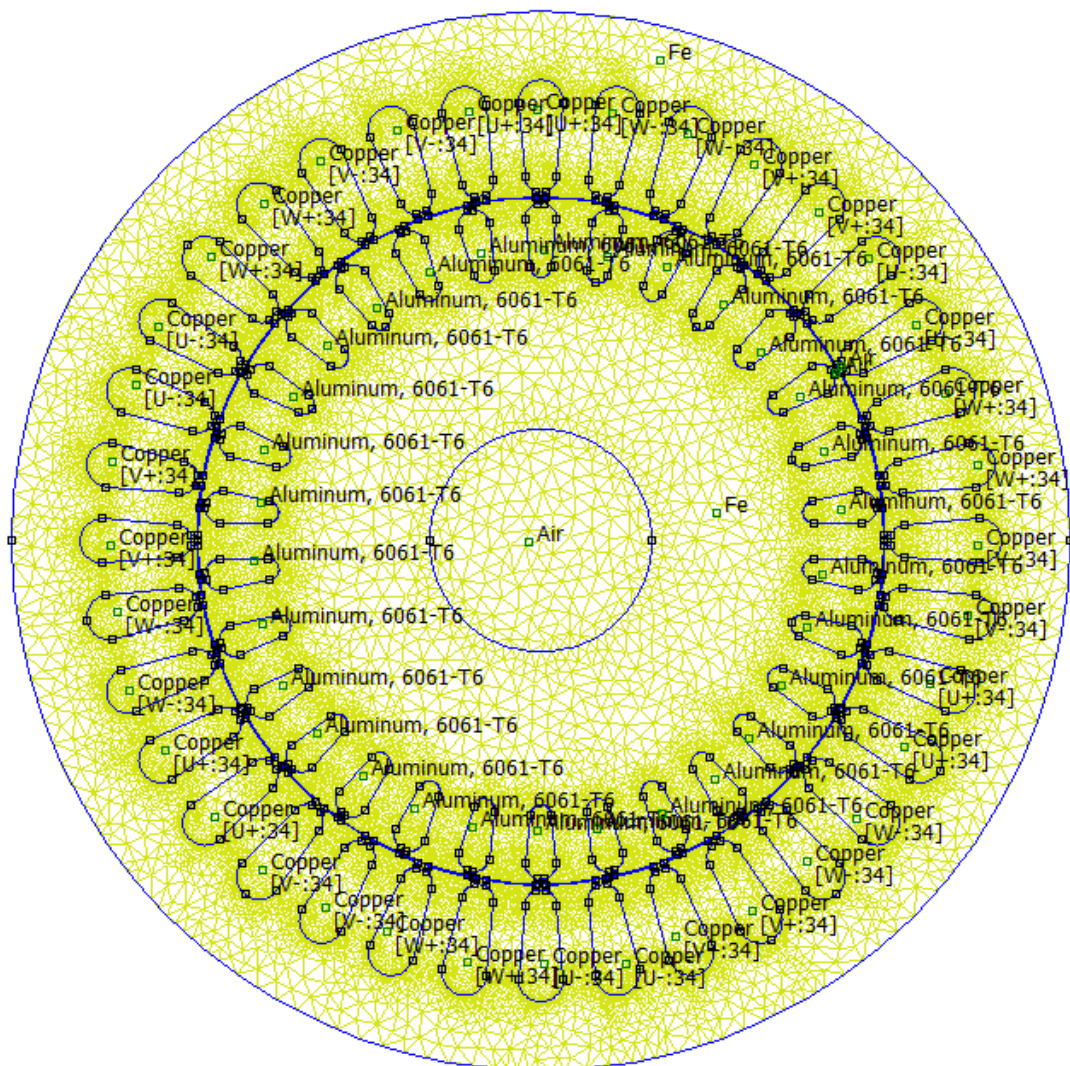
$$I_{Re} = \cos 60^\circ \cdot I_m = \frac{1}{2} \cdot 9,249 = 4,6245 \text{ A} \quad (4.3)$$

$$I_{Im} = \sin 60^\circ \cdot I_m = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 9,249 = 8,009869 \text{ A} \quad (4.4)$$

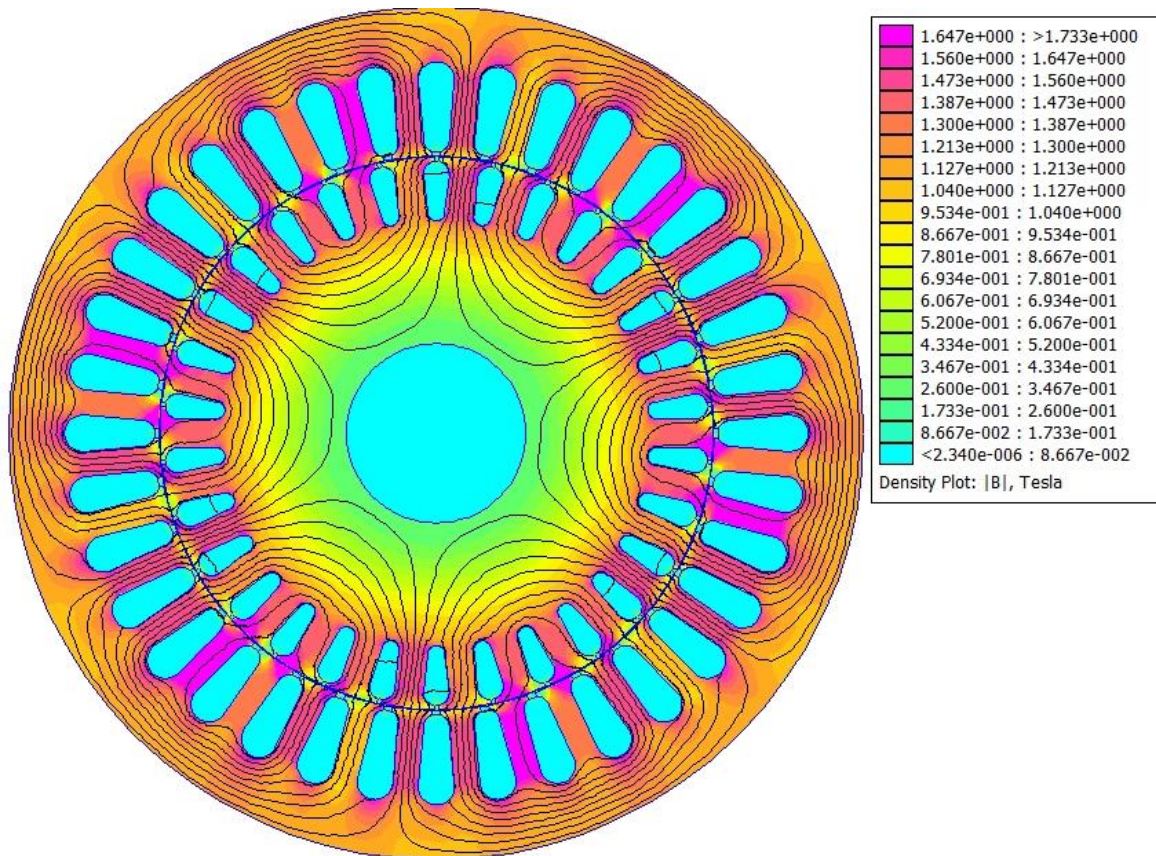
Velikosti proudů v jednotlivých fázích jsou poté zadávány ve tvaru:

