

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

VÝPOČET SYNCHRONIZOVANÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

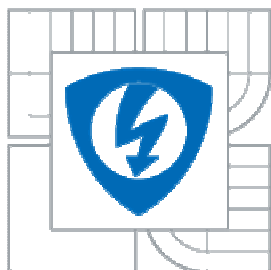
JAN BÁRTA

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLÓGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

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

VÝPOČET SYNCHRONIZOVANÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU

CALCULATION OF SYNCHRONIZED INDUCTION MACHINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

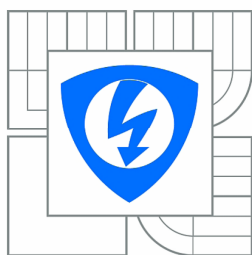
JAN BÁRTA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. ČESTMÍR ONDRŮŠEK, CSc.

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 elektroenergetika

Student: Jan Bárta

ID: 125361

Ročník: 3

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Výpočet synchronizovaného asynchronního motoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Proved'te literární rešerši.
2. Vytvořte model asynchronního motoru v programu Maxwell a jeho nadstavbě RMXpert.
3. Upravte model pro výpočet synchronizovaného asynchronního motoru. Vypočtete proudové a momentové charakteristiky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího

Termín zadání: 21.9.2011

Termín odevzdání: 31.5.2012

Vedoucí práce: doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

Konzultanti bakalářské práce:

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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Základní myšlenka této práce spočívá v prozkoumání možností zvyšování účinnosti asynchronních motorů prostřednictvím reluktančního rotoru. V první části práce je krátce pojednáno o simulačním software elektromagnetických polí Ansoft Maxwell. Dále o principech činnosti motorů s reluktančními rotory a možnostech jejich konstrukce. Další část práce je věnována tvorbě a vyhodnocení modelu výchozího asynchronního motoru, na kterém je v poslední části práce posouzen vliv reluktančního rotoru na výsledné parametry stroje.

Abstract

The basic idea of this thesis is to explore the possibility of the increasing the efficiency of induction motors via reluctance rotor. The first part briefly describes the electromagnetic fields simulation software Ansoft Maxwell. The thesis is further dealing with the principles of reluctance motors with rotors and their structures. Another chapter describes the creation and evaluation of the initial model of the induction motor. The last part of the thesis assess the influence on the resulting reluctance rotor machine parameters.

Klíčová slova

Ansoft Maxwell; Asynchronní motor; Synchronizovaný asynchronní motor; Zvyšování účinnosti asynchronních motorů

Keywords

Ansoft Maxwell; Induction motor; Synchronized induction machine; Increasing the efficiency of induction motors

Bibliografická citace

BÁRTA, J. *Výpočet synchronizovaného asynchronního motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 55 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma výpočet synchronizovaného asynchronního motoru 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

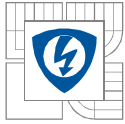
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Doc. Ing. Čestmíru Ondrůškovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych chtěl vyjádřit své poděkování společnosti Siemens - Odštěpný závod Elektromotory Frenštát pod Radhoštěm, za poskytnutí technické dokumentace simulovaného asynchronního motoru a rovněž za vstřícný přístup zaměstnanců oddělení konstrukce výše zmiňovaného závodu, kteří semnou ochotně konzultovali případné nejasnosti během mé bakalářské práce.

V Brně dne

Podpis autora

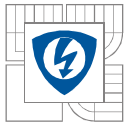


OBSAH

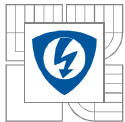
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	8
SEZNAM TABULEK	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
ÚVOD	13
1 SIMULACE A OPTIMALIZACE EL. STROJŮ	14
1.1 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ	14
1.2 ANSOFT MAXWELL	14
1.2.1 RMXprt	15
1.2.2 MAXWELL	16
1.2.3 OPTIMERICS	17
2 SYNCHRONIZOVANÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR.....	18
2.1 PRINCIP RELUKTANČNÍCH MOTORŮ	18
2.2 USTÁLENÝ STAV RELUKTANČNÍCH MOTORŮ	19
2.3 VÝPOČET ELEKTROMAGNETICKÉHO MOMENTU STROJE	20
2.3.1 MOMENT R_M V ZÁVISLOSTI NA PROUDECH $D - Q$ OS	20
2.3.2 MOMENT R_M V ZÁVISLOSTI NA NAPĚTÍ STATORU A ZÁTĚŽNÉM ÚHLU	20
2.4 ÚČINÍK R_M	21
2.5 PROVEDENÍ KONSTRUKCE.....	21
3 VÝCHOZÍ ELEKTRICKÝ STROJ.....	23
3.1 ZÁKLADNÍ PARAMETRY VÝCHOZÍHO ELEKTRICKÉHO STROJE	23
3.2 VZNIK TAŽNÉ SÍLY V ASYNCHRONNÍM MOTORU, SKLUZ.....	24
3.3 ROZDĚLENÍ ZTRÁT ASYNCHRONNÍHO MOTORU	24
3.4 ÚČINNOST A ÚČINNOSTNÍ TŘÍDY ASYNCHRONNÍHO MOTORU.....	26
3.5 VYTVOŘENÍ MODELU ASYNCHRONNÍHO MOTORU.....	27
3.5.1 VOLBA MATERIÁLU SVAZKU STATORU A ROTORU	28
3.5.2 POUŽITÁ ZJEDNODUŠENÍ A EKVIVALENTNÍ HODNOTY.....	29
3.6 CELKOVÉ VYHODNOCENÍ MODELU STROJE	31
4 NÁVRH A OPTIMALIZACE RELUKTANČNÍHO ROTORU	33
4.1 ROTOR S VYBRÁNÍM.....	33
4.1.1 METODIKA OPTIMALIZACE, NASTAVENÍ ANALÝZY A VÝCHOZÍ PARAMETRY	34
4.1.2 VLIV HLOUBKY NA VELIKOST TOČIVÉHO MOMENTU	34
4.1.3 VLIV ŠÍŘKY PÓLU NA VELIKOST TOČIVÉHO MOMENTU	35
4.1.4 VYHODNOCENÍ VÝSLEDNÉHO STROJE	36
4.2 ROTOR S LAMINACEMI	41
4.2.1 VYHODNOCENÍ VÝSLEDNÉHO STROJE	42
4.3 CELKOVÉ VYHODNOCENÍ UPRAVENÝCH STROJŮ	46
5 ZÁVĚR.....	48
LITERATURA	50
PŘÍLOHY	52

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. (1) Rozdělení statorových zubů na konečné prvky.....</i>	<i>14</i>
<i>Obr. (2) Filozofie návrhu elektrického stroje pomocí Ansoftu.....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. (3) Výsledek převodu návrhu AM do Maxwell 2D a); Maxwell 3D b)</i>	<i>15</i>
<i>Obr. (4) Ukázka pracovního prostředí Ansoft Maxwell v. 14.0 [11]</i>	<i>16</i>
<i>Obr. (5) Princip vzniku točivého magnetického pole [4] a); náčrt 2 pólového SRM [5] b)..</i>	<i>18</i>
<i>Obr. (6) Fázorový diagram RM [5]</i>	<i>19</i>
<i>Obr. (7) Náčrt rotorového plechu SAM s výřezy [1]</i>	<i>21</i>
<i>Obr. (8) Pozdější varianty provedení rotorových plechů SRM [4].....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. (9) Axiálně laminovaný rotor a); Příčně laminovaný rotor b) [4]</i>	<i>22</i>
<i>Obr. (10) Konstrukce AM s kotvou nakrátko [16]</i>	<i>23</i>
<i>Obr. (11) Rozdělení výkonů asynchronního motoru [9]</i>	<i>24</i>
<i>Obr. (12) Rozdělení ztrát výchozího stroje při jmenovitém výkonu $P_m = 37 \text{ kW}$.....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. (13) Klasifikace účinnostních tříd pro 6 pólové stroje dle IEC 60034-30 [17].....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. (14) Schématické znázornění modelování a vyhodnocení modelu asynchronního motoru .</i>	<i>27</i>
<i>Obr. (15) Schématické znázornění jednoho vodiče cívky statoru</i>	<i>29</i>
<i>Obr. (16) Stupňovitá rotorová klec [16]</i>	<i>30</i>
<i>Obr. (17) Základní tvar analyzovaného rotoru s vybráním</i>	<i>33</i>
<i>Obr. (18) Závislost momentu na hloubce vybrání.....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. (19) Závislosti momentu na relativní délce pólu při hloubce = 5mm, $I_s = 49\text{A}$.....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. (20) Srovnání a) momentové b) proudové charakteristiky původního a upraveného stroje.</i>	<i>36</i>
<i>Obr. (21) Srovnání parametrů upraveného motoru s výchozím motorem při $M = 100\text{Nm}$</i>	<i>38</i>
<i>Obr. (22) Srovnání parametrů upraveného motoru s výchozím motorem při $P_m = 37\text{kW}$.....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. (23) Rozměrový náčrt plechu laminovaného rotoru.....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. (24) Srovnání momentové a proudové charakteristiky původního a upraveného stroje</i>	<i>42</i>
<i>Obr. (25) Srovnání výstupního výkonu původního a upraveného stroje.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. (26) Srovnání parametrů upraveného motoru s výchozím motorem při $P_m = 37\text{kW}$.....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. (27) Srovnání parametrů rotoru s laminacemi a rotoru s vybráním při $P_m=37\text{kW}$</i>	<i>46</i>
<i>Obr. (A1) Závislost a) momentu b) proudu na otáčkách asynchronního motoru v pracovní oblasti</i>	<i>52</i>
<i>Obr. (A2) Závislost momentu na otáčkách asynchronního motoru</i>	<i>53</i>
<i>Obr. (A3) Závislost proudu na otáčkách asynchronního motoru</i>	<i>53</i>
<i>Obr. (A4) Závislost účinníku na výkonu asynchronního motoru</i>	<i>54</i>

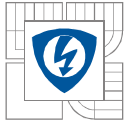


Obr. (A5) Závislost účinnosti na výkonu asynchronního motoru	54
Obr. (B1) Závislost momentu na otáčkách synchronizovaného asynchronního motoru	55
Obr. (B2) Závislost proudu na otáčkách synchronizovaného asynchronního motoru.....	55



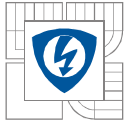
SEZNAM TABULEK

<i>Tab. (1) Jmenovité hodnoty asynchronního motoru při zapojení do D</i>	<i>23</i>
<i>Tab. (2) Tolerance technických parametrů dle ČSN EN 60 034 pro $P_m \leq 50 \text{ kW}$</i>	<i>23</i>
<i>Tab. (3) Použité parametry plechů statoru a rotoru</i>	<i>28</i>
<i>Tab. (4) Srovnání výsledných hodnot s typovou zkouškou stroje.....</i>	<i>31</i>
<i>Tab. (5) Srovnání výsledných hodnot s typovou zkouškou stroje při $M = 100 \text{ Nm}$.....</i>	<i>38</i>
<i>Tab. (6) Srovnání výsledných hodnot s typovou zkouškou stroje při $P_m = 37 \text{ kW}$.....</i>	<i>39</i>
<i>Tab. (7) Srovnání výsledných hodnot s typovou zkouškou stroje při stavu nakrátko</i>	<i>40</i>
<i>Tab. (8) Srovnání výsledných hodnot s typovou zkouškou stroje při $P_m = 37 \text{ kW}$.....</i>	<i>44</i>
<i>Tab. (9) Srovnání výsledných hodnot s typovou zkouškou stroje při stavu nakrátko</i>	<i>45</i>



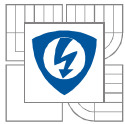
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Popis	Jednotka
2p	počet pólů	[-]
b	natočení drážek	[m]
d_{ekv}	ekvivalentní průměr	[m]
I_1	proud odebíraný strojem	[A]
I_{ds}	vektor proudu podélné osy	[A]
i_{ds}	okamžitá hodnota vektoru proudu podélné osy	[A]
I_{qs}	vektor proudu příčné osy	[A]
i_{qs}	okamžitá hodnota vektoru proudu příčné osy	[A]
I_z	záběrný proud	[A]
I_μ	magnetizační proud	[A]
L	indukčnost	[H]
L_{ds}	podélná indukčnost	[H]
L_{qs}	příčná indukčnost	[H]
m	počet fází	[-]
M	točivý moment	[Nm]
M_z	záběrný moment	[Nm]
M_{zv}	moment zvratu	[Nm]
n	otáčky	[ot/min]
N	počet závitů	[-]
n_n	jmenovité otáčky	[ot/min]
p	počet pólových dvojic	[-]
P_0	příkon naprázdno	[W]
P_1	příkon	[W]
$P_{1\delta}$	výkon elmagnet. pole ve vzduchové mezeře	[W]
P_m	mechanický výkon	[W]
R_1	odpor vinutí statoru	[Ω]
s	skluz	[-]
S	průřez	[m ²]
S_{1n}, S_{2n}	průřez vodiče statoru	[m ²]
t_p	pólová rozteč rotoru	[m]
U_1	napájecí napětí	[V]



U_{ds}	vektor napětí podélné osy	[V]
U_{qs}	vektor napětí příčné osy	[V]
U_s	napětí statoru	[V]
x	počet dílčích vodičů	[-]
X_{ds}	podélná reaktance	[Ω]
X_{qs}	příčná reaktance	[Ω]
X_{r1}, X_{r2}	rozptylové reaktance	[Ω]
$X_{r1\delta}, X_{r2\delta}$	rozptylové reaktance při natočených drážkách	[Ω]
δ	zátěžný úhel	[$^\circ$]
ΔP_{FE}	ztráty v železe	[W]
ΔP_{j1}	ztráty ve vinutí statoru	[W]
ΔP_{j2}	ztráty ve vinutí rotoru	[W]
ΔP_m	mechanické ztráty	[W]
ΔP_p	přídavné ztráty	[W]
η	účinnost	[%]
λ_m	magnetická vodivost	[H]
μ_0	permeabilita vakua	[H/m]
μ_r	poměrná permeabilita	[-]
Ψ_{ds}	spřažený magnetický tok v podélné ose d	[Wb]
Ψ_{qs}	spřažený magnetický tok v příčné ose q	[Wb]
ω	úhlová frekvence	[rad/s]

Zkratka	Popis
AM	asynchronní motor s kotvou nakrátko
RM	reluktanční motor
SAM	synchronizovaný asynchronní motor
SRM	synchronní reluktanční motor
SM	synchronní motor



ÚVOD

Zvyšování cen energií klade stále větší důraz na sledování energetické spotřeby pohonných systémů. Vždyť právě pohonné systémy se významnou měrou podílejí na odběru elektrické energie. Jednou z možností, jak dosáhnout podstatných úspor elektrické energie, je zvyšování účinností elektromotorů, které jsou tažnými koňmi průmyslu.

Evropská unie vypracovala pro snižování množství spotřebované elektrické energie příslušnou legislativu, ve které se mimo jiné zabývá účinností asynchronních motorů. Tato legislativa definuje i nové účinnostní třídy asynchronních motorů, o kterých je velice krátce pojednáno v kapitole 1.3.

Od 16. června 2011 nesmí být motory se standardní účinností IE1 dodávány na evropské trhy. Od 1. ledna 2015 musí být pro motory s výkony 7.5 až 375 kW dodržena zákonem stanovená minimální účinnost třídy IE3, alternativně IE2 u motorů napájených a řízených z měničů frekvence. [15]

Siemens - Odštěpný závod Elektromotory Frenštát pod Radhoštěm vyvinul a vyrábí elektromotory v účinnostní třídě IE3. Pro udržení konkurenceschopnosti je však třeba neustále vyráběný produkt inovovat. Není proto divu, že se frenštátský závod snaží konstrukčně zdokonalit své motory tak, aby dosáhl velmi vysoké účinnostní třídy IE4.

U klasického provedení motoru s kotvou nakrátko lze však této třídy dosáhnout velmi obtížně, pokud vůbec. Závod Frenštát tedy hledá jiné možnosti konstrukčních úprav. Jednou z variant o kterou se zajímá, je úprava rotoru stroje tak, aby oproti klasickému rotoru vytvářel ještě navíc reluktanční točivý moment. Takové motory jsou v literatuře někdy nazývány jako „synchronizované asynchronní motory“.

Tato práce si mimo stanovené cíle, dané zadáním této práce, klade také za cíl prozkoumat možnosti takovýchto úprav prostřednictvím aplikace moderního výpočetního software elektromagnetických polí „Ansoft Maxwell“, o kterém pojednává první kapitola.

Kapitola druhá této práce, představuje teoretický úvod do synchronních reluktančních motorů, z nichž vychází synchronizované asynchronní motory. Jsou zde popsány jak základní principy funkce, základní matematické vztahy, tak i naznačeny možnosti konstrukce rotorů takovýchto strojů.

Třetí kapitola se již věnuje samotnému vytvoření modelu zvoleného asynchronního motoru v Ansoft Maxwell vyráběného společností Siemens. Výsledný model je rovněž srovnán se skutečným strojem.

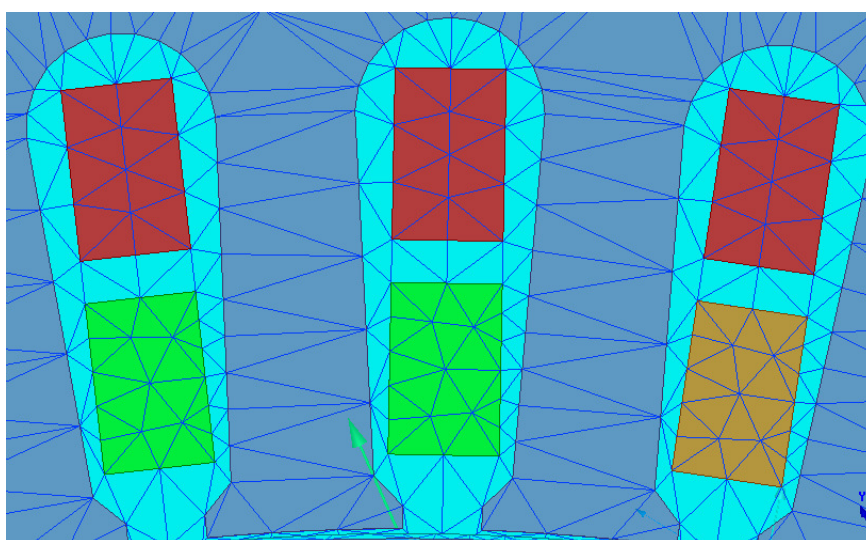
Nahrazení původního rotoru rotorem reluktančním a posouzení vlivu této úpravy na výsledné parametry stroje je náplní čtvrté kapitoly.

Na závěr této práce jsou shrnuty veškeré důležité poznatky, které tato práce přináší.

