



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY

A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

SYNCHRONNÍ STROJ SPOUŠTĚNÝ ZE SÍTĚ

LINE START SYNCHRONOUS MACHINE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ruben Kaczmarczyk

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Klíma

BRNO 2018

## Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Student:** Bc. Ruben Kaczmarczyk

**ID:** 168593

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2017/18

**NÁZEV TÉMATU:**

### Synchronní stroj spouštěný ze sítě

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1) Seznamte se s konstrukcí synchronního stroje spouštěného ze sítě a proveďte literární rešerši.
- 2) Vyberte jednu z možných konstrukčních variant vnořených magnetů, proveďte výpočet a navrhnete úpravu rotoru zadaného asynchronního motoru.
- 3) V programu ANSYS Maxwell ověřte rozběh navrženého synchronního motoru s kotvou nakrátko.
- 4) Shrňte dosažené výsledky a vhodně okomentujte v závěru.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] KOPYLOV, Igor Petrovič. Stavba elektrických strojů: celostátní vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988, 685 s.
- [2] J. Pyrhonen, J. Jokinen, V. Hrabovcová. Design of Rotating Electrical machines. John Wiley & Sons, Ltd, 2008. 512 s. ISBN 978-0-470-69516-6(H/B).
- [3] Časopisecké a konferenční články z databáze IEEE Xplore.

**Termín zadání:** 5. 2. 2018

**Termín odevzdání:** 21. 5. 2018

**Vedoucí práce:** Ing. Jiří Klíma

**doc. Ing. Ondřej Vitek, Ph.D.**  
předseda oborové rady

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI, díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá seznámením se s konstrukcí synchronního stroje spouštěného ze sítě. Dále je pak na základě výrobní dokumentace proveden výpočet asynchronního stroje. Analytický výpočet je proveden i v programu RMxpert, následně jsou výpočtu obou metod porovnány. Dále je provedena úprava rotoru zadaného asynchronního motoru včetně vložení permanentních magnetů do rotoru. V programu Ansys Maxwell je poté provedena optimalizace a analýza motoru, a je také ověřen rozběh motoru. Nakonec jsou dosažené výsledky shrnuté v závěru.

## **Klíčová slova**

Synchronní motor napájený ze sítě, návrh rotoru, metoda konečných prvků, ověření rozběhu motoru

## **Abstract**

This work deals with explanation of the construction of a line start synchronous machine. Furthermore, the calculation of the asynchronous machine is made on the basis of the production documentation. The analytical calculation is done in the RMxpert program, then the calculations of both methods are compared. In addition, rotor adjustment of the specified asynchronous motor is performed, including the insertion of permanent magnets into the rotor. Ansys Maxwell program then optimizes and analyzes the engine, and also checks engine's start-up. Finally, the results are compared and summarized.

## **Keywords**

Synchronous motor, design rotor, finite element method, verification of engine start up

### **Bibliografická citace:**

KACZMARCZYK, R. Synchronní stroj spouštěný ze sítě. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 39 s. Vedoucí práce: Ing Jiří Klíma

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Synchronní stroj spouštěný ze sítě jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 21. května 2018

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Klímovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé semestrální práce.

V Brně dne 21. května 2018

.....  
podpis autora

# Obsah

1	Úvod .....	1
1.1	Synchronní motory spouštěné ze sítě.....	1
1.1.1	Přehled topologií motorů spouštěných ze sítě .....	1
1.1.2	Adepti na energeticky účinné motory spouštěné ze sítě .....	3
1.1.3	Točivý moment synchronního motoru s PM .....	4
1.1.4	Návrh motoru .....	4
1.1.5	Ekonomické úvahy .....	6
2	Analytický výpočet asynchronního motoru .....	8
2.1	Zadané obecné parametry.....	8
2.2	Výpočet indukcí a magnetizačního proudu .....	8
2.3	Výpočet odporů a reaktancí.....	9
2.3.1	Parametry náhradního obvodu .....	10
2.4	Výpočet ztrát .....	11
2.4.1	Ztráty v železe .....	11
2.4.2	Ztráty ve vinutí.....	11
2.4.3	Mechanické ztráty.....	11
2.4.4	Dodatečné ztráty .....	11
2.4.5	Celkové ztráty a účinnost motoru.....	12
2.5	Veličiny pro určení pracovní charakteristiky .....	12
3	Porovnání analytického výpočtu s výpočtem v programu Rmxprt.....	13
3.1	ANSYS RMxpert.....	13
3.1.1	Vytvoření modelu .....	13
3.2	Porovnání výsledků .....	14
4	Návrh synchronního motoru spouštěného ze sítě.....	16
4.1	Návrh rotoru.....	16
4.1.1	Varianty rotorů s permanentními magnety.....	16
4.1.2	Návrh rotoru v programu RMXPERT .....	19
5	Optimalizace a analýza synchronního motoru spouštěného ze sítě.....	23
5.1	Optimalizace modelu.....	23
5.2	Analýza modelu .....	28
5.2.1	Rozběh motoru .....	28
5.2.2	Účinnost motoru.....	31
5.2.3	Vykreslení magnetické indukce a toku.....	32
6	Závěr .....	34

# Seznam obrázků

Obrázek 1.1 Princip rotorové struktury indukčního motoru, synchronního reluktančního motoru spouštěného ze sítě a synchronního motoru s vnitřními permanentními magnety spouštěného ze sítě.....	2
Obrázek 1.2 Topologie rotoru synchronního motoru s permanentními magnety .....	2
Obrázek 1.3 Srovnání naměřené účinnosti (EFF) a účinníku (PF) 1,1 kW třífázového čtyřpólového synchronního motoru s permanentními magnety a indukčního motoru, měřeno při stejném napětí 380 V/ 50 Hz. ....	3
Obrázek 1.4 Nominální limity třídy účinnosti navržené ve druhém vydání IEC 60034-30 .....	7
Obrázek 3.1 Řez statorem a rotorem.....	14
Obrázek 3.2 Moment v závislosti na otáčkách .....	15
Obrázek 4.1 Rotorová struktura: a) magnety uvnitř rotoru, b) magnety na povrchu rotoru .....	16
Obrázek 4.2 Konfigurace rotorů s vnitřními PM: a) paprskový typ, b) čtvercový typ, c) U-typ d) V-typ, e) W – typ, f) Svastika – typ .....	17
Obrázek 4.3 Demagnetizační křivky pro různé materiály PM .....	18
Obrázek 4.4 Řez statorem a rotorem.....	19
Obrázek 4.5 Rotor s magnety .....	20
Obrázek 4.6 Momentová charakteristika.....	21
Obrázek 4.7 Momentové charakteristiky navrženého motoru .....	22
Obrázek 5.1 Řez rotorem a statorem v Maxwell 2D .....	23
Obrázek 5.2 2D síť .....	24
Obrázek 5.3 Jemnější síť ve vzduchové mezeře a mezi magnety .....	24
Obrázek 5.4 Průběh indukovaného napětí.....	25
Obrázek 5.5 Průběh parazitního momentu.....	26
Obrázek 5.6 Moment při daném zatěžovacím úhlu .....	26
Obrázek 5.7 Závislost momentu na zátěžném úhlu.....	27
Obrázek 5.8 Určení hodnoty zátěžného úhlu .....	27
Obrázek 5.9 Rozběh motoru .....	28
Obrázek 5.10 Průběhy rozběhu motoru při různých podmínkách.....	29
Obrázek 5.11 Proud ve fázi A.....	30
Obrázek 5.12 Moment v závislosti na čase.....	30
Obrázek 5.13 Podíl jednotlivých ztrát.....	31
Obrázek 5.14 Účinnost motoru.....	32
Obrázek 5.15 Vykreslení magnetické indukce a toku .....	33



## Seznam tabulek

Tabulka 3.1 Hodnoty magnetických indukcí .....	14
Tabulka 3.2 Parametry náhradního obvodu.....	15
Tabulka 3.3 Hodnoty jednotlivých ztrát.....	15
Tabulka 3.4 Porovnání parametrů v jmenovitém bodě .....	15

# 1 ÚVOD

V současné době se převádí velký podíl elektrické energie do zbytečného tepla elektrickými pohony po celém světě. Velká část těchto elektrických pohonů je reprezentována tzv. jednootáčkovými aplikacemi – ventilátory, čerpadly a kompresory. V těchto pohonech jsou většinou elektromotory spouštěny a napájeny přímo ze sítě, tj. bez použití jakékoliv výkonové elektroniky. Proto také motory spouštěné ze sítě musí splňovat jeden základní požadavek – musí být schopny z klidového stavu vzrůst na jmenovité otáčky při konstantní amplitudě a frekvenci napájecího napětí. Pokud vezmeme v úvahu zvýšené povědomí o životním prostředí a celosvětových tržních trendech, používané motory musí také vykazovat nejvyšší možnou účinnost. Nicméně tyto dva požadavky jsou v opozici, pokud je zohledněna skutečná konstrukce motoru. Proto je také proces návrhu motorů spouštěných ze sítě spojen s vhodným řešením konstrukčních kompromisů.

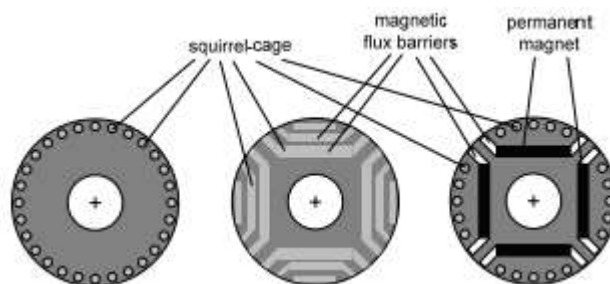
## 1.1 Synchronní motory spouštěné ze sítě

### 1.1.1 Přehled topologií motorů spouštěných ze sítě

Výrobní řada bezkartáčových motorů zahrnuje indukční motory, synchronní reluktanční motory a synchronní motory s vnitřními permanentními magnety. Princip rotorové struktury je znázorněn na obrázku 1.1, zatímco struktura statoru je stejná.

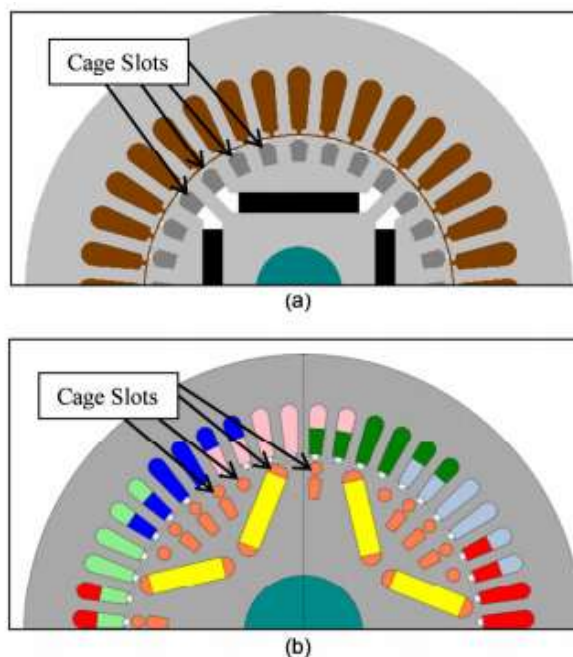
Návrháři motorů využívají různé konstrukce klece rotoru ve všech výše uvedených typech motorů. Kotva nakrátko poskytuje asynchronní spouštěcí schopnost nebo se jí "line-start schopnost" a tlumení dynamického kmitání při náhlých změnách zatížení. Ve vztahu k bezkartáčovým motorům (také nazývaných asynchronní motory), je kotva nakrátko obvykle vyrobena z elektricky vodivých tyčí, které jsou zapuštěny do drážek železného jádra rotoru a na obou koncích jsou spojeny zkratovacími kroužky. U malých točivých strojů jmenovitého výkonu, je ve velké míře klec rotoru odlévána z hliníku a jeho slitin. Výkony indukčních motorů v obojím stavu, jak v přechodném, tak v ustáleném, mají přímou závislost na konstrukci klece rotoru a rotorové drážky. U synchronních reluktančních motorů spouštěných ze sítě je kotva nakrátko obvykle konstruována jako elektricky vodivý materiál, kde jsou uvnitř zábrany magnetického toku, které jsou zodpovědné za hlavní moment jeho klidové synchronní oblasti. U synchronních motorů spouštěných ze sítě obsahující permanentní magnety, jsou permanentní magnety vloženy do bariér magnetického toku. Konstrukteři vytvořili mnoho sestav kotvy nakrátko, bariér magnetického toku a permanentních magnetů v rámci rotorů synchronních motorů s permanentními magnety spouštěnými ze sítě spolu s jejich

metodami návrhu. Vývoj těchto návrhů rotorů byl v souladu s vývojem materiálů permanentních magnetů a jejich současnou cenou a dostupností. Nejčastěji používaný návrh klece synchronního motoru s permanentními magnety spouštěný ze sítě je stále podobný indukčnímu motoru a v dnešní době nejvíce používaný materiál pro permanentní magnety je Nd-Fe-B. Permanentní magnety a bariéry toku jsou zodpovědné za vytváření točivého momentu synchronního motoru s permanentními magnety v jeho ustáleném stavu při synchronních otáčkách. Vzhledem k hybridní povaze synchronního reluktančního motoru a synchronního motoru s permanentními magnety, musí konstruktér motoru zohlednit všechny složky produkující točivý moment v asynchronním i synchronním provozu. [1]



**Obrázek 1.1** Princip rotorové struktury indukčního motoru, synchronního reluktančního motoru spouštěného ze sítě a synchronního motoru s vnitřními permanentními magnety spouštěného ze sítě [1]

U synchronní motorů s permanentními magnety může být dvojí uspořádání permanentních magnetů, jak je patrné na obrázku 1.2.



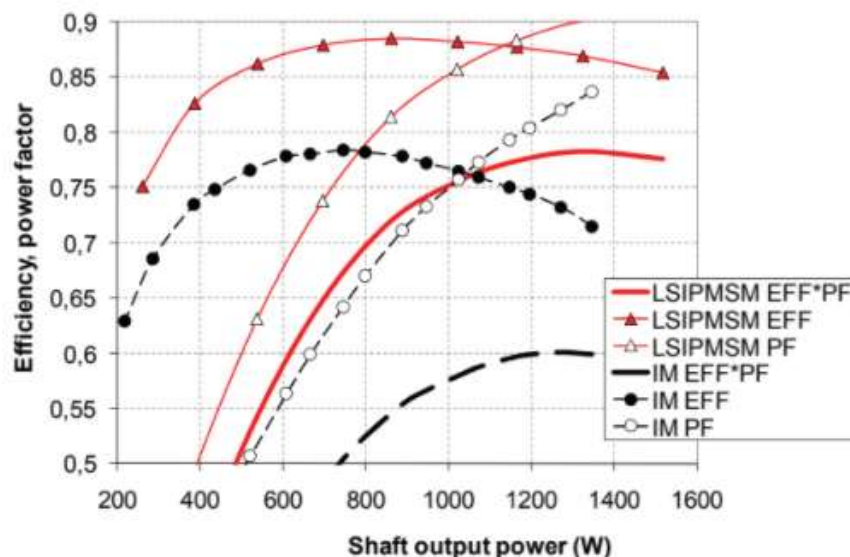
**Obrázek 1.2** Topologie rotoru synchronního motoru s permanentními magnety  
a) symetrická klec, b) asymetrická klec [2]

## 1.1.2 Adepti na energeticky účinné motory spouštěné ze sítě

Indukční motory se tradičně používají ve všech druzích aplikací, především kvůli jejich nízké ceně a robustnosti konstrukce. Nicméně, zvláště pro malý jmenovitý výkon indukčních motorů a jejich poměrně malou účinnost a účinník, je činí nevhodné pro trhy s přísnými předpisy energetické účinnosti. Některé předchozí studie byly zaměřeny na zlepšení účinnosti indukčních motorů pomocí použití drahých materiálů pro klece (slitiny mědi) v malých velikostech indukčních motorů.

Synchronní reluktanční motory představují alternativu pouze pro větší stroje, protože velká část rotorového materiálu musí být připevněna k bariérám, což je konstrukčně obtížné k dosažení dostatečného momentu. Proto jsou synchronní motory se zapaštěnými PM pod klecí v současnosti označeny za nejslibnější návrh energeticky úsporné aplikace s malým výkonem. Avšak i u těchto motorů je třeba dát pozor při geometrické návrhu bariér magnetického toku právě z důvodu tepelné kapacity. Teplo vytvořené v rotoru může magnety zahřívat a v důsledku toho ztrácet magnetismus.

