

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

FEM simulace momentové charakteristiky asynchronního motoru

FEM Simulation of Torque Characteristic of Asynchronous Motor

2017

Bc. Martin Zatloukal

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Martin Zatloukal

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907T001 Elektroenergetika

Téma:

FEM simulace momentové charakteristiky asynchronního motoru
FEM Simulation of Torque Characteristic of Asynchronous Motor

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Teoretický rozbor (konstrukční provedení stroje)
3. Vytvořte numerický model vybraného asynchronního motoru
4. Proved'te simulaci momentové charakteristiky motoru
5. Vyhodnocení simulace a diskuze nad výsledky analýzy
6. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:


- MENTLÍK, Václav, et al. Diagnostika elektrických zařízení, 2008, Praha, BEN
- KOPYLOV, Igor, Petrovič. Stavba elektrických strojů, 1988, Praha, SNTL/MIR
- CIGÁNEK, Ladislav. Stavba elektrických strojů, Praha, 1958, SNTL
- KAČOR, Petr. Vybrané typy elektrických strojů, Ostrava, 2010, VŠB-TU Ostrava
- Katalogy a katalogové listy
- Odborné a technické www stránky
- Technické normy

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Kačor, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 27. dubna 2017



.....
Bc. Martin Zatloukal

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval panu Ing. Petrovi Kačorovi, Ph. D. za poskytnutí odborného vedení a cenné připomínky při vytváření mé diplomové práce a Ing. Petrovi Chrobákovi za odbornou konzultaci a podnětné rady, které mi pomohly při psaní této diplomové práce.

Abstrakt

V této diplomové práci je popsán asynchronní motor a jeho konstrukční uspořádání. Jsou popsány a uvedeny díly, ze kterých se asynchronní motor skládá, princip jeho činnosti, náhradní schéma a zapojení svorkovnice pro připojení motoru k síti. Diplomová práce se zabývá simulací momentové charakteristiky pomocí metody konečných prvků v program ANSYS Maxwell. Momentová charakteristika je zde teoreticky rozebrána a popsána s uvedenými možnostmi měření momentové charakteristiky v praxi. Po provedení simulace je následně momentová charakteristika vyhodnocena z hlediska synchronních a asynchronních momentů, které jsou taktéž popsány v teoretické části. Dále jsou uvedeny příklady, jak potlačit parazitní momenty a synchronní momenty. Simulováno bylo natočení drážek rotoru o 10° a srovnání s rotorem bez natočených drážek.

Klíčová slova

ANSYS Maxwell, asynchronní elektromotor, momentová charakteristika

Abstract

Diploma thesis is focused to asynchronous motor and its mechanical design. Principle of operation, equivalent circuit, terminal block wiring and the parts of alternating current motor are described within as well. The main objective of thesis deal with simulation of torque characteristic using the finite element method in ANSYS Maxwell software. Theoretical analysis of torque characteristic is, along with mentioned real measurement methods, described. Simulation implementation was followed by the evaluation of torque characteristic which is based on synchronous and asynchronous moments. These are described in theoretical part of thesis. In examples are mentioned methods for suppressing parasitic and synchronous moments. Simulation was performed on one skew width of the rotor grooves and rotor positional matching without any rotation of grooves.

Key words

ANSYS Maxwell, asynchronous motor, torque characteristic

OBSAH

Seznam použitých symbolů a zkratk	8
Seznam ilustrací	11
Seznam tabulek	13
1 Úvod.....	14
2 Asynchronní stroj.....	15
2.1 Princip činnosti	17
2.2 Vznik točivého magnetického pole	18
2.3 Vznik tažné síly.....	22
2.4 Náhradní schéma asynchronního elektromotoru	23
2.4.1 Indukované napětí.....	23
2.4.2 Činitel vinutí.....	23
2.5 Zapojení svorkovnice.....	25
2.6 Momentová charakteristika asynchronního stroje	26
2.7 Skluz	27
2.8 Synchronní otáčky stroje	28
2.9 Momentová charakteristika asynchronního motoru.....	29
2.9.1 Moment indukčního motoru	29
2.9.2 Klossův vztah	30
2.10 Měření momentové charakteristiky	32
2.10.1 Statické měření momentové charakteristiky.....	32
2.10.2 Dynamické měření momentové charakteristiky.....	32
2.11 Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu	33
2.12 Vliv natočení drážek.....	34
2.13 Činitel natočení drážek.....	34
2.14 Činitel zešíkmení	36
2.15 Vliv vyšších harmonických na momentovou charakteristiku	37
2.16 Možnosti potlačení přídavných momentů.....	38
2.17 Synchronní a asynchronní momenty.....	39
3 Návrh asynchronního motoru v ANSYS Maxwell	43
3.1 Parametry rotoru.....	43
3.1.1 Rozměry rotorové drážky	43
3.2 Parametry statoru	45
3.2.1 Rozměry statorové drážky.....	45
3.3 Přidání nového materiálu do knihovny	51
4 Simulace momentové charakteristiky	53
4.1 Změna momentu setrvačnosti.....	53
4.2 Natočení rotorových drážek o 10°	56

5	Vyhodnocení simulace a výsledků simulace	60
	5.1 <i>Vyšetření synchronních momentů</i>	60
6	Závěr	61
	Literatura	62

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Význam	Jednotka
apod.	a podobně	-
atd.	a tak dále	-
f	Frekvence	(Hz)
FEM	Finite Elements Method (Metoda konečných prvků)	-
i	Okamžitá hodnota proudu	(A)
I_{μ}	Magnetizační proud	(A)
I_0	Proud naprázdno	(A)
I_1	Proud statoru	(A)
I_{21}	Proud rotoru	(A)
I_{Fe}	Proud ztrátovým rezistorem R_{Fe}	(A)
I_{max}	Maximální hodnota proudu	(A)
J	Magnetické polarizace	(T)
J	Moment setrvačnosti	(kg.m ²)
k_{γ}	Činitel natočení drážek	(-)
L	Indukčnost	(H)
M	Moment	(N.m ⁻¹)
M_{max}	Maximální moment	(N.m ⁻¹)
M_n	Jmenovitý moment	(N.m ⁻¹)
M_z	Záběrný moment	(N.m ⁻¹)
n	Otáčky	(ot.min ⁻¹)
např.	například	-
n_r	Rotorové otáčky	(ot.min ⁻¹)

n_s	Synchronní otáčky	(ot.min ⁻¹)
p	Počet pólových dvojic	(-)
P_s	Ztráty v jádře	(W.kg ⁻¹)
Q	Počet drážek	(-)
R_1	Odpor statoru	(Ω)
R_{21}	Rotorový odpor přepočítaný na stator	(Ω)
R_{Fe}	Ztrátový rezistor reprezentující ztráty v železe	(Ω)
s	Skluž	(-)
s_n	Jmenovitý skluz	(-)
s_{zv}	Skluž zvratu	(-)
t	Čas	(s)
t_{d1}, t_{d2}	Drážkové rozteče statoru a rotoru	(m)
$tzv.$	takzvaných	-
U_1	Napájecí napětí	(V)
U_i	Indukované napětí statoru	(V)
μ_0	Permeabilita vakua	(H.m ⁻¹)
ν	Řád vyšší harmonické	(-)
x_μ	Magnetizační reaktance	(Ω)
$x_{\sigma 1}$	Rozptylová reaktance statoru	(Ω)
$x_{\sigma 21}$	Rozptylová reaktance rotoru přepočítaná na stator	(Ω)
Z_1	Počet statorových drážek	(-)
Z_2	Počet rotorových drážek	(-)
α	Drážkový úhel	(rad; °)
γ	Úhel natočení drážek	(rad; °)
δ	Vzduchová mezera	(mm)

δ	Velikost vzduchové mezery	(m)
λ	Činitel magnetické vodivosti	(-)
ξ_{zv}	Činitel zešikmení	(-)
ϕ	Magnetický tok	(Wb)

Seznam ilustrací

Obr. 1 Řez uzavřeným asynchronním kroužkovým motorem.....	16
Obr. 2 Rotor asynchronního motoru - klecové vinutí	16
Obr. 3 Chod třífázového asynchronního elektromotoru.....	17
Obr. 4 Uspořádání cívek pro vznik točivého pole.....	18
Obr. 5 Vznik točivého magnetického pole.....	21
Obr. 6 Závit v točivém magnetickém poli.....	22
Obr. 7 Náhradní schéma asynchronního motoru.....	23
Obr. 8 Fázorový diagram indukčního motoru podle náhradního schématu	24
Obr. 9 Zapojení vinutí do hvězdy.....	25
Obr. 10 Zapojení vinutí do trojúhelníka	25
Obr. 11 Momentová charakteristika asynchronního stroje.....	26
Obr. 12 Momentová charakteristika asynchronního motoru	29
Obr. 13 Momentová charakteristika s vyznačeným průběhem proudu	33
Obr. 14 Natočení drážek.....	35
Obr. 15 K výpočtu činitele zešikmení	36
Obr. 16 K výpočtu činitele zešikmení	36
Obr. 17 Průběh činitele zešikmení	36
Obr. 18 Vliv vyšších harmonických na momentovou charakteristiku	37
Obr. 19 Zešikmení tyče klece.....	37
Obr. 20 Průběh momentu stroje v původním stavu (křivka 1) a po přetočení kruhů (křivka 2) .	38
Obr. 21 Průběh momentu asynchronního motoru $P = 1,1 \text{ kW}$, $2p = 4$, $Z_1 = 36$ s rotory $Z_2 = 10 - 48$	42
Obr. 22 Návrh a rozměry rotorové drážky	43
Obr. 23 Rotorový plech výstup z ANSYS Maxwell	44
Obr. 25 Statorový plech výstup z ANSYS Maxwell.....	46
Obr. 26 Rotorové a statorové plechy.....	46
Obr. 27 Zapojení statorového vinutí	47
Obr. 28 2D pohled na 1 pól stroje v řezu	48
Obr. 29 Magnetický obvod indukčního stroje.....	49

Obr. 30 Statická momentová charakteristika $M = f(s)$ z programu ANSYS Maxwell RMxpert..	49
Obr. 31 Statická momentová charakteristika $M = f(n)$ z programu ANSYS Maxwell RMxpert..	50
Obr. 32 Křivka prvotní magnetizace	52
Obr. 33 BP graf $P = f(B)$	52
Obr. 34 Dynamická momentová charakteristika, natočení drážky 0° , moment setrvačnosti 1 kg.m ²	53
Obr. 35 Dynamická momentová charakteristika, natočení drážky 0° , moment setrvačnosti 1,1 kg.m ²	54
Obr. 36 Závislost otáček na čase	54
Obr. 37 Dynamická momentová charakteristika, natočení drážky 0° , moment setrvačnosti 1,2 kg.m ²	55
Obr. 38 Dynamická momentová charakteristika, natočení drážky 0° , moment setrvačnosti 1,4 kg.m ²	55
Obr. 39 Dynamická momentová charakteristika, natočení drážky -4° , moment setrvačnosti 1,1 kg.m ²	56
Obr. 40 Dynamická momentová charakteristika, natočení drážky -2° , moment setrvačnosti 1,1 kg.m ²	57
Obr. 41 Dynamická momentová charakteristika, natočení drážky 0° , moment setrvačnosti 1,1 kg.m ²	57
Obr. 42 Dynamická momentová charakteristika, natočení drážky 2° , moment setrvačnosti 1,1 kg.m ²	58
Obr. 43 Dynamická momentová charakteristika, natočení drážky 4° , moment setrvačnosti 1,1 kg.m ²	58
Obr. 44 Dynamická momentová charakteristika, natočení drážky 0° , moment setrvačnosti 1,1 kg.m ²	59
Obr. 45 Dynamická momentová charakteristika natočení drážky 10° (zprůměrované výsledky - 4° ; -2° ; 0° ; 2° a 4°)	59

Seznam tabulek

Tab. 1 Normální průběhy momentových charakteristik asynchronních motorů nakrátko a jejich označení.....	31
Tab. 2 Tabulka se vznikem synchronních momentů podle rotorových a statorových drážek.....	41
Tab. 3 Rozměry rotorové drážky z RMxpřt	43
Tab. 4 Rozměry statorové drážky z RMxpřt	45
Tab. 5 Tabulka zapojení vinutí cívek na statoru	47
Tab. 6 Tabulka výrobce materiálu M530-50A s přepočtenou hodnotou indukce	51

1 Úvod

S asynchronními motory neboli indukčními stroji točivými, jelikož pracují na principu elektromagnetické indukce, se dnes můžeme setkat téměř ve všech odvětvích průmyslu i v domácnostech, díky své jednoduchosti a malé míře poruchovosti mají nezastupitelnou roli. Jsou prakticky bezúdržbové a jejich obsluhu zvládnou i osoby bez elektrotechnického vzdělání.

Při návrhu a vývoji nových asynchronních motorů nebo testování a měření stávající normované řady, se vychází z požadavků zákazníka. Výrobce vyrábí takové motory, po kterých je na trhu největší poptávka, vyrábí je ve velkých sériích (většinou motory menších výkonů, řádově jednotky kW), až po kusovou výrobu motorů o výkonu až 20 MW.

V dnešní době se s výhodou využívá počítačových simulací při návrhu a řešení problémů spojených s konstrukcí a provozem asynchronních elektromotorů. Programy jsou používány k simulaci podmínek, které nastanou při provozu, případně poruchy motorů. Vstupními hodnotami, které se zadávají při vytváření modelu v simulačním programu jsou, základní parametry motoru, rozměry statorových a rotorových plechů, včetně rozměrů drážek, celkové rozměry motoru, zapojení vinutí na statoru a tak dále. Program si vypočítá a vytvoří výsledný model ve dvojrozměrném i trojrozměrném zobrazení. Takovým programem je například ANSYS Maxwell, který je založen na metodě konečných prvků. Použitím výpočetního programu se může zkrátit čas, potřebný k vývoji, snížit výrobní náklady na zavedení do výroby, dodržování norem a zvýšení kvality.

Pomocí programu ANSYS Maxwell je vytvořen model tří fázového asynchronního motoru a následně simulována jeho momentová charakteristika. Dále jsou popsány jednotlivé tvary momentové charakteristiky v závislosti na provedení rotorové klece. Taktéž jsou popsány parazitní momenty, synchronní sedla a uvedeny způsoby, jakými je lze eliminovat.

Cílem práce je vytvoření modelu reálného tří fázového asynchronního motoru v programu ANSYS Maxwell a pomocí metody konečných prvků simulovat momentovou charakteristiku.

Bylo simulováno natočení rotorových drážek o jednu statorovou drážku a vyneseny jednotlivé momentové charakteristiky. V poslední kapitole práce je zhodnocení vlivu natočení rotorových drážek na momentovou charakteristiku.

2 Asynchronní stroj

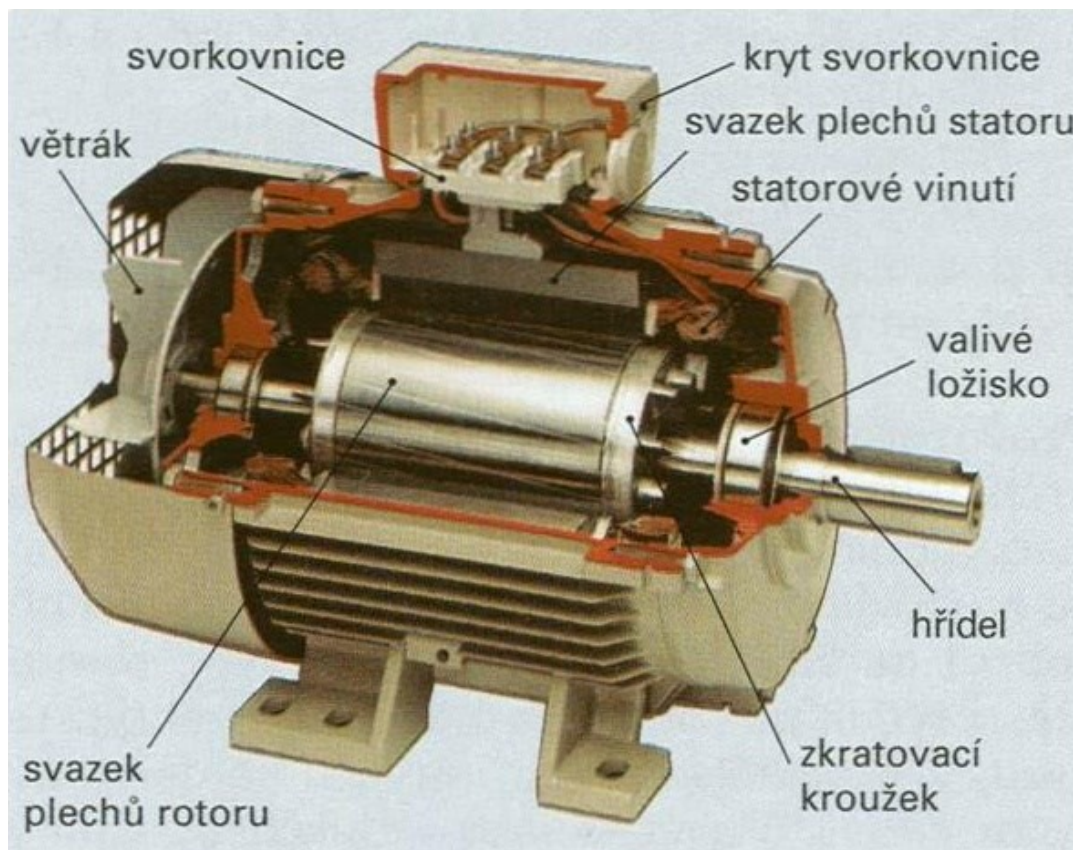
Asynchronní (nebo také indukční) stroj je elektrický stroj točivý, jeho magnetický obvod je malou mezerou rozdělen na dvě části, stator a rotor. Tyto části jsou opatřeny vinutím. Jedno z vinutí, obvykle statorové se připojuje na zdroj střídavého proudu a druhé, obvykle rotorové je spojeno nakrátko a elektromagnetickou indukcí v něm vzniká proud, podobně jako je tomu u transformátoru, odtud název indukční stroj.

Asynchronní stroj se skládá ze statoru a rotoru, statorové plechy mají na vnitřním obvodu drážky, do nichž se ukládá obvykle trojfázové vinutí. Vinutí bývají dvouvrstvé s ohledem na výhodné vlastnosti po elektromagnetické stránce. Můžeme se setkat i se soustředěným vinutím průměrovým, toto vinutí je výhodnější z hlediska technologického.

Rotory jsou buď s trojfázovým vinutím, které je vedeno ke kroužkům (kroužková kotva), z kroužků lze přes kartáčky vést proud ke spouštěcím odporům, taktéž mohou mít rotory klecové vinuté (kotva nakrátko). V obou případech vinutí kotev indukuje točivé pole statoru vícefázová napětí a proudy, ty mohou dávat moment spolu s točivým polem.