1 SIMULACE A OPTIMALIZACE EL. STROJŮ

1.1 Metoda konečných prvků

K numerickému řešení parciálních diferenciálních rovnic v inženýrské praxi se používá metoda konečných prvků. Základní myšlenka MKP je založena na diskretizaci oblasti řešení, tj. na jejím rozdělení do mnoha prvků jednoduchého tvaru, které se nazývají konečnými prvky. Prvek je určen svými vrcholy, tzv. uzly. Nejjednoduššími prvky pro rovinou úlohu je trojúhelník a čtyřúhelník, pro prostorovou úlohu pak čtyřstěn, pětistěn a šestistěn. Následující obrázek zachycuje část statoru asynchronního motoru a příklad jeho rozdělení na konečné prvky. [10]



Obr. (1) Rozdělení statorových zubů na konečné prvky

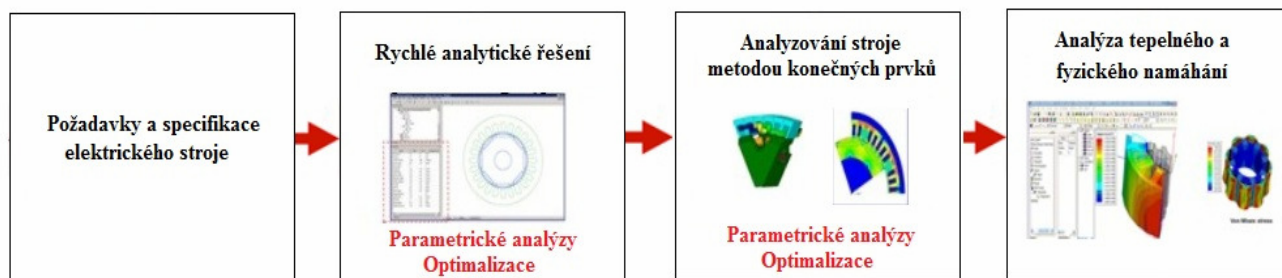
V každém takovém prvku je pak veličina, popsána parciální diferenciální rovnicí, aproximována. Pro uzlové hodnoty počítané veličiny je na základě diskretizace příslušné parciální diferenciální rovnice některou z variant MKP sestavena soustava rovnic. Vyřešením soustavy se získají hledané uzlové hodnoty. [10]

1.2 Ansoft Maxwell

ANSOFT Maxwell je přední simulační software určen pro simulaci elektromagnetických polí. Zahrnuje integrované nástroje, pomocí kterých lze provést návrh a optimalizaci celého elektrického stroje. Základní filozofii návrhu stroje v Ansoft Maxwell zachycuje obr. (2). [14]

Jednotlivé kroky této filozofie se realizují prostřednictvím následujících nástrojů integrovaných do prostředí Ansoft Maxwell: [14]

- **RMxprt:** rychlé analytické řešení stroje, základní návrh a optimalizace točivého elektrického stroje [14]
- **Maxwell:** simulace elektromagnetických polí prostřednictvím metody konečných prvků [14]
- **Optimetrics:** optimalizace stroje, parametrické analýzy [14]



Obr. (2) Filozofie návrhu elektrického stroje pomocí Ansoftu [14]

Ansoft Maxwell umožňuje mimo jiné také spolupráci s Ansoft Simplorer, který slouží k návrhu řízení elektrického stroje. Díky spolupráci těchto dvou programů lze například simulovat činnost elektrického stroje v součinnosti s řídicí výkonovou elektronikou. [14]

Spolupráce Maxwell a Simplorer tedy poskytuje efektivní a přesné metodiky pro návrh a optimalizaci elektrických strojů a souvisejících řídicích systémů. [14]

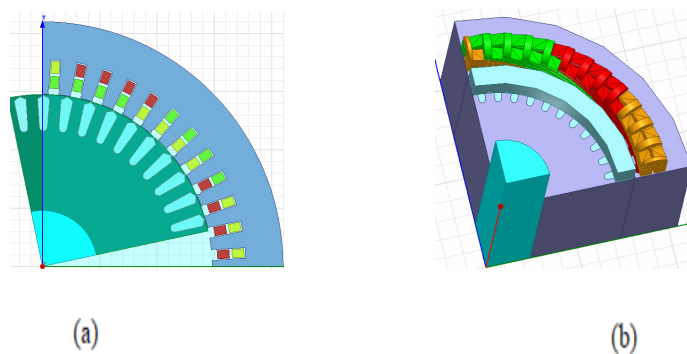
1.2.1 RMXprt

RMXprt je nástroj, který urychluje návrhový a optimalizační proces točivého elektrického stroje. Obsahuje totiž předdefinované šablony 13 typů motorů a generátorů. Prostředí umožňuje nastavit materiály, vinutí, rozměry jednotlivých aktivních částí stroje (drážky, klec, zkratovací kroužky aj.) atd. [13]

Pomocí klasické analytické teorie elektrických točivých strojů a magnetických obvodů dokáže určit například momentovou charakteristiku stroje, ztráty stroje, účinnost, indukci ve vinutí, rozptyl aj. [13]

Jakmile vytvoříme v RMXprt základní návrh požadovaného elektrického stroje, můžeme pomocí nástrojů Optimetrics (viz. kap. 1.2.3) vyhledat a vybrat optimální rozměry geometrie stroje, abychom dosáhli co nejlepších sledovaných parametrů. Takto vybrané provedení stroje lze dále analyzovat metodou konečných prvků. [13]

Převod navrženého stroje do Maxwell 3D nebo 2D včetně geometrie, materiálů, okrajových podmínek atd. umí RMXprt provést automaticky. [13]



Obr. (3) Výsledek převodu návrhu AM do Maxwell 2D a); Maxwell 3D b)

1.2.2 Maxwell

Slouží k 3D a 2D analyzování elektromagnetických a elektromechanických zařízení jako jsou motory, pohony, transformátory, senzory a cívky. [12]

Maxwell používá pro řešení metodu konečných prvků. Umožňuje automatizované řešení procesu, kde je od uživatele požadováno pouze zadání geometrie zařízení, materiálů a požadovaný výkon. [12]

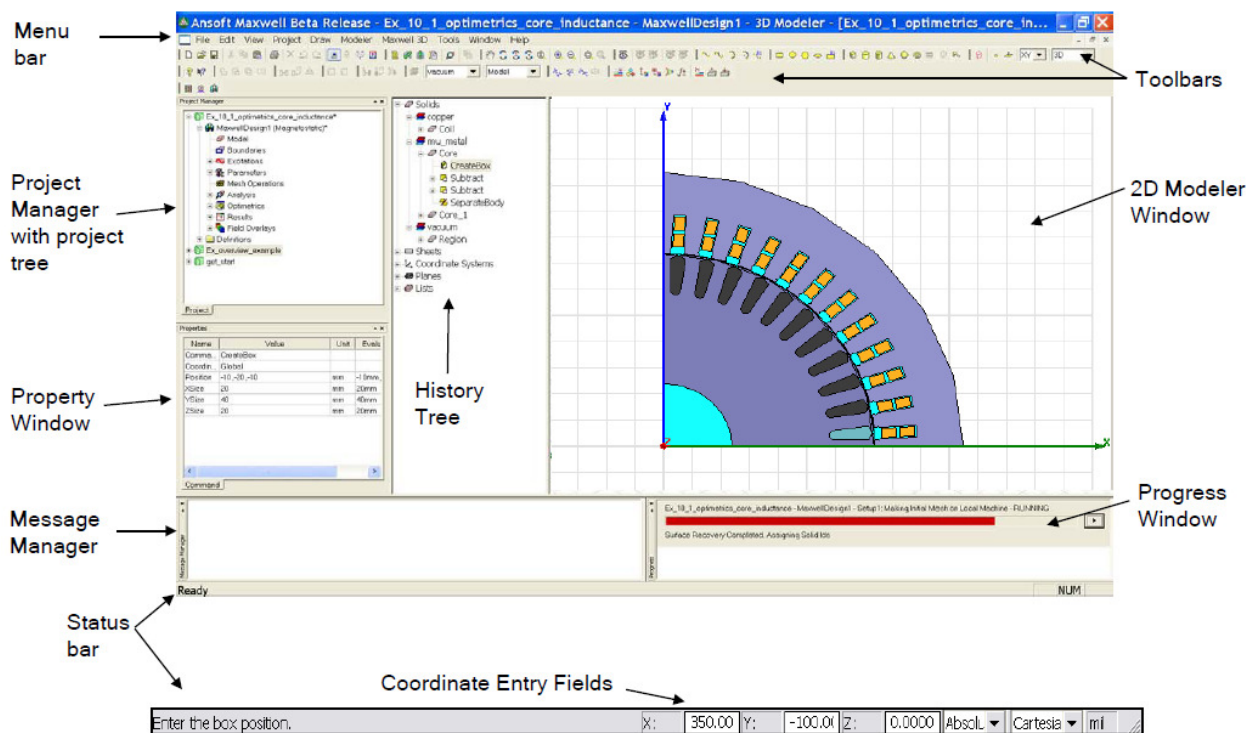
Importováním vytvořené geometrie elektrického stroje z RMXprt, Maxwell pomocí adaptivní metody tvorby sítí vytvoří na stroji síť z konečných prvků. Tento robustní algoritmus na vytváření sítí automaticky vytváří a zpřesňuje síť konečných prvků, a díky tomu software klade na uživatele méně nároků. Proces síťování využívá vysoce robustní techniky které vedou ke snížení množství použité paměti a potřebného času pro simulaci. [12]

Maxwell nám pak umožňuje 3D/2D magnetické časové, střídavé elektromagnetické, magnetostatické, elektrostatické analýzy elektrického stroje, pomocí kterých lze přesně vyřešit síly, moment stroje apod., a generovat např. stavové modely stroje. [12]

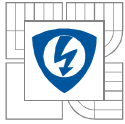
Další možnost, jak lze velice jednoduše vytvořit elektrický stroj přímo v Maxwellu, je použití knihoven tzv. primitiv. V takovém případě lze krok vytváření elektrického stroje pomocí RMXprt vynechat. Přesto má prvotní návrh elektrického stroje v RMXprt určité výhody.

V programu lze také nasimulovat rotační pohyb těles v elektromagnetickém poli (otáčení rotoru). [12]

Rovněž lze prostřednictvím Optimetrics, stejně jako u RMXprt, optimalizovat geometrii elektrického stroje tak, abychom dosáhli co nejlepších sledovaných parametrů. [12]



Obr. (4) Ukázka pracovního prostředí Ansoft Maxwell v. 14.0 [11]



1.2.2.1 Typy řešení magnetických polí v Maxwell

Magnetostatické: Slouží k výpočtům statických magnetických polí buzených DC proudy a permanentními magnety. Magnetické pole může být vypočteno i ve strukturách, které obsahují nelineární a lineární materiály. Z vypočtené energie, která je uložena v magnetickém poli, umožňuje vypočítat matici indukčností, točivý moment, sílu a spřažení magnetického toku. [11]

Vířivé proudy: Slouží k výpočtům oscilujících magnetických polí ve strukturách, které jsou buzeny střídavými proudy. Vypočítává proudové hustoty, při braní v potaz veškerých efektů vířivých proudů (včetně skin efektu). Umožňuje také výpočet impedančních matic, sil, točivého momentu, ztrát v železe. [11]

Časové: Slouží k výpočtům magnetických polí vybuzených permanentními magnety, vinutími, které jsou napájeny proudovými nebo napěťovými zdroji v závislosti na čase, pozici a rychlosti. Umožňuje simulovat rotační a translační pohyby. [11]

1.2.3 Optimetrics

Umožňuje analyzovat účinky geometrie a materiálu na výsledné parametry stroje. Optimetrics mění podle požadavků uživatele geometrii a materiály k dosažení požadovaných cílů. Tento nástroj takto pomáhá identifikovat nejlepší provedení stroje, které je nejméně citlivé na výrobní tolerance. Těchto cílů pomáhá dosahovat skrze následující nástroje: [11]

Parametrics: Pokud definujeme jednu nebo více proměnných (např. hloubka drážky), s uvedením řady hodnot na daném rozsahu. Parametrics nám umožní pro různé hodnoty této proměnné snadno prohlížet výsledky. [11]

Optimization: Je alternativou k parametrizaci. Hodí se zejména pro analýzy zahrnující mnoho proměnných. Definovaný algoritmus hledá optimální hodnoty automaticky, aniž by bylo potřeba procházet přes veškeré možné varianty. Může být založen na řešení hodnot polí R, L, C, síly, momentu, objemu, hmotnosti a dalších. [11]

Sensitivity: Určí citlivost návrhu na malé změny proměnných v okolí bodu konstrukce, tedy na výrobní tolerance. [11]

Tuning: Umožňuje měnit interaktivně hodnoty proměnných, a přitom sledovat výstupní parametry návrhu v reálném čase. Toto je užitečné pro provedení optimalizace, ve které jsou stanoveny optimální hodnoty. Navíc chceme postupným laděním daných hodnot zjistit, jak jsou výsledky návrhu ovlivňovány. [11]

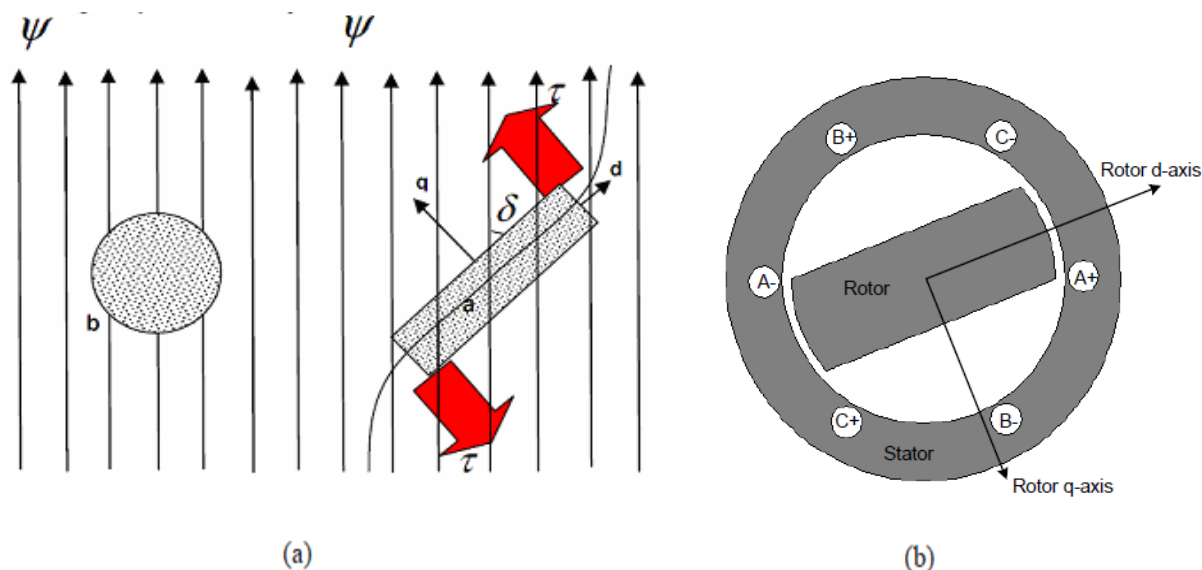
Statistical: Umožňuje zobrazení rozložení výstupních veličin, jako je síla, kroutící moment nebo ztráty způsobené statistickými odchylkami vstupních proměnných. [11]

2 SYNCHRONIZOVANÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR

2.1 Princip reluktančních motorů

Odpor, který klade prostředí průchodu magnetického toku, je znám pod pojmem magnetická reluktance. Reluktanční motor je založen na snaze rotoru svým otáčením v magnetickém poli statoru minimalizovat tento magnetický odpor. Podobný jev lze také pozorovat na snaze cívky, kterou protéká stejnosměrný proud, vtahovat do sebe magnetické jádro. [3]

Tento jev názorně zachycuje obr.(5a). Destička, označena písmenem „a“, je z magneticky vodivého materiálu. V podélné ose „d“ má menší magnetickou reluktanci, než je tomu v příčné ose „q“. Magnetické pole tedy vytvoří točivý moment, který se bude snažit natočit destičku tak, aby příčná osa „d“ svírala s magnetickými siločarami nulový úhel. Na kolečko „b“, které má ve všech směrech stejnou magnetickou reluktanci, žádný točivý moment působit nebude. [4]



Obr. (5) *Princip vzniku točivého magnetického pole [4] a); náčrt 2 pólového SRM [5] b)*

Na obr.(5b) je zachycen 2 pólový synchronní reluktanční motor. Stator stroje je tvořen 3-fázovým vinutím, které je od sebe navzájem prostorově pootočeno o 120° elektrických. Cívky statoru jsou napájeny soustavou 3-fázového napětí. Takto zajistíme ve stroji neustálou rotaci magnetického pole. Rotor se nám tedy bude neustále otáčet, a to tak, aby se jeho podélná osa vždy vyrovnala s osou siločar, vytvářených točivým magnetickým polem. V principu se tedy jedná o synchronní motor s vyniklými póly s tím rozdílem, že nemá budící vinutí.

Před vývojem dnešních frekvenčních měničů byly synchronní reluktanční motory napájeny z pevné sítě o stálé frekvenci. Bylo tedy třeba, aby rotor tohoto stroje obsahoval klec nakrátko, která vytvoří moment potřebný pro rozběh stroje. V opačném případě by rotor nezrychlil a nesynchronizoval se. Takovéto motory bývají také nazývány synchronizované asynchronní motory. [5]

2.2 Ustálený stav reluktančních motorů

Souměrná soustava třífázového napětí, kterou se napájí RM, vytváří rotující vektor v rovině $d - q$ o stálé velikosti. Když se bude rotor otáčet stejnou rychlostí jako rotující vektory napětí vytvářené statorem stroje, pak vektor napětí statoru bude vzhledem k rotoru stálý. V tomto případě lze popsat vztah mezi vektorem napětí statoru a vektory napětí příčné a podélné osy.

$$U_{qs} = U_s \cdot \cos \delta \quad (2-1)$$

$$U_{ds} = -U_s \cdot \sin \delta$$

Pro proudy v oblasti ustáleného napětí platí

$$I_{ds} = \frac{\omega L_{qs} U_{qs} + R_1 U_{ds}}{R_1^2 + \omega_e^2 L_{ds} L_{qs}} \quad (2-2)$$

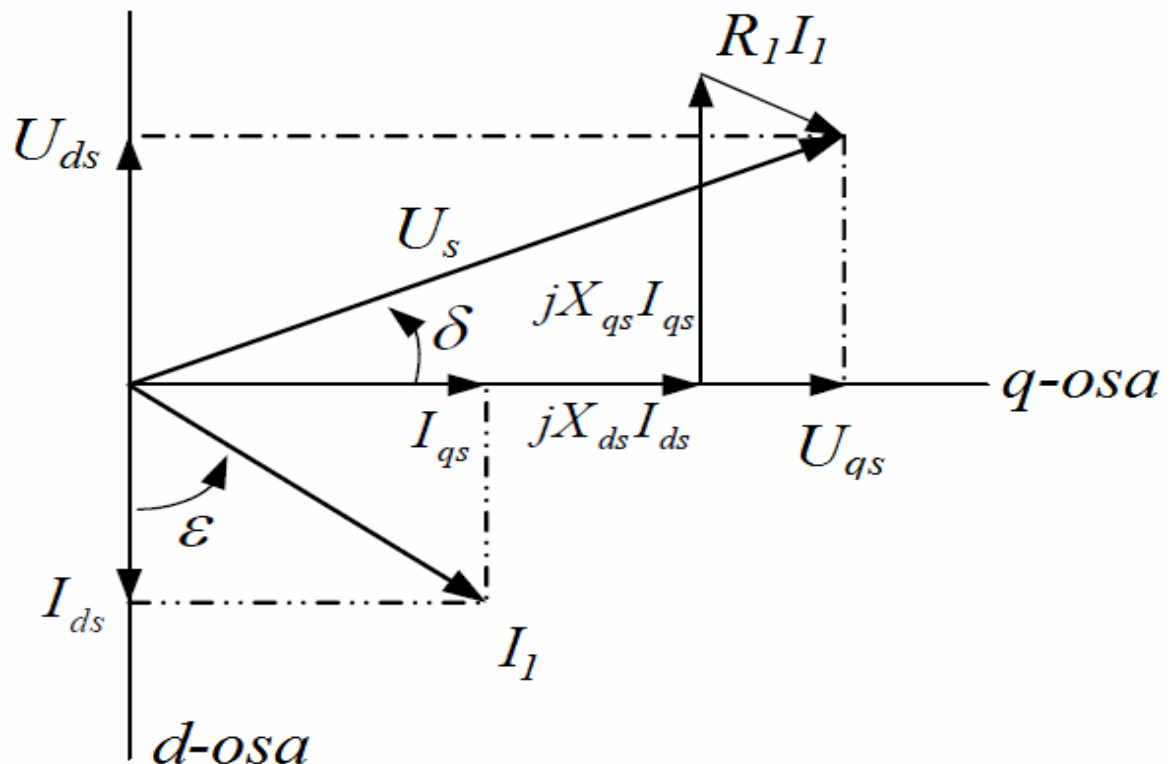
$$I_{qs} = \frac{-\omega L_{ds} U_{ds} + R_1 U_{qs}}{R_1^2 + \omega_e^2 L_{ds} L_{qs}}$$