Obrázek 1.3 představuje srovnání naměřených hodnot charakteristiky účinnosti a účinníku na výkonu pro 1,1 kW čtyřpólový třífázový synchronní motor s permanentními magnety a asynchronní motor s kotvou nakrátko vyrobenou z hliníku. Z tohoto srovnání lze vidět, že synchronní motor s permanentními magnety nabízí mnohem vyšší hodnoty účinnosti. Na druhé straně je účinnost velkých synchronních strojů s permanentními magnety v porovnání s indukčními motory těžce srovnatelná. [1]



Obrázek 1.3 Srovnání naměřené účinnosti (EFF) a účinníku (PF) 1,1 kW třífázového čtyřpólového synchronního motoru s permanentními magnety a indukčního motoru, měřeno při stejném napětí 380 V/ 50 Hz. [1]

### 1.1.3 Točivý moment synchronního motoru s PM

Asynchronní moment kotvy nakrátko ovlivňuje výkon synchronního motoru s permanentními magnety v libovolném provozním stavu, kde se skluz liší od 0. Tedy moment klece rotoru umožňuje výkon přímého napájení a tlumení oscilací dynamického zatížení. Kromě statorového vinutí točivý moment závisí na návrhu klece a materiálu.

Synchronní součásti momentu, které jsou reprezentovány reluktančním momentem (kvůli přítomnosti bariér toku) a točivým momentem permanentních magnetů (kvůli přítomnosti permanentních magnetů) ovlivňují výkon synchronního motoru s PM v jakémkoli provozním stavu, kde je skluz odlišný od 1. V synchronním provozu (kde je skluz roven 0) jsou užitečné pro točivý moment. Naopak u přechodu přímého napájení reprezentují brzdňý moment. Proto také snižují celkový točivý moment, který by měl urychlit přechod do synchronizace synchronního motoru s PM. Reakční točivý moment závisí hlavně na návrhu bariér magnetického toku, který se také musí přizpůsobit používaným segmentům PM. Točivý moment závisí hlavně na umístění, rozměrech a druhu materiálu PM. Z těchto důvodů je statický momentový skluz synchronního stroje s PM charakteristický pro oblast asynchronního provozu obecně nižší, než je statický momentový skluz charakteristický pro čistý asynchronní motor se stejným designem kotvy nakrátko, materiálu, statorových a rotorových geometrických drážek a konstrukce statorového vinutí. [1]

### 1.1.4 Návrh motoru

#### 1.1.4.1 Proces návrhu

Jak je patrné z předchozích částí, návrhové problémy synchronních reluktančních motorů a synchronních motorů s PM jsou celkem podobné a úzce souvisí s problémy a konstrukcí indukčních motorů. Obvykle je hlavním cílem nového návrhu synchronního reluktančního motoru a synchronního motorů s PM nahradit stávající indukční motor, proto nový motor musí splňovat následující dva požadavky:

- musí vykazovat schopnost spouštění a synchronizace
- v porovnání se stávajícím indukčním motorem musí vykazovat vyšší (nebo alespoň stejný) točivý moment na jednotku (stator) velikosti proudové hustoty a vyšší účinnost ve svém ustáleném stavu synchronní provozní oblasti

Různí autoři používali různě složité přístupy při řešení problémů s konstrukcí. Modely spojené s metodou silně vázaných konečných prvků jsou podle autorů výpočetně příliš komplexní na to, aby byly běžně používány motorovými konstruktéry. Proto je návrh založen na hybridním základu, na získaných znalostech

a zkušenostech s designem, vyvíjejícím se modelování a analýze indukčního motoru s kotvou nakrátko, (bezklecové motory) synchronního reluktančního motoru a (bezklecové motory) synchronního motoru s PM. Postup zahrnuje využívání metody bilance výkonu založených na výsledcích z časových kroků analýzy metody konečných prvků v analýze synchronního výkonu a využívání soustředěných parametrických dynamických modelů v analýze výkonů napájení ze sítě. Používá se metoda bilance výkonu, protože analýzy metody konečných prvků poskytují velmi detailní obraz geometrické a materiálově závislé distribuce magnetického pole v oblasti stroje. Proto design bariér magnetického pole, umístění a energetický produkt materiálu permanentních magnetů a jejich vliv na sycení železného jádra a parametrů motoru je v dostatečném rozlišení. [1]

#### **1.1.4.2 Kritéria návrhů**

Spolu se vším již zmíněným představuje následující seznam další důležité konstrukční aspekty, které by měly být brány v potaz motorovým konstruktérem za účelem dosažení výkonu cílového motoru, kde je třeba učinit mnoho kompromisů.

- Přechodový stav motoru závisí na dodávce napětí, frekvenci, setrvačnosti, charakteristice mechanického zatížení a také počáteční poloze rotoru. Počáteční pozice rotoru synchronního motoru s PM přechodně ovlivňuje jeho schopnost reakce na proud a rychlost startovacího rozběhu. Jeho efekt je zjevný, když je motor spuštěn bez zatížení.
- Kompromis synchronního motoru s PM mezi adekvátním výkonem přímého napájení v asynchronním režimu a účinnosti v synchronním režimu je spjatá s počtem závitů statorového vinutí. Proto musí být počet závitů vinutí přizpůsoben podle zatěžovací charakteristiky, hlavně, když jsou očekávány přísné startovací podmínky.
- Materiál klece rotoru hraje zásadní roli v elektromechanickém výkonu motoru s přímým napájením. Vyšší odpor klece způsobuje, že motor vykazuje vyšší hodnotu počátečního točivého momentu, ale na druhou stranu je skluz točivého momentu v blízkosti synchronních otáček menší. Ve vztahu k indukčním motorům to způsobuje nárůst ztrát a teploty motoru a tím účinnost indukčních motorů v ustáleném stavu klesá. Nicméně vliv materiálu kotvy nakrátko na výkon synchronního reluktančního a synchronního motoru s PM může být dalekosáhlejší. Když je např. synchronní motor s PM napájen ze sítě, pak by kotva nakrátko měla akcelarovat až po určitou rychlost a pokud je zrychlení dostatečné, pak by měl být rotor zatažen do synchronizace. Vtažení do synchronizačního režimu záleží na skluzu statického točivého momentu charakteristického pro daný motor v blízkosti synchronních otáček a následně startovací a synchronizační schopnost motoru závisí na použitém materiálu klece rotoru.

### 1.1.5 Ekonomické úvahy

Synchronní stroje s vnořenými PM pod kotvou nakrátko jsou v současné době nazývány nejslibnějšími návrhy energeticky výkonných malých zařízení. I přes to, že výrobci motorů mají tendenci být velmi přísní, pokud jde o výrobu nových konstrukcí motorů, výrobní nástroje (stroj pro výrobu drážek, lití kotvy nakrátko, navíječka, ...) vždy představují podstatnou část nákladů na výrobu motorů. Proto také zejména ve velkovýrobních motorů malých jmenovitých výkonů (např. ventilátory, čerpadla a motory kompresorů) se přiklání k používání stávajících nástrojů, dokud se neopotřebují nebo pokud si to nevyžaduje produkt nebo zákazník. Prosazování přísnější politiky efektivity motorů (jako je směrnice EU 2005/32 / ES) přinutí, aby výrobci zvážili nové návrhy motorů.

Způsob výroby rotorů synchronních motorů s PM (lití kotvy nakrátko při poměrně vysokých teplotách, které jsou vyšší než teploty Curie PM) činí to, že nelze umístit magneticky magnetizované segmenty v rotorových bariérách magnetického toku před litím klece rotoru. Na druhou stranu impulsní magnetizace celého multipólového rotoru se zapuštěnými PM představuje také problém, protože indukované proudy kotvy nakrátko omezují hloubku pronikání magnetického pole v oblasti rotoru a také magnetizační homogenitu magnetických segmentů. Nejjednodušší způsob, jak vyrobit rotor synchronního motoru s PM tkví v jednoduchém nákupu a vkládání předem namagnetizovaných segmentů PM, což ale může být poměrně nákladné. Ekonomické posouzení a přehled zvýšení nákladů související s výrobou synchronních strojů s PM a na druhou stranu potenciální úspory elektrické energie při použití těchto strojů v protikladu s indukčními motory jsou předmětem diskuzí. Na druhou stranu, jak bylo uvedeno výše, konstruktéři motorů mohou využívat obojí ze synchronních točivých momentů (tj. točivý moment PM a reluktanční točivý moment), kde navržení vyšší výnosnosti rotoru, méně magnetického materiálu nebo levnější PM může být použito za účelem dosažení vytyčeného synchronního výkonu. [1]

#### 1.1.5.1 Nová norma o třídách pro střídavé motory s nízkým napětím

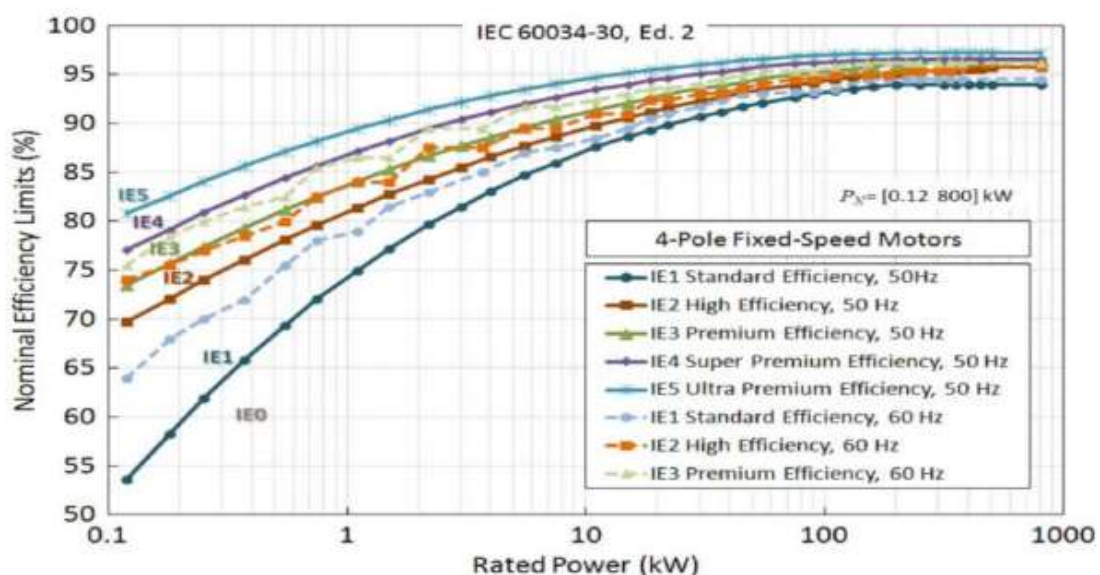
Evropská komise a CEMEP (European Committee of Manufacturers of Electric Machines and Power Electronics) vydala dobrovolnou dohodu výrobců ohledně třídění účinnosti motorů, a to do následujících tříd:

- EFF1 pro motory s vysokou účinností
- EFF2 pro motory standartních účinností
- EFF3 pro motory s nízkou účinností

V roce 2008 Evropská unie přijala nový mezinárodní standart pro účinnost elektrických strojů IEC 60034-30, nazvaná také jako "ECODESIGN". Tento standart je použitelný pro dvou až šestipólové motory s výkonem od 0,75 do 375 kW při

napětí do 1000 V. Tato norma pomáhá sladit normy energetické účinnosti se zeměmi Evropské Unie a stanovit cíle pro vytvoření úspor energie z hlediska ekodesignu. První vydání normy IEC 60034 definuje nové třídy účinnosti motoru a harmonizuje současně rozdílné požadavky na úrovně účinnosti indukčního motoru po celém světě. Ukončuje potíže, s nimiž se potýkají výrobci motorů na světových trzích. Uživatelé motorů mohou těžit z dostupnosti informací a díky přehlednosti lépe porozumět těmto informacím. Nový standard definuje tři IE (International Efficiency) pro jednofázové a trojfázové indukční motory. Byl představen také standart IE4 (Super Premium Efficiency), budoucí úroveň nad IE3, ale pouze jako informativní.

Druhé vydání normy IEC 60034-30 se připravuje a IE4 bude do něj zařazena. Navíc vznikne nová třída – Ultra-Premium Efficiency (IE5). Nicméně tato třída ještě není podrobně definována. Úrovně třídy mají být zavedeny v příštím vydání standardu IEC 60034-30. Cílem je snížit ztráty IE5 o 20 % oproti IE4. Pro přehlednost jsou na obrázku znázorněny křivky jednotlivých tříd.



**Obrázek 1.4 Nominální limity třídy účinnosti navržené ve druhém vydání IEC 60034-30 pro čtyřpólové motory (rozsah výkonů 0,12-800 kW) [3]**

Cílem této podkapitoly je ukázat na fakt, že asynchronní motory budou mít do budoucna problém se dostat na tyto jednotlivé účinnosti při daném jmenovitém výkonu, proto se začínají objevovat synchronní motory napájené ze sítě, u kterých se předpokládá vyšší účinnost v daném jmenovitém bodě oproti asynchronním motorům. [3]



## 2 ANALYTICKÝ VÝPOČET ASYNCHRONNÍHO MOTORU

Pro návrh synchronního motoru spouštěného ze sítě se v této diplomové práci vychází z asynchronního motoru. Stator zůstává stejný jako u asynchronního motoru, avšak rotor je odlišný. Nejprve je proto třeba vypočítat asynchronní motor, z kterého se potom bude vycházet. Byl vybrán třífázový motor, který má synchronní otáčky  $1500 \text{ min}^{-1}$ . Je to klasický asynchronní motor bez konstrukčních zvláštností. Rotor má klecové vinutí, je to rotor s kotvou nakrátko. Výpočet a všechny uvedené vztahy, obrázky, tabulky, pokud není uvedeno jinak, jsou aplikovány podle literatury [4]. Při analytickém výpočtu se vycházelo z výkresové dokumentace tvaru statorového a rotorového plechu. Zde jsou uvedeny jen ty nejdůležitější rovnice, celý postup výpočtu asynchronního motoru je uveden v příloze P.1.

### 2.1 Zadané obecné parametry

Jmenovitý výkon	$P_2 = 1500 \text{ W}$
Napájecí frekvence	$f = 50 \text{ Hz}$
Počet závitů	$N = 210 \text{ z.}$
Počet pólových dvojic	$p = 2$
Jmenovité otáčky	$n_1 = 1446 \text{ min}^{-1}$
Efektivní délka stroje	$l_e = 160 \text{ mm}$
Počet fází	$m = 3$
Fázové napětí	$U_f = 230 \text{ V}$
Vzduchová mezera	$\delta = 0,3 \text{ mm}$

### 2.2 Výpočet indukcí a magnetizačního proudu

Magnetický tok

$$\Phi = \frac{k_E U_f}{4k_B N k_{V1} f} = \frac{0,96 \cdot 230}{4,44 \cdot 210 \cdot 0,96 \cdot 50} = 4,93 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} \quad (2.1)$$

Indukce ve vzduchové mezeře

$$B_\delta = \frac{p \Phi}{D l_e} = \frac{2 \cdot 4,93 \cdot 10^{-3}}{84 \cdot 10^{-3} \cdot 0,16} = 0,73 \text{ T} \quad (2.2)$$

Indukce v zubu statoru

$$B_{zs} = \frac{B_\delta t_{ds}}{b_{zs} k_{Fe}} = \frac{0,73 \cdot 7,3 \cdot 10^{-3}}{3,82 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = 1,44 \text{ T} \quad (2.3)$$

Indukce ve jhu statoru

$$B_{js} = \frac{\Phi}{2 h_{js} l_e k_{Fe}} = \frac{4,93 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 12,3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,16 \cdot 0,97} = 1,29 T \quad (2.4)$$

Indukce v zubu rotoru

$$B_{zr} = \frac{B_{\delta} t_{dr}}{b_{zr} k_{Fe}} = \frac{0,73 \cdot 9,4 \cdot 10^{-3}}{4,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = 1,47 T \quad (2.5)$$

Indukce ve jhu rotoru

$$B_{jr} = \frac{\Phi}{2 h_{jr} l_e k_{Fe}} = \frac{4,93 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 14,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,16 \cdot 0,97} = 1,1 T \quad (2.6)$$

Magnetické napětí ve vzduchové mezeře

$$U_{\delta} = \frac{2 B_{\delta} \delta k_C}{\mu_0} = \frac{2 \cdot 0,73 \cdot 0,3 \cdot 10^{-3} \cdot 1,25}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 435,69 A \quad (2.7)$$

Magnetické napětí ve jhu statoru

$$U_{js} = H_{js} L_{js} = 233,32 \cdot 96,4 \cdot 10^{-3} = 22,49 A \quad (2.8)$$

Magnetické napětí ve jhu rotoru

$$U_{jr} = H_{jr} L_{jr} = 241,56 \cdot 33,2 \cdot 10^{-3} = 8,02 A \quad (2.9)$$

Magnetické napětí v zubu statoru

$$U_{zs} = H_{zs} L_{zs} = 492,98 \cdot 26,4 \cdot 10^{-3} = 13,01 A \quad (2.10)$$

Magnetické napětí v zubu rotoru

$$U_{zr} = H_{zr} L_{zr} = 929,606 \cdot 41,2 \cdot 10^{-3} = 38,29 A \quad (2.11)$$

