

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

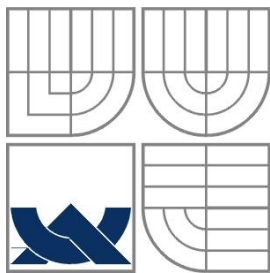
VÝPOČET PARAMETRŮ ASYNCHRONNÍHO MOTORU METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

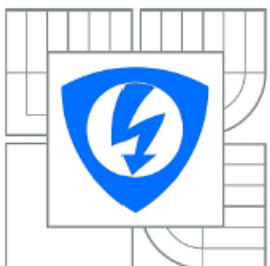
Bc. Michal Pešek

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

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

VÝPOČET PARAMETRŮ ASYNCHRONNÍHO MOTORU METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ

**CALCULATION OF THE PARAMETERES OF ASYNCHRONOUS MOTOR BY FINITE ELEMENT
METHOD**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

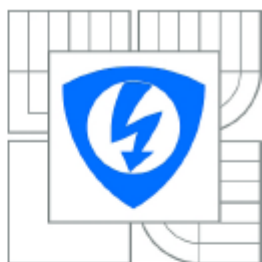
Bc. Michal Pešek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Bc. Michal Pešek

ID: 77889

Ročník: 2

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Výpočet parametrů asynchronního motoru metodou konečných prvků

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popište konstrukci asynchronních motorů a s možností řešení elektromagnetických polí metodou konečných prvků (MKP).
2. Vypočtete parametry zadaného asynchronního motoru analyticky a metodou konečných prvků na základě dodané výrobní dokumentace.
3. Proveďte experimentální analýzu zadaného motoru a dosažené výsledky vzájemně porovnejte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího

Termín zadání: 23.9.2010

Termín odevzdání: 23.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Práce se zaměřuje na využití metody konečných prvků, pro účely modelování asynchronního stroje. Zde je použit program FEMM, který počítá s fyzicky nepohyblivými dvourozměrnými modely. Model byl vytvořen na základě existujícího motoru. Pak se provedla série simulací, pomocí kterých se následně vypočítaly parametry náhradního schématu. Změřil se existující motor a provedl se výpočet náhradního schématu také z motoru. Porovnála se data získaná z motoru i modelů a průběhy momentů. Momenty se zjišťovaly na určitých frekvencích skluzu, při napájení náhradního schématu napětím a pak i naměřeným proudem.

Abstract

This project is focused on finite element method, for purposes of asynchronous motor modeling. Program FEMM is used here, which works with two-dimensional models. The model is based on an existing motor. Then was conducted a series of simulations that are used to calculate the parameters of the circuit model. Then was measured the existing asynchronous motor and performed the calculation of the circuit model parameters of the motor. Compared with data obtained from motor and models Then was compared their torque characteristics. Moments was identified at certain slip frequencies and voltage or current in circuit model.

Klíčová slova

Asynchronní motor; FEMM; metoda konečných prvků; modelování; náhradní schéma

Keywords

Asynchronous motor; FEMM; finite element method; modeling; circuit model

Bibliografická citace

PEŠEK, M. *Výpočet parametrů asynchronního motoru metodou konečných prvků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 57 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ondřej Vítek, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Výpočet parametrů asynchronního motoru metodou konečných prvků, jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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

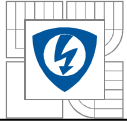
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Ondřeji Vítkovi Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé semestrální práce.

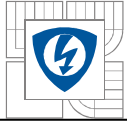
V Brně dne

Podpis autora



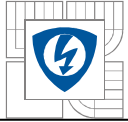
OBSAH

1 ÚVOD	14
2 ASYNCHRONNÍ MOTOR	15
2.1 ASYNCHRONNÍ MOTOR OBECNĚ.....	15
2.2 MOMENT ASYNCHRONNÍHO MOTORU	16
2.3 PŘEMĚNA ENERGIE A ZTRÁTY	17
2.4 SPOUŠTĚNÍ MOTORU	19
2.5 ŘÍZENÍ OTÁČEK.....	20
3 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ	21
3.1 PROGRAM FEMM.....	21
4 MODEL ASYNCHRONNÍHO MOTORU	23
4.1 PARAMETRY NÁHRADNÍHO SCHÉMATU - ROVNICE	23
4.2 ZJIŠTĚNÍ PARAMETRŮ NÁHRADNÍHO SCHÉMATU - FEMM	25
4.2.1 MODEL MOTORU	26
4.2.2 VODIVOST KLECE.....	27
4.2.3 SIMULACE MOTORU	28
4.3 VÝPOČET PARAMETRŮ Z VÝSLEDKU ANALÝZY	30
4.4 VÝPOČET ZTRÁT STATORU.....	34
4.5 VÝPOČET ZTRÁT ROTORU	36
5 MOTOR TM90-4S	37
5.1 ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKA.....	37
5.2 MĚŘENÍ NAPŘÁZDNO	40
5.3 VÝPOČET PARAMETRŮ NÁHRADNÍHO SCHÉMATU	41
6 SROVNÁNÍ MĚŘENÉHO MOTORU A MODELŮ	44
6.1 VÝPOČET MOMENTU - NAPĚTÍM NAPÁJENÉ NÁHRADNÍ SCHÉMA	44
6.2 MOMENT MOTORU – VNUCENÍ ZMĚŘENÉHO PROUDU A SKLUZU.....	46
6.3 SROVNÁNÍ PRŮBĚHŮ	47
LITERATURA	51
PŘÍLOHY	52



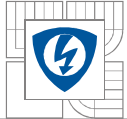
SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 2-1 Klecové vinutí</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 2-2 Křivka mms</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 2-3 Momentová charakteristika $M = f(s)$</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 2-4 Tok výkonu</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 2-5 Proudová hustota ve vodiči při $f_2 \approx f_1$</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 3-1 Náhled na prostředí programu FEMM</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 4-1 Plechy a drážky simulovaného motoru</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 4-2 Schéma jedné fáze motoru v ustáleném stavu</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 4-4 Model motoru vytvořený v programu FEMM</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 4-5 Magnetická indukce v motoru při frekvenci 3,0 Hz a proudu 1A</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 4-6 Rozložení proudů pro ve vinutí</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 4-7 Indukce při jmenovitém proudu</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 5-1 Schéma zapojení proměření zatěžovací charakteristiky</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 5-2 Schéma zapojení pro měření naprázdno</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 5-3 Magnetické pole při chodu naprázdno</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 6-1 Náhradní schéma - Analyticky</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 6-2 Náhradní schéma - FEMM</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 6-3 Vyjádření schématu pomocí impedancí</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 4 Motor TM90-4S a dynamometr</i>	<i>57</i>



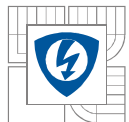
SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1</i>	<i>Hodnoty vypočítané FEMMem, pro zjištění parametrů náhradního schématu</i>	<i>29</i>
<i>Tabulka 2</i>	<i>Data výpočtu rozptylové indukčnosti, vztah (49).</i>	<i>33</i>
<i>Tabulka 3</i>	<i>Naměřené parametry motoru</i>	<i>41</i>
<i>Tabulka 4</i>	<i>Srovnání hodnot náhradního schématu vypočítaných pomocí FEMMu a z měření</i>	<i>44</i>
<i>Tabulka 5</i>	<i>TM90-4S Měření zatěžovací charakteristiky, změřené a vypočtené hodnoty.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 6</i>	<i>TM90-4S Měření naprázdno, změřené a vypočtené hodnoty.</i>	<i>53</i>
<i>Tabulka 7</i>	<i>Hodnoty momentu - souhrn</i>	<i>54</i>
<i>Tabulka 8</i>	<i>Náhradní schéma - výpočet momentu</i>	<i>55</i>
<i>Tabulka 9</i>	<i>Porovnání proudů náhradních schémat a fáze motoru</i>	<i>56</i>



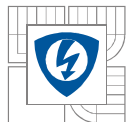
Seznam grafů

<i>Graf 4-1 Linearizace materiálu M700-50A.....</i>	<i>27</i>
<i>Graf 4-2 Namodelované hodnoty rozptylové indukčnosti při konstantním proudu, pro různé skluzové frekvence.</i>	<i>33</i>
<i>Graf 5-1 Závislost otáček na momentu na hřídeli.....</i>	<i>38</i>
<i>Graf 5-2 Závislost momentu na frekvenci skluzu</i>	<i>38</i>
<i>Graf 5-3 Závislost výkonu na momentu motoru</i>	<i>39</i>
<i>Graf 5-4 Závislost účinnosti na momentu motoru.....</i>	<i>39</i>
<i>Graf 5-5 Aproximace mechanických ztrát.....</i>	<i>40</i>
<i>Graf 6-1 Moment v závislosti na frekvenci skluzu - náhradní schéma napájené napětím</i>	<i>46</i>
<i>Graf 6-2 Závislost momentu na skluzu - model napájený proudem</i>	<i>47</i>
<i>Graf 6-3 Závislost momentu na skluzu - model napájený proudem</i>	<i>48</i>
<i>Graf 6-4 Proud fázový v závislosti na frekvenci skluzu.....</i>	<i>49</i>



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

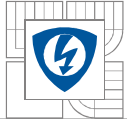
Značka	název veličiny	Jednotka
B	magnetická indukce	T
C_1	komplexní činitel rozptylu	
D_e	vnější průměr statoru	m
F_m	magnetomotorická síla (mms)	A
f	kmitočet	Hz
G	hmotnost	kg
I, (i)	efektivní (okamžitá) hodnota proudu	A
I_{1fk}	primární fázový proud nakrátko	A
I_{Rn}	reálná část proudu naprázdno	A
I_2	proud rotoru asynchronního motoru	A
I_z	záběrný proud	A
I_n	jmenovitý proud	A
i_m	magnetizační proud	A
J	moment setrvačnosti	kg . m ²
k	činitel, řád vyšší harmonické proudu	
k_i	Poměr záběrného proudu ke jmenovitému proudu	
k_M	Poměr záběrného momentu ke jmenovitému momentu	
k_{min}	Poměr nejmenšího rozběhového momentu ke jmenovitému momentu	
L_r	rozptylová indukčnost	H
L_m	magnetizační indukčnost	H
L_i	imaginární část indukčnosti	H
L_{re}	reálná část indukčnosti	H
l_k	vzdálenost mezi tyčemi rotoru	m
l_t	délka tyče rotoru	m
M	mechanický moment motoru	N . m
M_{max}	moment zvratu	N . m
M_{min}	nejmenší rozběhový moment	N . m
M_n	jmenovitý moment	N . m
M_p	zátěžný moment	N . m



M_0	stálá složka momentu na hřídeli	N . m
M_z	záběrný moment	N . m
m	počet fází	
n	otáčky	s ⁻¹
n_1	otáčky statorového pole	s ⁻¹
n_2	otáčky rotoru	s ⁻¹
P_{1fk}	příkon fáze nakrátko	W
P_{1fn}	příkon fáze naprázdno	W
P_i	vnitřní (elektromagnetický) výkon	W
P_{mech}	mechanický výkon	W
P_p	činný příkon	W
ΔP	ztráty	W
ΔP_d	ztráty přidavné	W
ΔP_{Fe}	ztráty v železe	W
ΔP_j	ztráty ve vinutí	W
ΔP_{mech}	ztráty mechanické	W
p	počet pólových dvojic	
$p_{1,0}$	měrné ztráty elektrotechnické oceli při B = 1 T, f = 50 Hz	W . Kg ⁻¹
R_2	odpor jedné fáze rotoru	Ω
R_k	odpor kruhu na rotoru	Ω
R_t	odpor tyče v kleci rotoru	Ω
$R_{t,ekv}$	ekvivalentní odpor tyče v kleci rotoru	Ω
S_t	plocha tyče rotoru	m ²
s	skluz	p.j
s_{max}	skluz zvratu	p.j
$U, (u)$	efektivní (okamžitá) hodnota napětí	V
U_{R1}	napětí na R_1 náhradního schématu	V
U_{Lr}	napětí na rozptylové indukčnosti	V
$X_{2\sigma}$	rozptylová reaktance rotoru při s = 1	Ω
Z	impedance	Ω
γ	konduktivita	S . m ⁻¹
δ	radiální rozměr vzduchové mezery	m



μ_0	permeabilita vakua	$\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$
ρ_{Al}	měrný odpor hliníku	$\Omega \cdot \text{m}$
$\rho_{Al,ekv}$	ekvivalentní měrný odpor hliníku	$\Omega \cdot \text{m}$
τ	časová konstanta rotoru	s
ϕ	magnetický tok	Wb
φ	úhel	rad (deg)
φ_U	úhel napětí mezi reálnou a komplexní hodnotou	rad (deg)
φ_I	úhel proudu mezi reálnou a komplexní hodnotou	rad (deg)
ω	úhlová rychlost	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$
ω_1	úhlová rychlost točivého pole (synchronní)	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$
ω_2	mechanická úhlová rychlost rotoru	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$
ω_s	úhlová rychlost skluzu	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$



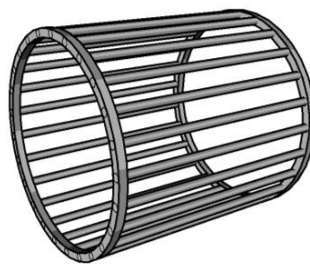
1 ÚVOD

Modelování se používá v mnoha oblastech lidské činnosti, ať už v elektrotechnice, při vývoji materiálů, nebo při předpovědi počasí. Oblastí využití je ohromné množství a tomuto rozvoji pomáhá značný nárůst výpočetního výkonu a jeho neustále se snižující náklady. S cenou také souvisí náklady na vývoj zařízení, které jsou u simulace daleko nižší, než výroba testovacích prototypů, například v automobilovém průmyslu. Samozřejmě existují oblasti, kde modely nemůžou pomoci, například pro nedostatek informací potřebných na vytvoření takového modelu, anebo je to neekonomické. Tato práce obsahuje jedno z možných využití modelování metodou konečných prvků, pro výpočet parametrů náhradního schématu. Zde je modelování využitelné poměrně lehce, máme-li informace o materiálech a rozměrech stroje.

2 ASYNCHRONNÍ MOTOR

2.1 Asynchronní motor obecně

Asynchronní trojfázový motor má obvykle na statoru vstupní vinutí, které se připojuje k síti, nebo jinému zdroji napětí. Rotorové vinutí je buď vyvedeno na kroužky, nebo je provedeno jako klec nakrátko bez vyvedení, proud klece vzniká indukovaným napětím magnetickým polem statoru, které se otáčí, materiál bývá měď, hliník, nebo jejich slitiny. Magnetický obvod je většinou proveden bez vyniklých pólů.



Obrázek 2-1 Klecové vinutí

Mezi vinutím statoru a rotoru je magnetická vazba. Při průtoku proudem statoru se vytvoří magnetomotorická síla, kterou si můžeme představit jako vektor \mathbf{F}_{m1} , který se otáčí v prostoru

$$\omega_1 = 2\pi f_1 \frac{1}{p} \quad (1)$$

úhlovou rychlostí.

Rotor se otáčí ve stejném směru úhlovou rychlostí

$$\omega_2 = \omega_1(1 - s) \quad (2)$$

kde

$$s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} \quad (3)$$

je skluz.

Příkon dodávaný ze sítě do statoru motoru je

$$P_p = 3 \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi \quad (4)$$

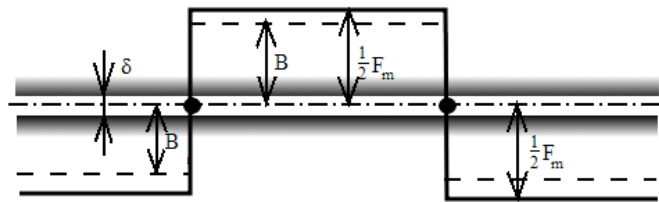
Rozložení proudu v drážkách se neustále periodicky mění. Tvar magnetického pole proto také mění, proto ho vztahujeme k určitému okamžiku. Ukázka magnetomotorických sil a indukce B , je na jednoduchém modelu rozložení vzduchové mezery, s jedinou cívkou Obrázek 1-2. Střední hodnota plochy mms nad a pod osou je nulová. Při otočení směru proudu se pole otočí.

Vzduchová mezera je konstantní. Za předpokladu permeability feromagnetických částí statoru i rotoru $\mu \approx \infty$ pak pro uzavřenou magnetickou silokřivku platí

$$\oint H dl = \frac{B}{\mu_0} 2\delta = F_m \quad (5)$$

δ – radiální směr vzduchové mezery [m]

$F_m = iN$ – mms cívky [A]



Obrázek 2-2 Křivka mms

2.2 Moment asynchronního motoru

Točivé magnetické pole statoru, spolu s proudem rotoru, vytvoří moment otáčející rotorem ve směru otáčení magnetického pole. Tento moment současně působí na stator stroje v opačném směru a jeho roztočení brání upevnění motoru k podkladu. Točivý moment asynchronního stroje

$$M = \frac{m_2 R_2 I_2^2}{\omega_1 s} = \frac{P_i}{\omega_1} \quad [Nm; W; s^{-1}] \quad (6)$$

Pro přepočtené veličiny.

$$M = \frac{m_1 R_2' I_2'^2}{s \omega_1} \quad (7)$$

Odpor ve srovnání s reaktancemi je malý, a proto velikost momentu závisí především na těchto reaktancích. Maximální moment stroje pracujícího jako alternátor $M_{\max M}$ je větší než maximální moment motoru $M_{\max M}$. Změnou R_2 se změní skluz, při kterém motor dosáhne M_{\max} , ale maximální velikost momentu se nezmění.

Nebo výraz vhodný pro rozbor práce asynchronního stroje z T článku.