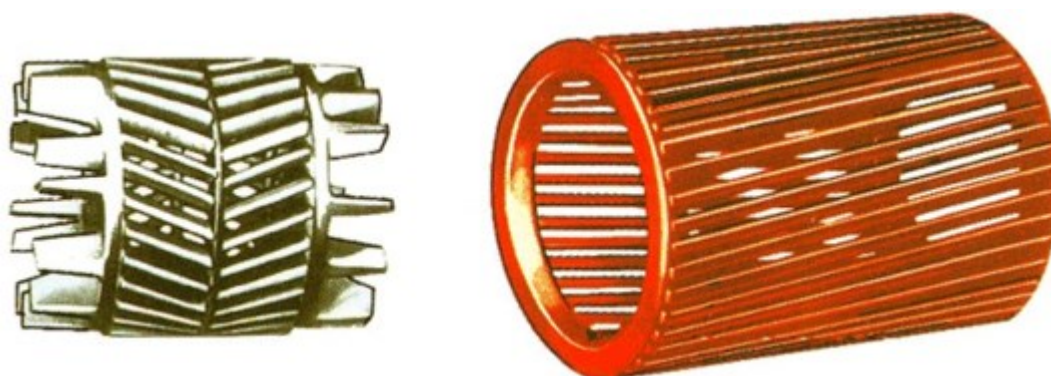
Trojfázový indukční motor je jednoduchý a v provozu spolehlivý, nevyžaduje téměř žádnou zvláštní údržbu a obsluhu. Motory jsou vyráběny ve velkém rozsahu výkonů od několika wattů až do 20 MW, se širokým rozsahem otáček od desítek otáček za minutu až 100 000 ot.min⁻¹.

Hlavní části jsou vyznačeny na Obr. 1, zde je v řezu vyobrazen asynchronní kroužkový motor.



Obr. 1 Řez uzavřeným asynchronním kroužkovým motorem [3]

Rotor je tvořen ze svazku elektrotechnických plechů, které jsou nalisovány na hřídeli elektromotoru. Na jeho obvodu jsou drážky, v nichž jsou uloženy navzájem spojené vodiče. Tyto vodiče jsou tvořeny z hliníkových nebo měděných tyčí spojenými na koncích zkratovacími kroužky, viz Obr. 2 klecové vinutí.

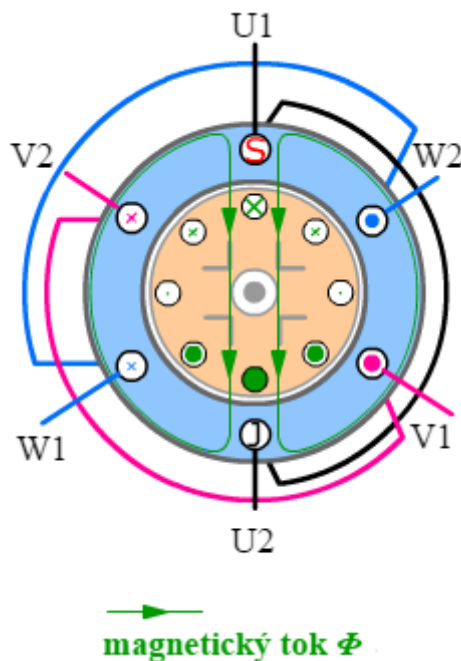


Obr. 2 Rotor asynchronního motoru - klecové vinutí [11]

2.1 Princip činnosti

Po zapnutí elektromotoru se vytvoří ve statoru točivé magnetické pole. Točivé magnetické pole začne ve vodičích rotoru vlivem elektromagnetické indukce indukovat napětí. Rotorem začne procházet střídavý elektrický proud, který vyvolá vznik magnetického pole.

Silové účinky magnetického pole vyvolají točivý moment, který uvede rotor do otáčivého pohybu ve směru otáčení točivého magnetického pole statoru. [11]



Obr. 3 Chod třífázového asynchronního elektromotoru [11]

Pro vznik točivého momentu je nezbytné, musí točivé magnetické pole statoru indukovat napětí v rotoru. Mechanické otáčky rotoru musí být menší než otáčky magnetického pole statoru. V případě, že by otáčky rotoru a točivého magnetického pole statoru byly totožné, byl by točivý moment nulový.

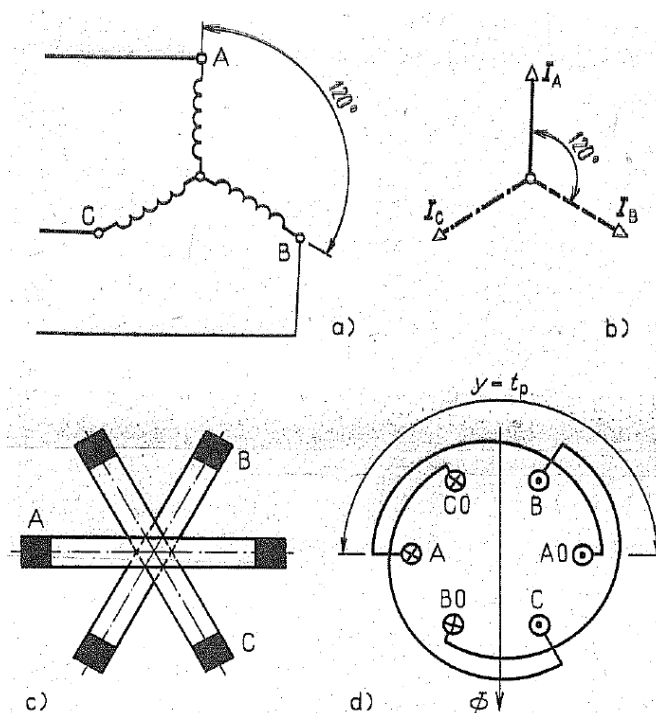
Ve skutečnosti nikdy otáčky rotoru nedosáhnou otáček magnetického pole statoru a to kvůli např. tření na hřídeli, odporu vzduchu apod.

2.2 Vznik točivého magnetického pole

Tažná síla indukčního motoru vzniká vzájemným působením točivého magnetického pole, které je výsledkem vzájemného působení dvou nebo několika střídavých magnetických polí vzájemně prostorově i časově posunutých a magnetického pole rotoru.

Točivé magnetické pole můžeme vytvořit např. třemi stejnými válcovými cívkami, pootočenými navzájem o 120° , jestliže jsou napájeny trojfázovým proudem (Obr. 4).

Úprava tří válcových cívek podle Obr. 4 by byla nepraktická, cívky by zabíraly mnoho místa, prostor stroje by byl špatně využit. Proto se válcové cívky nahradí kotoučovými cívkami, jejichž roviny se protínají ve společné ose a jsou navzájem pootočený o 120° (Obr. 4c). Aby čela cívek nepřekážela hřídeli stroje, jsou rozložena po obvodu stroje podle Obr. 4d. [1]



Obr. 4 Uspořádání cívek pro vznik točivého pole [1]

a) schematické uspořádání tří válcových cívek, b) fázorový diagram napájecího proudu, c) zásadní uspořádání tří kotoučových cívek, d) skutečné uspořádání tří cívek na obvodu statoru

Jak vzniká točivé magnetické pole je vysvětleno na Obr. 5. Pro zjednodušení je na Obr. 5a každá cívka zobrazena jen dvěma vodiči v řezu, které jsou označeny A - A0, B - B0, C - C0. Tyto cívky jsou spojeny do hvězdy a napájeny třemi proudy (I_A , I_B , I_C) posunutými o jednu třetinu kmitu, což je 120° elektrických.

Na Obr. 5b je znázorněn fázorový diagram proudů s jejich maximálními hodnotami. Tyto proudy procházejí jednotlivými cívkami a mění svoji velikost podle sinusovky, od kladného

maxima přes nulu k zápornému maximu a nazpět. Proudů vybudí v cívkách magnetické toky, které se také časem mění sinusově a při předpokladu konstantní permeability prostředí jsou jejich okamžité hodnoty přímo úměrné okamžitým hodnotám proudů.

Pro následující úvahy budeme okamžitou hodnotu proudu bez ohledu na měřítko uvažovat současně za okamžitou hodnotu jím vybudzeného magnetického toku.

Pomocí průmětu fázoru proudu do časové osy (t), kterou necháme otáčet úhlovým kmitočtem ω proti směru otáčení fázorů, zjistíme okamžité hodnoty proudů a magnetických toků.

V prvním přiblížení bereme okamžik t_1 , v tomto okamžiku je proud v cívce A maximální, kladný. Z průmětu do časové osy je vidět, že proudy v cívkách B a C jsou záporné a oba se rovnají poloviční hodnotě proudu na cívce A

$$i_{B1} = i_{C1} = I_{\max} \cdot \cos 60^\circ = \frac{I_{\max}}{2}$$

protože amplitudy všech tří proudů jsou shodné

$$I_{A \max} = I_{B \max} = I_{C \max} = I_{\max}$$

Obr. 5 znázorňuje okamžité směry proudů a jim odpovídající fázory magnetických toků. Pomocí pravidla pravé ruky určíme jejich směry.

Výsledný magnetický tok ϕ získáme součtem magnetických toků všech tří cívek, je dán jejich geometrickým součtem. Dle Obr. 5c platí

$$\phi_1 = \phi_{A \max} + \frac{1}{2} \cdot \phi_{A \max} = \frac{3}{2} \cdot \phi_{A \max} = \frac{3}{2} \cdot \phi_{\max}$$

protože shodným amplitudám proudů odpovídají i shodné amplitudy magnetických toků

$$\phi_{A \max} = \phi_{B \max} = \phi_{C \max} = \phi_{\max}$$

Výsledný směr magnetického toku odpovídá rozložení proudových vrstev, které jsou tvořeny vodiči (C0-A-B0) a (B-A0-C).

Obdobným způsobem se zjistí velikost i směr výsledného magnetického toku pro okamžik t_2 (Obr. 5d), tento okamžik odpovídá právě jedné čtvrtině kmitu (tj. 90° elektrických). Proud v cívce A, tím tedy i její magnetický tok je nulový, proudy v obou zbývajících cívkách mají stejnou velikost, ale opačný směr. Magnetické toky, odpovídající těmto proudům mají velikost

$$\phi_{B2} = \phi_{C2} = \phi_{A \max} \cdot \cos 30^\circ = \phi_{A \max} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$$

a výsledný magnetický tok:

$$\phi_2 = 2 \cdot \phi_{B2} \cdot \cos 30^\circ = 2 \cdot \phi_{A \max} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{3}{2} \phi_{A \max} = \frac{3}{2} \cdot \phi_{\max}$$

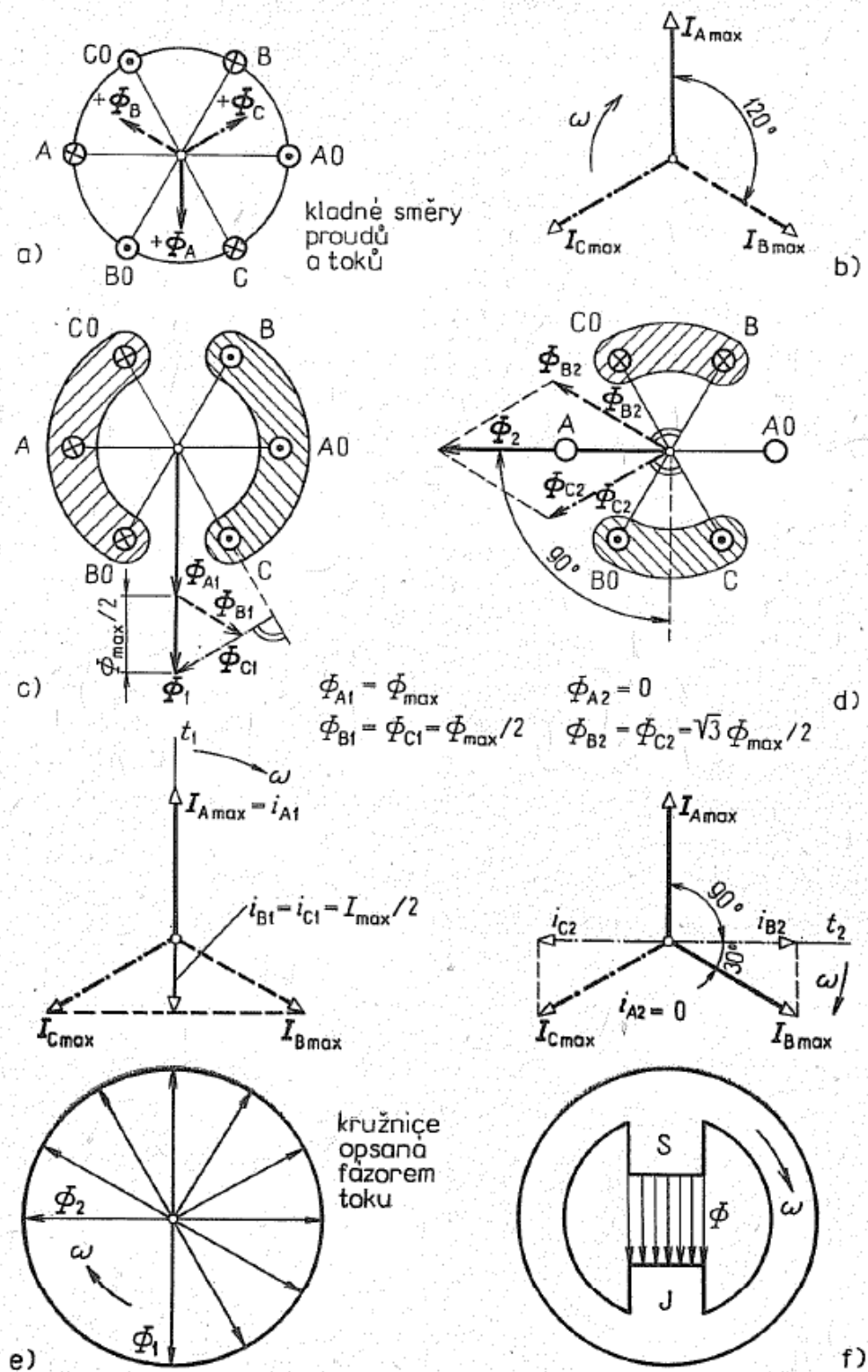
Výsledný magnetický tok je stejně velký jako v prvním okamžiku.

Fázor výsledného magnetického toku ϕ se pootočil o stejný úhel jako fázory proudů, ale velikost výsledného magnetického toku se nezměnila.

Stejného výsledku by bylo dosaženo, pokud by bylo provedeno podobné vyšetření v dalších okamžicích. Jedna otáčka výsledného fázoru magnetického toku by odpovídala právě jednomu kmitu.

Výsledné magnetické pole, které je vybuzené třemi cívkami pootočenými o 120° , napájenými trojfázovým proudem, se s časem nemění, ale jeho fázor se otáčí ve směru postupu fázi stálým úhlovým kmitočtem ω , ten závisí na kmitočtu napájecího proudu. Točivé kruhové magnetické pole se nazývá, protože koncový bod fázoru výsledného magnetického toku opisuje kružnici, jak je znázorněno na Obr. 5e.

Při záměně přívodů k libovolným dvěma cívkám se změní směr otáčení magnetického pole.

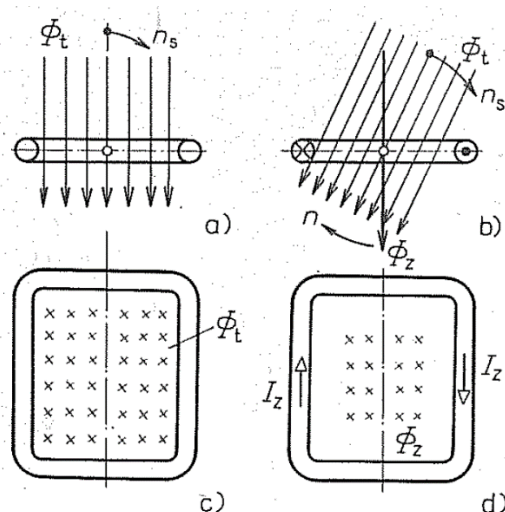


Obr. 5 Vznik točivého magnetického pole [1]

a) uspořádání cívkových stran, b) fázorový diagram proudu, c) rozložení proudů v okamžiku t_1 , d) rozložení proudů v okamžiku t_2 , e) kružnice opsaná fázorem výsledného magnetického toku, f) představa homogenního dvojpólového točivého pole

2.3 Vznik tažné síly

Jeden závit spojený nakrátko, který je vložen do točivého magnetického pole je nejjednodušší rotor indukčního motoru viz Obr. 6. Velikost magnetického toku, který prochází plochou stojícího závitu, se mění během otáčení točivého magnetického pole. Touto změnou magnetického toku se v závitě indukuje napětí, které protlačuje závitem značný proud. Tento proud vybudí své vlastní magnetické pole, které spolupracuje s točivým statorovým polem a vytvoří točivý moment.



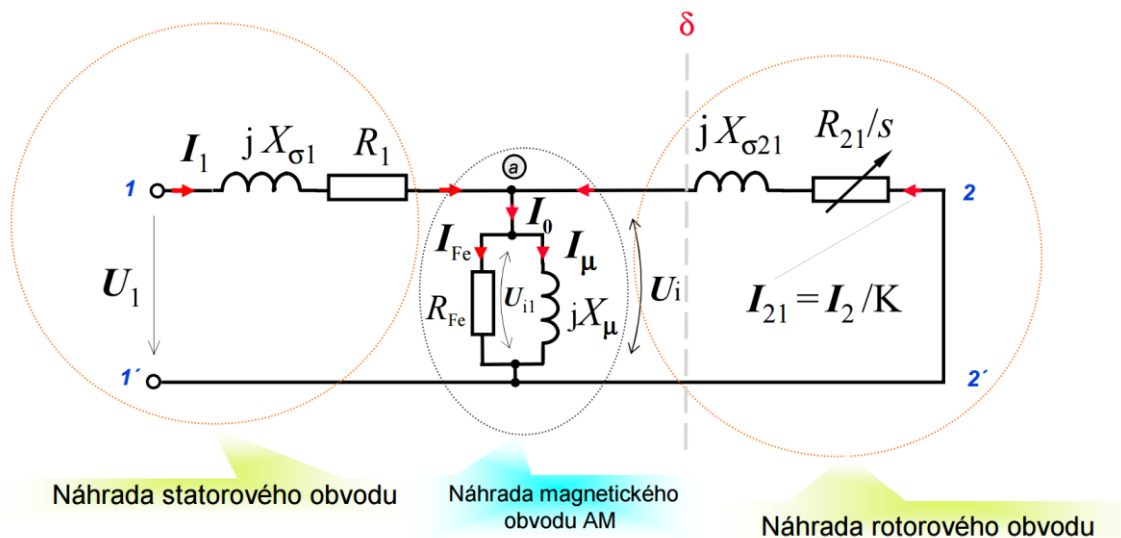
Obr. 6 Závit v točivém magnetickém poli [1]

Velkou výhodou indukčního motoru je, že se takto sám roztočí. Pokud se např. dostane točivé magnetické pole z polohy na Obr. 6a, do polohy na Obr. 6b, tak se magnetický tok procházející plochou závitu zmenšuje.

Zmenšováním magnetického toku se v závitě indukuje napětí, které jím protlačuje proud I_z , jehož smysle je vyznačen na Obr. 6b. Podle Lencova pravidla musí být takový, aby jím vybuděný magnetický tok ϕ_z vyrovnával zmenšování magnetického toku, který prochází plochou závitu. Z Obr. 6b je vidět, že točivé magnetické pole ϕ_t unáší závit sebou a tím se závit dostává do točivého pohybu shodného s pohybem točivého magnetického pole. I když se závit vlivem setrvačnosti ihned neroztočí, zůstává smysl síly stále stejný, neboť smysl indukovaného napětí, proudu a jeho magnetického toku se přizpůsobuje okamžité poloze točivého magnetického pole. [1]

Pro zvětšení tažné síly motoru a zrovnoměnění jeho tahu, se nahradí jediný rotorový závit několika tyčemi. Spojením tyčí, které jsou spojeny dvěma čelními kruhy nakrátko vznikne rotorová klec, taktéž se používá vinutý rotor s několika cívkami.