Celkové magnetické napětí

$$\begin{aligned} F_m &= U_{\delta} + U_{js} + U_{jr} + U_{zs} + U_{zr} = \\ &= 435,69 + 22,49 + 8,02 + 13,01 + 38,29 = 520,87 A \end{aligned} \quad (2.12)$$

Magnetizační proud

$$I_{\mu} = \frac{p F_m}{0,9 m N k_{V1}} = \frac{2 \cdot 520,87}{0,9 \cdot 3 \cdot 210 \cdot 0,97} = 1,89 A \quad (2.13)$$

## 2.3 Výpočet odporů a reaktancí

Odpor jedné fáze statorového vinutí

$$R_1 = \rho_{Cu75^{\circ}C} \frac{L}{S_{ef}} = \frac{1}{47} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{112,13}{7,05 \cdot 10^{-7}} = 3,38 \Omega \quad (2.14)$$

Odpor kruhu mezi dvěma sousedními tyčemi klece nakrátko

$$R_{kn} = \rho_{Al75^{\circ}C} \frac{\pi D_{kn}}{Q_r S_{kn}} = \frac{1}{21,5} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\pi \cdot 0,0629}{28 \cdot 2,5 \cdot 10^{-4}} = 9,4 \cdot 10^{-7} \Omega \quad (2.15)$$

Odpor jedné tyče klece rotoru

$$R_t = \rho_{Al75^\circ C} \frac{l_e}{S_t} = \frac{1}{21,5} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,16}{29,5 \cdot 10^{-6}} = 1,35 \cdot 10^{-4} \Omega \quad (2.16)$$

Odpor jedné fáze klece rotoru

$$R_2 = R_t + \frac{2 R_{kn}}{\Delta^2} = 1,35 \cdot 10^{-4} + \frac{2 \cdot 9,4 \cdot 10^{-7}}{0,45^2} = 1,45 \cdot 10^{-4} \Omega \quad (2.17)$$

Rozptylová reaktance jedné fáze statorového vinutí

$$\begin{aligned} X_s &= 15,8 \frac{f}{100} \left( \frac{N}{100} \right)^2 \frac{l_e}{pq} (\lambda_{ds} + \lambda_{cs} + \lambda_{difs}) = \\ &= 15,8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left( \frac{210}{100} \right)^2 \cdot \frac{0,16}{2 \cdot 3} \cdot (1,13 + 0,41 + 1,79) = 3,1 \Omega \end{aligned} \quad (2.18)$$

Rozptylová reaktance jedné fáze klece rotoru

$$\begin{aligned} X_r &= 7,9 f l_e (\lambda_{dr} + \lambda_{cr} + \lambda_{difs}) 10^{-6} = \\ &= 7,9 \cdot 50 \cdot 0,16 \cdot (0,66 + 2,8 \cdot 10^{-4} + 2,08) \cdot 10^{-6} = 1,73 \cdot 10^{-4} \Omega \end{aligned} \quad (2.19)$$

### 2.3.1 Parametry náhradního obvodu

Odpor jedné fáze statorového vinutí

$$R_1 = 3,38 \Omega$$

Odpor jedné fáze klece rotoru přepočítaný na statorové vinutí

$$R_{2'} = R_2 4m \frac{(N k_{v1})^2}{Q_r} = 1,45 \cdot 10^{-4} \cdot 4 \cdot 3 \cdot \frac{(210 \cdot 0,96)^2}{28} = 2,52 \Omega \quad (2.20)$$

Rozptylová reaktance jedné fáze statorového vinutí

$$X_s = 3,1 \Omega$$

Rozptylová reaktance jedné fáze klece rotoru přepočítaná na statorové vinutí

$$X_{r'} = X_r 4m \frac{(N k_{v1})^2}{Q_r} = 1,73 \cdot 10^{-4} \cdot 4 \cdot 3 \cdot \frac{(210 \cdot 0,96)^2}{28} = 3,01 \Omega \quad (2.21)$$

Odpor příčné větve náhradního obvodu

$$R_{12} = \frac{\Delta P_{Feh}}{m I_\mu^2} = \frac{61,31}{3 \cdot 1,89^2} = 5,72 \Omega \quad (2.22)$$

Reaktance příčné větve náhradního obvodu

$$X_{12} = \frac{U_f}{I_\mu} - X_s = \frac{230}{1,89} - 3,1 = 118,6 \Omega \quad (2.23)$$

Hopkinsonův činitel

$$c \approx 1 + \frac{X_s}{X_{12}} = 1 + \frac{3,1}{118,6} = 1,03 \quad (2.24)$$

Magnetizační impedance

$$\overline{Z}_\mu = \frac{j R_{Fe} X_{12}}{R_{Fe} + j X_{12}} = \frac{j 2189,7 \cdot 118,6}{2189,7 + j 118,6} = 6,41 + j 118,25 \Omega \quad (2.25)$$

Odpor respektující ztráty v železe (2.26)

$$R_{Fe} = \frac{3 E_m^2}{\Delta P_{Fe}} = \frac{3 \cdot 216,2^2}{64,04} = 2189,7 \Omega$$

Napětí ve vzduchové mezeře

$$E_m = 0,94 U_f = 0,94 \cdot 230 = 216,2 V \quad (2.27)$$

Impedance statorového obvodu

$$\bar{Z}_s = R_1 + jX_s = 3,38 + j3,1 \Omega \quad (2.28)$$

Impedance rotorového obvodu

$$\bar{Z}_r = \frac{R_2'}{s} + jX_{r'} = \frac{2,52}{0,036} + j3,01 = 70 + j3,01 \Omega \quad (2.29)$$

Celková impedance:

$$\begin{aligned} \bar{Z}_c &= \frac{\bar{Z}_\mu \bar{Z}_r}{\bar{Z}_\mu + \bar{Z}_r} + \bar{Z}_s = \\ &= \frac{6,41 + j118,25 \cdot 70 + j3,01}{(6,41 + j118,25) + (70 + j3,01)} + 3,38 + j3,1 = 52,28 + j33,86 \Omega \end{aligned} \quad (2.30)$$

## 2.4 Výpočet ztrát

### 2.4.1 Ztráty v železe

Celkové ztráty v železe

$$\begin{aligned} \Delta P_{Fe} &= \Delta P_{Feh} + \Delta P_{\delta pr} + \Delta P_{pr} = \\ &= 61,3 + 2,73 + 8,03 \cdot 10^{-8} = 64,03 W \end{aligned} \quad (2.33)$$

### 2.4.2 Ztráty ve vinutí

Elektrické ztráty ve všech fázích vinutí statoru

$$\Delta P_{js} = m R_1 I_{ns}^2 = 3 \cdot 3,38 \cdot 3,48^2 = 122,8 W \quad (2.34)$$

Elektrické ztráty v klecovém vinutí rotoru nakrátko

$$\Delta P_{jr} = Q_r R_2 I_{nr}^2 = 28 \cdot 1,45 \cdot 10^{-4} \cdot 117,19^2 = 55,76 W \quad (2.35)$$

### 2.4.3 Mechanické ztráty

$$\Delta P_m = 20 W \quad (2.36)$$

### 2.4.4 Dodatečné ztráty

$$\Delta P_d = 0,005 P_2 = 0,005 \cdot 1500 = 7,5 W \quad (2.37)$$

## 2.4.5 Celkové ztráty a účinnost motoru

Celkové ztráty

$$\begin{aligned}\Delta P &= \Delta P_{Fe} + \Delta P_{js} + \Delta P_{jr} + \Delta P_m + \Delta P_d = \\ &= 64,03 + 122,8 + 55,76 + 20 + 7,5 = 270 \text{ W}\end{aligned}\quad (2.38)$$

Účinnost motoru

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} 100 = \frac{1500}{1500 + 270} \cdot 100 = 84,7 \% \quad (2.39)$$

## 2.5 Veličiny pro určení pracovní charakteristiky

Záběrný proud

$$\begin{aligned}I_z &= \frac{U_f}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_s + X_r')^2}} = \\ &= \frac{230}{\sqrt{(3,38 + 2,52)^2 + (3,09 + 3,01)^2}} = 27,08 \text{ A}\end{aligned}\quad (2.40)$$

Záběrný moment

$$M_z = \frac{3R_2' I_z^2 p}{\omega} = \frac{3 \cdot 3,09 \cdot 27,08^2 \cdot 2}{2\pi \cdot 50} = 43,28 \text{ Nm} \quad (2.41)$$

Skluž zvratu

$$s_z = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_s + cX_r')^2}} = \frac{2,52}{\sqrt{3,38^2 + (3,09 + 1,03 \cdot 3,01)^2}} = 0,46 \quad (2.42)$$

Maximální moment

$$\begin{aligned}M_{max} &= \frac{3p}{2\omega} \frac{U_f^2}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_s + cX_r')^2}} = \\ &= \frac{3 \cdot 2}{2 \cdot 2\pi \cdot 50} \cdot \frac{230^2}{3,38 + \sqrt{3,38^2 + (3,38 + 1,03 \cdot 3,01)^2}} = 48,4 \text{ Nm}\end{aligned}\quad (2.43)$$

Jmenovitý skluz

$$s = \frac{n - n_1}{n} 100 = \frac{1500 - 1446}{1500} \cdot 100 = 3,6 \% \quad (2.44)$$

Jmenovitý moment

$$M_{jm} = \frac{P_2}{\frac{\omega}{p}(1-s)} = \frac{1500}{\frac{2\pi \cdot 50}{2}(1-0,036)} = 9,9 \text{ Nm} \quad (2.45)$$

## 3 POROVNÁNÍ ANALYTICKÉHO VÝPOČTU S VÝPOČTEM V PROGRAMU RMXprt

### 3.1 ANSYS RMXprt

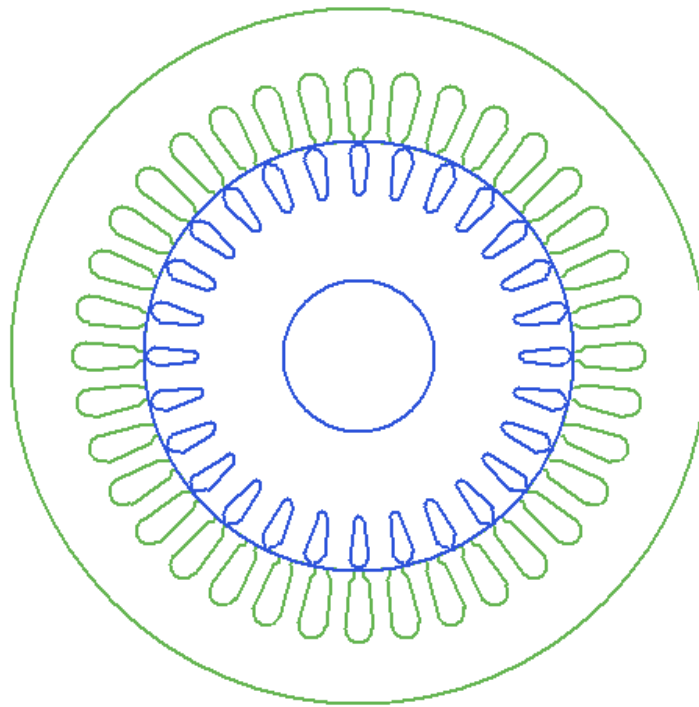
ANSYS RMXprt je program pro návrh a optimalizaci elektrických točivých strojů. Program využívá analytických vztahů při výpočtech. Výpočet je proveden na základě konstrukčních parametrů a požadovaných vlastností stroje. Výstupem jsou pak základní data pro vyhodnocení stroje, např. hodnoty magnetických indukcí, ztrát, proudů, odporů atd. [5].

#### 3.1.1 Vytvoření modelu

V prostředí RMXprt byl vytvořen model motoru podle výkresové dokumentace a vypočítaných parametrů. Nejprve byl vybrán třífázový asynchronní motor a byly zadány synchronní otáčky, počet pólů a také mechanické ztráty, které jsou rozděleny na třecí a ventilační ztráty. Dále pak byly zadány rozměry statoru a jeho parametry – počet drážek a její parametry, pak typ vinutí, počet jeho vrstev, počet vodičů v drážce, průměr drátu i izolace a počet paralelních větví. U rotoru se definují rozměry, jestli je vinutý nebo litý, typ drážky a její rozměr a materiál rotoru. Také rozměry zkratovacího kruhu a materiál. Jak u statoru, tak i rotoru se definuje činitel plnění železa. Důležitým faktorem bylo nadefinování statorových a rotorových plechů. Pro stator i rotor byl vybrán plech M470 – 50A. Hodnoty pro tento plech byly zvoleny z katalogu od firmy ThyssenKrupp Steel. Do materiálové knihovny byly následně naimportovány křivky prvotní magnetizace a měrných ztrát v závislosti na magnetické indukci. Nakonec se určuje, zda je hřídel feromagnetická, či nikoliv [4].

Před spuštěním samotné analýzy byly zadány jmenovité hodnoty motoru a analýza byla spuštěna. Jmenovité hodnoty: frekvence  $f=50\text{ Hz}$ , výkon  $P_2=1500\text{ W}$ , otáčky  $n_1=1446\text{ min}^{-1}$ , fázové napětí  $U_f=230\text{ V}$ , teplota  $t=75\text{ °C}$  a jednalo se o zapojení do hvězdy *Wye*.

Na obrázku 3.1 je vykreslen řez státorem a rotorem v programu RMXprt.



Obrázek 3.1 Řez statorem a rotorem

### 3.2 Porovnání výsledků

Byl porovnaný analytický výpočet a výpočet pomocí RMxprt. Hodnoty jednotlivých parametrů: magnetické indukce v jednotlivých částech stroje, odporů a reaktancí náhradního obvodu a jednotlivých ztrát jsou vyobrazeny v tabulkách. Základní parametry motoru byly porovnány při jmenovitém výkonu 1500 W.

	Výpočet	RMxprt
<b><math>B_{zs}</math> (T)</b>	1,44	1,41
<b><math>B_{zr}</math> (T)</b>	1,47	1,49
<b><math>B_{js}</math> (T)</b>	1,29	1,3
<b><math>B_{jr}</math> (T)</b>	1,1	1,15
<b><math>B_{\delta}</math> (T)</b>	0,73	0,71

Tabulka 3.1 Hodnoty magnetických indukcí

	Výpočet	RMxprt
<b><math>R_1</math> (<math>\Omega</math>)</b>	3,38	3,7
<b><math>R_2</math> (<math>\Omega</math>)</b>	2,52	3,26
<b><math>X_s</math> (<math>\Omega</math>)</b>	3,09	3,04
<b><math>X_r</math> (<math>\Omega</math>)</b>	3,01	4,89

$X_{12} (\Omega)$	118,22	111,3
$R_{Fe} (\Omega)$	2189	1990

Tabulka 3.2 Parametry náhradního obvodu

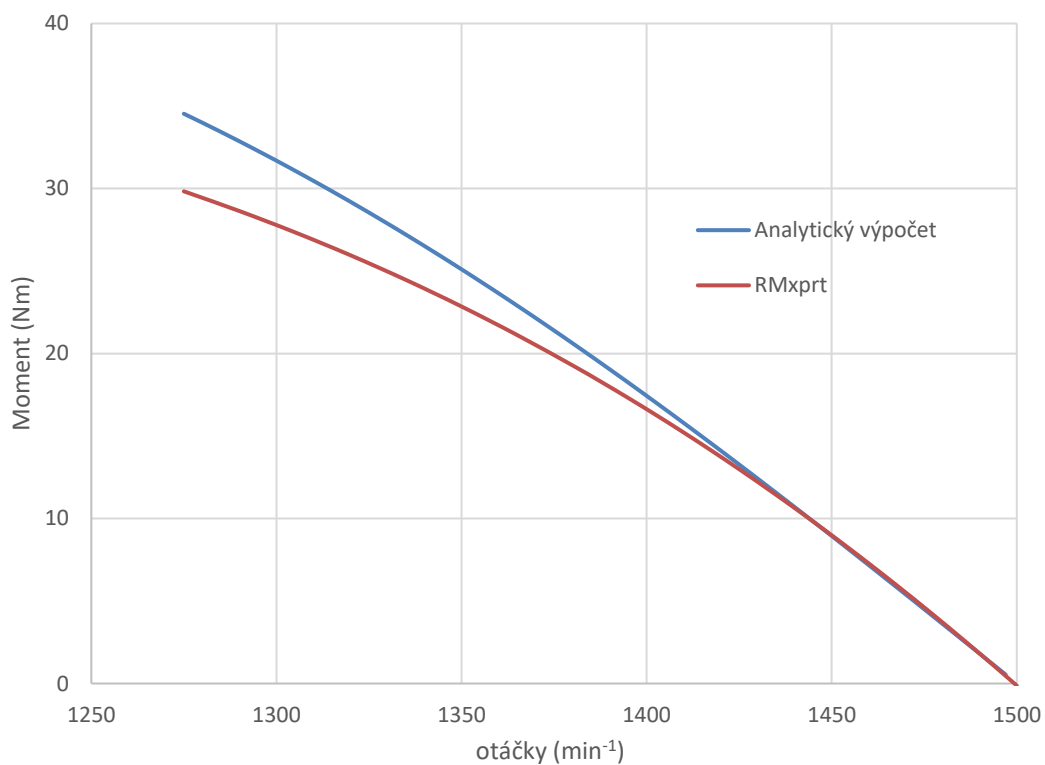
Ztráty	Výpočet	RMxpřt
$\Delta P_{Fe} (W)$	64,03	69,9
$\Delta P_{js} (W)$	122,8	115,4
$\Delta P_{jr} (W)$	55,76	55,19
$\Delta P_m (W)$	20	18,4
$\Delta P_d (W)$	7,5	9

Tabulka 3.3 Hodnoty jednotlivých ztrát

	$U_f (V)$	$f (Hz)$	$I (A)$	$M (Nm)$	$n (min^{-1})$	$P_1 (W)$	$P_2 (W)$	$\Delta P (W)$	$\eta (%)$
<b>Výpočet</b>	230	50	3,68	9,64	1446	1768	1460	270	84,7
<b>RMxpřt</b>	230	50	3,26	9,64	1446	1727	1459	268	84,5

Tabulka 3.4 Porovnání parametrů v jmenovitém bodě

Dále byla vytvořeny charakteristika momentu na otáčkách ve jmenovitém bodě.



