

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

NÁVRH SYNCHRONNÍHO MOTORU S PERMANENTNÍMI MAGNETY

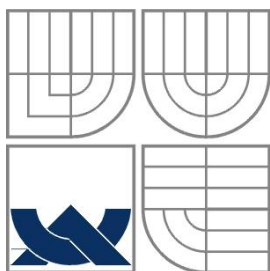
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

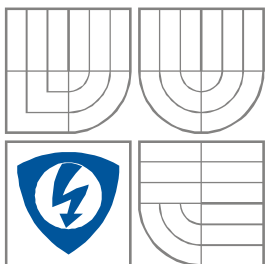
Jan Pavláček

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

NÁVRH SYNCHRONNÍHO MOTORU S PERMANENTNÍMI MAGNETY

DESIGN OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

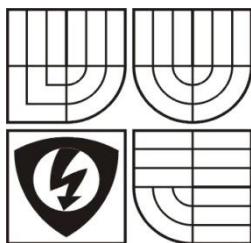
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Jan Pavláček

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Rostislav Huzlík

BRNO, 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Pavláček Jan

Ročník: 3

ID: 115250

Akademický rok: 2011/12

NÁZEV TÉMATU:

Návrh synchronního motoru s permanentními magnety

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s programem Maxwell a RMXpert.
2. Dle pokynů vedoucího navrhnete synchronní motor s permanentními magnety.
3. Proveďte různé konstrukční úpravy a tyto úpravy analyzujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Termín zadání: 21.9.2011

Termín odevzdání: 31.05.2012

Vedoucí projektu: Ing. Rostislav Huzlík

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Abstrakt

Tato práce je zaměřena na návrh synchronního motoru s permanentními magnety. Jsou zde popsány základní vlastnosti synchronních motorů, permanentních magnetů a možnosti konstrukce. Práce je seřazena od obecného popisu, vlastností a principu funkce. Jsou zde zmíněny i výhody a nevýhody synchronních motorů s permanentními magnety. Hlavní část práce je návrh samotného synchronního motoru s různými modifikacemi. Návrh je realizován v programu Ansys Maxwell (modul RMxpert). Parametry motoru jsou zadány z programu Excel, kde je uveden kompletní výpočet vstupních a výstupních parametrů. Hodnoty jsou ověřeny z [11]. Cílem této práce jsou různé modifikace synchronního motoru a jeho analýza.

Abstract

This thesis is bent proposal synchronic motor with permanent magnets. Here are described characteristic synchronic motors, permanent magnets and possibilites construction. This thesis is sorted from common description, feature and principle function. Here are also mentioned benefits and disadvantages synchronic motors with permanent magnets. Main volume of work is proposal synchronic motor with various modifications. Proposal is realized in program Ansys Maxwell (modulus RMxpert). Engine data are entered from program Excel, where is state full calculation input and output parameters. Value is tested from [11]. Aim those work are various modification synchronic motor and his analysis.

Klíčová slova

drážka; fázor; motor; magnet; mezera; model; moment; permanentní; rotor; stator; synchronní; vinutí; vzduch; ztráty.

Keywords

air; gap; motor; losses; magnet; model; permanent; phasor; rotor; slot; stator; synchronous; torque; winding;

Bibliografická citace

PAVLÁČEK, J. *Návrh synchronního motoru s permanentními magnety*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 47 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Rostislav Huzlík.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Návrh synchronního motoru s permanentními magnety jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

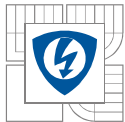
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Rostislavu Huzlíkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

Podpis autora



OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	8
SEZNAM TABULEK	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	10
1 ÚVOD	13
1.1 SYNCHRONNÍ MOTOR S PERMANENTNÍMI MAGNETY OBECNĚ.....	13
1.2 HISTORIE	14
1.3 POUŽITÍ.....	14
2 USPOŘÁDÁNÍ A CHARAKTERIZACE.....	14
2.1 PRINCIP FUNKCE	14
2.2 POPIS JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ STROJE	15
2.3 VLASTNOSTI PERMANENTNÍCH MAGNETŮ	16
2.4 OBVODOVÝ MODEL	16
3 MOŽNOSTI A KONSTRUKCE.....	18
3.1 MOTOR S VNITŘNÍM ROTOREM.....	18
3.2 MOTOR S VNĚJŠÍM ROTOREM	19
3.3 VZDUCHOVÁ MEZERA	19
3.4 STATOR	20
3.5 VINUTÍ.....	20
3.6 ZTRÁTY A ÚČINNOST	20
4 ANSYS MAXWELL, RMXPRT	22
4.1 ANSYS MAXWELL.....	22
4.2 RMXPRT	23
5 VÝPOČET SYNCHRONNÍHO MOTORU S P.M.	24
5.1 VSTUPNÍ PARAMETRY	24
5.2 VÝSTUPNÍ PARAMETRY	26
6 OVĚŘENÍ VÝPOČTU V PROGRAMU ANSYS MAXWELL – MODUL RMXPRT	27
7 ZHODNOCENÍ A ZÁVĚR	45
LITERATURA	46
PŘÍLOHY	47

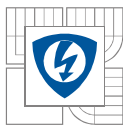
SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1:</i> Synchronní motor s permanentními magnety [1]	13
<i>Obrázek 2:</i> Závislost točivého momentu na úhlu zatížení [4]	15
<i>Obrázek 3:</i> Řez synchronním motorem s permanentními magnety [3]	15
<i>Obrázek 4:</i> Fázorový diagram [5]	17
<i>Obrázek 5:</i> Rozmístění vektoru proudu rotoru I_a v souřadnicovém systému d-q [6]	17
<i>Obrázek 6:</i> Průběh momentu v závislosti na zátěžném úhlu δ [5]	18
<i>Obrázek 7:</i> Motor s vnitřním rotorem [7]	18
<i>Obrázek 8:</i> Motor s vnějším rotorem [7]	19
<i>Obrázek 9:</i> Ukázka okna programu Maxwell [8]	22
<i>Obrázek 10:</i> Okno programu RMaxpert [9]	23
<i>Obrázek 11:</i> Graf závislosti magnetické indukce B na intenzitě magnetického pole H	25
<i>Obrázek 12:</i> Graf závislosti koeficientu c na magnetické indukci B_y	25
<i>Obrázek 13:</i> Model synchronního motoru v programu Ansys Maxwell	27
<i>Obrázek 14:</i> Graf závislosti vstupního proudu na úhlovém momentu motoru pro případ 1	29
<i>Obrázek 15:</i> Graf závislosti účinnosti na úhlovém momentu motoru pro případ 1	29
<i>Obrázek 16:</i> Graf závislosti výstupního výkonu na úhlovém momentu motoru pro případ 1	30
<i>Obrázek 17:</i> Graf závislosti vstupního proudu na úhlovém momentu motoru pro případ 2	32
<i>Obrázek 18:</i> Graf závislosti účinnosti na úhlovém momentu motoru pro případ 2	32
<i>Obrázek 19:</i> Graf závislosti výstupního výkonu na úhlovém momentu motoru pro případ 2	33
<i>Obrázek 20:</i> Graf závislosti vstupního proudu na úhlovém momentu motoru pro případ 3	35
<i>Obrázek 21:</i> Graf závislosti účinnosti na úhlovém momentu motoru pro případ 3	35
<i>Obrázek 22:</i> Graf závislosti výstupního výkonu na úhlovém momentu motoru pro případ 3	36
<i>Obrázek 23:</i> Graf závislosti vstupního proudu na úhlovém momentu motoru pro případ 4	38
<i>Obrázek 24:</i> Graf závislosti účinnosti na úhlovém momentu motoru pro případ 4	38
<i>Obrázek 25:</i> Graf závislosti výstupního výkonu na úhlovém momentu motoru pro případ 4	39
<i>Obrázek 26:</i> Graf závislosti vstupního proudu na úhlovém momentu motoru pro případ 5	41
<i>Obrázek 27:</i> Graf závislosti účinnosti na úhlovém momentu motoru pro případ 5	41
<i>Obrázek 28:</i> Graf závislosti výstupního výkonu na úhlovém momentu motoru pro případ 5	42



SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: <i>Vstupní parametry synchronního motoru s p.m.</i>	24
Tabulka 2: <i>Vybrané výstupní parametry synchronního motoru s p.m.</i>	26
Tabulka 3: <i>Vybrané parametry synchronního motoru s p.m. pro případ 1.</i>	28
Tabulka 4: <i>Porovnání vybraných parametrů z Excelu a RMxpertu pro základní průřez a délku motoru</i>	30
Tabulka 5: <i>Vybrané parametry synchronního motoru s p.m. pro případ 2.</i>	31
Tabulka 6: <i>Vybrané parametry synchronního motoru s p.m. pro případ 3.</i>	34
Tabulka 7: <i>Vybrané parametry synchronního motoru s p.m. pro případ 4.</i>	37
Tabulka 8: <i>Vybrané parametry synchronního motoru s p.m. pro případ 5.</i>	40
Tabulka 9: <i>Porovnání parametrů synchronního motoru pro výkon $P=160kW$</i>	43

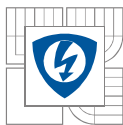


SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Název veličiny	Jednotka
I	proud	A
M_i	vnitřní moment	N.m
P	výkon	W
R	činný odpor	Ω
R_s	statorový odpor	Ω
U	elektrické napětí	V
U_i	indukované napětí	V
U_{if}	vnitřní indukované napětí	V
X_{ad}	podélná reaktance	Ω
X_d	celková reaktance	Ω
X_σ	rozptylová reaktance	Ω
δ	zátěžný úhel	rad
$\delta\%$	relativní chyba	%
η	účinnost	%
ω_{1m}	úhlový kmitočet	s^{-1}
ΔP_j	Joulovy ztráty	W
ΔP_{Fe}	ztráty v železe	W
ΔP_{mech}	mechanické ztráty	W
ΔP_h	hysterezní ztráty	W
ΔP_v	vířivé ztráty	W
ΔP	celkové ztráty	W
k_h	koeficient	-
k_v	koeficient	-
P_{in}	příkon stroje	W
f	frekvence	Hz
m	hmotnost	kg
B_m	maximální mag.indukce	T
n	otáčky	s^{-1}
m	počet fází	-
p	počet pólových dvojic	-



Značka	Název veličiny	Jednotka
H_c	koercivita	$A.m^{-1}$
B_r	remanentní mag.indukce	T
B_g	indukce ve vzduchové mezeře	T
μ_0	permeabilita vakua	$H.m^{-1}$
μ_{rec}	permeabilita materiálu	$H.m^{-1}$
Θ	oteplení ve vinutí stroje	K
σ_{Cu20C}	vodivost mědi (20°C)	$S.m^{-1}$
α_{Cu}	teplotní souč. odporu mědi	K^{-1}
k_{Fe}	činitel plnění jádra statoru	-
ρ_{Fe}	hustota železa	$kg.m^{-3}$
ρ_{PM}	hustota materiálu p.m	$kg.m^{-3}$
ρ_{Cu}	hustota mědi	$kg.m^{-3}$
σ_{Ftan}	tečné napětí	Pa
V_r	objem	m^3
χ	koeficient	-
D_r	průměr rotoru	mm
l'	ekvivalentní délka rotoru	mm
δ	délka vzduchové mezery	mm
D_s	vnitřní průměr statoru	mm
l	délka jádra	mm
q	počet drážek na pól a fázi	-
W_{tp}	rozteč vinutí	-
Q	počet statorových drážek	-
τ_u	rozteč statorových drážek	mm
τ_p	rozteč pólů statoru	mm
a	počet paralelních větví	-
z_Q	počet vodičů v drážce	-
z_Q	počet vodičů v drážce	-
N	počet závitů ve fázi vinutí	-
D_{se}	vnější statorový průměr	mm
D_{ri}	vnitřní rotorový průměr	mm



Značka	Název veličiny	Jednotka
U_{mtot}	celkové magnetické napětí	A
I_s	statorový proud	A
P_{cu}	odporové ztráty statoru	W
P_{loss}	ztráty	W
I_d	axiální proud statoru	A
I_q	kvadrátový ax. proud statoru	A
I_s	nový statorový proud	A
$\cos\varphi$	účinník	-
T_{sh}	výstupní moment	N.m

1 ÚVOD

1.1 Synchronní motor s permanentními magnety obecně

Slouží k přeměně elektrického výkonu na mechanický pro různé účely. Synchronní motory s permanentními magnety jsou řešeny jako bezkartáčové stroje buzené permanentními magnety na bázi vzácných zemin, které jsou umístěny na rotoru. V drážkách statoru je uloženo trojfázové vinutí zapojené do hvězdy. Motory nazýváme synchronními, protože pracují v synchronních otáčkách (rotor se otáčí stejnou rychlostí jako točivé magnetické pole statoru).

Permanentní magnet vytváří magnetické pole ve vzduchové mezeře, bez budících vinutí a bez rozptylu elektrické energie. Rotor motoru je vytvořen z rotorového jádra a stálým magnetem. Severní a jižní póly jsou umístěny vedle sebe.

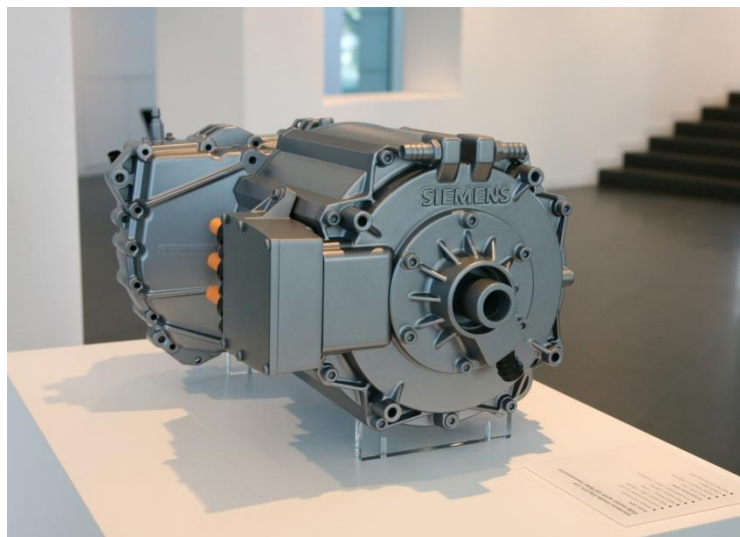
Výhody a nevýhody synchronních motorů s permanentními magnety:

Výhody:

- Menší objem a hmotnost
- Možnost přímého pohonu bez převodu
- Menší moment setrvačnosti
- Velká účinnost
- Velká momentová přetížitelnost

Nevýhody:

- Složitá konstrukce
- Vysoká cena dána cenou permanentních magnetů



Obrázek 1:Synchronní motor s permanentními magnety [1]

1.2 Historie

Mezi prvními konstruktéry budících systémů s permanentními magnety aplikované na elektrické stroje byli v 19. století J. Henry, H. Pixii, W. Ritchie, F. Watkins, M. H. Jacobi. Samozřejmě v této době se používali i nepříliš kvalitní tvrdé magnetické materiály (např. ocel, wolframová ocel), které postupem času odrazovaly při použití elektromagnetických budících systémů. V roce 1932 vynález Alnico způsobil oživení budících systémů s permanentními magnety. Nicméně tento vynález měl poměrně zanedbatelný výkon.