2.4 Náhradní schéma asynchronního elektromotoru



Obr. 7 Náhradní schéma asynchronního motoru [2]

2.4.1 Indukované napětí

Změna toku indukuje ve vinutí napětí.

$$U_i = 4,44 \cdot \phi \cdot f \cdot N \cdot k_v \quad (1)$$

kde ϕ = tok jednoho pólu (Wb)

f = frekvence (Hz)

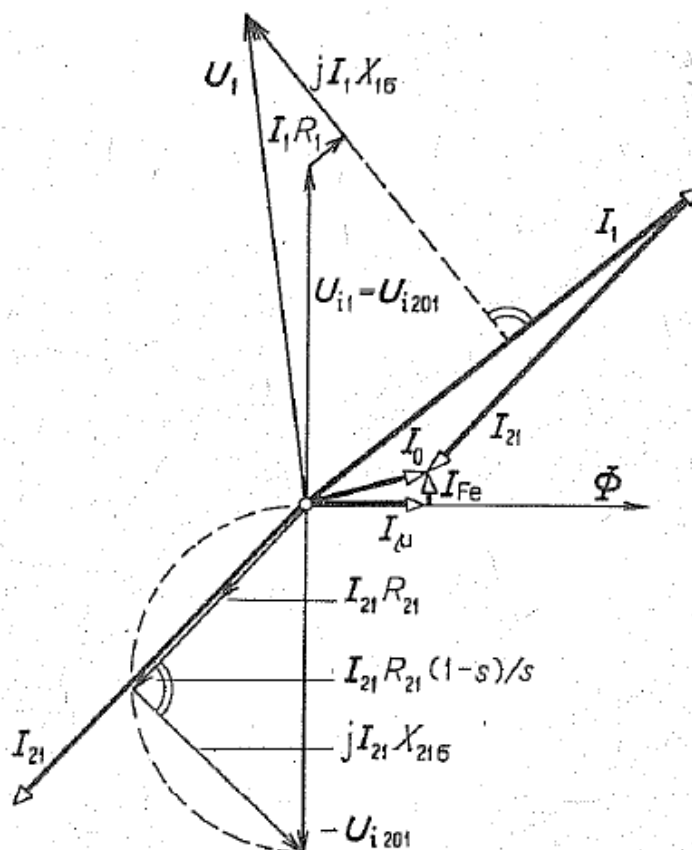
N = počet závitů v sérii (-)

k_v = činitel vinutí (-)

2.4.2 Činitel vinutí

Má hodnotu nejvýše 1 ($k_v \leq 1$) a zavádí do vztahu mírný pokles indukovaného napětí, který je způsobený:

- rozložením vinutí do více drážek (jednotlivá napětí se poté sčítají fázorově s určitým fázovým posunem, nikoliv algebraicky)
- zkráceným krokem cívky (cívka nevytvoří maximální tok, který se dosazuje do vztahu pro indukované napětí)



Obr. 8 Fázorový diagram indukčního motoru podle náhradního schématu [1]

Indukované napětí U_{11} je stejně velké jako U_{1201} , protože podle dohody odpovídá stejnému magnetickému toku ϕ .

Protože rozptylová reaktance statorového vinutí odpovídá stálému síťovému kmitočtu f_1 , její hodnota je stálá

$$X_{1\sigma} = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot L_1 \quad (2)$$

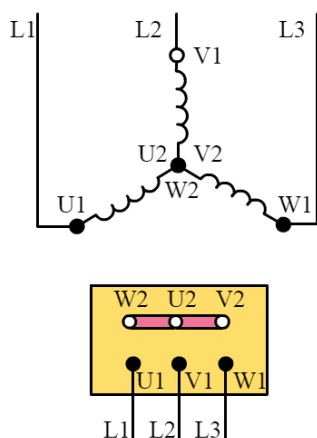
Rozptylová reaktance rotorového vinutí závisí na proměnném kmitočtu f_2 , proto je její hodnota proměnná

$$X_{2\sigma s} = 2 \cdot \pi \cdot f_2 \cdot L_2 = 2 \cdot \pi \cdot s \cdot f_1 \cdot L_2 = s \cdot X_{2\sigma s} \quad (3)$$

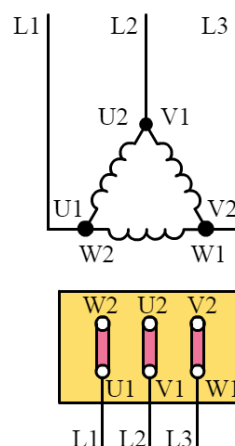
$$\text{kde } X_{2\sigma} = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot L_2$$

2.5 Zapojení svorkovnice

Stator tvoří elektrotechnické plechy, které jsou naskládány na sebe do tvaru dutého válce. Na jeho vnitřním obvodu jsou drážky, v těchto drážkách je uloženo vinutí vzájemně posunutě o 120° . U_1, V_1, W_1 se označují začátky vedení, konce vinutí se značí U_2, V_2, W_2 viz Obr. 9. zapojení vinutí do hvězdy, které vznikne spojením konců tří vinutí. Při spojení konce jednoho vinutí se začátkem následujícího vinutí získáme zapojení vinutí do trojúhelníka viz Obr. 10.



Obr. 9 Zapojení vinutí do hvězdy [11]



Obr. 10 Zapojení vinutí do trojúhelníka [11]

Pomocí svorek můžeme vinutí přepojit do hvězdy nebo do trojúhelníka. Jen motory do 3 kW a kroužkové motory na napětí 500 V nebo o výkonu větším než 100 kW mají svorkovnici jen se třemi svorkami.

Způsob zapojení musí být vyznačen na štítku, např. údajem 400 V - Δ . Většina našich motorů se vyrábí tak, aby bylo možné je používat na síť o napětí 400 V i 230 V. Na štítku mívají označení 400/230 V - Y/ Δ . To znamená, že v síti se sdruženým napětím 3 x 400 V se zapojí vinutí do hvězdy (Obr. 9) a v síti se sdruženým napětím 3 x 230 do trojúhelníka (Obr. 10).

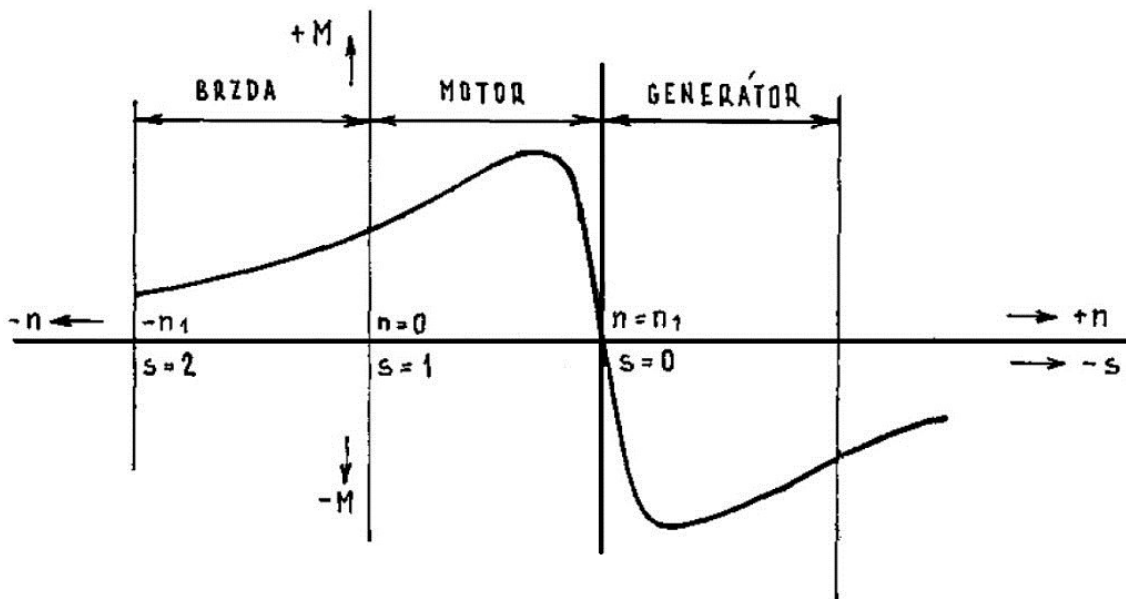
Vinutím motoru prochází v obou případech stejný proud a motor má tedy při obou napětích stejný výkon. Jen při napětí 230 V prochází přívodními vodiči proud $\sqrt{3}$ krát větší.

Kostra motoru se musí prostřednictvím uzemňovací svorky připojit na uzemnění nebo na nulovací vodič trojfázové sítě. [1]

2.6 Momentová charakteristika asynchronního stroje

Momentovou charakteristikou rozumíme závislost momentu točivého pole na otáčkách, případně skluzu $M = f(n)$ nebo $M = f(s)$.

Skutečný moment na hřídeli motoru je menší o moment vlastních mechanických ztrát a také o část ztrát přídatných. V případě generátoru a také při brzdění protiproudem o tento moment větší.



Obr. 11 Momentová charakteristika asynchronního stroje [4]

Brzda - od $s = 2$ do $s = 1$, k brzdění se využívá točivého momentu, který vzniká otáčením rotoru proti směru, kterým by se chtěl motor působením elektromagnetických sil otáčet

Motor - od $s = 1$ do $s = 0$, elektrická energie, která je přiváděna se v motoru mění na mechanickou, tato mechanická energie přemáhá odpor poháněného zařízení

Generátor - od $s = 0$ za určitých podmínek může indukční motor sloužit k přeměně mechanické energie, která je přiváděna na rotor na elektrickou energii, ta se odebírá ze statorového vinutí

2.7 Skluz

V případě uvažování ideální indukční motor, bez jakýchkoli mechanických ztrát, tak se jeho rotor roztočí po jeho rozběhu na synchronní otáčky a bude se otáčet souhlasně s točivým magnetickým polem. Jeho vodiče neprotínají žádné indukční čáry, a tudíž se v nich ani neindukuje proud. Točivý moment by byl v tomto případě nulový a rotor by se dále otáčel jen setrvačností.

Jestliže se však rotor mechanicky zatíží, musí se zpomalit, tudíž indukční čáry protínají vodiče, v těchto vodičích se indukuje proud, který je potřebný pro vznik tažné síly. Čím více je motor zatížen, tím větší musí být rotorový proud, a tudíž se bude rotor pomaleji otáčet.

Otáčky indukčního motoru se zmenšují s rostoucím zatížením.

Skluzem rozumíme rozdíl otáček rotoru a otáček točivého magnetického pole statoru.

Je to poměrná hodnota, případně udávaná v procentech po vynásobení 100.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (-) \quad (4)$$

kde n_s – synchronní otáčky magnetického pole statoru

n – mechanické otáčky rotoru

Podle odporu rotorového vinutí bývá skluz v rozmezí 1 - 10 %, v průměru asi 5 %. Malé motory mají větší skluz než motory velké.

Rotor indukčního motoru se neotáčí synchronními otáčkami, proto se někdy nazývá asynchronní motor.

2.8 Synchronní otáčky stroje

Otáčky točivého magnetického pole se nazývají synchronní otáčky, neboť závisí přímo (synchronně) na kmitočtu napájecího proudu, a tudíž i na otáčkách generátoru, který je jeho zdrojem.

Dvoupólové magnetické pole vykoná za jeden kmit jednu otáčku, která odpovídá dvěma pólovým roztečím. Pólová rozteč znamená vzdálenost os dvou sousedních pólů. Kmitočtu f se tedy rovnají otáčky za jednu sekundu, za jednu minutu jsou synchronní otáčky dány vztahem

$$n_s = 60 \cdot f \quad (\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}) \quad (5)$$

Čtyřpólové pole se za jeden kmit otočí taktéž o dvě pólové rozteče, které však odpovídají pouze jedné polovině otáčky, tudíž jeho synchronní otáčky jsou poloviční než v případě dvoupólového

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{2} \quad (\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}) \quad (6)$$

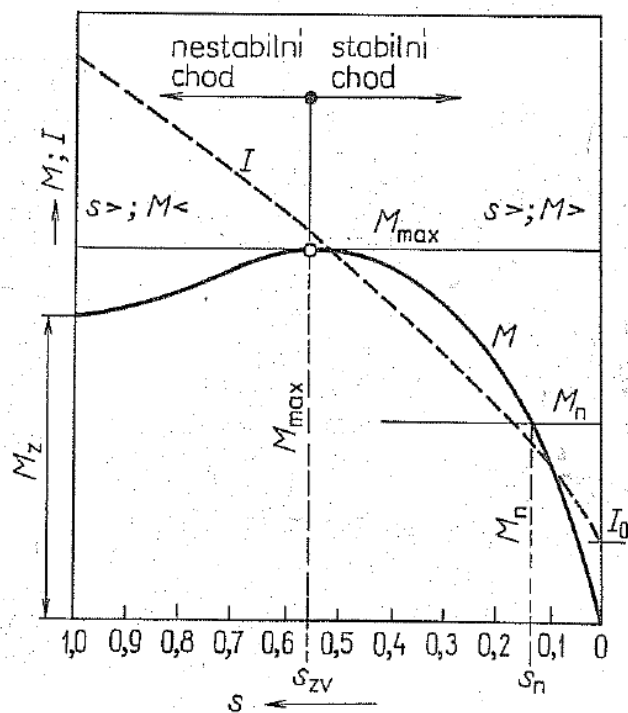
Obecně platí, že pokud má točivé magnetické pole $2p$ pólů, kde p je počet pólových dvojic, jsou synchronní otáčky magnetického pole

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}) \quad (7)$$

2.9 Momentová charakteristika asynchronního motoru

Normální průběh momentové charakteristiky motoru s kotvou nakrátko je na Obr. 12. Závislost je vynášena v rozsahu skluzu $s = (1 - 0)$, tento rozsah odpovídá rozsahu otáček $n = (0 - n_1)$. Vyznačí se zde jmenovitý moment M_n , který odpovídá jmenovitým otáčkám a maximální moment M_{max} , odpovídající tzv. skluzu zvratu s_{zv} .

V oblasti, kdy je skluz větší než skluz zvratu ($s > s_{zv}$) nemůže motor pracovat.



Obr. 12 Momentová charakteristika asynchronního motoru [1]

2.9.1 Moment indukčního motoru

Točivý moment odpovídá mechanickému výkonu na hřídeli.

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}} = 9,55 \cdot \frac{P}{n} \quad (8)$$

kde n jsou otáčky rotoru, které jsou zmenšené o skluz

$$n = n_s \cdot (1 - s)$$

lze tedy psát

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}} = 9,55 \cdot \frac{P}{n_s \cdot (1-s)}$$

2.9.2 Klossův vztah

Popisuje závislost mezi momentem a skluzem.

Platí pro běžný asynchronní motor s kotvou nakrátko v ustáleném stavu, tento stav nastane po odeznění přechodových dějů, které jsou způsobeny rychlými změnami zátěže nebo napájení stroje.

$$M = \frac{2 \cdot M_{\max}}{\frac{s}{s_{zv}} + \frac{s_{zv}}{s}} \quad (\text{N} \cdot \text{m}^{-1}) \quad (9)$$

kde M_{\max} je maximální moment ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)
 s je skluz (-; %)
 s_{zv} je skluz zvratu (-; %) a odpovídá maximálnímu momentu M_{\max}

Tab. 1 Normální průběhy momentových charakteristik asynchronních motorů nakrátko a jejich označení [9]

Označení	Klec	Průběh momentové charakteristiky
$M 0,7$	jednoduchá normální	
$M 1,0$	vírová	
$M 1,3$	dvojitá	
$M 1,6$	odporová	
Sp	zvláštní průběh podle sjednaných podmínek	

Na tvar momentové charakteristiky v okolí $s = 1$ mají mimo jiné vliv asynchronní parazitní momenty, zejména u strojů s nezeškmenými drážkami rotoru.

Poměr záběrného momentu ku jmenovitému momentu není u nás normalizován, průměrně bývá $M_z = (1 - 2) \cdot M_n$.

Pro rozběh motoru není rozhodující záběrný moment sám o sobě, ale i jeho průběh během rozběhu, ten se liší podle konstrukce motoru a může se od normálního průběhu značně lišit.

V Tab. 1 jsou uvedeny typické průběhy momentů pro různé druhy klecí.

Motor pro daný druh pohonu musí být navržen tak, aby zatížení za provozu nepřestoupilo maximální moment a aby moment motoru ani během rozběhu neklesl pod zatěžovací moment. [1]

Činný odpor rotoru má největší vliv na záběrný moment a na průběh momentové charakteristiky.

2.10 Měření momentové charakteristiky

Experimentální vyšetřování průběhu momentové charakteristiky při rozběhu asynchronních motorů lze rozdělit do dvou skupin. V prvním případě je to měření momentů statické, při tomto průběhu momentu se snímá bod po bodu při ustálených a předem nastavených otáčkách. Druhou skupinou je dynamické měření momentů, v tomto případě se snímá celá momentová charakteristika najednou při jediném rozběhu, motor je většinou nezatížený. Jednotlivá měření mají své přednosti i nedostatky.

2.10.1 Statické měření momentové charakteristiky

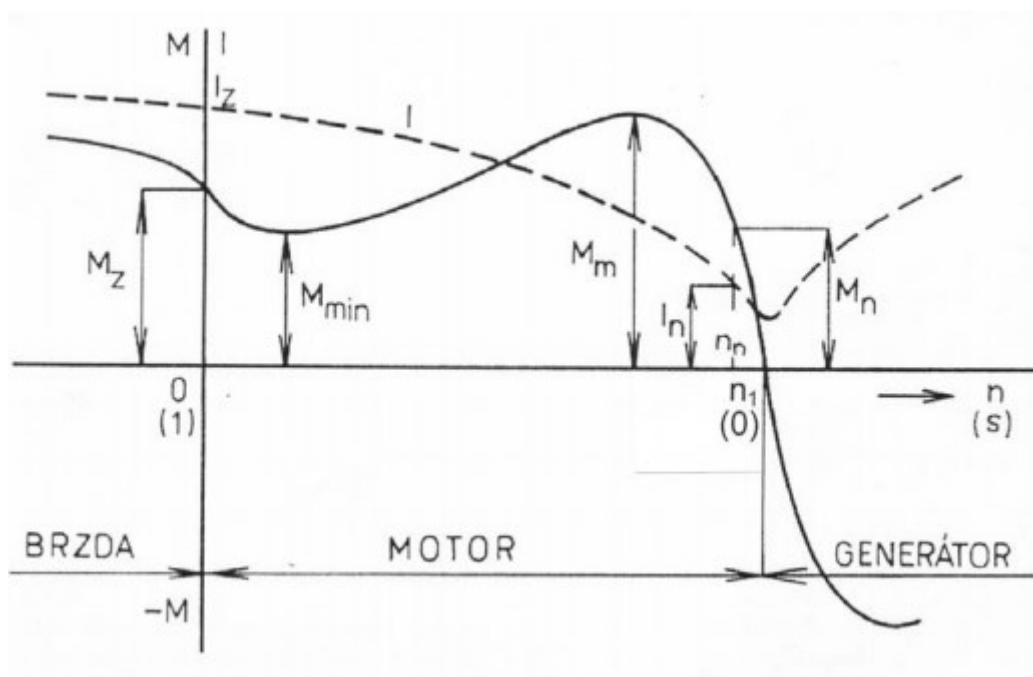
V tomto měření je motor zatížen vhodnou brzdou, tím se dosáhne ustálení rychlosti na určité hodnotě, při níž se odečte vyvozený moment. Nejvhodnější jsou pro tyto účely elektrodynamické brzdy s výkyvným statorem, tyto brzdy umožňují měření momentu s přesností méně než $\pm 5\%$. Takto vysoké přesnosti je dosaženo i při malých otáčkách, je jí dosaženo zmenšením tření v ložiskách, vnější věnce ložisek jsou i v klidu protáčeny. Další druhy brzd jako jsou třecí, vířivé, vodní atd. pro tyto účely nejsou dostatečně přesné, protože je jimi velmi obtížné dosáhnout ustáleného stavu v labilních částech charakteristiky motoru, ve kterých s ubývajícím rychlostí rychle klesá moment. Obvyklý postup je, že v Leonardově spojení brzda pohání nejprve měřený motor, dosud nepřipojený do sítě. Při tom se buzení nastaví na požadované otáčky. Otáčky soustavy mírně stoupnou, připojením měřeného motoru do sítě, brzda začne působit jako generátor a bude vracet energii zpět do sítě, při čemž se výkyvný stator pootočí a moment, který na něho působí se změní přesnou vahou. Až se systém ustálí, odečteme moment a otáčky, ihned po odečtení hodnot odpojme motor od sítě a necháme při zvýšených otáčkách chladit. Bod po bodu tímto postupem proměříme celou charakteristiku.

