

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Görgesovo sedlo v momentové charakteristice
synchronního motoru**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Petr KUTĚJ**
Osobní číslo: **E17B0117P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Téma práce: **Görgesovo sedlo v momentové charakteristice synchronního motoru**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

Zásady pro vypracování

1. Popište mechanismus vzniku Görgesova sedla v momentové charakteristice u strojů z vyniklými póly.
2. Vytvořte a detailně popište matematický model synchronního stroje, který bude schopen tento jev postihnout.
3. Proveďte simulační analýzu rozběhových charakteristik a diskutujte dosažené výsledky.

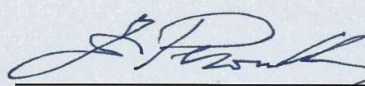
Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**


Seznam doporučené literatury:


1. Elektronické informační zdroje IEEE (dostupné přes knihovnu ZČU – <http://ieeexplore.ieee.org/>)
2. KINGSLEY, Ch., UMANS, S., FITZGERALD, A.: Electric Machinery, 7th edition. Humanities & Social Sciences, 2013. ISBN: 978-0073380469
3. PYRHONEN, J., JOKINEN, T., HRABOVCOVA, V.: Design of Rotating Electrical Machines, 2nd Edition. Wiley, 2013. ISBN: 978-1-118-58157-5

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Vladimír Kindl, Ph.D.**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání bakalářské práce: **11. června 2020**


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 4. října 2019

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na vznik Görgesova sedla v momentové charakteristice synchronního motoru. Je zde popsán vznik tohoto jevu a je nasimulován na matematickém modelu. Tento model je vytvořen v programu Ansys Electronics Desktop. Výsledky simulací jsou porovnány s teorií.

Klíčová slova

Görgesovo sedlo, momentová charakteristika, asynchronní rozběh, auto-synchronní rozběh, synchronní motor, negativní složka pole

Abstract

The bachelor theses presents the Görgess saddle in torque characteristics of synchronous motor. This theses describes the begining of this phenomenon, simulating the start of the synchronous motor, where this phenomenon is and comparing the results with the teoretic one. The motor is created in Ansys Electronics Desktop.

Key words

Görgess saddle, torque characteristic, asynchronous drive, synchronous motor, counter-rotating field

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 15. 6. 2020

Petr Kutěj

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Vladimíru Kindlovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 SYNCHRONNÍ STROJE	12
1.1 KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ.....	12
1.2 TOČIVÝ MOMENT SYNCHRONNÍHO STROJE	13
1.3 TLUMIČ SYNCHRONNÍHO STROJE	14
1.4 ASYNCHRONNÍ ROZBĚH.....	15
1.5 GÖRGESOVO SEDLO.....	16
1.6 EFEKT VYNIKLÝCH PÓLŮ.....	17
1.7 TLUMIČ A ZÁBĚRNÝ MOMENT	18
2 MATEMATICKÝ MODEL	21
2.1 NÁVRH MATEMATICKÉHO MODELU.....	21
3 VÝSLEDKY SIMULACE ROZBĚHU SYNCHRONNÍHO MOTORU	26
4 POROVNÁNÍ NASIMULOVANÝCH VÝSLEDKŮ S TEORIÍ	31
ZÁVĚR	33
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	35
PŘÍLOHY	1

Úvod

Synchronní stroje se v dnešní době nejvíce používají pro výrobu elektrické energie. V elektrárnách využívajících páru se používají turboalternátory, a to zejména v uhelných či jaderných elektrárnách. Ve vodních elektrárnách se používají pomaloběžné hydroalternátory.

Synchronní motory jsou vysoce rozšířené například pro pohon velkých výkonů, a v dnešní době i pro pohon elektromobilů. Synchronní stroj můžeme rozbíhat několika způsoby, například asynchronním motorem či rozběhem synchronního motoru pomocí tlumičů, tzv. asynchronním rozběhem. Při tomto rozběhu vzniká Görgesovo sedlo, které by mělo zapříčinit zpomalení rotoru. Toto sedlo by se mělo prokázat zejména v rozběhové momentové charakteristice.

Cílem této práce je popis, kdy Görgesovo sedlo vzniká, proč vzniká a jaké složky v tom hrají roli. Další cíl práce je vytvoření matematického modelu, který postihne tento jev. Posledním úkolem bude porovnání výsledků s teoretickým předpokladem.

V první části popisují teorii o synchronním stroji. Stručně zde zazní konstrukční provedení. Dále se zaměřím na moment synchronního stroje. S tím souvisí i tlumič, který je nedílnou součástí asynchronního rozběhu. Poté přejdu na nejdůležitější část, vznik Görgesova sedla. Druhá část pojednává o vytvoření matematického modelu. Zde popisují parametry motoru, které zadávám v Ansys Electronics Desktop. V poslední části mé práce analyzuji výsledky simulace.

Seznam symbolů a zkratk

b_p	Šířka pólu [m]
I, \bar{I}	Proud, efektivní hodnota, fázor proudu
I_s	Statorový proud
j	Rozdíl počtu drážek na pól a fáze v různých vrstvách
k_v	Činitel vinutí
k_d, k_q	Koeficient převodu v podélné a příčné ose
L	Indukčnost
$L_{m\delta}$	Magnetizační indukčnost synchronního stroje s hladkým rotorem
m	Počet fází
M	Točivý moment [Nm]
n_s	Synchronní otáčky [ot/min]
p	Počet pólových dvojic
R	Činný odpor
Re	Reálná složka
s	Skluz
U_{ib}	Indukované napětí
U, \bar{U}	Napětí, efektivní hodnota, fázor napětí
$X_{a\sigma}$	Rozptylová reaktance
X_{ad}	Reaktance reakce kotvy
X	Reaktance
X_d	Synchronní reaktance
Y, \bar{Y}	Admittance, fázor admittance
Z, \bar{Z}	Impedance, fázor impedance
Z_d	Impedance v podélné ose
α	Relativní šířka pólového nástavce
β	Zátěžný úhel
δ	Vzduchová mezera
η	Účinnost
$\zeta_{d,q}$	Harmonický činitel v ose d a q
τ_p	Pólová rozteč
φ	Fázový posuv

ω	Úhlová rychlost
ω_1	Úhlová rychlost napájecího systému
ω_s	Synchronní úhlová rychlost

Indexy

a	Kotva
b	Budící vinutí
d	Podélná osa
D	Tlumič
ef	Efektivní
f	Pole
i	Vnitřní
k	Nakrátko
m	Magnetizační
N	Jmenovitý
ns	Negativní složka
0	Naprázdko
q	Příčná osa
r	Rotor
s	Stator
δ	Vzduchová mezera
σ	Rozptylový
'	Imaginární

1 Synchronní stroje

Jak Petrov [1] uvádí ve své knize, synchronní stroje nejčastěji používáme jako měniče mechanické energie na elektrickou, a ty nazýváme alternátory. Další druh synchronních strojů můžeme nazývat kompenzátory. Ty dodávají jalový výkon do připojené sítě. Posledním typem jsou synchronní motory, které se uplatňují zejména pro pohon zařízení o velkých výkonech. Také se synchronní motory využívají tam, kde je potřeba zachovat přesný poměr mezi kmitočtem sítě a otáčkami stroje. V neposlední řadě se synchronní stroje začaly používat také v automobilovém průmyslu pro pohon elektromobilů, kde se používají motory s permanentními magnety nebo-li PMSM [2]. Důvodem, proč se začaly PMSM používat, je, že mají menší objem, hmotnost, moment setrvačnosti, velkou přetížitelnost a vyšší účinnost [2]. Bohužel nevýhodou PMSM je vyšší pořizovací cena a složitější konstrukce [2]. Zajímavostí je, že Görgesovo sedlo vzniká u všech synchronních strojů, které vykazují magnetickou anizotropii rotoru, neboli vyniklost rotoru.

Synchronní stroj má pracovní bod při synchronní otáčivé rychlosti, tedy při rychlosti pole statoru. Synchronní rychlost můžeme vypočítat vzorcem [3]

$$\omega_s = \frac{\omega_1}{p}. \quad (1)$$

Kmitočet napájecího systému určuje ω_1 a p je počet pólových dvojic [3].