1.3 Použití

Synchronní motory s permanentními magnety se již delší dobu využívají v oblasti robotiky, automatizační techniky, servopohonů, pohonů od jednotek wattů do desítek kilowattů. Velké využití mají i v dopravní technice a to díky rozvoji materiálů permanentních magnetů. Tyto motory začaly nahrazovat krokové a stejnosměrné motory. [2]

2 USPOŘÁDÁNÍ A CHARAKTERIZACE

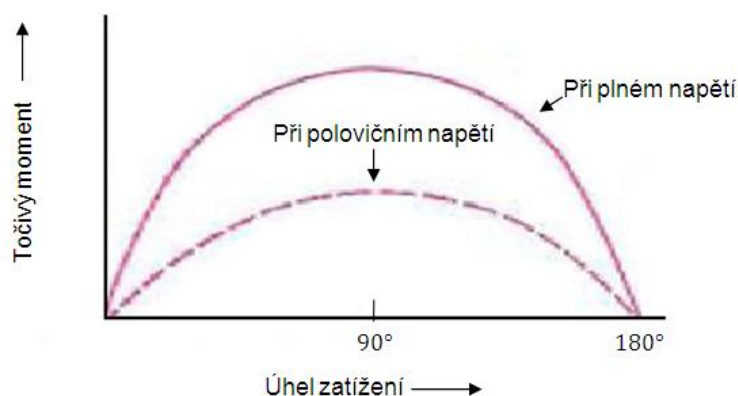
2.1 Princip funkce

Motor je konstrukčně podobný synchronnímu alternátoru. Stator je napájen z třífázové sítě. Proud procházející statorem vytváří točivé magnetické pole. Točivé magnetické pole se otáčí rychlostí dané frekvencí napájecí sítě a počtem pólů motoru. Póly rotoru jsou přitahovány protipóly statoru a odpuzovány statorovými póly stejného druhu. Rotor se vzhledem ke své setrvačné hmotě neroztočí okamžitě synchronně s točivým polem statoru. Jakmile se otáčky kotvy přiblíží díky rozběhovému systému otáčkám točivého pole, je kotva vtažena do synchronních otáček a běží synchronně.

Pro rozběh synchronního motoru je potřeba rozběhového systému. Má-li rotor motoru doplňkové vinutí nakrátko, může se synchronní motor rozbíhat jako asynchronní. Po rozběhu a zapnutí buzení kotvy pak běží motor synchronně.

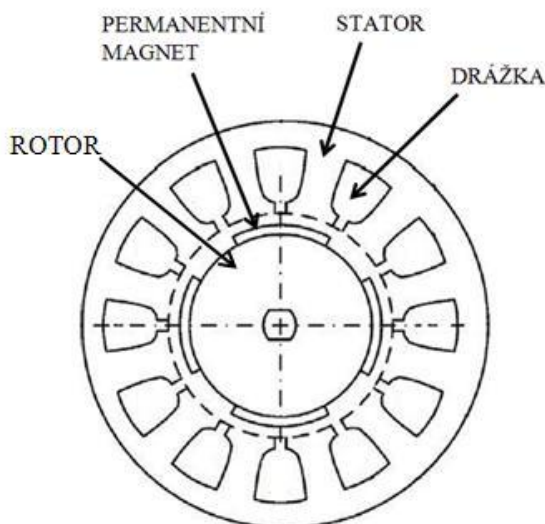
Při asynchronním rozběhu je budicí vinutí rotoru zkratováno. Zkratování se provádí pomocí odporu. Ten brání vzniku velkého indukovaného napětí, které by prorazilo izolaci vinutí. Při provozu zabrání zkratované vinutí při nárazovém kolísání zatížení prudkému kolísání otáček rotoru. Toto vinutí se proto nazývá tlumicí vinutí. Při rozběhu běží motor synchronně s točivým polem statoru. Při rostoucím zatížení motoru narůstá vzdálenost (pootočení) mezi póly kotvy a protipóly (rotujícími) statoru. Póly rotoru tak zůstávají zpět o úhel zátěže za póly točivého pole, nebo též za polohou při běhu naprázdno (bez zatížení motoru). Synchronní motory mají i při zatížení stejné otáčky jako točivé pole statoru. [4]

Točivý moment je větší, čím je větší úhel zátěže. Moment zvratu nastane v polovině úhlu mezi sousedními póly. Synchronní motory mají moment zvratu dvojnásobný než jmenovitý moment.



Obrázek 2: Závislost točivého momentu na úhlu zatížení [4]

2.2 Popis jednotlivých částí stroje



Obrázek 3: Řez synchronním motorem s permanentními magnety [3]

Permanentní magnet slouží k vytvoření magnetického pole ve vzduchové mezeře. Nejčastěji používáme materiály s vysokou relativní permeabilitou (Neodym-Železo-Bor, Samarium-Kobalt).

Stator je složen z izolovaných plechů a střídavé třífázové vinutí je uloženo v drážkách. Vinutí se nejčastěji zapojuje do hvězdy.

Rotor se v ustáleném stavu otáčí synchronně a nevznikají v něm velké ztráty v železe. Je konstruován z ušlechtné oceli. Na rotoru jsou umístěny permanentní magnety.

2.3 Vlastnosti permanentních magnetů

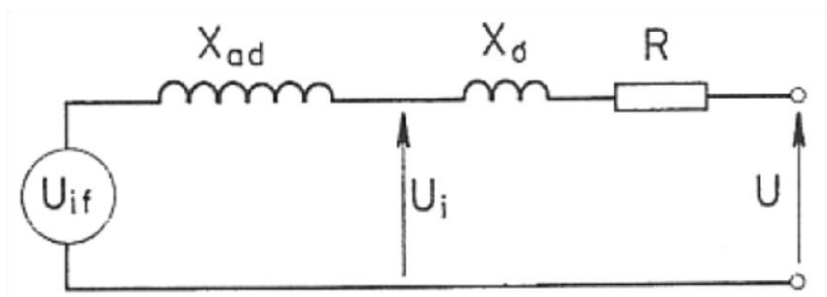
Trvalé magnety na bázi SmCo a NdFeB jsou vysoce výkonné a velmi kvalitní komponenty. K dispozici jsou dva typy magnetických materiálů ze vzácných zemin (Sm, Nd) a přechodného kovu (Co, Fe). Podle velikosti a tvaru jsou permanentní magnety řezány z izostaticky lisovaných surových magnetů, případně lisovaných v příčném nebo axiálním poli.

Kvůli jejich tvrdosti jsou řezány diamantovým nářadím. Tyto výrobní postupy pak udávají vlastnosti magnetů. Magnety mají vyšší hodnoty koercivity a remanence než trvalé magnety jako třeba ferity.

Magnety na bázi SmCo vykazují nepatrnou oxidaci povrchu. Tradiční magnety na bázi NdFeB jsou více náchylné vůči korozi než magnety na bázi SmCo. Charakteristickým znakem je změna magnetických vlastností se změnou teploty.

2.4 Obvodový model

Chování synchronního motoru v ustáleném stavu můžeme popsat pomocí obvodového modelu:



Obrázek 4: Obvodový model [5]

Napěťová rovnice:

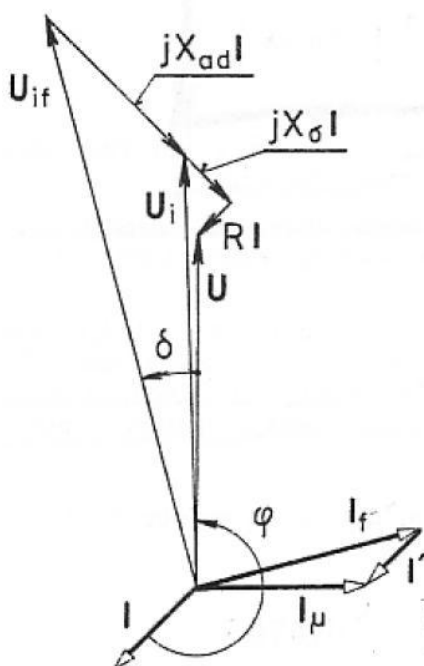
$$U = RI + jX_d I + U_{if} \quad (1)$$

Celková reaktance:

$$X_d = X_\sigma + X_{ad} \quad (2)$$

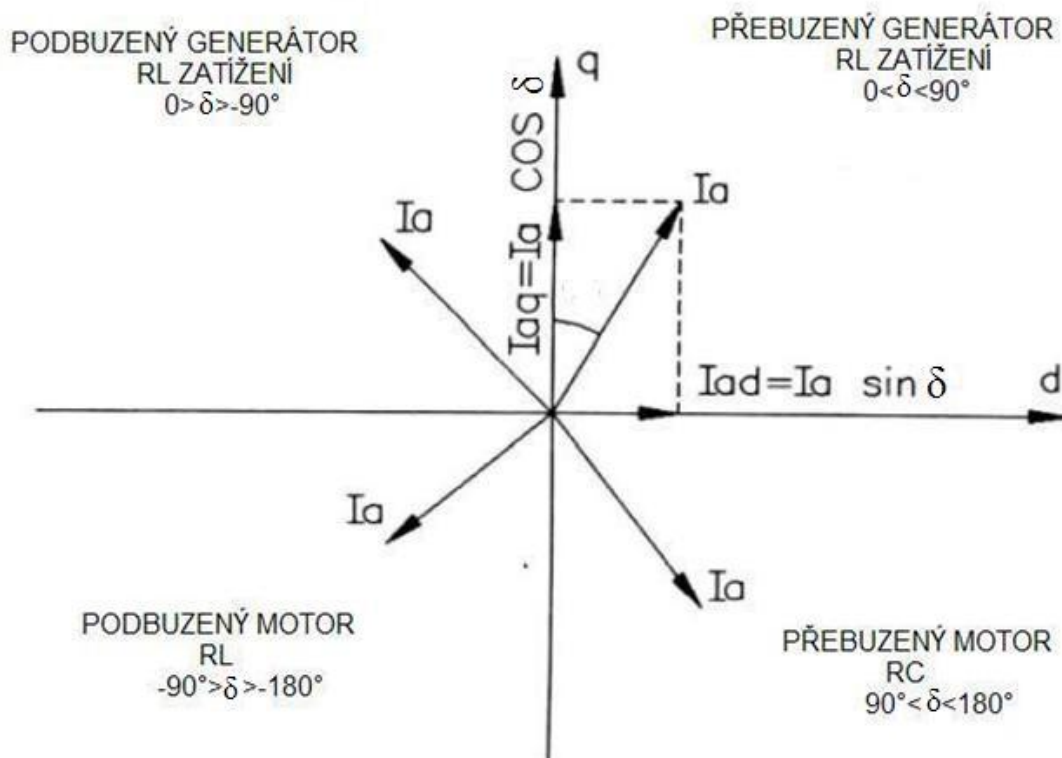
X_σ - rozptylová reaktance statoru

X_{ad} - podélná reaktance statoru



Obrázek 4: Fázorový diagram [5]

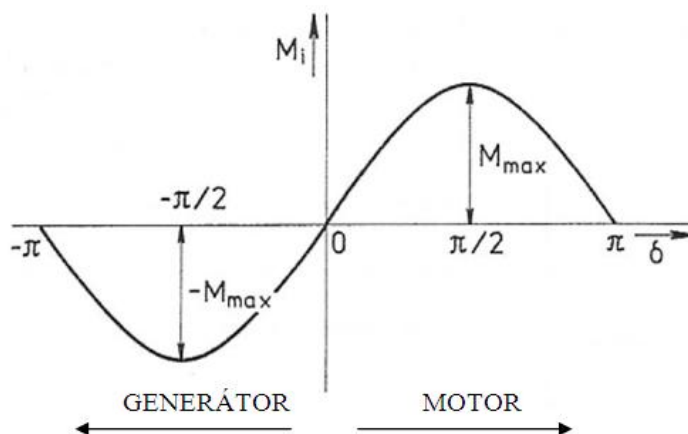
Fázový posuv mezi svorkovým napětím U a napětím U_{if} nazýváme celkový zátěžný úhel δ .



Obrázek 5: Rozmístění vektoru proudu rotoru I_a v souřadnicovém systému d-q [6]

Moment synchronního stroje neobsahuje reluktanční složku momentu:

$$M_i = \frac{3}{\omega_{1m}} \cdot \frac{U \cdot U_{if}}{X_d} \cdot \sin \delta \quad (3)$$

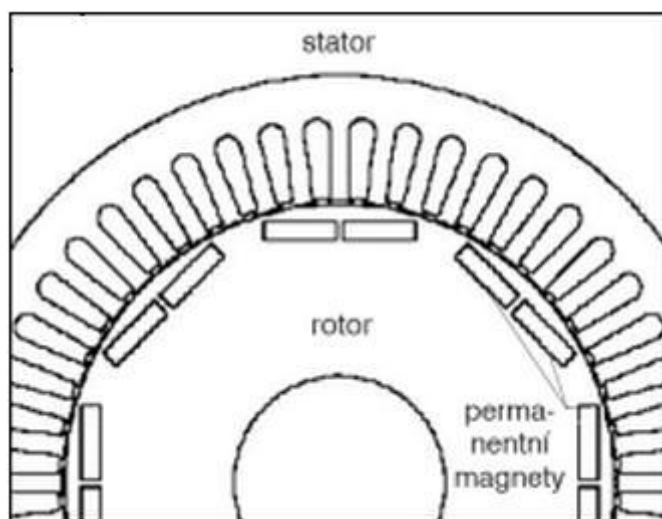


Obrázek 6: Průběh momentu v závislosti na zátěžném úhlu δ [5]

3 MOŽNOSTI A KONSTRUKCE

3.1 Motor s vnitřním rotorem

Statorové trojfázové vinutí je uloženo v drážkách magnetického obvodu. Uvnitř statoru je umístěn rotor s permanentními magnety.