Obrázek 3.2 Moment v závislosti na otáčkách



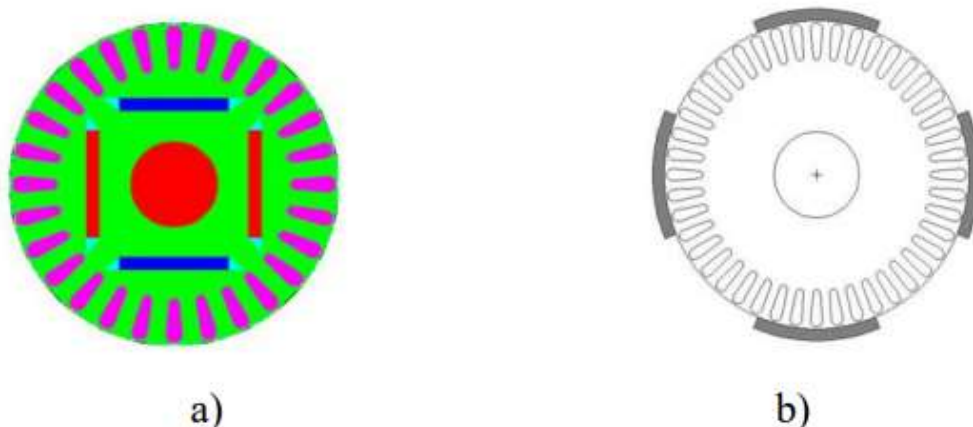
## 4 NÁVRH SYNCHRONNÍHO MOTORU SPOUŠTĚNÉHO ZE SÍTĚ

### 4.1 Návrh rotoru

V této práci byl proveden jen návrh rotoru, stator zůstává stejný jako u asynchronního motoru, jak už bylo zmíněno výše. Byl vybrán rotor s permanentními magnety.

#### 4.1.1 Varianty rotorů s permanentními magnety

Synchronní motory spouštěné ze sítě s permanentními magnety mohou být dvojího typu. A to motory s uložením magnetů v rotoru nebo motory s uložením magnetů na povrchu, jak lze vidět na obrázku 4.1.

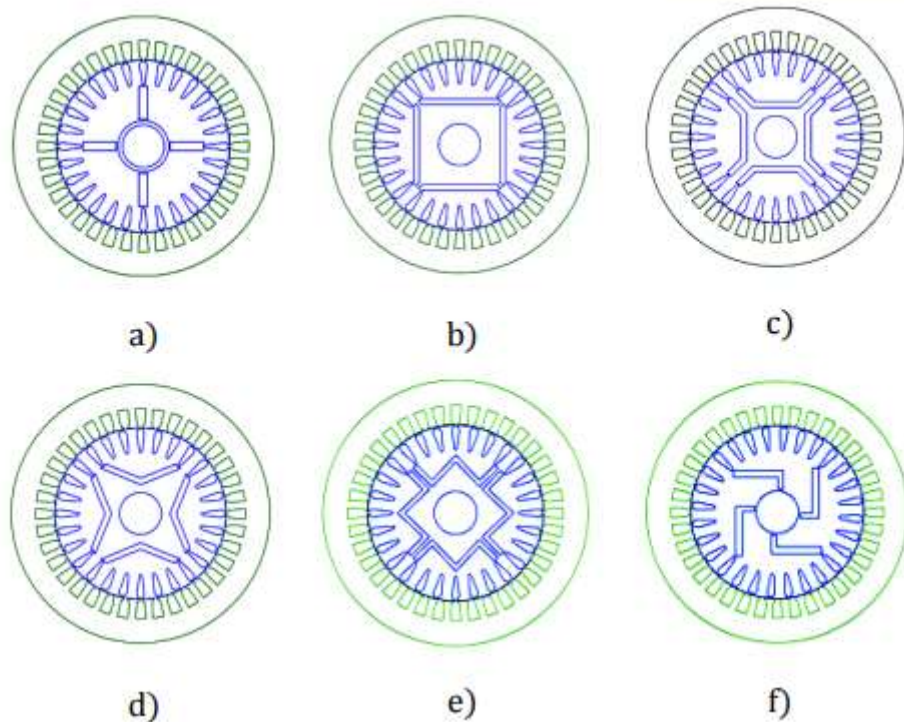


**Obrázek 4.1 Rotorová struktura: a) magnety uvnitř rotoru, b) magnety na povrchu rotoru [3]**  
Hlavní výhodou motoru s magnety na povrchu rotoru je jednodušší výroba. Navíc magnety mohou dosahovat větších rozměrů než u motorů s magnety uvnitř rotoru. Dále i magnetická indukce ve vzduchové mezeře může dosahovat větších hodnot, avšak větší magnetická indukce vytvoří větší reluktanční sílu a tím se zvýší i parazitní moment, který může vyvolat větší hlub i vibrace během otáčení. Na druhé straně motory s magnety uvnitř rotoru budou potřebovat méně času pro dosažení synchronních otáček. Avšak hlavní výhodou této konstrukce s magnety uvnitř rotoru je to, že magnety se hůře odmagnetují, a to z důvodu přítomnosti kotvy nakrátko, tím pádem jsou magnety více chráněny před demagnetizací.

V této práci byla vybrána rotorová struktura s permanentními magnety uvnitř rotoru.

#### 4.1.1.1 Topologie motorů s permanentními magnety uvnitř rotoru

Po zvolení rotorové struktury s permanentními magnety uvnitř rotoru je ještě velmi mnoho kombinací, jak lze uspořádat permanentní magnety uvnitř rotoru s největší efektivitou. Pro názornost je zde ukázáno několik kombinací uspořádání permanentních magnetů.



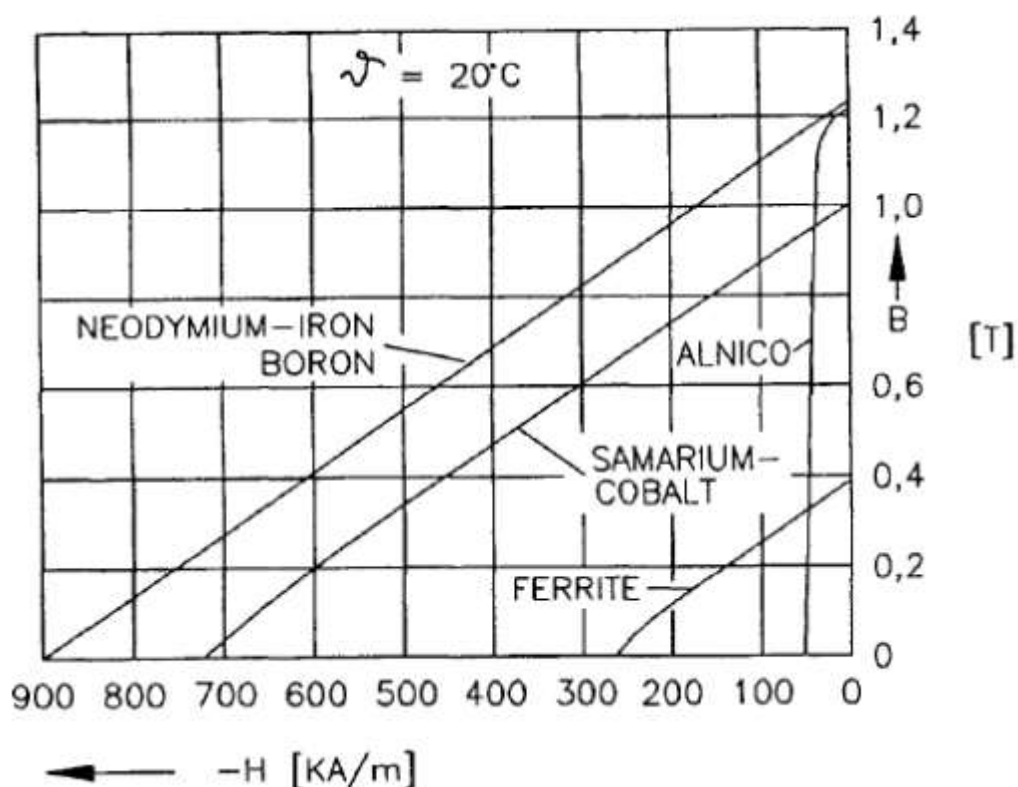
**Obrázek 4.2 Konfigurace rotorů s vnitřními PM: a) paprskový typ, b) čtvercový typ, c) U-typ d) V-typ, e) W - typ, f) Svastika - typ [3]**

Pokud vezmeme v potaz všechny tyto topologie, je velmi těžké vybrat jednu strukturu pro daný motor. Je třeba pamatovat na výkon, točivý moment, náklady na výrobu, a i samotnou rentabilitu. Například konfigurace e) tzn. W - typ má složitější geometrie, a tudíž i nákladnější výrobní proces. Nakonec byl zvolen V - typ, který má uvnitř dostatek prostoru na případnou další úpravu rotorové drážky a taky by se při tomto uspořádání měl magnetický tok soustředit do d osy.

#### 4.1.1.2 Materiály PM a demagnetizace

Po zvolení struktury rotoru bylo třeba zvolit materiál permanentních magnetů. V současné době se permanentní magnety vyrábí hlavně ze vzácných zemin (NdFeB, SmCo) nebo z feritů.

Na obrázku 4.3 jsou znázorněny demagnetizační křivky pro různé permanentní magnety.



Obrázek 4.3 Demagnetizační křivky pro různé materiály PM [3]

Přestože tyto materiály jsou považovány za poměrně drahé, vysoké teplotní rozmezí a chemická odolnost materiálů je však činí velmi výhodné. Zejména SmCo magnety mohou být použity tam, kde provozní teploty překročí  $260^\circ\text{C}$ . V aplikacích, kde je potřeba silný magnet, odolný vůči korozi, který bude vystaven vysokým teplotám, zůstává SmCo bezkonkurenční. Vzhledem k tomu, že jsou permanentní magnety často umístěny v cestě hlavního toku  $d$  osy a relativní permeabilita magnetu je blízká jedné, výběr magnetu výrazně ovlivňuje magnetizační indukčnost v  $d$  ose. Magnety s vysokou hustotou energie, jako jsou vzácné zeminy umožňují větší indukčnost osy  $d$ , než je to možné u feritových magnetů, což vede k vysokému účinníku a vysoké efektivitě v rámci většího rozsahu napájecího napětí.

Existuje však riziko demagnetizace, pokud je rotor přehřátý nebo při příliš velkém indukovaném proudu ve vinutí a v rotorových tyčích. Při spouštění motoru může také dojít k částečné nebo úplné demagnetizaci. Proto je velmi důležité správně odhadnout nárůst teploty, zajistit normální chod motoru bez poškození izolace statorového vinutí a zamezit demagnetizaci materiálu permanentních magnetů. Existují dvě hlavní příčiny ohřevu motoru: ztráty v mědi a v železe. Pokud se jedná o indukční motor, ztráty v rotoru zahrnují dvě složky: ztráty v železe a ztráty v kleci rotoru. Díky synchronní rychlosti rotoru v synchronních motorech spouštěných ze sítě zanikají ztráty v kleci rotoru, nebo jsou téměř zanedbatelné.

Proto je teplota rotoru o 30 % menší než u asynchronního motoru se stejným výstupním výkonem. Avšak doba rozběhu synchronního stroje spouštěného ze sítě může být delší, je třeba přehřátí rotoru ověřit při návrhu.

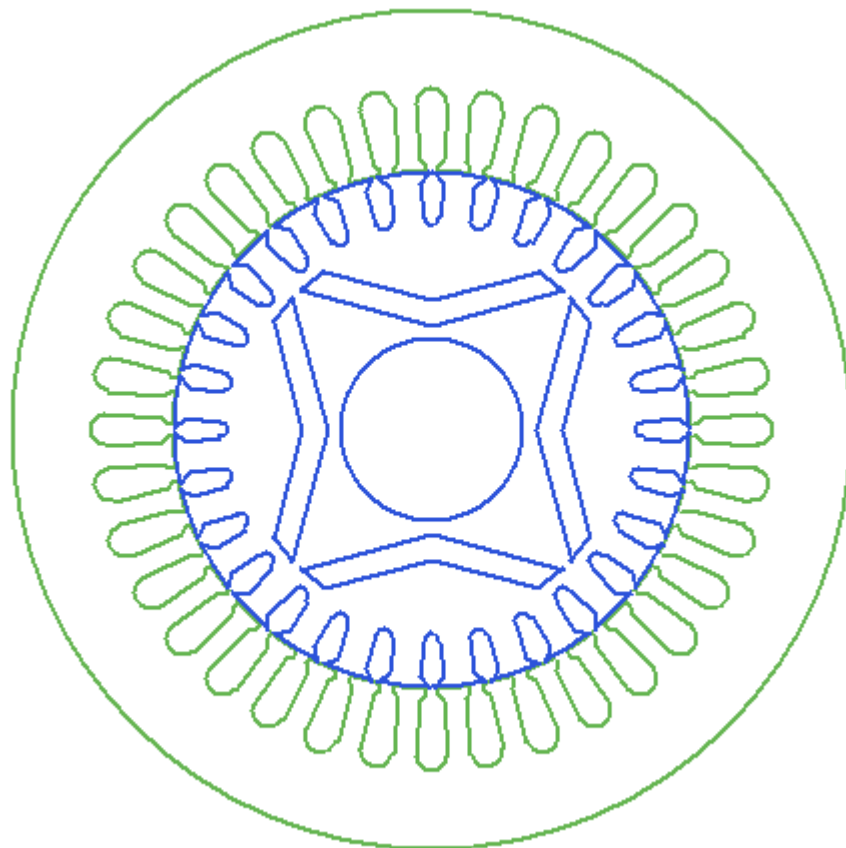
V této práci byly vybrány neodymové magnety. Tyto magnety mají dobrou odolnost vůči demagnetizaci a taky velkou magnetickou sílu, což je potřeba z důvodu toho, že v rotoru není dostatek místa pro velké magnety, proto je zvolen menší magnet s větší silou. Nevýhodou však je relativně nízká teplota (nad 80 °C), při které magnety ztrácejí magnetické vlastnosti. Tato práce ale prakticky neřeší přehřívání rotoru ani demagnetizaci magnetů.

Celá 4. kapitola čerpá z [3].

#### 4.1.2 Návrh rotoru v programu RMXprt

V programu RMXprt byl vytvořen model asynchronního motoru, následně byl upraven rotor, konkrétně byly přidány permanentní magnety podle zvolené topologie a byla upravena délka drážky.

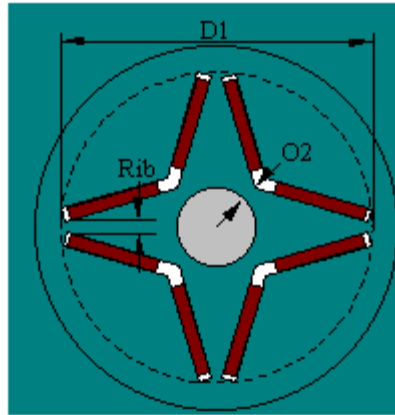
Na obrázku 4.4 je vykreslen řez statorem a rotorem v programu RMXprt



Obrázek 4.4 Řez statorem a rotorem

Při návrhu v programu RMXprt je nejprve potřeba určit jednotlivé proměnné a ty ostatní dopočítat. Rotorová drážka je stejná jako u asynchronního motoru. Nejprve bylo potřeba určit vnější průměr rotoru.

Pro názornost je zde uveden obrázek rotoru s jednotlivými parametry.