Tento způsob má výhodu ve značné přesnosti, se kterou lze určit maxima i minima momentových sedel. Nevýhodný je v jeho pracnosti a zdoluhavosti, protože u měření při plném napětí je nutné po každém odečtu, který trvá 5 až 10 vteřin, nechat měřený motor 3 až 5 minut chladit z důvodu zkreslení měření vlivem oteplení vinutí. Mezi další nevýhodu patří, že se zjistí pouze průměrný střední moment, tento moment sice stačí pro posouzení jeho vlastností, nicméně pro určení vhodnosti v případě moderních pohonů s rychlou reversací nevyhovuje.

2.10.2 Dynamické měření momentové charakteristiky

Při tomto vyšetřování motoru se buď moment určuje ze zrychlení při rozběhu nezatíženého motoru nebo se snímá různými snímači momentu a přímo vynáší v závislosti na otáčkách. Snímání momentu se obvykle provádí piezoelektrickými, tenzometrickými nebo induktivními snímači, které většinou stačí sledovat průběhy momentu i během jedné periody střídavého proudu. Výsledek měření se vynáší buď pomocí zapisovačů, smyčkových nebo katodových oscilografů s dosvitem. [5]

Výhody dynamického měření spočívá především v jeho rychlosti. Tento způsob dovoluje i sledování průběhu okamžitých hodnot přechodných momentů, které mohou dosáhnout při zapnutí velikosti 4,5 - 7,5 M_n . V případě současného připojení všech fází mohou maxima okamžitých hodnot momentů převýšit tuto hodnotu 1,3 až 1,5krát. Je důležité znát dynamické charakteristiky při reversaci a v oblasti brzdění, kde může střídavá složka momentů podstatně ovlivnit průběh celého přechodného procesu. Nevýhoda tohoto způsobu měření momentu spočívá v jeho menší přesnosti asi $\pm 3\%$, zvláště při rychlých změnách momentu, kde může resonance snímače a celého měřicího zařízení nebo tlumení průběh zcela zkreslit. Tento způsob měření vyžaduje speciální vybavení zkušebny.



Obr. 13 Momentová charakteristika s vyznačeným průběhem proudu [12]

2.11 Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu

Polem diferenčního rozptylu se rozumí celý souhrn polí různých harmonických ve vzduchové mezeře, které se nepodílejí na vytváření elektromagnetického momentu. [10]

$$\begin{aligned}
 X_{\sigma} &= 4 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \frac{N^2}{p \cdot q} \cdot l'_i \cdot \sum \lambda = \\
 &= 15,8 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N}{100} \right)^2 \cdot \frac{l'_i}{p \cdot q} \cdot \sum \lambda \quad (\Omega; \text{Hz}, \text{m})
 \end{aligned} \tag{10}$$

$$\text{kde } \sum \lambda = \lambda_d + \lambda_{\zeta} + \lambda_{\text{dif}}$$

2.12 Vliv natočení drážek

Natočení drážek do jisté míry potlačuje vliv vyšších harmonických a zlepšuje hlukové a vibrační vlastnosti motorů. Avšak indukované napětí je poněkud menší.

Snížení indukované napětí, vlivem natočení drážek se v praxi přímo nepočítá, ale vliv natočení se uvažuje zvětšením rozptylových reaktancí rotorového i statorového vinutí. Tudíž se do vztahu (10) zavádí činitel σ_γ .

Rozptylová reaktance při natočených drážkách:

$$X_{1\sigma\gamma} = X_{1\sigma} \cdot \sigma_\gamma, \quad X_{2\sigma\gamma} = X_{2\sigma} \cdot \sigma_\gamma \quad (11)$$

Určení přibližné hodnoty součinitele σ_γ lze určit vztahem:

$$\sigma_\gamma = 1 + 0,41 \cdot \left(\frac{b_\gamma}{t_p} \right)^2 \cdot \frac{U_{1n}}{X_{1\sigma} \cdot I_\mu} \quad (12)$$

kde b_γ je natočení drážek (m)

Natočení drážek se většinou používá u motorů nakrátko s osovou výškou $h \leq 160$ mm.

Při návrhu je důležité brát na vědomost i negativní důsledky natočení drážek. Pokud se zvětší rozptylové reaktance, zmenšuje se záběrný moment a momentová přetížitelnost motoru. Z tohoto důvodu se obvykle drážky natáčení ne více než o jednu drážkovou rozteč rotoru, tj. $b_\gamma \leq t_{d2}$. Jen u motorů s malým výkonem se drážky někdy natáčí v $b_\gamma \leq 1,5 \cdot t_{d2}$ nebo $b_\gamma \leq 2 \cdot t_{d2}$.

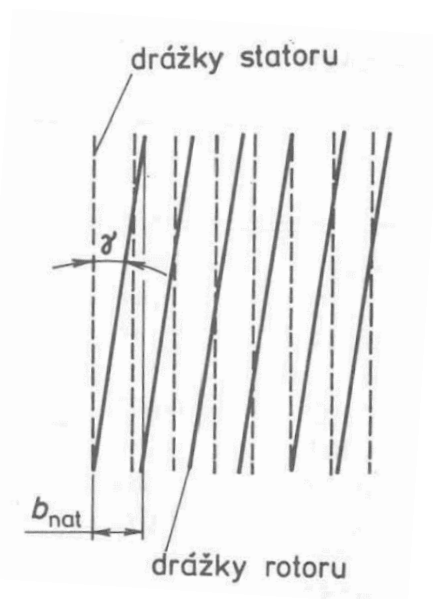
2.13 Činitel natočení drážek

Pro harmonické řádu $v_z = (kQ/p) \pm 1$ (pro trojfázové stroje $v_z = 6qk \pm 1$, kde $k = 1, 2, 3, \dots$ (při $k = 1$ je jejich řád blízký číslu vyjadřujícímu počet zubů připadajících na pólouvu dvojici stroje, tj. $v = Q/p$, proto se tyto harmonické nazývají tzv. zubové harmonické) budou hodnoty činitele zkrácení kroku i činitele rozlohy stejné jako činitele první harmonické pro libovolné zkrácení kroku a pro libovolné q . Dochází k tomu, protože se elektrické úhly mezi fázory elektromotorických napětí zubových harmonických a první harmonické liší o úhel, který je dělitelný 2π , tj.:

$$\alpha_v = \alpha_1 \cdot v_z = \frac{2 \cdot \pi \cdot p}{Q} \cdot \left(k \cdot \frac{Q}{p} \pm 1 \right) = 2 \cdot \pi \cdot k \pm \alpha$$

Ale řád harmonických se zvyšuje s rostoucím číslem q , zároveň se však zmenšuje jejich amplituda, a tudíž i nepříznivý vliv na práci stroje. U menších strojů, kde je obtížné zvětšit q , se pro potlačení zubových harmonických provádějí natočené drážky. tzn. že nejsou rovnoběžné s osou stroje, ale svírají s ní daný úhel $\gamma = \nu \cdot b_{\text{nat}} \cdot \pi / t_p$, nazývaný úhel natočení (viz Obr. 14). Napětí indukované v závitech vinutí se zmenšuje při natočení drážek. Toto zmenšení je vyjádřeno činitelem natočení

$$k_\gamma = \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{0,5 \cdot \gamma} = 1 - \frac{\gamma^2}{24} \quad (13)$$



Obr. 14 Natočení drážek [10]

Velikost natočení b_{nat} bývá při výpočtu v praxi udána v délkových jednotkách, které ukazují o kolik milimetrů nebo o jakou část drážkové rozteče je osa drážky pootočena drážky na konci proti ose drážky na začátku (Obr. 14). Obvykle se drážka natáčí o jednu drážkovou rozteč. Poté úhel γ pro první harmonickou je velmi malý, činitel k_γ je blízký jedné a neuvažuje se při výpočtu činitele vinutí. Úhel γ roste úměrně s řádem harmonických a pro vyšší řády harmonických, včetně zubových, bude k_γ značně menší než jedna. Proto ve strojích, které mají natočené drážky je vliv vyšších harmonických pole na charakteristiky stroje velmi malý.

Díky natočení drážek snížíme hladinu hluku při práci stroje, a proto jsou stroje se sníženou hlučností vyráběny s natočenými drážkami.

Avšak natočení drážek poněkud zvětší délku drážkové části cívek vinutí, tudíž se musí uvažovat jeho vliv při výpočtu reaktancí vinutí a odporů.

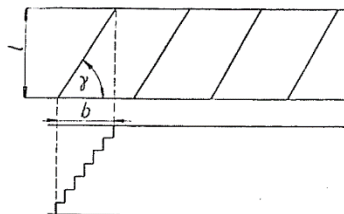
2.14 Činitel zešikmení

Zešikmením osy primárního a sekundárního vinutí (zešikmením drážek) navzájem o úhel γ , budou indukovaná napětí v jednotlivých částech téhož závitu navzájem fázově posunuta tak, že fázový posun napětí na obou koncích bude úhel $\nu\gamma$ viz Obr. 15. Výsledné napětí indukované v jednom závitu bude tedy dáno vektorovým součtem elementárních napětí po délce závitu, který je podle Obr. 16 roven tětivě AB .

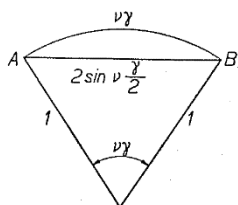
Napětí indukované v zešikmeném závitu se zmenší proti nezešikmenému závitu v poměru vektorového součtu k aritmetickému, který může být značen jako činitel zešikmení drážek. [5]

$$\xi_{zv} = \frac{\sin \nu \frac{1}{2} \gamma}{\nu \cdot \frac{1}{2} \cdot \gamma} \quad (14)$$

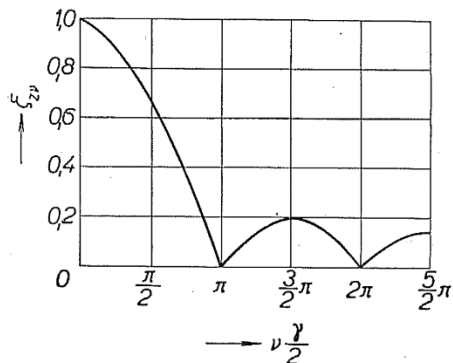
Průběh činitele zešikmení ξ_{zv} dle rovnice (14) je zobrazen na Obr. 17



Obr. 15 K výpočtu činitele zešikmení [5]



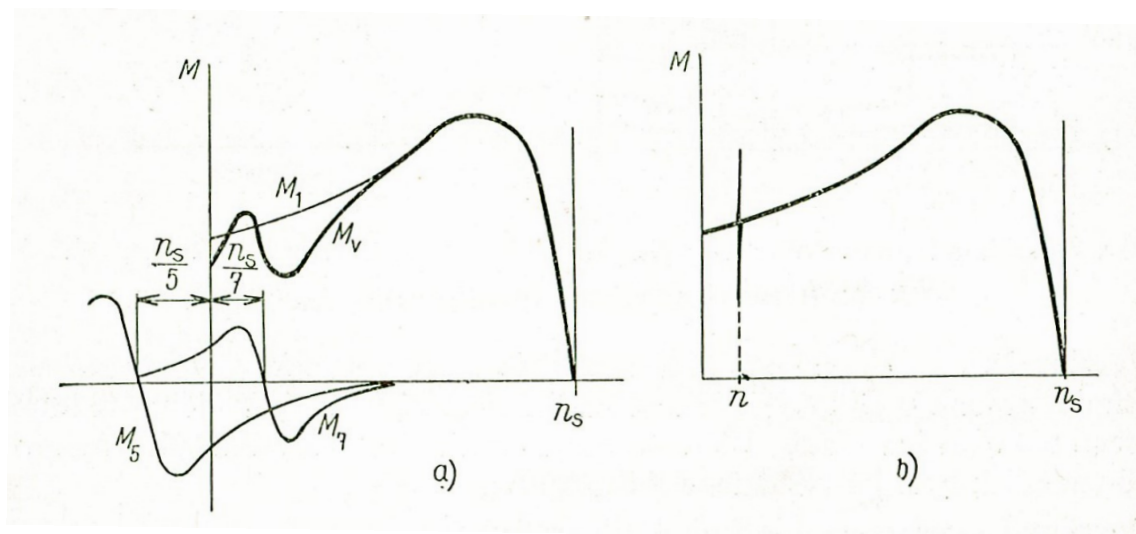
Obr. 16 K výpočtu činitele zešikmení [5]



Obr. 17 Průběh činitele zešikmení [5]

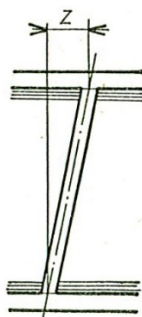
2.15 Vliv vyšších harmonických na momentovou charakteristiku

V rotoru se indukují točivá magnetická pole vyšších harmonických statoru elektromotorické síly a proudy vyšších kmitočtů a vytvářejí s nimi mechanické momenty zvané parazitní, neboť práci motoru většinou ruší. Na Obr. 18a je momentová charakteristika deformovaná pátou protiběžnou a sednou souběžnou harmonickou. Čára výsledného momentu má sedlo, které může způsobit ploužení motoru při těžším rozběhu. Na Obr. 18b je znázorněno tzv. synchronní sedlo, vytvořené dvěma vyššími harmonickými toky téhož řádu vzájemně protiběžnými, které způsobí při pomalém rozběhu ploužení při otáčkách, odpovídající synchronismu obou harmonických. Kromě parazitních momentů vytvářejí vyšší harmonické toky i síly radiální, které způsobují chvění a hluk. [7]



Obr. 18 Vliv vyšších harmonických na momentovou charakteristiku [7]

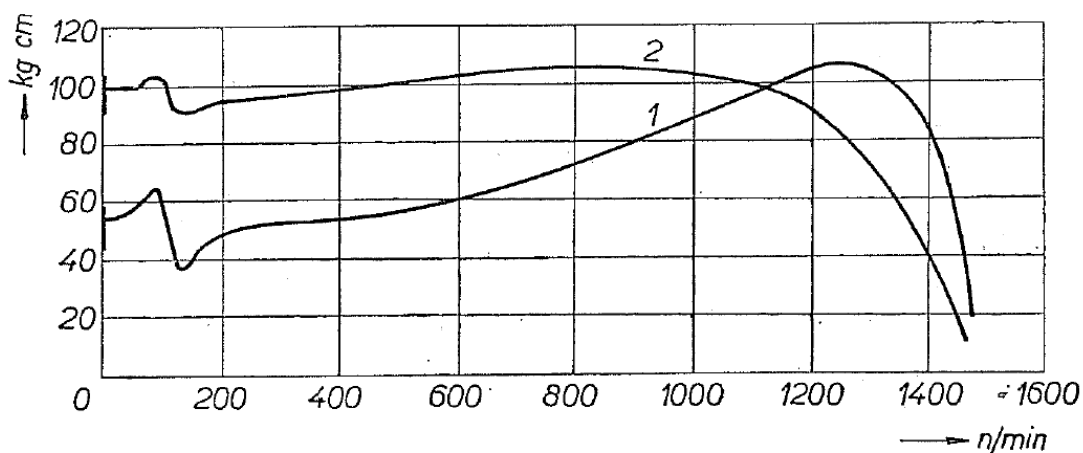
Vhodným počtem drážek u klece a úpravou vinutí lze omezit vyšší harmonické toky a tím i parazitní momenty a hluk. Zešíkmení tyčí klece se provádí podle Obr. 19. Zešíkmeněná tyč působí jako proudová vrstva šířky z . Zešíkmení se obvykle provádí o drážkovou rozteč statoru.



Obr. 19 Zešíkmení tyče klece [7]

2.16 Možnosti potlačení přídatných momentů

Přídavné momenty vznikají působením vyšších harmonických magnetického pole na rotor. Velikost přídatných momentů lze tedy ovlivnit již konstrukčním uspořádání stroje. Amplitudy vyšších harmonických magnetického pole lze např. podstatně snížit zvětšením vzduchové mezery.



Obr. 20 Průběh momentu stroje v původním stavu (křivka 1) a po přetočení kruhů (křivka 2) [5]

Tím se však zvýší magnetizační proud a zhorší účinník. Dalším způsobem je zvětšení odporu rotorového vinutí. Tím klesne velikost proudů vyšších harmonických v rotoru a sníží se magnetomotorická síla rotoru. Tímto způsobem se ovšem změní i průběh momentové charakteristiky pracovní harmonické. Zvýší se záběrný moment a jmenovitý skluz, a tím i ztráty. Příklad změny momentové charakteristiky a snížení vlivu přídatných momentů zvětšením rotorového odporu je na Obr. 20. Pro motor $P = 2,2 \text{ kW}$, $U = 380 \text{ V } \Delta$, $f = 50 \text{ Hz}$, $2p = 4$, počet drážek na statoru ($Z_1 = 24$), počet drážek na rotoru ($Z_2 = 32$) se zešikmením rotorových drážek o jednu statorovou rozteč byl snížen průřez kruhů nakrátko z $F = 180 \text{ mm}^2$ na $F = 60 \text{ mm}^2$. Je zde patrné snížení amplitudy přídatného asynchronního momentu, který vzniká při $n_r = (60 \cdot f) / (Z_1 + p) = 115,5 \text{ min}^{-1}$. Současně se zvýšil záběrný moment a skluz při jmenovitém zatížení stoupl z hodnoty $s_n = 4,4 \%$ na $s_n = 7,5 \%$. [5]

Velmi významným prostředkem ke snížení vlivu přídatných momentů je zešikmení drážek rotoru. Sice poněkud vzrůstá diferenční rozptyl pracovní harmonické, což při značném zešikmení může snížit přetížitelnost stroje. Běžně však zešikmení drážek rotoru velmi málo ovlivňuje průběh momentu pracovní harmonické. Moment harmonické řádu ζ je způsobena statorovou harmonickou řádu v , je úměrný součinu příslušných činitelů zešikmení (viz rovnice (14))

$$M_v \approx \frac{\sin \zeta \frac{1}{2} \gamma}{\zeta \cdot \frac{1}{2} \cdot \gamma} \cdot \frac{\sin \nu \frac{1}{2} \gamma}{\nu \cdot \frac{1}{2} \cdot \gamma} \quad (15)$$

kde γ je obvodový úhel zešikvení rotorových drážek vzhledem ke statorovým drážkám. První člen rovnice (15) respektuje závislost momentu na zešikvení při stejném proudu v rotoru, druhý člen určuje vliv zešikvení na velikost rotorových proudů. Např. pro $\gamma = (2\pi)/\nu$, nebude pole řádu ν indukovat v rotoru žádné napětí a tomu odpovídající rotorové pole řádu ζ nevznikne. Moment vymizí. [5]

2.17 Synchronní a asynchronní momenty

Vznik synchronních momentů vzniká působením vyšších harmonických. vyskytují-li se ve spektru statorových i rotorových harmonických harmonické stejného řádu, přičemž rotorová harmonická vzniká působením statorové harmonické jiného řádu. Pracovní harmonická řádu p vyvolává ve statoru i rotoru nejsilnější stupňové harmonické, statorové jsou řádu $\nu = c \cdot Z_1 \pm p$ a rotorové jsou řádu $\mu = c \cdot Z_2 \pm p$, kde c je libovolné kladné celé číslo.