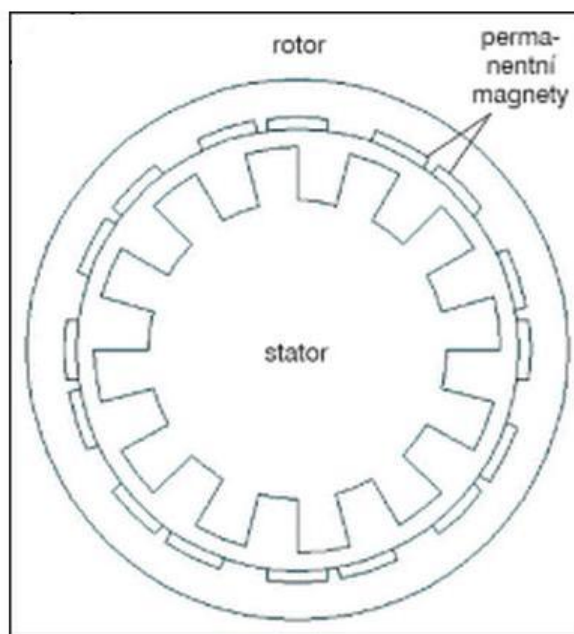


Obrázek 7: Motor s vnitřním rotorem [7]

Rotor bývá odlehčen dutinami, protože magnetický tok se uzavírá v povrchové vrstvě. Póly permanentních magnetů jsou tvořeny dílčími segmenty. Magnety se na rotor upevní lepením a zpevní bandáží.

3.2 Motor s vnějším rotorem

Nachází uplatnění v aplikacích kdy je motor integrován přímo do konstrukce kola. Stator je spojen s osou kola a rotor, který jej obklopuje je součástí kola.



Obrázek 8: Motor s vnějším rotorem [7]

Rotor

Rotorové uspořádání může být s válcovým rotorem nebo s diskovým rotorem. Obecně lze říci, že diskové rotory jsou lepší s větším počtem pólů $2p_1 > 6$, $2p_1 > 8$. U vícenásobných diskových rotorů jsou užívány pro zvětšení síly pro danou rychlost.

Lepší výkon je při použití vícenásobného diskového rotoru. Důležitým faktorem pro snižování ztrát vířivými proudy produkované harmonickými kmity prostorovým a časovým statorovým polem jsou tenké měděné štítky.

Typické vlastnosti pro materiál rotoru:

Přídržný kroužek: uhlíkové vlákno+epoxidová pryskyřice

Hřídel: nemagnetické železo

Rotorová část: magnetické železo

Přerušovací mezera: nemagnetické železo

3.3 Vzduchová mezera

Magnetický tok vzduchové mezery synchronního motoru s permanentními magnety má dva hlavní zdroje: permanentní magnet a magnetomotorické napětí statorového vinutí. Přítomnost drážek a magnetická saturace společně s permanentním magnetem rotoru má za následek složitější výpočty v rozměru 2D nebo 3D. Nicméně pro povrch permanentního magnetu můžeme vliv magnetické saturace zanedbat, jestliže není velké proudové zatížení ve vysoké kroutící síle.

3.4 Stator

Stator patří mezi pevnou část elektrického stroje. Plechy, které jsou ve statoru zalisovány jsou od sebe izolovány. Tyto plechy tvoří část magnetického obvodu. Ve statorových drážkách je uloženo střídavé vinutí (většinou třífázové zapojené do hvězdy).

3.5 Vinutí

Vinutí slouží k vytváření elektromotorické síly, nutnou pro práci stroje. Dále slouží k buzení magnetického pole, nutné k přeměně energie. Vinutí lze podle [10] rozdělit na:

- a) jednofázová
- b) dvoufázová
- c) třífázová
- d) vícefázová

Podle uložení vinutí v drážkách do vrstev lze dělit na:

- a) jednovrstvá
- b) dvouvrstvá

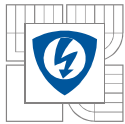
Výhodou dvouvrstvého vinutí je úspora materiálu na čela cívek z důvodu zkrácení kroku pro pátou a sedmou harmonickou. Máme dvě aktivní strany cívky (v horní vrstvě a ve spodní vrstvě).

Větší počet drážek na pól a fázi vede ke zvýšení první harmonické s rozkmitem, který je redukováný spolu s jeho dalším povrchem rotoru a ztrátami vířivými proudy permanentního magnetu. Pro větší počet drážek mají tendenci koncová vedení být velká, proto také Joulovy ztráty mají tendenci se zvětšovat. Distribuovaná vinutí jsou využívána k poskytnutí téměř sinusového průběhu elektromagnetického pole ve statorovém vinutí navzdory nesinusovému toku ve vzduchové mezeře.[10]

3.6 Ztráty a účinnost

Ztráty, které vznikají v elektrickém stroji dělíme na :

1. ΔP_j - Joulovy elektrické ztráty ve vodičích a vodivých částech stroje
2. ΔP_{Fe} - ztráty v magnetickém obvodu stroje (ztráty v železe)
3. ΔP_{mech} - mechanické ztráty, obsahující i ventilační ztráty



Celkové ztráty se vypočítají:

$$\Delta P = \Delta P_j + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} \quad (4)$$

Pro výkon platí následující vztah:

$$P = P_{in} - \Delta P \quad (5)$$

ΔP - celkové ztráty

P_{in} - příkon stroje

P - výkon stroje

Ztráty Joulovy elektrické v jedné fázi vinutí ΔP_j :

$$\Delta P_j = RI^2 \text{ [W, } \Omega, \text{ A]} \quad (6)$$

R - činný odpor

I - proud

Ztráty v magnetickém obvodu stroje ΔP_{Fe} (ztráty v železe):

Tyto ztráty lze ještě dělit na ztráty hysterezní a ztráty vířivými proudy, které vznikají v plechách. Dále ještě vznikají v magnetickém obvodu přídavné vířivé ztráty, vytvářené kmity magnetického pole. Tyto kmity vznikají nerovnoměrností vzduchové mezery způsobené drážkováním. U synchronního stroje zde uvažujeme hlavně ztráty na povrchu (skinefekt).

Hysterezní ztráty:

$$\Delta P_{Fe} = p_{1,0} \cdot k_p \cdot m \cdot B^n \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} \quad (7)$$

$$n = 5,69 \cdot \log \left(\frac{p_{1,5}}{p_{1,0}} \right) \quad (8)$$

Hysterezní ztráty:

$$\Delta P_h = \Delta P_{Fe} \cdot \frac{\beta \cdot f}{\beta \cdot f + 50} \quad (9)$$

Vířivé ztráty:

$$\Delta P_v = \Delta P_{Fe} \cdot \frac{50}{\beta \cdot f + 50} \quad (10)$$

Ztráty mechanické ΔP_{mech} :

Tyto ztráty se počítají pouze orientačně (přesné hodnoty se dosáhne měřením).[10]

4 ANSYS MAXWELL, RMXPERT

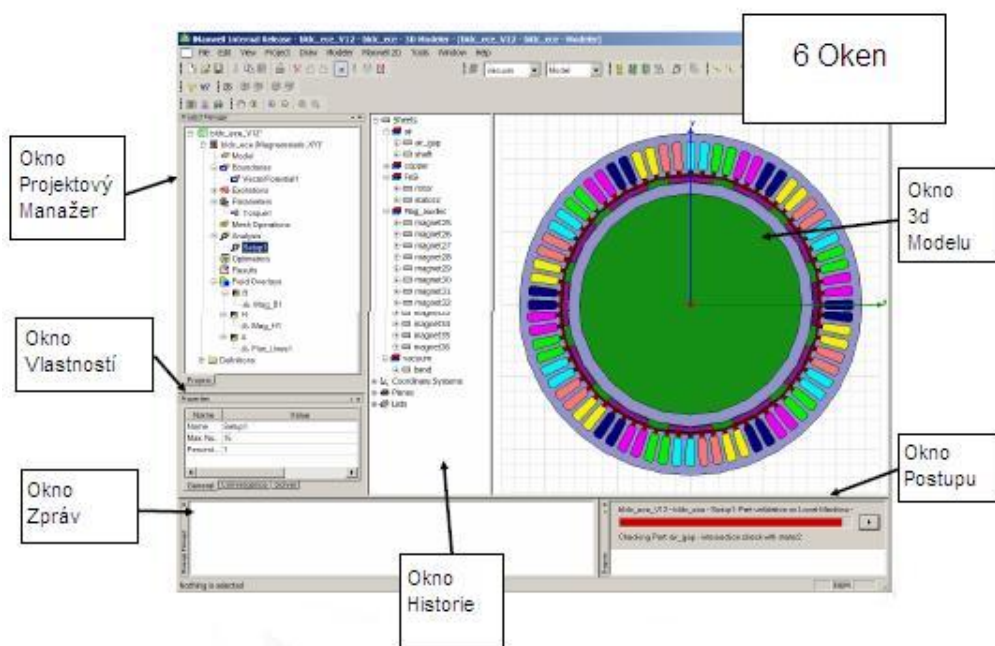
4.1 Ansys Maxwell

Program Ansys Maxwell (dále jen Maxwell) slouží k simulaci elektromagnetických polí při navrhování a simulování transformátorů, motorů atd. Tento program pracuje na principu metody konečných prvků. Což vede k diskretizaci spojitého kontinua do určitého počtu prvků (konečného). Zjišťované parametry jsou určovány v jednotlivých uzlových bodech. [8]

Maxwell umožňuje extrahovat stavové modely ze simulací a dále spolupracovat s moduly (Simplorer, Rmxpert, PExprt, Workbench). Tato schopnost je základem pro efektivní simulace.

Charakteristika programu Maxwell:

- Jednoduchá simulace rotačního a translačního pohybu těles v elektromagnetickém poli, podpora simulace elektrických strojů a pohonů
- Simulace stacionárních a kvazistacionárních elektromagnetických polí v časové i frekvenční oblasti
- Intuitivní grafické uživatelské rozhraní
- Automatická tvorba sítě s adaptivním zjemněním v kritických místech
- Pokročilé magnetické materiálové modely (dynamická demagnetizace, nelineární laminace, anizotropie)
- Různé možnosti zohlednění elektromagnetických ztrát na základě dostupných materiálových dat (BP charakteristiky)
- Rozsáhlá knihovna elektromagnetických a magnetických materiálů (Shin-Etsu, VACUUMSCHMELZE, Magnequench)
- Jednoduchá parametrizace modelů, optimalizační a statistické výpočty, možnosti využití více procesorů při optimalizaci i jednotlivých simulacích
- Extrakce stavových modelů pro rozsáhlé systémové simulace [8]



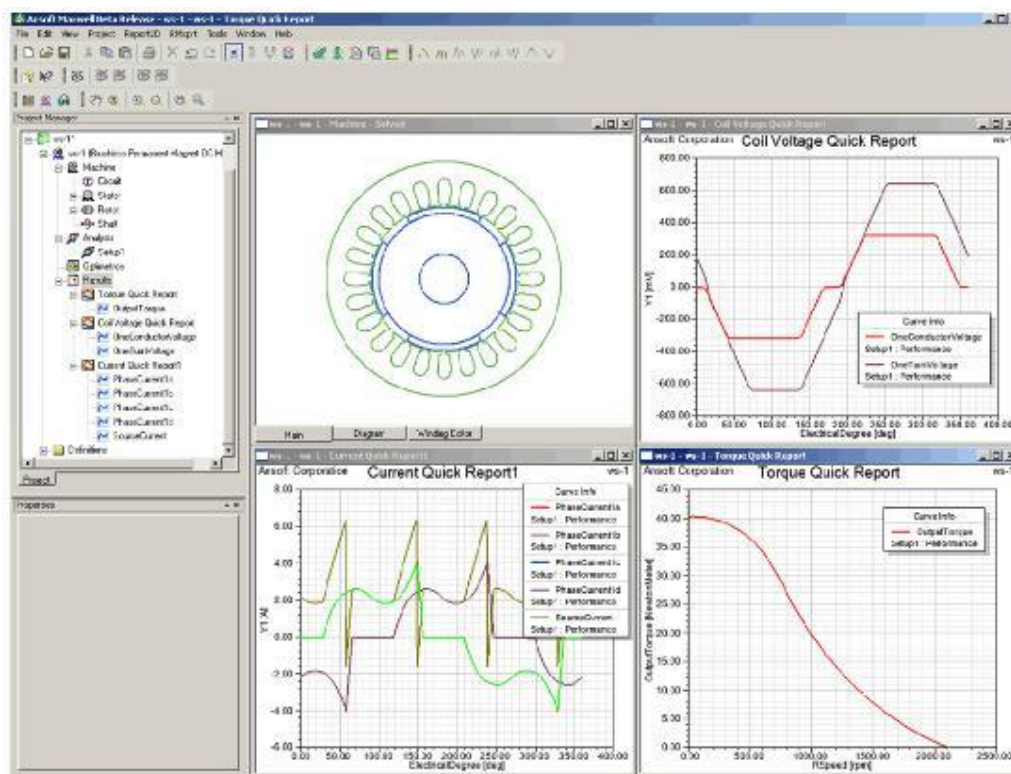
Obrázek 9: Ukázka okna programu Maxwell [8]

4.2 RMxpert

Modul Maxwellu pro návrh a optimalizaci elektrických točivých strojů (Rotation Machine expert). Porovnává návrhy a provádí parametrické analýzy. Lze jím simulovat kritické parametry strojů za normálních podmínek, stavu bez zatížení i zablokování. Výstupními veličinami jsou momentové charakteristiky, účinnost, indukce ve vzduchové mezeře, ztráty atd. RMxpert má předdefinované šablony strojů a na základě těchto vstupních údajů provádí analýzu. Tento program využívá klasickou analytickou teorii elektrických strojů točivých a magnetických obvodů.[9]

Výhody:

- intuitivní grafické uživatelské rozhraní
- předdefinované šablony elektrických strojů točivých
- jednoduché zpuštění simulace a automatická tvorba výstupního protokolu
- extrakce obvodových modelů elektrických strojů pro rozsáhlé systémové simulace
- přímá vazba na program Simplorer® (simulace elektrických strojů v součinnosti s výkonovou a řídicí elektronikou)
- knihovna lineárních, nelineárních, izotropních, anizotropních a laminovaných materiálů
- parametrické a optimalizační simulace (Optimetrics) [9]



Obrázek 10: Okno programu RMxpert [9]

5 VÝPOČET SYNCHRONNÍHO MOTORU S P.M.

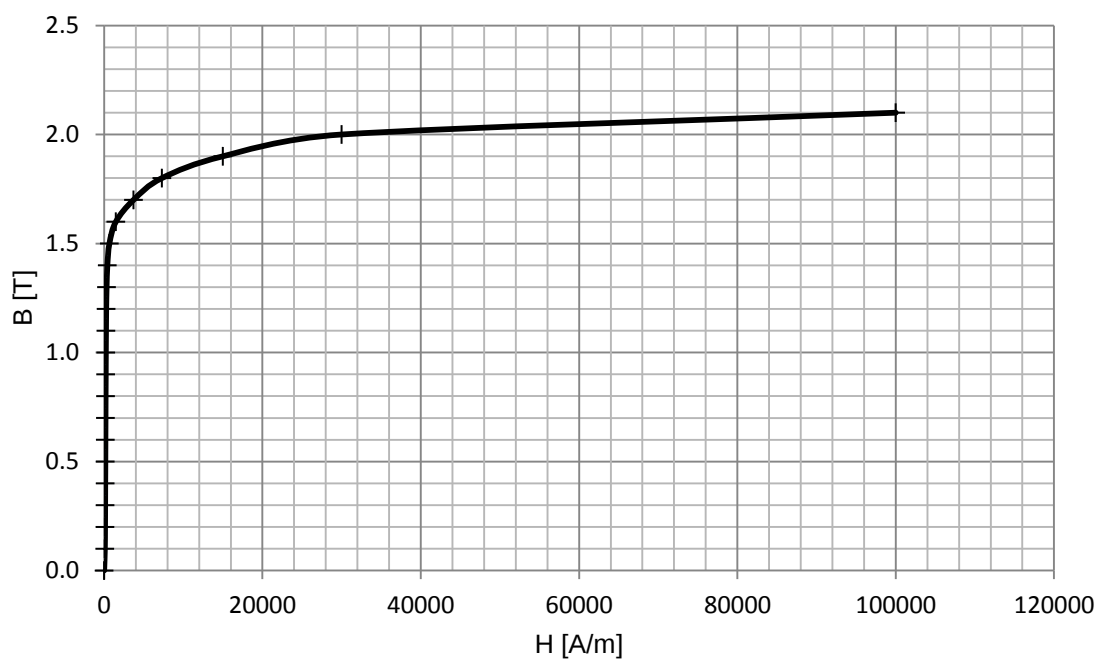
5.1 Vstupní parametry

Tabulka 1: Vstupní parametry synchronního motoru s p.m.