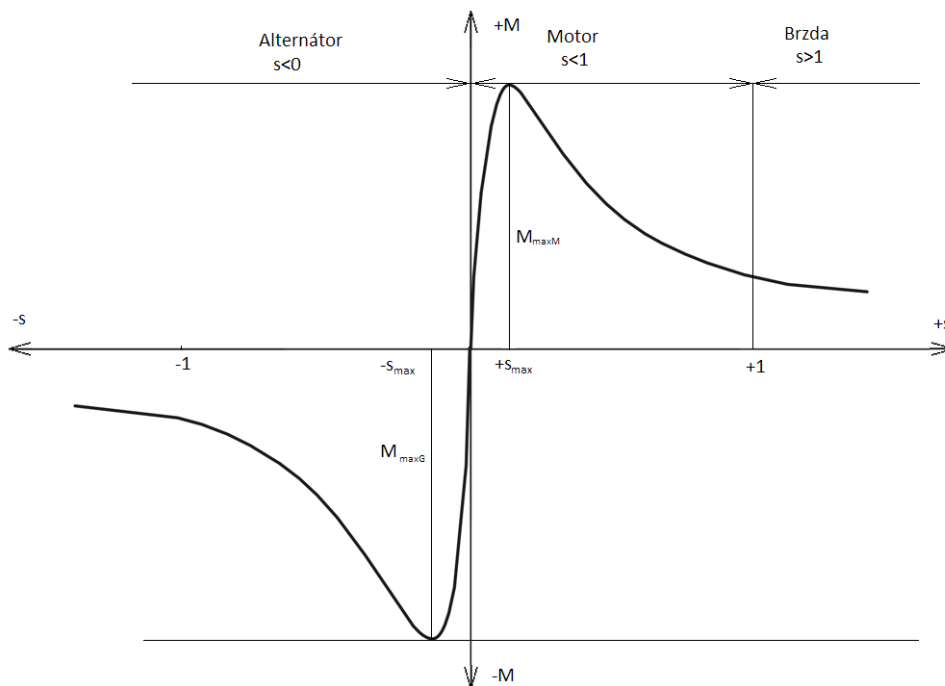
$$M = \frac{m_1 R_2' U_2'^2}{s \omega_1 \left[\left(R_1 + c_1 \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_{1\sigma} + c_1 X_{2\sigma}')^2 \right]} \quad (8)$$

Protože při $U_1 = \text{konst.}$ Má proměnou pouze veličinu s . Z toho plyne, že při zadaném skluzu je točivý moment úměrný čtverci napětí statoru U_1 .

Činitel c_1 je přibližně roven činiteli rozptylu. R_2' je přepočítaný odpor rotoru. $X_{2\sigma}'$ je přepočítaná rozptylová reaktance rotoru při $s = 1$.

Klossův vztah

$$M = \frac{2 \cdot M_{\max}}{\frac{s_{\max}}{s} + \frac{s}{s_{\max}}} \quad (9)$$



Obrázek 2-3 Momentová charakteristika $M = f(s)$

2.3 Přeměna energie a ztráty

Příkon přicházející na stator se zmenší o ztráty ve vinutí statoru ΔP_{j1} a o ztráty v železe statoru ΔP_{Fe1} a prochází přes pole ve vzduchové mezeře do rotoru $P_i = P_p - \Delta P_{j1} - \Delta P_{Fe1}$, kde se ke ztrátám v železe rotoru ΔP_{Fe2} a ve vinutí rotoru ΔP_{j2} , přidají ztráty mechanické ΔP_{mech} , které

zahrnují i ventilační ztráty a nakonec přidavné ztráty v železe $\Delta P'_d$. Zbylý mechanický výkon se hřídelí předává poháněnému zařízení.

Schéma přeměny výkonu je na Obrázku 2-4. a plyne z něj pro moment na hřídeli

$$M_2 = \frac{P}{\omega_2} = \frac{P_p - \Delta P_{j1} - \Delta P_{Fe1} - \Delta P_{j2} - \Delta P_{Fe2} - \Delta P_{mech} - \Delta P'_d}{\omega_2} \quad (10)$$

Ztráty ve vinutí určíme ze vztahu po dosažení odporu vinutí a efektivní hodnoty proudu

$$\Delta P_j = RI^2 \quad (11)$$

Ztráty v železe (hysterezní a vířivé) v určité části obvodu

$$\Delta P_{Fe} = p_{1,0} k_p G B^n \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \quad (12)$$

B – amplituda sinusové indukce [T]

G – hmotnost části [kg]

$p_{1,0}$ - měrné ztráty použité el. tech. oceli při B = 1 T a f = 50 Hz [W · Kg⁻¹]

k_p – činitel zvětšení ztrát vlivem vyšších harmonických polí a změnou struktury oceli během výroby

$n = 5,69 \log p_{1,5}/p_{1,0}$, zpravidla $n = 2$, $p_{1,5}$ – měrné ztráty při B = 1,5 T a f = 50 Hz

Mechanické ztráty můžeme vypočítat pouze přibližně za použití empirických vzorců, pro motor s povrchovým chlazením to je

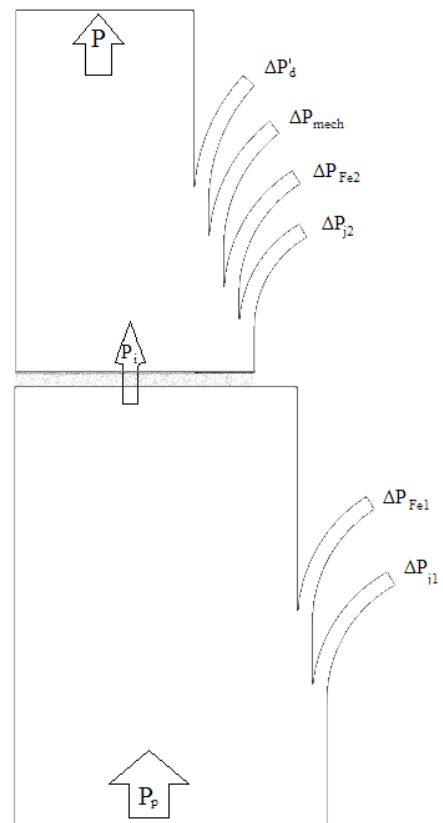
$$\Delta P_{mech} \approx k \left(\frac{n}{1000}\right)^2 (10D_e)^4 [W] \quad (13)$$

D_e – vnější průměr statoru [m]

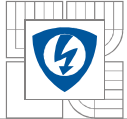
$k \approx 1,3(1 - D_e)$ pro stroje $2p = 2$

$k \approx 1$ pro stroje $2p > 2$

n – otáčky [min⁻¹]



Obrázek 2-4 Tok výkonu



Dodatečné ztráty přidáváme k ostatním ztrátám, ať už naměřeným, nebo vypočteným, pro zpřesnění ztrát. Přídavné ztráty jsou způsobeny všemi, dosud při výpočtech zanedbanými jevy, jako rozptylovými magnetickými toky a vyššími harmonickými.

2.4 Spouštění motoru

Impedance motoru při stojícím rotoru je podstatně menší než při otáčejícím se. To je příčinou proudových rázů při spouštění a tím i možných poklesů napětí v síti.

Pro posouzení motoru můžeme použít tyto základní ukazatele.

Poměr záběrného proudu ($s = 1$) ke jmenovitému proudu

$$k_i = \frac{I_z}{I_n} \quad (14)$$

nesmí při jmenovitém napětí a kmitočtu přesáhnout 7,5 násobek jmenovitého proudu.

Poměr záběrného momentu ($s = 1$) ke jmenovitému momentu

$$k_M = \frac{M_z}{M_n} \quad (15)$$

Poměr nejmenšího rozběhového momentu ke jmenovitému momentu

$$k_{min} = \frac{M_{min}}{M_n} \quad (16)$$

kteřý pro asynchronní motor nakrátko při jmenovitém napětí a proudu nesmí být menší než 0,5 násobek záběrného momentu.

Další parametry jsou plynulost rozběhu, ztráty energie při rozběhu, oteplení motoru, jednoduchost spouštění, záběrné číslo, míra rozběhu.

Impedance rotoru při spouštění se rovná impedanci nakrátko. Snížit proto záběrný proud můžeme buď, zvýšením impedance u kroužkového rotoru, nebo snížením napájecího napětí anebo změnou reaktance, zapojením indukčnosti nebo kapacity do obvodu.

Pro rozběh motoru je rozhodující rovnice momentů působících na motor.

$$M + J \frac{d\omega_2}{dt} + M_p + M_0 = 0 \quad (17)$$

M – moment motoru [N . m]

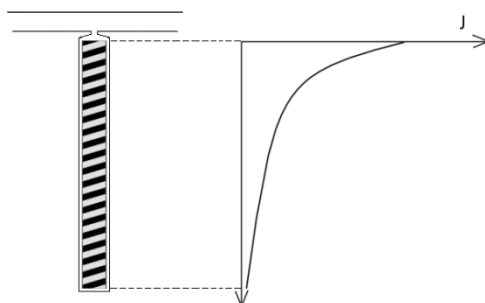
J – moment setrvačnosti [kg . m²]

ω_2 – úhlová rychlost rotoru [s⁻¹]

M_p – zátěžný moment [N . m]

M_0 – moment ztrát mechanických a přídavných [N . m]

Zvětšit odpor vinutí klece během rozběhu lze také vírovou klecí, která obsahuje relativně vysoké a úzké vodiče lichoběžníkového, nebo obdélníkového tvaru. Při rozběhu je frekvence rotoru přibližně rovna frekvenci statoru, proto vznikají v tyčích značné vířivé proudy, vyvolané rozptylovým polem drážek rotoru a mění rozdělení proudové hustoty v tyči Obrázek 2-5. Proud je soustředěný u vzduchové mezery, což má za následek výrazné zvýšení ztrát odpovídající zařazení přídavného odporu do rotoru. Při jmenovitých otáčkách je proudové rozdělení prakticky rovnoměrné.



Obrázek 2-5 Proudová hustota ve vodiči při $f_2 \approx f_1$

2.5 Řízení otáček

Otáčky asynchronního motoru jsou

$$n_2 = n_1(1 - s) = \frac{60f_1}{p}(1 - s) \quad (18)$$

Z toho plyne, že otáčky n_2 lze při daném momentu řídit změnou kmitočtu f_1 , nebo počtu pólů $2p$, nebo změnou skluzu. Ale zatížitelnost se u strojů s vlastním chlazením podstatně snižuje.

Kmitočtet je možné měnit, jestliže napájíme motor přes polovodičový měnič. Přitom je potřeba dodržovat podmínku $U_1/f_1 = \text{konstantní}$, aby se neměnilo sycení magnetického obvodu a tím i charakteristiky motoru.

Řízení změnou počtu pólů přepnutím statorového vinutí je skoková změna otáček synchronního pole statoru. Obvykle se provádějí se dvěma, až čtyřmi stupni synchronních otáček.

Skluz lze měnit změnou napětí, nebo změnou odporu vinutí statoru či rotoru. Ze vztahu pro moment

$$M = \frac{m_1 U_1^2 R_2'}{s\omega \left[\left(R_1 + C_1 \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_{1\sigma} + C_1 X_{2\sigma}')^2 \right]} \quad (19)$$



3 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ

Metoda konečných prvků je účinná metoda k řešení všech okrajových úloh inženýrské praxe, popsaných diferenciálními rovnicemi. Metoda byla vyvinuta s nástupem digitálních počítačů ke konci padesátých let k řešení úloh z pružnosti a pevnosti v leteckém průmyslu. V krátké době byla zavedena v řadě oblastí ve strojírenství, stavebnictví a v elektrotechnice, Zavádějí se oblasti, kde se počítá pole, uzly a uzlové potenciály. Uzly však mohou být rozloženy v oblasti nerovnoměrně a mohou tak sledovat tvar hraničních ploch. V místech, kde se očekává prudká změna pole, se zavede větší hustota sítě.

Sestaví se soustava rovnic pro neznámé uzlové hodnoty. Koeficienty matice soustavy a pravých stran se nepočítají z diferencií, nahrazujících derivace, ale jako integrály přes elementární plošky nebo objemy, v jejich vrcholech jsou uzly. Tyto elementární útvary jsou nazývány konečné prvky.

Metoda konečných prvků je založena na myšlence využít co nejnižší stupeň aproximačního polynomu. Co nejnižší znamená vybrat takový stupeň polynomu, který po dosazení do příslušné diferenciální rovnice představuje ještě netriviální řešení. Např. Aproximace stupňovitou po částech konstantní funkcí nelze použít pro řešení diferenciálních rovnic vůbec, neboť po dosazení konstantních hodnot jsou derivace nulové. Zdálo by se, že rovnice 2. řádu budou vyžadovat alespoň kvadratickou aproximaci. Víme však, že integrací per partes lze snížit řád rovnice o jeden. Tento princip platí i pro parciální diferenciální rovnice. Proto vystačíme pro rovnici 2. řádu s lineární aproximací. MKP tedy nevyužívají aproximaci polynomu vyšších řádů na dlouhém polynomu, ale naopak na mnoha malých intervalech lineární nebo nejvýše kvadratickou aproximaci.

Postup při aplikaci MKP sestává z těchto kroků:

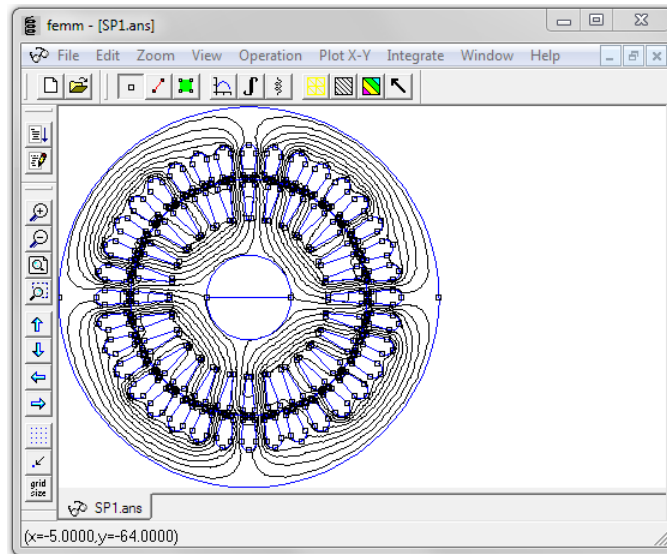
1. generace sítě prvků s uzly.
2. Aproximace potenciálu na jednotlivých prvcích z uzlových hodnot.
3. Dosazení zvolené aproximace do diferenciální rovnice nebo jejího ekvivalentu a sestavení soustavy rovnic pro neznámé uzlové hodnoty.
4. Vyřešení soustavy.
5. Zpracování dodatečných požadavků – výpočet dalších veličin a zobrazení výsledků.

3.1 Program FEMM

Jeho základní vlastností je, že modeluje statické situace na základě zadaných parametrů pro daný okamžik. Z toho plyne jisté omezení při zkoumání v čase závislých jevů, které lze modelovat pouze nepřímo za pomoci dodatečných výpočtů mimo FEMM.

Modely se zde také tvoří jako dvou rozměrné, čili jako řez s udanou hodnotou hloubky modelu, to je další omezení, při modelování prostorově jednodušších strojů to však není negativní vlastnost.

Program je šířen volně a jeho používání není omezeno při nevýdělečných činnostech, v licenční smlouvě to lze nalézt podrobně vysvětleno.



Obrázek 3-1 Náhled na prostředí programu FEMM

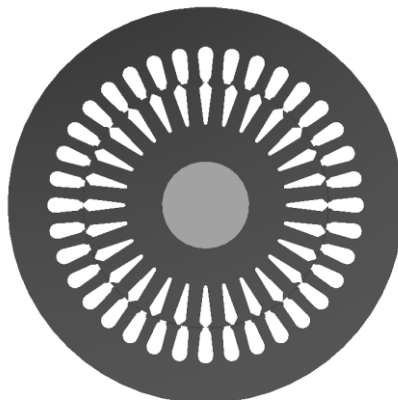
Je možné zde vytvořit geometrii modelu pomocí jednoduchých nástrojů zde obsažených, nebo importovat již vytvořený model ve formátu *.dxf z libovolného cad programu, který formát podporuje. Potřeba je si dát pozor při importu geometrie s miniaturními částmi při mezerami na zaokrouhlování, případně přezkontrolovat pozice bodů.

Na výběr je mnoho materiálů, umístěných v knihovně a lze si definovat vlastní, je-li to potřeba. Vytvořeným cívkám se definuje proud, klidně i v komplexním tvaru. FEMM nepracuje s napěťovými zdroji. Potom, když je motor nakreslený, materiály přiřazeny a proudy definovány. Zvolí se dostatečná hustota sítě konečných prvků, obzvláště v místech velkých změn veličin, jako třeba vzduchová mezera, nebo hrany. Poté se provede samotný výpočet a extrahování hledaných hodnot, nebo jejich dopočet v post-processoru FEMMu.

Jazyk Lua se používal pro dávkové zpracování ve FEMMu. Tím nám může ušetřit mnoho času při počítání většího množství hodnot, jako třeba různé natočení rotoru motoru nebo změna frekvence, pomocí jednoduchého skriptu. Nebo se může zadávat přímo do Lua konzole. Lua je open source skriptovací jazyk. Skripty jsou textové soubory a lze je editovat v jakémkoliv textovém editoru. FEMM obsahuje Lua 4.0. Jako přídavek ke standardním příkazům byly přidány příkazy pro manipulaci se soubory v pre a post-processoru.

4 MODEL ASYNCHRONNÍHO MOTORU

V programu FEMM byl vytvořen model [3] malého asynchronního motoru 1,1 kW, 135 mm vnější průměr. Stator obsahuje 36 drážek, rotor 28. Vzduchová mezera mezi státorem a rotorem má 0,25 mm. Hloubka plechů motoru je 78 mm. Jedná se o 4 pólový stroj. Jmenovitý proud 2,64 A. Model je dvourozměrný, v programu se vytvoří pouze řez motorem a definuje se jeho hloubka.