1.1 Konstrukční provedení

Pokud se podíváme na rotory, existují zásadně jen dva typy, a to hladký rotor nebo rotor s vyniklými póly [3]. S ohledem na pokrok ale tahle zmínka již neplatí. Jak jsem již zmínil, dnes existují jiné rotory, a to například rotory s permanentními magnety [2].

Petrov [1] uvádí, že stroje dvoupólové a velké čtyřpólové se navrhují s hladkým rotorem, kde je budící vinutí tvořeno rozloženými cívkami, ty jsou dále vloženy do drážek rotoru. Čtyřpólové a vícepólové stroje malých a středních výkonů jsou pak s rotorem s vyniklými póly. Zde je budící vinutí uloženo na jednotlivých pólech rotoru.

Synchronními stroji můžeme pokrýt velký rozsah výkonů, od zlomků wattů až do tisíců megawattů [1]. S tím přichází i nutnost rozdílného konstrukčního provedení [3].

Kniha [3] uvádí, že stroje rychloběžné konstruujeme s válcovým rotorem a nelze překročit průměr rotoru jeden metr, protože z pohledu mechanického zatížení by to nevydržel. Tyto rotory dosahují obvodové rychlosti cca 565 km/hod při 3000 ot/min a mají délku i více než sedm metrů. Pomaloběžné stroje mají rotor s vyniklými póly. Počet pólů určuje synchronní rychlost. Tyto stroje mají většinou velký průměr rotoru, až 14 metrů, ale malou délku, jeden až dva metry.

1.2 Točivý moment synchronního stroje

Nejjednodušší způsob odvození točivého momentu je u stroje s válcovým rotorem [4]. Teorie v knize [3] uvádí točivý moment zhruba takto. Předpokládejme ideální stroj, tedy všechny ztráty budou nulové a R_a bude také nulové. Poté platí rovnost výkonu a příkonu, dále pak i mechanický výkon je roven výkonu elektrickému.

$$M_i \omega_s = mUI \cos \varphi'. \quad (2)$$

Pro úpravu rovnice č. 2 lze využít zjednodušený fázorový diagram pro $R_a = 0$ (Obrázek 2). Uvažujme ho jako obecný trojúhelník a potom dostaneme [3]:

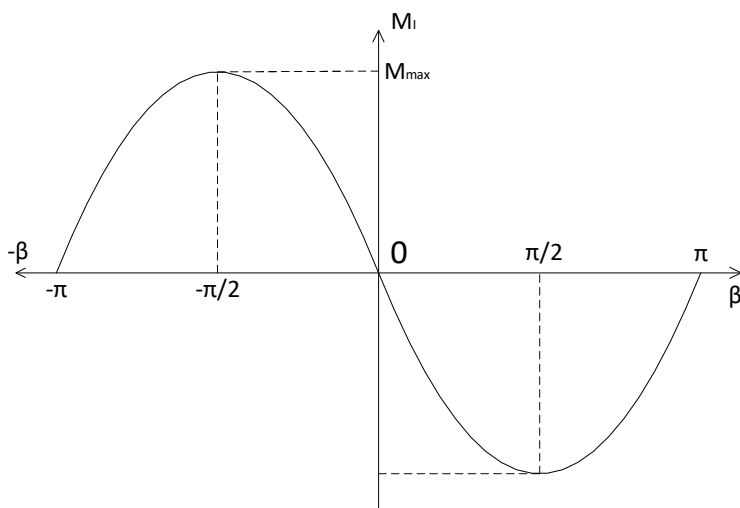
$$\frac{X_d I}{\sin \beta} = \frac{U_{ib}}{\sin \left(\varphi' + \frac{\pi}{2} \right)} = \frac{U_{ib}}{\cos \varphi'}, \quad (3)$$

z rovnice č. 3 určíme

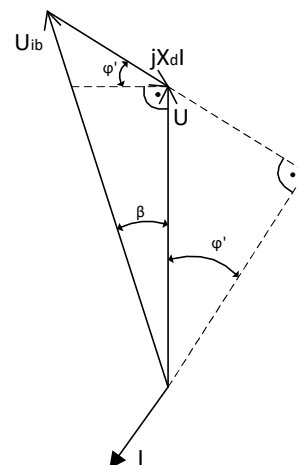
$$I \cos \varphi' = \frac{U_{ib}}{X_d} \sin \beta, \quad (4)$$

a po dosazení máme vzorec pro moment

$$M_i = \frac{m}{\omega_s} U \frac{U_{ib}}{X_d} \sin\beta = \frac{m}{\omega_s} U I_k \sin\beta = \frac{pm}{\omega_1} U I_k \sin\beta. \quad (5)$$



Obrázek 1: Momentová charakteristika synchronního stroje $R_a=0$ – upraveno [3]



Obrázek 2: Fázorový diagram pro $R_a=0$ – upraveno [3]

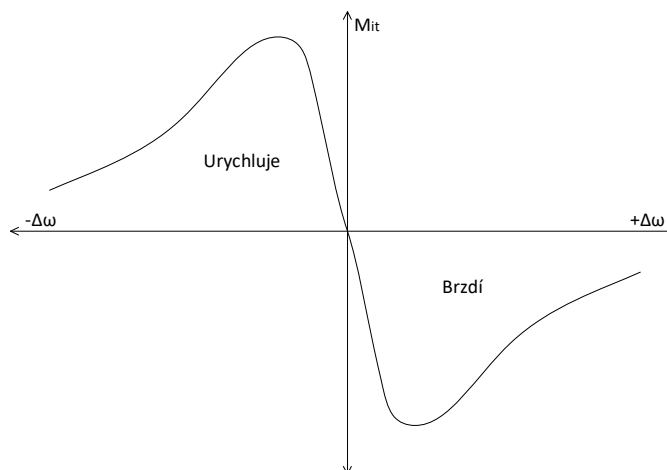
Z toho nám plyne $M_{max} \approx I_b$. Pokud takto odvozujeme, nebereme ohled na znaménko momentu v motorickém či generátorickém režimu. V generátorickém režimu je zátěžný úhel $\beta > 0$ a moment $M_i < 0$. V motorickém režimu to je přesně naopak (Obrázek 1) [3].

1.3 Tlumič synchronního stroje

Z obrázku 1, který zobrazuje momentovou charakteristiku v závislosti na zátěžném úhlu β můžeme vidět, že každá změna zatížení vede ke změně zátěžného úhlu. Bartoš ve své knize z roku 2004 uvádí [5], že při změně budícího proudu se mění maximální moment M_{max} , je to tedy obdobné. Tato reakce způsobuje změnu rychlosti rotujících hmot a při tom musí platit rovnováha všech momentů, které právě na tyto hmoty působí. Musí tedy platit [5]

$$\sum M_i = 0. \quad (6)$$

Dále Bartoš uvádí, že skoro každý synchronní stroj má na rotoru nejen budící vinutí, ale i tzv. tlumič. Je to víceméně klec nakrátko podobná jako u asynchronního stroje a její funkce je totožná. Při synchronní rychlosti se do tlumiče neindukují žádná napětí a proudy jsou nulové. Pokud se rychlost rotoru změní, tedy $\omega \neq \omega_1$, vzniká moment vyobrazený na obrázku 3.



Obrázek 3: Moment tlumiče při odchylce od synchronní rychlosti – upraveno [5]

Z charakteristiky (Obrázek 3) vyplývá, že tlumič působí svým momentem proti odchylkám synchronní rychlosti, a tím tlumí kývání a udržuje chod rotoru v synchronismu [5]. Tlumicí účinek má i masivní železo rotoru [5]. Z toho také vyplývá, že je tlumič nezbytný u strojů napájených ze sítě [6].

1.4 Asynchronní rozběh

Asynchronní rozběh nejlépe popisuje Mravec [7]. V dnešní době se synchronní motory spouští většinou indukčním, neboli asynchronním rozběhem. K tomu nám pomáhá rozběhové vinutí, které je uloženo v pólových nástavcích, tzv. tlumič. Když připojíme motor k síti stejně jako asynchronní motor, pak jeho točivé magnetické pole roztočí rotor téměř na synchronní otáčky. Po zapnutí buzení se dostane rotor synchronním momentem do synchronních otáček. Uvádí se, že stačí roztočit na 95% n_s .