V případě zanedbání odporu statoru rovnice přechází do stavu

$$I_{ds} = \frac{U_{qs}}{\omega L_{ds}} \quad (2-3)$$

$$I_{qs} = \frac{-U_{ds}}{\omega L_{qs}}$$

Kapitola čerpána z [5]



Obr. (6) Fázorový diagram RM [5]

2.3 Výpočet elektromagnetického momentu stroje

2.3.1 Moment RM v závislosti na proudech d – q os

S použitím teorie příčných a podélných os lze točivý moment RM vyjádřit následovně

$$M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\Psi_{ds} \cdot i_{qs} - \Psi_{qs} \cdot i_{ds}) \quad (2-4)$$

Pro případ, kdy je rotor v ustáleném stavu (viz. 2.2), platí

$$\Psi_{ds} = L_{ds} \cdot i_{ds} \quad (2-5)$$

$$\Psi_{qs} = L_{dq} \cdot i_{qs} \quad (2-6)$$

Pro SRM platí, že $L_{dq} \neq L_{qs}$. Pak po dosazení rovnic (2-6) a (2-5) do (2-4) získáváme

$$M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (L_{ds} - L_{qs}) \cdot i_{ds} \cdot i_{qs} \quad (2-7)$$

Vztahy čerpány z [7]

Ze vzorce č. (2-7) plyne, že největších hodnot výkonu stroje, a tím i jeho točivého momentu dosáhneme v případě, kdy bude podélná indukčnost o hodně větší než příčná. Proto je důležité při návrhu dosáhnout co nejlepšího poměru L_d/L_q s ohledem na zachování dobrých parametrů stroje. [1]

2.3.2 Moment RM v závislosti na napětí statoru a zátěžném úhlu

Dosazením do rovnice (2-7) za proudy i_{ds} a i_{qs} z rovnice (2-2) dostáváme tvar

$$M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (L_{ds} - L_{qs}) \frac{-\omega L_{ds} R_1 U_{ds}^2 + \omega L_{qs} R_1 U_{qs}^2 + (R_1^2 - \omega L_{ds} L_{qs}) U_{ds} U_{qs}}{(R_1^2 + \omega L_{ds} L_{qs})} \quad (2-8)$$

Po přijetí zjednodušujícího předpokladu, $R_1 = 0$ přechází rovnice (2-8) do tvaru

$$M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \frac{(L_{ds} - L_{qs}) U_{ds} \cdot U_{qs}}{L_{ds} L_{qs} \omega^2} \quad (2-9)$$

Po dosazení za napětí z rovnic (2-1) dostáváme výsledný vztah

$$M = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \frac{(L_{ds} - L_{qs})}{L_{ds} L_{qs}} \left(\frac{U_s}{\omega_e} \right)^2 \frac{\sin 2\delta}{2} \quad (2-10)$$

Z této rovnice plyne, že moment je dán čtvercem napětí statoru a dvojnásobným úhlem δ . Pokud bychom stroj napájeli ze zdroje konstantního napětí a kmitočtu, tak maxima momentu dosáhneme pro zátěžný úhel $\delta = 45^\circ$ elektrických.

Kapitola čerpána z [5]

2.4 Účinitk RM

Účinitk RM může být vyjádřen jako poměr průmětu vektorů napětí na vektor proudu dělený amplitudou vektoru napětí. [8]

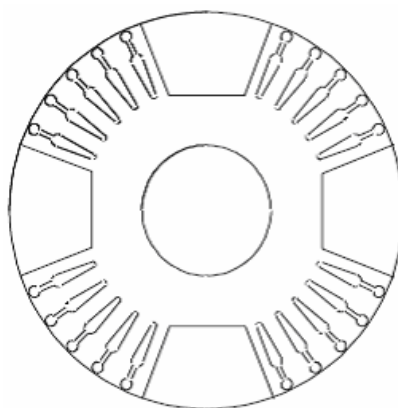
$$\cos \phi = \frac{U_{qs} \cdot \sin \varepsilon + U_{ds} \cdot \cos \varepsilon}{\sqrt{U_{qs}^2 + U_{ds}^2}} \quad (2-11)$$

Vztah čerpán z [8]

Obr. (6) znázorňuje fázorový diagram synchronního reluktančního stroje. Jak z diagramu vyplývá, tak při zvýšení příčné synchronní reaktance se zvýší také zátěžný úhel δ . Na druhou stranu, pokud bychom zvýšili podélnou reaktanci, budeme potřebovat menší proud pro zmagnetizování podélného směru, a tím také získáme lepší účinitk. [1]

2.5 Provedení konstrukce

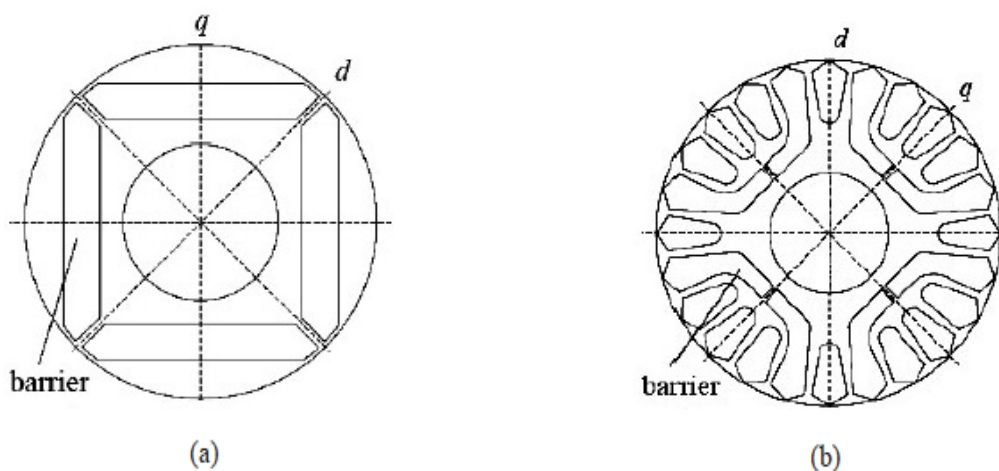
Na následujícím snímku jsou zachyceny rotorové plechy nejstarších reluktančních strojů. Stejně jako u asynchronního stroje jsou v rotorových drážkách vloženy vodivé tyče, které jsou na čelech rotoru zakončeny zkratovacími kroužky. Oproti kleci nakrátko, která se používá u asynchronních motorů, jsou v tomto rotoru navíc vybrání, která vytvářejí magnetickou reluktanci. Motory s tímto provedením rotoru díky velké vzduchové mezeře dosahovaly špatných parametrů výkonu a účinnosti. Typická hodnota indukčního poměru L_d/L_q takového provedení se pohybuje od 2 do 3. [1]



Obr. (7) Nákres rotorového plechu SAM s výřezy [1]

Snahou v dalším vývoji synchronních reluktančních motorů bylo co nejvíce zvýšit poměr L_d/L_q , čehož nelze u klasické geometrie s vyniklými póly dosáhnout. Toto je způsobeno tím, že pokud v příčné ose „q“ rozšířujeme vzduchovou mezeru s cílem snížit příčnou indukci L_q , tak také zároveň zmenšíme magneticky vodivý prostor v podélné ose „d“, a tím i podélnou indukčnost L_d . Proto byly pro lepší parametry stroje vyvinuty rotory s jiným provedením. [6]

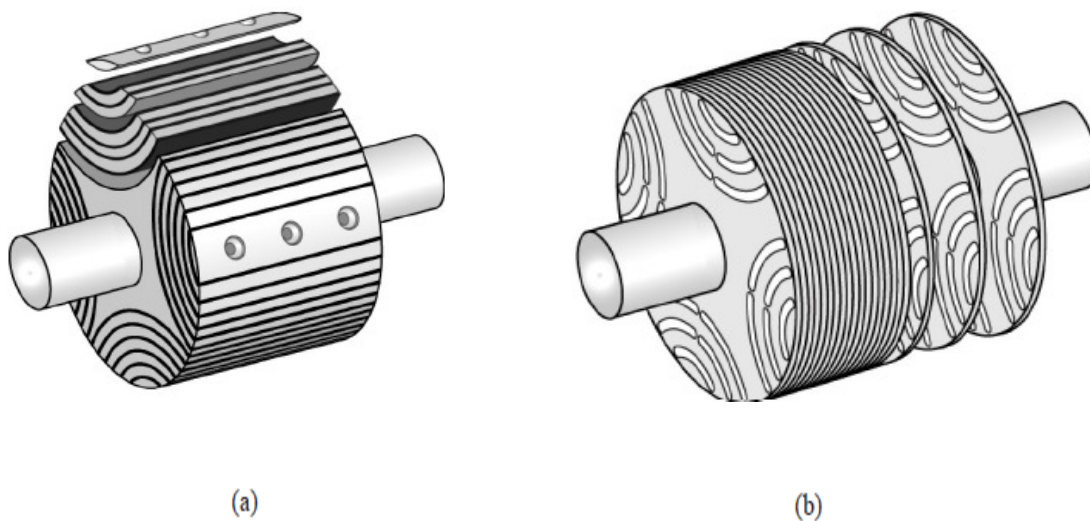
Provedení na obr.(8a) je odvozeno od provedení SM s permanentními magnety, kde jsou magnety odstraněny. Takto uvnitř rotoru vznikne vzduchová mezeře, která vytváří točivý moment. Podobně je tomu u provedení obr.(8b), kde jsou do klasického rotoru s klecí nakrátko vytvořeny vzduchové mezery. [4] Tyto úpravy však nevedly ke zlepšení parametrů stroje. [6]



Obr. (8) Pozdější varianty provedení rotorových plechů SRM [4]

Jednou z dalších možností je použití rotorových plechů s laminací obr. (7). Tyto rotorové plechy obsahují vzduchové mezery, které vytváří díky své magnetické reluktanci bariéru magnetickému toku. Tok se tedy uzavírá pouze osami laminace. Aplikace takovéto struktury rotorového plechu umožňuje při vhodné konstrukci (správné umístění, tvar a počet bariér v rotoru) dosažení poměru až $L_d/L_q = 10$. [1]

V dnešní době existují dvě odlišná provedení tohoto rotoru, a to s příčně laminovanou geometrií rotoru a axiálně laminovanou geometrií rotoru.



Obr. (9) Axiálně laminovaný rotor a); Příčně laminovaný rotor b) [4]

3 VÝCHOZÍ ELEKTRICKÝ STROJ

3.1 Základní parametry výchozího elektrického stroje

V této práci bude asynchronní motor s kotvou nakrátko, vyráběný společností Siemens elektromotory s.r.o., převeden na synchronizovaný asynchronní motor. Jak je zmíněno v úvodu, účelem této úpravy je posouzení vlivu reluktančního rotoru, obsahující původní kotvu nakrátko, na výsledné parametry elektrického stroje. Základní parametry výchozího stroje jsou přehledně uvedeny v tab. (1)

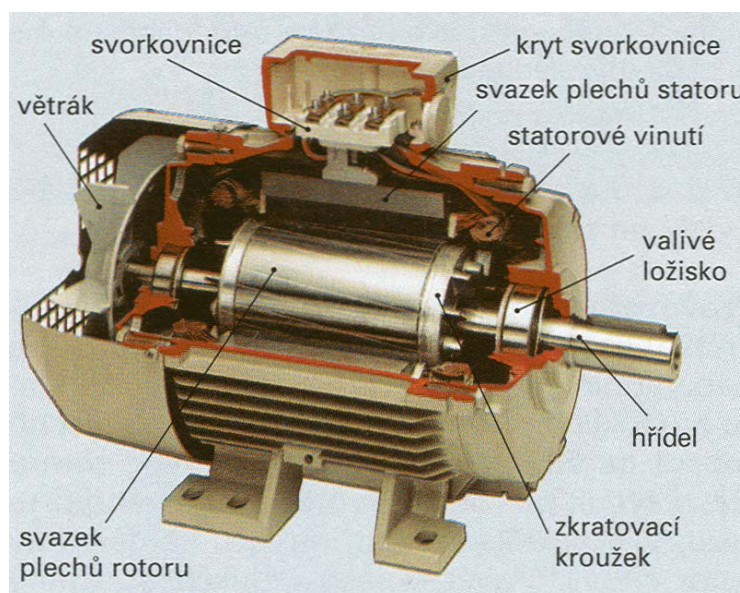
2p	P ₁	P _m	U ₁	I ₁	n _n	η	cosφ	s
[-]	[W]	[W]	[V]	[A]	[ot/min]	[%]	[-]	[-]
6	39 704	37 000	400	68,2	984,6	93,19	0,84	1,53

Tab. (1) Jmenovité hodnoty asynchronního motoru při zapojení do D

η	cosφ	s	I _z	M _z	M _{zv}
-0,15 (1-η)	$-\frac{1 - \cos \varphi}{6}$	±20%	+20%	-15% až +25%	-10%

Tab. (2) Tolerance technických parametrů dle ČSN EN 60 034 pro P_m ≤ 50 kW

Asynchronní motor vyniká svou jednoduchou konstrukcí, nízkou pořizovací cenou, vysokou spolehlivostí a velkým rozsahem vyráběných výkonů, díky čemuž se stal nejpoužívanějším elektrickým motorem na světě. [2]



Obr. (10) Konstrukce AM s kotvou nakrátko [16]

3.2 Vznik tažné síly v asynchronním motoru, skluz

Rotor asynchronního motoru je tvořen tyčemi, které jsou na obou koncích rotorového paketu spojeny kruhy nakrátko. Díky točivému magnetickému poli, které je vytvářeno vinutím statoru, se v těchto tyčích indukuje napětí, které tyčemi protlačuje proud. Takto vzniklý proud v rotorových tyčích vybudí magnetické pole rotoru, které společně s polem statoru vytvoří točivý moment. [2]

Kdyby se rotor roztočil až na synchronní otáčky, neprotínaly by jej indukční čáry, tudíž by se v něm neindukovalo napětí a točivý moment by byl nulový. Ve skutečnosti tohoto stavu nelze dosáhnout, neboť motor vždy musí vytvořit točivý moment, díky kterému překoná tření ložisek a tření rotoru o vzduch. Rotor se tedy bude vždy zpožďovat za otáčkami magnetického pole o tzv. skluz. [2]

3.3 Rozdělení ztrát asynchronního motoru

Asynchronní motor po připojení k síti odebírá ze sítě příkon

$$P_1 = m \cdot U_1 I_1 \cos \varphi \quad (3-1)$$

Část příkonu se maří ve statoru na krytí ztrát ve vinutí statoru, ztrát v železe a přidavné ztráty statoru.

Pro elektrické ztráty ve statorovém vinutí platí

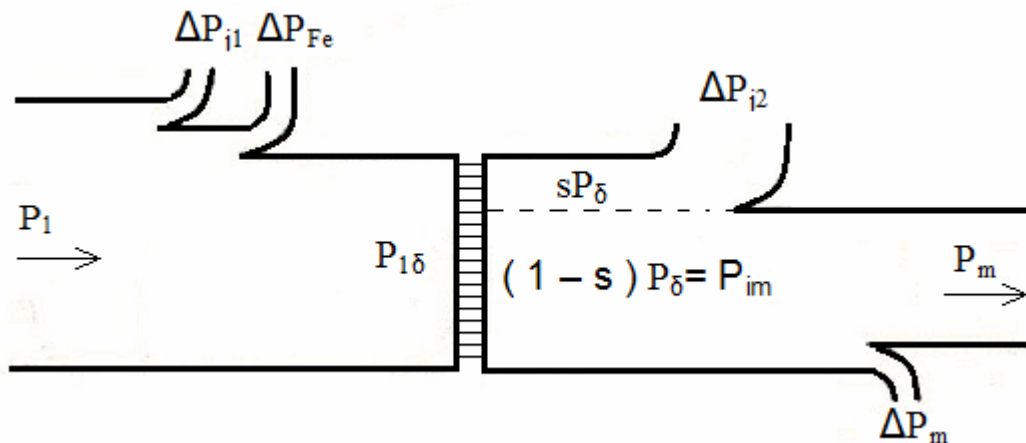
$$\Delta P_{j1} = m \cdot R_1 I_1^2 \quad (3-2)$$

Ze zkoušky naprázdno lze vypočítat ztráty v železe následovně

$$\Delta P_{Fe} = P_0 - (\Delta P_m + \Delta P_{j1}) \quad (3-3)$$

Zbytek příkonu po odečtení výše zmíněných ztrát představuje výkon elektromagnetického pole ve vzduchové mezeře

$$P_{1\delta} = P_1 - \Delta P_{j1} - \Delta P_{Fe} - \Delta P_p \quad (3-3)$$



Obr. (11) Rozdělení výkonů asynchronního motoru [9]

Část výkonu elektromagnetické pole ve vzduchové mezeře je využita na krytí ztrát v rotorovém vinutí a mechanických ztrát.

Pro ztráty v rotorovém vinutí, které jsou také označovány jako ztráty skluzové, platí:

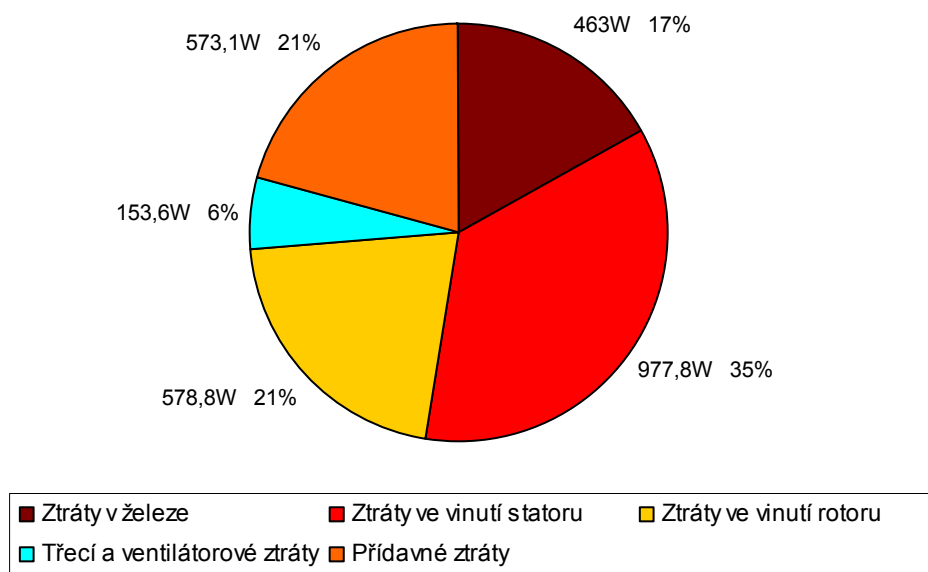
$$\Delta P_{j_2} = sP_{\delta} \quad (3-4)$$

Ztráty mechanické zahrnují ztráty třením v ložiscích, tření rotoru o vzduch a ventilační ztráty. Většina výkonu elektromagnetického pole je však využita jako výstupní mechanický výkon na hřídeli, pro který platí:

$$P_m = P_{\delta} - sP_{\delta} - \Delta P_m \quad (3-5)$$

Rozdělení výkonových ztrát výchozího asynchronního motoru je dáno následujícím grafem.