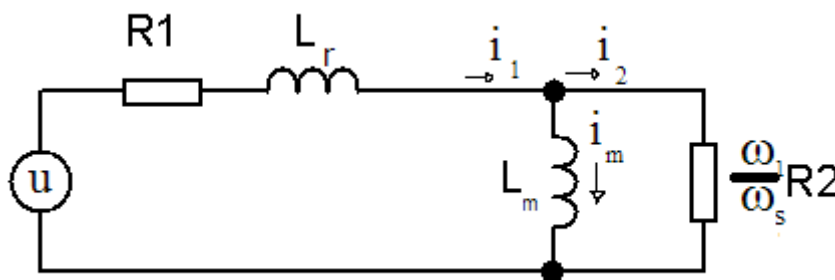
Obrázek 4-1 Plechy a drážky simulovaného motoru

Vše co je před a za modelem se nebere v úvahu elektricky ani magneticky. To je, propojení vodičů a tím i přídavný odpor např. kruhů klece v rotoru, magnetické pole unikající do hloubky mimo plechy, ložiskové štíty.

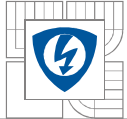
4.1 Parametry náhradního schématu - rovnice

Protože FEMM nám poskytne údaje o magnetickém toku, na základě vytvořené geometrie a proudu, zjistíme z jejich vztahu i indukčnost. Tyto informace použijeme na zjištění parametrů náhradního schématu.

Jelikož FEMM neumí modelovat mechanický pohyb, použijeme jednoduchý obvodový model. Je potřeba udělat sérii simulací, pro zjištění parametrů obvodového modelu.



Obrázek 4-2 Schéma jedné fáze motoru v ustáleném stavu



Ve schématu se předpokládá konstantní frekvence napájení a konstantní rychlost rotoru. Vazba a proudy rotoru jsou reprezentovány paralelními prvky, L_m , reprezentuje magnetizační proud motoru a R_2 reprezentující práci motoru na hřídeli. Prvky R_1 , L_r jsou ztráty. Zdroj u , dodává fázové napětí a proud.

$$\omega_s = \omega_1 - \omega_2 \cdot p \quad (20)$$

ω_1 – synchronní rychlost otáčivého pole

ω_2 – rychlost rotoru

ω_s – skluzová rychlost

p – počet pólových dvojic

Celkovou impedanci lze ze schématu určit jako kombinaci sériově a paralelně řazených prvků.

$$Z = R_1 + j\omega_1 L_r + \frac{j\omega_1 L_r \cdot \frac{\omega_1}{\omega_s} R_2}{j\omega_1 L_r + \frac{\omega_1}{\omega_s} R_2} \quad (21)$$

Po úpravě, kde časová konstanta rotoru

$$\tau = \frac{L_m}{R_2} \quad (22)$$

Získáme z rovnic (21) a (22)

$$Z = R_1 + j\omega_1 \left(L_r + \frac{L_m}{1 + j\tau\omega_s} \right) \quad (23)$$

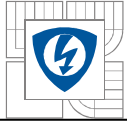
Druhý člen impedance je násoben $j\omega$ což značí, že to je příspěvek napětí na impedanci související se změnou toku na frekvenci ω . To znamená že tok Φ libovolné fáze je

$$\Phi = \left(L_r + \frac{L_m}{1 + j\tau\omega_s} \right) i \quad (24)$$

Po vydělení proudem pak můžeme získat indukčnost závislou na skluzové frekvenci.

$$L(\omega_s) = \left(L_r + \frac{L_m}{1 + (\tau\omega_s)^2} \right) - j \left(\frac{\tau\omega_s L_m}{1 + (\tau\omega_s)^2} \right) \quad (25)$$

Závislost indukčnosti na skluzové frekvenci využijeme na zjištění parametrů motoru L_m , L_r , R_2 .



Výkon na rezistoru, odpovídající mechanickému, celkovému výkonu pro 3 fáze. Je ho možno rozložit na dodaný mechanický výkon a ztráty odporové.

$$P = 3 \left(\frac{\omega_1}{\omega_s} \right) R_2 |i_2|^2 = 3 \left(\frac{\omega_1 - \omega_s}{\omega_s} \right) R_2 |i_2|^2 + 3 R_2 |i_2|^2 \quad (26)$$

Vyjmeme mechanický výkon.

$$P_{mech} = 3 \left(\frac{p\omega_2}{\omega_s} \right) R_2 |i_2|^2 \quad (27)$$

Mechanický výkon je součin momentu a rychlosti, vydělením rychlostí rotoru dostaneme moment.

$$M = 3 \left(\frac{pR_2}{\omega_s} \right) |i_2|^2 \quad (28)$$

Vztah (28) pracuje s rotorovým proudem, proto provedeme úpravy pro změnu na fázový proud.

Z modelu motoru, napětí na rotoru je stejné u paralelních větví. Porovnáme napětí na magnetizační indukčnosti a odporu rotoru.

$$\left(\frac{\omega_1}{\omega_s} \right) R_2 i_2 = j\omega_1 L_m i_m \quad (29)$$

Vyjádříme $i_2 = j\tau\omega_s i_m$ dále pro proudy platí $i_1 = i_m + i_2$, potom dostaneme vztah.

$$i_2 = \left(\frac{j\tau\omega_s}{1 + j\tau\omega_s} \right) i_1 \quad (30)$$

Nyní můžeme proud rotoru nahradit právě vzniklým výrazem (30) a dosadit do vztahu pro moment (28).

$$M = 3pL_m i_1^2 \left(\frac{\tau\omega_s}{1 + (\tau\omega_s)^2} \right) \quad (31)$$

Když máme vyjádřené vztahy, můžeme identifikovat parametry motoru.

4.2 Zjištění parametrů náhradního schématu - FEMM

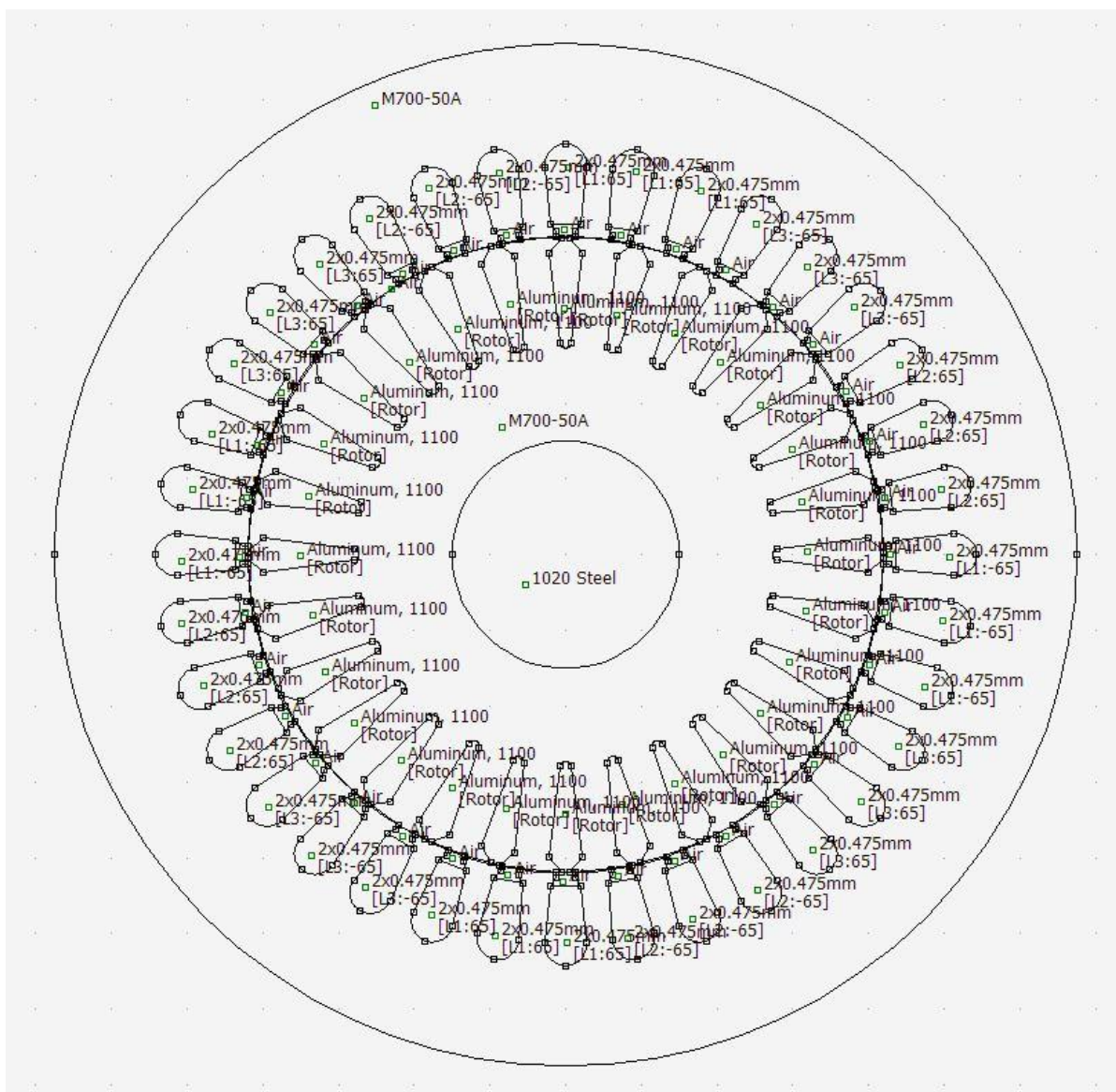
Postup pro zjištění parametrů náhradního schématu je následující:

- Vytvoření modelu
- Simulace modelu a získání dat

- Výpočet hodnot parametrů z dat

4.2.1 Model motoru

V modelu jsou lineární parametry materiálů, předpokládáme v obvodovém modelu, že odpor není funkcí amplitudy proudu. Přestože je předpoklad lineárních parametrů přiměřený pro velké množství modelů motorů, nelze použít lineární materiály pro stroje s uzavřenými drážkami, protože tyto stroje závisí na saturaci materiálu mezi drážkami a tím omezují tok na únosnou mez. Pokud se toto nenasimuluje, jsou vypočteny nereálné hodnoty. V našem případě si linearizaci dovolit můžeme, protože tento problém nenastává. Linearizace materiálu M700-50A [6] je v grafu 4-1.



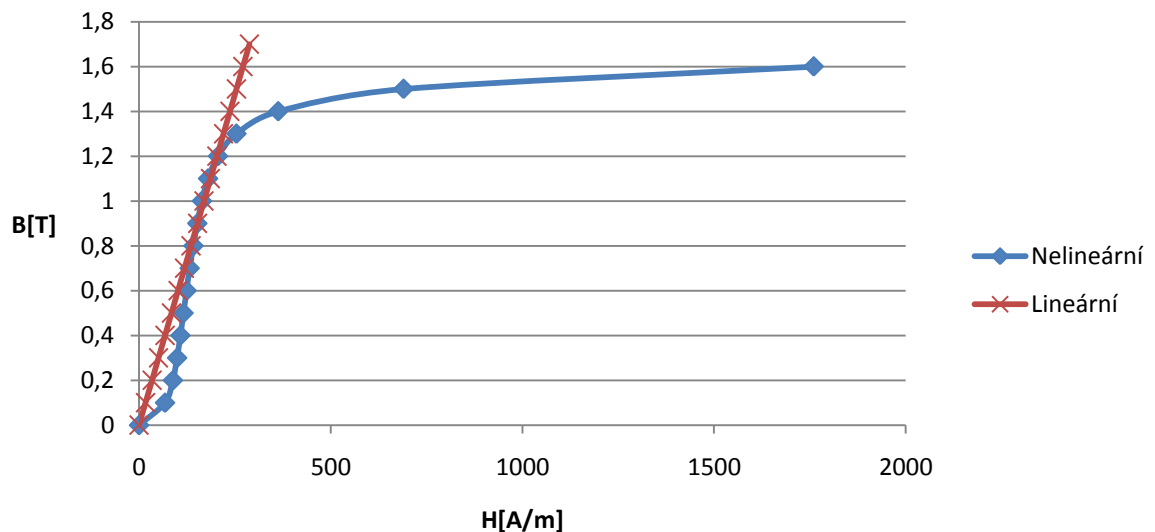
Obrázek 4-3 Model motoru vytvořený v programu FEMM

Pro naše účely je nastavena elektrická vodivost plechů statoru na nulovou hodnotu. V nastavení materiálu kolonka *Electrical Conductivity*, To znamená, že se v něm nebudou indukovat vířivé proudy. Jde jen o elektrickou vodivost plechů, magnetické vlastnosti zůstanou a jsou linearizované. Jak si můžete povšimnout na obrázku 4-4, není model uzavřen ve vzduchovém obalu. Není to nezbytné, pokud splníme pár podmínek. První podmínka je zanedbatelný vliv magnetického pole na okolí. U tohoto motoru se magnetický tok uzavírá jhem statoru a proto je vnější pole irelevantní. Toto pole není také nezbytné pro práci stroje. Proto si v modelu přímo nastavíme hraniční podmínku nulového toku mimo plechy vně stroje. *Properties* --> *Boundary* a hodnoty ponecháme na 0. Poté se přiřadí tato hraniční podmínka vnější kružnici. Bez této podmínky uniká magnetický tok ven, jako by bylo okolí perfektně magneticky vodivé.

Vinutí každé fáze statoru je rozloženo do tří drážek, máme 3 fáze a 2 pólové dvojice. Každá drážka obsahuje 65 závitů. Zde je třeba dávat pozor na znaménko při nastavování počtu závitů, tím se určuje které závity do modelu „vstupují“ a které naopak „vystupují“ (vrací se). Při špatném směru vinutí program vypočítá hodnoty, které budou chybné a je jen na nás, případný problém odhalit.

Hřídel rotoru má minimální význam při této simulaci a je jen na nás jestli ji ponecháme nebo ne. Zde je hřídel ponechána, aby byl vidět její zanedbatelný význam pro vedení magnetického toku.

Rotor je definován jako vodič v celé ploše každé drážky rotoru paralelně s ostatními tyčemi rotoru. Tyče jsou mezi sebou propojeny s nulovým odporem.

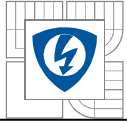


Graf 4-1 Linearizace materiálu M700-50A

4.2.2 Vodivost klece

Použitý hliník má vodivost 33MS ($3,03 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$). Tuto vodivost však nemůžeme přímo použít v našem modelu a tím zanedbat vliv odporu kruhů na celkový odpor klece. Vliv na odpor klece je podstatný, to si ukážeme v následujícím výpočtu ekvivalentního odporu tyče[6].

Odpor tyče klece rotoru, délku tyče i průřez známe, hodnoty máme i v modelu v programu.



$$R_t = \frac{\rho_{Al} \cdot l_t}{S_t} = \frac{3,03 \cdot 10^{-8} \cdot 0,078}{4,17 \cdot 10^{-5}} = 5,67 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (32)$$

Odpor části kruhu mezi tyčemi zjistíme stejným postupem.

$$R_k = \frac{\rho_{Al} \cdot l_k}{S_t} = \frac{3,03 \cdot 10^{-8} \cdot 0,009}{4,17 \cdot 10^{-5}} = 6,54 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (33)$$

Ekvivalentní odpor tyče rotoru

$$R_{t,ekv} = R_t + \frac{R_k}{2 \sin^2 \left(\frac{2\pi}{Q} \right)} = \frac{6,54 \cdot 10^{-6}}{2 \sin^2 \left(\frac{2\pi}{28} \right)} = 1,22 \cdot 10^{-4} \Omega \quad (34)$$

Ekvivalentní měrný odpor tyče rotoru

$$\rho_{Al,ekv} = \frac{R_{t,ekv} \cdot S_t}{l_t} = \frac{1,22 \cdot 10^{-4} \cdot 4,17 \cdot 10^{-5}}{0,078} = 6,522 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m \quad (35)$$

Ekvivalentní měrná vodivost tyče rotoru s integrovaným odporem kruhu.

$$\gamma_{Al,ekv} = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{6,522 \cdot 10^{-8}} = 15332720 S \cdot m^{-1} \cong 15,3 MS \cdot m^{-1} \quad (36)$$

V našem případě je vliv zanedbání kruhů na vodivost 50%. Proto pro simulaci motoru použijeme vypočítanou ekvivalentní vodivost hliníku. Třebaže v modelu kruhy chybí, započítávají se snížením vodivosti hliníku proti původní hodnotě.

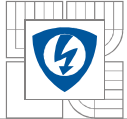
4.2.3 Simulace motoru

Provede se tak, že zadáme do statoru trojfázový proud, posunutý po 120° $L_1=1A$, $L_2=(-0,5+0,866i)A$, $L_3=(-0,5-0,866i)A$. Ten byl zvolen 1A pro zjednodušení následných výpočtů. Proud je trojfázový, symetrický, jeho suma je nula. Během modelování se nastavený proud měnit nebude, jen jeho frekvence.

Necháme model vypočítat tok vinutím, indukčnost zjistíme vydělením proudem, který jí prochází. Podrobněji objasníme v další kapitole.

FEMM počítá magnetický tok výpočtem objemového integrálu, který souvisí s výpočtem uložené energie, tu program počítá velice přesně. Proto budou tyto hodnoty přesnější, než výpočet momentu.

Sérii výpočtů provedeme na různých skluzových frekvencích, které budeme měnit a kterými bude vinutí napájeno. Tím získáme dostatek dat pro přesné zjištění parametrů. Zvolen byl rozsah 0,2 – 5,7Hz, krok 0,5Hz. Větší rozsah je zbytečný, nejen protože to je mimo pracovní oblast, ale vliv na výsledné parametry je již zanedbatelný. Také časová náročnost výpočtů je značná.