Dále Mravec popisuje, že během indukčního rozběhu se v budícím vinutí indukují nebezpečně vysoké napětí a toto napětí by mohlo poškodit izolaci budícího vinutí. Z tohoto důvodu se musí během rozběhu zkratovat budící vinutí přes vhodný odpor. Tyčové rozběhové vinutí je nahrazeno masivními pólovými nástavci, spojenými po obou stranách kruhy, a to z tepelných důvodů. Pólové nástavce sice mají velkou tepelnou kapacitu a netrpí oteplováním, ale zhoršují poměry při rozběhu. Povrch motoru by neměl překročit dle zkušeností teplotu 200 K, jinak by se poškodila izolace vinutí v drážkách pod klíny.

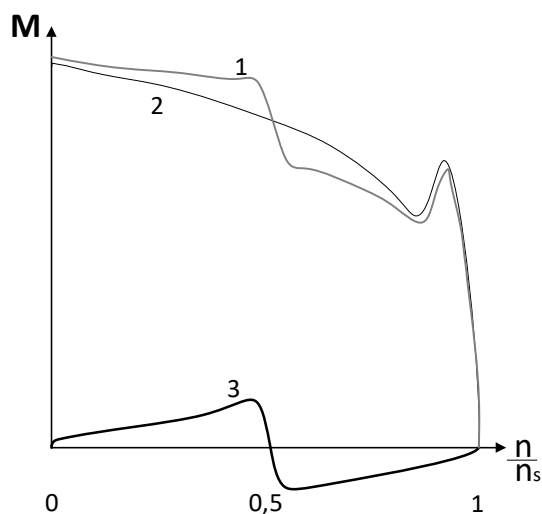
Po připojení vinutí statoru k síti dochází k přechodnému proudovému nárazu, obdobně jako u indukčních motorů [7]. U přímého připojení je jmenovitý proud 3,5 až 5ti násobný, přitom záběrný moment je 0,5 až 2,5 násobek jmenovitého momentu [7]. Záběrný proud a moment je ovlivněn příslušným odporem u rozběhového vinutí [7].

1.5 Görgesovo sedlo

Tuto problematiku popisuje kniha [6]. Motor s vyniklými póly a tlumičem vytváří pulsující magnetický tok, který se uzavírá do rotoru při asynchronním chodu. Tento pulzující tok je složen z pozitivní a negativní složky magnetického toku rotoru. Negativní složka tohoto magnetického toku vytváří elektromagnetické pole, které působí proti běhu rotoru. Elektrická úhlová rychlost této negativní složky toku závisí na skluzu a lze ji vypočítat vztahem [6]

$$\omega_{ns} = \omega_s(1 - 2s). \quad (7)$$

Při synchronismu ($s = 0$, $\frac{n}{n_s} = 1$) se nevytváří žádné pulzující pole v rotoru, a proto nevznikne ani negativní složka magnetického toku. Jeho rychlost je pak synchronní rychlost statoru. Se zvyšujícím se skluzem narůstá i velikost negativní složky magnetického toku, a to až do hodnoty skluzu blízké 0,5. Při skluzu ($s = 0,5$, $\frac{n}{n_s} = 0,5$) je úhlová rychlost negativní složky magnetického toku nulová. Při skluzu $s = 0,75$ je pak úhlová



Obrázek 4: Asynchronní moment synchronního stroje pro rozběh – upraveno [6]

rychlost negativní složky magnetického toku poloviční a se záporným znaménkem. To znamená, že působí proti pozitivní složce, a tím brzdí rotor. Z toho také vyplývá, že směr otáčení zpětného pole závisí na změnách skluzu a na tom závisí i celkový moment stroje.

Graf na *obrázku 4* znázorňuje 3 průběhy [6]:

1. celkový moment,

2. asynchronní moment produkovaný statorom synchronně rotující složkou toku,
3. moment zpětného pole rotoru.

1.6 Efekt vyniklých pólů

Dále kniha [6] stručně popisuje efekt vyniklých pólů. U motoru s vyniklými póly závisí indukčnost fázových vinutí synchronního motoru na pozici rotoru. Pokud porovnáme magnetickou indukčnost $L_{m\delta}$ stroje s hladkým rotorem a magnetickou indukčnost stroje s vyniklými póly, můžeme říci, že osa d a q magnetické indukčnosti motoru s vyniklými póly je [6]

$$L_{md} = k_d L_{m\delta}, \quad (8)$$

$$L_{mq} = k_q L_{m\delta}. \quad (9)$$

U běžných strojů je k_d zhruba 0,85 a k_q 0,35. Tím pádem proud I_{ns} produkovaný zpětným točivým polem je na začátku rozběhu [6]

$$\frac{I_{ns}}{I_s} = \frac{(k_d^2 - k_q^2) \bar{Z}_1}{(k_d + k_q)^2 (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)}, \quad (10)$$

kde jsou \bar{Z}_1 a \bar{Z}_2 [6]:

$$\bar{Z}_1 = R_s + jX_{s\sigma}, \quad (11)$$

$$\bar{Z}_2 = \frac{R'_D}{s} + jX'_{D\sigma}. \quad (12)$$

Když přidáme běžné hodnoty k_d a k_q , pak $Z_1 = 3Z'_2$ a při startu získáme rozběhový moment [6]

$$\frac{M_{ns}}{M_s} = \left(\frac{I_{ns}}{I_s} \right)^2 \frac{Z'_2}{Z_1} \approx 0,31^2 \frac{1}{3} = 0,032. \quad (13)$$

Moment zpětného pole je tak malý, že může být zanedbán, minimálně při počátečních hodnotách [6]. Při rozběhu jsou vinutí spojena nakrátko, aby se předcházelo vysokonapětovému namáhání vinutí [6].

1.7 Tlumič a záběrný moment

Teorie v knize [6] dále uvádí, že pokud porovnáme klecové vinutí asynchronního stroje se strojem s vyniklými póly (tlumičem), některé tyče vinutí chybí. Tato chybějící vinutí narušují linearitu proudové hustoty v klecovém vinutí a více proudu teče tyčemi blíže k hranám pólu. V ideálním vinutí bude o $1/\alpha$ více vinutí než v reálném. Díky tomuto nedostatku bude rotorové vinutí produkovat menší rychlost rotoru. Toto můžeme vzít v potaz a zanedbat nižší činitele vinutí d a q osy rotoru.

Činitel ideálního vinutí je $k_v = 1$, harmonické činitele ζ_d a ζ_q pro klec s vyniklými póly jsou pro $f_r < 2 \text{ Hz}$ [6]:

$$\zeta_d = \frac{b_p}{\tau_p} - \frac{1}{\pi} \sin\left(\pi \frac{b_p}{\tau_p}\right), \quad (14)$$

$$\zeta_q = \frac{b_p}{\tau_p} - \frac{1}{\pi} \left(1 - 2 \frac{\delta_{def}}{\delta_{qef}}\right) \sin\left(\pi \frac{b_p}{\tau_p}\right). \quad (15)$$

Tyto činitele, uvedené v knize [6], popisují, jak proud teče tlumičem. S harmonickými činiteli můžeme definovat nové činitele vinutí klece rotoru v ose d a v ose q. Harmonický činitel není konstantní v závislosti na frekvenci (viz. Příloha 1). Pro synchronní motory je obvykle rozptylový činitel vinutí tlumiče $\sigma_D = X_{D\sigma}/X_m = 0,05$. Poměr vzduchové mezery $\delta_{qef}/\delta_{def}$ je imaginární hodnota, která není přímo úměrná reálné vzduchové mezeře. Pro klasické synchronní stroje ($\alpha = 0,7$) je obvyklá hodnota $\delta_{qef}/\delta_{def} = 6$. Pro asynchronní stroje dostaneme tuto hodnotu rovnu jedné, dokonce i když jsou některé tyče klecového vinutí poškozeny.

Během asynchronního rozběhu můžeme použít charakteristiky z přílohy 1 [6]. Pro běžné synchronní motory dostaneme průměrné hodnoty $\zeta_d = 0,9$ a $\zeta_q = 0,95$ [6]. Blízko synchronního běhu dostaneme průměrné hodnoty $\zeta_d = 0,45$ a $\zeta_q = 0,8$ [6].