Vztahy (3-1) až (3-5) čerpány z [2]



Obr. (12) Rozdělení ztrát výchozího stroje při jmenovitém výkonu $P_m = 37 \text{ kW}$

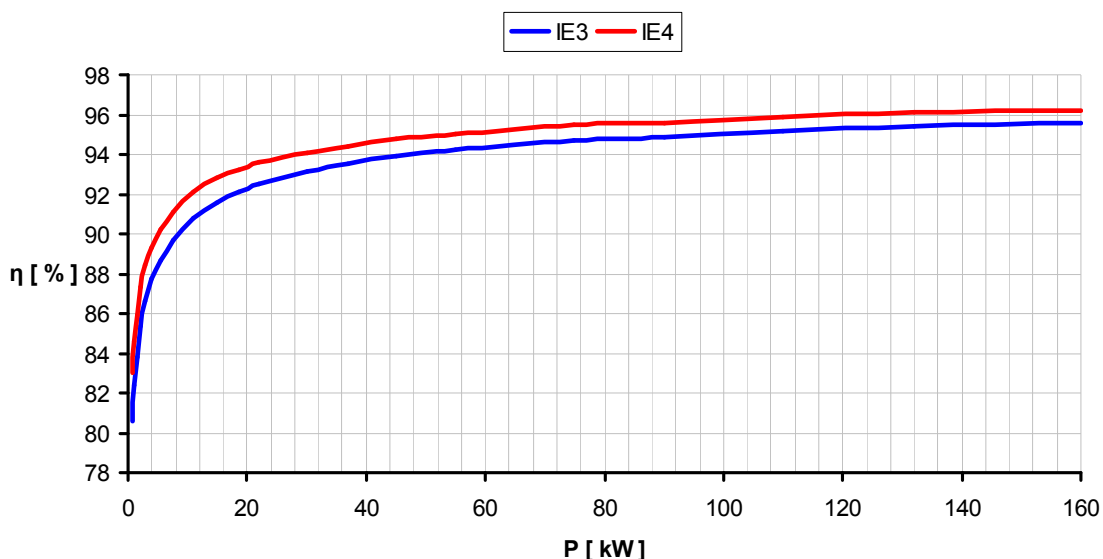
3.4 Účinnost a účinnostní třídy asynchronního motoru

Účinnost elektrického stroje je dána jako podíl výstupního výkonu a příkonu stroje, platí:

$$\eta = \frac{P_m}{P_1} \cdot 100 \quad (3-6)$$

Třídy účinnosti s označením IE stanovuje pro asynchronní motory norma ČSN EN 60034 – 30 následovně:

- IE1 standardní účinnost
- IE2 zvýšená účinnost
- IE3 vysoká účinnost
- IE4 velmi vysoká účinnost [15]



Obr. (13) Klasifikace účinnostních tříd pro 6 pólové stroje dle IEC 60034-30 [17]

Účinnostní třída IE4 může být definována, dle normy IEC 60034-30(2008-04-30), jako snížení ztrát o 15% relativně k IE3. [17]

$$P_{ZTRATY_IE4} = (1 - 0,15) \cdot P_{ZTRATY_IE3} \quad (3-7)$$

$$\eta_{IE4} = \frac{P}{P + P_{ZTRATY_IE4}} \cdot 100 \quad (3-8)$$

Vztahy čerpány z [17]

Svou účinností výchozí elektrický stroj spadá do účinnostní třídy IE3. Jak plyne z obr. (12) největší podíl ztrát připadá na ztráty ve vinutí statoru, které tvoří 35% z celkových ztrát stroje. Významně jsou také zastoupeny přídatné ztráty a ztráty ve vinutí rotoru.

Pro dosažení třídy účinnosti IE4 by musela v souladu s normou IEC 60034-30(2008-04-30) účinnost asynchronního motoru být alespoň 94.4%

3.5 Vytvoření modelu asynchronního motoru

Pro vytvoření modelu asynchronního motoru s klecí nakrátko bude použit simulační software Ansoft Maxwell v 14.0.1, o kterém bylo stručně pojednáno v kapitole 1.3.2.

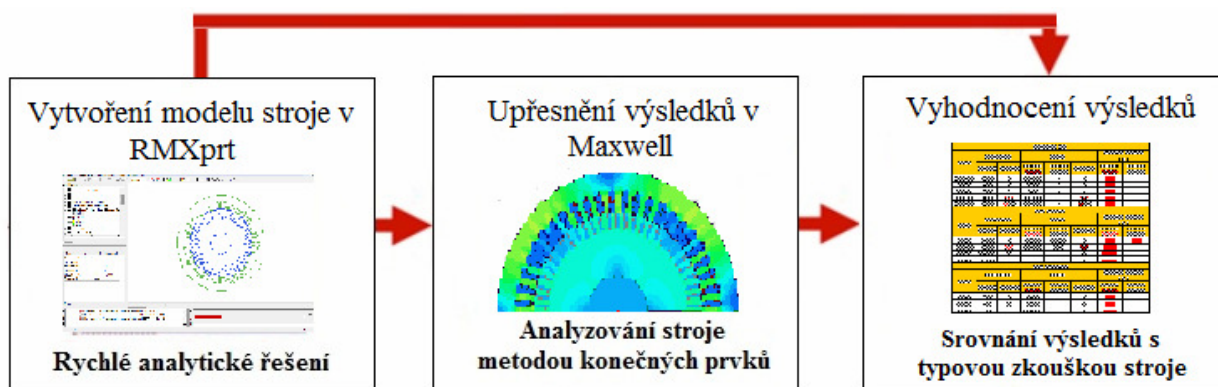
Při tvorbě modelu elektrického stroje v Ansoft Maxwell byl aplikován postup, který schématicky zachycuje obr. (14). Tento postup metodicky vychází z filozofie uvedené na obr. (2).

Výchozím bodem je RMXprt, protože umožňuje velice snadno a poměrně rychle, vyplněním příslušných formulářových oken, vytvořit model elektrického stroje, který lze dále analyzovat metodou konečných prvků.

V RMXprt byla vyplněna příslušná formulářová okna v souladu s výrobní dokumentací stroje. Protože se nejedná svou konstrukcí zcela o typický stroj, pro který je RMXprt určen, je v některých případech nutno zvolit nebo dopočítat ekvivalentní hodnoty tak, aby model odpovídal co nejvíce skutečnosti. Veškeré takto zvolené hodnoty a způsob jejich volby popisuje kapitola 3.5.2.

Takto vytvořený model motoru v RMXprt byl analyzován pomocí klasické analytické teorie elektrických točivých strojů. Výsledné hodnoty jsou porovnány v kapitole 3.6 s hodnotami typové zkoušky stroje. Vybrané výsledné průběhy a jejich srovnání s průběhy typové zkoušky jsou uvedeny v příloze – část A.

Přesto, že pro modelovaný stroj by bylo správné použít 3D model (Maxwell 3D). Z RMXprt byl vygenerován 2D model stroje do Maxwell 2D, který umožňuje analyzovat stroj metodou konečných prvků. 2D model byl zvolen z důvodu výrazného snížení výpočetního času analyzování a pozdější optimalizace modelu. Výsledné hodnoty z Maxwell 2D jsou opět srovnány s hodnotami typové zkoušky v kapitole 3.6



Obr. (14) Schématické znázornění modelování a vyhodnocení modelu asynchronního motoru

3.5.1 Volba materiálu svazku statoru a rotoru

Pro statorový a rotorový svazek byly použity plechy o parametrech které jsou přehledně sepsány v tab. (3)

B	H	P	P	P	P
[T]	50 Hz	50Hz	100Hz	200Hz	400Hz
[T]	[A/m]	[W/kg]	[W/kg]	[W/kg]	[W/kg]
0.1	56.1	0.04	0.14	0.23	0.56
0.2	74.1	0.14	0.42	0.82	2.07
0.3	85.8	0.3	0.81	1.7	4.29
0.4	95.6	0.48	1.24	2.8	7.09
0.5	105	0.69	1.58	4.09	10.5
0.6	114	0.92	2.14	5.56	14.6
0.7	123	1.17	2.83	7.2	19.5
0.8	133	1.44	3.49	9.09	25.5
0.9	145	1.74	4.28	11.3	32.6
1	158	2.07	5.52	13.8	40.8
1.1	174	2.43	6.46	16.7	50.4
1.2	200	2.84	7.38	20	61.5
1.3	243	3.3	8.73	23.8	74.1
1.4	333	3.84	10.2	28.2	89.1
1.5	573	4.46	12	32.8	105
1.6	1345	5.16			
1.7	3367	5.81			
1.8	6964	6.3			

Tab. (3) Použité parametry plechů statoru a rotoru

Uváděné parametry tab. (3) vycházejí z katalogového listu pro plech, který byl doporučen pro model výrobcem stroje. Jedná se tedy o typické hodnoty daného typu plechu.

Plech použity ve skutečném stroji se mohou svými parametry od uvedených lišit. Je to způsobeno tím, že plechy mají svou výrobní toleranci.

Ztráty v železe skutečného stroje závisí také na kvalitě vyražení plechů (otřepy), kvalitě paketování.

Na základě těchto předpokladů se tedy mohou výsledné vypočtené hodnoty pro model asynchronního motoru lišit od hodnot udávaných typovou zkouškou skutečného stroje.

3.5.2 Použitá zjednodušení a ekvivalentní hodnoty

3.5.2.1 Statorové vinutí

Jednotlivé cívky vinutí statoru nemají stejný počet závitů. RMXprt umí pracovat pouze se statorovým vinutím, kde je počet závitů každé cívky stejný. Proto byl počet závitů zadán hodnotou, která odpovídá převažujícímu počtu závitů cívek statoru.

Takto zjednodušené vinutí má za následek částečné znehodnocení analyticky vypočtených charakteristik a parametrů stroje v RMXprt. Toto je jeden z hlavních důvodů, proč musí být model na svou správnost ověřen ještě metodou konečných prvků, kde bude již respektováno skutečné rozložení cívek statoru.

3.5.2.2 Průměr vodiče statorového vinutí

Jeden vodič cívky statoru se skládá z několika dílčích vodičů rozdílných průřezů, tato skutečnost je schématicky naznačena na obr. (15).



Obr. (15) Schématické znázornění jednoho vodiče cívky statoru

Protože v RMXprt lze zadat pouze vodič, který se skládá z dílčích vodičů stejného průřezu, je třeba vypočítat ekvivalentní průměr. Tento byl vypočten dle vztahu (3-9).

$$d_{ekv} = \sqrt{\frac{4 \cdot \left(\frac{\sum_{n=1}^n S_{1n} + \sum_{n=1}^n S_{2n}}{x} \right)}{\pi}} \quad (3-9)$$

Díky takto ekvivalentně stanovenému průřezu nedosáhneme skutečného odporu a reaktance vinutí. Tento parametr nám tedy částečně ovlivní výsledné průběhy.

3.5.2.3 Zešíkmení drážek

Zešíkmení tyčí se provádí za účelem potlačení vlivu vyšších harmonických složek a zlepšení vibračních a hlukových vlastností motoru. Tímto se ovšem snižuje také indukované napětí. Snižování indukovaného napětí se zohledňuje zvětšením rozptylových reaktancí statorového i rotorového vinutí. Proto se do vztahů pro rozptylové reaktance zavádí činitel σ . [18]

Pro rozptylové reaktance při natočených drážkách platí

$$X_{r1\delta} = X_{r1} \cdot \delta \quad (3-9)$$

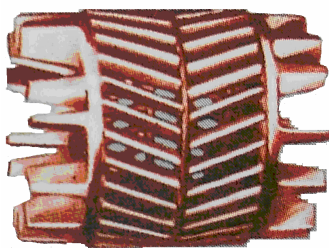
$$X_{r2\delta} = X_{r2} \cdot \delta \quad (3-10)$$

Přibližná hodnota činitele σ se dá určit ze vztahu

$$\delta = 1 + 0,41 \cdot \left(\frac{b}{t_p} \right)^2 \cdot \frac{U_1}{X_{r1} \cdot I_{\mu}} \quad (3-11)$$

Vztahy (3-9) až (3-11) čerpány z [18]

Rotor stroje obsahuje netradiční šípovité zešíkmení tyčí, které je naznačeno na obr. (16). Takto zešíkmené tyče nelze do RMXprt zadat. RMXprt umí pracovat pouze s klasicky zešíkmenými tyčemi po celé délce jedním směrem. Je tedy třeba nalézt ekvivalentní náhradu.



Obr. (16) Štupňovitá rotorová klec [16]

Poznámka: na obrázku není vyobrazeno skutečné provedení rotorové klece výchozího stroje

Jak plyne ze vztahu (3-11) činitel σ závisí na rozptylové reaktanci, magnetizačním proudu, napájecím napětí, pólové rozteči rotoru a na natočení drážky mezi kruhy. Z těchto jmenovaných veličin lze ovlivnit pouze natočení drážky mezi kruhy. Na základě této úvahy je jako parametr „skew“ v RMXprt zadáno natočení fiktivní drážky která by spojovala příslušnou tyč na obou kruzích přímo, tedy bez zalomení.

Maxwell 2D zohledňuje zešíkmení tyčí úpravou velikosti reaktance rotorové klece. Reaktance rotorového vinutí je počítaná z tvaru rotorové tyče, a to tak, jako by byla přímá, tedy nezešíkmená. Změna velikosti reaktance zešíkmené tyče oproti tyči přímé je zohledněna velikostí reaktance kruhu nakrátko mezi dvěma sousedními tyčemi.

Tyče v místě sbíhání do vrcholu V nejsou zalomeny rovnou, ale je mezi nimi rovná plocha spoje. O tuto rovnou plochu spoje, dvou proti sobě zešíkmených tyčí, byla snížena délka rotoru, aby byla neaktivní plocha rotoru zanedbána. To bude mít za důsledek snížení vypočtených ztrát v železe oproti skutečnosti.

3.6 Celkové vyhodnocení modelu stroje

Výsledný vytvořený model stroje má parametry, které jsou srovnány s parametry skutečného stroje v následující tabulce.

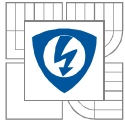
Nominální stav					
Popis	Typová zkouška	Model		Relativní odchylka [%]	
		Hodnota RMXprt	Hodnota Maxwell	Hodnota RMXprt	Hodnota Maxwell
Účinnost [η]	93.19	92.83	93.2	0.38	0
Proud [A]	68.2	67.06	68.21	1.67	0.01
Účinič [-]	0.84	0.8594	0.847	0.02	0.83
Moment [Nm]	358.9	364.741	358.8	1.63	0.02
Rychlost [ot/min]	984.6	948.6	984.6	0	0
Ztráty v železe [W]	463	618.169	413.04	33.51	10.79
Ztráty ve vinutí statoru [W]	988.1	966.396	985.89	2.2	0.22
Elektrické ztráty v rotoru [W]	584.7	590.615	585.75	1.01	0.19
Stav nakrátko					
Popis	Typová zkouška	Model		Relativní odchylka [%]	
		Hodnota RMXprt	Hodnota Maxwell	Hodnota RMXprt	Hodnota Maxwell
Proud [A]	505.4	508.99	530	0.71	4.86
Moment [Nm]	940.4	949.894	925	1	2.69

Tab. (4) Srovnání výsledných hodnot s typovou zkouškou stroje

Z výše uvedené tabulky plyne, že model pro jmenovité zatížení v Maxwell odpovídá typové zkoušce přesněji než model v RMXprt.

Nejvyšší procentní chyby se dopouštíme u ztrát v železe, lze tedy předpokládat, že parametry použitých plechů (viz. tab. 3) nemusí zcela přesně odpovídat skutečným parametrům použitých plechů u stroje, na kterém byla prováděna typová zkouška. Rovněž se na rozdílu ztrát v železe modelu oproti skutečnosti podílí zkrácení délky rotoru (viz. 3.5.1.4.).

Ostatní vypočtené parametry modelu motoru v Maxwell odpovídají pro jmenovité zatížení typové zkoušce stroje s přesností pod 1%.



Porovnání některých získaných výsledných závislostí s typovou zkouškou stroje je obsahem příloh – část A. Na obr. (A1) je vyneseno detail pracovní oblasti asynchronního motoru, na kterém jsou srovnány jak výsledky z RMXprt, tak výsledky z Maxwell 2D. Na obr.(A2) a (A3) jsou vyneseny momentové a proudové závislosti na otáčkách asynchronního motoru pro celý rozsah otáček.

Zhodnocení vypočtené závislosti momentu na otáčkách:

- Do přibližně 980 ot/min dosahujeme přesnosti pod 1% mezi typovou zkouškou stroje a modelem stroje v Maxwell. V tomto rozmezí model v RMXprt dosahuje shody v okolí 3% s typovou zkouškou stroje.
- V oblasti od 980 ot/min do bodu zvratu se nejvyšší rozdíl mezi typovou zkouškou stroje a modelem v Maxwell pohybuje v okolí 6%, pro RMXprt je tento rozdíl v okolí 14%.
- V okolí bodu zvratu model vypočtený v Maxwell opět velice přesně odpovídá typové zkoušce stroje, a to s odchylkou pod 1%. RMXprt odpovídá s 5% odchylkou.
- V oblasti od 0 ot/min do bodu zvratu nejvyšší procentní odchylka s typovou zkouškou pro Maxwell činí okolo 10% a pro RMXprt 12%.

Zhodnocení vypočtené závislosti proudu na otáčkách:

- V pracovní oblasti (880 až 1000 ot/min) nejvyšší odchylka mezi typovou zkouškou stroje a modelem v Maxwell je v okolí 2,7% a v případě RMXprt 4,33%.
- V oblasti od 0 ot/min do 880 ot/min je nejvyšší odchylka mezi typovou zkouškou stroje a modelem v Maxwell v okolí 10% a v případě RMXprt 5%.

V odchylkách mezi typovou zkouškou stroje a modelem stroje se negativně projevují použité zjednodušující předpoklady, které jsou popsány v kapitole 3.5.1. Dá se předpokládat, že při vytvoření a analýze 3D modelu stroje bychom dosáhli vyšší shody s typovou zkouškou stroje.

Je třeba si také uvědomit, že průběhy a hodnoty uváděné v typové zkoušce jsou dány přesností použité metody a přístrojů pro měření typové zkoušky na zkoumaném stroji. Rovněž také každý vyrobený stroj dané řady má svou výrobní toleranci. Toleranční pásma některých hodnot jsou uvedeny v tab. (2). Výsledný model stroje tato toleranční pásma nepřesahuje a může být proto použit pro úpravu na synchronizovaný asynchronní motor.

4 NÁVRH A OPTIMALIZACE RELUKTANČNÍHO ROTORU

V kapitole 2.5 byly popsány základní konstrukční provedení synchronizovaných asynchronních motorů a synchronních reluktančních motorů. Na základě těchto poznatků budou v této práci aplikovány úpravy na tvarovou strukturu rotoru a tyto vyšetřeny pomocí analýz.

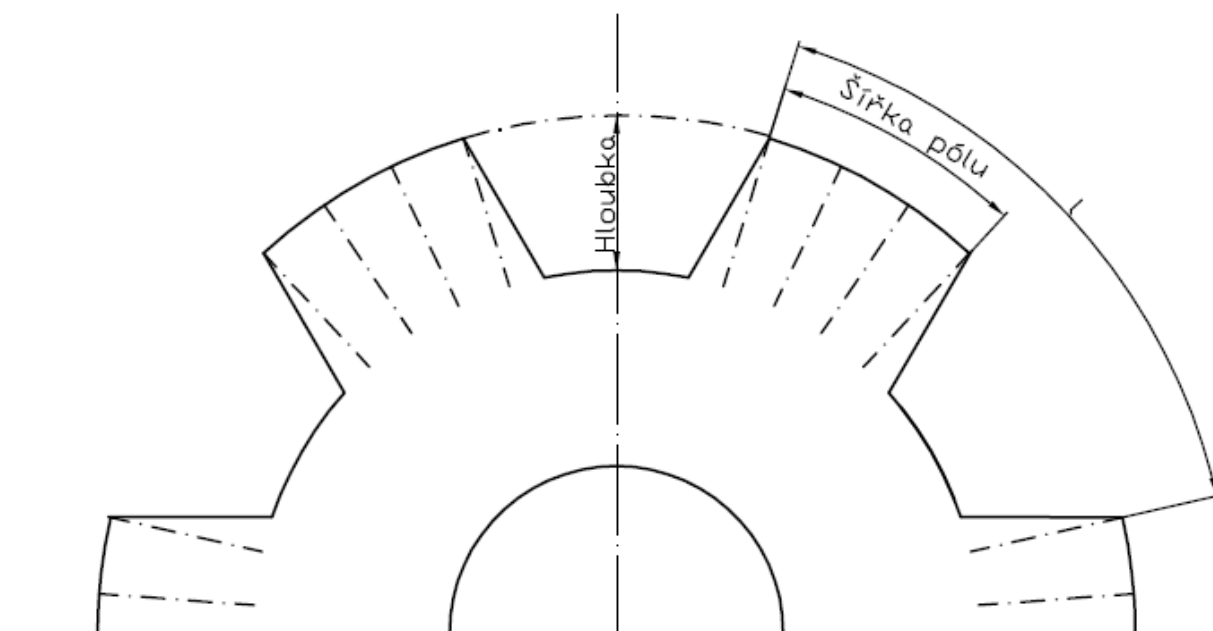
4.1 Rotor s vybráním

Jako první bude analyzován nejstarší tvar rotoru, který byl popsán v kapitole 2.5. Tomuto rotoru odpovídá výchozí tvar plechu rotoru, který je naznačen na obr. (17). Tento tvar lze velice snadno aplikovat na již vyhotovený klasický rotor pouhým vyfrézováním drážek o zvoleném tvaru a rozměrech.