$$\begin{aligned} I_u &= 9,249 \text{ A} \\ -I_u &= -9,249 \text{ A} \\ I_v &= -4.6245 - i 8.009869 \text{ A} \\ -I_v &= 4.6245 + i 8.009869 \text{ A} \\ I_w &= -4.6245 + i 8.009869 \text{ A} \\ -I_w &= +4.6245 - i 8.009869 \text{ A.} \end{aligned}$$

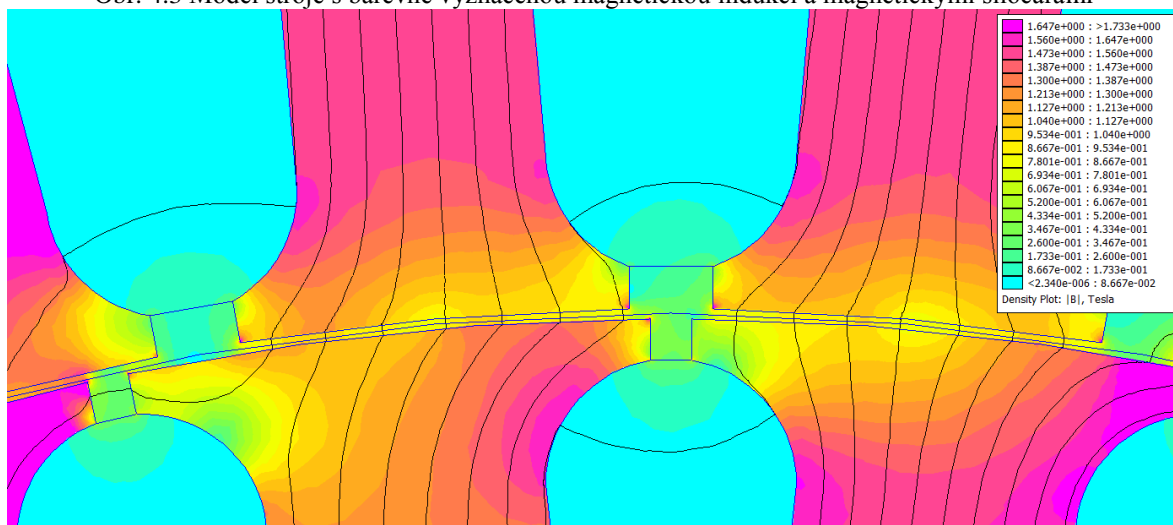
Pro spuštění výpočtu máme nyní všechny potřebné hodnoty. Zapojení jednotlivých vinutí je uvedeno v příloze 3, kde jsou barevně rozlišeny fáze.



Obr. 4.2 Vytvořená síť v programu FEMM pro model motoru 1



Obr. 4.3 Model stroje s barevně vyznačenou magnetickou indukcí a magnetickými siločárami



Obr. 4.4 Detail - rozložení magnetické indukce ve vzduchové mezeře

Výstup z programu a dopočítané hodnoty jsou uvedeny v příloze 5. Moment získaný přes energii dopočítáme z rovnice (2.1) uvedený v kapitole 2. Dále uvedený příklad je pro pootočení rotoru z 0° na $0,25^\circ$ (změnu úhlu musíme přepočítat na radiány).

$$M = -\frac{\partial W}{\partial \theta_m} = -\frac{2,71163 - 2,71459}{(0,25^\circ - 0^\circ) \cdot \frac{\pi}{180}} = -0,678382 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (4.5)$$

