

# 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 A MĚŘENÍ PARAMETRŮ ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

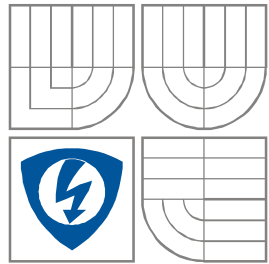
Bc. MARTIN NEKOVÁŘ

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY  
A ELEKTRONIKY

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

## VÝPOČET A MĚŘENÍ PARAMETRŮ ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ

CALCULATION AND MEASUREMENT OF INDUCTION MOTOR PARAMETERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

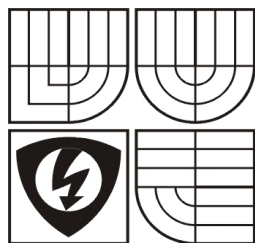
Bc. MARTIN NEKOVÁŘ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ VÍTEK, Ph.D.

BRNO 2012



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. Nekovář Martin

**Ročník:** 2

**ID:** 106667

**Akademický rok:** 2011/2012

**NÁZEV TÉMATU:**

## Výpočet a měření parametrů asynchronních motorů

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Seznamte se s problematikou výpočtu parametrů asynchronního motoru a s metodou konečných prvků.
2. Pomocí analytického výpočtu zjistěte parametry náhradního schématu zadaných strojů z dodané výrobní dokumentace.
3. Vytvořte modely těchto strojů a vypočtete parametry náhradního schématu s využitím metody konečných prvků.
4. Proveďte měření a výsledky dosažené jednotlivými postupy srovnajte.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Dle pokynů vedoucího

**Termín zadání:** 21.9.2011

**Termín odevzdání:** 21.5.2012

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

**Konzultanti diplomové práce:**

**Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.**

*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**

Tématem této diplomové práce je výpočet a měření parametrů asynchronního motoru. Práce je rozdělena do několika částí. V první a druhé části je obecně popsána konstrukce a princip funkce asynchronních motorů. Konstrukce zahrnuje popis jednotlivých částí asynchronního motoru, které tvoří stator a rotor. Práce se věnuje třífázovým souměrným a částečně nesouměrným jednofázovým motorům. Princip funkce s využitím točivého magnetického pole, které je u třífázových motorů kruhové, jednofázové motory mají pole eliptického tvaru. Dále je probráno náhradní schéma asynchronního motoru. Analytické početní zjištění velikostí parametrů motoru pomocí příslušných vzorců je obsahem části čtvrté. V této části práce jsou definovány postupy k získání parametrů náhradního schématu asynchronního motoru. V následující kapitole je pomocí dodané dokumentace proveden postup výpočtu parametrů náhradního schématu třífázového asynchronního motoru pro konkrétní typ. Další obsah práce pojednává o metodě konečných prvků, simulaci a měření asynchronních motorů k získání parametrů ze zkoušky naprázdno a nakrátko. Srovnání výsledků z měření, analytického výpočtu a ze simulace je uvedeno v poslední kapitole.

## **Abstract**

The theme of this master's thesis is calculation and measurement of the parameters of induction motor. The thesis is divided into several parts. The first and the second part describes the general construction and operating principle of asynchronous motors. The construction includes a description of each part of induction motor, which consists of stator and rotor. The thesis deals with three-phase symmetrical and asymmetric single-phase motors. Principle of operation with using the rotating magnetic field, which is circular at three-phase motors, single phase motors have field elliptical shape. The next part contains the motor replacement scheme. The fourth part contains the calculation of motor's parameters through the formulas. In this part the procedures for obtaining parameters of the replacement scheme of induction motor are defined. The process of calculating the parameters of the motor replacement scheme of three-phase asynchronous motor is created according to given documentation is the next part for the certain type. The next content of the thesis describe finite element method, simulation and measurement of asynchronous motors to get of parameters from no-load and short-circuit test. The comparison of the results from measurement, analytical calculation and from simulation is given in the last chapter.