V podkapitole 3.5.1.4 je zmíněno, že původní stroj má rotorové tyče zešikmeny. Pokud bychom provedli vyříznutí drážek přímo bez zešikmení, tak by došlo u tyče nejbližší kraji vyříznuté drážky k částečnému omezení její proudovodné dráhy v prostřední části délky rotoru.

Pokud by výřezy byly zešikmeny tak, aby kopírovaly trasu tyčí, dosáhneme tak prostorové nejednoznačnosti podélné osy rotoru. Je zřejmé, že podélná osa „d“ by se tak na začátku rotoru nacházela vůči točivému poli statoru v jiné poloze než v ostatních místech rotoru. Pro vyhodnocení vlivu prostorové nejednoznačnosti d-q os, by bylo nutné analyzovat model ve 3D.

Vzhledem k použitému 2D modelu budeme při analýze vycházet z předpokladu, že vyříznuté drážky jsou provedeny bez zešikmení. Dále zavedeme zjednodušující předpoklad, že tyče nejbližší kraji seříznutí nebudou ovlivněny jejich částečným seříznutím v oblasti výřezu. Tímto se dopouštíme jisté chyby, ale vzhledem k výrazné změně vlastností upraveného stroje od stroje původního nám tento model postačuje pro vyhodnocení dopadu této úpravy rotoru na výsledné vlastnosti stroje.



Obr. (17) Základní tvar analyzovaného rotoru s vybráním

4.1.1 Metodika optimalizace, nastavení analýzy a výchozí parametry

Parametrickou analýzou (viz. 1.2.3) bude měněna hloubka a šířka pólu rotoru, tyto parametry jsou zakótovány na obr. (17). Cílem parametrické analýzy bude posoudit vliv těchto proměnných na celkový moment stroje při synchronních otáčkách.

Protože parametrická analýza v časové oblasti by trvala velice dlouho, neboť při každé změně jednoho z parametrů by bylo nutné čekat na ustálení počátečního přechodného děje, byla zvolena analýza magnetostatická, která byla stručně popsána v kapitole 1.2.2.1.

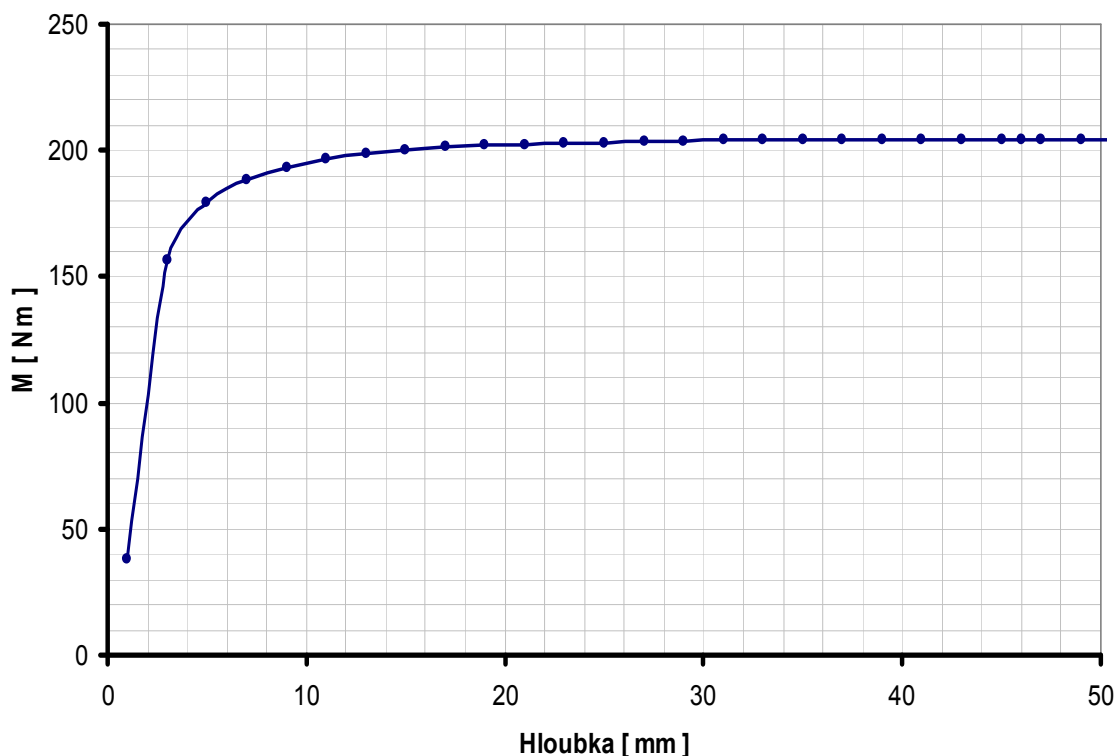
Pro potřeby statické analýzy stroje byly nastaveny proudy vinutím statoru tak, aby odpovídaly $I_s = 49$ A, a to v okamžiku, kdy ve fázi A je amplituda proudu, a v ostatních fázích je $\frac{1}{2}$ velikosti amplitudy proudu.

Jako první bude parametrizována hloubka, to znamená, že musíme parametr šířka pólu zvolit. Výchozí relativní šířka pólu (definice relativní šířky pólu viz. 4.1.2.) byla zvolena 0,52. Výchozí zátěžný úhel byl nastaven 45° elektrických pro který, jak plyne z kapitoly 2.3.2 by měl moment dosahovat maxima své velikosti.

Při hledání vhodné velikosti parametrů hloubka a šířky pólu je třeba vzít v potaz, že zvětšováním vzduchové mezery také zvyšujeme magnetizační proud, tím pádem i ztráty ve vinutí statoru, dále snižujeme účinník stroje. Je tedy nutné tyto parametry volit tak, aby se vzduchová mezera co nejméně zvětšovala.

4.1.2 Vliv hloubky na velikost točivého momentu

Parametrická analýza parametru hloubky byla provedena pro hloubku 1 až 50mm. Výsledná závislost hloubky na momentu je vykreslena na obr. (18).



Obr. (18) Závislost momentu na hloubce vybrání

Z vynesené závislosti plyne, že se zvyšováním hloubky nám z počátku prudce roste točivý moment stroje. Prudký nárůst přechází od hloubky výřezu 3mm v méně strmější a postupně se od 20mm ustaluje k hodnotě 205Nm. Od hloubky zářezu 45mm však moment začíná naopak mírně klesat.

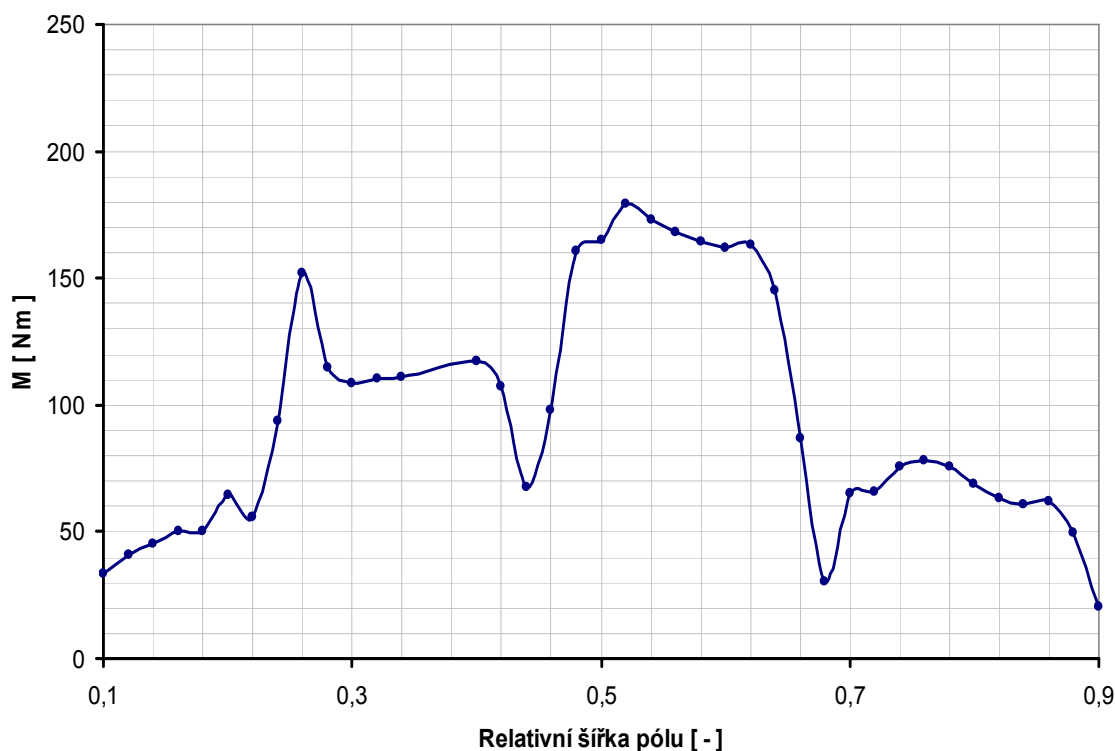
S ohledem na co nejmenší vzduchovou mezeru byla zvolena jako vhodná hodnota hloubky 5mm (třetí vynesení bod v charakteristice na obr. (18)), ta odpovídá momentu 179Nm.

4.1.3 Vliv šířky pólu na velikost točivého momentu

Pro vytvoření správné představy velikosti pólu vůči celému obvodu rotoru definujeme parametr „relativní šířka pólu“, platí

$$\text{relativni_sirka_polu} = \frac{l}{\text{sirka_polu}} \quad (4-1)$$

Parametrická analýza parametru relativní šířka pólu byla provedena pro relativní šířku pólu 0,1 až 0,9. Výsledná závislost hloubky na momentu je vykreslena na obr. (19).



Obr. (19) Závislosti momentu na relativní délce pólu při hloubce = 5mm, $I_s = 49A$

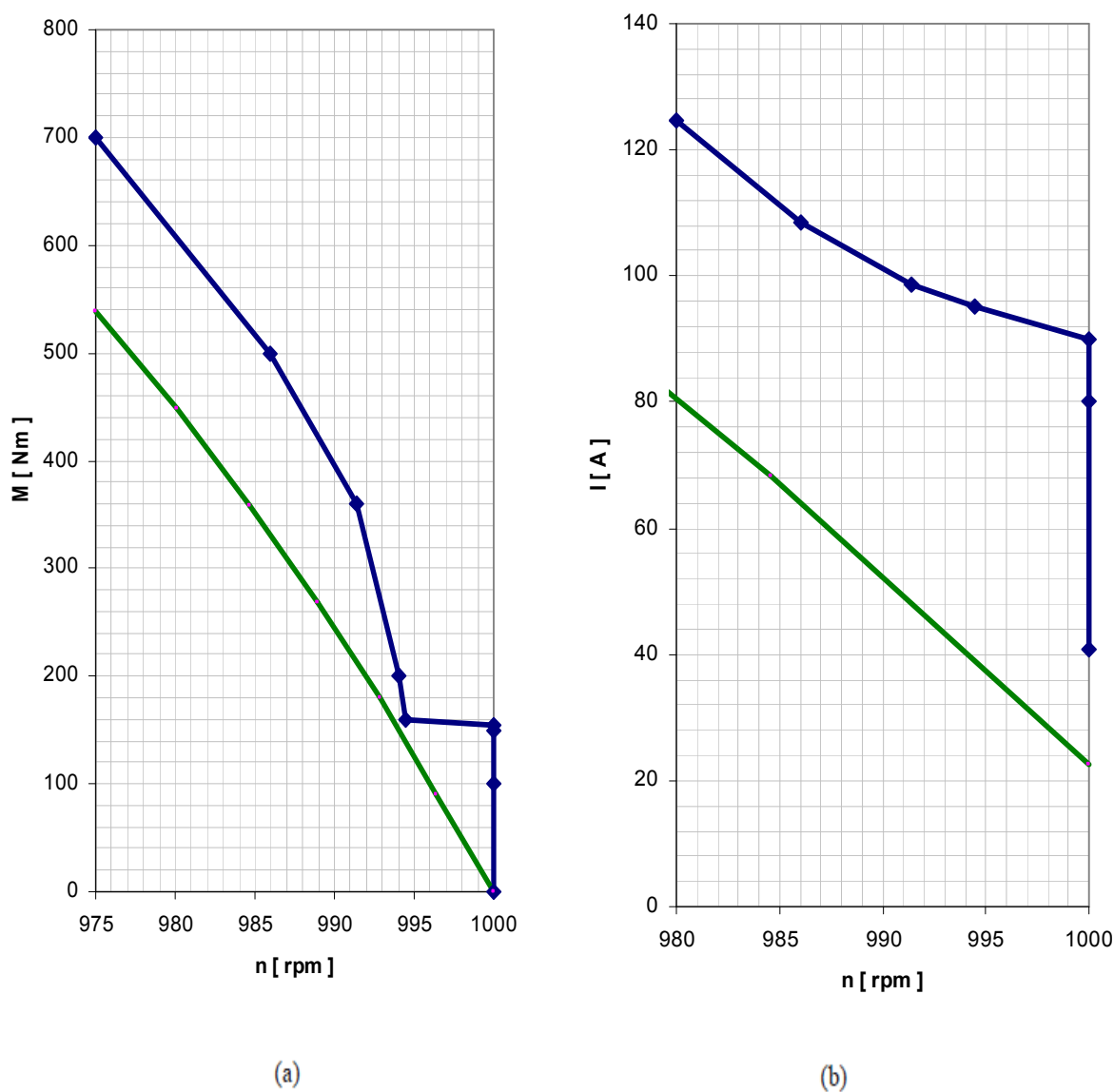
Z vypočtených hodnot plyne, že nejvyššího točivého momentu dosáhneme při relativní délce pólu 0,52mm. Tato relativní délka pólu bude použita pro další analýzu stroje.

4.1.4 Vyhodnocení výsledného stroje

4.1.4.1 Momentové a proudové charakteristiky

Pro vyhodnocení dynamických vlastností výsledného stroje, s výše navrhnutým tvarem rotoru, je třeba stroj analyzovat časovou analýzou. Tato analýza umožňuje, stejně jak tomu bylo u analyzování modelu výchozího stroje, vynést momentovou charakteristiku upraveného stroje a vypočítat další parametry.

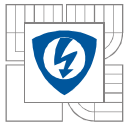
Pomocí vhodného nastavení časové analýzy v Ansoft Maxwell byl postupně měněn zátěžný moment stroje. Pro každý zátěžný moment byly po ustálení přechodného děje odečteny otáčky a proud statorovým vinutím stroje. Takto získané naměřené hodnoty byly graficky znázorněny na obr. (20).



Obr. (20) Srovnání a) momentové b) proudové charakteristiky původního a upraveného stroje

Modře – Závislost a) momentu b) proudu na otáčkách motoru s upraveným rotorem

Zeleně – Závislost a) momentu b) proudu na otáčkách motoru modelu výchozího stroje



Z důvodu časové náročnosti simulace nebyla takto proměřena momentová a proudová charakteristika v celém rozsahu otáček, ale pouze pro část pracovní oblasti.

Jak plyne z momentové charakteristiky, výsledný stroj až do zátěžného momentu 155Nm pracuje v synchronním režimu, při dalším zvýšení zátěžného momentu na 160Nm vypadává ze synchronismu a z momentové charakteristiky je patrný skokový pokles otáček na $n=994,5$ ot/min. Při dalším zvyšování zatížení otáčky již klesají hladkým průběhem.

Ve srovnání s původním strojem upravený motor dosahuje při daném zatížení vyšších otáček, tzn. rotor má nižší skluz. Odevzdávaný mechanický výkon pro dané zatížení je tedy vyšší než u původního stroje.

Jak plyne z obr. (20), došlo u upraveného stroje v porovnání s původním strojem k podstatnému nárůstu odebíraného proudu. Tento nárůst je způsoben zvětšením vzduchové mezery stroje. Odebíraný proud naprázdno stroje činní $I_s = 59,98A$.

Zvýšení proudu statorovým vinutím má rovněž za následek zvýšení ztrát ve vinutí statoru a zhoršení celkového účinníku stroje.

Z vynesných charakteristik plyne, že upravený stroj bude mít pro dané otáčky vyšší příkon než stroj původní.

Následují podkapitoly, ve kterých je provedeno podrobnější srovnání upraveného stroje s původním strojem, a to pro stav, kdy se rotor upraveného stroje otáčí synchronními otáčkami a pro stav kdy je upravený stroj zatížen jmenovitým výkonem původního stroje. Pro posouzení záběrného momentu je také uvedeno srovnání stavu nakrátko původního a upraveného stroje.

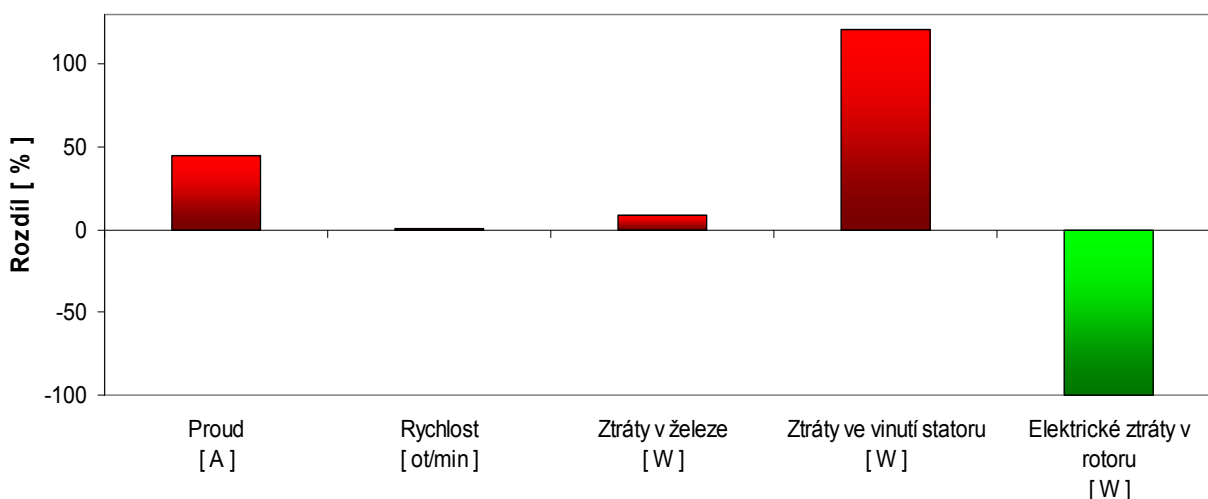
4.1.4.2 Srovnání upraveného stroje s původním strojem při $M = 100\text{Nm}$

Jak plyne z momentové charakteristiky na obr. (21) a také z tab. (5), rotor se při tomto zatížení nezpožďuje za točivým magnetickým polem vytvářeným statorem stroje, otáčí se tedy synchronními otáčkami. Díky tomu se neindukuje napětí v rotorových tyčích a ztráty rotoru jsou tedy nulové.