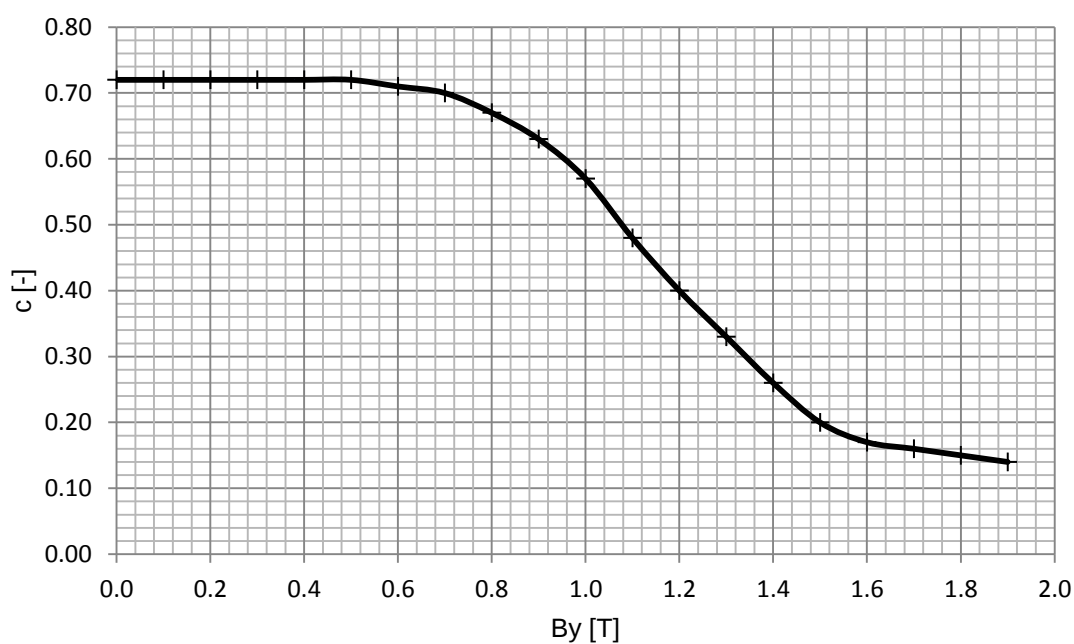
Výkon	P [W]	160000,00
Otáčky	n [s^{-1}]	41,67
Moment	M [N.m]	611,15
Napětí	U [V]	690,00
Počet fází	m [-]	3
Počet pólových dvojic	p [-]	4
Frekvence	f [Hz]	166,67
Úhlová rychlost	ω [s^{-1}]	1047,21
Požadovaná účinnost	η [-]	0,95
Účinník	$\cos\varphi$ [-]	0,91
Koercivita p.m.	H_c [$A \cdot m^{-1}$]	800000,00
Remanentní mag.indukce materiálu p.m.	B_r [T]	1,05
Permeabilita vakua	μ_0 [$H \cdot m^{-1}$]	$1,26 \cdot 10^{-6}$
Permeabilita materiálu p.m.	μ_{rec} [$H \cdot m^{-1}$]	1,04
Oteplení ve vinutí stroje	Θ [K]	80,00
Vodivost mědi (20°C)	σ_{Cu20C} [$S \cdot m^{-1}$]	$5,70 \cdot 10^7$
Teplotní součinitel odporu mědi	α_{Cu} [K^{-1}]	$3,81 \cdot 10^{-3}$
Činitel plnění jádra statoru	k_{Fe} [-]	0,97
Hustota železa	ρ_{Fe} [$kg \cdot m^{-3}$]	7600
Hustota materiálu p.m	ρ_{PM} [$kg \cdot m^{-3}$]	7500
Hustota mědi	ρ_{Cu} [$kg \cdot m^{-3}$]	8960

V tabulce 1 jsou uvedeny vstupní parametry synchronního motoru s permanentními magnety, ze kterého vychází vlastní výpočet. Mezi základní parametry patří výkon, otáčky, moment, počet pólových dvojic. Z konečného výpočtu bychom měli dojít k účinnosti 95% a účinníku 0,96.

V tabulce jsou zahrnuty parametry jako permeabilita, hustota atd., které souvisí s použitým materiálem. Veškeré výpočty jsme provedli v programu Excel a výpočty ověřili pomocí vzorově vypočítaného příkladu z knihy [11]. Mezi vstupní parametry řadíme i graf závislosti magnetické indukce B na intenzitě magnetického pole H (BH křivka) a graf závislosti koeficientu c na magnetické indukci B_y . BH křivka má rostoucí charakter a závislost koeficientu c na magnetické indukci B_y má klesající charakter.



Obrázek 11: Graf závislosti magnetické indukce B na intenzitě magnetického pole H



Obrázek 12: Graf závislosti koeficientu c na magnetické indukci B_y

5.2 Výstupní parametry

Kompletní tabulka výstupních parametrů je uvedena v příloze. Zde jsou uvedeny pouze vybrané vypočítané výstupní parametry

Tabulka 2: Vybrané výstupní parametry synchronního motoru s p.m.

Tečné napětí	Tečné napětí	σ_{Ftan} [Pa]	30485,00
Rozměr rotoru	Objem	V_r [m ³]	0,01
	Koeficient	χ [-]	0,39
	Průměr rotoru	D_r [mm]	320,00
	Ekvivalentní délka rotoru	l [mm]	125,70
Vzduchová mezera a délka jádra	Délka vzduchové mezery	δ [mm]	1,60
	Vnitřní průměr statoru	D_s [mm]	323,20
	Délka jádra	l [mm]	122,50
Statorové vinutí	Počet drážek na pól a fázi	q [-]	2
	Rozteč vinutí	W_{tp} [-]	5/6
	Počet statorových drážek	Q [-]	48
	Rozteč statorových drážek	τ_u [mm]	21,20
	Rozteč pólů statoru	τ_p [mm]	126,90
Počet vodičů v drážce	Počet paralelních větví	a [-]	2
	Počet vodičů v drážce	z_Q [-]	14,40
	Počet vodičů v drážce	z_Q [-]	14,00
	Počet závitů ve fázi vinutí	N [-]	56
Vnější statorový průměr a vnitřní rotorový průměr	Vnější statorový průměr	D_{se} [mm]	474,30
	Vnitřní rotorový průměr	D_{ri} [mm]	241,10
Celkové magnetické napětí	Celkové magnetické napětí	U_{mtot} [A]	4876,10
Statorový proud, ztráty odporové a celkové	Statorový proud	I_s [A]	154,86
	Odporové ztráty statoru	P_{cu} [W]	$1,43 \cdot 10^3$
	Ztráty v železe	P_{Fe} [W]	$3,093 \cdot 10^3$
	Ztráty	P_{loss} [W]	$7,16 \cdot 10^3$
	Axiální proud statoru	I_d [A]	-43,90
	Kvadrátový axiální proud statoru	I_q [A]	139,22
	Nový statorový proud	I_s [A]	145,97
Účinnost a účiník	Účinnost	η [%]	95,72
	Účiník	$\cos\varphi$ [-]	0,96
Výstupní moment	Výstupní moment	T_{sh} [Nm]	611,15

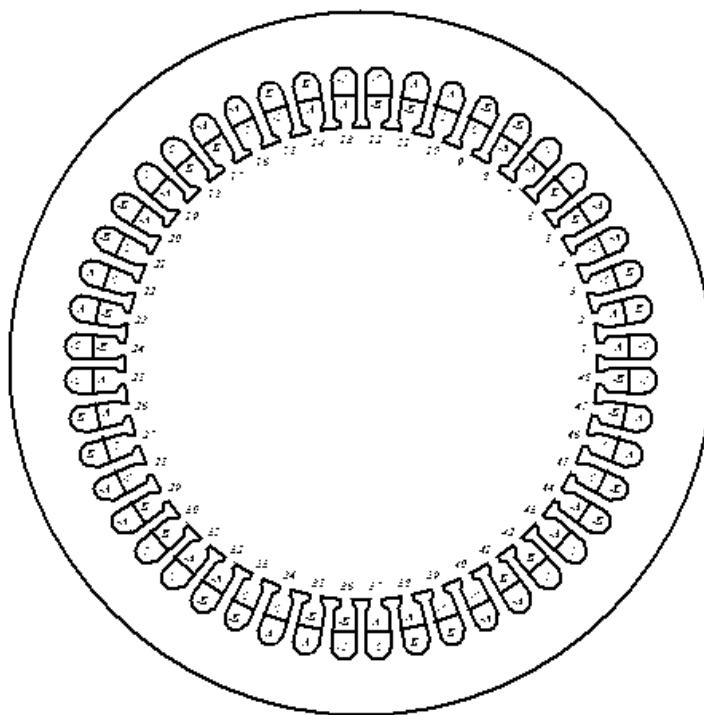
Tyto výstupní parametry byly ověřeny v [11] a téměř se shodují. Základní parametry byly převedeny do Maxwellu, ve kterém byl sestaven a ověřen model synchronního motoru s permanentními magnety.

6 OVĚŘENÍ VÝPOČTU V PROGRAMU ANSYS MAXWELL – MODUL RMXPERT

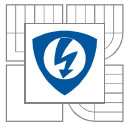
Výpočet bude ověřován pro hodnoty vypočítané v Excelu. Dále se budeme zabývat změnou parametrů motoru (délka a průměr) a budeme srovnávat tyto modifikace. Ověření výpočtu bude realizováno pro pět případů:

1. Základní vypočítané parametry bez změny délky a průměru motoru
2. Změna délky motoru o +20 mm bez změny průměru motoru
3. Změna délky motoru o -20 mm bez změny průměru motoru
4. Změna průměru motoru o +10 mm bez změny délky motoru
5. Změna průměru motoru o -10 mm bez změny délky motoru

Model synchronního motoru s permanentními magnety v programu Ansys Maxwell:



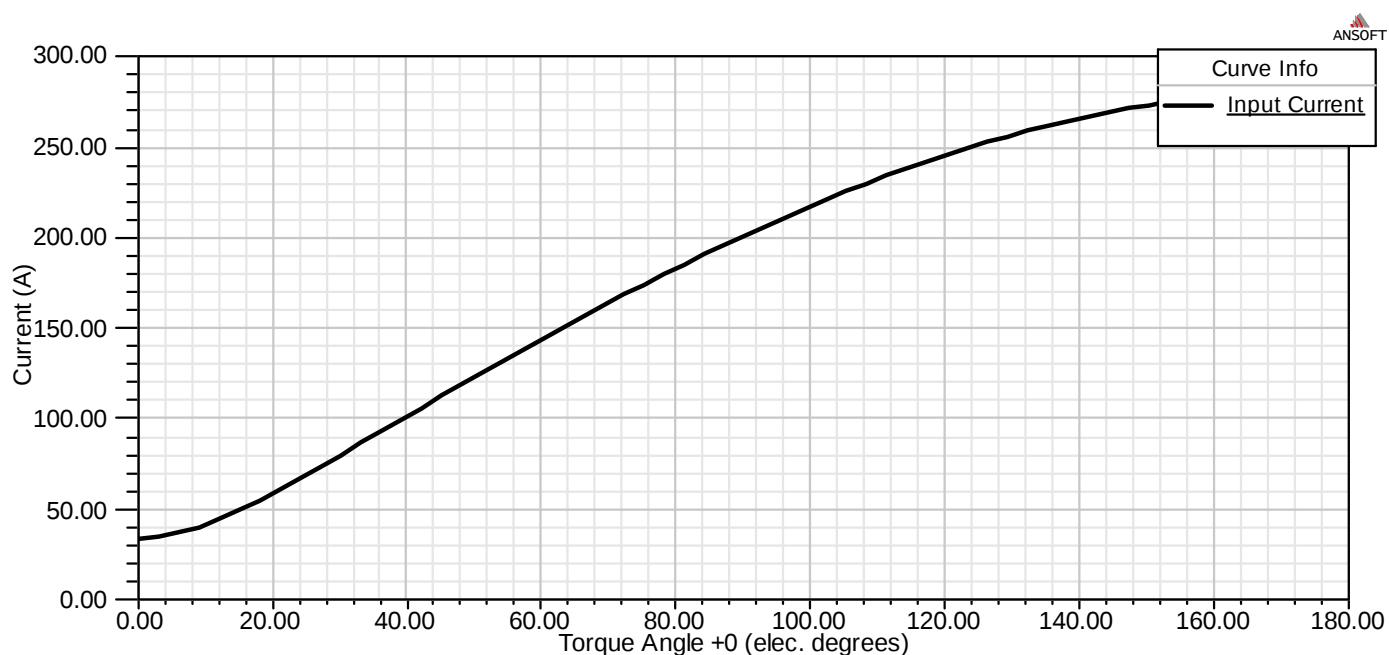
Obrázek 13: Model synchronního motoru v programu Ansys Maxwell