Značné synchronní momenty vzniknou za podmínek

$$\omega_r = 0, \text{ je-li } Z_1 = Z_2 \quad (16)$$

$$\omega_r = \frac{2 \cdot \omega}{p + (Z_2 - p)} = \frac{2 \cdot \omega}{Z_2}, \text{ je-li } Z_2 - Z_1 = 2p \quad (17)$$

$$\omega_r = \frac{2 \cdot \omega}{p - (Z_2 + p)} = -\frac{2 \cdot \omega}{Z_2}, \text{ je-li } Z_1 - Z_2 = 2p \quad (18)$$

$$Z_2 = 6 \cdot c \cdot p, \quad \text{kde } c = 1, 2, 3, \dots \quad (19)$$

$$Z_2 = (6 \cdot c \pm 2) \cdot p \quad (20)$$

Vlivem přesycení krčků zubů vznikají synchronní momenty, za podmínky

$$Z_2 = 2 \cdot p \cdot (3 \cdot c \pm 1), \quad \text{kde } c = 1, 2, 3, \dots \quad (21)$$

Při splnění podmínky (21) vzniká synchronní sedlo, při úhlové rychlosti rotoru

$$\omega_r = \pm \frac{4 \cdot \omega}{Z_2} \quad (22)$$

$$Z_2 = Z_1 \pm 4 \cdot p \quad (23)$$

Obecně mohou synchronní sedla vznikat při úhlových rychlostech rotoru podle

$$\omega_r = \pm \frac{2 \cdot c_1 \cdot \omega}{c_2 \cdot Z_2}, \quad \text{kde } c_1 = 0, 1, 2, \dots; c_2 = 1, 2, 3, \dots \quad (24)$$

Podle obecného vztahu (24) vznikají za uvedených podmínek synchronní sedla při rotorových otáčkách za minutu

$$n_r = \pm \frac{120 \cdot c_1 \cdot f}{c_2 \cdot Z_2}, \quad \text{kde } c_1 = 0, 1, 2, \dots; c_2 = 1, 2, 3, \dots \quad (25)$$

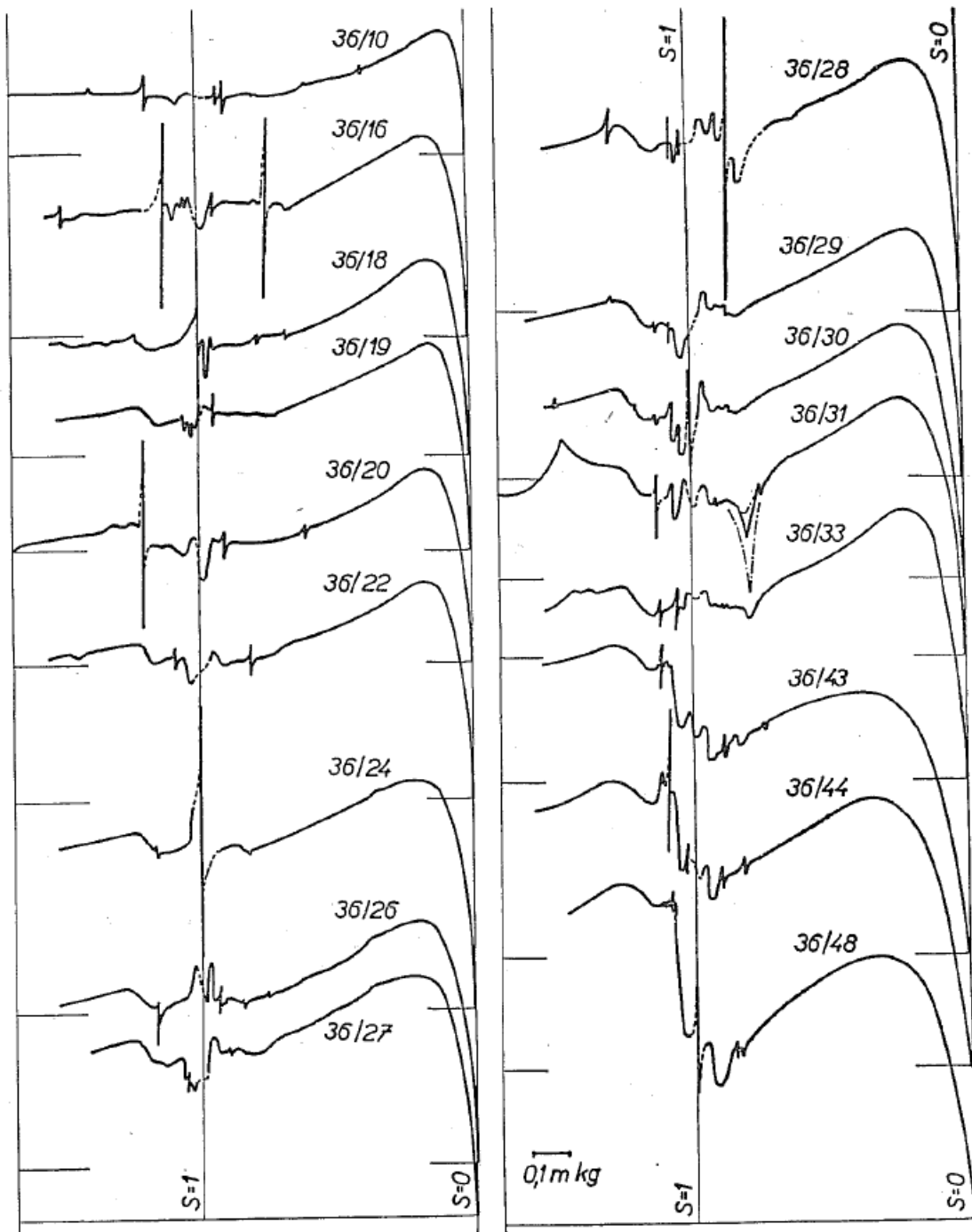
Tyto momenty jsou zesíleny při splnění podmínky (23) následujícím jevem. Pokud působí na stupňovou harmonickou magnetomotorické síly statoru řádu $\nu = Z_1 \pm p$ proměnná magnetická vodivost vzduchové mezery způsobená přesycením krčků statorových zubů, vzniká člen úměrný $\cos[(Z_1 \pm 3 \cdot p) \cdot \alpha \pm 3 \cdot \omega \cdot t]$. Tato harmonická statorového pole způsobuje se stupňovými harmonickými rotoru řádu $\mu = Z_2 \pm p$ synchronní momenty za stejných podmínek, které jsou udány rovnicemi (22) a (23). [5]

Tab. 2 Tabulka se vznikem synchronních momentů podle rotorových a statorových drážek [5]

$Z_1 = 24$	$Z_2 =$	12	16	20	24	28	32	36
	$n_r =$	0	375 750	-300	0	214	-188 375	0
$Z_1 = 36$	$Z_2 =$	24	28	32	36	40	44	48
	$n_r =$	0	214 -429	-188	0	150	-136 272	0
$Z_1 = 48$	$Z_2 =$	20	28	32	36	40	44	48
	$n_r =$	-300	214 -429	-188	0	150 300	-136 272	0

Na Obr. 21 jsou znázorněny momentové charakteristiky experimentálního měření, které je rozebráno podle [5]. Bylo provedeno měření na čtyřpólovém asynchronním motoru s kotvou nakrátko $P = 1,1$ kW, $n = 1\,500$ ot.min⁻¹, $2p = 4$, $f = 50$ Hz, pro 3 různé statory ($Z_1 = 24, 36, 48$) a 19 různých rotorů s různým počtem drážek.

Pro případ 36 drážek na statoru a 28 drážek na rotoru je dle Obr. 21 velké synchronní sedlo při $n_r = 214$ ot.min⁻¹, z ostatních je nejvíce patrné při $n_r = -105$ ot.min⁻¹ a $n_r = -430$ ot.min⁻¹. Asynchronní sedla jsou zde zanedbatelná.



Obr. 21 Průběh momentu asynchronního motoru $P = 1,1 \text{ kW}$, $2p = 4$, $Z_1 = 36$ s rotory $Z_2 = 10 - 48$ [5]

3 Návrh asynchronního motoru v ANSYS Maxwell

Pro vytvoření simulace byl použit tří fázový asynchronní motor s typovým označením 1LE1002. Jedná se o 4 pólový stroj ($2p = 4$) s 36 drážkami na statoru a 28 drážkami na rotoru.

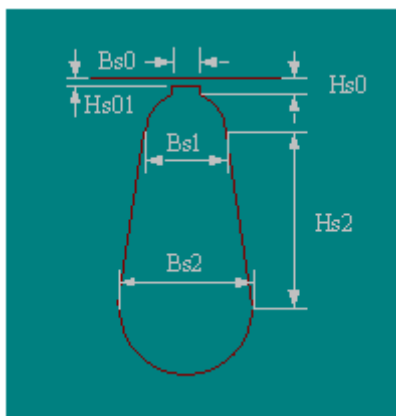
3.1 Parametry rotoru

Počet drážek	28
Vnitřní průměr	35
Vnější průměr	99,5 mm
Vinutí	jednovrstvé
Plnění drážky	0,98
Materiál vinutí	Al
Materiál plechů	M22 24G
Délka rotoru	79,2 mm

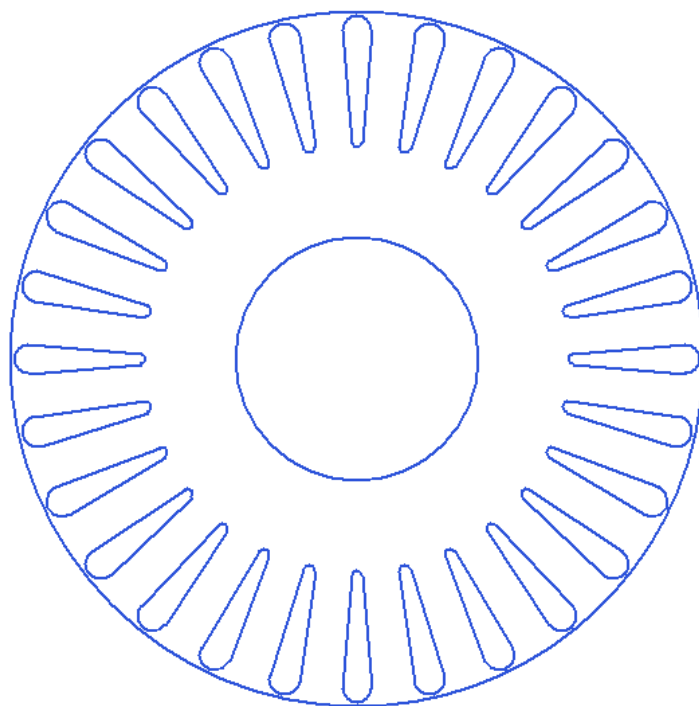
3.1.1 Rozměry rotorové drážky

Tab. 3 Rozměry rotorové drážky z RMXprt

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Hs0	0.55	mm	0.55mm
Hs01	0.55	mm	0.55mm
Hs2	16	mm	16mm
Bs0	0	mm	0mm
Bs1	4.5	mm	4.5mm
Bs2	1.6	mm	1.6mm



Obr. 22 Návrh a rozměry rotorové drážky



Obr. 23 Rotorový plech výstup z ANSYS Maxwell

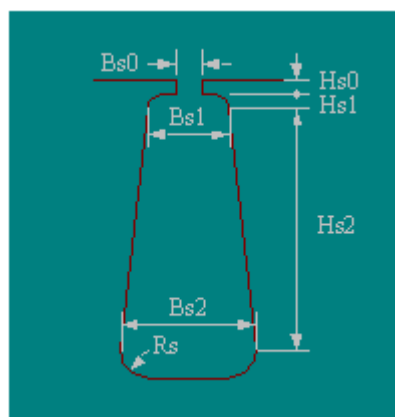
3.2 Parametry statoru

Počet drážek	36
Vnitřní průměr	100 mm
Vnější průměr	155 mm
Vinutí	jednovrstvé
Plnění drážky	0,98
Materiál vinutí	Cu
Materiál plechů	M22 24G
Délka statoru	80 mm

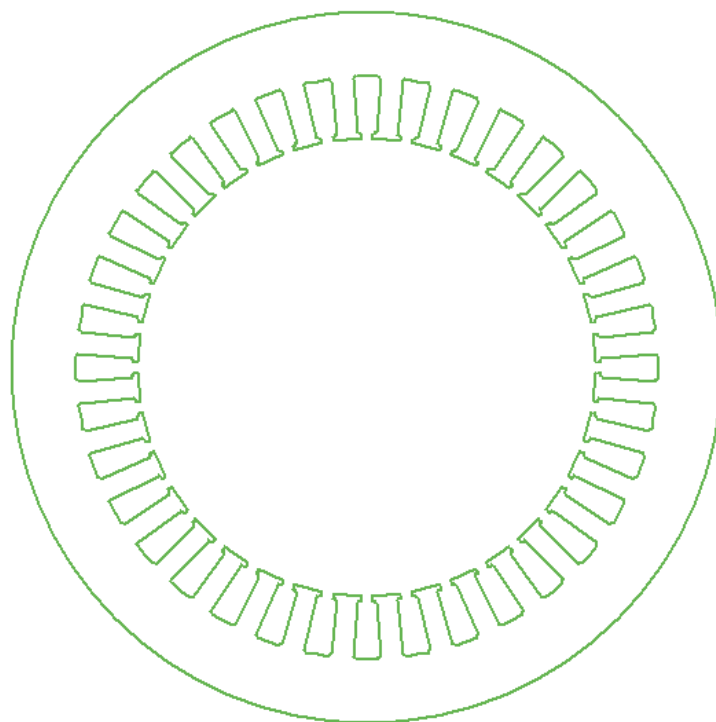
3.2.1 Rozměry statorové drážky

Tab. 4 Rozměry statorové drážky z RMxpřt

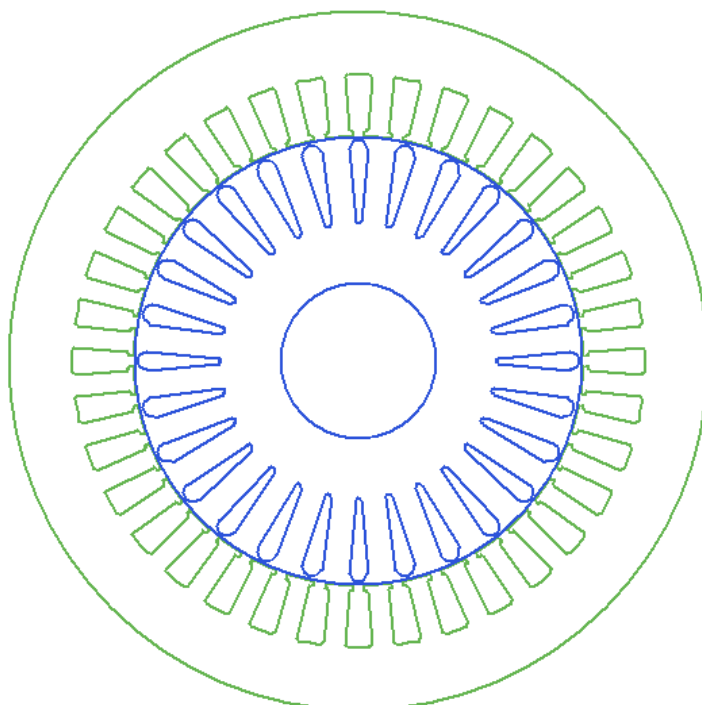
Name	Value	Unit	Evaluated Value
Hs0	0.8	mm	0.8mm
Hs1	0.3	mm	0.3mm
Hs2	11.7	mm	11.7mm
Bs0	2.6	mm	2.6mm
Bs1	4.5	mm	4.5mm
Bs2	6.1	mm	6.1mm
Rs	0.5	mm	0.5mm



Obr. 24 Návrh a rozměry statorové drážky



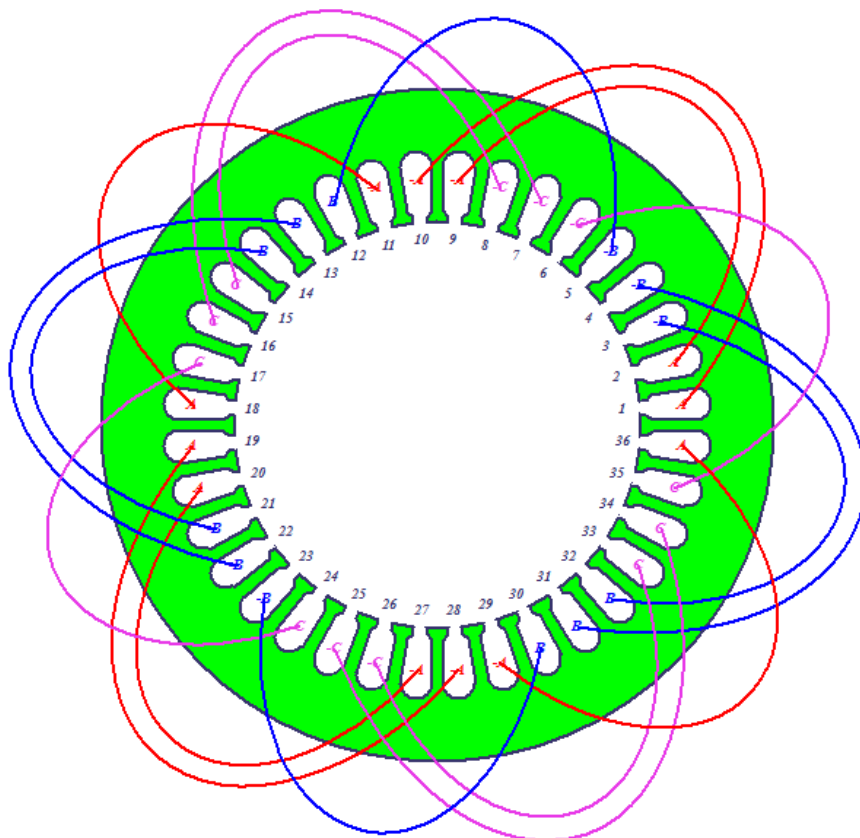
Obr. 25 Statorový plech výstup z ANSYS Maxwell