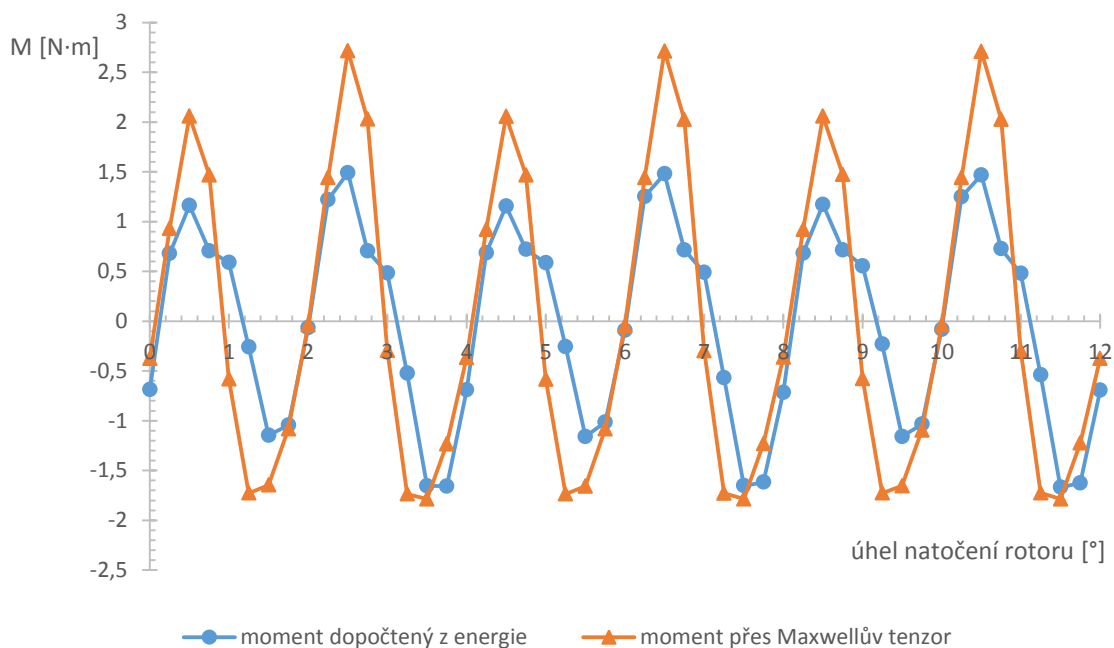
Moment z Maxwellova tenzoru počítáme na pomocné kružnici umístěné uprostřed vzduchové mezery mezi statorem a rotorem. Pro následné porovnání obou metod musíme od získaného průběhu momentu přes tenzor odečíst jeho střední hodnotu. Momenty dopočtené z obou metod jsou zobrazeny v grafu na Obr. 4.5.

Jmenovitý moment motoru se získá jako:

$$n_s = 60 \cdot \frac{f}{p} = 60 \cdot \frac{50}{3} = 1000 \text{ ot/min} \quad (4.6)$$

$$n = (1 - s) \cdot n_s = (1 - 0,0376) \cdot 1000 = 962,4 \text{ ot/min} \quad (4.7)$$

$$M_n = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{\frac{2\pi \cdot n}{60}} = \frac{3 \cdot 10^3}{\frac{2\pi \cdot 962,4}{60}} = 29,77 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (4.8)$$



Obr. 4.5 Graf dopočtených momentů pro motor 1

Jak je vidět z Obr. 4.5 průběh momentu je zvlněný. Obě použité metody se liší ve velikosti. Při dopočítání přes energii ve vzduchové mezeře je samotný výpočet složitější a tak se do výsledku může zanášet větší početní chyba, která se může projevit rozdílnou výchylkou. Jmenovitý výkon z dopočtených parametrů vyšel o něco málo menší s porovnáním hodnot Maxwellova tenzoru, kde se hodnoty pohybují okolo hodnoty

32,3 N·m. Tento rozdíl je způsoben konečným oteplením stroje, který má vliv na vodivost materiálu, hlavně materiálu drážek rotoru.

4.2 Simulace motoru 2

Tabulka 4.2 Parametry motoru 2

<i>Délka stroje</i>	440 mm
<i>Výkon stroje</i>	240 kW
<i>Napájecí frekvence</i>	50 Hz
<i>Počet fází</i>	3
<i>Počet pólpárů</i>	2
<i>Činitel plnění plechů</i>	0,97
<i>Počet drážek na fázi</i>	4
<i>Kleec rotoru</i>	Měď
<i>Vinutí statoru</i>	Měď
	Dvouvrstvé, smyčkové se zkráceným krokem
<i>Počet matematických fází</i>	6
<i>Krok vinutí</i>	10
<i>Počet paralelních větví</i>	2
<i>Počet závitů jedné cívky</i>	3
<i>Proud naprázdno</i>	120 A
<i>Jmenovitý proud</i>	401 A
<i>Jmenovitý skluz</i>	0,0158

V příloze 2 je uvedena B-H charakteristika magnetického obvodu.

Dopočet parametrů je stejný jako u motoru 1. Rotorovou frekvenci získáme jako:

$$f_2 = f_1 \cdot s_n = 50 \cdot 0,0158 = 0,79 \text{ Hz} . \quad (4.9)$$

Při zadávání proudů si musíme uvědomit, že nyní máme paralelní vinutí ($a = p$). Proto zadávaný proud do jedné cívky určíme tak, že maximální hodnotu proudu musíme ještě podělit dvěma (proud se dělí mezi dvě vinutí).

$$I_m = \frac{\sqrt{2} \cdot I_n}{2} = \frac{\sqrt{2} \cdot 401}{2} = 283,5498 \text{ A} . \quad (4.10)$$

V ostatních fázích mají proudy následující tvar:

$$\begin{aligned} I_u &= 283,5498 \text{ A} \\ -I_u &= -283,5498 \text{ A} \\ I_v &= -141,7749 - i 245,5612 \text{ A} \\ -I_v &= 141,7749 + i 245,5612 \text{ A} \\ I_w &= -141,7749 + i 245,5612 \text{ A} \\ -I_w &= +141,7749 - i 245,5612 \text{ A} \end{aligned}$$

Zapojení jednotlivých vinutí je uvedeno v příloze 4.