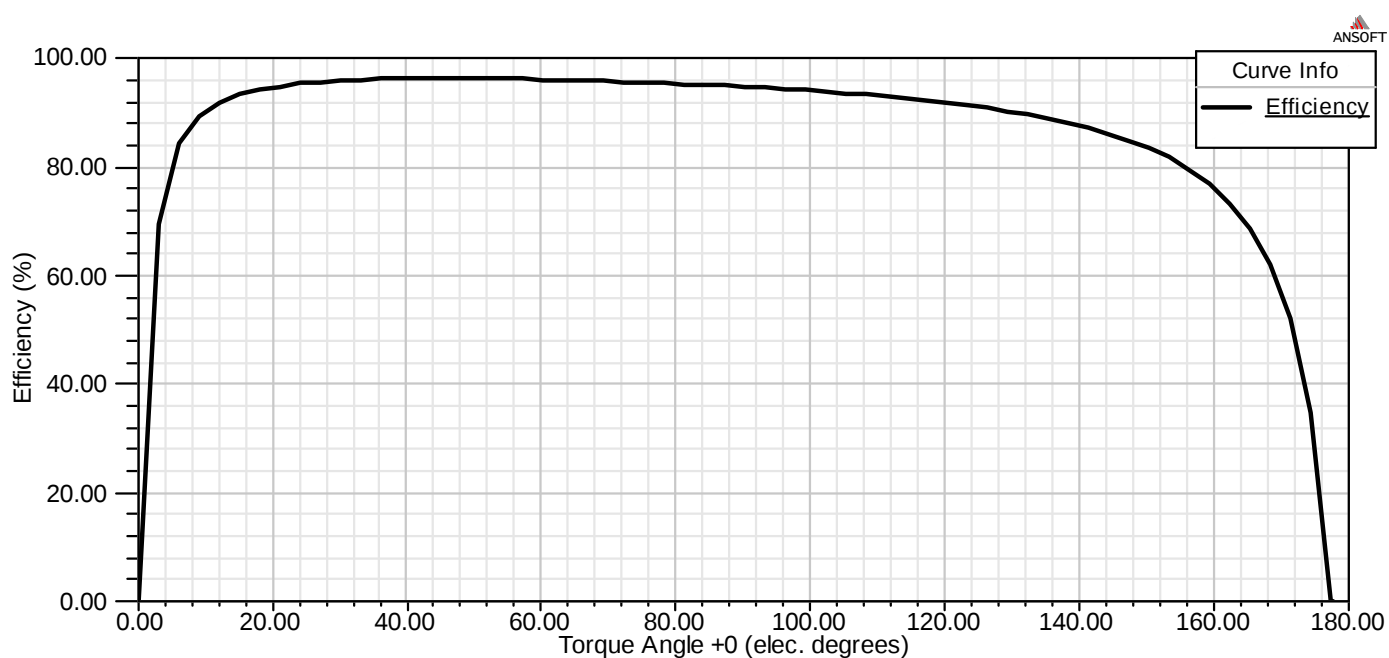
Základní vypočítané parametry bez změny délky a průměru motoru

Tabulka 3: Vybrané parametry synchronního motoru s p.m. pro případ 1.

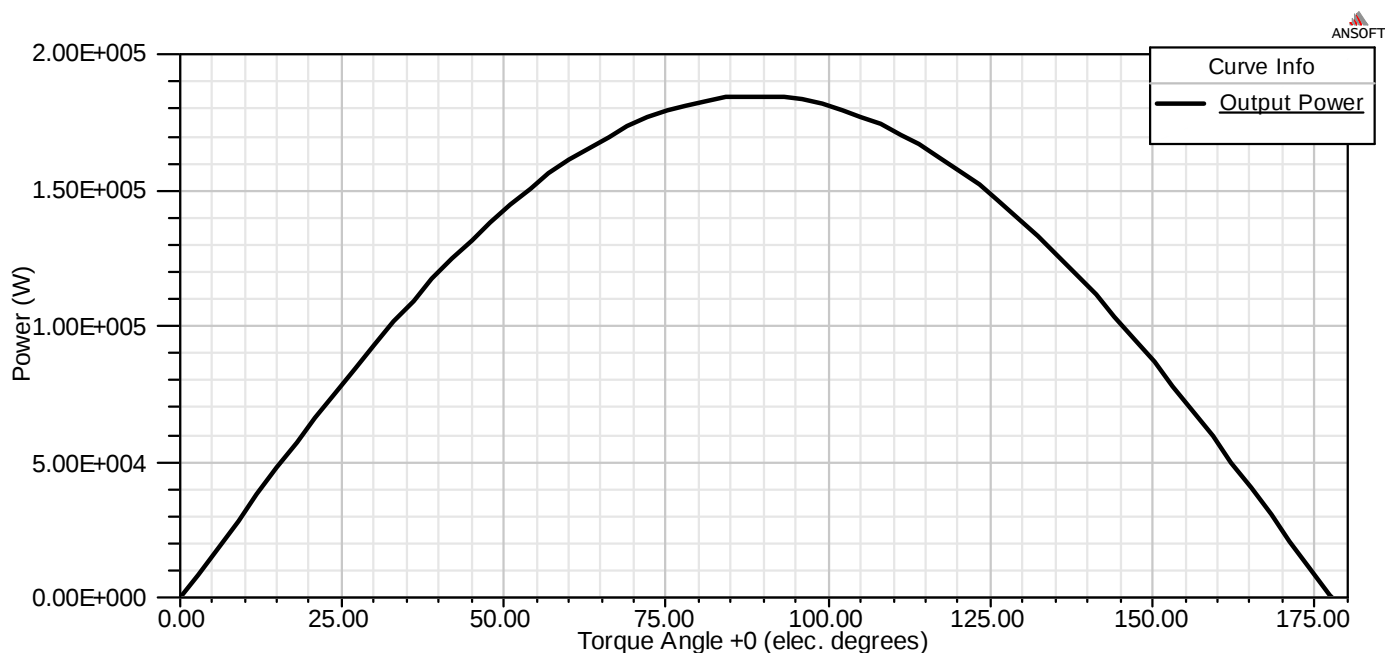
ADJUSTABLE-SPEED PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR DESIGN	
GENERAL DATA	
Rated Output Power (kW):	160
Rated Voltage (V):	690
Number of Poles:	8
Frequency (Hz):	166.667
Frictional Loss (W):	500
Windage Loss (W):	1115.2
Rotor Position:	Inner
Type of Circuit:	Y3
Type of Source:	Sine
FULL-LOAD DATA	
Root-Mean-Square Line Current (A):	145.307
Root-Mean-Square Phase Current (A):	145.307
Armature Thermal Load (A^2/mm^3):	743.515
Specific Electric Loading (A/mm):	96.1668
Armature Current Density (A/mm^2):	7.73151
Frictional and Windage Loss (W):	1615.2
Iron-Core Loss (W):	1340.95
Armature Copper Loss (W):	4007.39
Total Loss (W):	6963.53
Output Power (W):	160034
Input Power (W):	166997
Efficiency (%):	95.8302
Rated Torque (N.m):	611.284
Maximum Output Power (W):	182639
Armature Core Steel Consumption (kg):	141.439
D-Axis Reactive Inductance L_d (mH):	2.34789
Armature Phase Resistance R_1 (mOhm):	63,267



Obrázek 14: Graf závislosti vstupního proudu na úhlovém momentu motoru pro případ 1



Obrázek 15: Graf závislosti účinnosti na úhlovém momentu motoru pro případ 1



Obrázek 16: Graf závislosti výstupního výkonu na úhlovém momentu motoru pro případ 1

Tabulka 4: Porovnání vybraných parametrů z Excelu a RMxpertu pro základní průřez a délku motoru

	I_n, D_n EXCEL	I_n, D_n RMxpert	$\delta\%$ [%]
I_s [A]	145,97	145,31	0,45
P_{Fe} [W]	1430,00	1340,95	6,23
P_{Cu} [W]	3093,84	4007,39	29,53
ΔP [W]	7160,00	6963,53	2,74
P_{in} [W]	167000,00	166997,00	$1,80 \cdot 10^{-3}$
η [%]	95,72	95,83	0,11

Výpočet procentuálních chyb (parametry vypočítané v Excelu jsou referenční)

$$\delta_{\%I} = \frac{\Delta I_s}{I_r} \cdot 100 = \frac{145,97 - 145,31}{145,97} \cdot 100 = 0,45\%$$

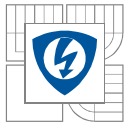
$$\delta_{\%P_{Fe}} = \frac{\Delta P_{Fe}}{P_{Fe}} \cdot 100 = \frac{1430,00 - 1340,95}{1430,00} \cdot 100 = 6,23\%$$

$$\delta_{\%P_{Cu}} = \frac{\Delta P_{Cu}}{P_{Cu}} \cdot 100 = \frac{3093,84 - 4007,39}{3093,84} \cdot 100 = 29,53\%$$

$$\delta_{\%P} = \frac{\Delta P}{P_r} \cdot 100 = \frac{7160,00 - 6963,53}{7160,00} \cdot 100 = 2,74\%$$

$$\delta_{\%P_{in}} = \frac{\Delta P_{in}}{P_{inr}} \cdot 100 = \frac{167000,00 - 166997,00}{167000,00} \cdot 100 = 1,80 \cdot 10^{-3}\%$$

$$\delta_{\%\eta} = \frac{\Delta \eta}{\eta_r} \cdot 100 = \frac{95,72 - 95,83}{95,72} \cdot 100 = 0,11\%$$

**Změna délky motoru o +20 mm bez změny průměru motoru****Tabulka 5:** Vybrané parametry synchronního motoru s p.m. pro případ 2.