## **Klíčová slova**

Asynchronní motor; konstrukce; princip funkce; výpočet parametrů; měření parametrů; metoda konečných prvků MKP; simulace

## **Keywords**

Asynchronous motor; construction; principle of operation; calculation of parameters; measurement of parameters; finite element method FEM; simulation

## **Bibliografická citace**

NEKOVÁŘ, M. *Výpočet a měření parametrů asynchronních motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 65 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ondřej Vítek, Ph.D..

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Výpočet a měření parametrů asynchronních motorů 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.

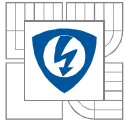
Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského 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 diplomové práce.

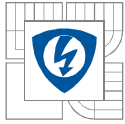
V Brně dne ..... Podpis autora .....



## Obsah

|   |    |
|---|----|
| SEZNAM OBRÁZKŮ.....   | 9  |
| SEZNAM TABULEK .....  | 10 |
| SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....   | 11 |
| ÚVOD .....  | 13 |
| 1 KONSTRUKCE ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ .....   | 14 |
| 1.1 OBECNÁ KONSTRUKCE ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ (3F MOTOR) .....   | 14 |
| 1.2 KONSTRUKCE JEDNOFÁZOVÝCH ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ .....   | 14 |
| 1.2.1 CHARAKTER POMOCNÉ (ROZBĚHOVÉ) IMPEDANCE .....   | 15 |
| 1.2.2 SPOUŠTĚNÍ JEDNOFÁZOVÉHO MOTORU.....   | 15 |
| 1.3 STATOROVÉ VINUTÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU .....   | 15 |
| 1.4 ROTOROVÉ VINUTÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU .....  | 15 |
| 1.5 DRUHY KLECOVÝCH VINUTÍ.....   | 16 |
| 1.5.1 VÍROVÉ KLECE .....  | 16 |
| 1.5.2 DVOJITÉ KLECE .....   | 16 |
| 2 PRINCIP FUNKCE ASYNCHRONNÍHO MOTORU.....  | 16 |
| 2.1 TŘÍFÁZOVÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR.....  | 16 |
| 2.2 JEDNOFÁZOVÝ MOTOR BEZ POMOCNÉ IMPEDANCE .....   | 17 |
| 2.3 JEDNOFÁZOVÝ MOTOR S POMOCNOU FÁZÍ .....   | 17 |
| 3 OBVODOVÝ MODEL ASYNCHRONNÍHO MOTORU.....  | 18 |
| 3.1 OBVODOVÝ MODEL JEDNÉ FÁZE 3F ASYNCHRONNÍHO MOTORU[4] .....  | 18 |
| 3.1.1 MOMENT A MOMENTOVÁ CHARAKTERISTIKA ASYNCHRONNÍHO MOTORU .....                                       | 20 |
| 4 ANALYTICKÝ VÝPOČET PARAMETRŮ 3F MOTORU .....  | 21 |
| 4.1 MAGNETIZAČNÍ PROUD $I_M$ [A].....   | 21 |
| 4.2 ODPORY A REAKTANCE ASYNCHRONNÍHO STROJE .....   | 26 |
| 4.2.1 ODPOR VINUTÍ STATORU $R_1$ [ $\Omega$ ] .....   | 26 |
| 4.2.2 ODPOR VINUTÍ ROTORU $R_2$ [ $\Omega$ ] .....  | 26 |
| 4.2.3 ROZPTYLOVÁ REAKTANCE FÁZE STATOROVÉHO VINUTÍ $X_{1\Sigma}$ [ $\Omega$ ] .....                       | 28 |
| 4.2.4 ROZPTYLOVÁ REAKTANCE FÁZE ROTOROVÉHO VINUTÍ $X_{2\Sigma}$ [ $\Omega$ ].....                         | 29 |
| 4.2.5 VLIV NATOČENÍ DRÁŽEK.....   | 30 |
| 4.3 CELKOVÉ ZTRÁTY V ŽELEZE ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ $\Delta P_{Fe}$ [ $\Omega$ ].....                        | 30 |
| 4.4 MECHANICKÉ A VENTILAČNÍ ZTRÁTY $\Delta P_{MECH}$ [W] .....  | 33 |
| 4.5 ELEKTRICKÉ ZTRÁTY VE STATOROVÉM VINUTÍ PŘI CHODU NAPRÁZDNO (JOULEOVY ZTRÁTY) $\Delta P_{j0}$ [W]..... | 33 |
| 4.6 PROUD NAPRÁZDNO MOTORU $I_0$ [A] .....  | 34 |
| 5 VÝPOČET PARAMETRŮ PRO MOTOR TM90-4S[7].....   | 34 |