Výpočty budou trvat několik hodin, a proto použijeme skript, abychom nemuseli hlídat průběh výpočtů a po každé zadávat ručně frekvence a zapínat další výpočet.

Pro sérii výpočtů byl použit následující lua skript.

```
open("Motor.FEM")          --otevře požadovaný soubor
showconsole()              --zobrazí konzoli
print("krouťící moment")   --vypíše v konzoli
mi_saveas("temp.fem")      --bude pracovat z kopií originálu

for n=2,60,5 do            --smyčka od 0,2 po 5,7 Hz, krok 0,5 Hz
    mi_probdef(n/10,'millimeters','planar',1e-8,90,30)  --změna
    frekvence odpovídající kroku

    mi_analyze()           --výpočet
    mi_loadsolution()      --načtení řešení
    i1,u1,flux1=mo_getcircuitproperties("L1")  --získání hodnot L1
    mo_groupselectblock(1) --výbrání rotoru
    f=mo_blockintegral(22) --výpočet momentu
    print(n," ",f)        --vypsání do konzole

    handle=openfile("results.txt","a");  --zápis do souboru
    write(handle,"f[Hz]=",n,"Moment=",f,"I1=",i1,"U1=",u1,"fi
1=",flux1,"\n")
    closefile(handle)

    mo_close()             --zavření řešení
end                         --konec smyčky
```

Tento skript se zadává do konzole ve FEMMu a lze si ho připravit v jakémkoliv textovém editoru. Informace za „--“ jsou komentáře a program je ignoruje. Skript provede výpočet, zobrazí řešení, zjistí magnetický tok v cívce, vypočítá moment. Poté hodnoty uloží do textového souboru, změní frekvenci a opakuje proces znovu.

Po provedení série těchto výpočtů, máme následující hodnoty.

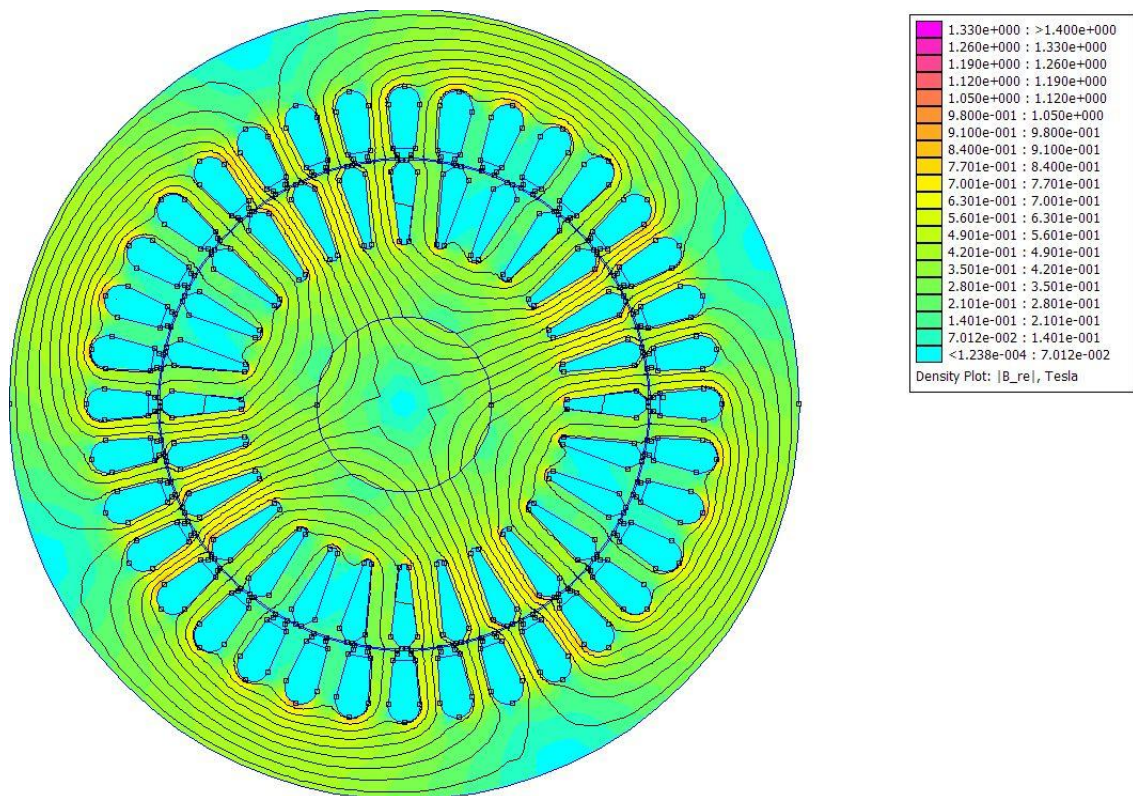
Skuzová frekvence, moment, magnetický tok, reálná a imaginární složka.

Tabulka 1 Hodnoty vypočítané FEMMem, pro zjištění parametrů náhradního schématu

f[Hz]	M [Nm]	ϕ_{Re} [Wb]	ϕ_{Im} [Wb]
0,2	0,118305756	0,455988862	-0,029969355
0,7	0,344005335	0,428309101	-0,106595088
1,2	0,507006492	0,380157682	-0,162465407
1,7	0,600257843	0,325658563	-0,194943397
2,2	0,638388646	0,274573289	-0,208780923
2,7	0,640835337	0,231048854	-0,210453341



3,2	0,623170707	0,195668648	-0,205199001
3,7	0,595585638	0,167484413	-0,196470223
4,2	0,564075617	0,145154806	-0,186312379
4,7	0,531931499	0,127419166	-0,175857702
5,2	0,500846281	0,113238365	-0,165695759
5,7	0,471612339	0,101801571	-0,156108345



Obrázek 4-4 Magnetická indukce v motoru při frekvenci 3,0 Hz a proudu 1A.

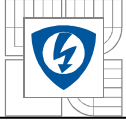
4.3 Výpočet parametrů z výsledku analýzy

Nyní máme potřebné hodnoty pro výpočet parametrů náhradního schématu.

Parametry z indukčnosti lze zjistit pomocí soustavy rovnic. Nejprve se vezme imaginární část indukčnosti ze vztahu.

$$L(\omega_s) = \left(L_r + \frac{L_m}{1 + (\tau\omega_s)^2} \right) - j \left(\frac{\tau\omega_s L_m}{1 + (\tau\omega_s)^2} \right) \quad (37)$$

Máme imaginární část indukčnosti náhradního schématu z (37), které odpovídá imaginární část indukčnosti zjištěné modelováním.



$$L(Im) = L_i = -\left(\frac{\tau\omega_s L_m}{1 + (\tau\omega_s)^2}\right) \quad (38)$$

Označíme li si v (38)

$$x_1 = \tau L_m \quad (39)$$

$$x_2 = \tau^2 \quad (40)$$

pak lze rovnici (38) přepsat na jednodušší tvar dosazením (39),(40).

$$-L_i = (\omega_s)x_1 + (L_i\omega_s^2)x_2 \quad (41)$$

Dosazením frekvence a imaginární části indukčnosti vypočítané FEMMem pro různé naměřené hodnoty dostaneme soustavu lineárních rovnic o dvou neznámých x_1 , x_2 . To rozepíšeme do matice a vektoru, kde $\omega_s = 2\pi f_s$ a n je počet řádků matice. Každý řádek matice obsahuje hodnotu skluzové frekvence a k ní náležící hodnotu imaginární indukčnosti.

$$A = \begin{bmatrix} 2\pi f_1 & L_{i1}(2\pi f_1)^2 \\ \vdots & \vdots \\ 2\pi f_n & L_{in}(2\pi f_n)^2 \end{bmatrix} \quad b = \begin{Bmatrix} -L_{i1} \\ \vdots \\ -L_{in} \end{Bmatrix} \quad (42)$$

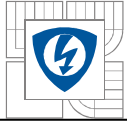
Řešení rovnice pak dostaneme ze soustavy.

$$A \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = b \quad (43)$$

Například v matlabu to lze rozepsat následovně, pozor, používá se desetinná tečka (uvedeme na ukázkou pouze první 3 členy):

```
A = [  
(2*pi*0.2) ( -0.029969355 * (2*pi*0.2) ^2);  
(2*pi*0.7) ( -0.106595088 * (2*pi*0.7) ^2);  
(2*pi*1.2) ( -0.162465407 * (2*pi*1.2) ^2);... ]
```

```
b = [ 0.029969355;  
      0.106595088;  
      0.162465407;... ]
```

$$x = A \setminus b$$

Takto byly získány hodnoty $x_1 = 0,0265$ a $x_2 = 0,004$.

To z definice vztahů (39), (40) znamená následující.

Časová konstanta z (40).

$$\tau = \sqrt{x_2} = \sqrt{4 \cdot 10^{-3}} = \underline{0,063} \text{ s} \quad (44)$$

Magnetizační indukčnost z (39).

$$L_m = \frac{x_1}{\tau} = \frac{0,0265}{0,063} = \underline{0,419} \text{ H} \quad (45)$$

Odpor R_2 z časové konstanty rotoru (22).

$$R_2 = \frac{L_m}{\tau} = \frac{0,419}{0,063} = \underline{6,62} \text{ } \Omega \quad (46)$$

Rozptylovou indukčnost L_r vypočítáme stejným postupem z reálné části indukčnosti ze vztahu (25).

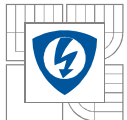
$$L_{re} = \left(L_r + \frac{L_m}{1 + (\tau\omega_s)^2} \right) \quad (47)$$

V rovnici (47) známe všechny hodnoty až na L_r , tu si vyjádříme.

$$L_r = L_{re} - \frac{L_m}{1 + (\tau\omega_{s,n})^2} \quad (48)$$

A ze vztahu (48) si vypočítáme všechny rozptylové indukčnosti, plynoucí z nasimulovaných dat. Pro náhradní schéma potom použijeme jejich střední hodnotu. Hodnoty, které dosazujeme do vztahu, jsou v tabulce 2, dosazuje se odpovídající frekvence $\omega_s = 2\pi f_s$ a indukčnost z každého řádku, která se vypočítala dle (50). Magnetizační indukčnost použijeme 0,419H ze (45).

$$L_{rst\check{r}.} = \frac{\sum \left[L_{re,n} - \frac{L_m}{1 + (\tau\omega_{s,n})^2} \right]}{n} \quad (49)$$



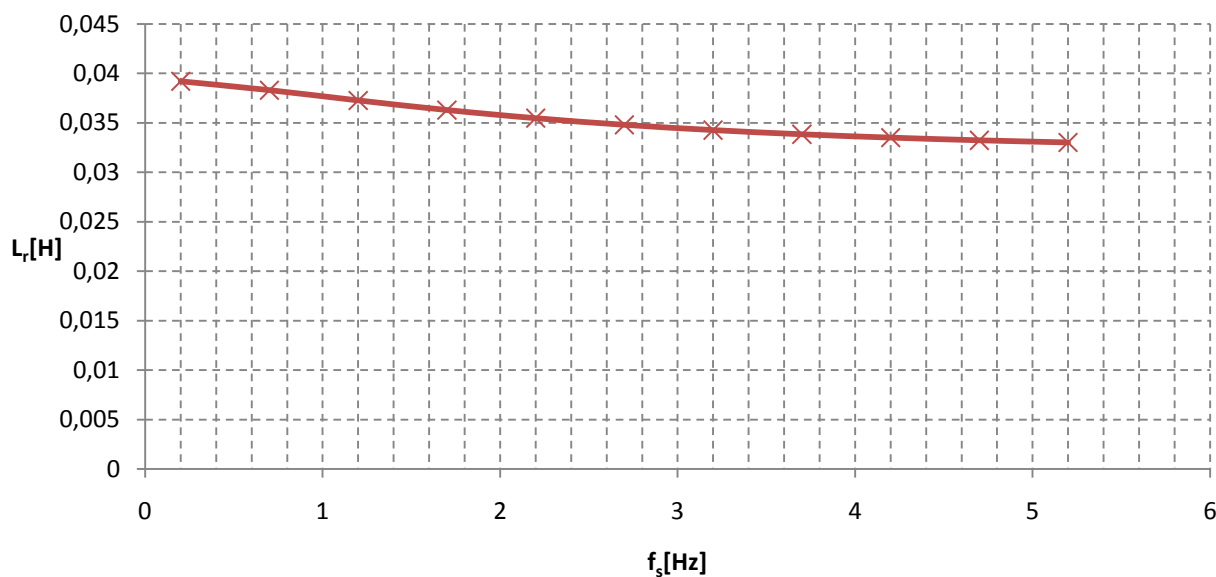
Reálná část indukčnosti odpovídá nasimulované reálné části magnetického toku, proud je 1A.

$$L_{re,n} = \frac{\phi_{Re,n}}{i_n} \quad (50)$$

Tabulka 2 Data výpočtu rozptylové indukčnosti, vztah (49).

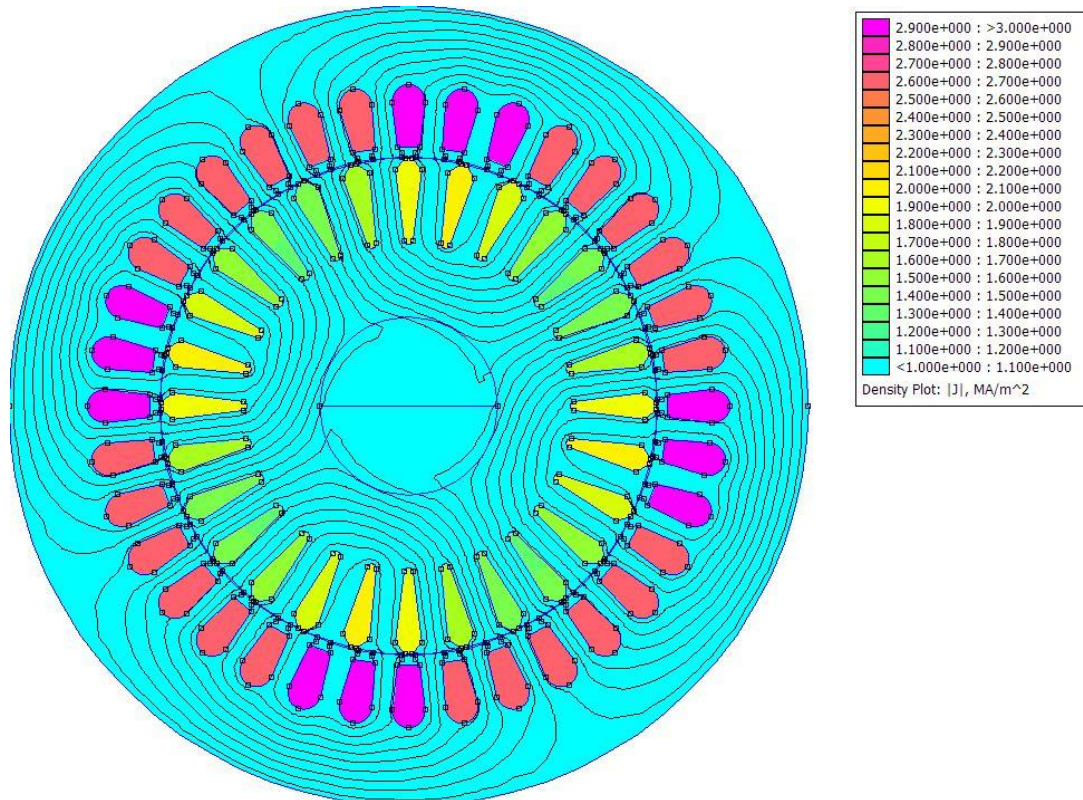
f_s [Hz]	L_{re} [H]	L_r [H]
0,2	0,455988862	0,039598626
0,7	0,428309101	0,03918526
1,2	0,380157682	0,038293622
1,7	0,325658563	0,03725665
2,2	0,274573289	0,036285615
2,7	0,231048854	0,035461832
3,2	0,195668648	0,034793484
3,7	0,167484413	0,034260622
4,2	0,145154806	0,033837318
4,7	0,127419166	0,033499901
5,2	0,113238365	0,033229097
5,7	0,101801571	0,033009892
stř. hodnota $L_{rstř}$ [H]		0,035725993

Hodnota potom vyjde $L_{rstř} \cong 0,036 H$.



Graf 4-2 Namodelované hodnoty rozptylové indukčnosti při konstantním proudu, pro různé skluzové frekvence.

Průběh rozptylové indukčnosti, graf 4-2, klesá v důsledku poklesu magnetického toku vinutím statoru, způsobený rostoucím vlivem magnetického pole rotoru. Který působí proti poli statoru. Také vidíme, že použitím střední hodnoty indukčnosti se nedopouštíme výrazné chyby, protože se příliš nemění.