ADJUSTABLE-SPEED PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR DESIGN

GENERAL DATA

Rated Output Power (kW):160

Rated Voltage (V):690

Number of Poles:8

Frequency (Hz):166.667

Frictional Loss (W):500

Windage Loss (W):1115.2

Rotor Position:Inner

Type of Circuit:Y3

Type of Source:Sine

FULL-LOAD DATA

Root-Mean-Square Line Current (A):144.589

Root-Mean-Square Phase Current (A):144.589

Armature Thermal Load (A^2/mm^3):736.206

Specific Electric Loading (A/mm):95.6939

Armature Current Density (A/mm^2):7.69334

Frictional and Windage Loss (W):1615.2

Iron-Core Loss (W):1552.32

Armature Copper Loss (W):4292.42

Total Loss (W):7459.93

Output Power (W):160054

Input Power (W):167513

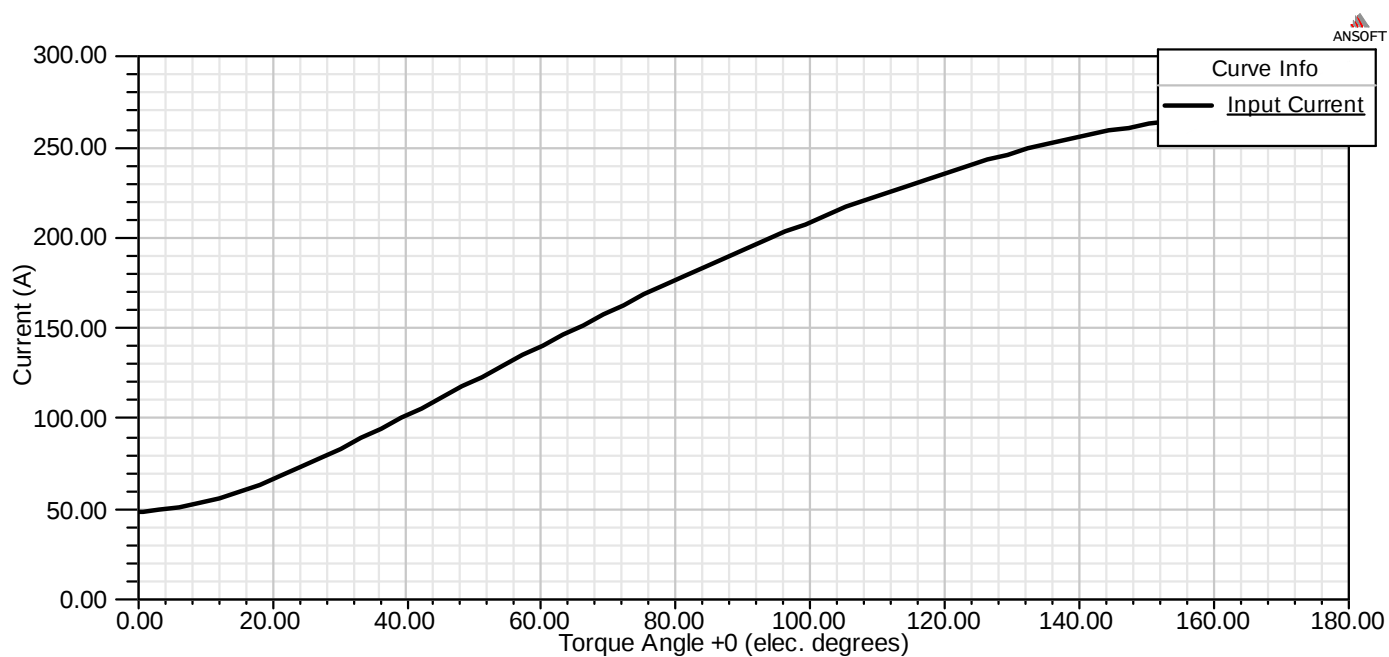
Efficiency (%):95.5467

Rated Torque (N.m):611.36

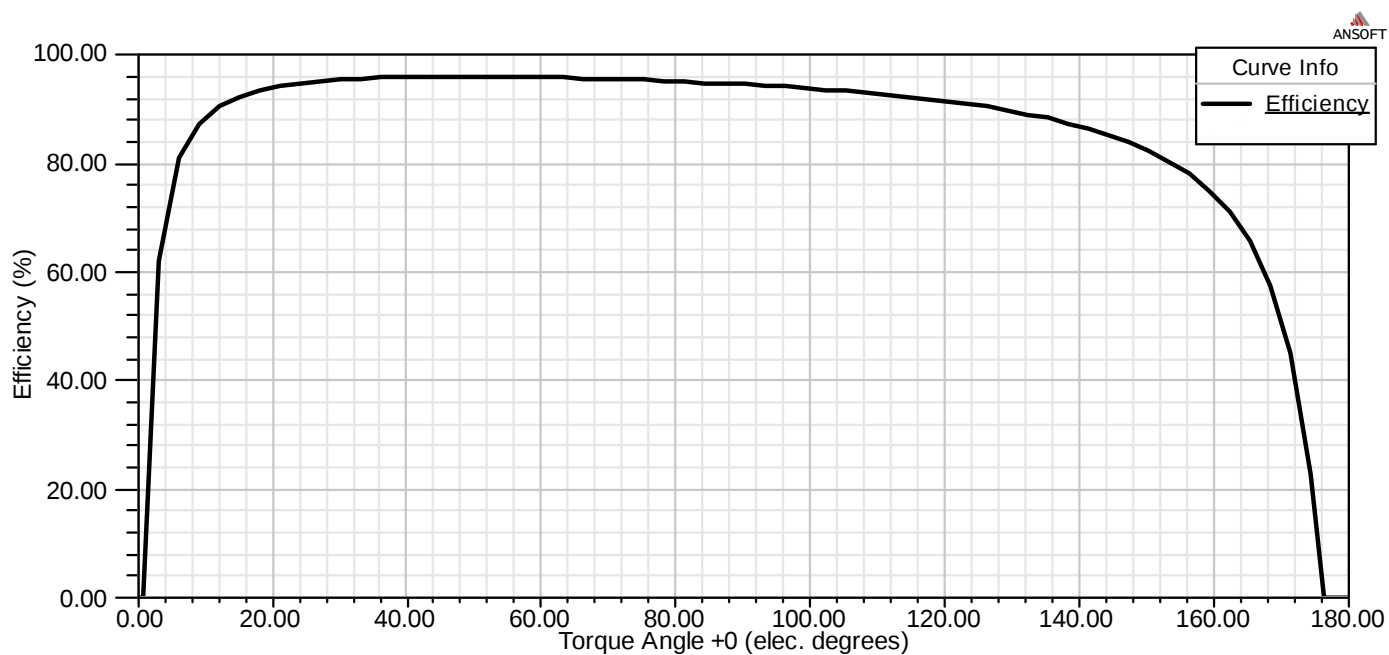
Maximum Output Power (W):178618

Armature Core Steel Consumption (kg):163.944

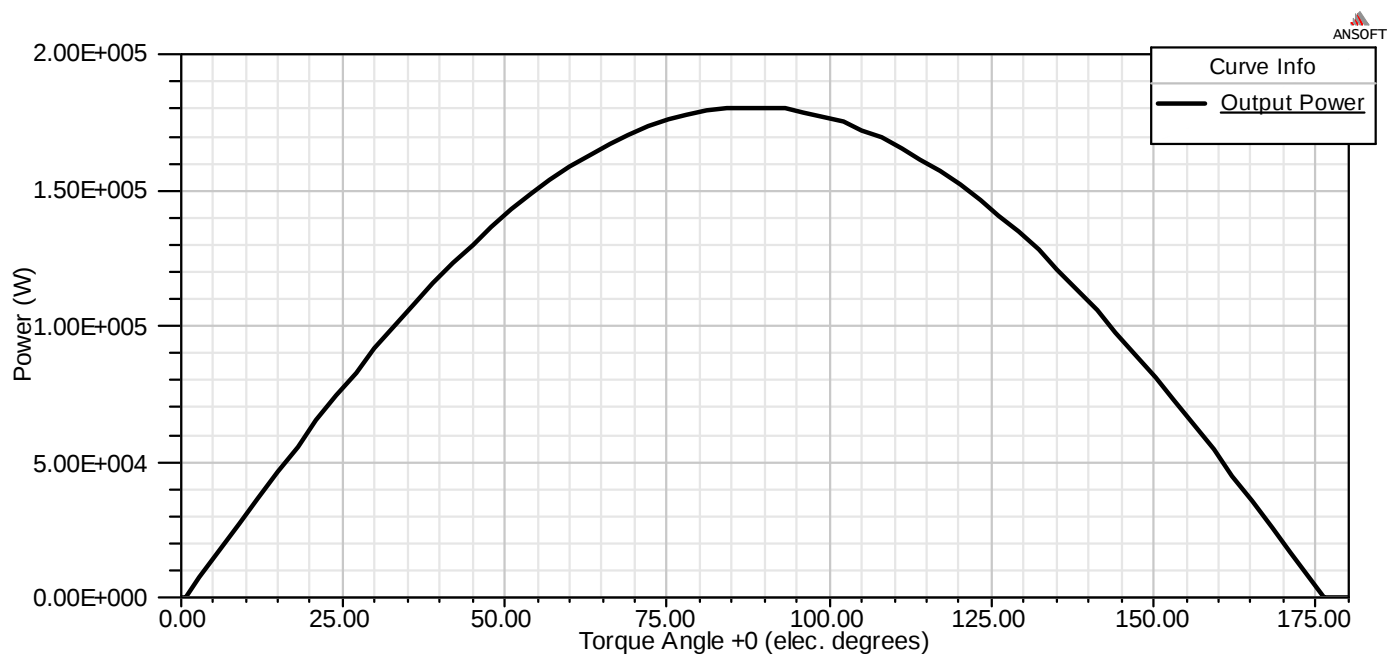
D-Axis Reactive Inductance L_d (mH):2.71218Armature Phase Resistance R_1 (mOhm):68.44



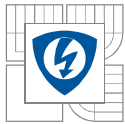
Obrázek 17: Graf závislosti vstupního proudu na úhlovém momentu motoru pro případ 2



Obrázek 18: Graf závislosti účinnosti na úhlovém momentu motoru pro případ 2



Obrázek 19: Graf závislosti výstupního výkonu na úhlovém momentu motoru pro případ 2



Změna délky motoru o -20 mm bez změny průměru motoru

Tabulka 6: Vybrané parametry synchronního motoru s p.m. pro případ 3.

ADJUSTABLE-SPEED PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR DESIGN

GENERAL DATA

Rated Output Power (kW):160

Rated Voltage (V):690

Number of Poles:8

Frequency (Hz):166.667

Frictional Loss (W):500

Windage Loss (W):1115.2

Rotor Position:Inner

Type of Circuit:Y3

Type of Source:Sine

FULL-LOAD DATA

Root-Mean-Square Line Current (A):159.334

Root-Mean-Square Phase Current (A):159.334

Armature Thermal Load (A^2/mm^3):894.008

Specific Electric Loading (A/mm):105.452

Armature Current Density (A/mm^2):8.47786

Frictional and Windage Loss (W):1615.2

Iron-Core Loss (W):1129.39

Armature Copper Loss (W):4424.55

Total Loss (W):7169.14

Output Power (W):160000

Input Power (W):167170

Efficiency (%):95.7115

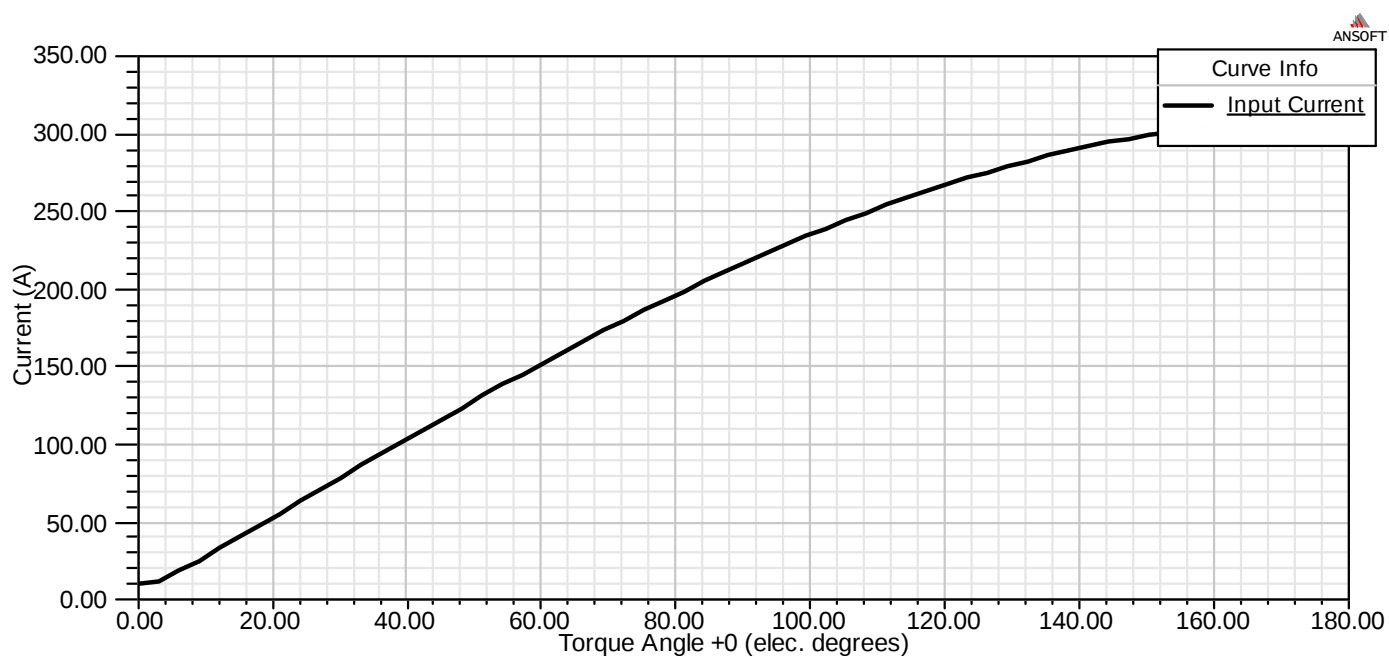
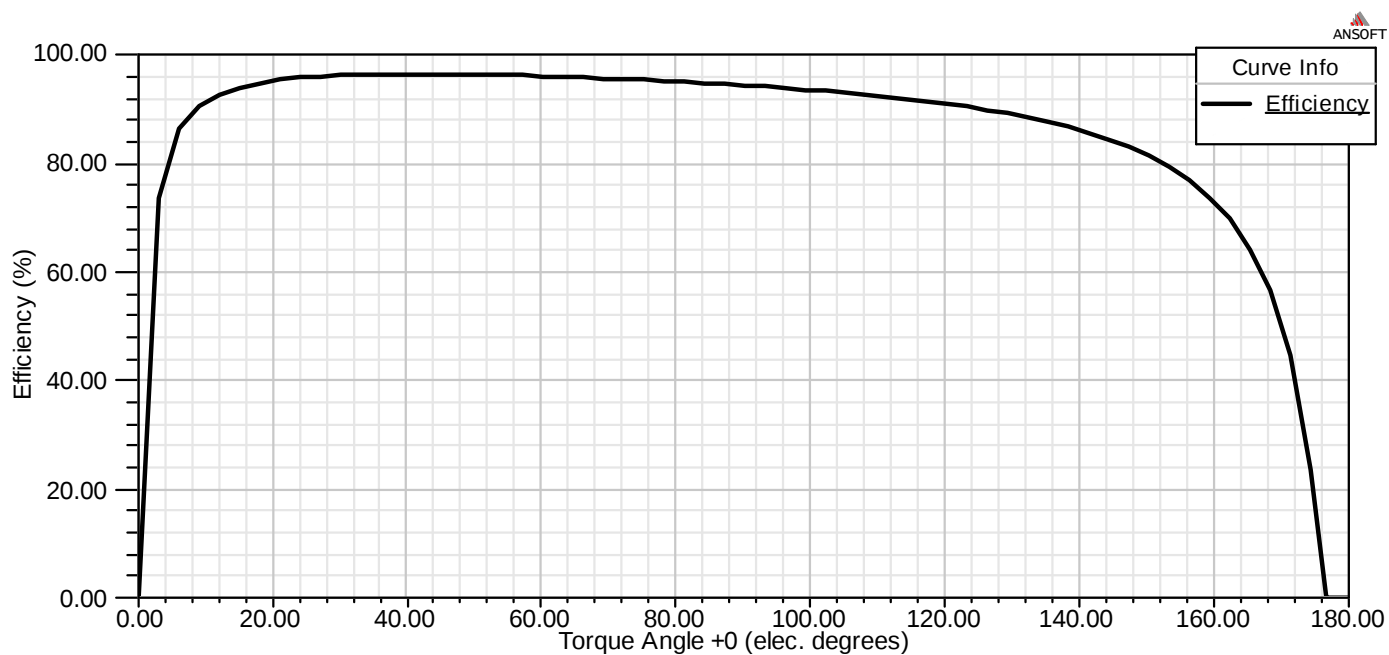
Rated Torque (N.m):611.156

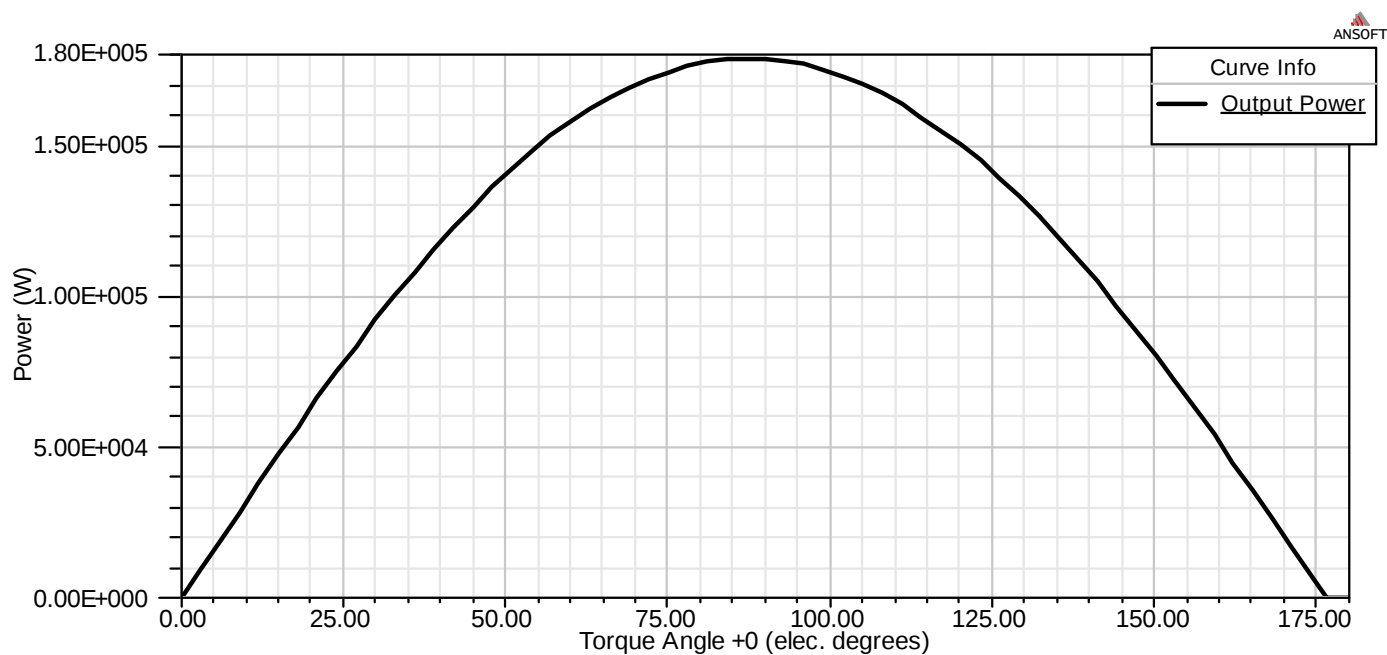
Maximum Output Power (W):176733

Armature Core Steel Consumption (kg):118.935

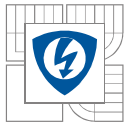
D-Axis Reactive Inductance L_d (mH):1.98359

Armature Phase Resistance R_1 (mOhm):58.094

**Obrázek 20:** Graf závislosti vstupního proudu na úhlovém momentu motoru pro případ 3**Obrázek 21:** Graf závislosti účinnosti na úhlovém momentu motoru pro případ 3



Obrázek 22: Graf závislosti výstupního výkonu na úhlovém momentu motoru pro případ 3



Změna průměru motoru o +10 mm bez změny délky motoru

Tabulka 7: Vybrané parametry synchronního motoru s p.m. pro případ 4.