Záběrný proud a moment, uvedený v [6], lze nyní aproximovat do náhradního obvodu d-q osy. V tomto obvodě synchronního stroje máme magnetizační indukčnost, tlumič a dokrátká spojené pole vinutí v paralelní větvi. Dále pak paralelně spojené admitance převedené do d-q osy. Když vypočteme doporučené hodnoty rotoru, můžeme využít následující činitele vinutí pro tlumič rotoru [6]

$$\overline{Y}_{rd} = -\frac{j}{X_{md}} + \frac{\frac{R'_f}{s} - jX'_f}{\left(\frac{R'_f}{s}\right)^2 + (X'_f)^2} + \frac{\frac{R'_{Dd}}{s} - jX'_{Dd}}{\left(\frac{R'_{Dd}}{s}\right)^2 + (X'_{Dd})^2}, \quad (16)$$

$$\overline{Y}_{rq} = -\frac{j}{X_{mq}} + \frac{\frac{R'_{Dq}}{s} - jX'_{Dq}}{\left(\frac{R'_{Dq}}{s}\right)^2 + (X'_{Dq})^2}. \quad (17)$$

Odpovídající impedanci paralelní větve jsou [6]:

$$\overline{Z}_{rd} = \frac{1}{\overline{Y}_{rd}} \quad \overline{Z}_{rq} = \frac{1}{\overline{Y}_{rq}}. \quad (18)$$

Dále během startu můžeme využít průměrné hodnoty d a q osy [6]

$$\overline{Z}_r \approx \frac{\overline{Z}_{rd} + \overline{Z}_{rq}}{2}. \quad (19)$$

Statorová impedance tvořená odporem a rozptylovou indukčností zapsaná jako [6]

$$\overline{Z}_s = R_s + jX_{s\sigma}. \quad (20)$$

Záběrný proud je pak přibližně [6]

$$\overline{I}_{s,start} \approx \frac{\overline{U}_s}{\overline{Z}_s + \overline{Z}_r}, \quad (21)$$

a tomu odpovídající záběrný moment, který je přibližně [6]

$$M_{s,start} \approx \frac{pI_{s,start} \operatorname{Re}(\overline{Z_r}) \eta_N \cos \varphi_N}{\omega_s}, \quad (22)$$

kde užijeme účinnost η_N a účiník $\cos \varphi_N$ [6]. Nyní jsme tedy schopni popsat celou momentovou charakteristiku i číselně.

2 Matematický model

Pro vytvoření matematického modelu jsem použil program Ansys RMXprt a pro simulaci rozběhu Ansys Maxwell 2D. Tento program používá metodu konečných prvků a umožňuje simulaci elektromagnetických polí v časové i frekvenční oblasti [8]. Hlavní využití tohoto programu nalezneme zejména u návrhu a analýzy elektromotorů, generátorů, transformátorů, solenoidů a systémů s magnety [8].

2.1 Návrh matematického modelu

Pro vytvoření modelu, který postihne jev Görgesova sedla, jsem použil nástroj Ansys RMXprt obsažený v Ansys electronics Desktop. Tento nástroj vygeneroval geometrii stroje, takže jsem nemusel provádět elektromagnetický návrh. Základní parametry použitého stroje jsou následující...

Tab. 1: Nastavení motoru - RMXprt

Machine	
Machine Type	Three Phase Synchronous Machine
Number of Poles	4
Reference Speed	1500 rpm

Použité parametry statoru jsou tyto:

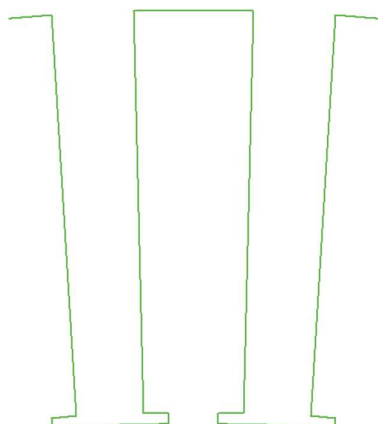
Tab. 2: Rozměry a parametry statoru - RMXprt

Stator	
Outer Diameter	500 mm
Inner Diameter	380 mm
Length	200 mm
Stacking Factor	0.95
Steel Type	M19_24G
Number of Slots	72

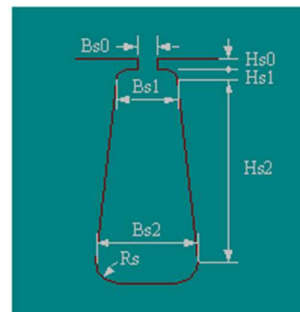
Tab. 3: Statorová drážka - RMXprt

Drážka	
Hs0	1 mm
Hs1	0 mm
Hs2	40 mm
Bs0	5 mm
Bs1	10 mm
Bs2	12 mm
Rs	0 mm

Pro lepší představu přikládám náhled statorové drážky (Obrázek 5 a 6).



Obrázek 5: Statorová drážka



Obrázek 6: Model statorové drážky

Tab. 4: Statorové vinutí - RMxppt

Statorové vinutí	
Winding Layers	2
Winding Type	Whole Coiled
Parallel Branches	4
Conductors per Slot	10
Coil Pitch	11
Number of Strands	9
Wire Wrap	1 mm
Wire Size	Diameter: 1.628 mm

Rotorové parametry jsou následující...

Tab. 5: Rozměry rotoru - RMxppt

Rotor	
Outer Diameter	370 mm
Inner Diameter	50 mm
Length	200 mm
Steel Type	steel_1008

Tab. 6: Rozměry pólového nástavce - RMxppt

Pólový nástavec	
Second Air Gap	0 mm
Pole Body Width	60 mm
Pole Body Height	75 mm
Pole Shoe Width	180 mm
Pole Shoe Height	40 mm
Steel Type	steel_1008

Tab. 7: Izolace pólového nástavce - RMxpzt

Izolace	
Shoe Insulation	3 mm
Pole Insulation	2 mm
Winding Clearance	20 mm

Tab. 8: Rotorové vinutí - RMxpzt

Vinutí	
Winding Type	CylinderCoil
Parallel Branches	1
Conductors per Pole	200
Wire Wrap	2 mm
Wire Size	Width: 3,26mm Thickness: 2,05mm

Jelikož se nejvíce účastní při asynchronním rozběhu motoru tlumič, byl na něj kladen důraz nejvíce. Na jednom pólovém nástavci je 8 tlumičů z mosazi. Pro rozběhové vinutí se používá materiál s větší rezistivitou, proto jsem vybral právě mosaz. Její vlastnosti jsou na obrázku 7.

Tab. 9: Parametry tlumiče pólového nástavce - RMxpzt

Tlumič	
Damper Slots per Pole	8
Slot Type	1
Bar Conductor Type	Brass
End Length	2 mm
End Ring Width	2 mm
End Ring Height	2 mm
End Ring Conductor Type	Brass
End Rint Type	3
Slot Pitch	7 deg
Center Slot Pitch	10 deg

Name	Type	Value	Units
Relative Permeability	Simple	1	
Bulk Conductivity	Simple	15000000	siemens/m
Magnetic Coercivity	Vector		
- Magnitude	Vector Mag	0	A_per_meter
Core Loss Model		None	w/m^3
Mass Density	Simple	8600	kg/m^3
Composition		Solid	
Young's Modulus	Simple	100000000000	N/m^2
Poisson's Ratio	Simple	0.34	
Magnetostriction	Custom	<input type="button" value="Edit..."/>	
Inverse Magnetostriction	Custom	<input type="button" value="Edit..."/>	