Obrázek 4.5 Rotor s magnety [5]

Vnější průměr rotoru

$$D_2 = D - 2\delta = 84 - (2 \cdot 0,3) = 83,6 \text{ mm} \quad (4.1)$$

Vnitřní průměr rotoru

$$\begin{aligned} D_1 &= D - 2(h_{s0} + h_{s1} + h_{s2} + \frac{b_{s2}}{2} + h_{r2}) = \\ &= 83,6 - 2 \cdot \left(0,01 + 2 + 10 + \frac{1,96}{2} + 1,5\right) = 54,62 \text{ mm} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Hodnota  $h_{r2} = 1,5 \text{ mm}$ . Je to hodnota můstku neboli délka od konce rotorové drážky k začátku permanentnímu magnetu.

Dále hodnota  $b_{s2}$ , to je šířka spodní části drážky, je proměnná podle velikosti výšky drážky. Pro začátek je velikost  $h_{s2}$  zvolena na  $10 \text{ mm}$ .

Šířka spodní části drážky

$$b_{s2} = b_{s1} - 2h_{s2} \tan(6,39) = 4,2 - 2 \cdot 10 \cdot \tan(6,39) = 1,96 \text{ mm} \quad (4.3)$$

Délka magnetu

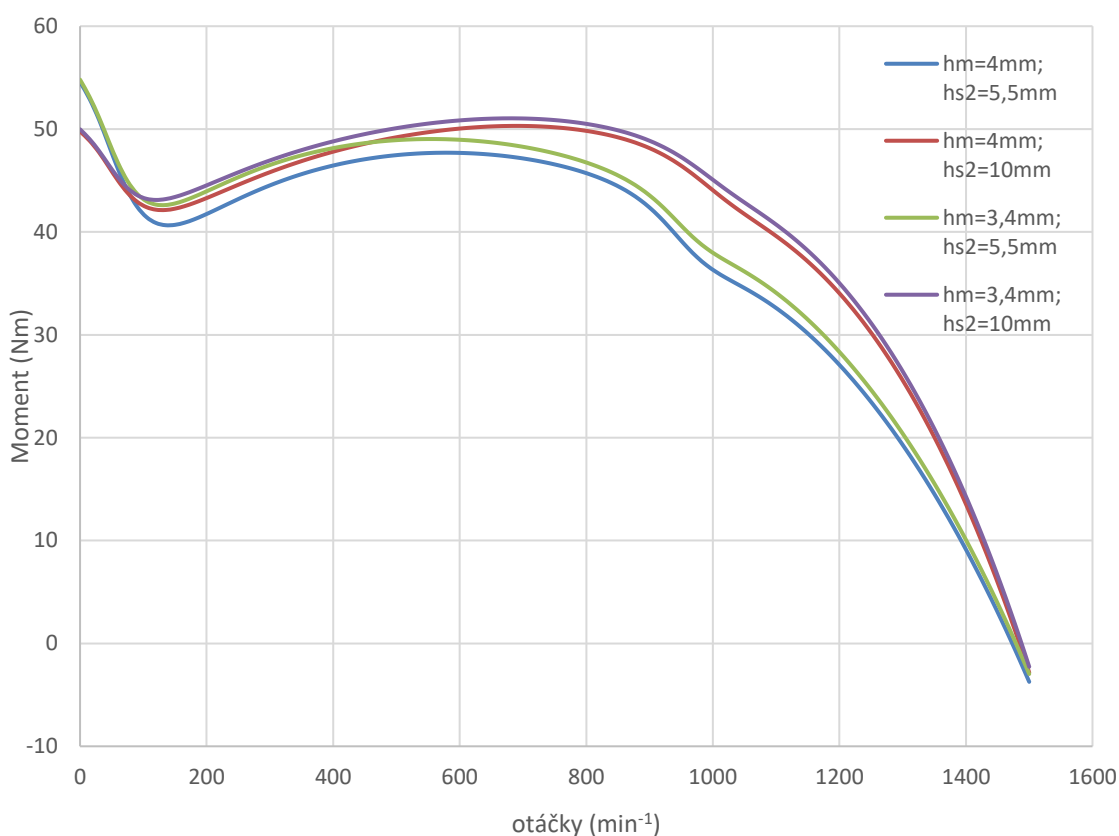
$$\begin{aligned} l_m &= 2 \left( \left( \frac{D_1}{2\sqrt{2}} - h_m \right) - \frac{R_{ib}}{\sqrt{2}} \right) = 2 \cdot \left( \left( \frac{54,62}{2\sqrt{2}} - 3,4 \right) - \frac{1,5}{\sqrt{2}} \right) = \\ &= 30,13 \text{ mm} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Kde  $R_{ib} = 1,5 \text{ mm}$ .

Tloušťka magnetu je nastavena na hodnotu  $h_m = 3,4 \text{ mm}$ .

Dále hodnota  $O_2 = 2 \text{ mm}$ .

Pro dokončení návrhu je třeba zvolit optimální poměr mezi tloušťkou magnetu a výškou rotorové drážky. Proto je třeba parametrizovat tyto dvě hodnoty. Tím pádem se budou měnit i ostatní parametry. Na obrázku 4.6 je znázorněna momentová charakteristika pro různé velikosti drážky a tloušťky magnetu.



**Obrázek 4.6 Momentová charakteristika**

Z momentové charakteristiky je patrné, že nejmenší propad v oblasti záběrného momentu je při  $h_m = 3,4 \text{ mm}$  a  $h_{s2} = 10 \text{ mm}$ . Cílem bylo zachování co nejhladšího průběhu s co jak nejmenšími propady. Dalším faktorem je i menší skluz v daném bodě. Proto byly vybrány tyto hodnoty pro tloušťku magnetu a velikost drážky.

Nakonec byla vytvořena momentová charakteristika navrhnutého motoru.

Kde celkový moment se vypočte jako

$$M_{tot} = M_{mb} + M_{klec} \quad (4.5)$$

Potom zátěžný moment musí být během celého startovacího procesu menší než celkový moment vytvořený motorem.

$$M_{load} < M_{tot} < M_{mb} + M_{klec} \quad (4.6)$$

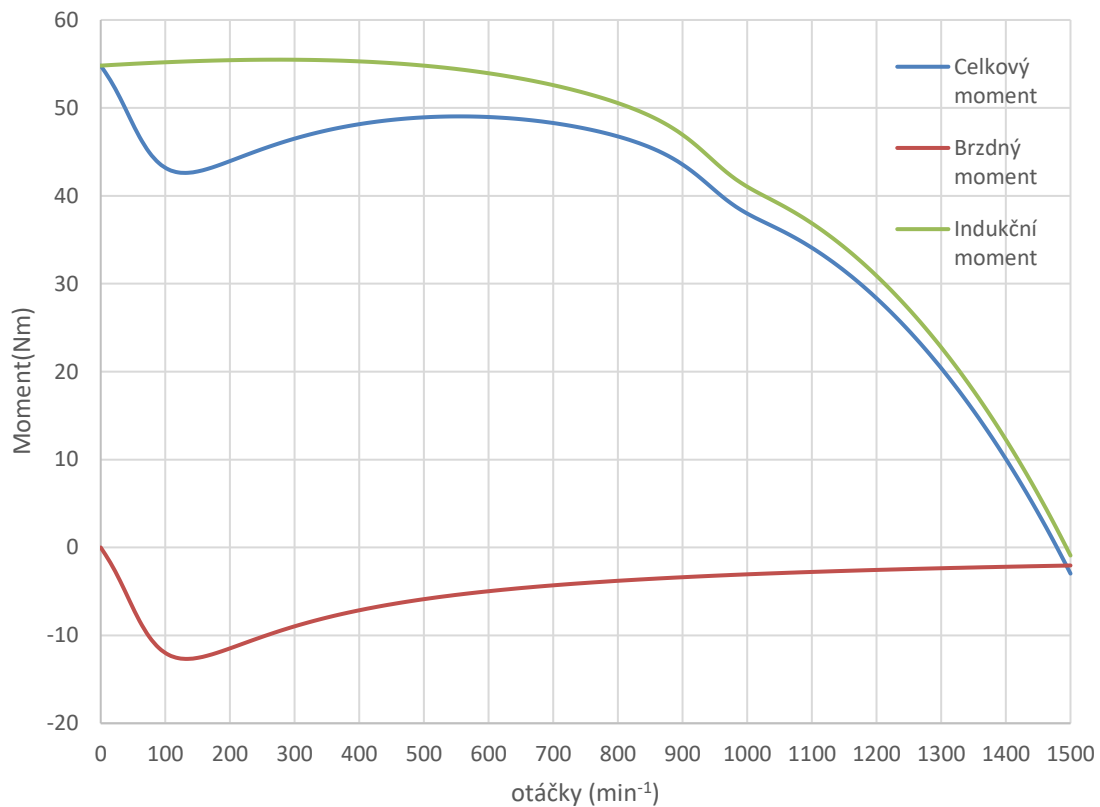
Brzdňý moment je potom přímo úměrný indukovanému napětí a reaktanci v ose q a nepřímo úměrný výsledků reaktancí os d a q, jak je patrné i z rovnice.

$$M_{mb} = -\frac{3p}{\omega} (1-s) U_i^2 R_1 \frac{R_1^2 + X_q^2 (1-s)^2}{[R_1^2 + X_d^2 X_q^2 (1-s)^2]^2} \quad (4.7)$$

Jak lze vidět na obrázku 4.7, brzdňý moment magnetu snižuje celkový moment a tím i komplikuje proces vtažení motoru.

Brzdňý moment je silně závislý na elektromotorickém napětí, které vytváří permanentní magnety. U motorů menších výkonu, kdy je odpor  $R_1$  relativně velký

dochází při vyšších rychlostech k tomu, že brzdný moment je plošší. Naopak u velkých motorů, kde je R1 relativně malý, je křivka více špičatá a vrchol nastává při nižší rychlosti. [3]



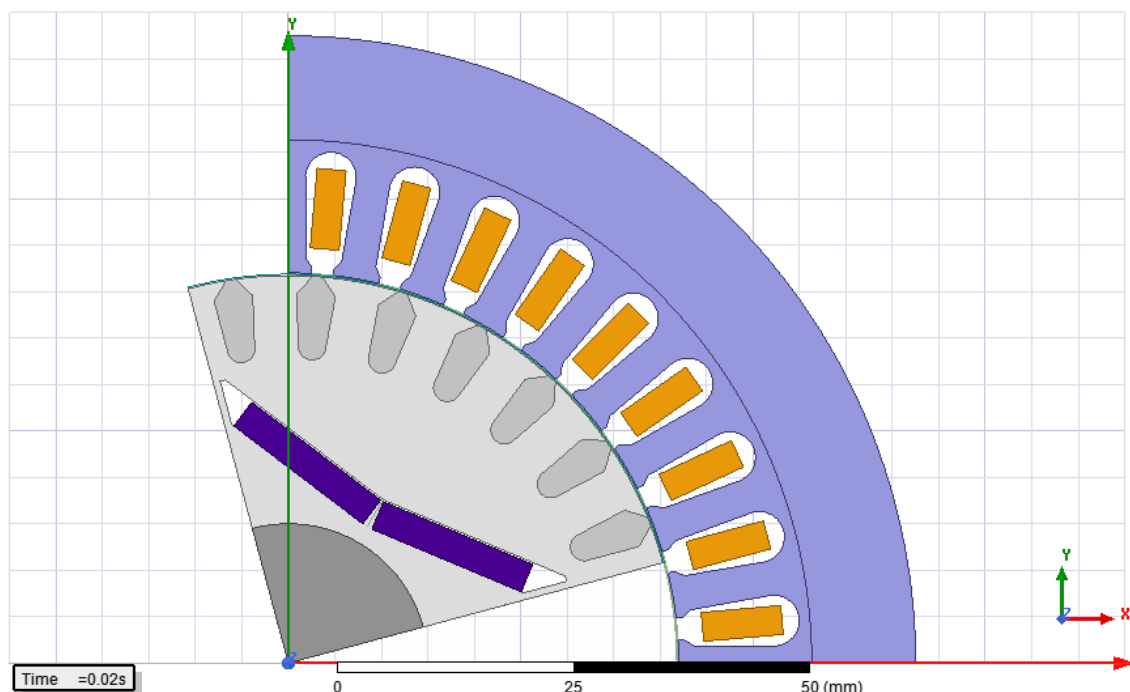
**Obrázek 4.7 Momentové charakteristiky navrhnutého motoru**

# 5 OPTIMALIZACE A ANALÝZA SYNCHRONNÍHO MOTORU SPOUŠTĚNÉHO ZE SÍTĚ

## 5.1 Optimalizace modelu

Po návrhu stroje, respektive rotoru, byla provedena analýza daného motoru. Nejprve však bylo potřeba provést optimalizační proces k vytvoření co nejúčinnější architektury rotoru a přesvědčit se, zda různé parametry, jako například délka drážky rotoru, tloušťka magnetu a jiné, jsou správně navrženy. Nakonec byla provedena analýza, která především zahrnuje ověření rozběhu daného motoru.

Nejprve byl model motoru v programu RMXprt naimportován do programu Ansys Maxwell 2D. Tento program počítá pomocí metody konečných prvků. Je to numerická metoda, která slouží k simulaci průběhů napětí, proudění tepla, jevů elektromagnetismu atd. na vytvořeném daném modelu. Princip spočívá v diskretizaci spojitého kontinua do určitého počtu prvků, kde jsou jednotlivé parametry určovány v jednotlivých bodech. Metoda konečných prvků se především používá pro kontrolu již navržených zařízení a taky pro stanovení kritického neboli nejnamáhavějšího místa konstrukce. Na obrázku 5.1 je znázorněn řez statorem a rotorem v programu Maxwell 2D.



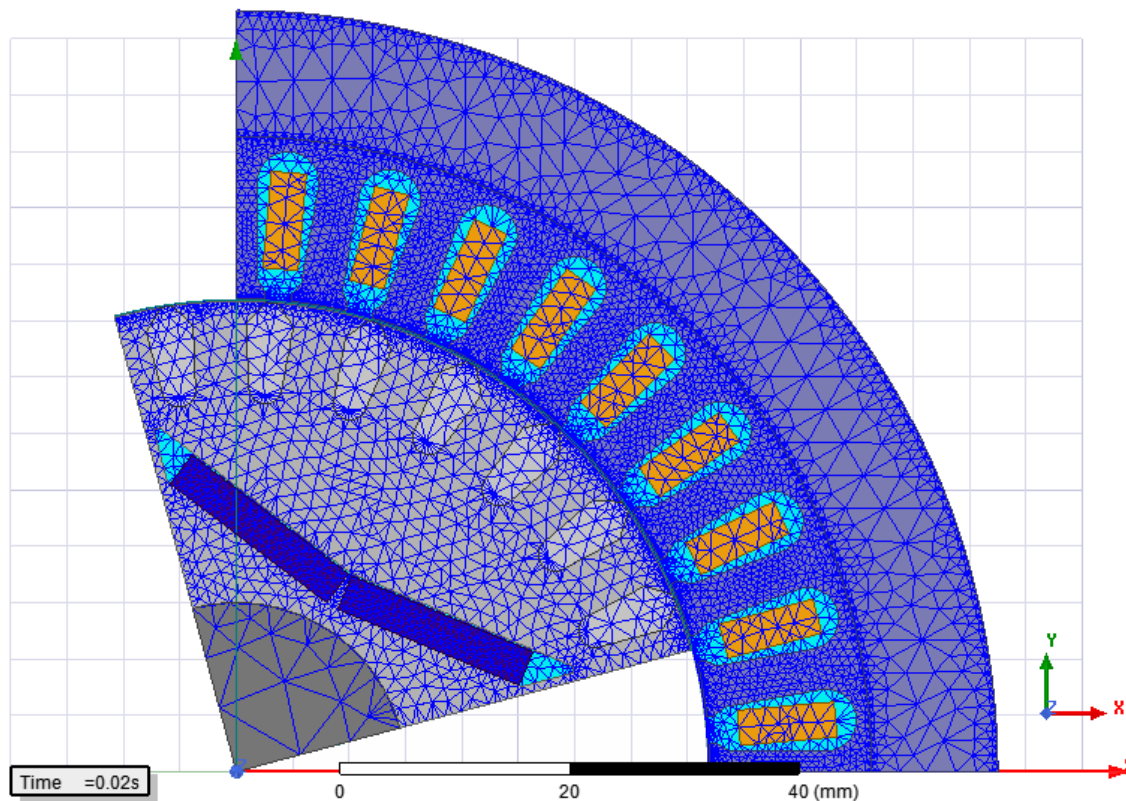
Obrázek 5.1 Řez rotorem a statorem v Maxwell 2D

Z obrázku je patrné natočení rotoru. Je to výchozí stav a rotor je natočen o  $15^\circ$  mechanických. Důvodem této hodnoty natočení je, aby byl rotor zarovnan k fázi A.