Obrázek 4-5 Rozložení proudů pro ve vinutí

4.4 Výpočet ztrát statoru

Ztráty v železe[1] určené z dostupných hodnot k materiálu M700-50A pro $B = 1$ T, 50 Hz je $2,57 \text{ W.kg}^{-1}$. Nejprve jho statoru. Činitel zvětšení ztrát vlivem vyšších harmonických neuvažujeme. Hmotnost části je vypočítána níže. Uvažovaná frekvence je 50Hz.

$$\Delta P_{Fe} = p_{1,0} k_p G B^n \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} = 2,57 \cdot 1 \cdot 4,84 \cdot 1^{5,69 \log \frac{5,68}{2,57}} \left(\frac{50}{50} \right)^{1,3} = 12,4 \text{ W} \quad (51)$$

B – amplituda sinusové indukce [T] amplituda byla odhadnuta z modelu motoru

G – hmotnost části [kg]

$p_{1,0}$ - měrné ztráty použité el. tech. oceli při $B = 1$ T a $f = 50$ Hz [$\text{W} \cdot \text{Kg}^{-1}$]

k_p – činitel zvětšení ztrát vlivem vyšších harmonických polí a změnou struktury oceli během výroby

$n = 5,69 \log p_{1,5}/p_{1,0}$, zpravidla $n = 2$, $p_{1,5}$ – měrné ztráty při $B = 1,5 \text{ T}$ a $f = 50 \text{ Hz}$

Hmotnost jha. Měrná hmotnost byla zjištěna z dostupných materiálů k použitým plechům. Objem byl vypočítán pomocí FEMMu.

$$G = V \cdot \rho = 6,37 \cdot 10^{-4} \cdot 7600 = 4,84 \text{ kg} \quad (52)$$

Ztráty jha. Pro kontrolu jsme vypočítali ztráty i z dostupných údajů o měrných ztrátách k danému materiálu. Zde je vidět že zjištěné hodnoty jsou stejné výpočet (51 a 53). Dále již budeme požívat pouze první vztah pro výpočet ztrát.

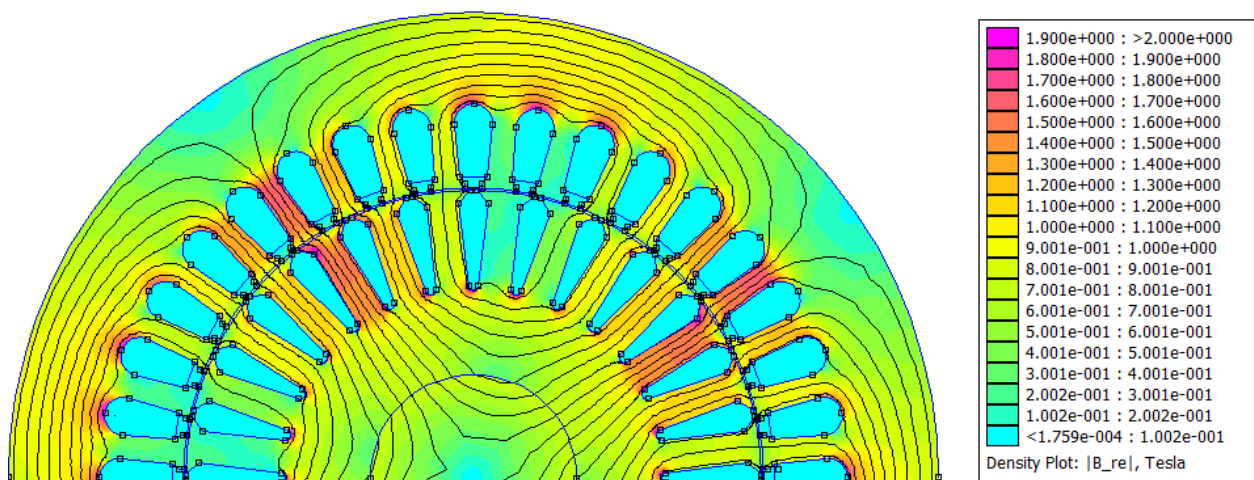
$$\Delta P_{Fe} = V \cdot \rho \cdot p = 0,637 \cdot 10^{-3} \cdot 7600 \cdot 2,57 = 12,4 \text{ W} \quad (53)$$

Hmotnost zubů statoru. Objem opět zjištěn pomocí FEMMu.

$$G = V \cdot \rho = 1,196 \cdot 10^{-4} \cdot 7600 = 0,909 \text{ kg} \quad (54)$$

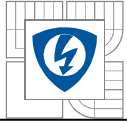
Ztráty v zubech statoru. Amplituda indukce odečtena z FEMMu. vzhledem k větší indukci v zubech, jsou i ztráty v nich vyšší na jednotku objemu.

$$\Delta P_{Fe} = p_{1,0} k_p G B^n \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} = 2,57 \cdot 1 \cdot 0,909 \cdot 1,5^{5,69 \log \frac{5,68}{2,57}} \left(\frac{50}{50} \right)^{1,3} = 5,2 \text{ W} \quad (55)$$



Obrázek 4-6 Indukce při jmenovitém proudu

Joulové ztráty vinutí statoru při jmenovitém proudu zjištěném měřením. Odpor vinutí jsme zjistili multimetrem.



$$\Delta P_{j1} = 3 \cdot R I^2 = 3 \cdot 8,6 \cdot 2,3^2 = 139,5W \quad (56)$$

4.5 Výpočet ztrát rotoru

Mechanické ztráty včetně ventilačních pro povrchové chlazení motoru [1]. Kde dosazujeme vnější průměr motoru a jmenovité otáčky.

$$\Delta P_{mech} = 1,3(1 - D_e) \left(\frac{n}{1000} \right)^2 \cdot (10D_e)^4 = 1,3(1 - 0,14) \left(\frac{1400}{1000} \right)^2 \cdot (1,4)^4 = 8,4 W \quad (57)$$

Výkon ve vzduchové mezeře.

$$P_\delta = P_1 - \Delta P_{j1} - \Delta P_{Fe} = 1378,1 - 148,6 - 14,7 = 1214,8W \quad (58)$$

Ztráty v kleci rotoru, dosazeny hodnoty naměřené při jmenovitém výkonu a skluzu rotoru. Klec je hlavním zdrojem ztrát v rotoru.

$$P_{j2} = M \cdot \omega_s = 7,49 \cdot 2\pi \cdot 1,43 = 67,5W \quad (59)$$

Ztráty v železe stojícího rotoru, určené z dostupných hodnot k materiálu M700-50A pro $B = 1 T$, 50 Hz je $2,57 W \cdot kg^{-1}$. Při jmenovitých otáčkách jsou ztráty v železe rotoru zanedbatelné. A proto jsou zde pro informaci uvedeny ztráty stojícího rotoru, hodnota nebude zahrnuta do ztrát.

$$\Delta P_{Fe} = V \cdot \rho \cdot p = 0,326 \cdot 10^{-3} \cdot 7600 \cdot 2,57 = 6,4 W \quad (60)$$

Součet vypočítaných ztrát (53,55,56,57,59), nám dá celkové ztráty motoru, ze kterých lze zjistit účinnost daného motoru.

$$\sum \Delta P = \Delta P_{j1} + \Delta P_{j2} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} = 139,5 + 67,5 + (12,4 + 5,2) + 8,4 = 233W \quad (61)$$

Účinnost motoru je vypočtena z naměřeného příkonu a vypočítaných ztrát (61).

$$\eta = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = \frac{1378,1 - 233}{1378,1} = 0,83 \quad (62)$$

Výrobce udává účinnost pro motor TM90-4S je 79%.

5 MOTOR TM90-4S

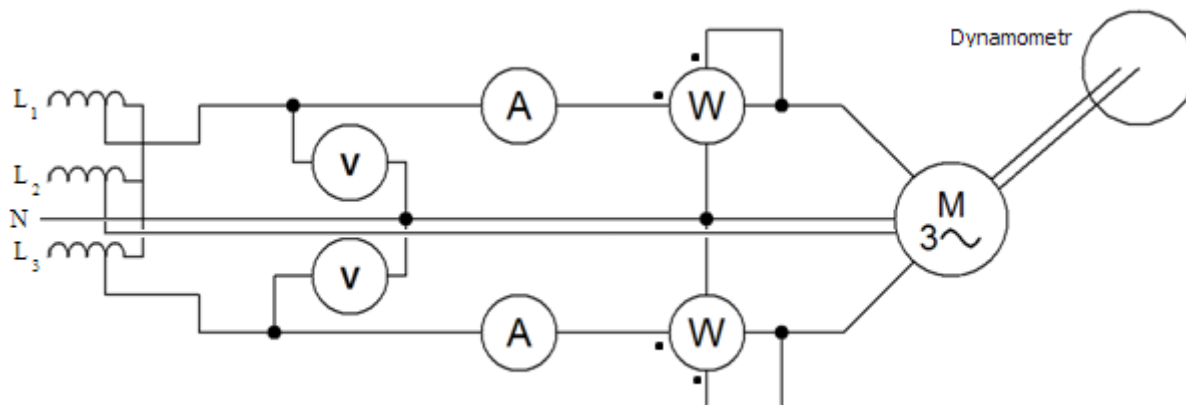
Pro upřesnění teoretického modelu a také pro srovnání se skutečným motorem, bylo provedeno měření na motoru TM90-4S naprázdno, nakrátko a zatěžovací charakteristika. Naměřené hodnoty použijeme pro zjištění parametrů náhradního schématu a zatěžování modelu motoru.

Štítkové údaje:

TYP	VÝKON	Y/D		COS	OTÁČKY	FREKV.
TM90-4S B3	1100 W	400/230 V	2,5/4,3 A	0,83	1400 min ⁻¹	3~50 Hz

5.1 Zatěžovací charakteristika

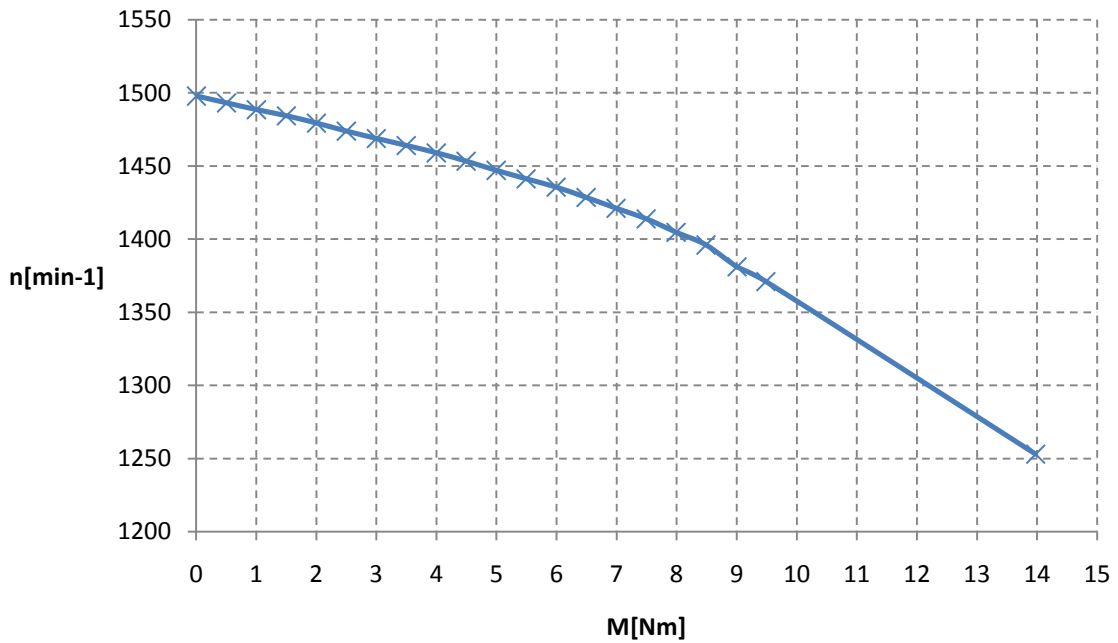
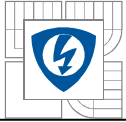
Zatěžovací charakteristika byla změřena pomocí dynamometru. Motor byl připojen přes autotransfornátor, nastaveno bylo 230V. Na dynamometru se volil moment (Nm), kterým se motor zatěžoval a odečítaly se hodnoty proudu, napětí a výkonu.



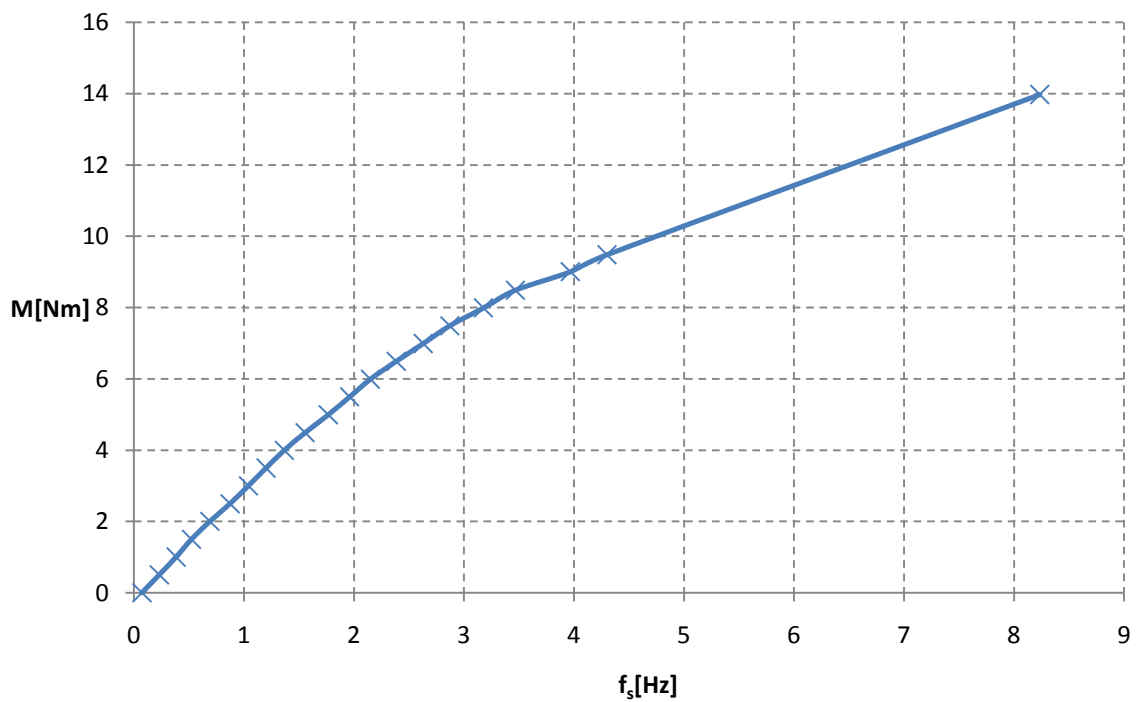
Obrázek 5-1 Schéma zapojení proměření zatěžovací charakteristiky

Jmenovitý moment motoru je 7,6 Nm, v grafu 5-1 a 5-2 je vidět, že ani při 14 Nm nebylo dosaženo maxima momentu, z preventivních důvodů nebyl motor více zatěžován.

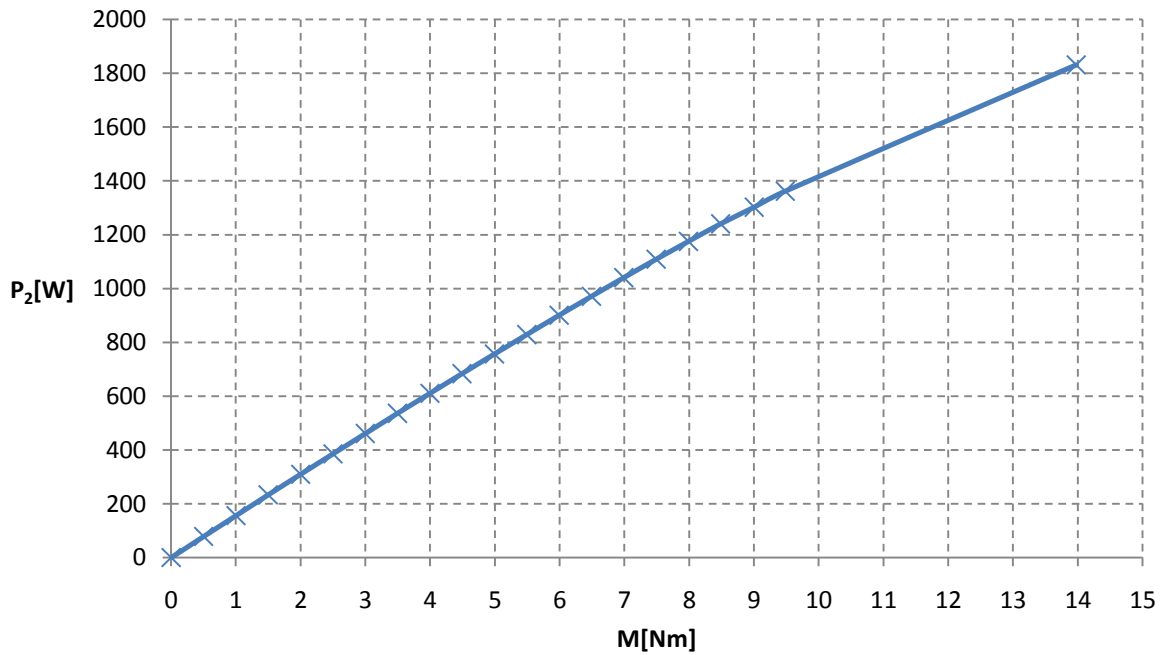
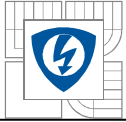
Pracovní bod motoru je umístěn v místě nejvyšší účinnosti (7,6Nm ,1400 min⁻¹), průběh účinnosti je vidět v grafu 5-4. Naměřené hodnoty jsou v příloze Tabulka 5.