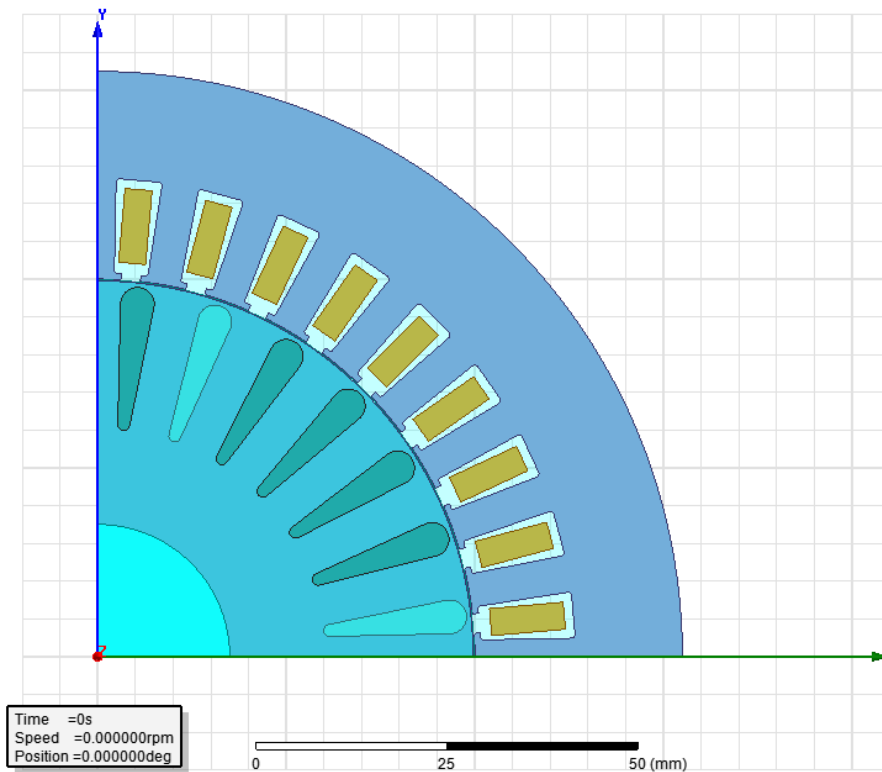
Obr. 26 Rotorové a statorové plechy

Tab. 5 Tabulka zapojení vinutí cívek na statoru

	Phase	Turns	In Slot	Out Slot
Coil_1	A	37	1	10
Coil_2	A	37	2	9
Coil_3	-C	37	7	16
Coil_4	-C	37	8	15
Coil_5	B	37	31	4
Coil_6	B	37	32	3
Coil_7	-A	37	11	18
Coil_8	C	37	35	6
Coil_9	-B	37	5	12
Coil_10	A	37	19	28
Coil_11	A	37	20	27
Coil_12	-C	37	25	34
Coil_13	-C	37	26	33
Coil_14	B	37	13	22
Coil_15	B	37	14	21
Coil_16	-A	37	29	36
Coil_17	C	37	17	24
Coil_18	-B	37	23	30



Obr. 27 Zapojení statorového vinutí

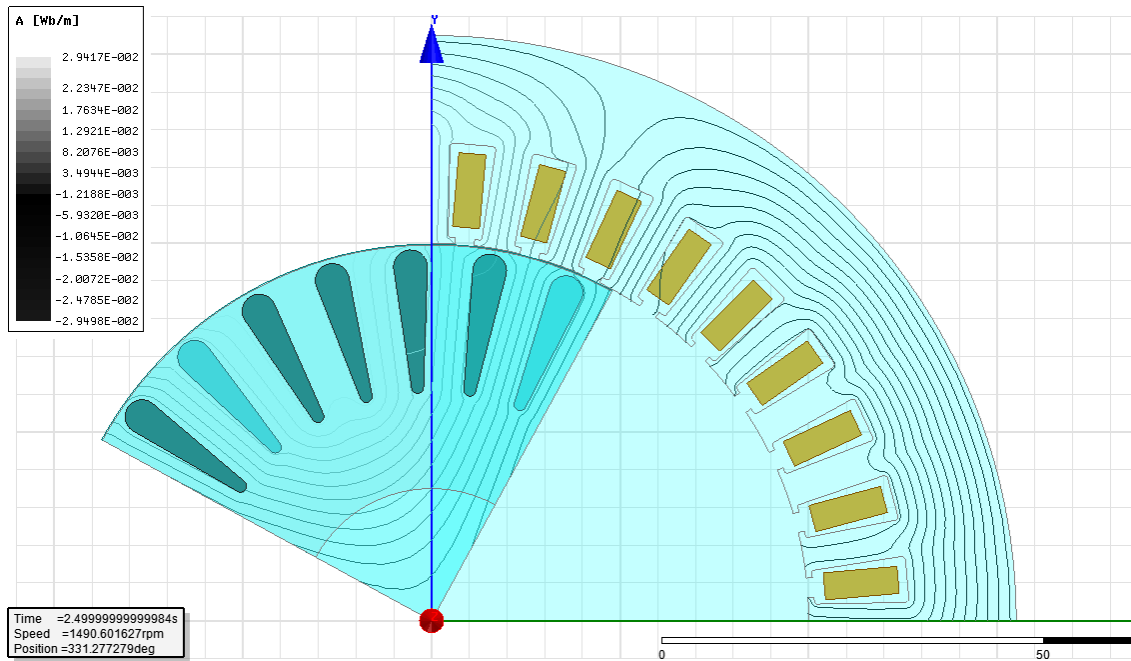


Obr. 28 2D pohled na 1 pól stroje v řezu

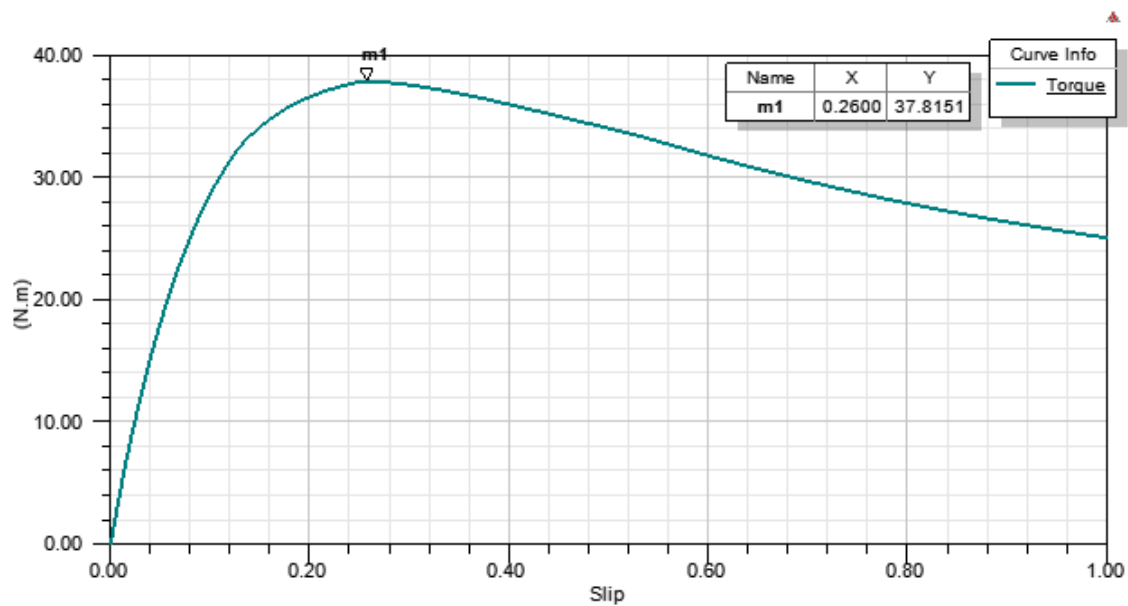
Obr. 28 a Obr. 29 jsou 2D modely vytvořeného asynchronního motoru pomocí RMxprt, je zde znázorněn vždy jeden pól čtyř pólového stroje ($2p = 4$), pokud by se jednalo o stroj dvou pólový, výsledný 2D model by měl tvar půlkružnice, zobrazoval by polovinu stroje.

Obr. 29 zobrazuje rozložení indukčních čar a jejich intenzitu v čase $t = 2,5$ s, otáčkách $n = 1490$ ot.min⁻¹. Předpokládáme, že všechny indukční čáry procházejí jen zuby. Drážkami, které mají značně větší magnetický odpor, tyto indukční čáry neprocházejí.

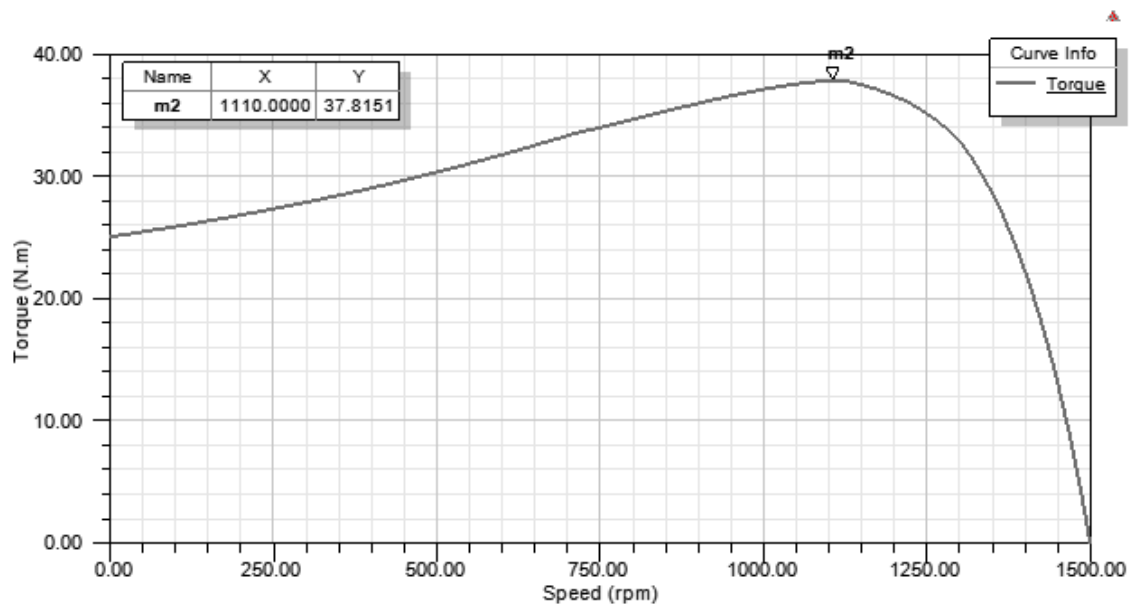
Zapojení satorového vinutí se vytváří z výkresu, do tabulky (Tab. 5) se zapisují vstupní a výstupní strany cívek, které jsou uloženy ve satorových drážkách.



Obr. 29 Magnetický obvod indukčního stroje

Obr. 30 Statická momentová charakteristika $M = f(s)$ z programu ANSYS Maxwell RMXprt

Na Obr. 30 je znázorněna statická momentová charakteristika kde moment je závislý na skluzu, je zde vyznačena hodnota skluzu zvratu ($s_{zv} = 0,26$), tomu odpovídá maximální hodnota momentu ($M_{max} = 37,82 \text{ N.m}^{-1}$).



Obr. 31 Statická momentová charakteristika $M = f(n)$ z programu ANSYS Maxwell RMXprt

Na Obr. 31 je znázorněna statická momentová charakteristika vykreslena v prostředí ANSYS Maxwell RMXprt, kde moment je závislý na otáčkách motoru, s vyznačenou hodnotou otáček ($n = 1110 \text{ ot. min}^{-1}$) při maximálním momentu ($M_{\max} = 37,82 \text{ N.m}^{-1}$).

3.3 Přidání nového materiálu do knihovny

Pro statorové a rotorové plechy navrhnutého motoru je zapotřebí vložit do knihovny ANSYS Maxwell materiál M530-50A. Od výrobce plechů byly vybrány parametry pro 50 Hz. V prvním kroku je zapotřebí vložit BH křivku materiálu, zadává se křivka prvotní magnetizace.

V tomto případě výrobce neudával přímo hodnotu magnetické indukce, ale magnetické polarizace. Hodnota magnetické indukce byla přepočtena dle vztahu

$$B = (\mu_0 \cdot H) + J \quad (26)$$

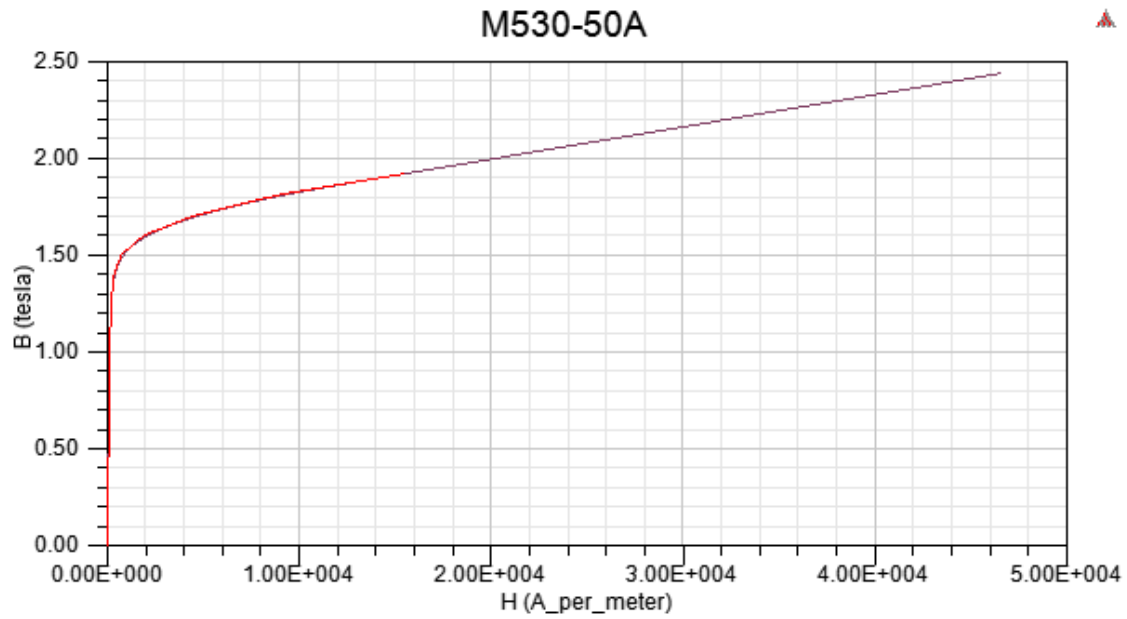
V prvních řádcích Tab. 6 nebyl rozdíl magnetické polarizace a magnetické indukce příliš patrná. Pro hodnotu č. 15 však rozdíl činil 0,02 T.

Příklad výpočtu pro řádek č. 14:

$$B = (\mu_0 \cdot H) + J = (4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 9007) + 1,8 = \underline{1,8111 \text{ T}}$$

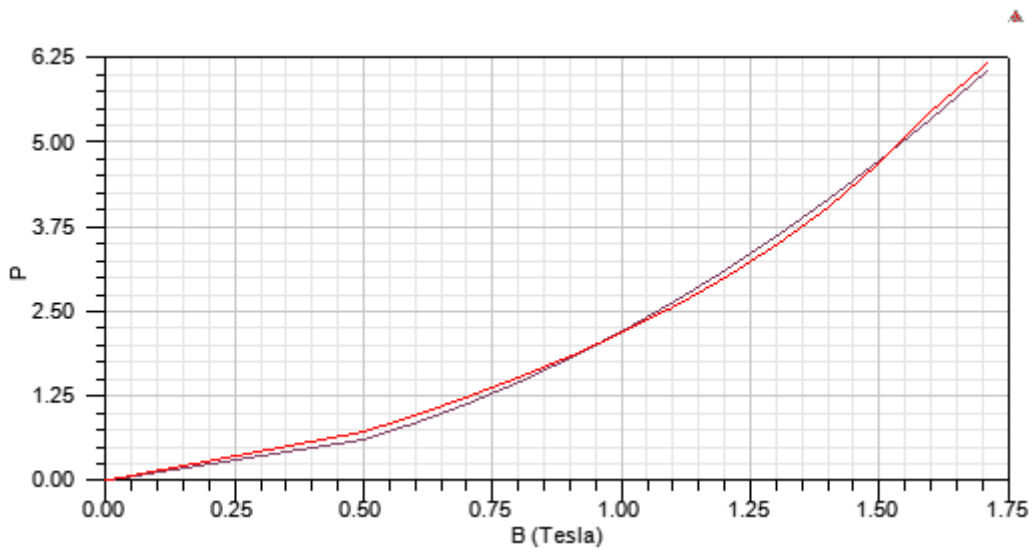
Tab. 6 Tabulka výrobce materiálu M530-50A s přepočtenou hodnotou indukce

$f = 50 \text{ Hz}$				
č.	$J \text{ (T)}$	$H \text{ (A.m}^{-1}\text{)}$	$B \text{ (T)}$	$P_s \text{ (W.kg}^{-1}\text{)}$
1	0,5	105	0,500131947	0,72
2	0,6	114	0,600143257	0,96
3	0,7	124	0,700155823	1,23
4	0,8	135	0,800169646	1,52
5	0,9	147	0,900184726	1,83
6	1	163	1,000204832	2,18
7	1,1	184	1,100231221	2,56
8	1,2	216	1,200271434	2,99
9	1,3	272	1,300341805	3,48
10	1,4	395	1,400496372	4,03
11	1,5	759	1,500953788	4,7
12	1,6	1933	1,602429079	5,47
13	1,7	4618	1,70580315	6,14
14	1,8	9007	1,81131853	
15	1,9	15504	1,919482901	



Obr. 32 Křivka prvotní magnetizace

Po vytvoření křivky prvotní magnetizace viz Obr. 32, následuje zadání ztrát v jádře a vytvoření křivky tzv. BP křivky pro 50 Hz (Obr. 33), zde je důležité zadávat vše ve správných jednotkách, které udává výrobce plechu.