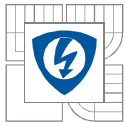
---

|  |           |
|--|-----------|
| <b>6 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ (MKP)</b> .....                                | <b>42</b> |
| <b>6.1 OBECNĚ K METODĚ KONEČNÝCH PRVKŮ</b> .....                           | <b>42</b> |
| <b>6.2 SIMULACE MOTORŮ V PROGRAMU FEMM</b> .....                           | <b>42</b> |
| <b>6.3 VYTVOŘENÍ MODELŮ MOTORŮ</b> .....                                   | <b>43</b> |
| <b>6.4 MODELOVÁNÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU TM90-4S A TM71-2S[7]</b> .....      | <b>43</b> |
| 6.4.1 NÁHRADNÍ SCHÉMA JEDNÉ FÁZE INDUKČNÍHO MOTORU V USTÁLENÉM STAVU ..... | 43        |
| 6.4.2 ODVOZENÍ MOMENTU $M$ [N·m] Z NÁHRADNÍHO SCHÉMATU[10]: .....          | 43        |
| <b>6.5 VÝSLEDKY SIMULACÍ - VÝPOČET MOMENTU <math>M</math></b> .....        | <b>45</b> |
| <b>7 MĚŘENÍ 3F ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ</b> .....                              | <b>47</b> |
| <b>7.1 ZKOUŠKA NAPRÁZDNO - TM90-4S</b> .....                               | <b>47</b> |
| <b>7.2 ZKOUŠKA NAPRÁZDNO - TM71-2S</b> .....                               | <b>48</b> |
| <b>7.3 ZKOUŠKA NAKRÁTKO - TM90-4S</b> .....                                | <b>48</b> |
| <b>7.4 ZKOUŠKA NAKRÁTKO - TM71-2S</b> .....                                | <b>48</b> |
| <b>8 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ</b> .....   | <b>49</b> |
| <b>9 ZÁVĚR</b> .....   | <b>51</b> |
| <b>LITERATURA</b> .....  | <b>52</b> |
| <b>PŘÍLOHY</b> .....   | <b>53</b> |



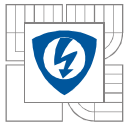
## SEZNAM OBRÁZKŮ

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Obr. č.1: Zapojení svorkovnice 3f asynchronního motoru.....</i>   | <i>14</i> |
| <i>Obr. č.2: Rozklad stojatého pole na dvě točivá (převzato z [1]).....</i>  | <i>17</i> |
| <i>Obr. č.3: Obvodový model skutečného transformátoru při zatížení (převzato z [4]) .....</i>                                  | <i>18</i> |
| <i>Obr. č.4: Obvodový model asynchronnímu motoru (převzato z [4]).....</i>   | <i>19</i> |
| <i>Obr. č.5: Obvodový model asynchronního motoru s přemístěnou magnetizační větví na vstupní svorky (převzato z [4]) .....</i> | <i>19</i> |
| <i>Obr. č.6: Momentová charakteristika asynchronního stroje (převzato z [4]) .....</i>   | <i>20</i> |
| <i>Obr. č.7: Rozměry kruhu rotoru – podélný řez rotorem (převzato z [1]) .....</i>   | <i>26</i> |
| <i>Obr. č. 8: Ukázka sítě uzlů a elementů (mesh) v programu FEMM[11] .....</i>   | <i>42</i> |
| <i>Obr. č.9: Náhradní schéma jedné fáze indukčního motoru v ustáleném stavu (převzato z [10])..</i>                            | <i>43</i> |
| <i>Obr. č.10:Srovnání momentových charakteristik - TM90-4S.....</i>  | <i>50</i> |
| <i>Obr. č.11:Srovnání momentových charakteristik - TM71-2S.....</i>  | <i>50</i> |
| <i>Obr. č.12: Měření naprázdno - TM90-4S - graf a) .....</i>   | <i>62</i> |
| <i>Obr. č.13:Měření naprázdno - TM90-4S - graf b) .....</i>  | <i>63</i> |
| <i>Obr. č.14:Měření naprázdno - TM90-4S - graf c) .....</i>  | <i>63</i> |
| <i>Obr. č.15:Měření naprázdno - TM71-2S - graf d) .....</i>  | <i>64</i> |
| <i>Obr. č.16:Měření naprázdno - TM71-2S - graf e) .....</i>  | <i>64</i> |
| <i>Obr. č.17:Měření naprázdno - TM71-2S - graf f) .....</i>  | <i>65</i> |