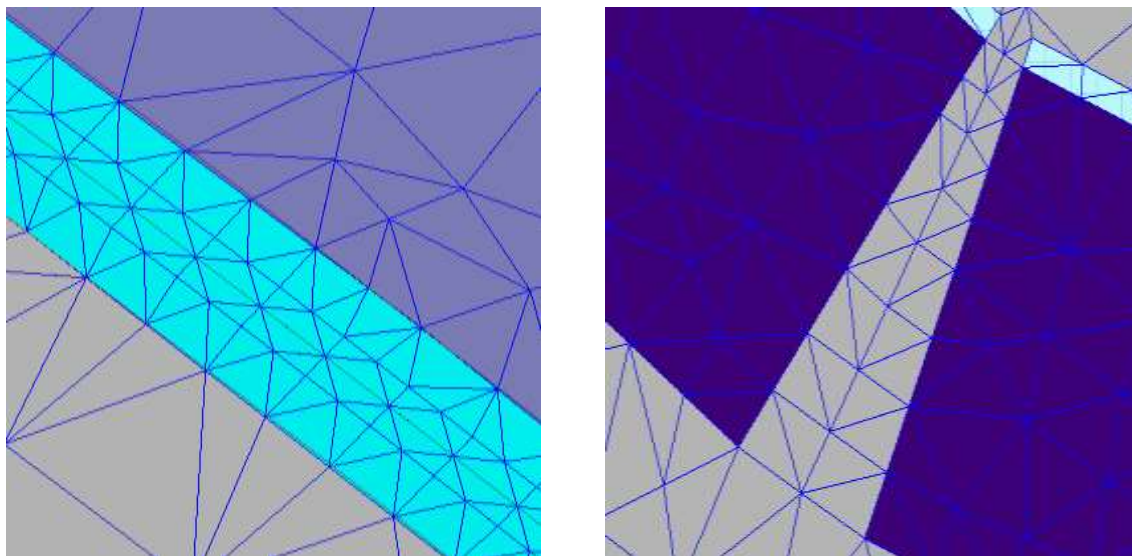
Dále lze vidět, že magnet je sestaven ze dvou částí, kde je mezi nimi malá mezera, aby byla výroba čím jak nejjednodušší. Magnety jsou v této konfiguraci natočeny o  $7,23^\circ$ .

Dále byla vytvořena 2D síť.



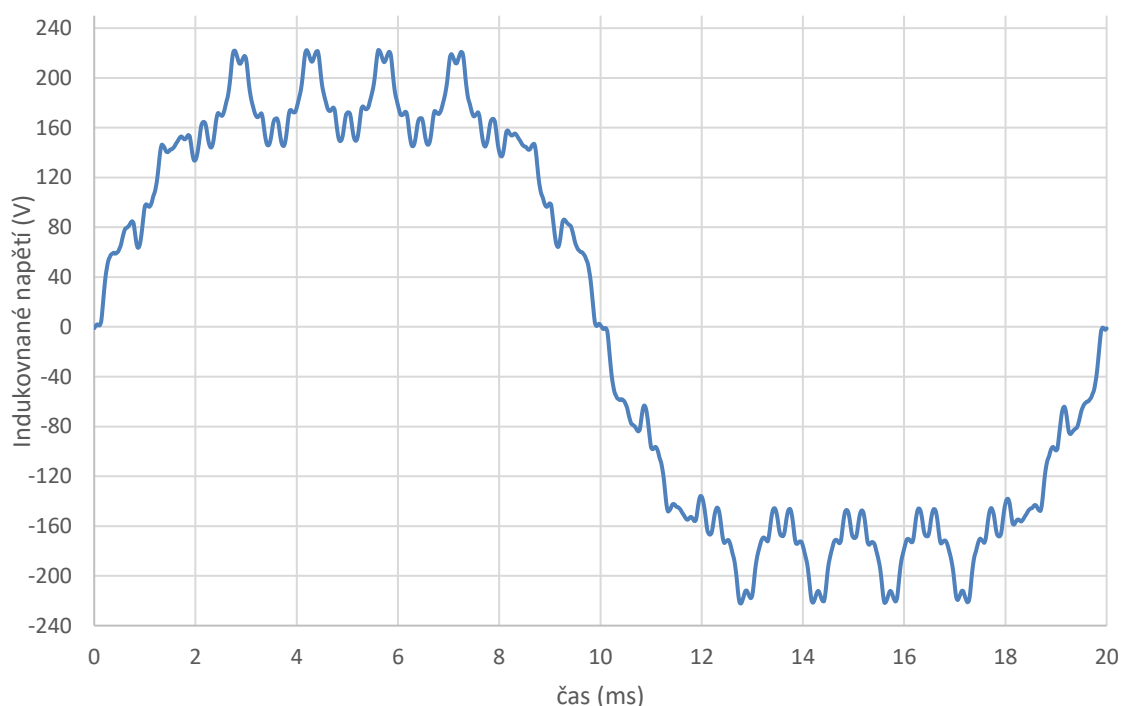
Obrázek 5.2 2D síť

Pro lepší přesnost výpočtů bylo potřeba zjemnit síť v určitých místech, hlavně ve vzduchové mezeře a taky mezi magnety.



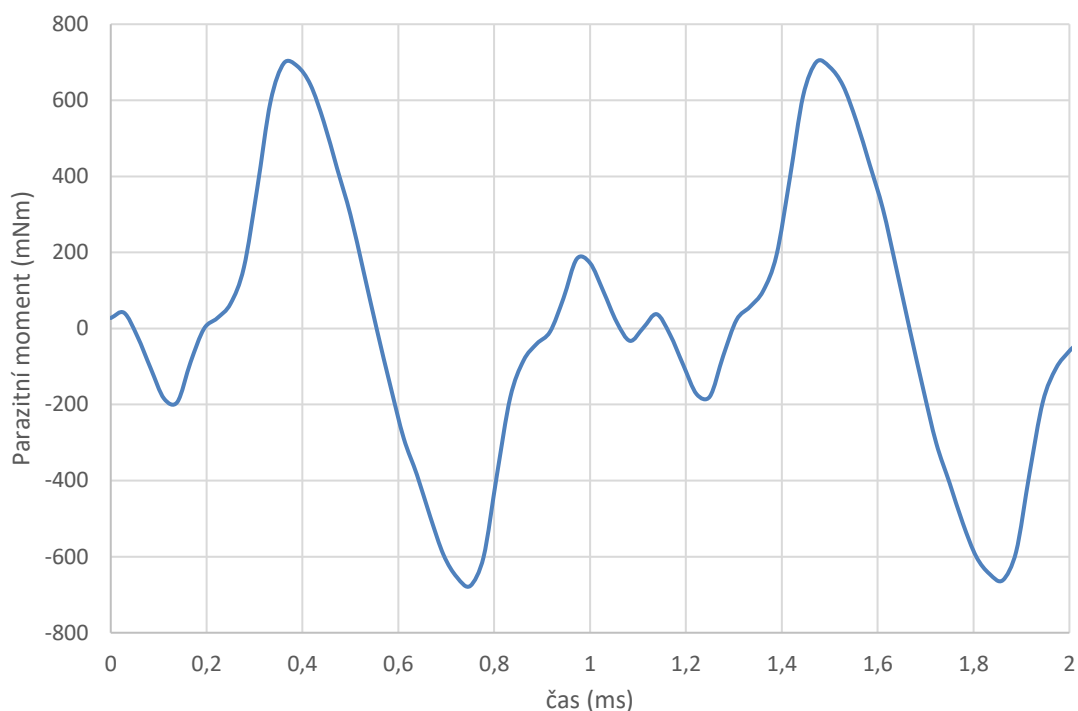
Obrázek 5.3 Jemnější síť ve vzduchové mezeře a mezi magnety

Následně byl motor spuštěn naprázdno, bez mechanického zatížení. Tudíž nebyl odebrán žádný mechanický výkon kromě ztrát v konstrukčním uspořádání mechanických částí. Poté byla spuštěna první analýza, kde se ukázalo, že efektivní hodnota indukovaného napětí je 133 V, proto byl model poupraven, ale už v prostředí Maxwell 2D. Byla snížena velikost drážky rotoru na 5,5 mm, tím pádem se zvýšilo indukované napětí na efektivní hodnotu 155 V. Tato hodnota je ale nižší než jmenovité napětí. Je to způsobeno nízkým objemem permanentního magnetu obsaženého v konstrukci rotoru. Na obrázku je znázorněn průběh indukovaného napětí ve fázi A. [6]



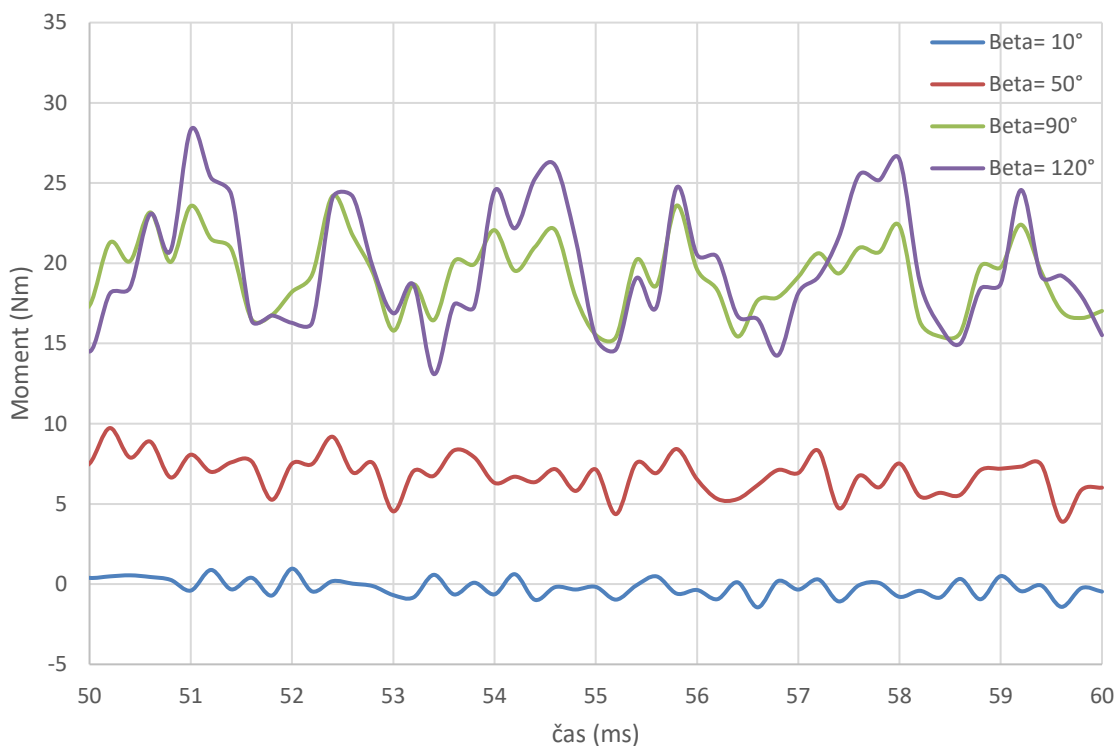
**Obrázek 5.4 Průběh indukovaného napětí**

Dále byl vykreslen parazitní moment, který vzniká vzájemným působením magnetů v rotoru a zubů ve statoru. Tento moment je závislý na šířce otevření drážky a je velmi nežádoucí pro stroj. Parazitní moment je vykreslen na obrázku 5.5. Hodnota momentu je udávána v  $mNm$ . Jsou vykresleny pouze dvě periody, jelikož však je ve statoru 36 zubů, celkový průběh má potom 36 period.



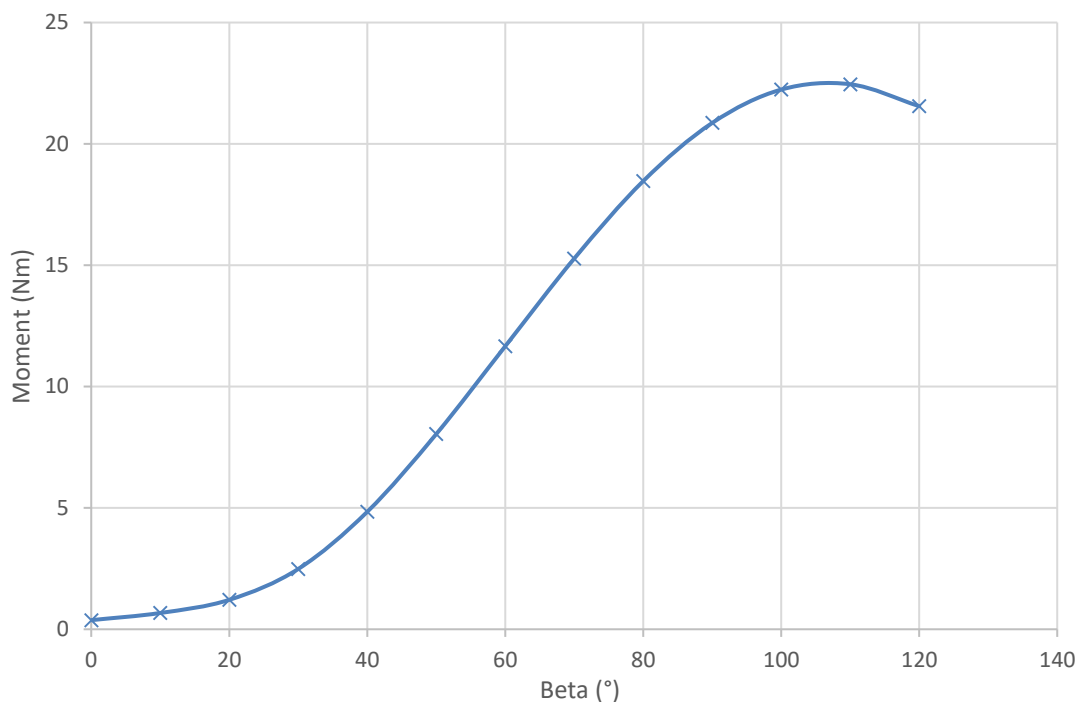
**Obrázek 5.5 Průběh parazitního momentu**

Dále byl určen zatěžovací úhel. Jelikož je ve stavu naprázdno zatěžovací úhel  $\beta$  roven nule, bylo potřeba připojením zátěže uvést motor do chodu. Následně byly vykresleny charakteristiky momentů při daném zatěžovacím úhlu.

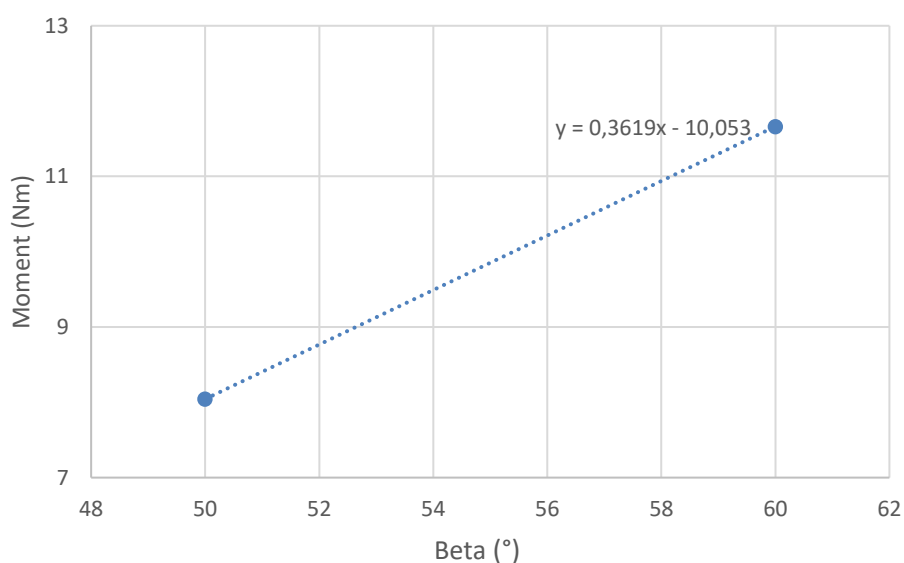


**Obrázek 5.6 Moment při daném zatěžovacím úhlu**

Z obrázku je patrné, že při hodnotě  $\beta=90^\circ$  a více jsou momentové pulzace velmi velké, což pro stroj není vůbec příznivé. Je to téměř totožné jako u klasického synchronního stroje, s výjimkou toho, že zátěžný úhel lze nastavit jen na maximální hodnotu  $90^\circ$ . Pro určení zátěžného úhlu bylo potřeba sestavit závislost momentu na zátěžném úhlu, obrázek 5.7, a následně pro hodnotu  $9,9 \text{ Nm}$ , což je jmenovitý moment motoru, najít odpovídající zátěžný úhel. Tato hodnota byla vypočtena z rovnice v grafu na obrázku 5.8, a to proložení dvou bodů a dosazením do rovnice. Hodnota zátěžného úhlu je  $55,13^\circ$ .