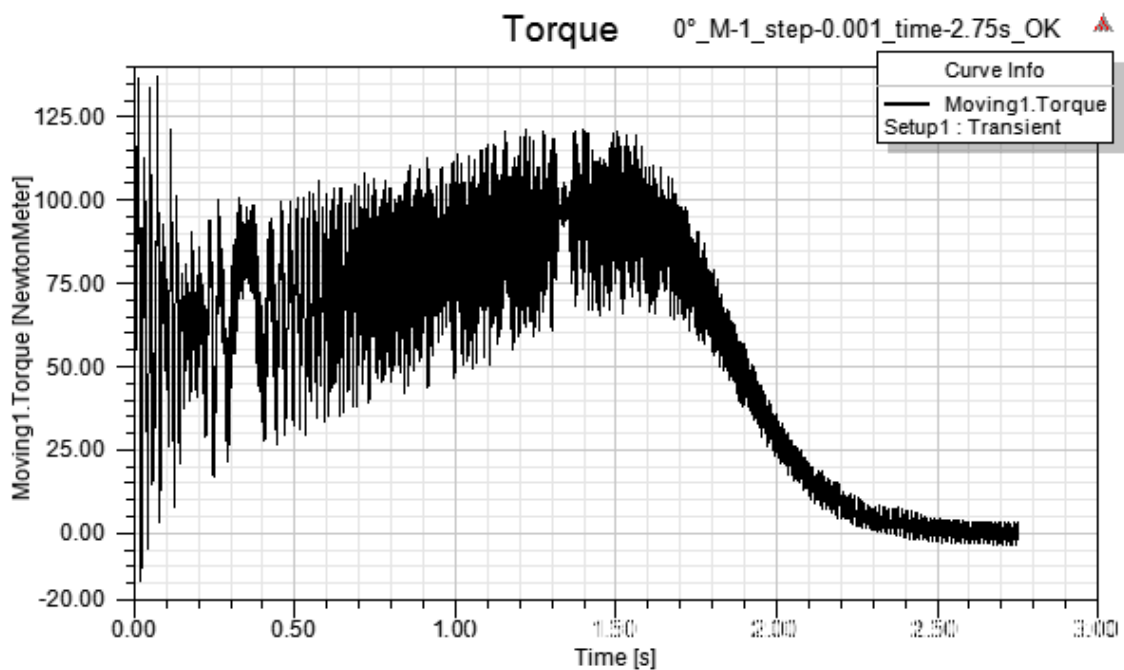


Obr. 33 BP graf $P = f(B)$

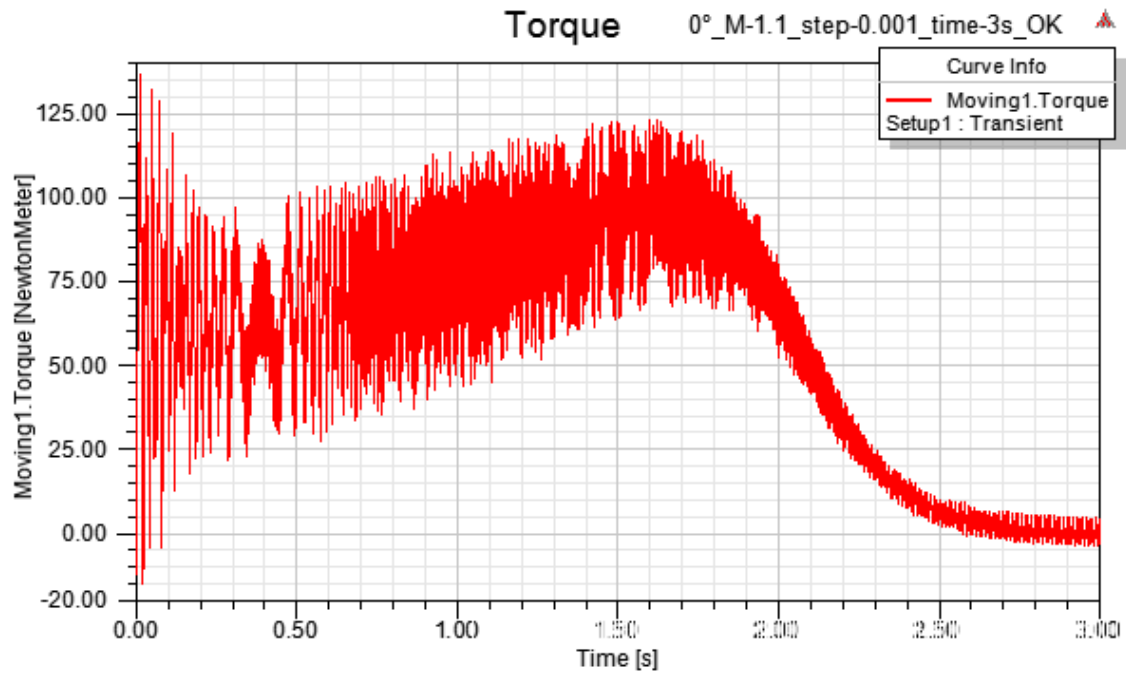
4 Simulace momentové charakteristiky

4.1 Změna momentu setrvačnosti

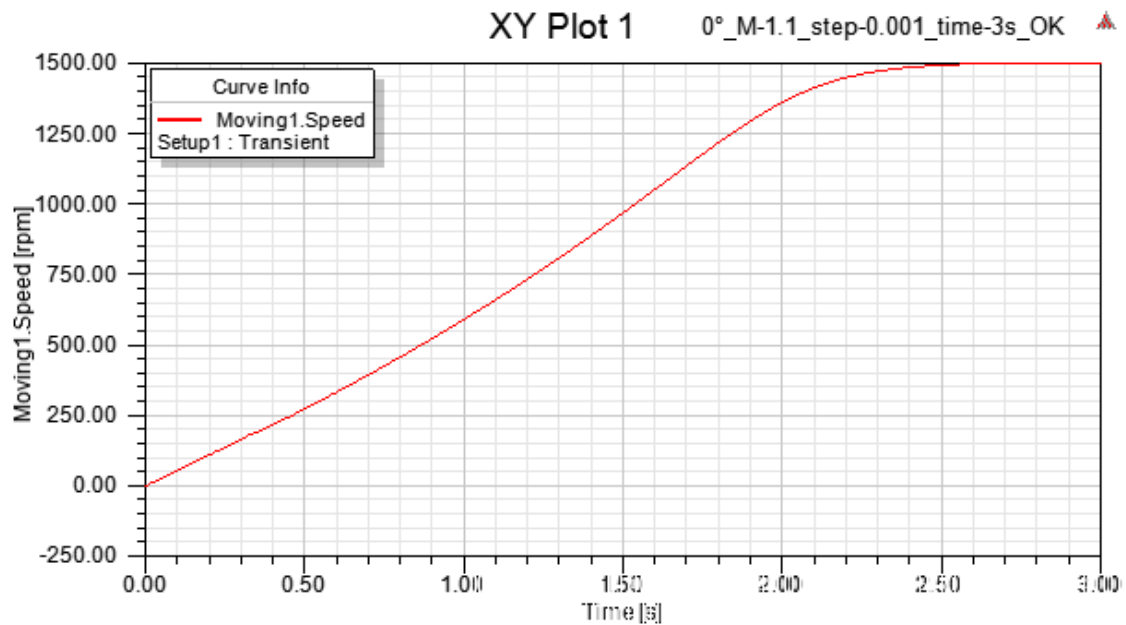
V grafech na Obr. 34, Obr. 35, Obr. 37 a Obr. 38 jsou znázorněny průběhy závislosti moment na čase pro natočení drážek na rotoru 0° , lze z nich určit za jak dlouho se motor při nastaveném momentu setrvačnosti rozběhne na synchronní otáčky. Pro případ, kdy je moment setrvačnosti $1,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ viz Obr. 35 je vynesena na Obr. 36 závislost otáček na čase, z tohoto grafu lze jasně určit, za jakou dobu dosáhne motor synchronních otáček, případně odečíst hodnotu otáček v libovolném čase.



Obr. 34 Dynamická momentová charakteristika, natočení drážky 0° , moment setrvačnosti $1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$

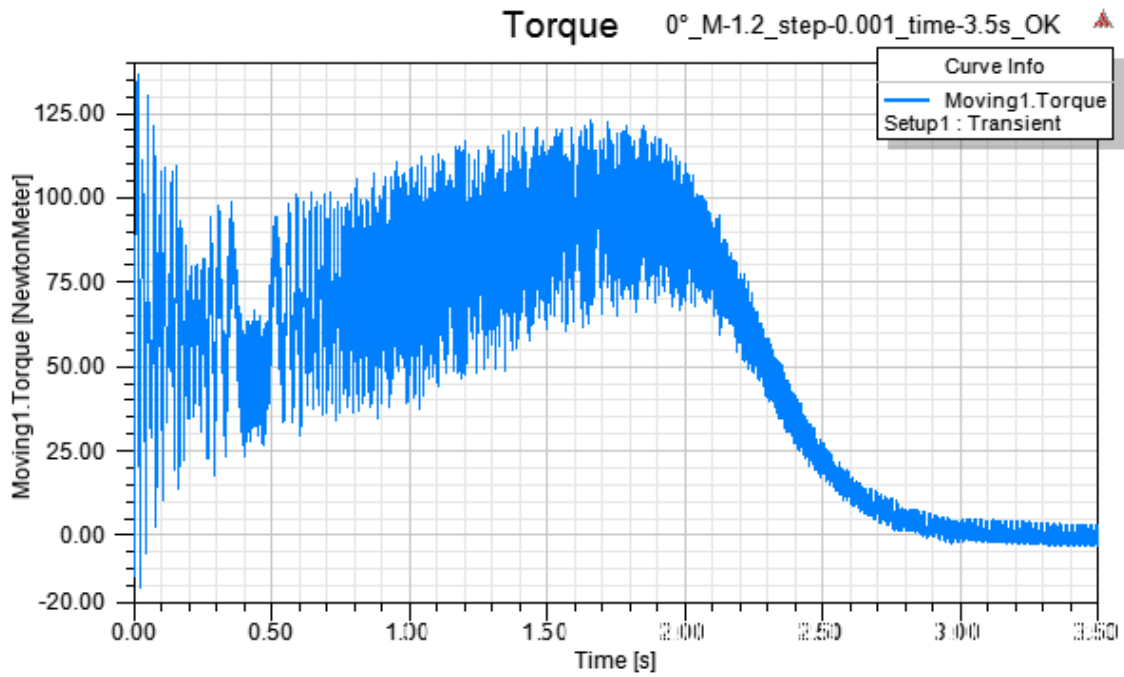


Obr. 35 Dynamická momentová charakteristika, natočení drážky 0° , moment setrvačnosti $1,1 \text{ kg.m}^2$

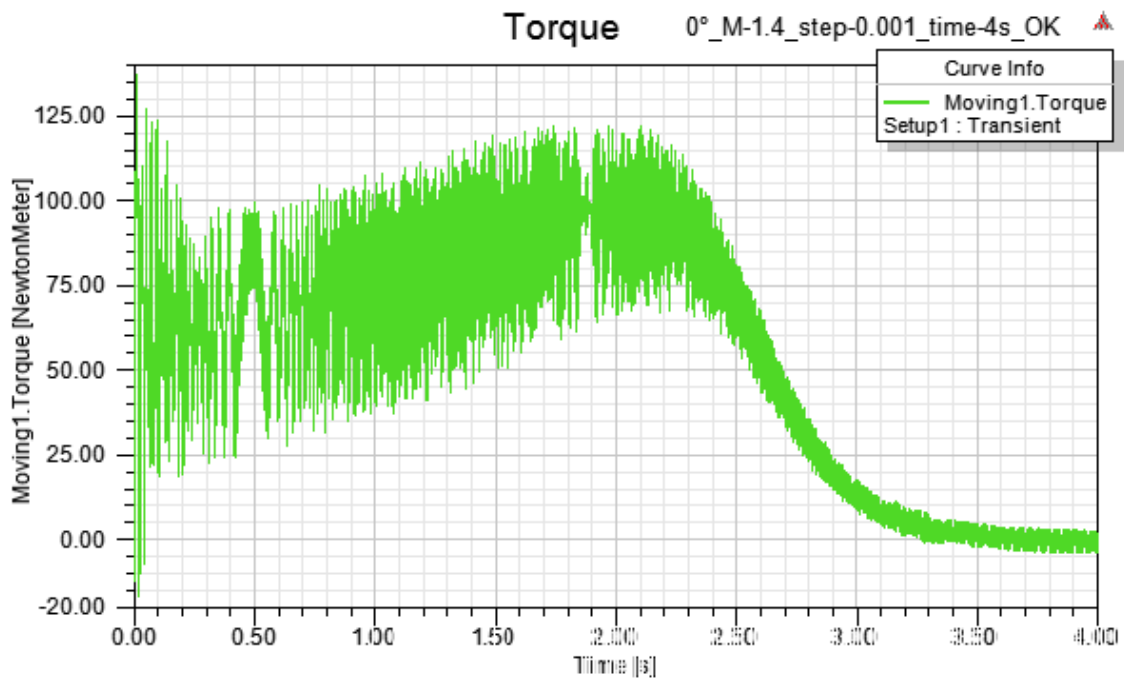


Obr. 36 Závislost otáček na čase

Jak je patrné z Obr. 36 pro hodnotu momentu setrvačnosti $M = 1,1 \text{ kg.m}^2$ dosáhne motor synchronních otáček v čase 2,6 sekundy.



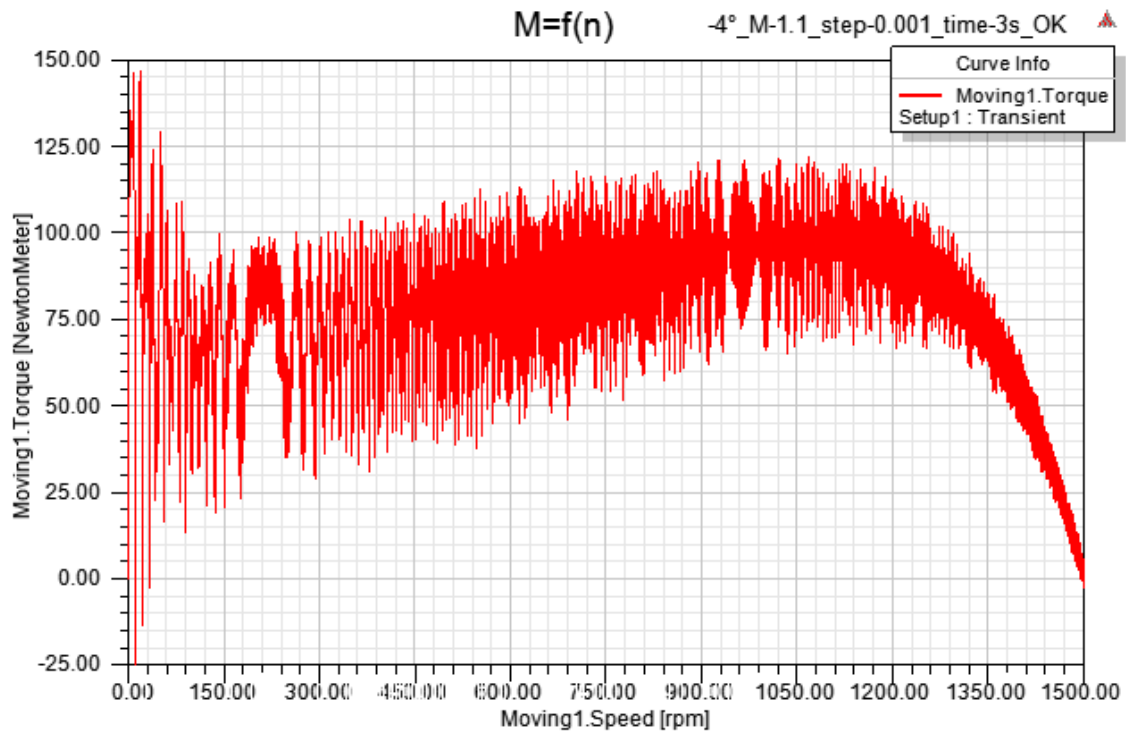
Obr. 37 Dynamická momentová charakteristika, natočení drážky 0°, moment setrvačnosti 1,2 kg.m²



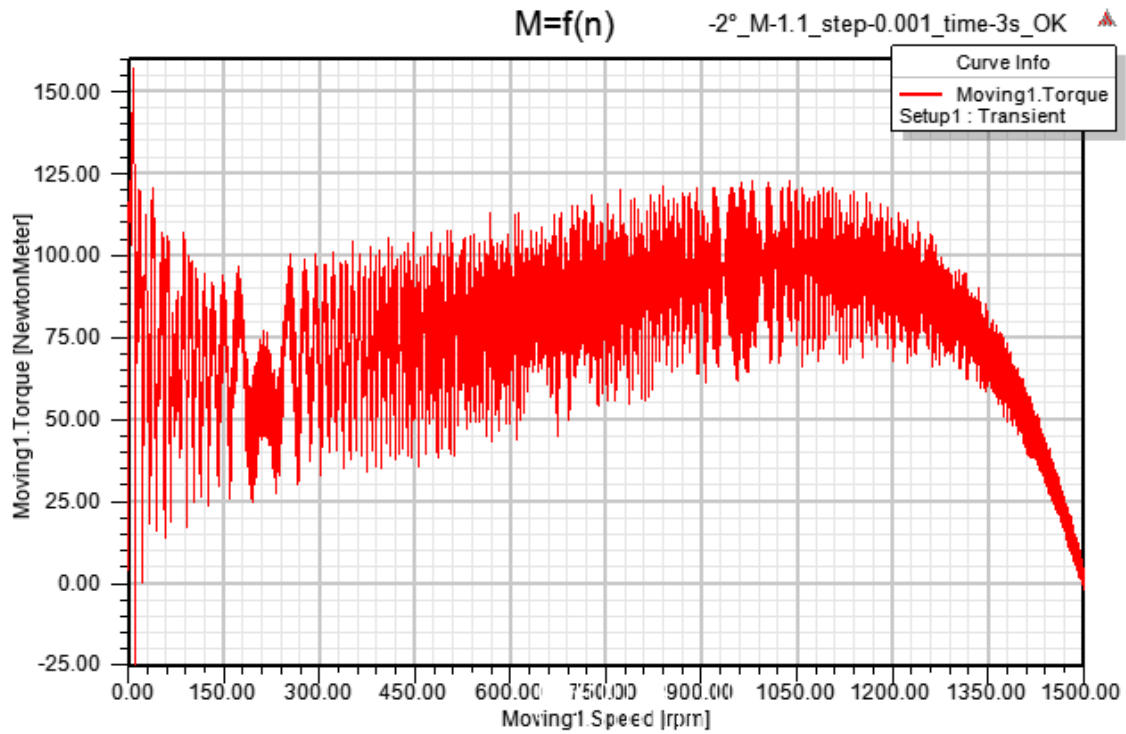
Obr. 38 Dynamická momentová charakteristika, natočení drážky 0°, moment setrvačnosti 1,4 kg.m²

4.2 Natočení rotorových drážek o 10°

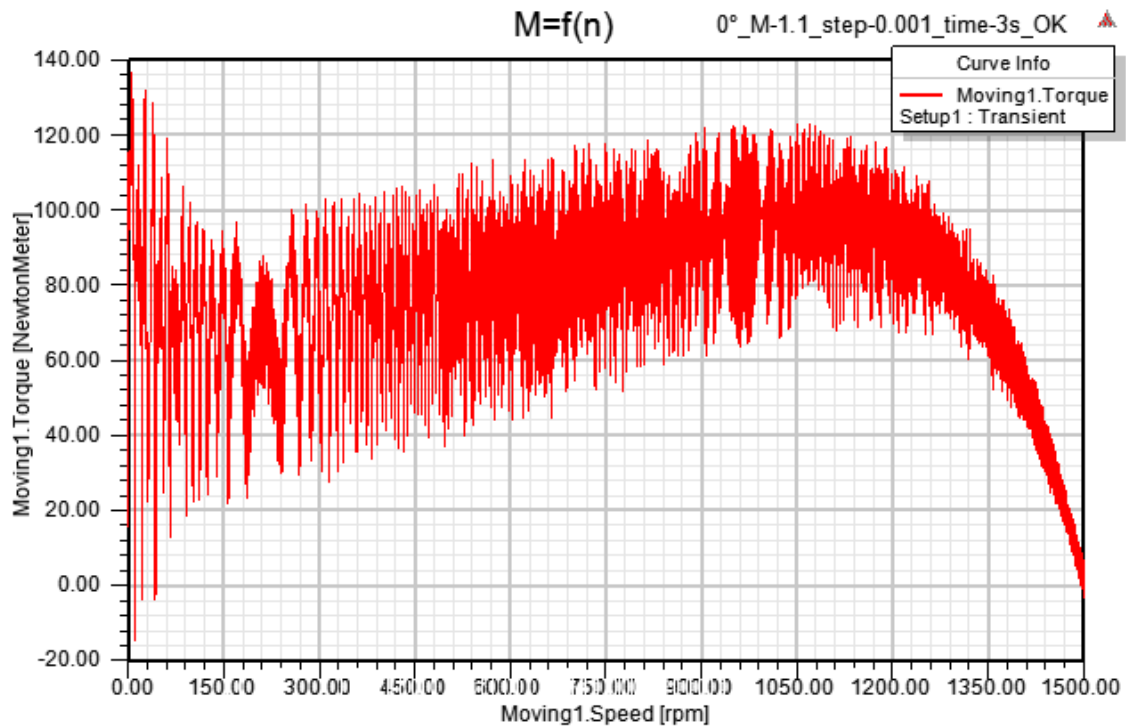
Následující simulace (Obr. 39 - Obr. 43) popisují vytvoření celkového natočení drážek rotoru ve 2D simulaci o 10° po částech, je vytvořeno 5 grafů, pro každý případ je voleno jiné počáteční natočení rotoru -4° , -2° , 0° , 2° a 4° , následně je těchto 5 grafů spojeno a zprůměrováno v jeden výsledný (viz Obr. 45). Tímto postupem je vytvořeno natočení rotoru o jednu statorovou drážku, tj. 10° .