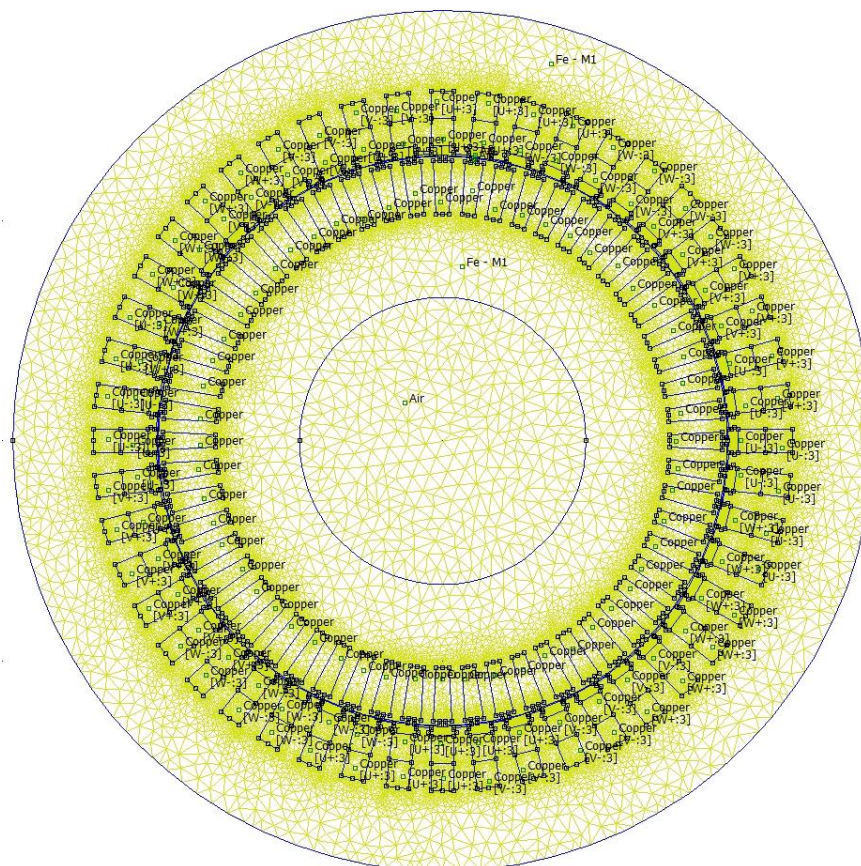
Jmenovitý moment získáme jako:

$$n_s = 60 \cdot \frac{f}{p} = 60 \cdot \frac{50}{2} = 1500 \text{ ot/min} \quad (4.11)$$

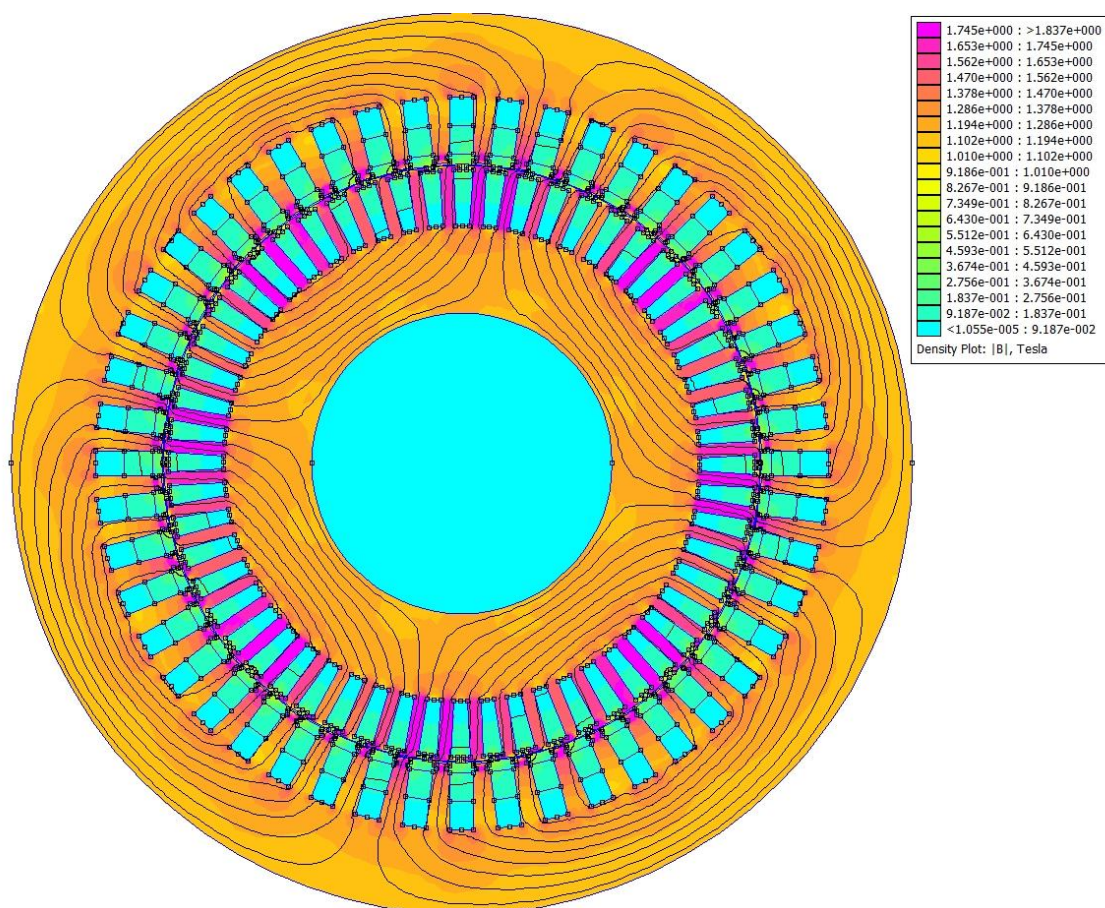
$$n = (1 - s) \cdot n_s = (1 - 0,0158) \cdot 1500 = 1476,3 \text{ ot/min} \quad (4.12)$$

$$M_n = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{\frac{2\pi \cdot n}{60}} = \frac{240 \cdot 10^3}{\frac{2\pi \cdot 1476,3}{60}} = 1552,42 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (4.13)$$