Vlastnosti stroje při zatížení stroje momentem $M=100\text{Nm}$ s původním strojem srovnává tab. (5), graficky jsou rozdíly mezi původním a upraveným strojem znázorněny na obr. (21).

Synchronní otáčky při $M = 100\text{ Nm}$			
Popis	Model původní rotor	Model reluktanční rotor	Rozdíl [%]
Proud [A]	35,04	50,67	+ 44,61
Mechanický výkon [kW]	10,43	10,47	+ 0,38
Rychlost [ot/min]	996	1000	+ 0,40
Ztráty v železe [W]	415	453,014	+ 9,16
Ztráty ve vinutí statoru [W]	262	579	+ 120,99
Elektrické ztráty v rotoru [W]	70	0	- 100,00

Tab. (5) Srovnání výsledných hodnot s typovou zkouškou stroje při $M = 100\text{ Nm}$



Obr. (21) Srovnání parametrů upraveného motoru s výchozím motorem při $M = 100\text{Nm}$

Přestože nevznikají elektrické ztráty v rotoru, je celkový součet ztrát motoru při zatížení momentem $M = 100\text{Nm}$ vyšší než u výchozího elektrického stroje. Upravený stroj má tedy pro daný zátěžný moment i při synchronních otáčkách horší vlastnosti než výchozí elektrický stroj.

4.1.4.3 Srovnání upraveného stroje s původním strojem při $P_m = 37 \text{ kW}$

Pro zatížení jmenovitým výkonem původního stroje $P_m = 37 \text{ kW}$ jsou získané výsledky srovnány s původním strojem v tab. (6) a graficky na obr. (22).

Nominální stav			
Popis	Model původní rotor	Model reluktanční rotor	Rozdíl [%]
Proud [A]	68.21	98,72	+ 44,73
Rychlost [ot/min]	984.6	991,45	+ 0,69
Ztráty v železe [W]	413.04	426	+ 3,14
Ztráty ve vinutí statoru [W]	985.89	2022	+ 105,09
Elektrické ztráty v rotoru [W]	585.75	700	+ 19,50

Tab. (6) Srovnání výsledných hodnot s typovou zkouškou stroje při $P_m = 37 \text{ kW}$



Obr. (22) Srovnání parametrů upraveného motoru s výchozím motorem při $P_m = 37 \text{ kW}$

Jak plyne z výsledků, při jmenovitém zatížení stroje dochází k podstatnému zhoršení sledovaných parametrů stroje, a tím i ke snížení jeho celkové účinnosti. Odebíraný proud statorem upraveného stroje odpovídá odebíranému proudu původního stroje, který by přibližně dodával mechanický výkon $P_m = 52 \text{ kW}$.

Při srovnání se zatížením stroje při $M=100 \text{ Nm}$ dochází téměř ke stejnému procentnímu nárůstu odebíraného proudu oproti výchozímu stroji.

4.1.4.4 Srovnání upraveného stroje s původním strojem při stavu nakrátko

Stav, kdy je rotor zabrzděn, tedy motor je ve stavu nakrátko, je srovnán mezi upraveným a původním strojem v tab. (7).

Stav nakrátko			
Popis	Model původní rotor	Model reluktanční rotor	Rozdíl [%]
Proud [A]	530	526.56	- 0,64
Moment [Nm]	925	882	- 4,64

Tab. (7) Srovnání výsledných hodnot s typovou zkouškou stroje při stavu nakrátko

Jak z těchto hodnot plyne, při stavu nakrátko nedochází k podstatně velkým rozdílům mezi původním a upraveným strojem.

4.2 Rotor s laminacemi

V této kapitole bude analyzován synchronizovaný asynchronní motor s rotorem, který vychází z provedení příčně laminovaného rotoru z obr. (9b).

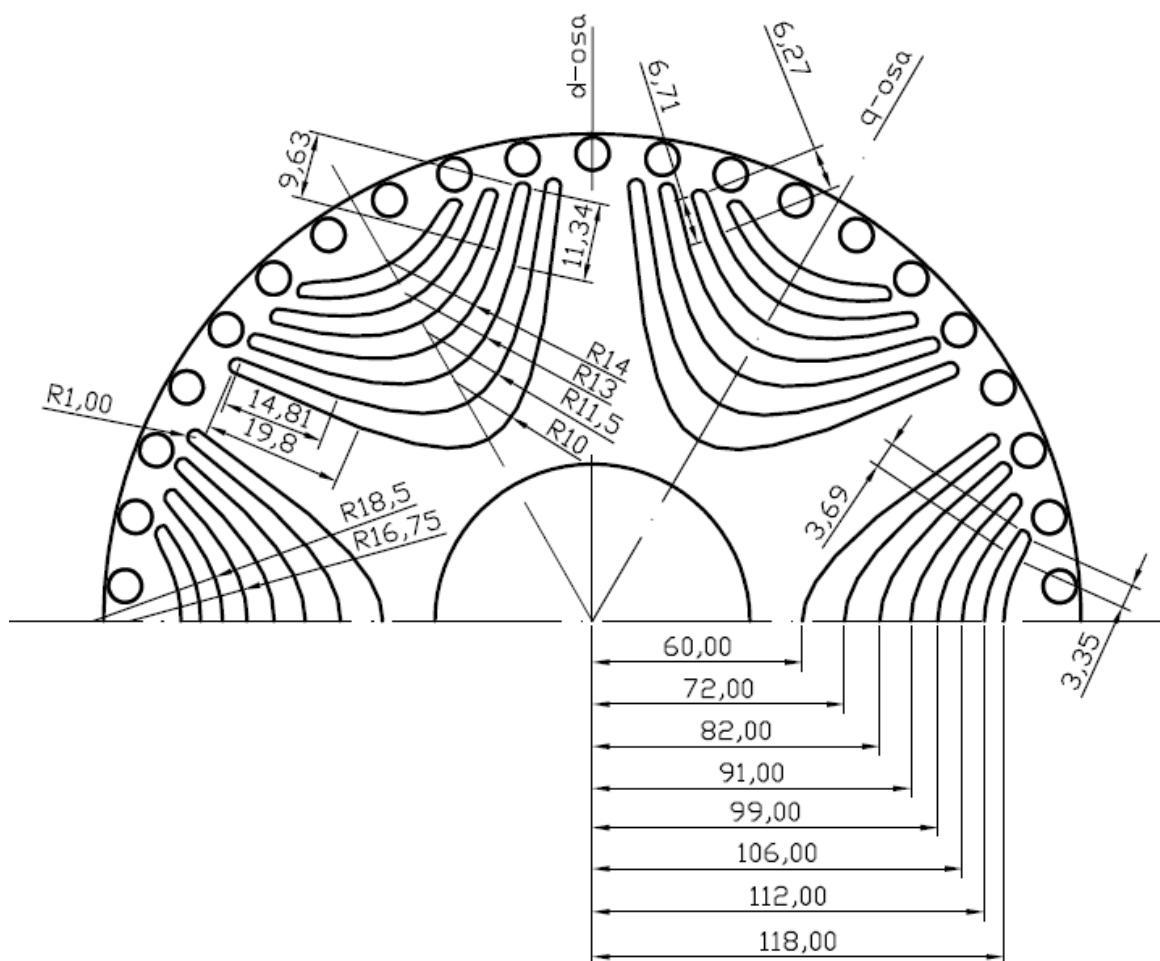
Provedení příčně laminovaného rotoru z obr. (9) je určeno pro synchronní reluktanční motory, které nemají klec nakrátko a rozbíhají se pomocí řízení z frekvenčního měniče. Takto zkonstruované stroje jsou schopny dosahovat velmi dobrých parametrů.

U synchronizovaného asynchronního motoru zajišťuje rozběh klec nakrátko. Přítomnost klece v rotoru snižuje volný prostor pro laminace rotorových plechů. Proto je potřeba změnit tvar rotorových tyčí původního stroje tak, aby zabíraly co nejmenší plochu, a přitom zajišťovaly dobré rozběhové vlastnosti stroje.

Místo původních hlubokých rotorových tyčí budou tedy použity jednoduché tyče kruhového průřezu, které jsou na koncích rotoru spojeny pomocí kruhů nakrátko. Kruhový tvar rotorové tyče by měl zajistit vysoký záběrný moment a zajistit tak rozběh stroje až do synchronních otáček.

Z časových důvodů vyhrazených na bakalářskou práci již nebude v této práci provedena parametrická analýza dílčích rozměrů a hledání tak optimální konfigurace tvaru a provedení laminací.

Nákres použitého rotoru včetně zakótovaných rozměrů je na obr. (23). Rozměry byly zvoleny odhadem s ohledem na základní rozměry původního rotoru.



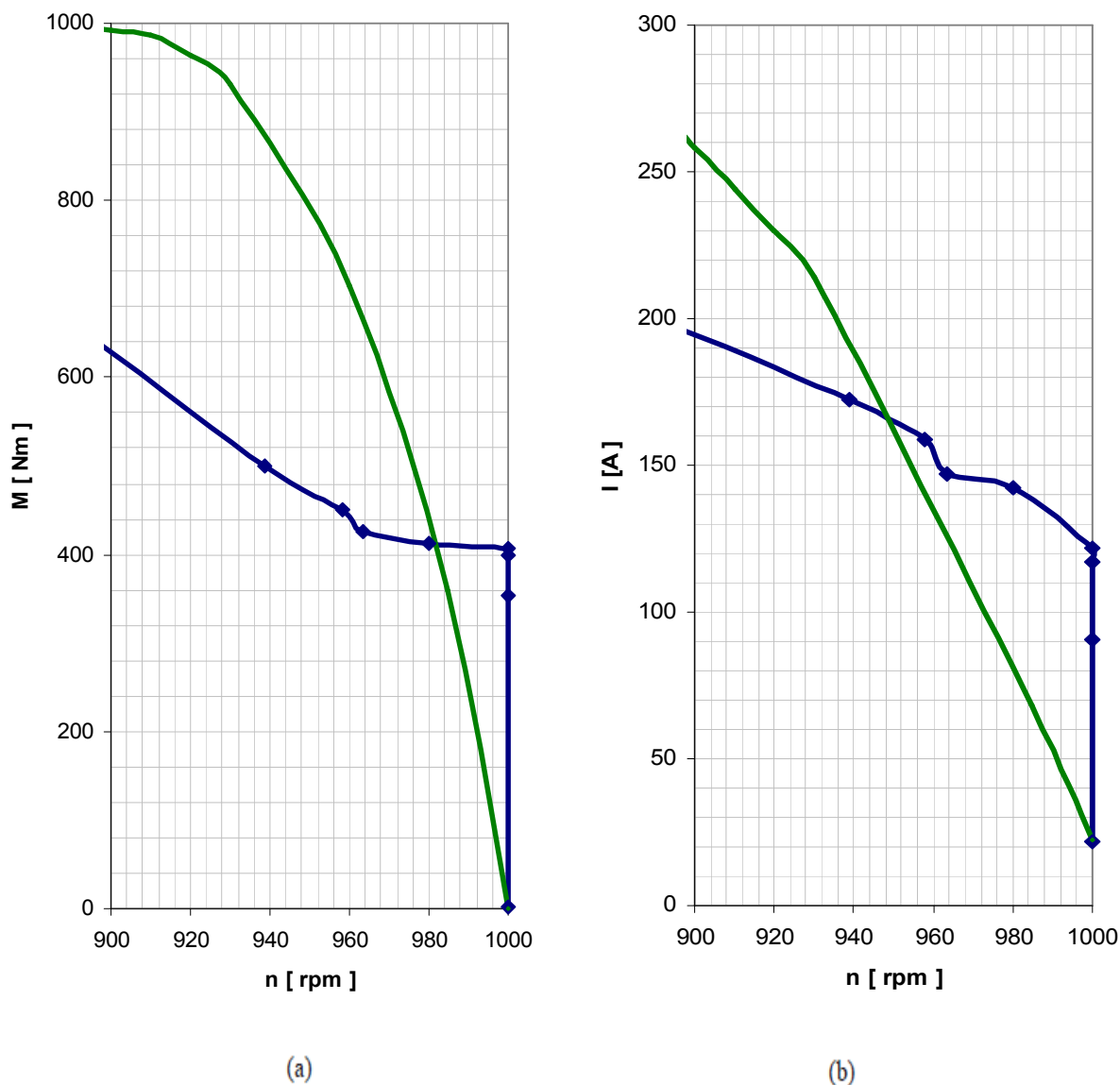
Obr. (23) Rozměrový náčrtek plechu laminovaného rotoru

4.2.1 Vyhodnocení výsledného stroje

4.2.1.1 Momentové a proudové charakteristiky

Pro vynesení proudových a momentových charakteristik bude aplikován postup popsáný v kapitole 4.1.4.1. Protože u daného rotoru s laminacemi se počáteční přechodný děj ustaluje rychleji, je čas simulace oproti stroji s rotorem, který má vybrání podstatně nižší (v řádu hodin). Proto pro rotor s laminacemi mohla být vypočtena momentová a proudová charakteristika v celém rozsahu otáček (příloha B) v rozumném čase. Část momentové a proudové charakteristiky je uvedena na obr. (24).

Jak plyne z vynesené momentové charakteristiky, rozběh motoru je dán momentovou charakteristikou rotorové klece rotoru. Stejně tak i záběrný moment tohoto stroje je dán odporem rotorové klece.



Obr. (24) Srovnání momentové a proudové charakteristiky původního a upraveného stroje

Modře – Závislost a) momentu b) proudu na otáčkách motoru s upraveným rotorem

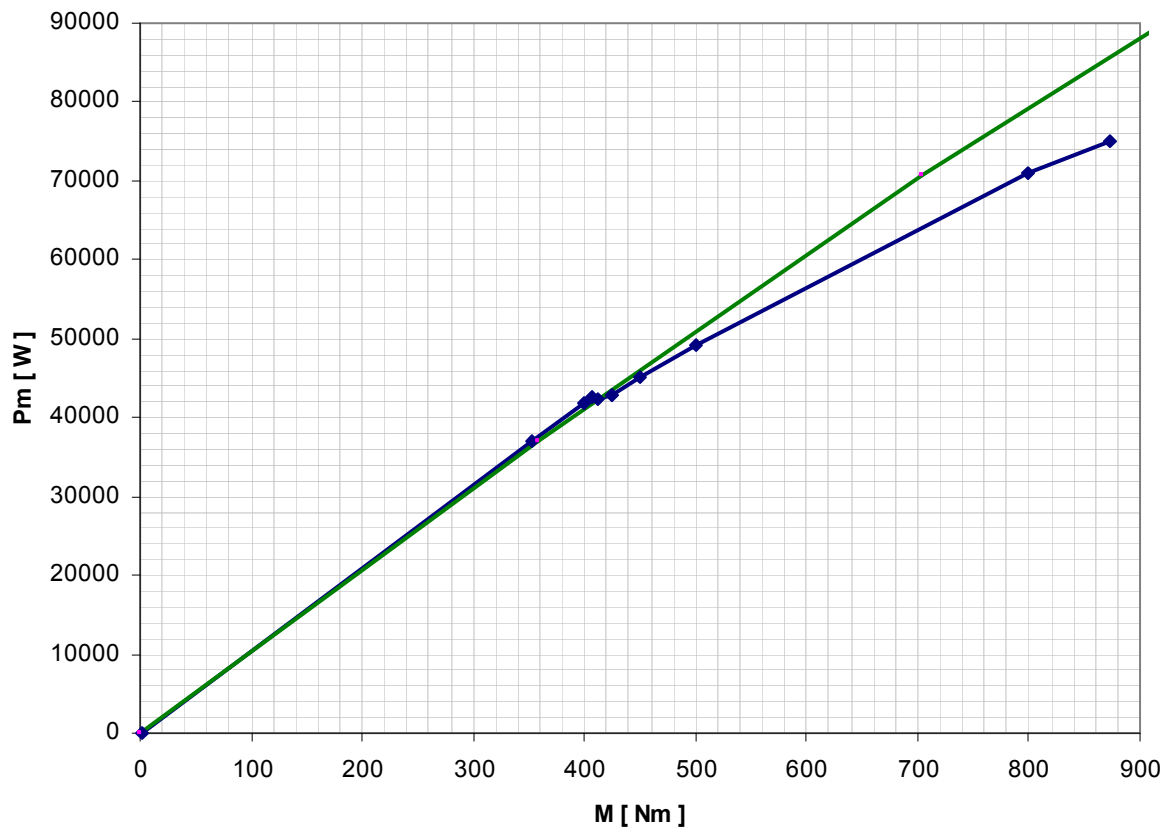
Zeleně – Závislost a) momentu b) proudu na otáčkách motoru modelu výchozího stroje

Stroj vypadáva ze synchronismu v intervalu mezi 406 a 412,5 Nm. Pod toto zatížení se rotor otáčí synchronními otáčkami. Při vypadnutí ze synchronismu dochází ke skokovému poklesu otáček přibližně o 20 ot/min.

Pro vyšší zatížení, než odpovídá synchronnímu režimu, motor pracuje oproti původnímu stroji s podstatně vyšším skluzem. Navíc z výsledků simulací v Ansoft Maxwell plyne, že při těchto zatíženích dochází k vibracím rotoru, neboť otáčky se periodicky mění mezi dvěma hodnotami a nedochází k jejich ustálení.

Proto aby stroj v pracovní oblasti, kdy není vtažen do synchronismu, pracoval s menším skluzem, by bylo nutné zvýšit vodivost rotorové klece. Touto úpravou bychom ale naopak snížili záběrný moment stroje. Střetávají se zde tedy dva protichůdné požadavky.

Z proudové charakteristiky je zřetelný nárůst proudu oproti původnímu stroji. Při srovnání charakteristik pro upravený motor s původním strojem je třeba mít na paměti, že pro daný zatížený moment má upravený stroj jiný výstupní výkon než je tomu u původního stroje.



Obr. (25) Srovnání výstupního výkonu původního a upraveného stroje

Modře – Závislost výkonu na zátěžném momentu motoru s upraveným rotorem

Zeleně – Závislost výkonu na zátěžném momentu modelu výchozího stroje

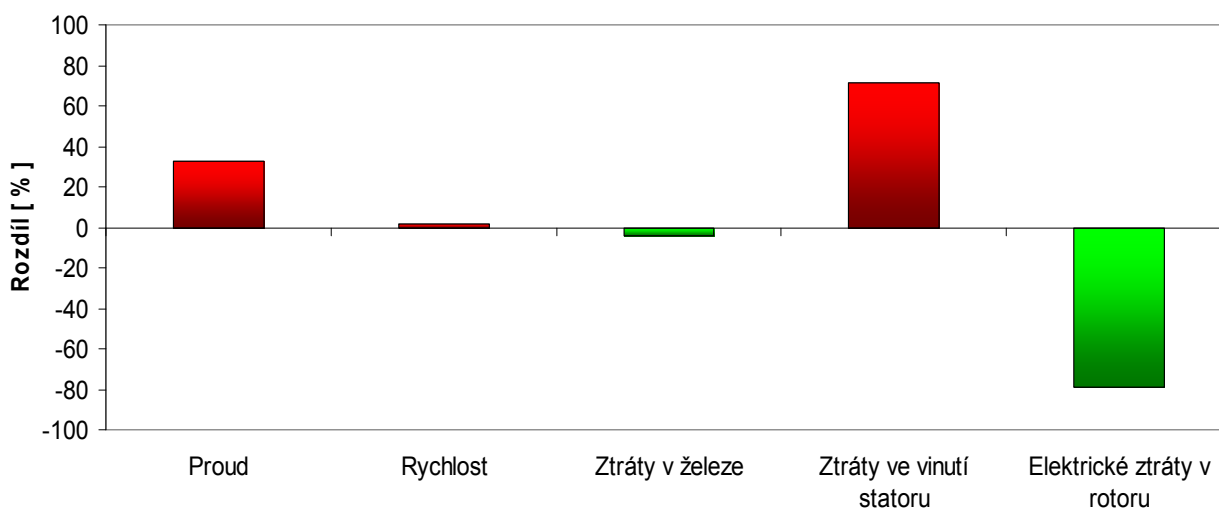
Upravený stroj dodává v oblasti synchronismu, pro dané zatížení, o něco málo vyšší výkon než původní stroj. V oblasti, kdy upravený stroj není v synchronismu, postupně dochází k poměrně vysokému poklesu výstupního výkonu oproti původnímu stroji v řádu jednotek kW.