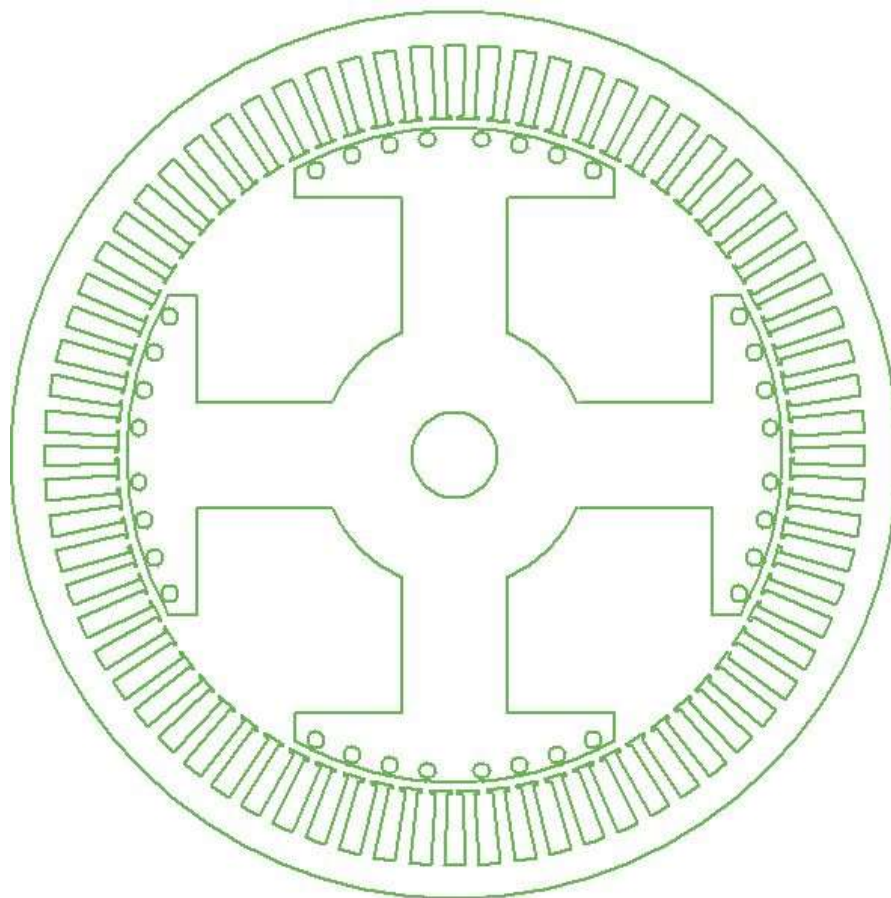
Obrázek 7: Vlastnosti mosazi - použitý materiál pro tlumič

Rozměry tlumiče jsem volil následující...

Tab. 10: Rozměry tlumiče - RMXprt

Rozměry tlumiče	
Hs0	1,5 mm
Hs01	1,5 mm
Hs2	0 mm
Bs0	0 mm
Bs1	10 mm
Bs2	10 mm

4-pólový motor mnou navržený v RMXprt je zobrazený na Obrázku 8.

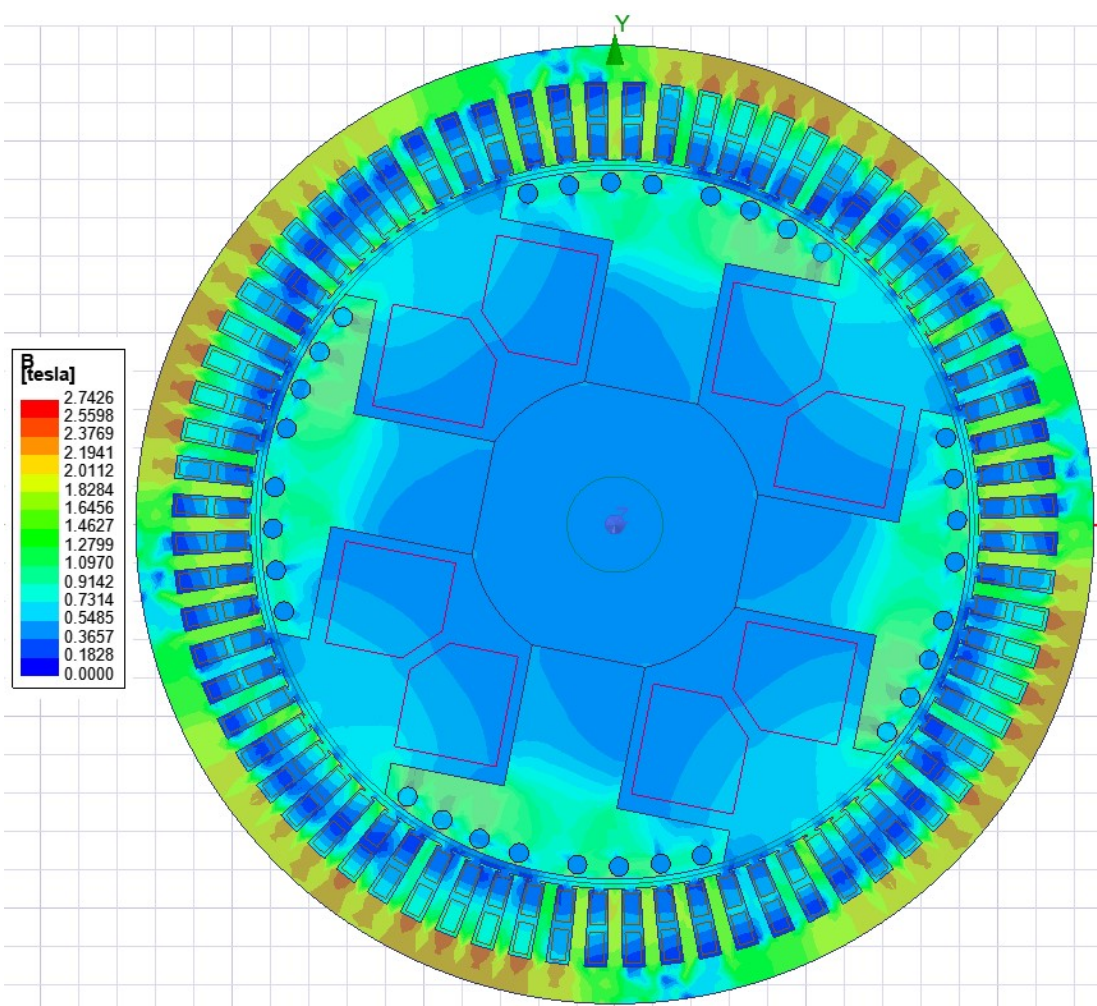


Obrázek 8: 4-pólový motor navržený v RMxprt

3 Výsledky simulace rozběhu synchronního motoru

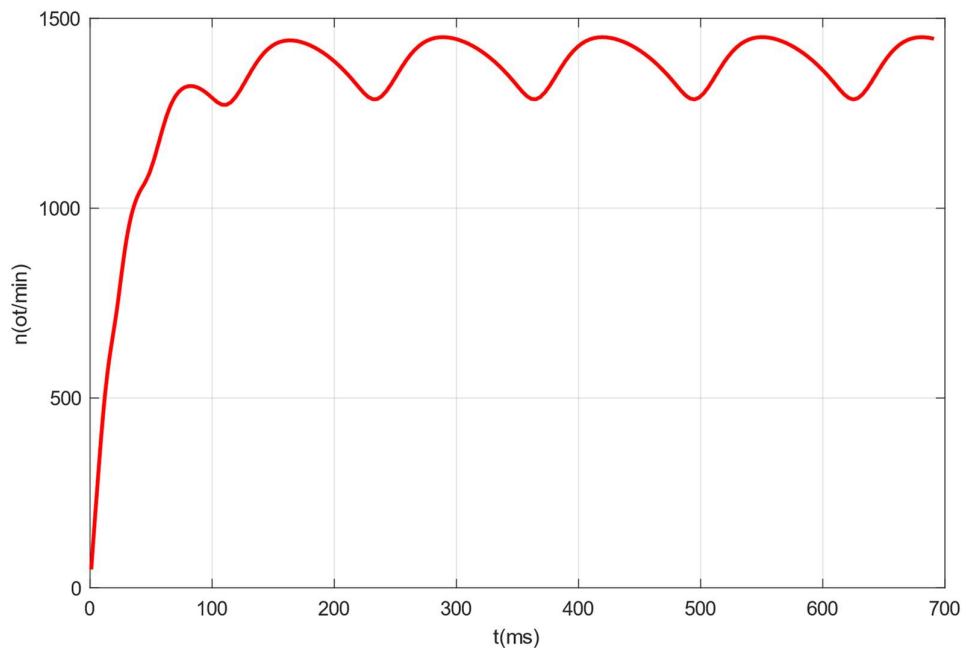
Pro simulaci rozběhu synchronního motoru jsem musel použít další program, taktéž z balíčku Ansys electronics Desktop, ale tentokrát Maxwell 2D.