ADJUSTABLE-SPEED PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR DESIGN

GENERAL DATA

Rated Output Power (kW):160

Rated Voltage (V):690

Number of Poles:8

Frequency (Hz):166.667

Frictional Loss (W):500

Windage Loss (W):1115.2

Rotor Position:Inner

Type of Circuit:Y3

Type of Source:Sine

FULL-LOAD DATA

Root-Mean-Square Line Current (A):147.652

Root-Mean-Square Phase Current (A):147.652

Armature Thermal Load (A^2/mm^3):744.685

Specific Electric Loading (A/mm):94.7881

Armature Current Density (A/mm^2):7.85631

Frictional and Windage Loss (W):1615.2

Iron-Core Loss (W):1418.36

Armature Copper Loss (W):4167.82

Total Loss (W):7201.38

Output Power (W):160041

Input Power (W):167242

Efficiency (%):95.694

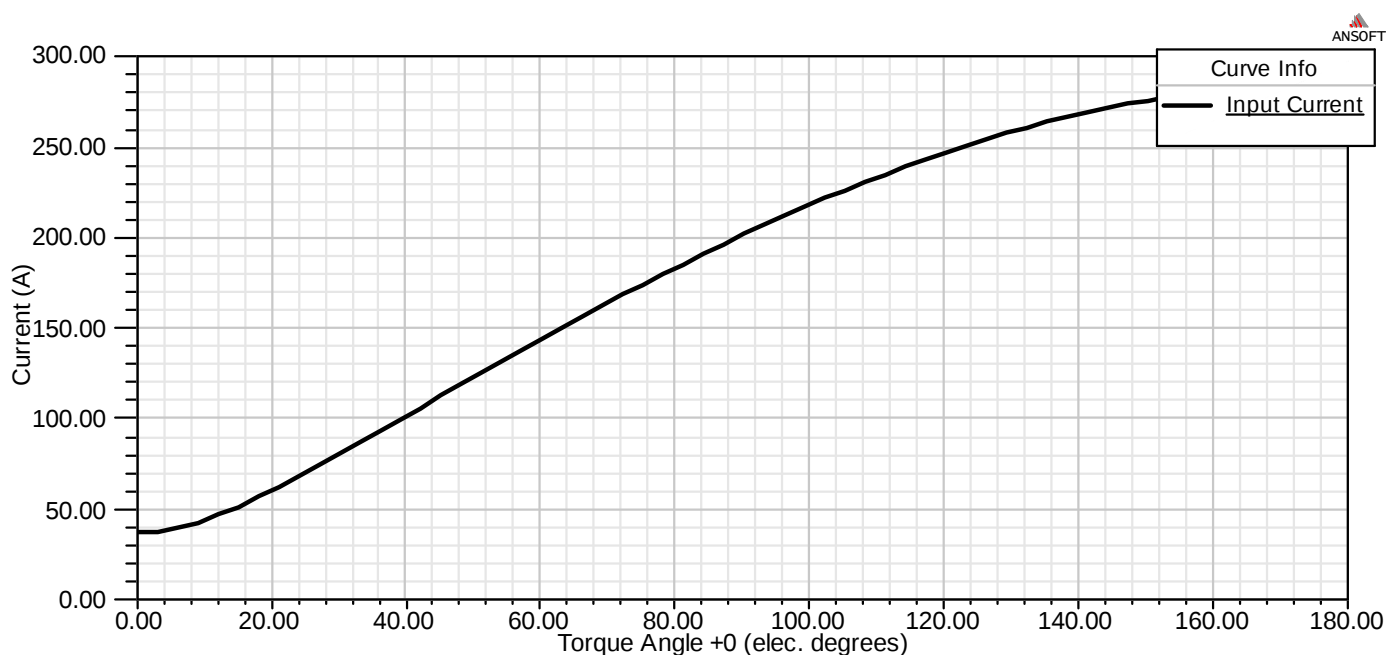
Rated Torque (N.m):611.312

Maximum Output Power (W):178978

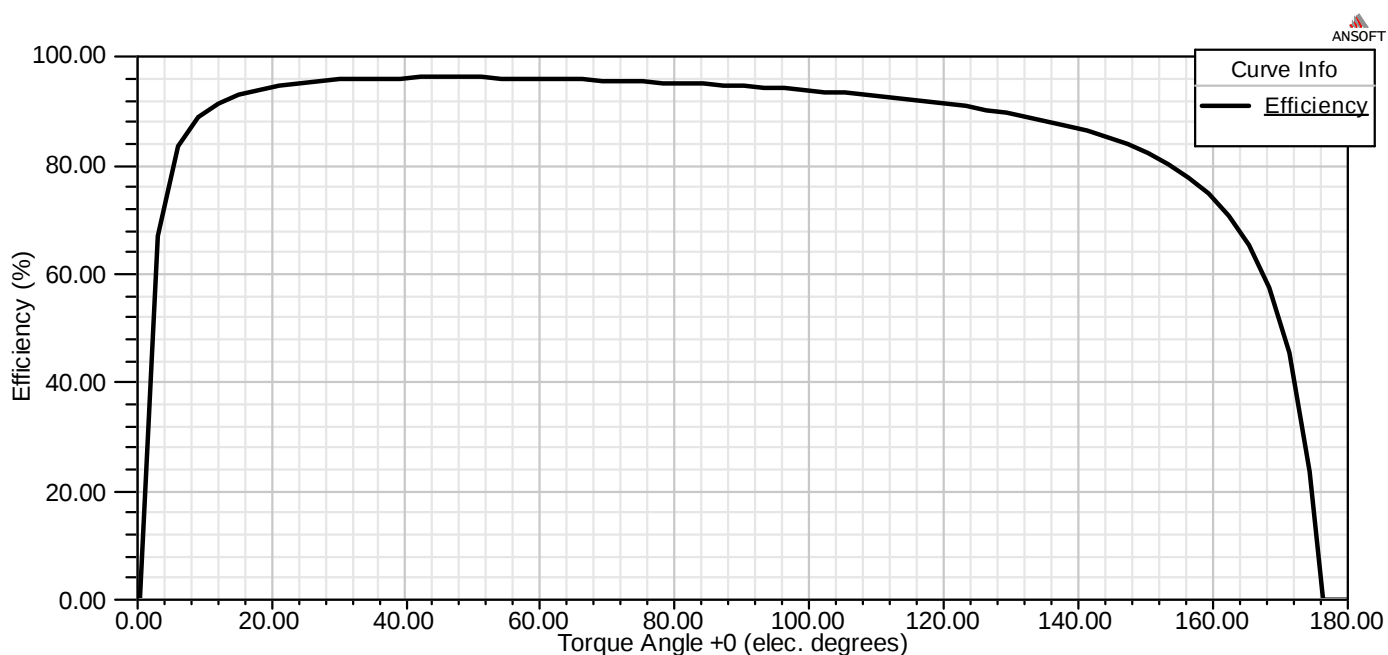
Armature Core Steel Consumption (kg):145.801

D-Axis Reactive Inductance L_d (mH):2.42495

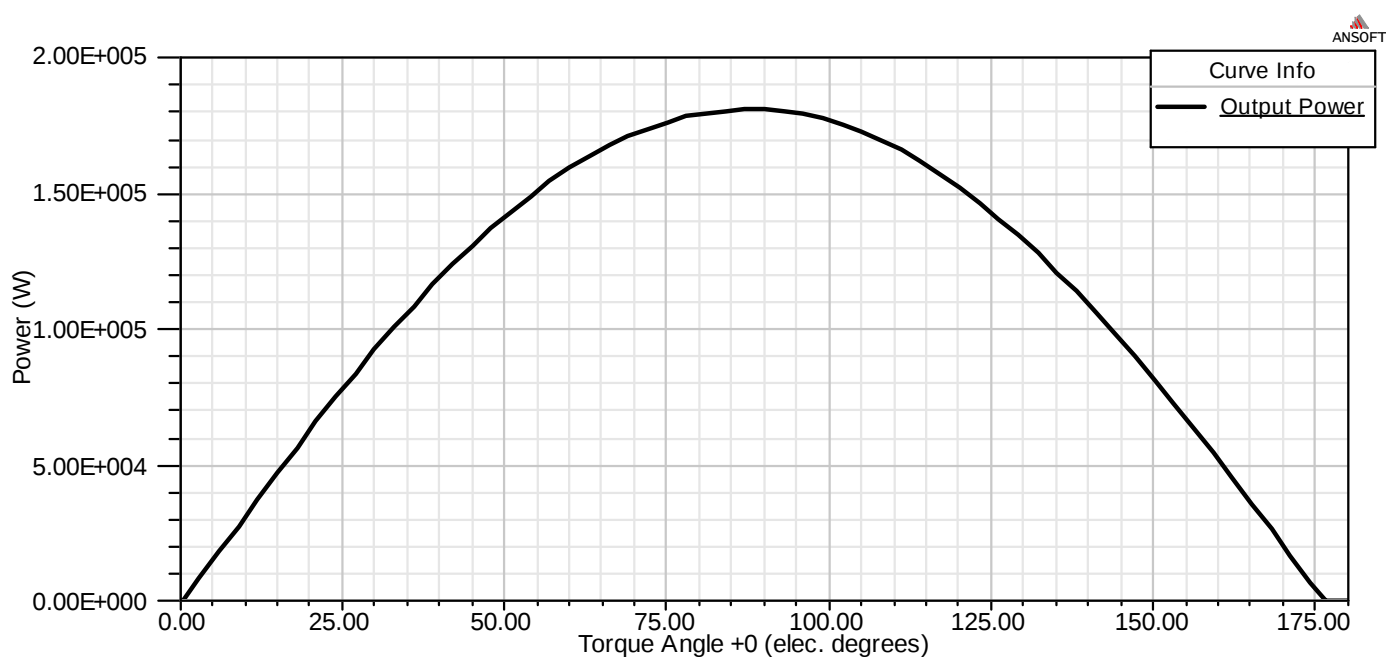
Armature Phase Resistance R_1 (mOhm):63.725



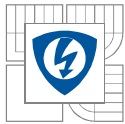
Obrázek 23: Graf závislosti vstupního proudu na úhlovém momentu motoru pro případ 4



Obrázek 24: Graf závislosti účinnosti na úhlovém momentu motoru pro případ 4



Obrázek 25: Graf závislosti výstupního výkonu na úhlovém momentu motoru pro případ 4



Změna průměru motoru o -10 mm bez změny délky motoru

Tabulka 8: Vybrané parametry synchronního motoru s p.m. pro případ 5.