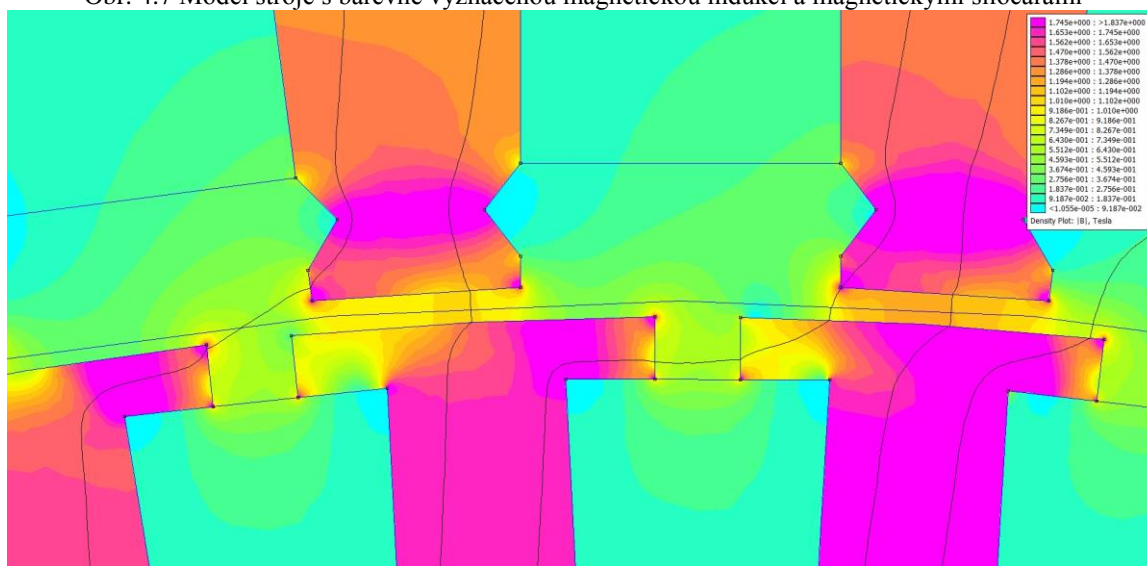
Výstup z programu a dopočtené hodnoty jsou uvedeny v příloze 6. Dopočtené momenty jsou uvedeny na Obr. 4.9.



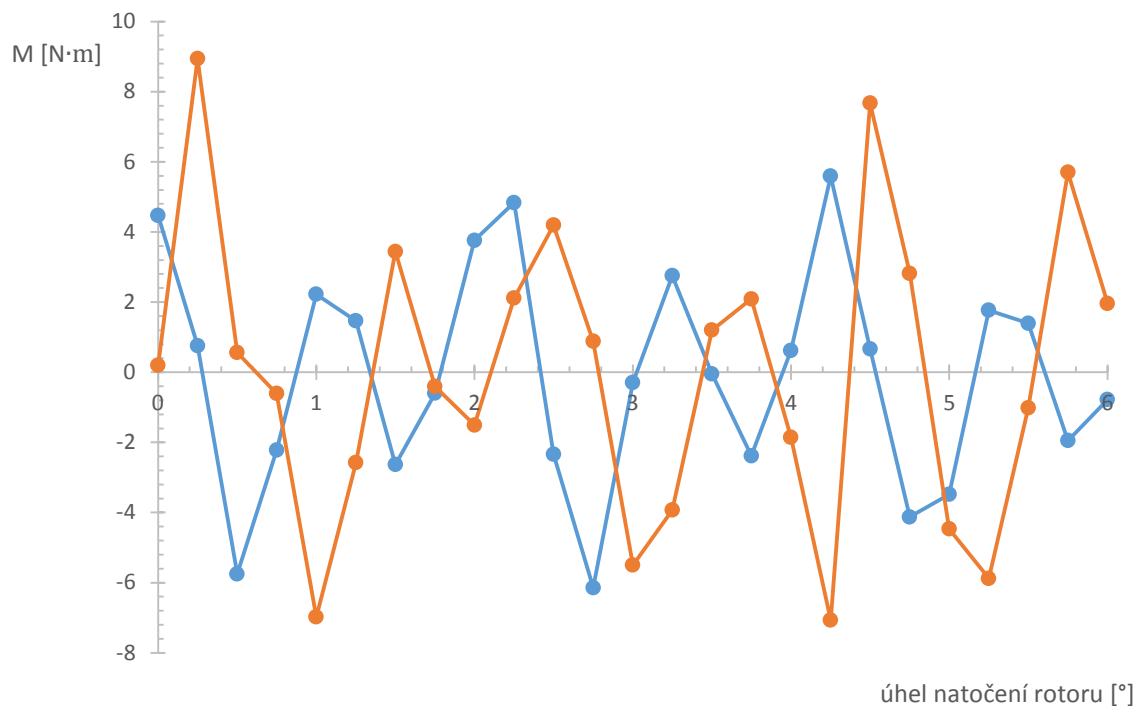
Obr. 4.6 Vytvořená síť v programu FEMM pro model motoru 2



Obr. 4.7 Model stroje s barevně vyznačenou magnetickou indukcí a magnetickými siločarami



Obr. 4.8 Detail - rozložení magnetické indukce ve vzduchové mezeře



Obr. 4.9 Graf dopočtených momentů pro motor 2

Moment je opět zvlněný a to v některých částech více. Rozdíl momentu dopočítaný přes tenzor, kde se moment pohybuje okolo hodnoty 1343,5 N·m, od jmenovitého momentu je opět dán konečným oteplením stroje a tím ovlivnění vodivosti materiálu.

4.3 Porovnání dopočtených hodnot s teoretickými údaji

U motoru 1 je počet drážek: $Q_1=36$, $Q_2=30$.

Úhel, který zabírá jedna drážka statoru a rotoru se určí jako:

$$\alpha_{st} = \frac{360^\circ}{Q_1} = \frac{360^\circ}{36} = 10^\circ \quad (4.14)$$

$$\alpha_{rot} = \frac{360^\circ}{Q_2} = \frac{360^\circ}{30} = 12^\circ$$

Z Obr. 4.5 je možné odečíst, že moment kmitá při každém otočení rotoru o 2° tzn., že po každém otočení rotoru o úhel 2° se drážky dostanou do nové polohy, která je stejná jako předešlá, což lze určit i z rozdílu dopočtených úhlů α_{st} a α_{rot} . Harmonická obsažená v momentu se určí jako (1. harmonická se otáčí s úhlem 360°):

$$v = \frac{360^\circ}{2^\circ} = 180. \text{harminocká} \quad (4.15)$$

U motoru 2 je počet drážek: $Q_1=48$, $Q_2=56$. Úhel, který zabírá jedna drážka statoru a rotoru se určí jako:

$$\alpha_{st} = \frac{360^\circ}{Q_1} = \frac{360^\circ}{48} = 7,5^\circ \quad (4.16)$$

$$\alpha_{rot} = \frac{360^\circ}{Q_2} = \frac{360^\circ}{56} = 6,43^\circ$$

Z Obr. 4.9 můžeme zjistit, že pulzace momentu se opakuje přibližně o každý úhel pootočení rotoru roven $1,1^\circ$. Rozdíl dopočtených úhlů je $1,07^\circ$. Harmonická obsažená v momentu se určí jako:

$$v = \frac{360^\circ}{1,07^\circ} = 336. \text{harminocká} \quad (4.17)$$

Závěr

V první části bakalářské práce jsem popsal konstrukci a princip činnosti asynchronních strojů. Je zde uvedena i momentová charakteristika stroje a její případné změny způsobené odlišným tvarem drážek rotoru.