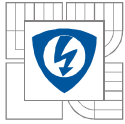
## SEZNAM TABULEK

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Tab. č.1: Zvláštnosti klecového rotorového vinutí[3] .....</i>                                | <i>28</i> |
| <i>Tab. č.2:Výsledné vypočítané hodnoty z Lua skriptů - TM90-4S.....</i>                         | <i>45</i> |
| <i>Tab. č.3: Výsledné vypočítané hodnoty z Lua skriptů - TM71-2S.....</i>                        | <i>45</i> |
| <i>Tab. č.4: Naměřené hodnoty při zkoušce naprázdno motoru TM90-4S - 1.část.....</i>             | <i>47</i> |
| <i>Tab. č.5: Naměřené a vypočtené hodnoty při zkoušce naprázdno motoru TM90-4S - 2.část.....</i> | <i>47</i> |
| <i>Tab. č.6:Naměřené a vypočtené hodnoty při zkoušce naprázdno motoru TM71-2S.....</i>           | <i>48</i> |
| <i>Tab. č.7: Naměřené hodnoty při zkoušce nakrátko motoru TM90-4S - 1.část.....</i>              | <i>48</i> |
| <i>Tab. č.8: Naměřené a vypočtené hodnoty při zkoušce nakrátko motoru TM90-4S - 2.část.....</i>  | <i>48</i> |
| <i>Tab. č.9: Vypočtené hodnoty při zkoušce nakrátko motoru TM90-4S - 3.část.....</i>             | <i>48</i> |
| <i>Tab. č.10: Naměřené hodnoty při zkoušce nakrátko motoru TM71-2S - 1.část.....</i>             | <i>48</i> |
| <i>Tab. č.11: Vypočtené hodnoty při zkoušce nakrátko motoru TM71-2S - 2.část.....</i>            | <i>49</i> |
| <i>Tab. č.12:Srovnání výsledků - asynchronní motor TM90-4S.....</i>                              | <i>49</i> |
| <i>Tab. č.13: Srovnání výsledků - asynchronní motor TM71-2S.....</i>                             | <i>49</i> |



## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

|                  |   |
|------------------|---|
| $2p$             | počet pólů stroje                         |
| $a_{kn}, b_{kn}$ | rozměry rotorového kruhu                  |
| $B$              | magnetická indukce                        |
| $b_{01}, b_{02}$ | otevření statorové a rotorové drážky      |
| $b_{zr}$         | šířka zubu rotoru                         |
| $b_{zs}$         | šířka zubu statoru                        |
| $D$              | průměr                                    |
| $D$              | vnitřní průměr statoru (vrtání statoru)   |
| $D_h$            | průměr hřídele                            |
| $D_{kn}$         | střední průměr rotorového kruhu           |
| $f_1$            | kmitočet napájecí sítě                    |
| $F_m$            | magnetomotorická síla pólové dvojice      |
| $H$              | intenzita magnetického pole               |
| $h_{j1}$         | výška $j$ ha na rotoru                    |
| $h_{j2}$         | výška $j$ ha na statoru                   |
| $h_{d2}$         | výška rotorové drážky                     |
| $h_{d1}$         | výška statorové drážky                    |
| $I$              | elektrický proud                          |
| $k_c$            | Carterův činitel                          |
| $k_{c1}, k_{c2}$ | Carterův činitel pro stator a rotor       |
| $k_{v1}$         | činitel vinutí                            |
| $k_{y1}$         | činitel kroku                             |
| $l$              | délka indukční čáry                       |
| $l_{\check{e}}$  | přibližná délka čela                      |
| $L_e$            | efektivní délka železa                    |
| $m$              | hmotnost                                  |
| $n$              | otáčky                                    |
| $N_1$            | počet závitů v sérii                      |
| $p$              | počet pól párů                            |
| $\Delta p_{1,0}$ | ztrátové číslo pro magnetickou indukci 1T |
| $q$              | počet drážek na pól a fázi                |
| $Q_1$            | počet drážek na statoru                   |



---

|                  |  |
|------------------|--|
| $Q_2$            | počet drážek na rotoru   |
| $R$              | elektrický odpor   |
| $R_2'$           | přepočtený odpor rotorového vinutí                                   |
| $R_t$            | odpor rotorové tyče  |
| $S_{kn}$         | průřez kruhu rotoru  |
| $S_t$            | průřez rotorové tyče   |
| $t_{d2}$         | drážková rozteč rotoru   |
| $t_{d1}$         | drážková rozteč statoru  |
| $U$              | magnetické napětí  |
| $U_1$            | svorkové napětí  |
| $X$              | reaktance  |
| $Z$              | impedance  |
| $\gamma$         | hustota statorového plechu   |
| $\delta$         | délka vzduchové mezery   |
| $\Delta P_{Cu1}$ | ztráty v mědi statoru  |
| $\Delta P_{Fe}$  | ztráty v železe  |
| $\Delta P_m$     | mechanické ztráty  |
| $\lambda$        | jednotková vodivost  |
| $\mu_0$          | permeabilita vakua ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$ ) |
| $\rho$           | rezistivita  |
| $t_p$            | pólová rozteč  |
| $\Phi$           | magnetický tok   |

## ÚVOD

Asynchronní stroje patří mezi nejrozšířenější střídavé elektrické stroje. Tyto stroje mohou pracovat jako motory a přeměňovat tak elektrickou energii na mechanickou nebo jako generátory, které elektrickou energii vyrábějí přeměnou z mechanické energie. Jejich největší uplatnění je ve funkci motorů. Vyrábí se v širokém rozsahu výkonů od desítek W do tisíců kW. Používaná velikost napájecí frekvence střídavého proudu u těchto strojů je 50 Hz v ČR[3].

Asynchronní motory jsou jedny z nejvíce používaných elektrických pohonů a to zejména pro svou konstrukční jednoduchost, spolehlivost a nenáročnost na údržbu. Z tohoto důvodu je možné se s nimi setkat zejména v průmyslu, ale také v domácnostech, kde slouží pro pohon chladniček, čerpadel, ventilátorů a dalších zařízení.