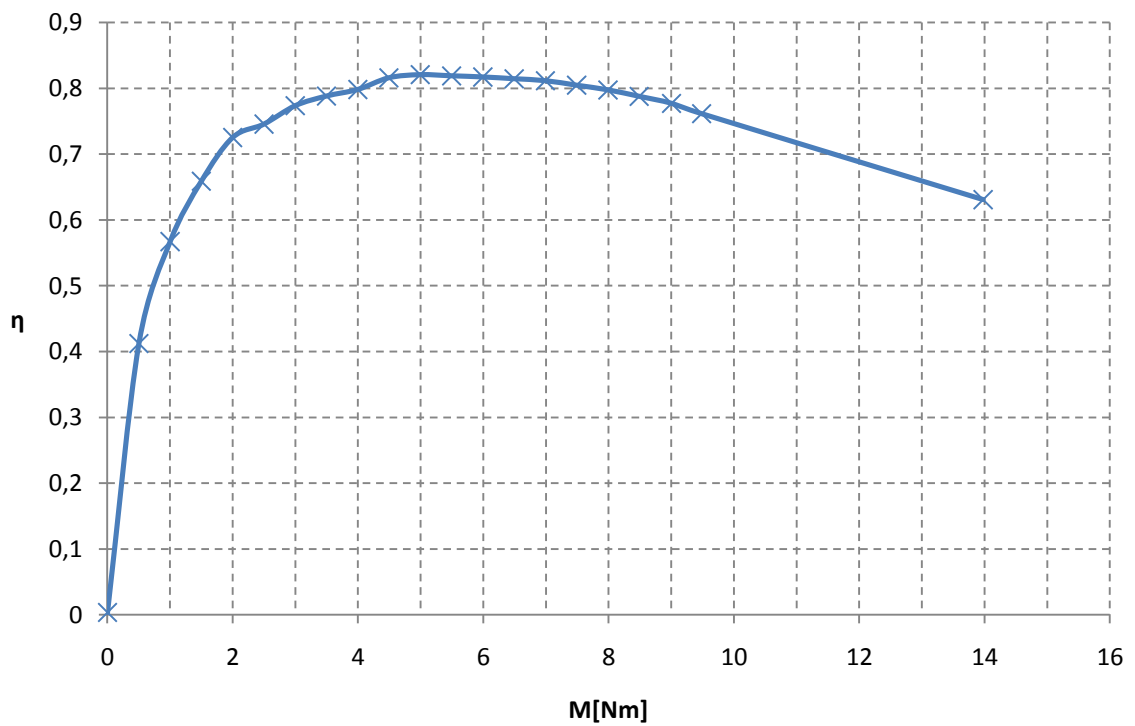
Graf 5-1 Závislost otáček na momentu na hřídeli



Graf 5-2 Závislost momentu na frekvenci skluzu



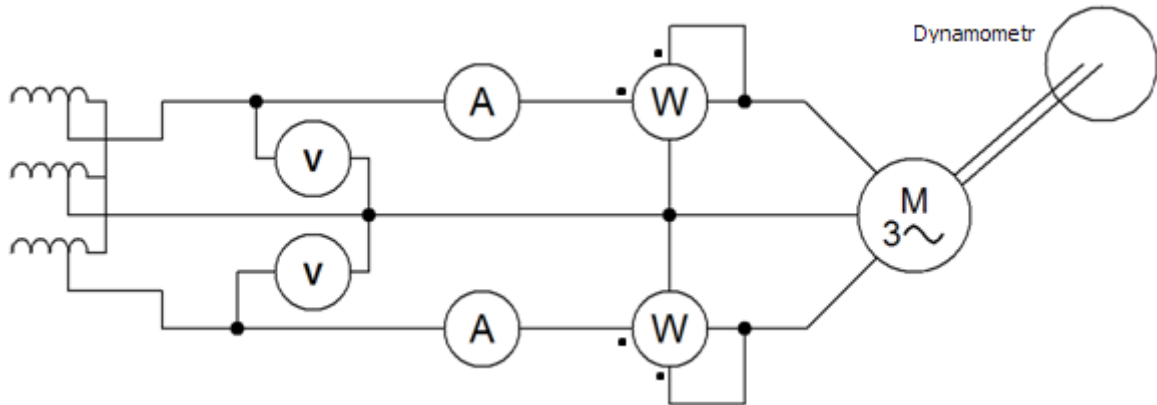
Graf 5-3 Závislost výkonu na momentu motoru



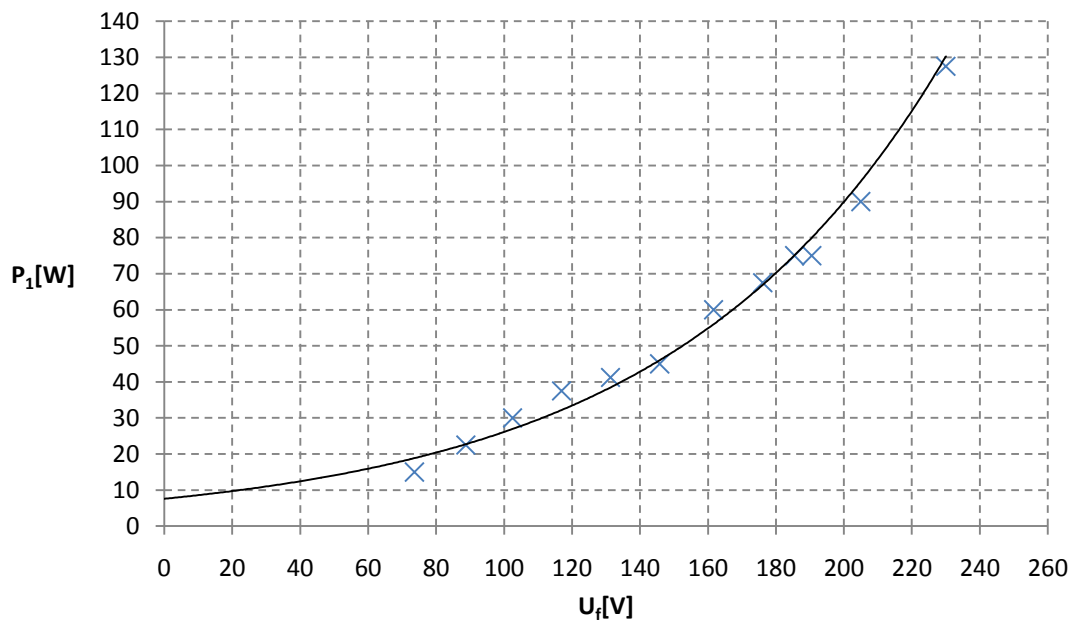
Graf 5-4 Závislost účinnosti na momentu motoru

5.2 Měření naprázdno

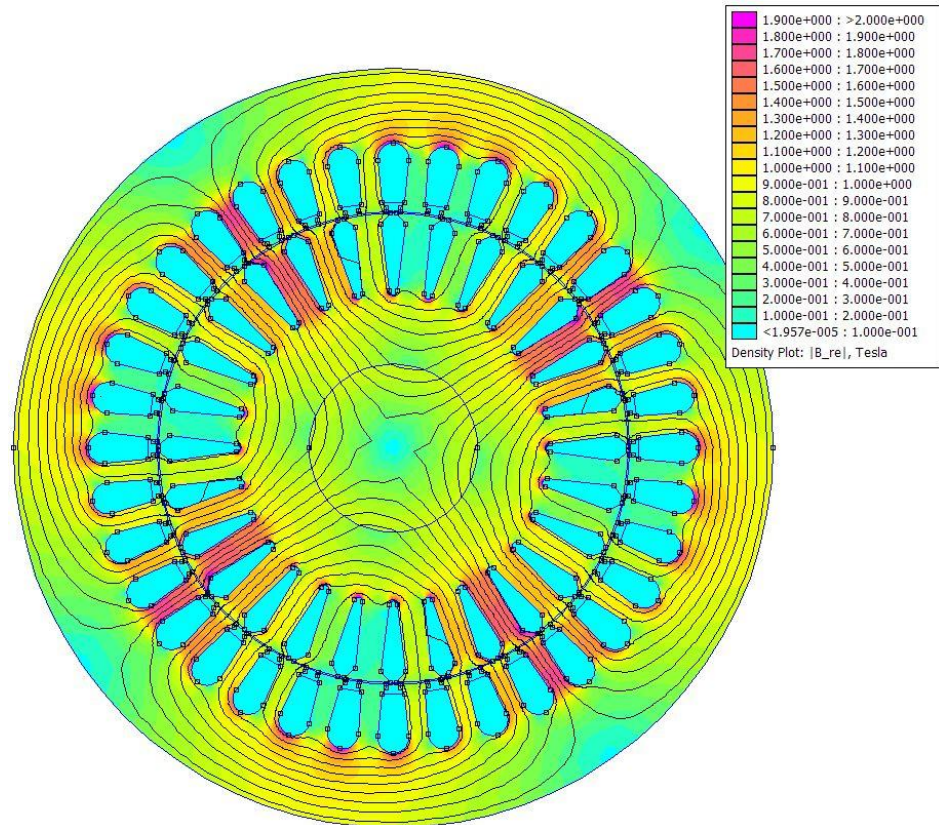
Zapojení bylo změněno na Aronovo zapojení, výsledky ne nelišily od předchozí metody, odpojil se dynamometr. Autotransfornátorem se regulovalo napětí až na 30% jmenovité hodnoty a zjišťoval se příkon. Následně se průběh hodnot aproximoval až k nule. Ostatní ztráty závislé na napětí klesají také k nule, až na ztráty mechanické, které zbudou. V Grafu 5-5 vidíme, že ztráty jsou přibližně 8W. Naměřené hodnoty jsou v příloze, Tabulka 6.



Obrázek 5-2 Schéma zapojení pro měření naprázdno



Graf 5-5 Aproximace mechanických ztrát



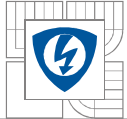
Obrázek 5-3 Magnetické pole při chodu naprázdno

5.3 Výpočet parametrů náhradního schématu

Měřením byly zjištěny parametry motoru naprázdno a nakrátko, které ke zjištění parametrů využijeme. Při výpočtu parametrů vycházíme z předpokladu, že při měření naprázdno je náhradní schéma nezátížené a proto lze zanedbat jeho podélné parametry. Pak je již snadné dopočítat velikost zbývajících dvou prvků. Stejně tak při měření nakrátko lze předpokládat tak velký proud schématem, že paralelní prvky jsou zanedbatelné. Samozřejmě se zanedbáváním dopouštíme chyby. Proud naprázdno není tak malý, jako u transformátorů.

Tabulka 3 Naměřené parametry motoru

	<i>Nakrátko</i>	<i>Naprázdno</i>
I_{1f}	2,6A	1,325A
P_{1f}	97,5W	127,5W
U_{1f}	52V	230V
M	0,67Nm	



Nejprve provedeme výpočet z měření nakrátko, kde se zanedbá paralelní větve náhradního schématu a zbudou pouze prvky primární odpor a rozptylová indukčnost. Při výpočtu vycházíme z toho, že vztah mezi veličinami lze vypočítat z pravouhlého trojúhelníku. Přepona je zdánlivá složka a odvěsny jsou činná a imaginární část.

Použité indexy: I – primární změřená hodnota
 I_f – fázová hodnota
 I_k – hodnota měřená nakrátko
 I_n – hodnota měřená naprázdno
 r – rozptylová indukčnost
 R_1 – hodnota na odporu reprezentujícího primární vinutí
 L_r – hodnota na rozptylové indukčnosti

Pak napětí na činném odporu bude z činného výkonu a celkového proudu fáze.

$$U_{R1} = \frac{P_{1fk}}{I_{1fk}} = \frac{97,5}{2,6} = 37,5V \quad (63)$$

Výsledný odpor je pak z Ohmova zákona.

$$R_1 = \frac{U_{R1}}{I_{1fk}} = \frac{37,5}{2,6} = 14,4\Omega \quad (64)$$

Víme však z měření, že je $R_1 = 8,6\Omega$. Větší odpor v (64) působí zanedbaný R_2 . Budeme tedy předpokládat jeho velikost na základě rozdílu naměřeného a vypočítaného odporu.

$$R_2 = R_1 - R_{1 \text{ změřený}} = 14,4 - 8,6 = 5,8\Omega \quad (65)$$

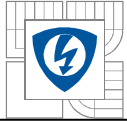
Teď již známe zdánlivou (Tabulka 3) a reálnou (63) složku napětí a dopočteme část imaginární (67), nejprve zjistíme úhel.

$$\varphi_U = \sin^{-1} \left(\frac{U_{R1}}{U_{1fk}} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{25,7}{52} \right) = 46,1^\circ \quad (66)$$

A z toho dopočteme imaginární část napětí na indukčnosti.

$$U_{Lr} = U_{1fk} \cdot \cos(\varphi_U) = 52 \cdot \cos(46,1^\circ) = 36V \quad (67)$$

Z Ohmova zákona si vyjádříme reaktanci cívky a z ní indukčnost. Potřebné napětí jsme právě vypočítali (67).



$$L_r = \frac{U_{Lr}}{\omega_1 \cdot I_{1f}} = \frac{36}{2\pi \cdot 50 \cdot 2,6} = \underline{0,044H} \quad (68)$$

Nyní vypočteme zbývající parametry z měření naprázdno, kde se pro změnu zanedbají podélné parametry náhradního schématu. Na magnetizační indukčnosti a odporu rotoru je stejné napětí a vypočítáme jak se rozdělí proud, tentokrát z trojúhelníku proudu.

Reálná část proudu je z naměřených hodnot (Tabulka 3).

$$I_{Rn} = \frac{P_{1fn}}{U_{1fn}} = \frac{127,5}{230} = 0,554A \quad (69)$$

Máme změřený zdánlivý a vypočítaný reálný proud (69) a dopočteme úhel do trojúhelníku.

$$\varphi_I = \sin^{-1} \left(\frac{I_{Rn}}{I_{1fn}} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{0,554}{1,325} \right) = 24,7^\circ \quad (70)$$

A z (70), pomocí úhlu a změřené komplexní hodnoty vypočítáme imaginární proud magnetizační.

$$I_{Lm} = I_{1fn} \cdot \cos(\varphi_I) = 1,325 \cdot \cos(24,7^\circ) = 1,2A \quad (71)$$

Z Ohmova zákona si vyjádříme reaktanci cívky a z ní indukčnost.

$$L_m = \frac{U_f}{\omega_1 \cdot I_{1fn}} = \frac{230}{2\pi \cdot 50 \cdot 1,2} = \underline{0,61H} \quad (72)$$

6 SROVNÁNÍ MĚŘENÉHO MOTORU A MODELŮ

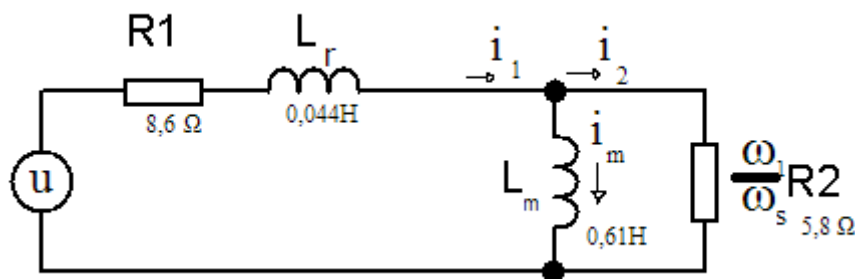
Tedy, když máme hodnoty parametrů náhradního schématu zjištěné pomocí měření i modelu, můžeme je porovnat. Rozptylová indukčnost se liší o 20%. Magnetizační indukčnost se liší o 30%, to u modelů není neobvyklé. Odpor primárního vinutí se liší také o 30%, ale to v důsledku zanedbání čel vinutí. Protože se ve FEMMu modelovaný stroj napájí proudem, nemá to vliv na indukovaný tok vinutím. Odpor rotory se liší pouze o 13%.

Tabulka 4 Srovnání hodnot náhradního schématu vypočítaných pomocí FEMMu a z měření

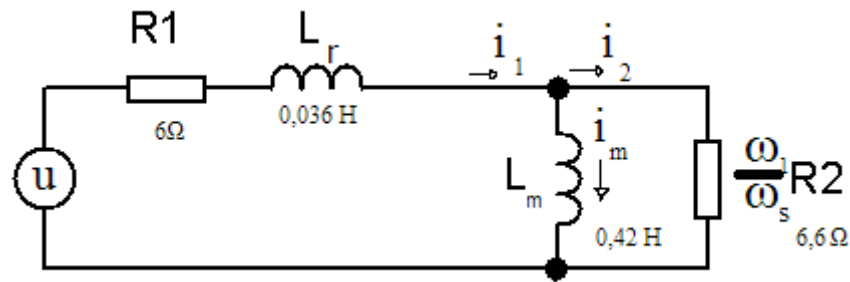
zdroj	FEMM	Analyticky
L_r	0,036H	0,044H
L_m	0,42H	0,61H
R_1	6 Ω	8,6 Ω
R_2	6,6 Ω	5,8 Ω

6.1 Výpočet momentu - napětím napájené náhradní schéma

Nyní, když máme náhradní schéma hotové. Vypočítáme pomocí něj momentovou charakteristiku. Na schéma se připojí zdroj fázového napětí. Dopočítají se proudy a napětí v obvodu. Proud protékající R_2 nám pak řekne jaký výkon a tím pádem i moment máme při daném skluzu.



Obrázek 6-1 Náhradní schéma - Analyticky

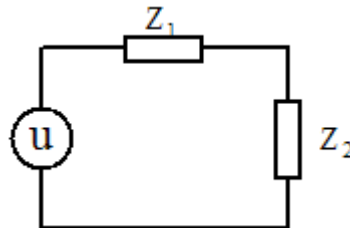


Obrázek 6-2 Náhradní schéma - FEMM

Celková impedance (23) je Z , pomocí které zjistíme celkový proud I .

$$Z = R_1 + j\omega_1 \left(L_r + \frac{L_m}{1 + j\tau\omega_s} \right)$$

Pro další výpočty využijeme schéma na obrázku 6-3.