V druhé části jsem se zabýval popsáním jednotlivých momentů, které mohou vzniknout. Tyto momenty mohou způsobovat různé deformace momentové charakteristiky stroje, jako například sedla a tím zabránit stroji dosáhnout jeho jmenovitých parametrů. V horším případě se stroj ani nedokáže rozběhnout tzv. lepení rotoru. K největšímu potlačení těchto parazitních momentů dochází při natočení drážek a vhodnou volbou počtu drážek statoru a rotoru. Při samotném návrhu stroje se používají pro volbu počtu drážek tabulky a to jak při natočených tak i nenatočených drážkách.

Ve třetí části popisují metody použité pro výpočet momentu. Je zde uvedena metoda konečných prvků, její využití a způsob jakým se výpočet provádí. Další metoda je přes Maxwellův tenzor, který slouží k výpočtu síly působící na určitý objekt umístěný v elektromagnetickém poli.

Čtvrtá část se zabývá výpočtem momentu pro dvě uspořádání v programu FEMM. Pomocí tohoto programu jsem mohl použít obě metody zmíněné v třetí části. U prvního uspořádání je motor menších rozměrů, drážky jsou polouzavřené a vinutí je jednovrstvé. Dopočtený moment, až na velikost, je u obou použitých metod stejný. Rozdíl ve velikosti je způsoben pravděpodobně větším počtem početních kroků při dopočítávání přes energii a tím zanesení chyby do výsledku. Druhé uspořádání má drážky otevřené a vinutí je dvouvrstvé. Zde je zvlnění podstatně vyšší. Obě použité metody se liší o určitý fázový posuv. U prvního uspořádání se drážky statoru a rotoru dostanou do polohy, která je při každém natočení o úhel 2° stejná. Tento úhel odpovídá i kmitání momentu z dopočtených hodnot momentu v programu FEMM. Pro druhé uspořádání je úhel, se kterým kmitá moment dopočtený v programu FEMM přibližně $1,1^\circ$. Tento úhel téměř odpovídá úhlu, který jsem dopočetl z úhlu počtu drážek statoru a rotoru. Rozdíl je dán kvůli většímu zvlnění a tím horší odečtením periody, se kterou moment kmitá.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ROUBÍČEK, Ota. *Elektrické motory a pohony: příručka techniky, volby a užití vybraných druhů*. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-092-X.
- [2] KUBIE, Ivan. *Elektrické motory (5. část)*. ČASOPIS ELEKTRO. 2013, 2013(05), s. 62.
- [3] ČERMÁK, Jiří. *Asynchronní stroje - konstrukce, princip, funkce a řízení* [online]. 2017 [cit. 2017-03-10]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/asynchronni-stroje-konstrukce-princip-funkce-a-rizeni/>
- [4] KUBIE, Ivan. *Elektrické motory (6. část)*. ČASOPIS ELEKTRO. 2013, 2013(06), s. 62.
- [5] HELLER, Bedřich. HAMATA, Václav, *Přídavná pole, síly a ztráty v asynchronním stroji*, Praha: ČSAV, 1961. 204 s. DT 62131333 – 5016.
- [6] MĚŘIČKA, Jiří. HAMATA, Václav. VOŽENÍLEK, Petr, *Elektrické stroje*. Praha: ČVUT, 2001. 311 s. ISBN 80-01-02109-2.
- [7] PETROV, G. N. *Elektrické stroje 2*, Praha: Academia Praha, 1982. 732 s.
- [8] Metoda konečných prvků [online], [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda_kone%C4%8Dn%C3%BDch_prvk%C5%AF
- [9] BIANCHI, Nicola. *Electrical machine analysis using finite elements*. Taylore & Francis group: 2005. ISBN 0-8493-3399-7.