**Obrázek 5.7** Závislost momentu na zátěžném úhlu



**Obrázek 5.8** Určení hodnoty zátěžného úhlu

## 5.2 Analýza modelu

### 5.2.1 Rozběh motoru

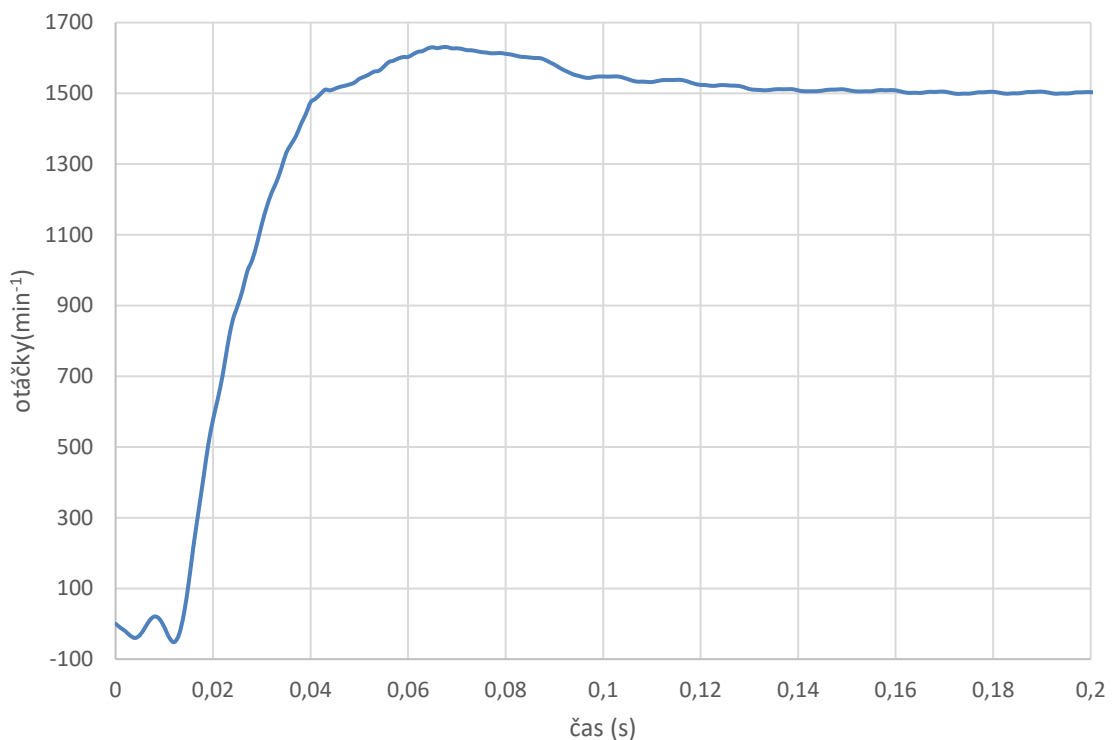
V této části byl ověřen rozběh motoru s již optimalizovanými hodnotami. Nejprve bylo potřeba zadat podmínku, kdy počáteční otáčky musí být nastaveny na  $0 \text{ min}^{-1}$ , tudíž, že se motor má rozbíhat z nulových otáček, dále tlumení, moment setrvačnosti rotoru a zátěž.

Moment setrvačnosti rotoru byl zadán z programu RMXprt, kde hodnota je  $0,0059276 \text{ kgm}^2$ . Zátěž byla nastavena na hodnotu  $9,9 \text{ Nm}$ , což je jmenovitý moment motoru.

Tlumení se vypočte jako

$$d = \frac{P_{mech}}{\omega^2} = \frac{20}{\left(\frac{2\pi \cdot 1500}{60}\right)^2} = 8,1 \cdot 10^{-4} \text{ Nm} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1} \quad (5.1)$$

Po nastavení těchto veličin byl vykreslen graf, který znázorňuje rozběh motoru z nulových otáček. Z obrázku lze vyčíst, že do  $0,12 \text{ s}$  trval přechodový děj a následné ustálení na hodnotě  $1500 \text{ min}^{-1}$ .



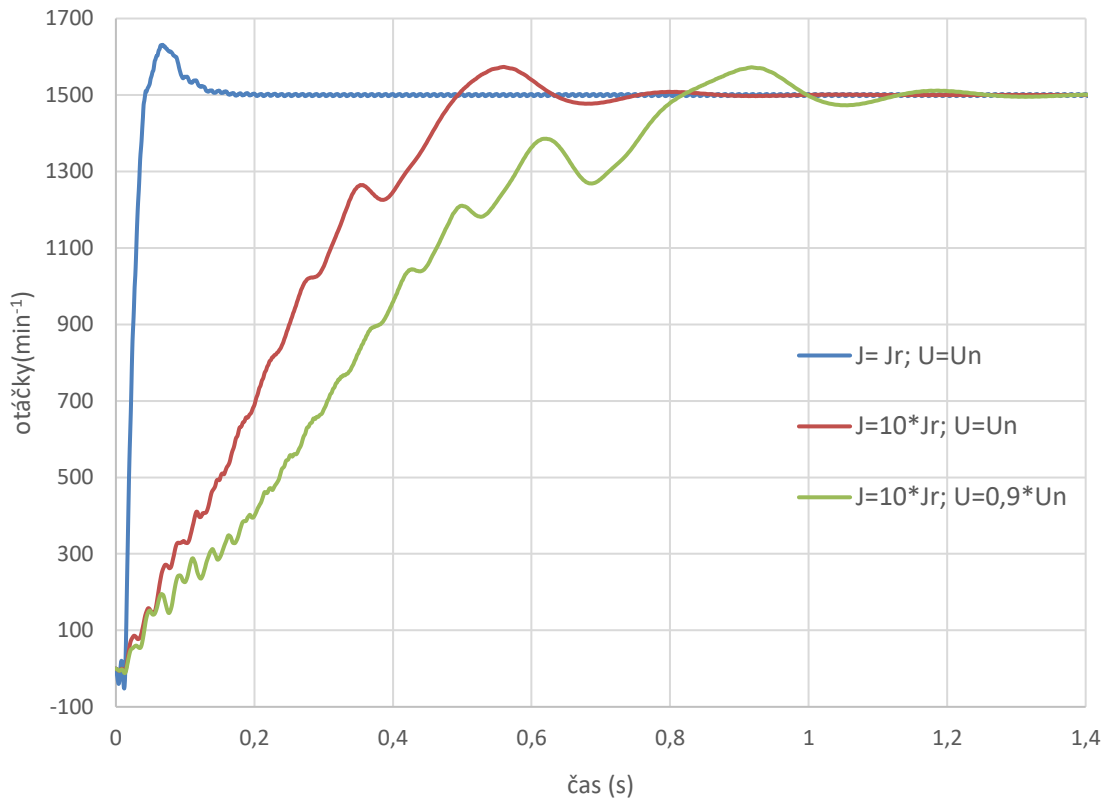
Obrázek 5.9 Rozběh motoru

Z grafu je patrné, že došlo k ustálení, tudíž byl ověřen rozběh motoru. Avšak pro správně ověření rozběhu motoru bylo potřeba splnit ještě následující podmínky, popsané v následující kapitole.

### 5.2.1.1 Rozběh motoru za nejtěžších podmínek

Bylo potřeba ověřit, zda se motor rozběhne i při:

- Sníženém napětí ( $U = 0,9 \cdot U_n$ )
- Desetinásobku momentu setrvačnosti rotoru
- Nejhorším možným natočení rotoru, což vychází na  $105^\circ$  mechanických

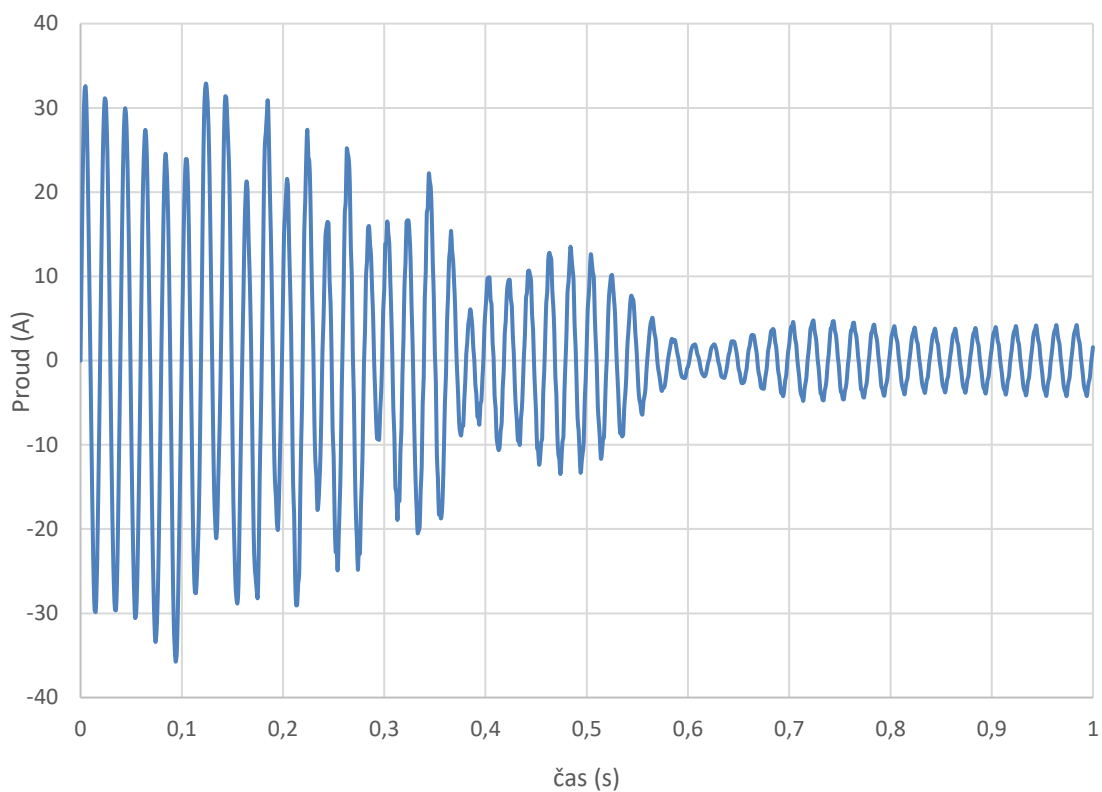


Obrázek 5.10 Průběhy rozběhu motoru při různých podmínkách

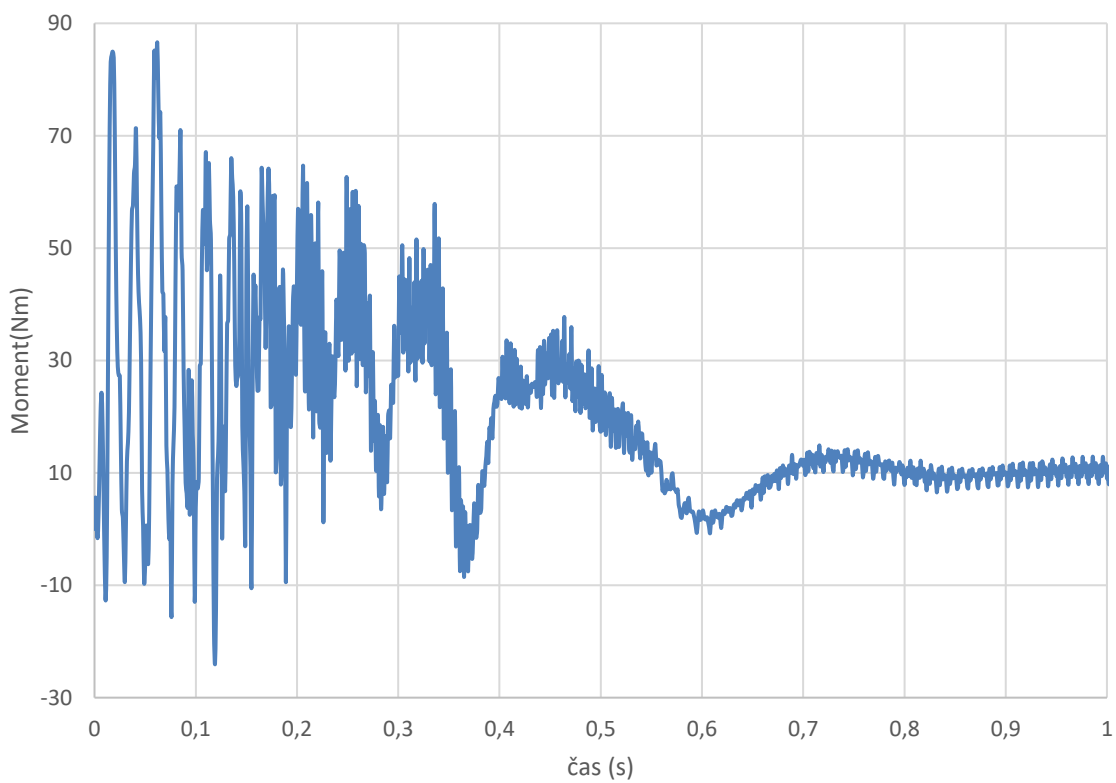
Z grafů je patrné, že i při nejtěžším rozběhu dochází k ustálení na jmenovité otáčky, ale za cenu delšího času.

Dále byly vykresleny grafy proudu ve fázi A a momentu i s přechodným dějem. Grafy byly vytvořeny při nejtěžším rozběhu, ale při jmenovitém napětí. ( $J = 10 \cdot J_r; U = U_n$ )

Jak je patrné z obrázku 5.12 při ustálení dochází k pulzacím momentu. Tento moment vytváří vibrace a akustický hluk v motoru. Je možné ho eliminovat, nebo aspoň částečně omezit například zvýšením délky vzduchové mezery, zvýšením počtu zubů nebo jejich natočením. Hodnota proudu ve fázi A v ustáleném stavu je 2,7 A a hodnota momentu v ustáleném stavu je 10,3 Nm.



**Obrázek 5.11 Proud ve fázi A**



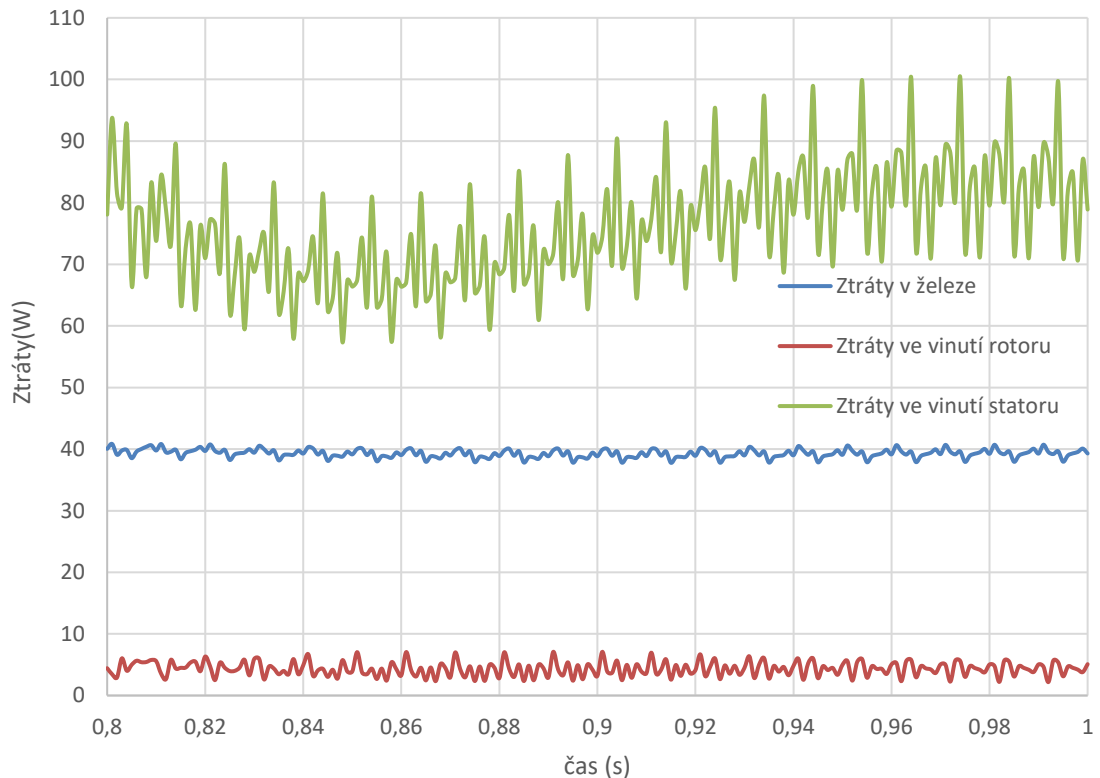
**Obrázek 5.12 Moment v závislosti na čase**

## 5.2.2 Účinnost motoru

Účinnost motoru se vypočte podle vztahu

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{js} + \Delta P_{jr} + \Delta P_m} \cdot 100$$
$$= \frac{1500}{1500 + 39,27 + 79,6 + 4,2 + 20} \cdot 100 = 91,27 \%$$
(5.2)