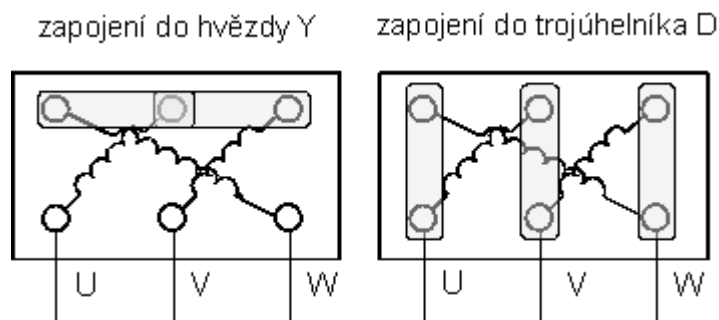
Třífázové asynchronní motory vyžadují pro svůj provoz připojení k třífázovému rozvodu elektrické energie. Mohou být zapojeny do hvězdy (Y) nebo do trojúhelníka (D). Přímé připojení k elektrické síti je možné pouze za přesně definovaných podmínek omezujících připojení motorů o dosti velkém výkonu, což by mělo za následek velký pokles napětí v místě připojení a zapůsobení elektrických ochranných zařízení. Tyto motory lze proto spouštět několika způsoby, mezi které patří rozběh hvězda – trojúhelník, autotransformátor zapojený v obvodu statoru, statorový spouštěč a další. Třífázové motory se nehodí pro použití v místech, kde není k dispozici třífázová napájecí síť, ale pouze jednofázové rozvody. Asynchronní motor, který obsahuje tři fáze, může být použit i v jednofázové síti avšak za cenu snížení jeho výkonu, což může být v některých aplikacích použitím tohoto stroje nežádoucí. Kompromisem mezi výhodami třífázových asynchronních strojů a použitím na jednofázové síti vznikl jednofázový asynchronní motor s pomocným (rozběhovým) vinutím. Tento motor obsahuje přídatnou impedanci, která je nejčastěji kapacitního charakteru. Tvoří ji kondenzátor s pevným dielektrikem zapojený do série s pomocnou fází. Vznikne tak pomocné vinutí obsahující přidanou impedanci, které je paralelně připojeno k vinutí hlavnímu. Rozběhová impedance kapacitního charakteru způsobí, že motor se rozběhne bez použití mechanického podnětu. Bez pomocné impedance by se totiž nerozběhl, jelikož napájení jednofázovým proudem způsobí vznik pouze stojatého magnetického pole. Jednofázový asynchronní motor patří mezi nesouměrné stroje, u kterého není jednoduché vypočítat jeho návrhové parametry[6].

Mezi nevýhody asynchronních strojů patří jejich větší hmotnost na jednotku výkonu oproti stroji stejnosměrnému stejného výkonu. Naproti tomu velkou výhodou asynchronních motorů je to, že nemají komutátor, který bývá zdrojem poruch a vyžaduje údržbu. S rychle se rozšiřujícím rozvojem výkonové elektroniky je možné snáze řídit otáčky asynchronního motoru změnou frekvence při současné změně napájecího napětí pomocí frekvenčních měničů, což dříve nebylo u tohoto druhu motoru možné.

# 1 KONSTRUKCE ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ

## 1.1 Obecná konstrukce asynchronních motorů (3f motor)

Asynchronní motory se skládají ze dvou základních částí. První částí je stator obsahující vinutí z mědi, které může být třífázové nebo jednofázové (hlavní a pomocné vinutí). Vinutí se ukládají do statorového paketu elektrotechnických plechů, který je nalisován do kostry motoru. Vodiče v drážkách jsou lakované nebo smaltované a musí být izolovány od statorových plechů. Plechy jsou mezi sebou také izolovány. Kostra je vyrobena z hliníku nebo litiny a má žebrování na svém povrchu sloužící k ochlazení stroje během provozu. Na přední a zadní straně motoru se nachází ložiskové štíty, ve kterých jsou uložena ložiska. Spodní část kostry obsahuje patky k přichycení stroje. S ohledem na použití motoru může obsahovat přírubu. Statorový svazek se impregnuje zejména k dosažení určité mechanické pevnosti. Ve svazku mohou být zapletena čidla k měření teploty vinutí. Svorkovnice třífázového asynchronního motoru má šest svorek, mezi které jsou zapojena tři vinutí. K možnosti zapojení motoru do hvězdy nebo do trojúhelníka slouží tři malé kovové spojky.