Přílohy

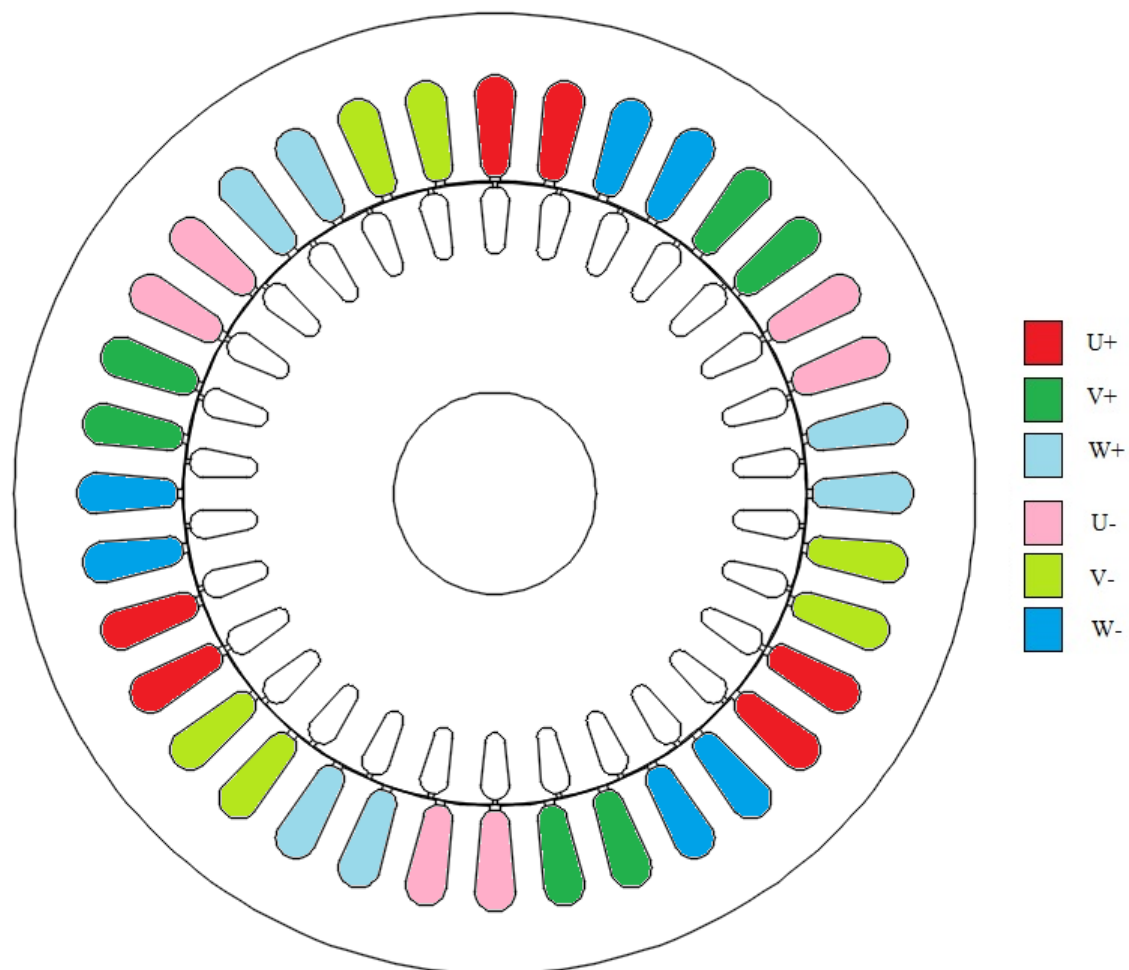
Příloha 1 B-H charakteristika magnetického obvodu motoru 1

B [T]	H [A/m]
0,2003	238,699
0,3204	318,3
0,40004499	358,1
0,50055	437,677
0,560599	477,5
0,790799	636,6
0,931	795,799
1,1010399	1114,099
1,2016	1273,2
1,302	1591,5
1,4028	2228,199
1,524	3183,099
1,62599	4774,6
1,698	6366,199
1,73	7957,699
1,87	15915,5
1,99	31831
2,04	47746,5
2,0699	63662
2,095	79577,5
2,2	159155
2,399	318310

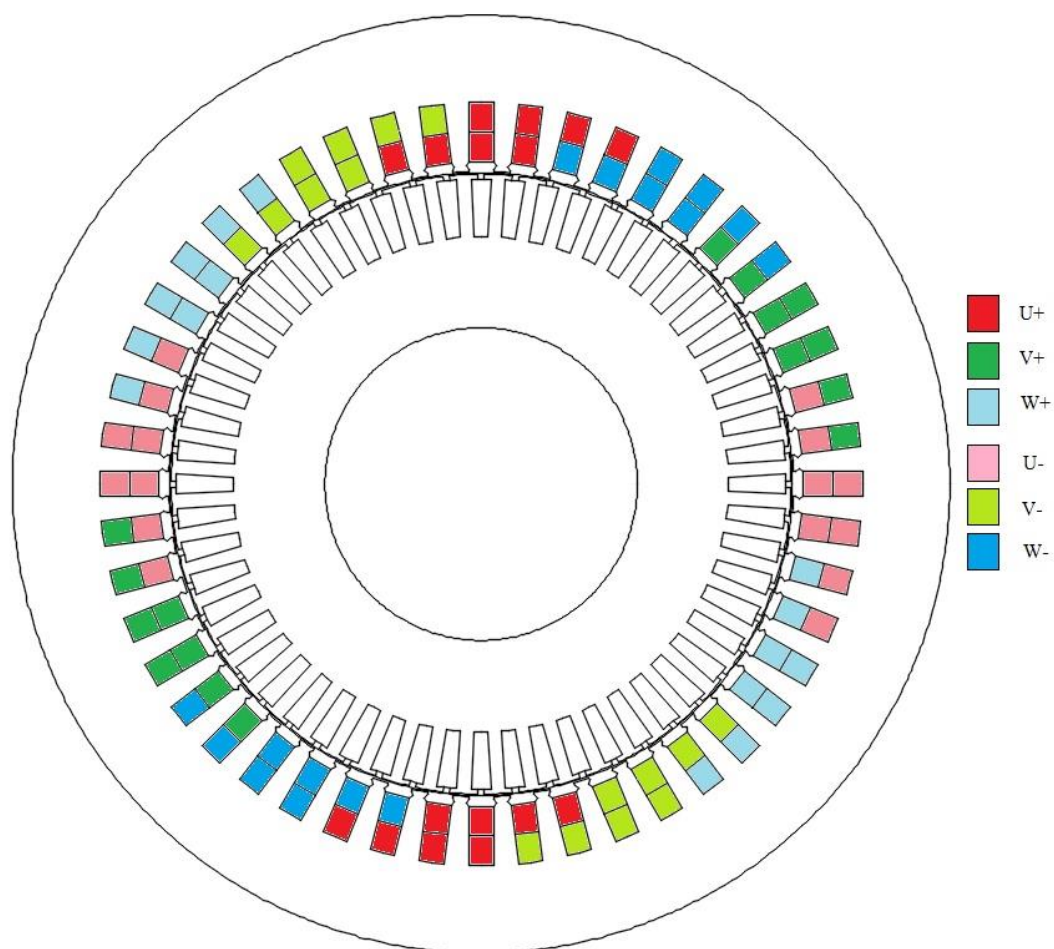
Příloha 2 B-H charakteristika magnetického obvodu motoru 2