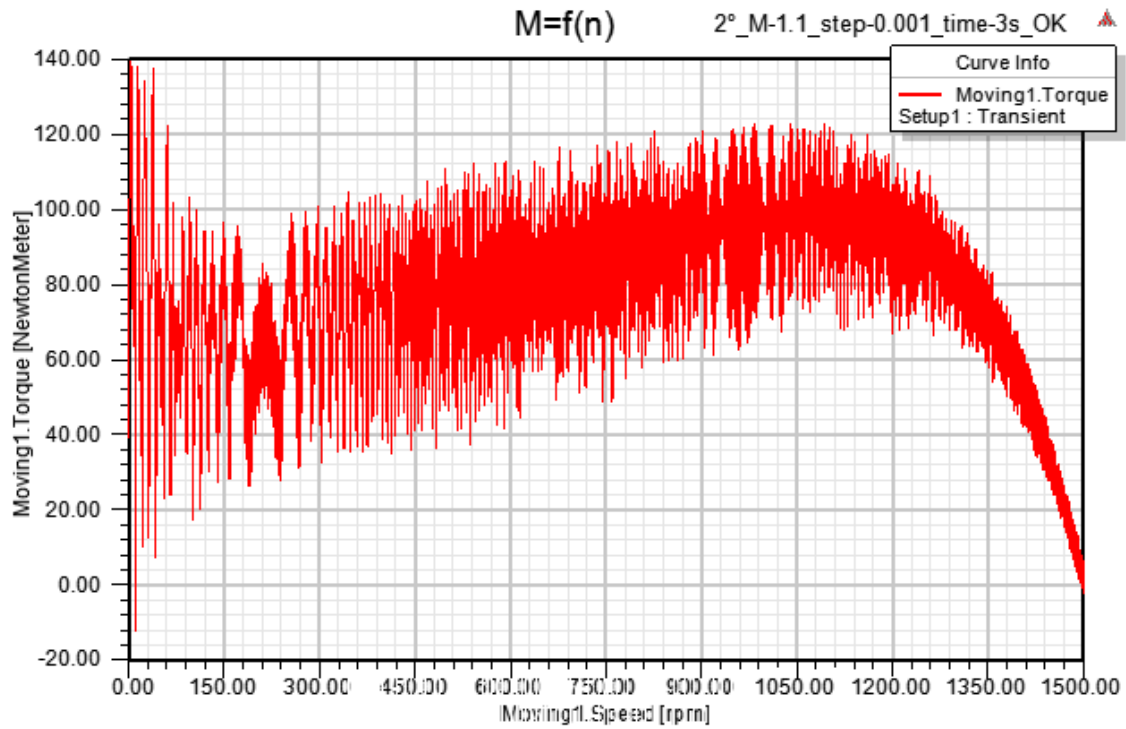
Obr. 39 Dynamická momentová charakteristika, natočení drážky -4° , moment setrvačnosti $1,1 \text{ kg.m}^2$



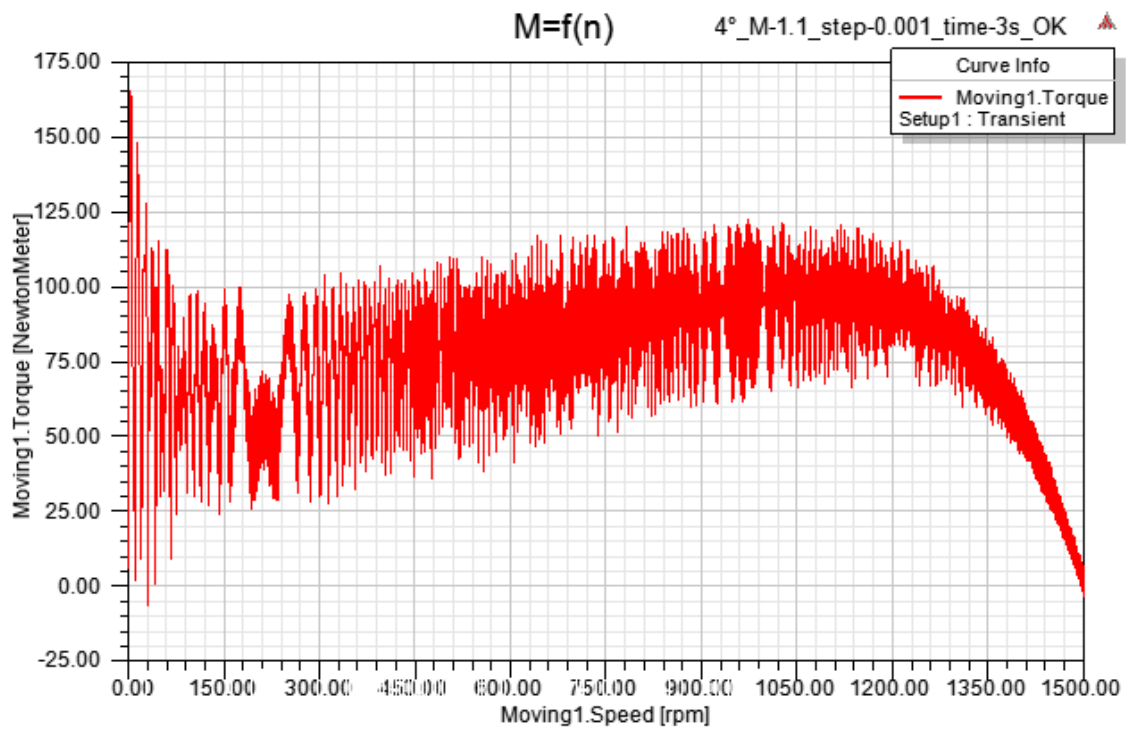
Obr. 40 Dynamická momentová charakteristika, natočení drážky -2° , moment setrvačnosti $1,1 \text{ kg.m}^2$



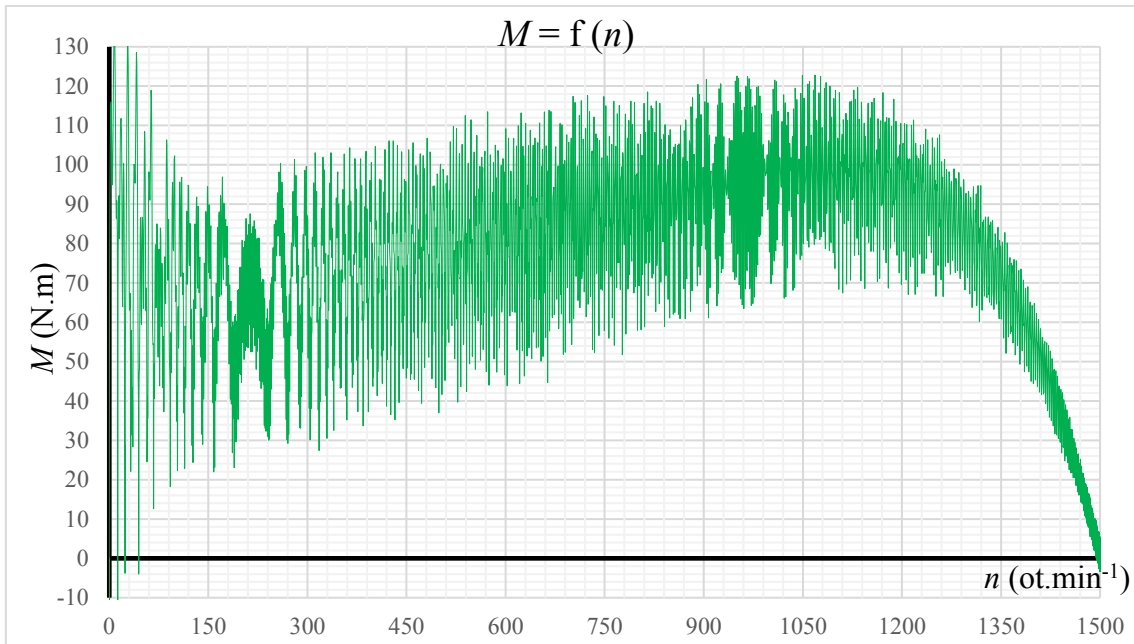
Obr. 41 Dynamická momentová charakteristika, natočení drážky 0° , moment setrvačnosti $1,1 \text{ kg.m}^2$



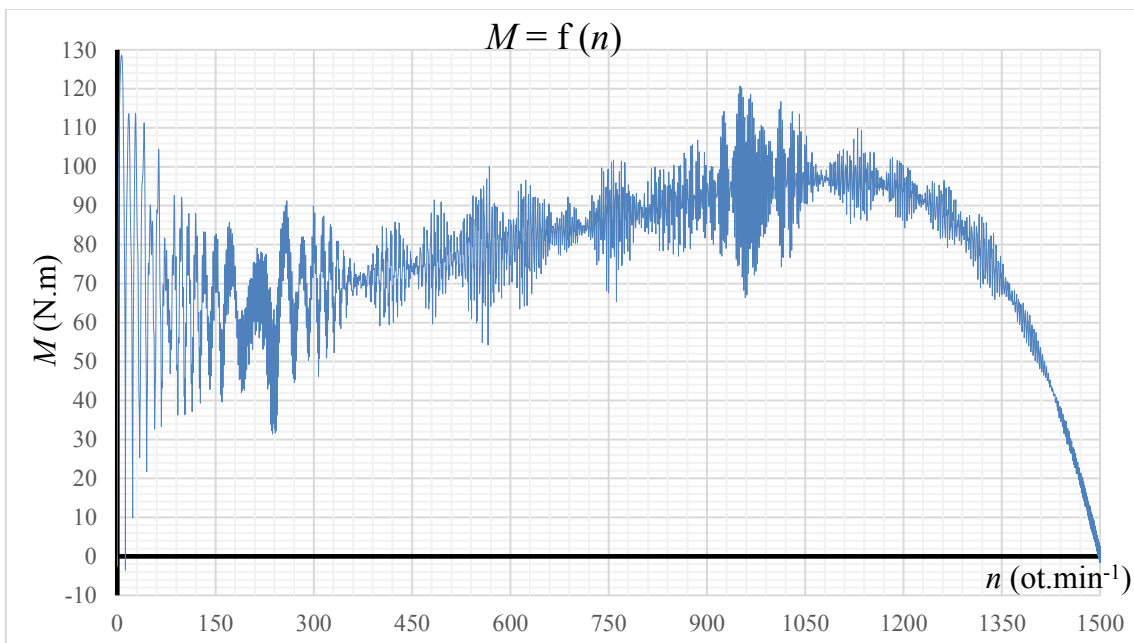
Obr. 42 Dynamická momentová charakteristika, natočení drážky 2°, moment setrvačnosti 1,1 kg.m²



Obr. 43 Dynamická momentová charakteristika, natočení drážky 4°, moment setrvačnosti 1,1 kg.m²



Obr. 44 Dynamická momentová charakteristika, natočení drážky 0° , moment setrvačnosti $1,1 \text{ kg.m}^2$



Obr. 45 Dynamická momentová charakteristika natočení drážky 10° (zprůměrované výsledky - 4° ; -2° ; 0° ; 2° a 4°)

5 Vyhodnocení simulace a výsledků simulace

5.1 Vyšetření synchronních momentů

Jak vyplývá z kapitoly 2.17, pro případ motoru s 36 drážkami na statoru a 28 drážkami na rotoru vznikají největší synchronní momenty pro daný případ (viz Tab. 2) v otáčkách $n_r = 214 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ a $n_r = -429 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$.

Příklad výpočtu podle vztahu (25)

$$n_r = \frac{120 \cdot c_1 \cdot f}{c_2 \cdot Z_2} = \frac{120 \cdot 2 \cdot 50}{2 \cdot 28} = 214,29 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \cong \underline{214 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}}$$

Dle vztahu (21) vznikají pro motor s rotorem o počtu 28 drážek a statorem o počtu drážek 36 synchronní momenty, vlivem přesycení krčků zubů.

$$Z_2 = 2 \cdot p \cdot (3 \cdot c \pm 1) = 2 \cdot 2 \cdot (3 \cdot 2 \pm 1) = 28$$

Jak je patrné z grafů závislosti momentu na čase (Obr. 34 - Obr. 38) se měnil moment setrvačnosti z hodnoty $M = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ až $M = 1,4 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. Pro první případ ($M = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$) byla doba simulace 2,75 sekund a pro poslední případ ($M = 1,4 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$) byla potřebná doba simulace 4 sekundy. Z toho vyplývá, že čím větší moment setrvačnosti, tím delší doba simulace je potřebná k dosažení synchronních otáček ($n_s = 1\,500 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$), motor potřebuje delší dobu k rozběhu.

Natočení rotorových drážek o 10° snížilo velikost synchronního sedla ve $214 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ a celkově snížilo parasitní momenty, jak lze pozorovat při srovnání grafů Obr. 44 (bez natočení drážek rotoru) a Obr. 45 (s natočenými drážkami rotoru).

6 Závěr

Tato diplomová práce se zabývá simulací momentové charakteristiky pomocí metody konečných prvků. Bylo popsáno konstrukční uspořádání asynchronního motoru, princip jeho funkce a náhradní schéma. Největší část se věnuje momentové charakteristice, ať už z hlediska tvaru, který lze měnit pomocí druhu rotorové klece nebo vlivu natočení drážek rotoru na momentovou charakteristiku. Bylo zjištěno, že natočením drážek se do jisté míry potlačí vliv vyšších harmonických, avšak zároveň dojde ke snížení indukovaného napětí. Se snížením indukovaného napětí se v praxi přímo nepočítá, ale natočením drážek se zvětší rozptylové reaktance statorového a rotorového vinutí. Negativními důsledky natočení drážek na rotoru jsou zmenšení záběrného momentu a momentové přetížitelnosti motoru, kvůli zvětšení rozptylových reaktancí. Drážky se obvykle natáčejí o jednu statorovou drážku, v případě použitého motoru 36 drážek na statoru tato hodnota byla 10° .

Dle štítkových hodnot, rozměrů statorových a rotorových plechů, včetně drážek na statoru a rotoru jsem vytvořil model motoru v prostředí RMxprt, následovalo přenesení modelu z tohoto prostředí do 2D prostoru v Maxwell, kde byly vyneseny jednotlivé momentové charakteristiky pro příslušné počáteční natočení rotoru. V závislosti na nastavené hodnotě momentu setrvačnosti pro 4 případy trvala doba simulace určitý čas. Pro první případ, kdy měl moment setrvačnosti hodnotu $1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, trvala doba simulace 2,75 sekund, naproti tomu pro poslední případ pro moment setrvačnosti $1,4 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ byla potřebná doba simulace 4 sekundy. Z toho vyplývá, že čím větší je moment setrvačnosti stroje, tím delší dobu bude trvat, než se motor rozběhne na synchronní otáčky.

Natočení rotorových drážek o 10° bylo provedeno zprůměrováním pěti situací. Nastaven byl moment setrvačnosti $1,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ pro všech 5 případů. V prvním případě měl rotor počáteční pozici natočení -4° , druhý případ -2° , dále 0° , 2° a 4° . Následně se vynesly závislosti momentu na otáčkách motoru pro jednotlivé případy a zprůměrovaly do jednoho grafu. Lze vypořadovat, že největší synchronní sedlo se vyskytlo při $214 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$. Porovnáním grafu momentové charakteristiky motoru bez natočených drážek rotoru a případu s natočenými drážkami rotoru o 10° bylo zjištěno, že došlo ke snížení momentového sedla a omezení vlivu vyšších harmonických.

Dalším vývojem tématu práce může být studie jiných možností, jak snížit přídavné momenty, účinek vyšších harmonických magnetického pole a zmenšení momentových sedel. Například amplitudy vyšších harmonických lze snížit zvětšením vzduchové mezery nebo zvětšením odporu rotorového vinutí.

Literatura

- [1] MRAVEC Rudolf. *Elektrické stroje a přístroje, I. Elektrické stroje*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1982. 432 s.
- [2] Indukční stroje [online]. [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: <http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FS/prednasky/sylab_As-Motory%20nazorne%206_2.pdf>
- [3] SlideServe [online]. [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: <<http://www.slideserve.com/reeves/asynchronn-a-synchronn-stroje>>
- [4] oEnergetice.cz [online]. [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: <<http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/asynchronni-stroje-konstrukce-princip-funkce-a-rizeni/>>
- [5] HELLER Bedřich, HAMATA Václav. *Přídavná pole, síly a ztráty v asynchronním stroji*. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1961.
- [6] G.N. Petrov. *Elektrické stroje 2, ASYNCHRONNÍ STROJE - SYNCHRONNÍ STROJE*. 1. vyd. Praha: Academia nakladatelství Československé akademie věd, 1982. 732 s.
- [7] CIGÁNEK, BAUER. *Elektrické stroje a přístroje*. 2. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1957. 640 s.
- [8] BAŠTA, CHLÁDEK. *Teorie elektrických strojů*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1968. 584 s.
- [9] BAŠTA. *Měření na elektrických strojích. 4. měření na indukčních strojích*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962. 312 s.
- [10] KOPYLOV a kol. *Stavba elektrických strojů*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1988. 688 s.
- [11] emotor [online]. [cit. 2017-03-10]. Dostupné z: <<http://www.emotor.cz/asynchronni-elektromotor-trifazovy.htm>>
- [12] motor.feld.cvut [online]. [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <http://motor.feld.cvut.cz/sites/default/files/predmety/AD1B14SP1/AD1B14SP1_cv06_Skripta-Asynchronni_motor.pdf>