Nastavení v Maxwell 2D jsem víceméně nechal stejné, jaké mi vygeneroval Ansys po překlopení motoru do Maxwellu. Změnil jsem pouze počáteční úhlovou rychlost na 0, protože chci simulovat rozběh, typ rotorového vinutí na „Voltage Type“ a budící proud do rotorového vinutí rovněž na 0. Magnetické pole motoru je zobrazeno na *obrázku 9*.



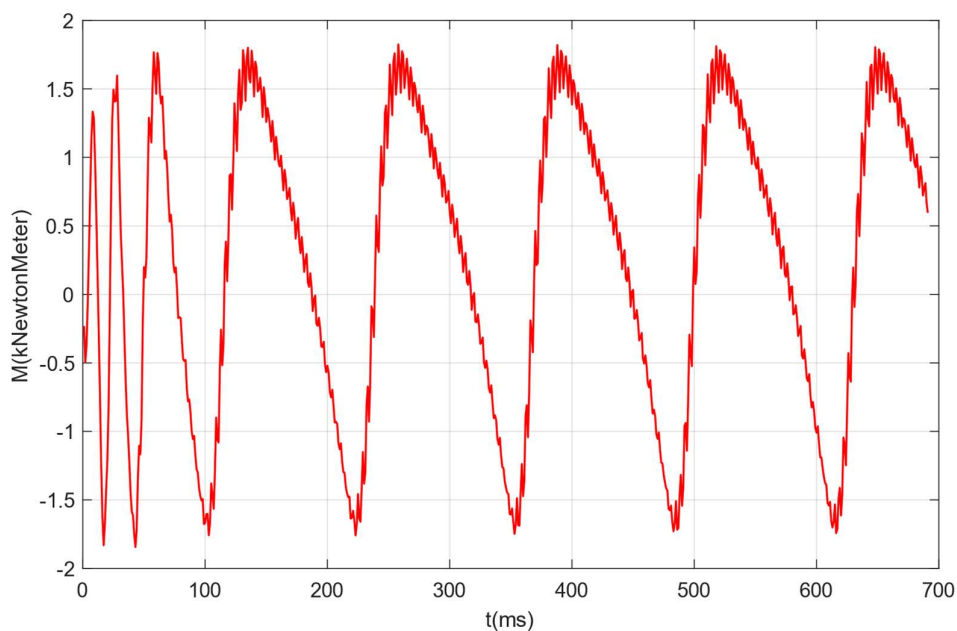
Obrázek 9: Magnetická indukce v 4-pólovém motoru

Synchronní rychlost 4-pólového motoru je 1500 ot/min. Po spuštění simulace se měl motor rozběhnout na tuto rychlost, ale nestalo se tak. Jak je vidět na *obrázku 10*, motor se k této rychlosti jen přiblíží a periodicky kmitá mezi 1273 a 1442 ot/min.



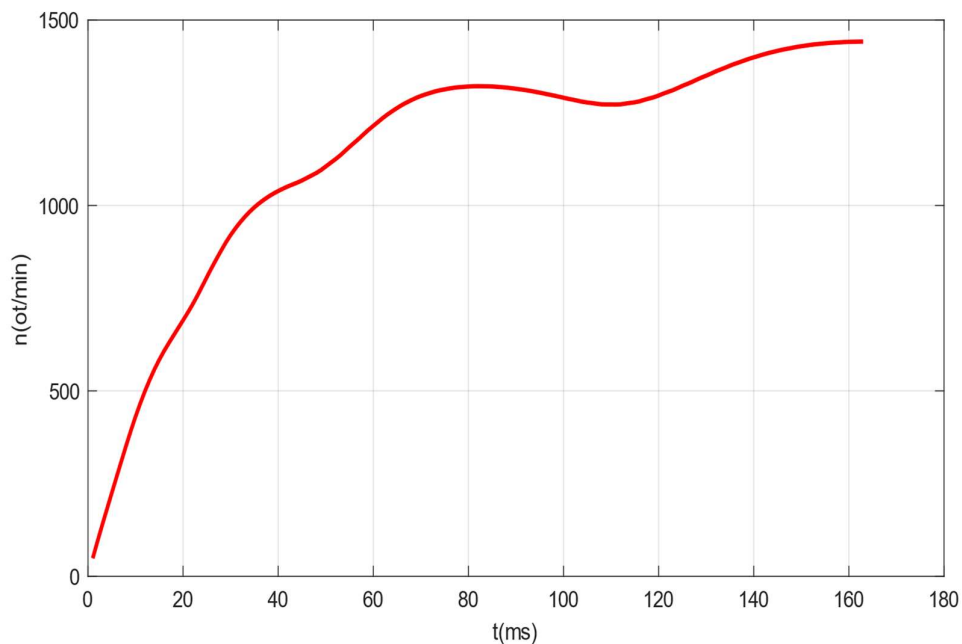
Obrázek 10: Rozběh synchronního motoru – 4-pólový motor

Rychlosti také odpovídá i momentová charakteristika, která je zobrazena na *obrázku 11*. Teoretický předpoklad je, že moment bude jen v kladných číslech, jak již bylo zmíněno v kapitole [1.3](#). Protože úhlové otáčky byly menší než synchronní, tedy by měl být kladný i moment.

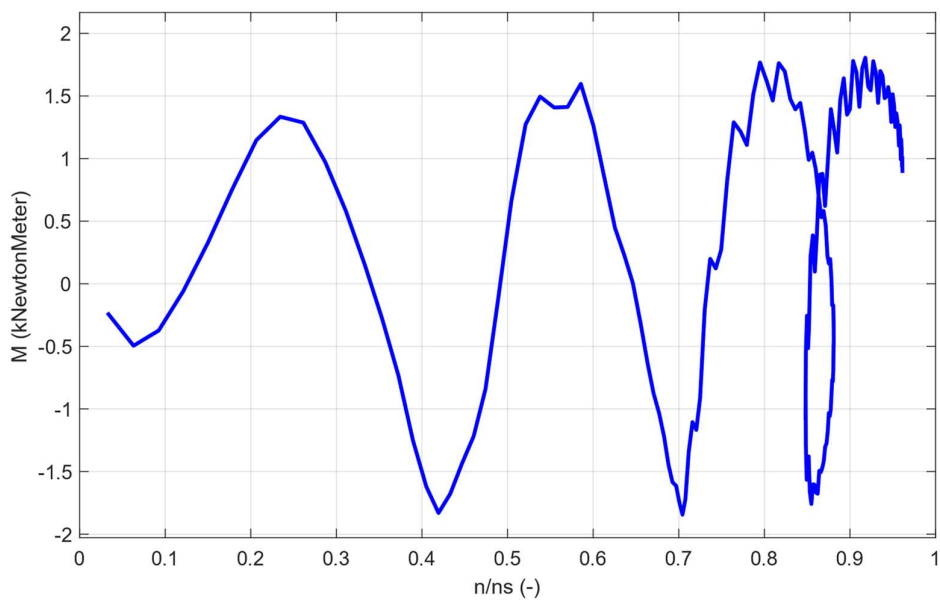


Obrázek 11: Momentová charakteristika – 4-pólový motor

Rozběhoový graf jsem zkrátil na 163 ms, kde motor nekmitá, ale má nejvyšší otáčky. Graf je zobrazen na *obrázku 12*.