B [T]	H [A/m]
0,35	215
0,4	230
0,45	250
0,5	266
0,55	290
0,6	320
0,65	340
0,7	360
0,75	390
0,8	420
0,85	450
0,9	500
0,95	540
1	600
1,05	660
1,1	770
1,15	910
1,2	1100
1,25	1700
1,3	2400
1,35	3620
1,4	4600
1,45	4840
1,5	5590
1,55	7400
1,6	8600
1,65	10100
1,7	12500
1,75	17000
1,8	20200
1,85	22900
1,9	27800
1,95	34585
2	39620
2,05	47965
2,1	57730
2,15	69085
2,2	82210
2,25	97253
2,3	110426
2,35	129909
2,4	151902
2,45	176695
2,5	204688
2,55	236281
2,6	271874
2,65	311874

Příloha 3 – zapojení vinutí motoru 1



Příloha 4 – zapojení vinutí motoru 2



Příloha 5 – výstup z programu FEMM a dopočtené momenty pro motor 1

<i>Úhel pootočení [°]</i>	<i>W [J]</i>	<i>Moment z Maxwellova tenzoru [N·m]</i>	<i>Moment dopočítaný přes energii [N·m]</i>	<i>Moment z Maxwellova tenzoru s odečtenou střední hodnotou [N·m]</i>
-0,25	2,71159	31,0884		
0	2,71459	31,935	-0,687549354	-0,37699
0,25	2,71163	33,2401	0,678382029	0,92811
0,5	2,70656	34,369	1,161958409	2,05701
0,75	2,70348	33,7799	0,705884004	1,46791
1	2,70091	31,7303	0,589000613	-0,58169
1,25	2,70204	30,5851	-0,258976923	-1,72689
1,5	2,70704	30,6652	-1,14591559	-1,64679
1,75	2,7116	31,2306	-1,045075018	-1,08139
2	2,71189	32,2754	-0,066463104	-0,03659
2,25	2,70657	33,7529	1,219254188	1,44091
2,5	2,70007	35,0268	1,489690267	2,71481
2,75	2,69699	34,3404	0,705884004	2,02841
3	2,69489	32,0174	0,481284548	-0,29459
3,25	2,69718	30,5762	-0,52482934	-1,73579
3,5	2,7044	30,5257	-1,654702112	-1,78629
3,75	2,71163	31,0781	-1,656993944	-1,23389
4	2,71465	31,946	-0,692133017	-0,36599
4,25	2,71166	33,2327	0,685257523	0,92071
4,5	2,70662	34,3685	1,155082915	2,05651
4,75	2,70348	33,7792	0,719634991	1,46721
5	2,70093	31,728	0,584416951	-0,58399
5,25	2,70205	30,575	-0,256685092	-1,73699
5,5	2,70711	30,6546	-1,159666577	-1,65739
5,75	2,71154	31,2293	-1,015281213	-1,08269
6	2,71194	32,2657	-0,091673247	-0,04629
6,25	2,70648	33,7543	1,251339825	1,44231
6,5	2,70003	35,0231	1,478231111	2,71111
6,75	2,69691	34,3368	0,715051328	2,02481
7	2,69478	32,0148	0,488160041	-0,29719
7,25	2,69726	30,5843	-0,568374133	-1,72769
7,5	2,70447	30,5263	-1,652410281	-1,78569
7,75	2,71153	31,082	-1,618032813	-1,22999
8	2,71465	31,9476	-0,715051328	-0,36439
8,25	2,71167	33,2315	0,682965692	0,91951
8,5	2,70656	34,3688	1,171125733	2,05681
8,75	2,70344	33,785	0,715051328	1,47301
9	2,70102	31,7352	0,554623146	-0,57679
9,25	2,70203	30,5849	-0,231474949	-1,72709
9,5	2,70709	30,6578	-1,159666577	-1,65419
9,75	2,71161	31,2173	-1,035907694	-1,09469
10	2,71197	32,2732	-0,082505922	-0,03879
10,25	2,70652	33,753	1,249047993	1,44101
10,5	2,70012	35,0201	1,466771956	2,70811
10,75	2,69695	34,3366	0,726510484	2,02461
11	2,69486	32,011	0,478992717	-0,30099
11,25	2,69722	30,5869	-0,540872159	-1,72509
11,5	2,7045	30,525	-1,668453099	-1,78699
11,75	2,71159	31,0877	-1,624908307	-1,22429
12	2,71462	31,9372	-0,694424848	-0,37479

Příloha 6 – výstup z programu FEMM a dopočtené momenty pro motor 2

<i>Úhel pootočení [°]</i>	<i>W [J]</i>	<i>Moment z Maxwelllova tenzoru [N·m]</i>	<i>Moment dopočítaný přes energii [N·m]</i>	<i>Moment z Maxwelllova tenzoru s odečtenou střední hodnotou [N·m]</i>
-0,25	76,4327	1343,55		
0	76,4132	1343,73	4,469070802	0,2024
0,25	76,4099	1352,47	0,75630429	8,9424
0,5	76,435	1344,09	-5,752496263	0,5624
0,75	76,4447	1342,92	-2,223076245	-0,6076
1	76,435	1336,55	2,223076245	-6,9776
1,25	76,4286	1340,95	1,466771956	-2,5776
1,5	76,4401	1346,97	-2,635605858	3,4424
1,75	76,4427	1343,12	-0,595876107	-0,4076
2	76,4263	1342,02	3,758603136	-1,5076
2,25	76,4052	1345,64	4,835763791	2,1124
2,5	76,4154	1347,72	-2,337667804	4,1924
2,75	76,4422	1344,41	-6,142107564	0,8824
3	76,4435	1338,03	-0,297938053	-5,4976
3,25	76,4315	1339,6	2,750197417	-3,9276
3,5	76,4317	1344,73	-0,045836624	1,2024
3,75	76,4421	1345,62	-2,383504428	2,0924
4	76,4394	1341,67	0,618794419	-1,8576
4,25	76,415	1336,46	5,59206808	-7,0676
4,5	76,4121	1351,2	0,664631042	7,6724
4,75	76,4301	1346,35	-4,125296125	2,8224
5	76,4453	1339,06	-3,483583394	-4,4676
5,25	76,4376	1337,65	1,764710009	-5,8776
5,5	76,4315	1342,51	1,39801702	-1,0176
5,75	76,44	1349,23	-1,948056503	5,7024
6	76,4434	1345,49	-0,779222601	1,9624