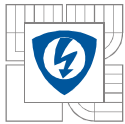


Obr. č.1: Zapojení svorkovnice 3f asynchronního motoru

Další základní částí motoru je rotor. Na rotoru se nachází klecové vinutí v případě asynchronního motoru s klecí nakrátko nebo třífázové vinutí, jehož konce jsou vyvedeny ke kroužkům na rotoru. Proud protéká přes sběrací kartáče do odporových spouštěčů. U klecového vinutí je na rotoru klec vyrobená z hliníku nebo mědi. Tato klec je zastříknuta do paketu rotorových plechů. Ty jsou pak s klecí nalisovány na hřídel. Hřídel obsahuje vyfrézovanou drážku, do které se umísťuje pero. Na kleci bývají malé lopatky sloužící k ventilaci motoru. K aktivnímu chlazení motoru je na hřídel nasazen plastový ventilátor. Ke snížení vibrací stroje během jeho provozu se používají podložky, které jsou nasazeny na malé válečky po obvodu kruhu rotorové klece a následně mechanicky zafixovány (rozklepáním válečků).

## 1.2 Konstrukce jednofázových asynchronních motorů

Jednofázové asynchronní motory se skládají z pevné nerotující části, kterou je stator a z pohyblivé části rotoru stejně jako motory třífázové. Obvykle se vyrábí menšího výkonu a to přibližně do 1 kW. Stator je tvořen kostrou, která je odlita z litiny, případně z hliníku. Dále stator obsahuje přední a zadní ložiskový štít, ve kterých jsou uložena ložiska, svorkovnici sloužící



k připojení přívodních vodičů, paket statorových plechů, ve kterých je uloženo hlavní a pomocné rozběhové vinutí, patky, ventilátor a v některých případech může obsahovat i přírubu.

Rotor je složen z elektrotechnických plechů tvořících paket, do kterého je zastříknuta hliníková (měděná) klec a hřídele s vyfrézovanou drážkou pro pero. K hlavnímu vinutí je paralelně připojeno pomocné vinutí se sériově připojenou impedancí.

V paketu statorových plechů jsou vytvořeny drážky, od kterých jsou izolována obě vinutí. Vinutí jsou tvořena lakovaným nebo smaltovaným měděným vodičem. Podle způsobu spojení závitů na statoru mluvíme o vinutí soustředném nebo se stejnými cívkami. U soustředného vinutí nedochází ke křížení vodičů na čelech vinutí jako je tomu u vinutí se stejnými cívkami. K ochlazení motoru při chodu slouží plastový ventilátor umístěný v drážce na hřídeli a žebrování na kostře statoru, pomocí kterého dochází k výměně tepla mezi povrchem motoru a okolním vzduchem[1].

### 1.2.1 Charakter pomocné (rozběhové) impedance

Impedance sériově připojená k pomocnému vinutí je nejčastěji kapacitního charakteru tvořená kondenzátorem vhodné kapacity, kterou lze vypočítat pomocí empirického vzorce. Pro rozběh motoru lze také použít impedanci indukčního nebo odporového charakteru. Obě vinutí budou napájena střídavým proudy, které jsou vzájemně fázově posunuty. Pomocné vinutí lze po rozběhu odpojit pomocí odstředivého vypínače nebo proudového relé. V mnoha případech se však přídatná impedance nechává připojena i za provozu ke zlepšení některých vlastností stroje. Jinou možností je použít dva elektrolytické kondenzátory o odlišné kapacitě a odpojit za provozu pouze jeden z nich[6].

### 1.2.2 Spouštění jednofázového motoru

Řízení zapnutí motoru lze buď mechanicky pomocí ručně ovládaného spínače, případně automaticky ovládaného stykače. Jinou možností je použití triaku, pomocí kterého lze zapnout a vypnout jednofázový motor, např. čerpadlo nebo jej spouštět s využitím funkce soft-start. Funkci soft-start lze s výhodou využít tam, kde je potřeba spouštět několik jednofázových motorů zapojených na síť k omezení vypadávání elektrických ochran.

## 1.3 Statorové vinutí asynchronního motoru

Vinutí statoru může být tvořeno soustřednými nebo stejnými cívkami. U soustředných cívek nedochází ke křížení vodičů na čelech vinutí jako je tomu u vinutí se stejnými cívkami. U trojfázových motorů jsou drážky vyplněny cívkami pro každou fázi. U jednofázového asynchronního motoru jsou statorové drážky z 2/3 vyplněny vodiči hlavního vinutí, zbylá 1/3 je vyplněna vodiči rozběhového vinutí[1].