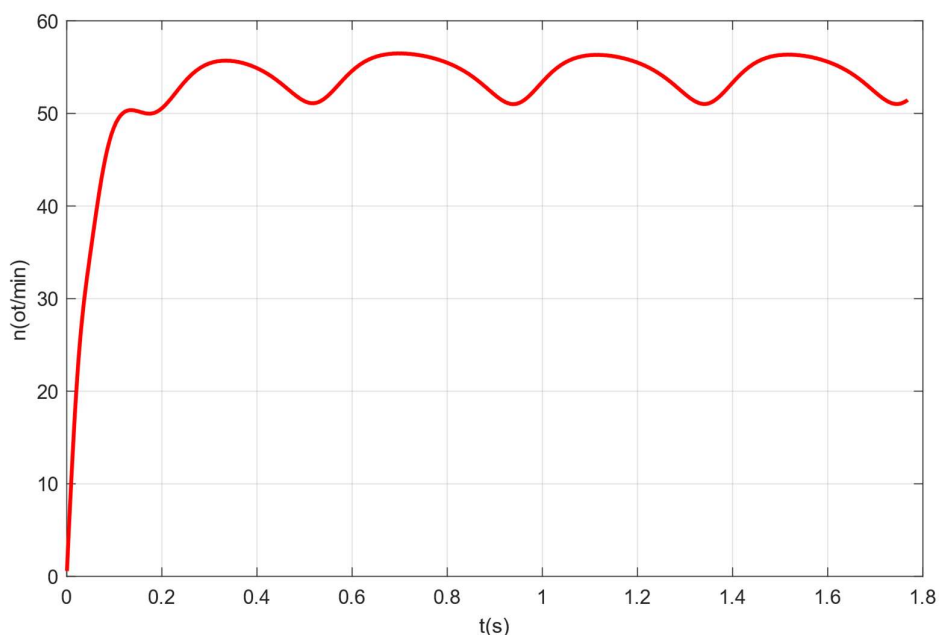


Obrázek 12: Graf rychlosti motoru - zkrácený na 163 ms – 4-pólový motor

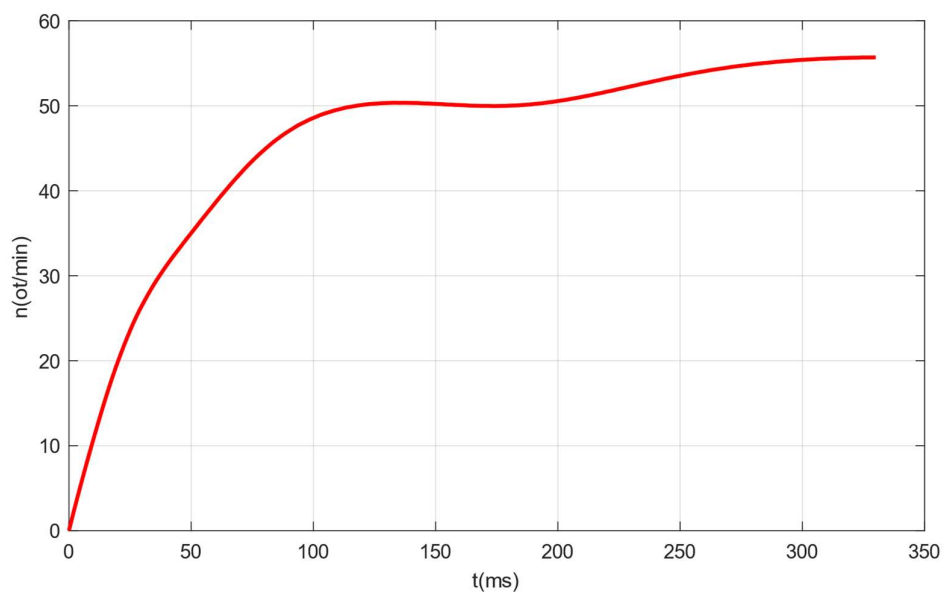


Obrázek 13: Graf Görgesova sedla - 4-pólový motor

Obrázek 13 zobrazuje graf, který by se měl podobat grafu uvedenému v teorii. Jelikož se mi graf hodně lišil od uvedené teorie, ověřil jsem svoji simulaci na jiném stroji. Motor poskytnutý k ověření mých simulací je 40-pólový, napájen 19,33 Hz, takže by synchronní otáčky měly být kolem 58 ot/min. Rozběh motoru je ukázán na Obrázku 14. Můžeme zde opět pozorovat, že motor kmitá mezi 51 a 57 ot/min a nevtáhne se do synchronismu.

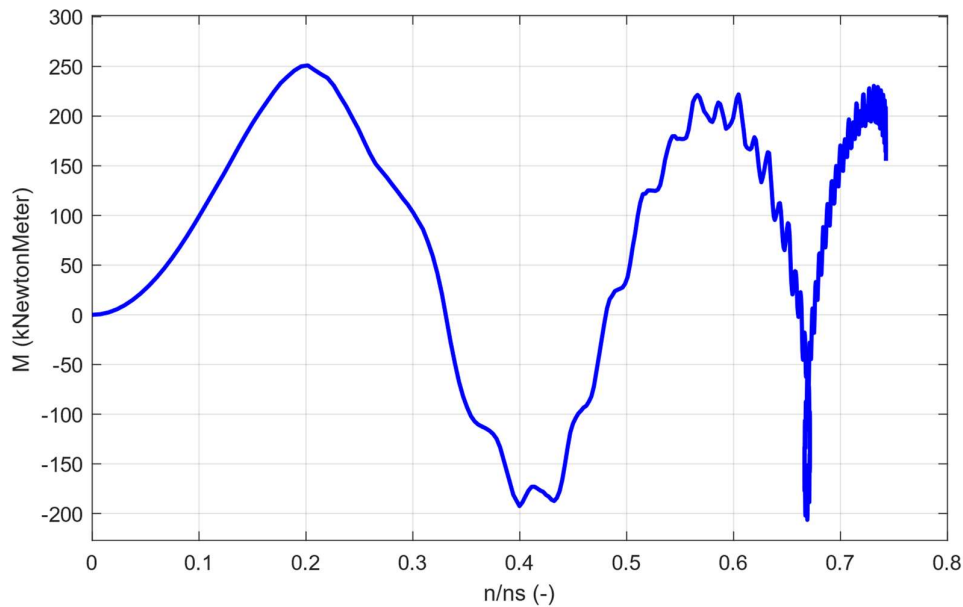


Obrázek 14: Rozběh synchronního motoru - 40-pólový motor



Obrázek 15: Graf rychlosti motoru - zkrácený na 330 ms – 40-pólový motor

Graf Görgesova sedla vypadá také obdobně. Opět na *obrázku 16* můžeme pozorovat, že zpočátku má strmý nárůst momentu až na hodnotu 250 kNewtonMetru, poté motor ztrácí moment a propadá se do záporných čísel. Jak můžeme sledovat na *obrázku 15*, motor stále zrychluje. Kolem $n/n_s = 0,4$ se začne moment opět zvyšovat. Tomu odpovídá rychlost motoru 30,5 ot/min. Na *obrázku 15* pozorujeme, že už se motor neroztáčí tak strmě, jako tomu bylo v prvních milisekundách, ale není zde stále poznat významný pokles momentu. Další pokles momentu vidíme u $n/n_s = 0,67$. Ten se již projeví na rychlosti rozbíhajícího motoru. Na *obrázku 15* lze pozorovat ustálení otáček na zhruba 50 milisekund a ustálí se kolem 50 ot/min.



Obrázek 16: Graf Görgesova sedla - 40-pólový motor

4 Porovnání nasimulovaných výsledků s teorií

Teorie Görgesova sedla uvádí, že by měl mít motor kolem skluzu $s = 0,75 \div 0,6$ významný pokles momentu, jak je vidět na *obrázku 4*. Výsledky znázorněné v předešlé kapitole ukazují, že mé simulace tomu úplně neodpovídají. Pro ověření mých simulací jsem mohl použít další motor, který měl podobné výsledky. Motor se nevtáhl do synchronismu, ač po konstrukci bude pracovat pravděpodobně správně.

Když porovnáme *obrázek 4* z teorie s *obrázkem 13*, který ukazuje mou simulaci, je zde poměrně patrný rozdíl. Celkový moment z teorie při rozběhu začíná na maximální možné hodnotě a se zvyšujícími se otáčkami postupně klesá, zhruba do poloviny synchronních otáček, což odpovídá skluzu $s = 0,5$. U této hodnoty má moment výrazný pokles, protože zde začne působit negativní složka magnetického toku, který působí proti rotující složce magnetického toku. Od této hodnoty moment dále klesá, zhruba do 80% synchronních otáček. Zde se moment trochu zvýší a pak klesne na nulu. Motor je vtažen do synchronismu.