4.2.1.2 Srovnání upraveného stroje s původním strojem při $P_m = 37 \text{ kW}$

Pro zatížení jmenovitým momentem původního stroje $P_{\text{mech}} = 37 \text{ kW}$ jsou získané výsledky srovnány s původním strojem v tab. (8) a graficky na obr. (26).

Nominální stav			
Popis	Model původní rotor	Model reluktanční rotor	Rozdíl [%]
Proud [A]	68,21	90,67	+ 32,92
Rychlost [ot/min]	984,6	1000	+ 1,56
Ztráty v železe [W]	413,04	396	- 4,12
Ztráty ve vinutí statoru [W]	985,89	1693	+ 71,72
Elektrické ztráty v rotoru [W]	585,75	124,47	- 78,75

Tab. (8) Srovnání výsledných hodnot s typovou zkouškou stroje při $P_m = 37 \text{ kW}$



Obr. (26) Srovnání parametrů upraveného motoru s výchozím motorem při $P_m = 37 \text{ kW}$

Jak plyne z výše uváděných výsledků, při zatížení upraveného stroje jmenovitým výkonem původního stroje dochází k nárůstu proudu statorovým vinutím stroje, a tím i ke ztrátám ve statorovém vinutí stroje. Přestože má upravený stroj podstatně nižší rotorové ztráty, tak součet ztrát v železe, elektrických ztrát ve vinutí statoru a v kleci nakrátko dá vyšší hodnotu než u původního stroje. Touto úpravou tedy dochází také ke zhoršení účinnosti stroje.

4.2.1.3 Srovnání upraveného stroje s původním strojem při stavu nakrátko

Stav, kdy je rotor zabrzděn, tedy motor je ve stavu nakrátko, je srovnán mezi upraveným a původním strojem v tab. (9).

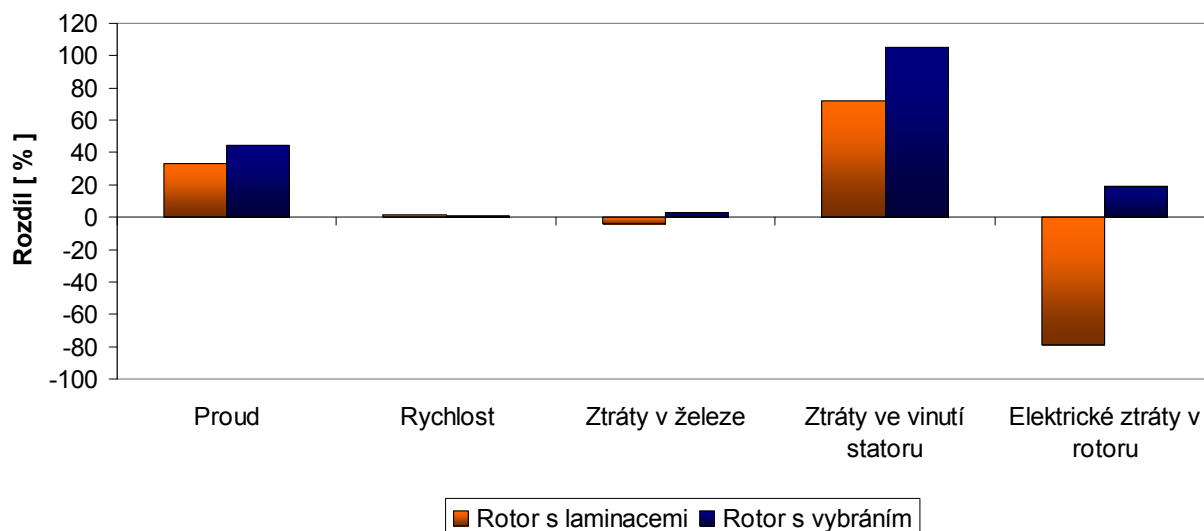
Stav nakrátko			
Popis	Model původní rotor	Model reluktanční rotor	Rozdíl [%]
Proud [A]	530	529,9	- 0,02
Moment [Nm]	925	1016	+ 9,83

Tab. (9) Srovnání výsledných hodnot s typovou zkouškou stroje při stavu nakrátko

Jak z těchto hodnot plyne, při stavu nakrátko nedochází k podstatně velkým rozdílům mezi původním a upraveným strojem.

4.3 Celkové vyhodnocení upravených strojů

V této práci byly provedeny dvě úpravy rotoru původního stroje za účelem vytvoření synchronizovaného asynchronního motoru a vypočtení jeho proudových a momentových charakteristik. Procentní srovnání rozdílů sledovaných parametrů oproti výchozímu stroji je zobrazeno na obr. (27)



Obr. (27) Srovnání parametrů rotoru s laminacemi a rotoru s vybráním při $P_m=37kW$

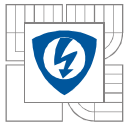
Jak plyne z obr. (27) provedení rotoru s laminacemi je daleko lepší variantou, než rotor s pouhým vybráním na povrchu rotoru. A to i přesto, že tvary laminace byly zvoleny odhadem bez předchozí optimalizace. Je zde tedy dobrý předpoklad, že aplikací optimalizačních algoritmů bychom pro rotor s laminacemi dosáhli ještě lepších parametrů.

Na základě průběhu momentových charakteristik obou upravených rotorů lze konstatovat, že rozběh synchronizovaného asynchronního motoru se dělí na dvě hlavní části

- Asynchronní rozběh
- Vtáhnutí do synchronismu s otáčivým magnetickým polem vytvářeným statorovým vinutím stroje

Motor se uvádí do chodu působením asynchronního momentu, vytvářeného proudy, které jsou indukovány v rotorových tyčích. Záběrný moment a průběh rozběhu je dán tvarem a použitým materiálem rotorových tyčí. Po zatížení stroje se stroj ustálí na otáčkách, které budou závislé na impedanci klece. Čím více se budou ustálené otáčky lišit od synchronních otáček, tím těžší bude také vtáhnutí do synchronismu. Je tedy nutné zajistit co nejstrmější průběh pracovní oblasti motoru zvolením vhodné impedance klece při zachování co nejlepšího záběrného momentu. [19]

Vtáhnutí do synchronismu závisí na velikosti zátěžného úhlu β , a také na velikosti setrvačných hmot, které se musí při synchronizaci zrychlit. Čím budou tyto veličiny vyšší, tím bude také těžší pro stroj dostat se do synchronního režimu. [19]



Oba předložené stroje mají podstatně vyšší proud vinutím statoru, a tím také ztráty ve vinutí statoru oproti stroji původnímu. Ze vztahů známých z teoretické elektrotechniky odvodíme, čím je tato podstatná změna způsobena.

Vyjděme z předpokladu, že nové reluktanční rotory svým tvarem, oproti původnímu rotoru, prodlužují mimo jiné dráhu magnetického toku. Budeme tedy obecně hledat závislost proudu na délce drah magnetického toku.

Velikost magnetického toku je dána napětím U . Platí, že:

$$\phi(t) = \frac{1}{N} \int u(t) \cdot dt = \frac{1}{N} \int U \cdot \cos \omega \cdot t \cdot dt \quad (4-2)$$

Integrací vztahu (4-2) dostáváme

$$\phi(t) = \frac{U}{N\omega} \sin \omega t \quad (4-3)$$

Vztahy (4-2) a (4-3) čerpány z [20]

Velikost magnetického toku může být rovněž vyjádřena následujícím vztahem

$$\phi(t) = L \frac{I}{N} \sin \omega t \quad (4-4)$$

Pro indukčnost magnetického obvodu platí

$$L = N^2 \cdot \lambda_m = \frac{N^2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot S}{l} \quad (4-5)$$

Dosazením do vztahu (4-4) získáme

$$\phi(t) = \frac{N \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot S}{l} \cdot I \sin \omega t \quad (4-6)$$

Postavením rovnic (4-3) a (4-6) proti sobě získáme

$$\frac{U}{N\omega} \sin \omega t = \frac{N \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot S}{l} I \sin \omega t \quad (4-7)$$

Z toho plyne, že velikost proudu je obecně dána vztahem

$$I = \frac{l \cdot U}{N^2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot S \cdot \omega} \quad (4-8)$$

Velikost proudu je tedy přímo úměrná velikosti napětí, délce siločar a nepřímo úměrná čtverci počtu závitů. Zvětšení délky siločar, jak plyne z rovnice (4-8), se skutečně podílí na nárůstu proudu statoru stroje. Jak také plyne z této rovnice, můžeme snížení proudu dosáhnout změnou počtu závitů vinutí statoru. Z tohoto lze tedy vyvodit závěr, že pro návrh synchronizovaného asynchronního motoru, který má co nejlepší parametry, nestačí upravit pouze rotor stroje, ale je také nutné provést změny ve statoru stroje.

5 ZÁVĚR

První kapitola je v souladu se zadáním práce věnována literární rešerši výpočetního programu Ansoft Maxwell, který byl využit při řešení této práce.

Dále byla provedena literární rešerše problematiky synchronizovaných asynchronních motorů, a s tím i úzce související problematiky reluktančních motorů. Tato práce stručně popisuje základní principy funkce těchto strojů a uvádí základní vztahy, kterými je dán točivý moment těchto strojů. Rovněž jsou zde uvedeny příklady nejběžnějších typů provedení rotorů takovýchto strojů.

Autor této práce navázal spolupráci se společností Siemens - Odštěpný závod Elektromotory Frenštát pod Radhoštěm, od které také získal potřebnou technickou dokumentaci, podle které byl vytvořen model asynchronního motoru v nadstavbě RMXprt a také v Maxwell.

Za účelem snížení času veškerých výpočtů v Ansoft Maxwell byl použit 2D model stroje, i přesto výsledky poměrně dobře odpovídají typové zkoušce skutečného stroje. Podrobné porovnání je obsahem tab. (4), která je součástí kapitoly 3. Rovněž jsou v této kapitole popsány, pro transparentnost výsledků, veškerá nutně použitá zjednodušení, která mohla mít vliv na vypočtené hodnoty. Tato část práce mimo jiné dokazuje, že i netradičně zhotovený asynchronní motor je možno poměrně přesně namodelovat, po přijetí určitých zjednodušení v maxwell 2D.

Takto získaný model asynchronního motoru byl využit pro splnění třetího bodu zadání této práce. Čtvrtá kapitola popisuje upravení modelu původního asynchronního motoru na nový synchronizovaný asynchronní motor.

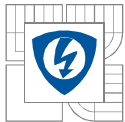
Jako první byl upraven původní rotor výchozího stroje dle tvaru z literární rešerše uvedeném na obr. (7). Rozměry rotoru základního tvaru vycházející z obr. (7) byly měněny pomocí parametrické analýzy. Na základě výsledků z parametrické analýzy pak byly stanoveny výsledné rozměry vybraní v rotoru. Pro takto vytvořený model byly vypočteny proudové a momentové charakteristiky v části pracovní oblasti, tímto byl splněn třetí bod zadání této práce.

Jak plyne ze srovnání uvedených v kapitolách 4.1.4.2 a 4.1.4.3, upravením původního rotoru na rotor s vybráním dochází k podstatnému zhoršení výsledných parametrů stroje. Tímto tvarem rotoru tedy nedosáhneme zvýšení účinnosti stroje, ale naopak jejího nezanedbatelného snížení. Takovýto tvar rotoru se tedy nehodí pro konstrukci synchronizovaného asynchronního motoru.

Dále byl vytvořen a analyzován rotor s laminacemi, který je rovněž odvozen z literární rešerše obr. (9b). Pro tento rotor již nebyla, z časových důvodů, provedena optimalizace pomocí parametrické analýzy, nýbrž rozměry jednotlivých tvarů byly zvoleny s ohledem na rozměry rotoru. Rozběhová klec nakrátko vznikla úpravou původní klece.

Jak plyne z výsledků a porovnání uvedeného na obr. (27), motor s laminovaným rotorem dosahuje lepších vlastností u sledovaných parametrů. Ztráty oproti rotoru s vybráním jsou nižší a rovněž stroj dokáže pracovat v synchronismu i při vyšších zátěžných momentech, a to i přesto, že jednotlivé rozměry stroje byly zvoleny odhadem.

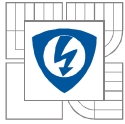
Na základě skutečností uvedených v kapitole 4.3 lze konstatovat, že na práci v předložené podobě lze smysluplně navázat další prací, ve které by byl kompletně navržen synchronizovaný asynchronní motor s co nejlepšími parametry. Jako struktura rotoru se jeví nejvýhodnější



provedení s laminacemi. Jednotlivé rozměry laminací, jejich tvary, počet, poloha vůči rotorovým tyčím by měly být předmětem podrobnějších analýz, které by využily sofistikované optimalizační algoritmy. Dále je potřeba navrhnout rozměry a tvar tyčí rotorové klece, a to tak, aby poskytovaly vysoký záběrný moment a co nejmenší skluz v pracovní oblasti, to vše při zachování co nejmenších rozměrů tyčí. Jak plyne z výše zmiňované kapitoly, rovněž je nutné provést změny ve satorovém vinutí stroje, a to tak, abychom snížili vysoké proudy vinutím statoru, které nám nepřípustně zvyšují ztráty stroje.

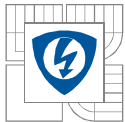
Po výše uvedené optimalizaci stroje by bylo vhodné převedení 2D modelu stroje do 3D modelu, u kterého se dá předpokládat vyšší shoda výsledků se skutečností. 3D model by nám také umožnil posoudit vliv možného zešíkmení výřezů po délce rotoru, po různých trajektoriích.

Závěrem lze konstatovat, že autor této práce splnil náplň jednotlivých bodů zadání, navíc s důrazem porovnat ztráty původního a nově vzniknutého synchronizovaného asynchronního motoru, který je odvozen z původního asynchronního motoru.



LITERATURA

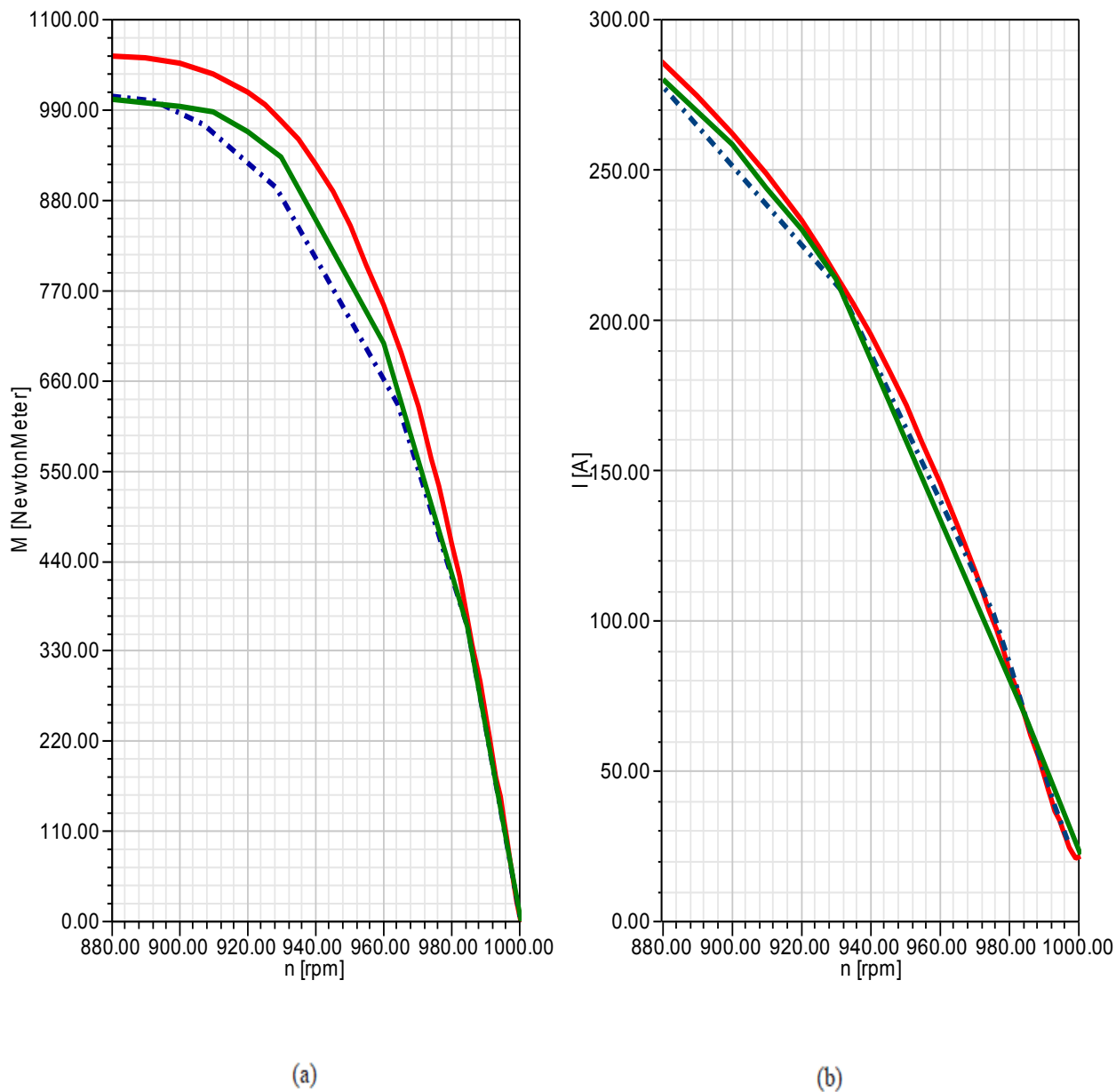
- [1] PYRHONEN, Juha ; JOKINEN, Tapani; HRABOVCOVÁ, Valéria. *Design of Rotating Electrical machines*. první. [s.l.] : John Wiley & Sons, Ltd, 2008. 512 s. ISBN 978-0-470-69516-6(H/B).Rotating electrical machines
- [2] KOČMAN, Karel, et al. *Elektrické stroje a přístroje I*. Praha : SNTL, 1990. 420 s. ISBN 80-03-00406-3.
- [3] KOPECKÝ, Ladislav. *Elektromobily* [online]. 2008 [cit. 2011-10-28]. Reluktanční motor a elektromobil. <http://www.elektromobily.org/w/images/a/ad/Reluktancni_motor_Kopecky.pdf>.
- [4] MOGHADDAM, Reza. *Synchronous Reluctance Machine (SynRM) Design*. Stockholm, 2007. 95 s. Diplomová práce. Royal Institute of Technology.Synchronous Reluctance Machina (SynRM) Design by Reza Rajabi Moghaddam
- [5] PEYMAN, Niazi. *Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor Design And Performance Improvement*. [s.l.], 2005. 153 s. Dizertační práce. Texas A&M University.
- [6] I. V. Hrabovcova, J. Pyrhonen, J. Haataja, “Reluctance Synchronous motor (RSM) and its performances”, Lappeenranta University of Technology, May 2005.
- [7] LIPO, T. A.: Synchronous Reluctance Machines – a viable Alternative for AC Drives? *Electric Machines and Power Systems*, 1991,19, s. 659–671,.
- [8] T. Matsuo and T .A. Lipo, “Rotor design optimization of synchronous reluctance machine,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 9, no. 2, s. 359–365, 1994.
- [9] MĚŘIČKA, Jiří; HAMATA, Václav; VOŽENÍLEK, Petr. *Elektrické stroje*. Praha : ČVUT, 2000. 311 s. ISBN 80-01-02109-2.E
- [10] RŮŽIČKA, Jan. Simulace, vizualizace a analýza fyzikálních polí v počítači. *Elektro*. 30.8.2011, 8-9, s. 18-19.
- [11] *User’s guide – Maxwell 2D*. Canonsburg : ANSYS Inc., 2010. 565 s.
- [12] *Maxwell 14.0* [online]. Canonsburg : ANSYS, Inc., 2010 [cit. 2011-11-05]. <http://www.ansoft.com/products/em/maxwell/datasheet.cfm?f=Maxwell_Flysheet.pdf>.
- [13] *RMXprt* [online]. Pittsburgh : ANSYS, Inc., 2010 [cit. 2011-11-05]. <http://www.ansoft.com/products/em/rmxprt/datasheet.cfm?f=rmxprt_Flysheet.pdf>.
- [14] TANG, Zerd. *Ansoft EMDM* [online]. Pittsburgh : ANSYS, Inc., 2010 [cit. 2011-11-05]. <http://www.ansoft.com/workshops/Ansoft_EMDM/Ansoft_EMDM.cfm>.
- [15] HOLUB, Gustav. Nové třídy účinností asynchronních motorů. *Elektro*. 2011, 6, s.44.
- [16] Tkotz a kol.: *Příručka pro elektrotechnika*. ČR : Europa Sobotáles, 2006. 623 s. ISBN 80-86706-13-3



-
- [17] S. MANOHARAN, N. DEVARAJAN, S. DEIVASAHAYAM, G. RANGANATHAN. *Review on efficiency improvement in squirrel cage induction motor by using dcr technology*, Journal of Electrical engineering vol. 60,no. 4, s 227-236, 2009
- [18] KOPYLOV a kol.: *Stavba elektrických strojů*. Praha : SNTL, 1988. 688 s.
- [19] POLIAK, František, Viliam FEDÁK a Ladislav ZBORAY. *Elektrické pohony*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1987, 616 s.
- [20] PATOČKA, Miroslav. *Vybrané statě z výkonové elektroniky svazek II: Pulsní měniče bez transformátoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2005, 173 s.
- [21] BÁRTA, J. *Synchronizovaný asynchronní motor*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 31 s. Semestrální práce. Vedoucí semestrální práce doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc..