ADJUSTABLE-SPEED PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR DESIGN

GENERAL DATA

Rated Output Power (kW):160

Rated Voltage (V):690

Number of Poles:8

Frequency (Hz):166.667

Frictional Loss (W):500

Windage Loss (W):1115.2

Rotor Position:Inner

Type of Circuit:Y3

Type of Source:Sine

FULL-LOAD DATA

Root-Mean-Square Line Current (A):151.639

Root-Mean-Square Phase Current (A):151.639

Armature Thermal Load (A^2/mm^3):835.595

Specific Electric Loading (A/mm):103.564

Armature Current Density (A/mm^2):8.06842

Frictional and Windage Loss (W):1615.2

Iron-Core Loss (W):1267.4

Armature Copper Loss (W):4333.04

Total Loss (W):7215.64

Output Power (W):160007

Input Power (W):167223

Efficiency (%):95.685

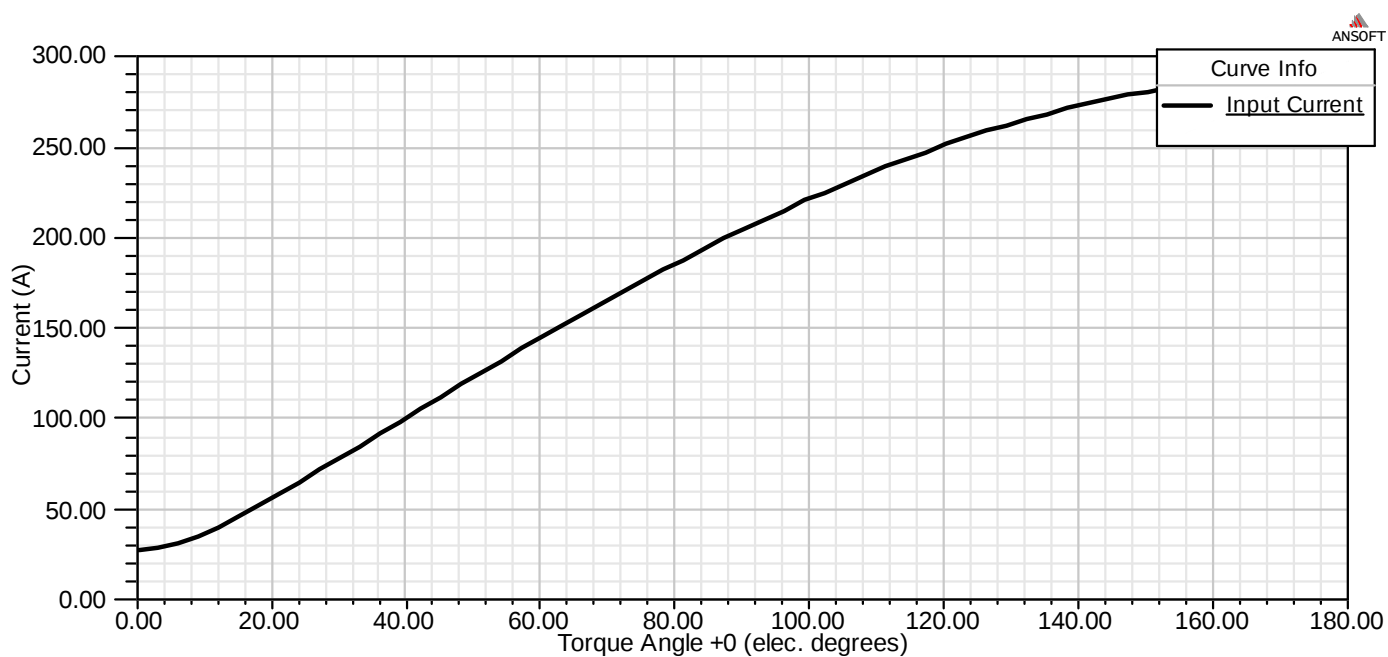
Rated Torque (N.m):611.183

Maximum Output Power (W):176809

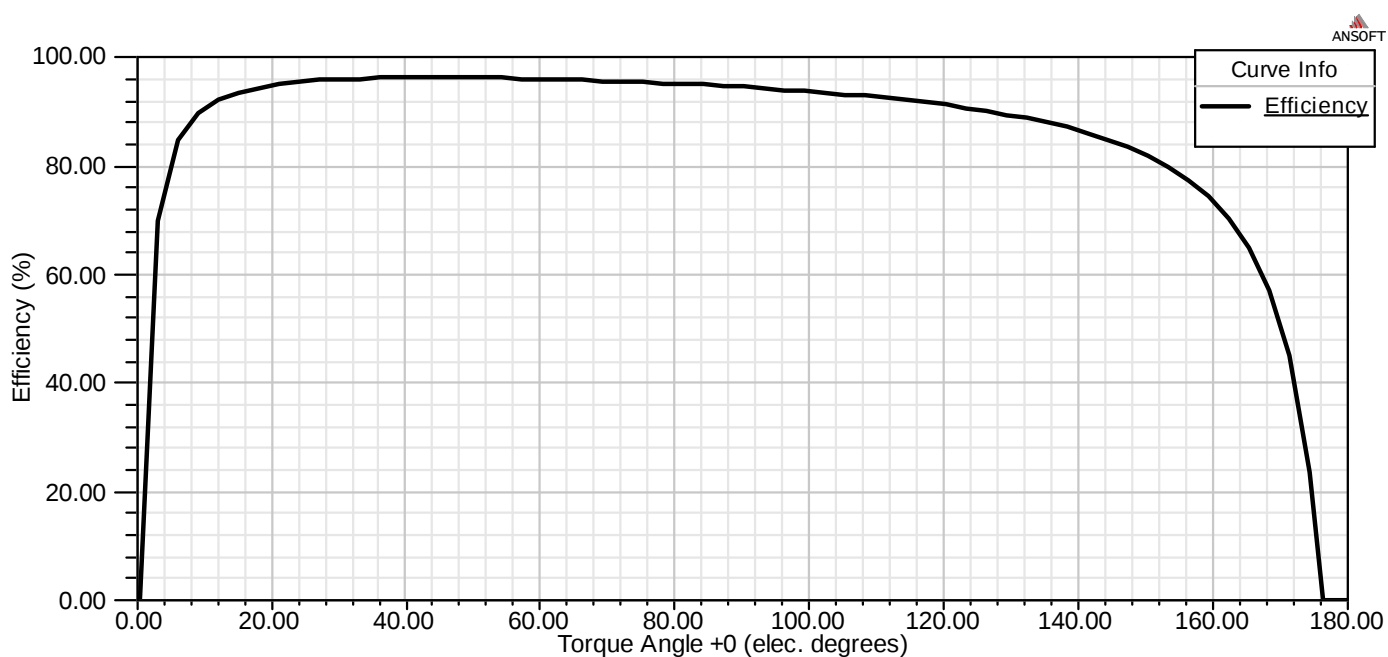
Armature Core Steel Consumption (kg):137.118

D-Axis Reactive Inductance L_d (mH):2.27083

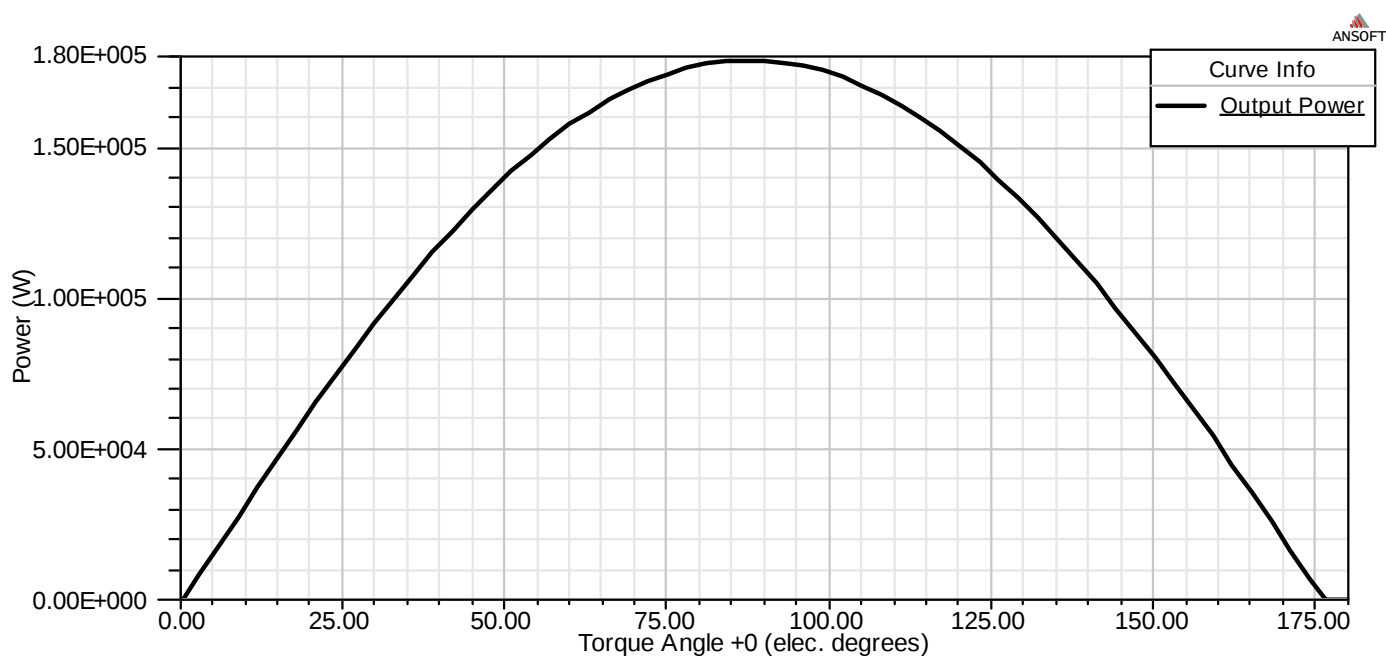
Armature Phase Resistance R_1 (mOhm):62.813



Obrázek 26: Graf závislosti vstupního proudu na úhlovém momentu motoru pro případ 5



Obrázek 27: Graf závislosti účinnosti na úhlovém momentu motoru pro případ 5



Obrázek 28: Graf závislosti výstupního výkonu na úhlovém momentu motoru pro případ 5

Porovnání parametrů synchronního motoru s p.m.

Tabulka 9: Porovnání parametrů synchronního motoru pro výkon $P=160\text{kW}$

	1	2	3	4	5
	l_n, D_n	$l + 20 \text{ mm}$	$l - 20 \text{ mm}$	$D + 10 \text{ mm}$	$D - 10 \text{ mm}$
$R_s [\text{m}\Omega]$	63,27	68,44	58,09	63,73	62,81
$B_g [\text{mT}]$	760,40	762,51	757,45	764,96	755,33
$m [\text{kg}]$	141,44	163,944	118,935	145,801	137,118
$I_s [\text{A}]$	145,31	144,59	159,33	147,65	151,64
$P_{Fe} [\text{W}]$	1340,95	1552,32	1129,39	1418,36	1267,4
$P_{Cu} [\text{W}]$	4007,39	4292,42	4424,55	4167,82	4333,04
$\Delta P [\text{W}]$	6963,53	7459,93	7169,14	7201,38	7215,64
$P_{in} [\text{W}]$	166997,00	167513,00	167170,00	167242,00	167223,00
$\eta [\%]$	95,83	95,55	95,71	95,69	95,69

l_n, D_n – základní vypočítané parametry

$l + 20 \text{ mm}$ – změna délky motoru o $+20 \text{ mm}$

$l - 20 \text{ mm}$ – změna délky motoru o -20 mm

$D + 10 \text{ mm}$ – změna průměru motoru o $+10 \text{ mm}$

$D - 10 \text{ mm}$ – změna průměru motoru o -10 mm

I_s – statorový proud

P_{Fe} – ztráty v železe

P_{Cu} – ztráty v mědi

ΔP – celkové ztráty

P_{in} – vstupní výkon

η – účinnost

R_s – statorový odpor

B_g – indukce ve vzduchové mezeře

m – hmotnost

Porovnání hodnot je provedeno pro 5 případů. V prvním případě jsou uvedeny hodnoty pro základní parametry (konstantní délka i průměr motoru). Ve druhém případě byla změněna pouze délka motoru o +20 mm při konstantním průměru. Ve třetím případě byla změněna pouze délka motoru o -20mm při konstantního průměru. Ve čtvrtém případě byl změněn pouze průměr motoru o +10mm při konstantní délce. Ve pátém případě byl změněn pouze průměr motoru o -10mm při konstantní délce.

Z tabulky 9 (sloupec 2) je patrné, že jakmile zvětšíme délku motoru (zvětší se množství použitého železa tedy i hmotnost), zvětší se odpor R a proud I poklesne. Protože platí vztah pro ztráty v mědi v jedné fázi $P_{Cu} = R \cdot I^2$ vzrostou nám i ztráty celkové. Vstupní výkon P_{in} se logicky zvětší. Účinnost motoru η se sníží cca. o 0,3%.

Z tabulky 9 (sloupec 3) je patrné, že jakmile zmenšíme délku motoru (zmenší se množství použitého železa tedy i hmotnost), sníží se odpor R a proud I vzroste. Protože platí vztah pro ztráty v mědi v jedné fázi $P_{Cu} = R \cdot I^2$ vzrostou nám i ztráty celkové (díky kvadrátu proudu). Vstupní výkon P_{in} se logicky zvětší. Účinnost motoru η se sníží cca. o 0,1%.

Z tabulky 9 (sloupec 4) je patrné, že jakmile zvětšíme průměr motoru (zvětší se množství použitého železa tedy i hmotnost), zvýší se odpor R a proud I by měl poklesnout (v našem případě ale mírně vzrostl viz. závěr). Protože platí vztah pro ztráty v mědi v jedné fázi $P_{Cu} = R \cdot I^2$ vzrostou nám i ztráty celkové (díky kvadrátu proudu). Vstupní výkon P_{in} se logicky zvětší. Účinnost motoru η se sníží cca. o 0,1%.

Z tabulky 9 (sloupec 5) je patrné, že jakmile zmenšíme průměr motoru (zmenší se množství použitého železa tedy i hmotnost), zmenší se odpor R a proud I vzroste. Protože platí vztah pro ztráty v mědi v jedné fázi $P_{Cu} = R \cdot I^2$ vzrostou nám i ztráty celkové (díky kvadrátu proudu). Vstupní výkon P_{in} se logicky zvětší. Účinnost motoru η se sníží cca. o 0,1%.

7 ZHODNOCENÍ A ZÁVĚR

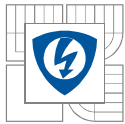
Cílem práce bylo seznámit se s programem Maxwell a RMxpert a následně navrhnout v tomto programu synchronní motor s permanentními magnety. Vstupní a výstupní parametry synchronního motoru byly vypočítány v programu Excel a ověřeny pomocí [11]. Parametry byly z Excelu převedeny do programu Maxwell (modul RMxpert), kde byl sestaven a analyzován model. Dalšími modifikacemi byly analyzovány změny výstupních parametrů synchronního motoru (změny délky motoru, průměru motoru).

Dle výpočtu mělo být dosaženo účinnosti $\eta=95\%$ a účinníku $\cos\varphi=0,95$. Tohoto výsledku bylo dosaženo. V tabulce 9 jsou porovnány vybrané výstupní parametry synchronního motoru. Účinnost změnila minimálně. Docházelo ke změně statorového proudu a změně ztrát.

Ve čtvrtém případě (změna průměru motoru o +10 mm) nám měl proud I klesnout pod nominální hodnotu $I=145,31\text{ A}$ (hodnota proudu při základních parametrech). V tomto případě ale byl proud roven $I=147,65\text{ A}$. Tato chyba mohla být způsobena zaokrouhlováním i zvolením vlastních hodnot, které požadoval RMxpert ale ve našem výpočtu nebyly vypočítány.

Pro základní parametry motoru:

Grafická závislost vstupního proudu na úhlovém momentu motoru je rostoucího charakteru (roste téměř lineárně). Z grafu závislosti účinnosti na úhlovém momentu motoru je patrné, že maximální účinnost nastává při úhlovém momentu v rozmezí $40-60^\circ$. V tomto rozmezí je účinnost $\eta=95,83\%$. Graf závislosti výstupního výkonu na úhlovém momentu motoru má tvar paraboly. Maximální výkon nastává při úhlovém zatížení v rozmezí $85-90^\circ$.



LITERATURA

- [1] SIEMENS. *Http://www.siemens.com/press/en/presspicture/?press=/en/presspicture/2011/industry/soi201104/soi201104-04.htm* [online]. [cit. 2012-05-04]. Dostupné z: <http://www.siemens.com>
- [2] Synchronní motory s permanentními magnety pro trakční pohony kolejových vozidel. *Synchronní motory s permanentními magnety pro trakční pohony kolejových vozidel* [online]. 2010, roč. 2010, č. 29, s. 9 [cit. 2012-05-04]. Dostupné z: <http://vts.cd.cz/VTS/CLANKY/vts29/2908.pdf>
- [3] BOLDEA, Ion. *Variable Speed Generators* [online]. [s.l.] : CRC Press, 2006 [cit. 2010-11-26]. Permanent Magnet , s. . Dostupné z WWW: <<http://www.crcnetbase.com/isbn/9781420037265>>. ISBN 978-1-4200-3726-5.
- [4] Motory. In: *Synchronní motor* [online]. [cit. 2012-05-04]. Dostupné z: http://www.myinfo.sk/download/SKOLA/002-Motory_TYPY_33str.pdf
- [5] MĚŘIČKA, J. , HAMATA, V., VOŽENÍLEK, P.: *Elektrické stroje*, Praha, ČVUT, 1994
- [6] GIERAS, JACEK F.; WANG, RONG-JIE; KAMPER, MAARTEN J. *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines* [online]. [s.l.] : Springer, 2008 [cit. 2010-11-26]. Dostupné z WWW: <<http://www.springerlink.com/content/978-1-4020-6993-2/#section=206083&page=2&locus=75>>. ISBN 978-1-4020-8227-6.
- [7] JAROSLAV, Novák. Uplatnění synchronních strojů v dopravní technice. In: *Http://www.odbornecasopisy.cz* [online]. 2006 [cit. 2012-05-04]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26832
- [8] Maxwell. *Http://www.svsfem.cz* [online]. [cit. 2012-05-04]. Dostupné z: <http://www.svsfem.cz/content/maxwell>
- [9] RMxprrt. *Http://www.svsfem.cz* [online]. [cit. 2012-05-04]. Dostupné z: <http://www.svsfem.cz/content/rmxprt>
- [10] PETROV, G.N. *Elektrické stroje 2 : asynchronní stroje - synchronní stroje*. 2. oprav. a dopl. vyd. Praha : Academia, 1982. 728 s. ISBN 509-21-857.
- [11] PYRHÖNEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valéria HRABOVCOVÁ. *Design of Rotating Electrical Machines* [online]. United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd, 2008, s. 531 [cit. 2012-05-21]. ISBN 978-0-470-69516-6.



PŘÍLOHY

Viz. přiložené CD