Obrázek 6-3 Vyjádření schématu pomocí impedancí

Se zjištěným proudem můžeme vypočítat úbytek napětí na podélných parametrech.

$$Z_1 = R_1 + j\omega_1 L_r \quad (73)$$

Zbývající napětí po úbytku na Z_1 napájí R_2 , který reprezentuje výkon motoru.

$$P_{2f} = \frac{(U_1 - U_{Z1})^2}{\frac{\omega_1}{\omega_s} R_2} \quad (74)$$

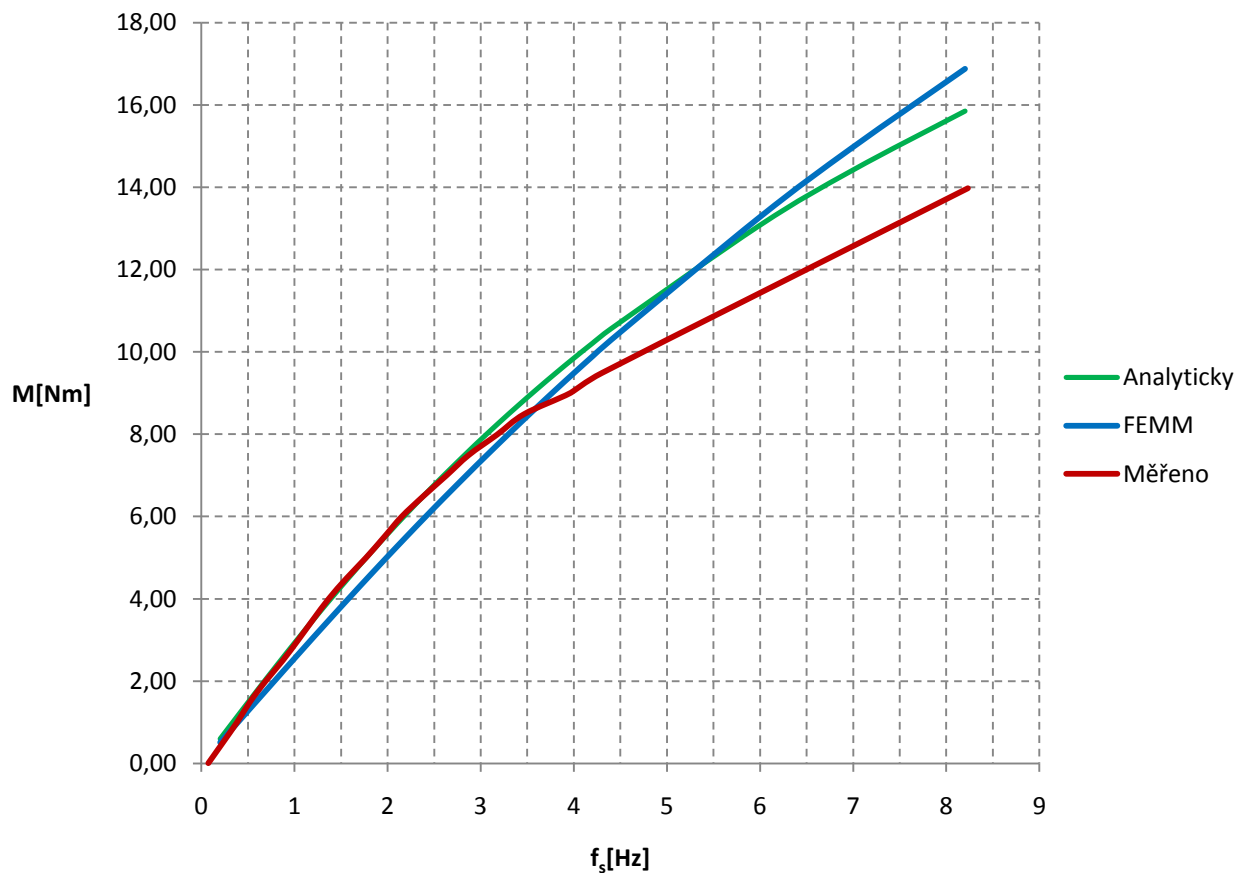
Nyní pomocí informace o výkonu můžeme vypočítat moment (76), když vztah (74) porovnáme se vztahem (75).

$$3 \cdot P_{2f} = M \cdot \omega_2 \quad (75)$$

Po dosazení a vyjádření momentu máme vztah, kde je úhlová rychlost rotoru vyjádřena pomocí synchronní a skluzové úhlové rychlosti. To nám umožní dosazováním frekvence skluzu sledovat odpovídající moment.

$$M = \frac{3 \cdot (U_1 - U_{Z1})^2}{\frac{\omega_1}{\omega_s} R_2 \cdot (\omega_1 - \omega_s) \cdot \pi} \quad (76)$$

Výsledné průběhy momentu jsou na následujícím grafu 6-1, měřená charakteristika má na konci pokles strmosti, protože než se hodnota změřila, přetížení ohřálo klec rotoru a její odpor vzrostl. Vypočítané hodnoty v tabulce 9. Ve jmenovitém bodě $f_s = 2,87\text{Hz}$ se moment analytický kryje s měřeným. FEMM model se liší přibližně o 5%.



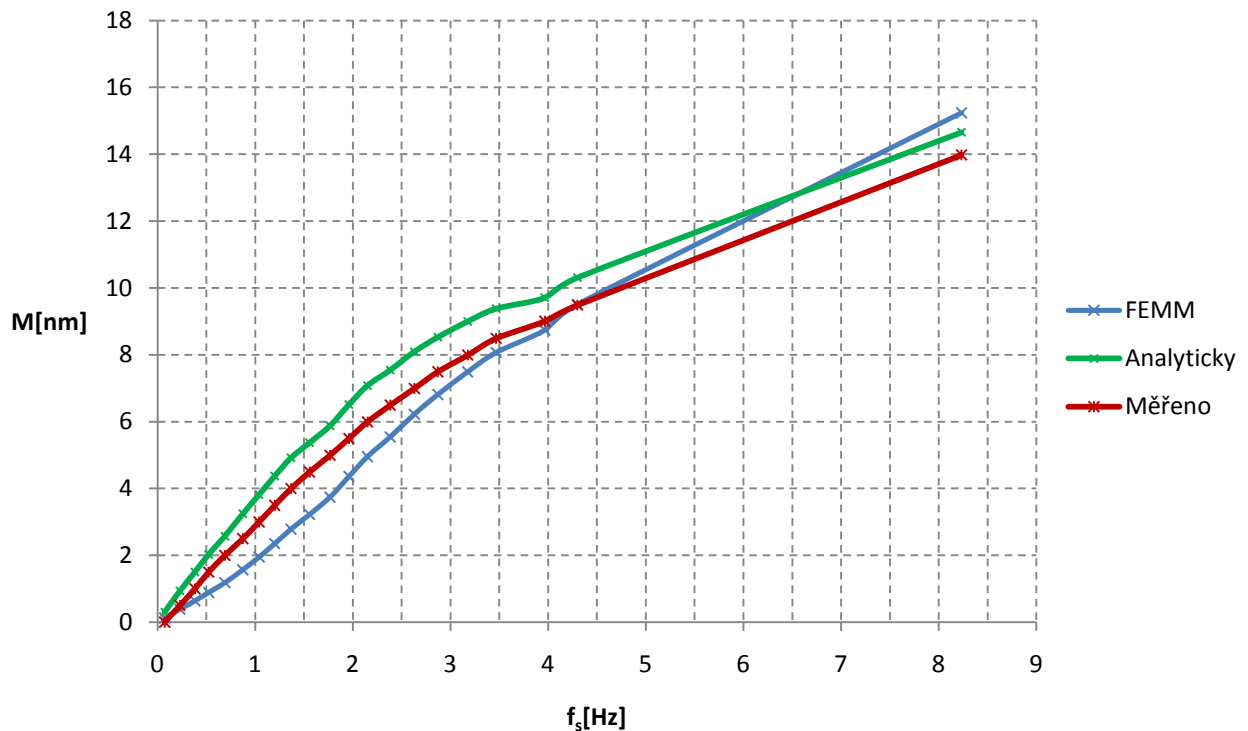
Graf 6-1 Moment v závislosti na frekvenci skluzu - náhradní schéma napájené napětím

6.2 Moment motoru – vnucení změřeného proudu a skluzu

Tentokrát místo napájení náhradního schématu napětím, bude model napájený proudem a skluzem. Hodnoty proudu a odpovídajícího skluzu máme změřené a můžeme je tedy dosadit do následujícího vztahu (31) pro moment. Odvodili jsme si již v kapitole 4.1. Časovou konstantu vypočítáme podle vztahu (22). Parametry náhradního schématu máme vypočítané.

$$M = 3pL_m i_1^2 \left(\frac{\tau\omega_s}{1 + (\tau\omega_s)^2} \right)$$

Zde se již jmenovitý moment liší o 10% v obou směrech, tato metoda je méně vhodná, ale v případě potřeby použitelná.



Graf 6-2 Závislost momentu na skluzu - model napájený proudem

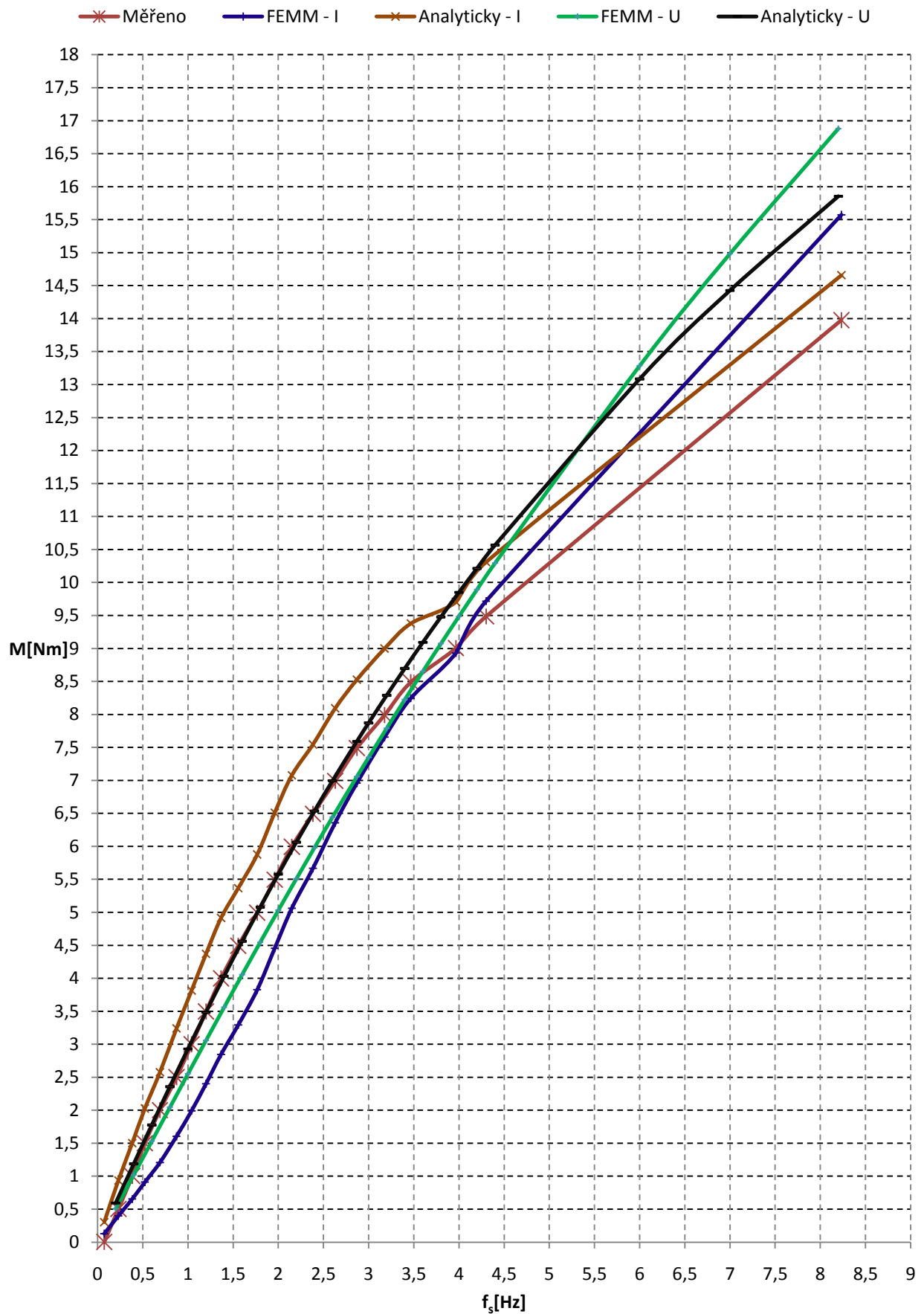
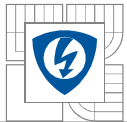
6.3 Srovnání průběhů

Nyní si srovnáme všechny průběhy v jednom grafu 6-3.

Pro jistotu si legendu v tomto grafu zrekapitulujeme.

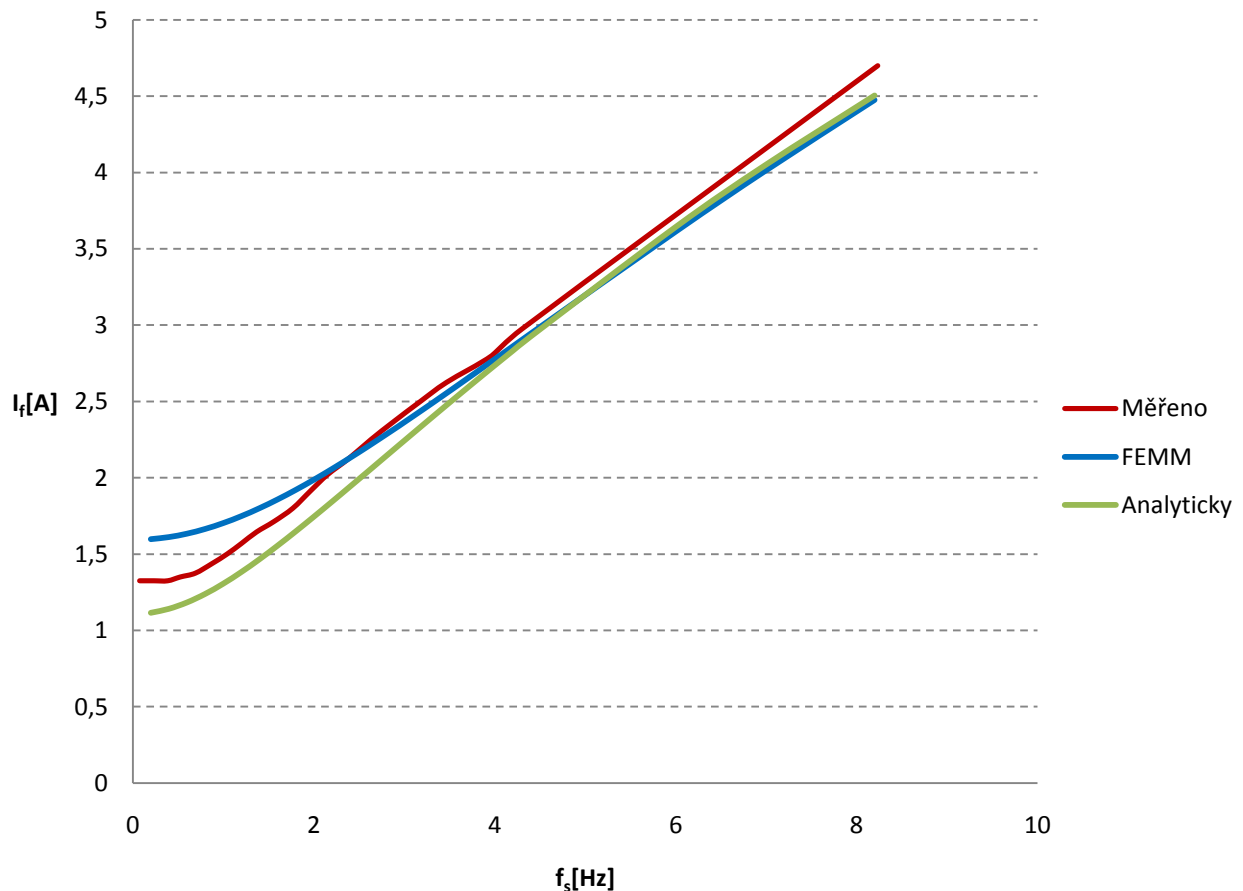
- FEMM - I, Analyticky – I Průběhy vypočítané v kapitole 6.2 s vnuceným proudem.
- FEMM – U, Analyticky – U Průběhy z kapitoly 6.1 s nastaveným napětím v náhradním schématu.

Jmenovitý moment motoru je 7,6Nm, tuto hodnotu jsme dvojnásobně překročili, to je důvod rozcházení hodnot na konci křivek, proud v kleci ji zahřívá. Vyšší odpor klece způsobí snadnější dosažení indukovaného napětí v kleci a proto pokles proudu a tím i momentu, vzroste skluz a proud opět vzroste, ale na úkor větších ztrát. To se v modelech neděje. Jejich odpor zůstává stále stejný, a proto mají všechny větší moment na konci. Různá maximální hodnota je dána parametry náhradního schématu a způsobu napájení.



Graf 6-3 Závislost momentu na skluzu - model napájený proudem

Podíváme se ještě, jak vypadá proud jedné fáze motoru.



Graf 6-4 Proud fázový v závislosti na frekvenci skluzu

Závěr:

I když se modelováním snažíme postihnout realitu co nejlépe, dopouštíme se mnohdy záměrně zjednodušování. Dokonalý model by obsahoval nepředstavitelné množství detailních údajů a byl neuvěřitelně náročný na výpočet. Proto nelze očekávat, že budou hodnoty z tohoto 2D modelu přesně odpovídat hodnotám reálného motoru.

Asynchronní motor se skládá z mnoha částí a v FEMMu jsou pouze ty základní. Mezi zanedbanými částmi jsou:

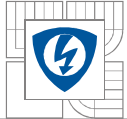
Celá vnější konstrukce motoru, chladicí žebra, ventilátor který zvýší spotřebu, štíty, ložiska a další mechanické prvky.

Zakřivení drážek rotoru snižující počet harmonických magnetického toku.