Mnou nasimulovaný rozběh začíná tak, že moment klesne pod nulovou hodnotu a roste až od 5% synchronních otáček do zhruba 25% n_s . Od této rychlosti klesá do záporných hodnot, a to do rychlosti zhruba 42% n_s . Zde mi vzniklo první sedlo. Poté se moment opět začne zvyšovat, překlopí se opět do kladných hodnot. Rychlost motoru teď odpovídá 60% synchronních otáček, kde začne znova ztrácet moment. U 70% n_s je minimum a vzniklo druhé sedlo. Při dalším nárůstu rychlosti se moment začne zvyšovat až do jeho maxima, které odpovídá 80% synchronní rychlosti. I zde opět začne moment klesat, ale s klesajícím momentem je vidět i zpomalení motoru. Dále se pak poslední část charakteristiky opakuje, tj. od 85% n_s do 95% n_s , protože se motor nevtáhne do synchronismu a jen periodicky kmitá.

Když porovnáme i druhý nasimulovaný motor, výsledky se od předešlého moc neliší. Při prvotních otáčkách se moment zvyšuje až do 20% synchronních otáček. Od této hodnoty klesá do jeho minima, které je zhruba na 40% n_s . Vznikne první sedlo. Se zvyšujícími otáčkami se zvyšuje i moment. Zde odpovídají otáčky zhruba 60% n_s . Dále motor sice zrychluje, ale moment opět klesá až do minimální hodnoty, která odpovídá zhruba 68% synchronní rychlosti. Od této hodnoty se opět graf opakuje, protože se motor nevtáhne do synchronismu a periodicky kmitá.

Při porovnání charakteristiky z obrázku 13 a z obrázku 16, tedy motoru 4-pólového a motoru 40-pólového, je zde patrný rozdíl. U motoru 4-pólového vznikla dvě sedla, kdežto u motoru 40-pólového jen jedno. Další rozdíl je v tom, že motor 4-pólový začne periodicky kmitat až od 80% n_s a motor 40-pólový už od 68% n_s . Rozdíl může být právě v počtu pólu nebo v nedokonalém návrhu 4-pólového motoru, či dokonce v chybné simulaci.

Největším rozdílem teorie s nasimulovanými motory je tedy rozdílný moment hned v nulových otáčkách. Teorie uvádí maximální moment, ale v simulaci je nulový. Další rozdíl, který je docela patrný, je, že v simulaci došlo hned k několika propadům momentu do záporných hodnot a v teorii není žádný, což souvisí právě i se vznikem Görgesova sedla. Víme, že negativní složka magnetického pole má největší sílu kolem skluzu $s = 0,75 \div 0,6$, což odpovídá 25% \div 40% synchronní rychlosti, a tam by mělo vzniknout i sedlo. S ohledem na simulace mi sedlo vzniklo hned 2x, a to v 42% n_s , dále pak 70% n_s . U 40-pólového motoru sedlo vzniklo u 40% n_s . Je zde vidět, že první sedlo je v podobné procentuální rychlosti, předpokládejme tedy, že 4-pólový motor je nedokonale navržen, proto je sedlo i v 70% n_s .

Jak jsem již zmínil, motor téměř dosáhne synchronních otáček, ale nevtáhne se do synchronismu a kmitá. Ve své simulaci ale neuvažuji nabuzení stroje. Pokud bych vnějším obvodem zajistil plné nabuzení stroje ve chvíli, kdy má největší rychlost, pravděpodobně by se vtáhl do synchronismu.

Teorie tedy úplně neodpovídá simulaci, ale sedlo kolem 40% synchronní rychlosti vzniklo. Dá se tedy říct, že teorie se se simulací liší v uváděné charakteristice, ale Görgesovo sedlo vzniká tam, kde teorie popisuje.

Závěr

Görgesovo sedlo vzniká při rozběhu synchronního motoru. Mým úkolem bylo tento jev nasimulovat. To znamenalo nejen vytvořit matematický model, ale také se naučit pracovat v programu, který je schopen simulaci provést. Nejprve jsem musel nastudovat a popsat, kdy toto sedlo vzniká. Dle teorie by sedlo mělo vznikat při rozběhu jako asynchronní motor. Po zdárně napsané teorii jsem se pustil do matematického modelu.

První pokus nasimulovat tento jev byl na velkém 16-pólovém motoru, který byl vytvořen pro zápočet. Když jsem zjistil, že je motor velmi špatně navržen, od tohoto modelu jsem ustoupil. Po konzultaci s panem doc. Ing. Kindlem, Ph.D. jsem vytvořil 4-pólový motor. Ale i tento motor nebyl schopen rozběhu, který by odpovídal teorii. Rozhodl jsem se pak pro 6-ti pólový motor, bohužel výsledek byl obdobný. Motor nedosáhl synchronních otáček a jen se pravidelně k těmto otáčkám přibližoval. Nakonec mi byl poskytnut 40-pólový motor, který taktéž nedosáhl synchronních otáček. Po tomto zjištění jsem nakonec nabyl dojmu, že můj motor není zcela špatný a že teorie nemusí úplně odpovídat simulacím.

Pro srovnání byl použit 4-pólový a poskytnutý 40-pólový motor. První uváděný model, mnou vytvořený, se v prvotních otáčkách dostal do záporného momentu, ale i tak zrychloval. U mého modelu se objevily celkem dvě sedla. První sedlo by odpovídalo teorii, vzniklo někde kolem 40% synchronních otáček, kdy je záporná složka magnetického pole největší. Druhé sedlo v teorii uvedeno není, bohužel v mé simulaci vzniklo. Dále se měl motor dostat do synchronismu, a tím má simulace skončit, bohužel se tak nestalo a motor se k této rychlosti jen přibližoval. U druhého motoru se sedlo vytvořilo jen jedno, taktéž kolem 40% synchronních otáček. Nadále motor pokračoval ve zrychlování, ale také se nevtáhl do synchronismu, jen se k těmto otáčkám přibližoval. Nutno podotknout, že jsem v simulaci neuvažoval nabuzení stroje, proto se motor nevtáhl do synchronismu. Charakteristiky jsem uváděl ve stejné podobě, jako je uvedeno v teorii.

Je zde vidět chybný návrh mého modelu, protože vzniklo sedlo druhé, které se na 40-pólovém motoru neobjevilo. Zajímavostí simulace bylo stále zrychlování motoru, i když byl moment záporný. Projevil se téměř až u synchronní rychlosti. Pravděpodobně byl způsoben velkým momentem setrvačnosti motoru.

Závěrem bych dodal, že teorie úplně neodpovídá simulacím, ač se jim přibližuje. Görgesovo sedlo vzniká, když je záporná složka magnetického pole největší, tedy kolem 40% synchronní rychlosti, a moment se dostává do záporných hodnot, což teorie nezmiňuje.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] PETROV, Georgij Nikolajevič. *Elektrické stroje 2*. B.m.: Praha: Academia, 1982. ISBN 21-055-80.
- [2] *Uplatnění synchronních strojů v dopravní technice (1. část) - Časopis Elektro - Odborné časopisy* [online]. [vid. 2020-04-16]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/uplatneni-synchronnich-stroju-v-dopravni-technice-1-cast--13092>
- [3] BARTOŠ, Václav, Josef ČERVENÝ, Josef HRUŠKA, Anna KOTLANOVÁ a Bohumil SKALA. *Elektrické stroje*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2006. ISBN 80-7043-444-9.
- [4] BARTOŠ, Václav. *Teorie elektrických strojů*. 1. vydání. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2009. ISBN 978-80-7043-509-0.
- [5] BARTOŠ, Václav. *Elektrické stroje*. 2. vydání. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2004. ISBN 80-7043-332-9.
- [6] PYRHÖNEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valéria HRABCOVÁ. *Design of rotating electrical machines*. 2nd ed. Chichester: Wiley, 2013. ISBN 978-1-118-58157-5.
- [7] MRAVEC, Rudolf. *Elektrické stroje a přístroje 1. 2.*, nezm. Praha: SNTL, 1982.
- [8] *ANSYS Maxwell | SVS FEM s.r.o.* [online]. [vid. 2020-04-02]. Dostupné z: <https://www.svsfem.cz/produkty/elektronika/ansys-maxwell>

Přílohy

Příloha 1: harmonické činitele pro frekvence vyšší než 5 Hz (a,b) a nižší než 2 Hz (c,d) [6]