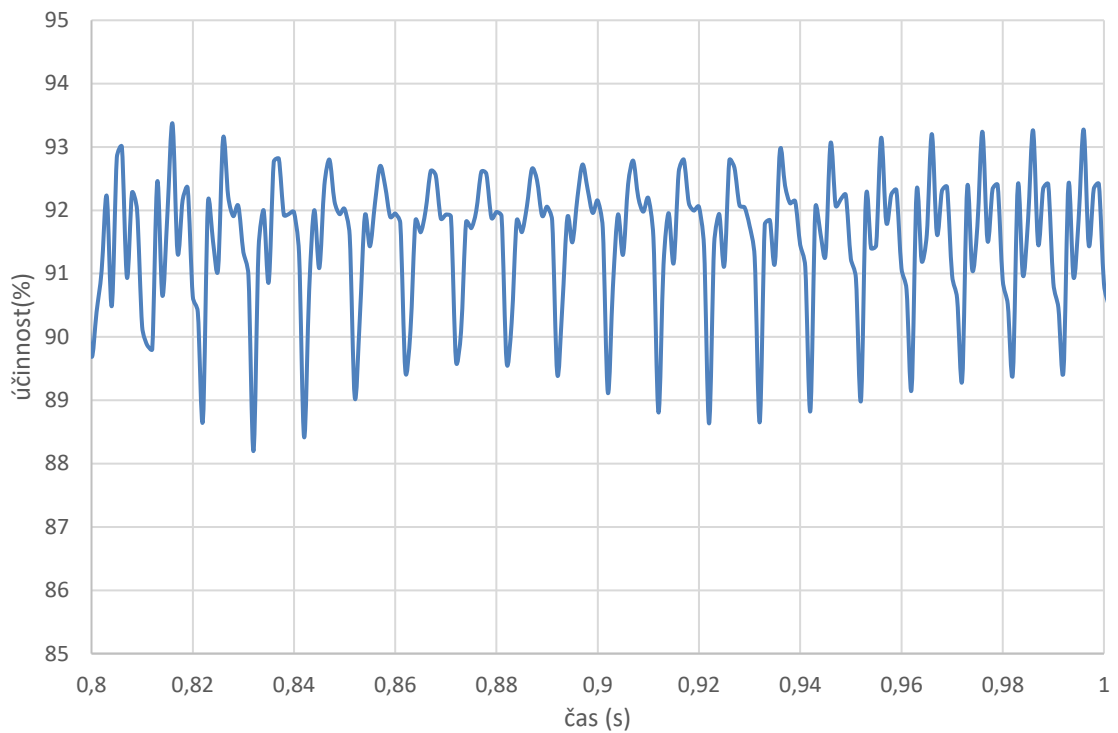
Kde jednotlivé ztráty jsou odečteny z grafu.



**Obrázek 5.13 Podíl jednotlivých ztrát**

Dále je vykreslený graf účinnosti daného motoru v ustálené oblasti, účinnost motoru je tedy vyšší než účinnost indukčního motoru. Nicméně opět jsou viditelné nežádoucí pulzace.

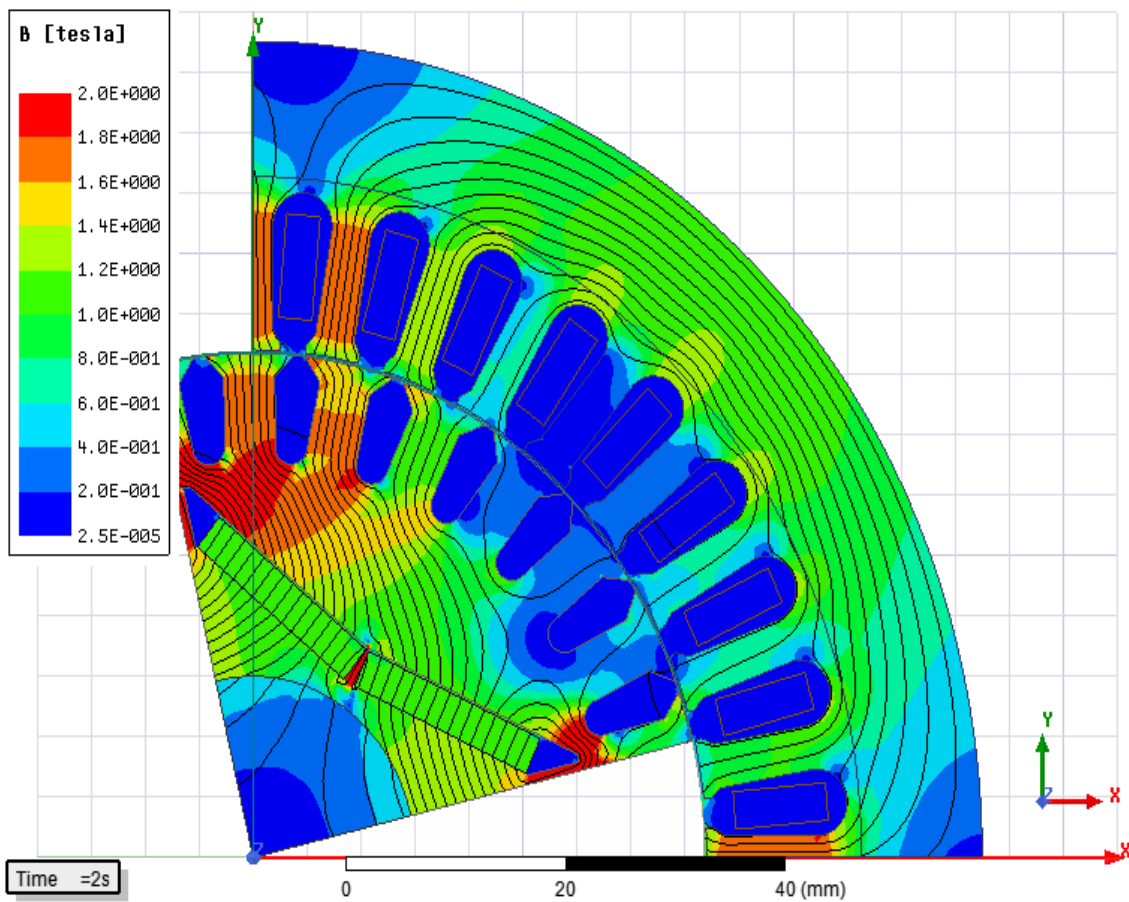




Obrázek 5.14 Účinnost motoru

### 5.2.3 Vykreslení magnetické indukce a toku

Nakonec byla vykreslena magnetická indukce a magnetický tok na daném modelu. Z obrázku 5.15 je patrné, kde se stroj přesycuje. Je to zejména v oblasti tzv. můstku, to je mezi magnetem a drážkou rotoru. Dalším místem přesycování je mezera mezi magnety. Dále lze vidět, že magnetický tok je hlavně soustředěn do d osy.



Obrázek 5.15 Vykreslení magnetické indukce a toku

## 6 ZÁVĚR

V této diplomové práci byl popsán synchronní stroj spouštěný ze sítě. V dnešní době začínají tyto stroje pomalu vytlačovat indukční motory v řadách malých výkonů, jako například ve ventilátorech, čerpadlech nebo kompresorech. Je to právě z důvodu vyšší účinnosti a účinníku. Díky zvýšenému zájmu o životní prostředí a ekologii se začíná dávat důraz hlavně na co nejvyšší energetickou účinnost, proto je zcela na místě zaměřit se právě na tyto motory. V této práci je také uveden přehled topologií rotoru.

V další části této práce byl proveden výpočet motoru pomocí výkresové dokumentace. Byl vybrán klasický třífázový asynchronní motor, bez konstrukčních zvláštností, který má otáčky  $1500 \text{ min}^{-1}$ . Byly vypočítány magnetické indukce v jednotlivých částech stroje, dále magnetické napětí a následně magnetizační proud. Dále byl proveden výpočet odporů a reaktancí pro statorové vinutí a rotorovou klec. Odpory a reaktance rotorové klece byly následně přepočítány na statorové vinutí a byl sestaven náhradní obvod. Nakonec byly vypočteny ztráty, účinnost a hodnoty jednotlivých momentů.

Poté byl vytvořen model motoru v programu RMxprt, ve kterém se zadaly rozměry stroje a jeho štítkové parametry. Dále byly zadány rozměry statorových a rotorových drážek, materiály, počet vodičů, činitel plnění železa atd. Program poté celý motor simuloval a počítal. Výstupem této simulace byly hodnoty jednotlivých parametrů. Výsledné hodnoty byly porovnány.

Dále byl v programu RMxprt upraven rotor, kde byly také vloženy permanentní magnety. Magnety byly uspořádány do tvaru písmene „V“. Výhodou tohoto uspořádání je to, že je v rotoru dostatek místa na další úpravu drážky rotoru. Další výhodou je, že se tok soustředí hlavně do osy d. Následně byl model naimportován do programu Ansys Maxwell 2D, kde proběhla optimalizace modelu a následná analýza. Nejprve byla v programu vytvořena 2D síť. Tato síť byla zjemněna ve vzduchové mezeře a v mezeře mezi magnety z důvodu zpřesnění výsledků. Potom byla upravena drážka rotoru, konkrétně zkrácení délky drážky, z důvodu zvýšení indukovaného napětí. Dále byl sestaven graf momentu na zátěžném úhlu, kde byl stanoven zátěžný úhel pro daný motor. Tento zátěžný úhel má hodnotu  $55,13^\circ$ . Po optimalizaci motoru byl proveden rozběh motoru a samotné ověření, zda se motor rozběhne. Rozběh se provází z nuly otáček. Byl také nastaven moment setrvačnosti motoru a také tlumení. Po přechodovém ději se motor ustálil na jmenovité hodnotě otáček, a to za čas 0,2 s. Nicméně rozběh bylo třeba ověřit i při nejhorších podmínkách, a to při sníženém napětí, deseti násobku momentu setrvačnosti a při nejhorším možném natočení rotoru. Tato podmínka byla splněna a motor se ustálil za 1,2 s. Nakonec byly vypočítány ztráty a také účinnost. Účinnost

motoru ve jmenovitém bodě je 91,27 %. Pokud porovnáme účinnost asynchronního motoru se synchronním motorem napájeným ze sítě, je účinnost u synchronního stroje větší. U indukčního motoru je účinnost ve jmenovitém bodě 84,7 % (vypočteno analyticky) a 84,5 % (RMxprt). Tudíž byla splněna počáteční podmínka a to, že ve jmenovitém bodě je účinnost synchronního stroje napájeného ze sítě vyšší. Nicméně i tento stroj má zranitelná místa. Jsou to především permanentní magnety. Zvláště při výrobě je to znatelné. Pokud jsou například magnety vloženy do rotoru ještě před tím, než dojde ke svařování rotorové klece, může magnet degradovat a tím i zhoršit výkon stroje. Pokud jsou magnety příliš tenké, kromě toho, že jsou křehké a způsobují výrobní problémy, stávají se citlivější na demagnetizaci. Dalším problémem jsou momentové pulzace, které způsobují nežádoucí vibrace a akustický hluk. Momentové pulzace lze částečně omezit, například zvýšením délky vzduchové mezery, to bude mít vliv na magnetickou indukci a dojde ke snížení magnetického toku a momentu, což je nežádoucí. Omezit momentové pulzace lze také zvýšením počtu drážek nebo skosením statorových nebo rotorových drážek, ovšem je třeba zvolit správné zkosení. Nevýhoda této úpravy je snížené indukované napětí.

Nakonec byla ještě vykreslena magnetická indukce a tok v daném motoru. Z obrázku je patrné, že v oblasti můstku dochází k největšímu přesycování, to je mezi koncem magnetu a drážkou rotoru, avšak přesycení v těchto místech je žádoucí.

# Literatura

- [1] MARČIČ, Tine. A short review of energy- efficient line- start motor design [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z:  
<http://www.red.pe.org.pl/articles/2011/3/31.pdf>
  
- [2] MELFI, Mike, Roger DAUGHERTY a Robbie MCELVEEN. Line start permanent magnet motors – Starting, standards and application guidelines [online]. [cit. 2018-01-03]. Dostupné z:  
<http://ieeexplore.ieee.org/document/6961876/references>
  
- [3] Vera Elistratova. Optimal design of line-start permanent magnet synchronous motors of high efficiency. Electric power. Ecole Centrale de Lille, 2015. English.
  
- [4] KOPYLOV I. P.: Stavba elektrických strojů. 1. vydání Praha: Státní nakladatelství technické literatury; Moskva: Mir, 1988
  
- [5] ANSYS RMxprt. Ansys [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z:  
<http://www.ansys.com/products/electronics/ANSYS-RMxprt>
  
- [6] BIANCHI, Nicola. Line-Start PM-Assisted Synchronous Motor Design, Optimization, and Tests. [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z:  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/7946186/>

# Seznam symbolů, veličin a zkratek

$b_{zr}$	-	šířka zubu rotoru ( $mm$ )
$b_{zs}$	-	šířka zubu statoru ( $mm$ )
$c$	-	Hopkinsonův činitel (-)
$\cos \varphi$	-	účinník (-)
$D$	-	vnitřní průměr statoru ( $mm$ )
$D_{kn}$	-	střední průměr kruhu nakrátko ( $mm$ )
$f$	-	napájecí frekvence ( $Hz$ )
$h_{jr}$	-	výška jha rotoru ( $mm$ )
$H_{jr}$	-	magnetická intenzita jha rotoru ( $Am^{-1}$ )
$H_{js}$	-	magnetická intenzita jha statoru ( $Am^{-1}$ )
$h_{js}$	-	výška jha statoru ( $mm$ )
$H_{zr}$	-	magnetická intenzita zubu statoru ( $Am^{-1}$ )
$H_{zs}$	-	magnetická intenzita zubu statoru ( $Am^{-1}$ )
$I_{nr}$	-	proud v jedné tyči klece rotoru ( $A$ )
$I_{ns}$	-	jmenovitý proud vinutí statoru jedné fáze ( $A$ )
$k_B$	-	činitel tvaru pole (-)
$k_c$	-	Carterův činitel (-)
$k_{Fe}$	-	činitel plnění železa (-)
$k_{v1}$	-	činitel statorového vinutí
$L$	-	celková délka efektivních vodičů jedné fáze vinutí ( $mm$ )
$l_e$	-	efektivní délka stroje ( $mm$ )
$L_{jr}$	-	střední délka siločáry ve jhu rotoru ( $mm$ )
$L_{js}$	-	střední délka siločáry ve jhu statoru ( $mm$ )
$L_{zr}$	-	délka siločáry v zubu rotoru ( $mm$ )
$L_{zs}$	-	délka siločáry v zubu statoru ( $mm$ )
$m$	-	počet fází (-)
$M_{klece}$	-	indukční moment ( $Nm$ )
$M_{mb}$	-	brzdny moment ( $Nm$ )
$M_{tot}$	-	celkový moment ( $Nm$ )
$N$	-	počet závitů na jednu fázi (-)
$n$	-	synchronní otáčky ( $min^{-1}$ )
$n_1$	-	jmenovité otáčky ( $min^{-1}$ )
$p$	-	počet pólových dvojic (-)
$P_2$	-	výkon motoru ( $W$ )
PM	-	permanentní magnet
$Q_r$	-	počet drážek rotoru (-)
$Q_s$	-	počet drážek statoru (-)

$R_{kn}$	-	odpor kruhu nakrátko ( $\Omega$ )
$S_{kn}$	-	příčný průřez kruhu nakrátko ( $mm^2$ )
$S_t$	-	průřez tyče ( $mm^2$ )
$t_{dr}$	-	drážková rozteč rotoru (mm)
$t_{ds}$	-	drážková rozteč statoru (mm)
$U_f$	-	fázové napětí (V)
$\delta$	-	vzduchová mezera (mm)
$\mu_0$	-	permeabilita vakua ( $Hm^{-1}$ )
$\Delta$	-	činitel přepočtu proudů v kruhu na proud v tyči (-)
$\Delta P_{Fe_h}$	-	hlavní ztráty v železe (W)
$\Delta P_{pr}$	-	pulzní ztráty v zubech rotoru (W)
$\Delta P_{\delta pr}$	-	povrchové ztráty rotoru (W)
$\lambda_{cr}$	-	činitel magnetické vodivosti čel vinutí rotoru (-)
$\lambda_{cs}$	-	činitel magnetické vodivosti čel vinutí statoru (-)
$\lambda_{difr}$	-	činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu rotorového vinutí
$\lambda_{difs}$	-	činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu statorového vinutí
$\lambda_{dr}$	-	činitel magnetické vodivosti drážky rotoru (-)
$\lambda_{ds}$	-	činitel magnetické vodivosti drážky statoru (-)

# Seznam příloh

Příloha 1. CD s vytvořeným skriptem v programu Matlab pro výpočet asynchronního motoru, je tam i BH křivka daného plechu.