Harmonické, které má na svědomí pohyb rotoru. Modely ve FEMMu jsou statické konfigurace. Vyšší harmonické působí ztráty a ty zde chybí.

Nelineární materiály. Obecně pracují blízko saturace. Protože nelineární časově proměnné jevy FEMM neumí modelovat, je to těžko řešitelný problém.

Konce tyčí také zapříčiňují další rozptylový tok na koncích stroje. Tímto způsobené ztráty se obtížně zjišťují. Podobě jsou tyto ztráty i na statoru. Tyto ztráty neovlivňují vztah mezi



proudem a vyvolanou silou v modelu FEMM. Bude ale potřeba vyšší napětí na vyvolání požadovaného proudu.

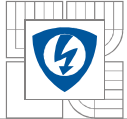
Ukázali jsme si, že i složitější stroje je možno za určitých podmínek analyzovat pomocí jednoduchého modelu. Je ovšem potřeba počítat s tolerancí, která bývá běžně i 20-30%. Podle toho jak přesně se nám podaří zjistit vlastnosti materiálů a jestli vezmeme v úvahu zanedbané části. Náhradní schéma s konstantními parametry platí přesně jen ve jednom bodě a pak se začne rozcházet od reálného motoru. Mění se odpor primárního vinutí, rozptylová indukčnost i odpor klece, který se mění nejvýznamněji.

Ztráty na odporu rotoru způsobí jeho zahřívání. Hliník při ohřevu o 100°C zvýší svůj odpor o 40%. Obvykle je v pořádku zvýšit odpor proti jeho hodnotě udané za pokojové teploty. Je ale potřeba vědět, při jaké teplotě motor pracuje. Zde jsme pracovali s konstantní vodivostí hliníku.

Část energie se také ztrácí v železe vířivými proudy. Tyto ztráty byly zanedbány, do obvodu by se musel přidat paralelně další odpor, vířivé ztráty reprezentující.

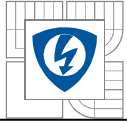
Všechny tyto nedostatky se musí vzít v úvahu k dosažení realistického výsledku.

Ukázali jsme si, jak postupovat při použití metody konečných prvků pro zjištění parametrů náhradního schématu a jaké výsledky můžeme očekávat vzhledem ke skutečnému motoru. Výsledné průběhy momentu jsou velice přesné, co se pracovní oblasti motoru týče. Při přetěžování už máme téměř 20% odchylku momentu, ale to je hlavně způsobeno změnou teploty klece během měření.



LITERATURA

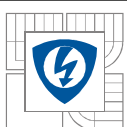
- [1] PETROV, G. N. *Elektrické stroje 2*. Vydání 1. Praha : Academia, 1982. 732 s.
- [2] PEŠEK, M. *Program FEMM - podklady pro výuku v elektronické formě*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2009. 54 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
- [3] MEEKER, David. *Finite Element Method Magnetics: HomePage* [online]. 2004, 2009-08-06 [cit. 2010-04-25]. Finite Element Method Magnetics : InductionMotorExample. Dostupné z WWW: <<http://www.femm.info/wiki/InductionMotorExample>>.
- [4] *EMP s.r.o. Slavkov u Brna* [online]. 2007 [cit. 2010-12-04]. [Www.emp-slavkov.cz](http://www.emp-slavkov.cz). Dostupné z WWW: <http://www.emp-slavkov.cz/tm_jmc.html>.
- [5] BOLDEA, Ion; A. NASAR, Syed. *The Induction Machine Handbook*. London : CRC, 2001. 968 s. ISBN 0849300045.
- [6] *Electrical Steel Non Oriented Fully Processed*. Newport (United Kindgdom) : Cogent Power Ltd., 2011. 28 s.



PŘÍLOHY

Tabulka 5 TM90-4S Měření zatěžovací charakteristiky, změřené a vypočtené hodnoty

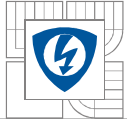
U1[V]	P1[W]	η	Pout[W]	M[Nm]	$n[\text{min}^{-1}]$	U2[240/120]	P2[900/120]	A2[1/1]	U1[240/120]	P1[900/120]	A1[1/1]
230	30	0,0036	0,4	0,003	1497,8	115	6	1,35	115	4	1,3
230	52,5	0,412	78,8	0,504	1493,1	115	10	1,35	115	7	1,3
230	82,5	0,5671	156,3	1,003	1488,5	115	13,5	1,35	115	11	1,3
230	112,5	0,6586	233,4	1,5001	1484,3	115	16,5	1,4	115	15	1,3
230	135	0,7251	310	2,001	1479,3	115	20	1,425	115	18	1,325
230	165	0,7455	385,8	2,5	1473,8	115	24	1,475	115	22	1,4
230	195	0,7735	461,2	3	1468,8	115	27	1,55	115	26	1,45
230	221,25	0,7881	536,4	3,497	1464	115	31	1,6	115	29,5	1,54
230	247,5	0,7982	610,6	3,998	1459	115	35	1,69	115	33	1,6
230	270	0,8159	683,8	4,493	1453,3	115	38,5	1,75	115	36	1,675
230	300	0,8206	757	4,995	1447	115	42	1,85	115	40	1,75
230	330	0,8189	829,1	5,494	1441,2	115	46	1,95	115	44	1,875
230	360	0,8171	900,9	5,993	1435,5	115	50	2,05	115	48	1,99
230	390	0,8144	971,2	6,493	1428,5	115	54	2,15	115	52	2,1
230	420	0,8115	1040,7	6,992	1421,1	115	58	2,3	115	56	2,2
230	450	0,8046	1108,8	7,49	1413,9	115	62,5	2,4	115	60	2,325
230	480	0,7975	1175,3	7,99	1404,7	115	67	2,55	115	64	2,45
230	525	0,7877	1240,7	8,488	1396	115	70	2,65	115	70	2,6
230	555	0,7771	1302,6	9,005	1381	113	75	2,85	115	74	2,75
226	592,5	0,7614	1361,9	9,485	1371	113	80	3	113	79	2,95
228	960	0,6308	1831	13,977	1253	113	65	4,8	114	64	4,6



Příkon	s [Hz]	I [A]	P2 [W]
112,5	0,0733	1,325	45
191,25	0,23	1,325	75
275,63	0,3833	1,325	101,25
354,38	0,5233	1,35	123,75
427,5	0,69	1,375	150
517,5	0,8733	1,4375	180
596,25	1,04	1,5	202,5
680,63	1,2	1,57	232,5
765	1,3667	1,645	262,5
838,13	1,5567	1,7125	288,75
922,5	1,7667	1,8	315
1012,5	1,96	1,9125	345
1102,5	2,15	2,02	375
1192,5	2,3833	2,125	405
1282,5	2,63	2,25	435
1378,1	2,87	2,3625	468,75
1473,8	3,1767	2,5	502,5
1575	3,4667	2,625	525
1676,3	3,9667	2,8	562,5
1788,8	4,3	2,975	600
2902,5	8,2333	4,7	975

Tabulka 6 TM90-4S Měření naprázdno, změřené a vypočtené hodnoty.

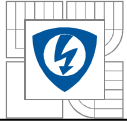
P2 [W]	U1 [V]	P1 [W]	U2 [V]	P2 [W]	A2 [d] [1/1]	U1 [d] [240V/120d]	P1 [d] [900W/120d]	A1 [1/1]
157,5	350	247,5	72	21	1,15	70	33	1,1
127,5	325	202,5	67	17	1,05	65	27	0,9
112,5	317,5	187,5	65	15	0,98	63,5	25	0,92
97,5	300	165	62	13	0,9	60	22	0,85
82,5	275	142,5	57	11	0,8	55	19	0,77
67,5	250	112,5	51	9	0,71	50	15	0,68
48,75	225	90	46	6,5	0,63	45	12	0,61
37,5	200	75	41	5	0,555	40	10	0,54
30	175	60	36	4	0,485	35	8	0,49
22,5	150	45	31,5	3	0,42	30	6	0,43
15	125	30	26	2	0,35	25	4	0,35
7,5	100	22,5	20,5	1	0,29	20	3	0,3
0	75	15	15	0	0,23	15	2	0,24



U[V]	cosφ[rad ⁻¹]	P=P1+P2	U2[V]
204,96	0,1301	90	360
190,53	0,1346	75	335
185,47	0,1419	75	325
176,09	0,146	67,5	310
161,66	0,1576	60	285
145,78	0,148	45	255
131,35	0,1688	41,25	230
116,91	0,1953	37,5	205
102,48	0,2002	30	180
88,768	0,1988	22,5	157,5
73,612	0,1941	15	130
58,457	0,2899	15	102,5
43,301	0,4914	15	75

Tabulka 7 Hodnoty momentu z náhradního schématu a měření - souhrn

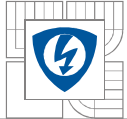
NAPÁJENO				PROUDEM			NAPĚTÍM		
parametry	FEMM	měření			měření	FEMM			
s[Hz]	M[Nm]	M[Nm]	M[Nm]		s[Hz]	M 3f U[Nm]	M 3f U[Nm]		
0,07	0,07	0,25	0,00		0,2	0,88	0,31		
0,23	0,21	0,78	0,50		0,4	1,76	0,63		
0,38	0,34	1,26	1,00		0,6	2,59	0,96		
0,52	0,48	1,73	1,50		0,8	3,37	1,28		
0,69	0,65	2,25	2,00		1	4,07	1,62		
0,87	0,89	2,90	2,50		1,2	4,70	1,95		
1,04	1,14	3,50	3,00		1,4	5,25	2,28		
1,20	1,42	4,10	3,50		1,6	5,74	2,62		
1,37	1,75	4,72	4,00		1,8	6,16	2,95		
1,56	2,11	5,28	4,49		2	6,52	3,28		
1,77	2,57	5,92	5,00		2,2	6,84	3,61		
1,96	3,14	6,69	5,49		2,4	7,11	3,94		
2,15	3,73	7,40	5,99		2,6	7,35	4,26		
2,38	4,41	8,03	6,49		2,8	7,56	4,58		
2,63	5,23	8,75	6,99		3	7,75	4,89		
2,87	6,03	9,35	7,49		3,2	7,91	5,20		
3,18	7,06	10,01	7,99		3,4	8,06	5,51		
3,47	8,03	10,55	8,49		3,6	8,19	5,81		
3,97	9,46	11,08	9,01		3,8	8,31	6,11		
4,30	10,81	11,86	9,49		4	8,42	6,40		
					4,2	8,52	6,69		
					4,4	8,61	6,98		



Tabulka 8 Náhradní schéma - výpočet momentu

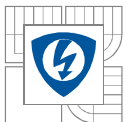
Analyticky											
f_s [Hz]	η [min ⁻¹]	M [Nm]	P_f [W]	U_{z1} [V]	I_f [A]	M [Nm]	P_f [W]	U_{z1} [V]	I_f [A]	Z_2 [Ω]	Z_1 [Ω]
0,2	1494	0,51	26,53	20,45	1,6	131,22	0,51	20,45	1,6	12,80	12,80
0,4	1488	1,02	52,98	20,62	1,6	130,00	1,02	20,62	1,6	12,80	12,80
0,6	1482	1,53	79,25	20,91	1,6	128,04	1,51	20,91	1,6	12,80	12,80
0,8	1476	2,04	105,27	21,30	1,6	125,44	2,01	21,30	1,6	12,80	12,80
1	1470	2,55	130,97	21,79	1,7	122,32	2,49	21,79	1,7	12,80	12,80
1,2	1464	3,06	156,28	22,38	1,7	118,80	2,97	22,38	1,7	12,80	12,80
1,4	1458	3,56	181,17	23,04	1,8	115,01	3,45	23,04	1,8	12,80	12,80
1,6	1452	4,06	205,58	23,77	1,8	111,06	3,91	23,77	1,8	12,80	12,80
1,8	1446	4,55	229,49	24,57	1,9	107,04	4,37	24,57	1,9	12,80	12,80
2	1440	5,03	252,88	25,42	1,9	103,02	4,82	25,42	1,9	12,80	12,80
2,2	1434	5,51	275,73	26,32	2,0	99,07	5,27	26,32	2,0	12,80	12,80
2,4	1428	5,98	298,04	27,26	2,1	95,22	5,71	27,26	2,1	12,80	12,80
2,6	1422	6,44	319,79	28,23	2,2	91,51	6,15	28,23	2,2	12,80	12,80
2,8	1416	6,90	340,99	29,23	2,2	87,95	6,57	29,23	2,2	12,80	12,80
3	1410	7,35	361,65	30,24	2,3	84,56	7,00	30,24	2,3	12,80	12,80
3,2	1404	7,79	381,77	31,28	2,4	81,33	7,41	31,28	2,4	12,80	12,80
3,4	1398	8,22	401,35	32,33	2,5	78,27	7,82	32,33	2,5	12,80	12,80
3,6	1392	8,65	420,41	33,39	2,6	75,38	8,22	33,39	2,6	12,80	12,80
3,8	1386	9,07	438,95	34,46	2,6	72,64	8,62	34,46	2,6	12,80	12,80
4	1380	9,49	456,99	35,54	2,7	70,06	9,01	35,54	2,7	12,80	12,80
4,2	1374	9,89	474,53	36,62	2,8	67,62	9,39	36,62	2,8	12,80	12,80
4,4	1368	10,29	491,59	37,70	2,9	65,31	9,77	37,70	2,9	12,80	12,80
6	1320	13,28	612,11	46,24	3,6	50,88	20,09	46,24	3,6	12,80	12,80
7	1290	14,98	674,69	51,39	4,0	44,50	17,22	51,39	4,0	12,80	12,80
8,2	1254	16,88	738,92	57,29	4,4	38,59	14,58	57,29	4,4	12,80	12,80

FEMM											
f_s [Hz]	η [min ⁻¹]	M [Nm]	P_f [W]	U_{z1} [V]	I_f [A]	M [Nm]	P_f [W]	U_{z1} [V]	I_f [A]	Z_2 [Ω]	Z_1 [Ω]
0,2	1494	0,59	30,95	18,15	1,12	1494	30,95	18,15	1,12	189,99	16,28
0,4	1488	1,19	61,65	18,58	1,14	1488	61,65	18,58	1,14	185,27	16,28
0,6	1482	1,78	91,89	19,26	1,18	1482	91,89	19,26	1,18	178,15	16,28
0,8	1476	2,36	121,47	20,16	1,24	1476	121,47	20,16	1,24	169,42	16,28
1	1470	2,93	150,26	21,26	1,31	1470	150,26	21,26	1,31	159,88	16,28
1,2	1464	3,49	178,17	22,50	1,38	1464	178,17	22,50	1,38	150,16	16,28
1,4	1458	4,03	205,15	23,86	1,47	1458	205,15	23,86	1,47	140,67	16,28
1,6	1452	4,56	231,17	25,31	1,55	1452	231,17	25,31	1,55	131,68	16,28
1,8	1446	5,08	256,23	26,82	1,65	1446	256,23	26,82	1,65	123,32	16,28
2	1440	5,58	280,33	28,39	1,74	1440	280,33	28,39	1,74	115,63	16,28
2,2	1434	6,06	303,50	29,98	1,84	1434	303,50	29,98	1,84	108,61	16,28
2,4	1428	6,54	325,76	31,60	1,94	1428	325,76	31,60	1,94	102,21	16,28
2,6	1422	6,99	347,13	33,23	2,04	1422	347,13	33,23	2,04	96,40	16,28
2,8	1416	7,44	367,65	34,87	2,14	1416	367,65	34,87	2,14	91,12	16,28
3	1410	7,87	387,34	36,50	2,24	1410	387,34	36,50	2,24	86,31	16,28
3,2	1404	8,29	406,23	38,13	2,34	1404	406,23	38,13	2,34	81,93	16,28
3,4	1398	8,70	424,37	39,75	2,44	1398	424,37	39,75	2,44	77,92	16,28
3,6	1392	9,09	441,77	41,36	2,54	1392	441,77	41,36	2,54	74,26	16,28
3,8	1386	9,48	458,46	42,95	2,64	1386	458,46	42,95	2,64	70,90	16,28
4	1380	9,85	474,48	44,53	2,74	1380	474,48	44,53	2,74	67,81	16,28
4,2	1374	10,21	489,85	46,09	2,83	1374	489,85	46,09	2,83	64,96	16,28
4,4	1368	10,57	504,59	47,63	2,93	1368	504,59	47,63	2,93	62,33	16,28
6	1320	13,08	602,88	59,30	3,64	1320	602,88	59,30	3,64	46,87	16,28
7	1290	14,43	649,58	65,95	4,05	1290	649,58	65,95	4,05	40,49	16,28
8,2	1254	15,85	694,00	73,34	4,50	1254	694,00	73,34	4,50	34,78	16,28



Tabulka 9 Porovnání proudů náhradních schémat a fáze motoru

f_s [Hz]	I[A] Analyticky	I[A] Měřený	I[A] FEMM
0,07	1,11	1,33	1,59
0,23	1,12	1,33	1,60
0,38	1,14	1,33	1,61
0,52	1,17	1,35	1,62
0,69	1,21	1,38	1,65
0,87	1,26	1,44	1,68
1,04	1,32	1,50	1,71
1,20	1,38	1,57	1,75
1,37	1,45	1,65	1,79
1,56	1,53	1,71	1,84
1,77	1,63	1,80	1,91
1,96	1,72	1,91	1,97
2,15	1,82	2,02	2,04
2,38	1,93	2,13	2,12
2,63	2,06	2,25	2,22
2,87	2,18	2,36	2,31
3,18	2,33	2,50	2,43
3,47	2,47	2,63	2,55
3,97	2,72	2,80	2,76
4,30	2,88	2,98	2,90
8,23	4,52	4,70	4,49



Obrázek 4 Motor TM90-4S a dynamometr