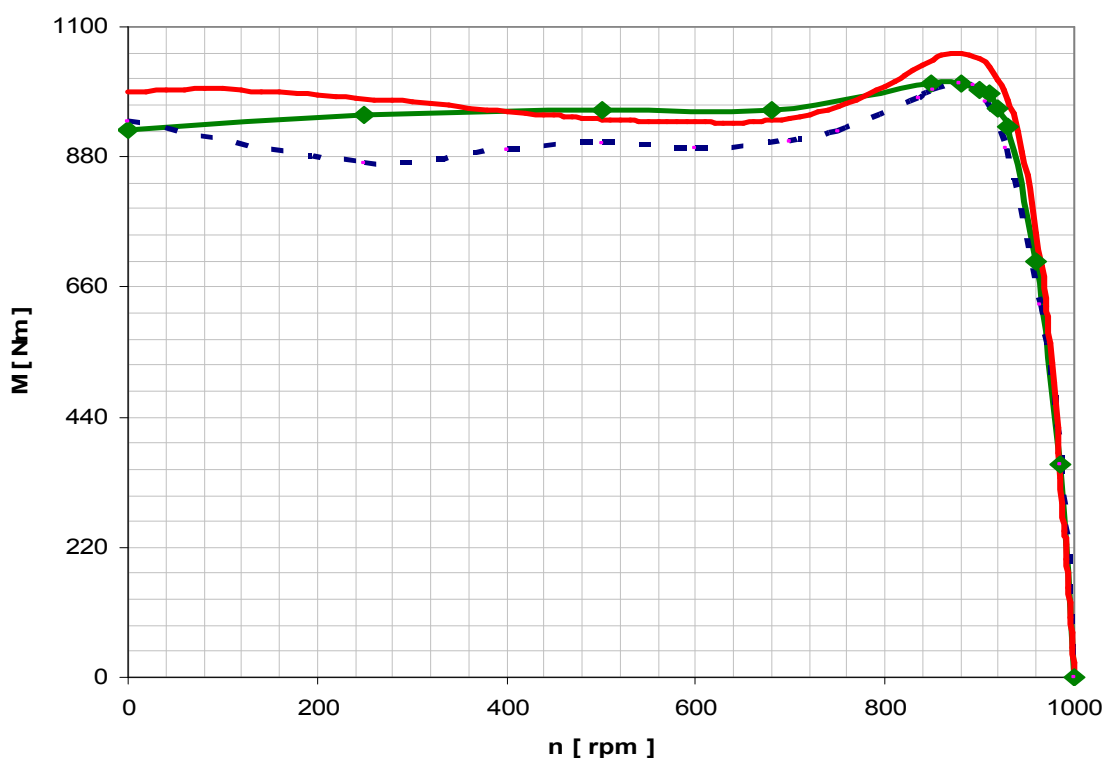
PŘÍLOHY

Část A – Výsledné závislosti modelu asynchronního motoru



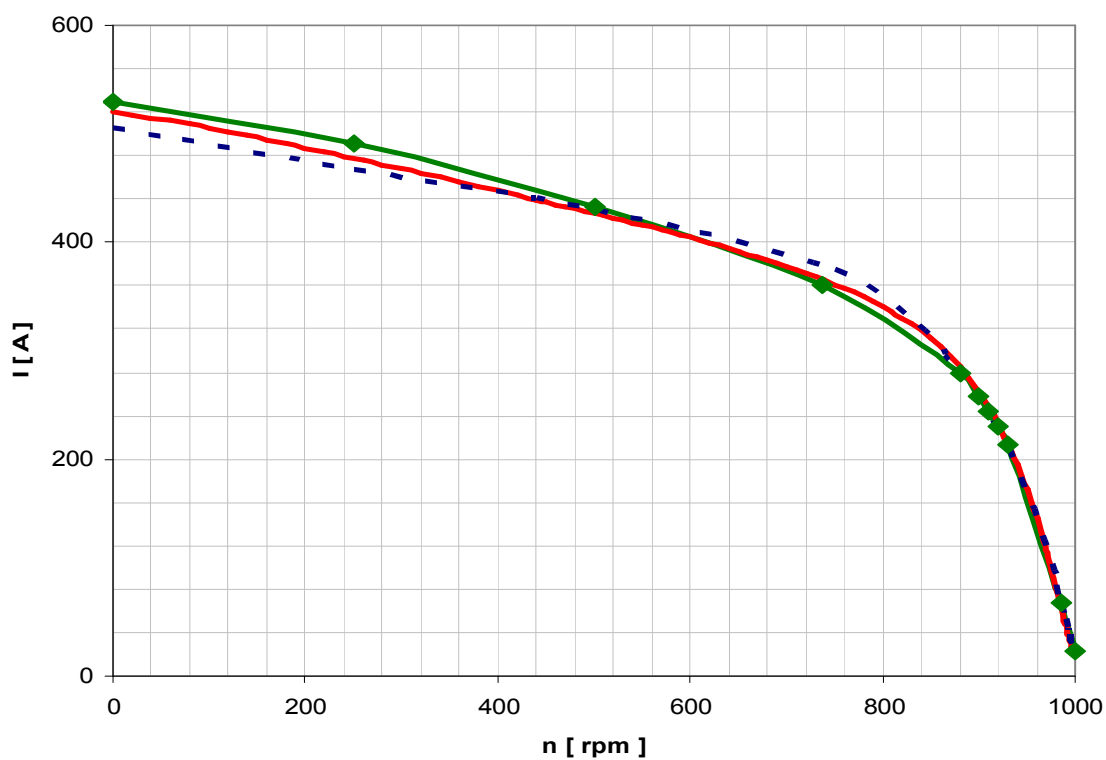
Obr. (A1) Závislost a) momentu b) proudu na otáčkách asynchronního motoru v pracovní oblasti

Modře – průběh typové zkoušky, Zeleně – průběh Maxwell 2D, Červeně – průběh RMXprt



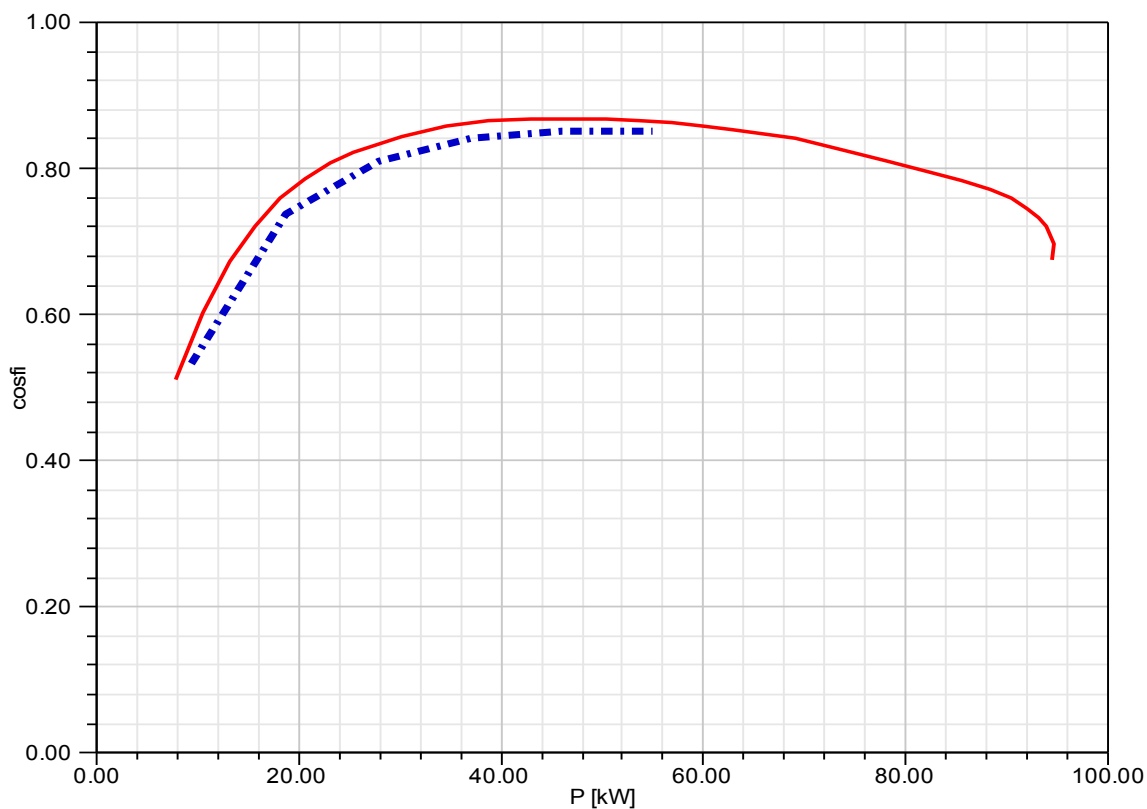
Obr. (A2) Závislost momentu na otáčkách asynchronního motoru

Modře – průběh typové zkoušky, Červeně – průběh RMXprt, Zeleně – průběh Maxwell 2D

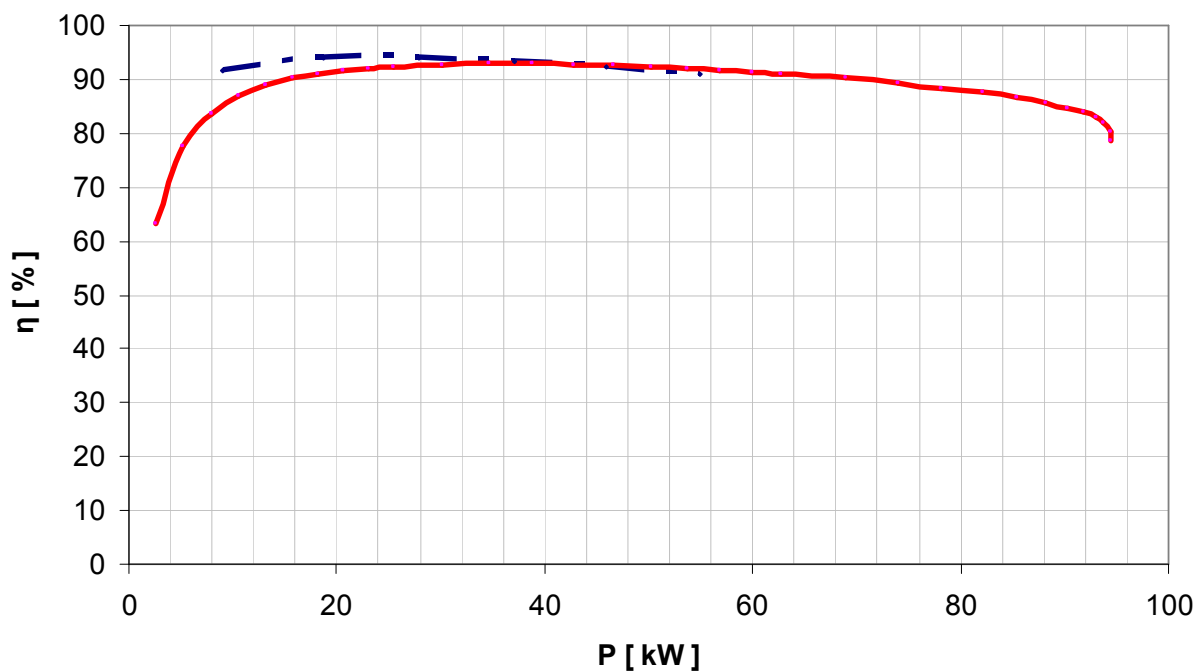


Obr. (A3) Závislost proudu na otáčkách asynchronního motoru

Modře – průběh typové zkoušky, Červeně – průběh RMXprt, Zeleně – průběh Maxwell 2D

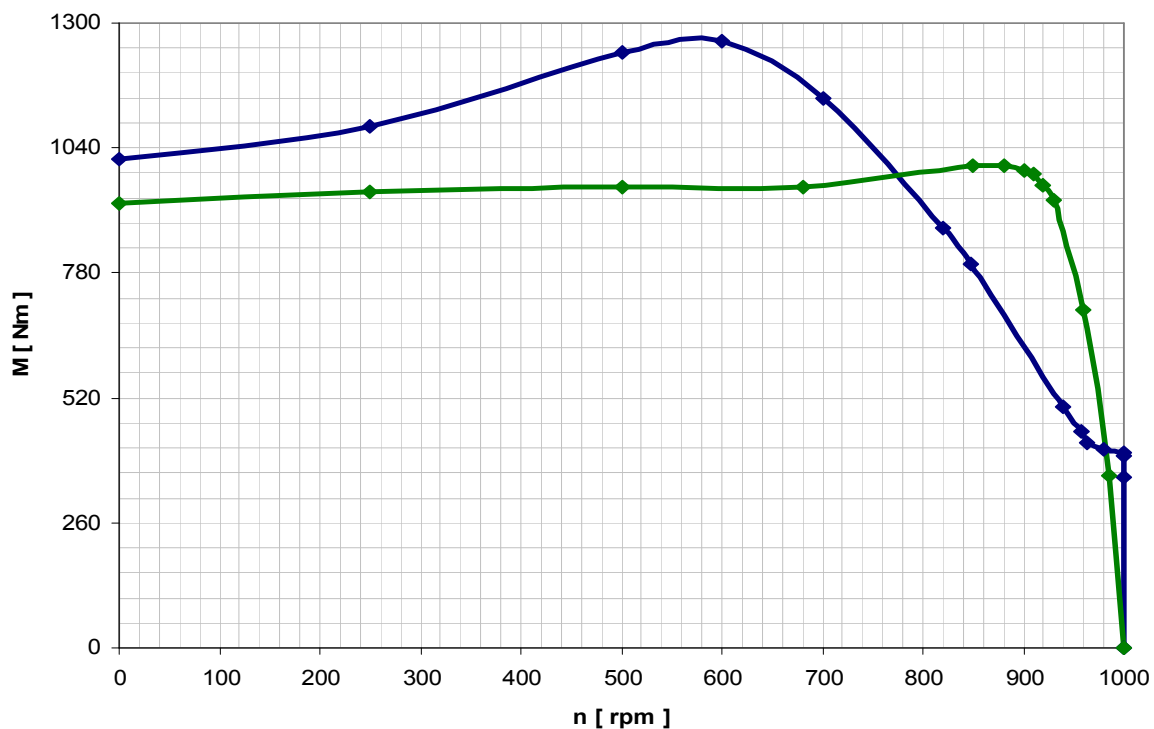


Obr. (A4) Závislost účinníku na výkonu asynchronního motoru
Modře – průběh typové zkoušky, Červeně – průběh RMXprt

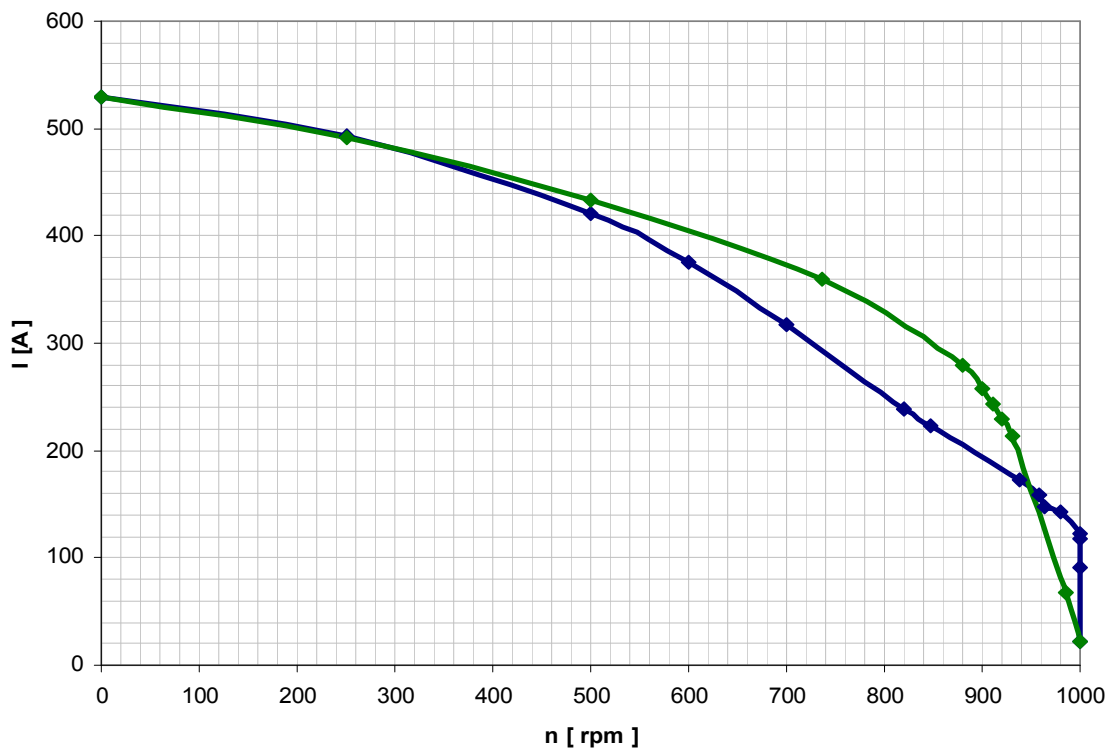


Obr. (A5) Závislost účinnosti na výkonu asynchronního motoru
Modře – průběh typové zkoušky, Červeně – průběh RMXprt

Část B – Výsledné závislosti synchronizovaného asynchronního motoru s laminovaným rotorem



Obr. (B1) Závislost momentu na otáčkách synchronizovaného asynchronního motoru
Modře – průběh SAM Maxwell 2D, Zeleně – průběh AM Maxwell 2D



Obr. (B2) Závislost proudu na otáčkách synchronizovaného asynchronního motoru
Modře – průběh SAM Maxwell 2D, Zeleně – průběh AM Maxwell 2D