## 1.4 Rotorové vinutí asynchronního motoru

Zvětšením odporu rotorového vinutí po dobu rozběhu dochází ke zlepšení rozběhových charakteristik. Při zapojení spouštěcího odporníku do obvodu rotoru lze dosáhnout zvětšení jeho odporu. Pomocí tohoto způsobu lze docílit potřebného průběhu rozběhového proudu a momentu, avšak má své nevýhody a to ve složitější konstrukci stroje a s tím souvisejícími problémy.



Řešením, které by odstranilo tyto nevýhody, je použití asynchronního motoru nakrátko, který obsahuje klecové vinutí[3].

## 1.5 Druhy klecových vinutí

### 1.5.1 Vírové klece

Vírová klec se nazývá vinutí s relativně úzkými a vysokými vodiči obdélníkového či lichoběžníkovitého průřezu. Důvod použití této konstrukce spočívá v tom, že v první fázi rozběhu, při které se rotorová frekvence  $f_2$  přibližně rovná frekvenci statoru  $f_1$ , dochází ke vzniku značných vířivých proudů v tyčích rotoru. Tyto proudy jsou vyvolané rozptylovým polem, které prochází drážkami rotoru. Vířivé proudy se skládají s rotorovým proudem. To má za následek rozdělení proudové hustoty v rotorové tyči. V části tyče, která je blíže ke vzduchové mezeře, se soustřeďuje proud. Velikost elektrických ztrát podstatně naroste. Tomu odpovídá zařazení dodatečných odporů do obvodu rotoru. Na velikost reaktance má vliv změna rozdělení proudové hustoty. Frekvence v rotoru se při rozběhu postupně zmenšuje, dochází také ke zmenšení vířivých proudů a nerovnoměrného rozložení proudu v rotorové tyči. Kmitočet má malou hodnotu a proudová hustota je rozložena prakticky rovnoměrně při jmenovitém zatížení[3].

### 1.5.2 Dvojité klece

Klecové vinutí s dvěma soustavami rotorových tyčí se nazývá dvojitá klec. Vnější klec je tvořena tyčemi kruhového průřezu z normální nebo legované mosazi. Tento materiál má zvětšený měrný odpor. Vnitřní klec je vyrobena z měděných kruhových nebo obdélníkových tyčí. Z mědi jsou také vyrobeny kruhy nakrátko. Při první fázi rozběhu, kdy frekvence  $f_1$  přibližně odpovídá  $f_2$  je reaktance vnitřní klece výrazně větší než vnější klece. Z tohoto důvodu protéká rotorový proud převážně vnější klecí s velkým odporem, což způsobuje snížení záběrného proudu a zvýšení záběrného momentu. Rotorová frekvence se při rozběhu zmenšuje a proud rotoru přebírá ve větší míře klec vnitřní. Reaktance klecí je relativně velice malá při malých skluzech. Proudů v klecích se rozdělují nepřímo úměrně jejich odporům. Vnitřní klecí protéká převážná část proudu, protože její tyče jsou většího průřezu a jsou vyrobeny z materiálu o menším měrném odporu[3].

## 2 PRINCIP FUNKCE ASYNCHRONNÍHO MOTORU

### 2.1 Třífázový asynchronní motor

Statorové vinutí motoru je napájeno ze zdroje třífázového proudu. Po připojení napájení začne třífázovým vinutím protékat střídavý proud. Tento proud způsobí vznik točivého magnetického pole, které indukuje napětí do rotorového vinutí. Indukované napětí protlačí tímto vinutím proud. Dojde k vytvoření magnetického pole kolem rotoru. Vzájemnou interakcí obou magnetických polí dochází ke vzniku točivého momentu a třífázový motor se roztočí. Otáčky rotoru budou mít hodnotu vždy menší než synchronní otáčky sítě  $n_s$ .

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad [\text{min}^{-1}] \quad (2.0)$$

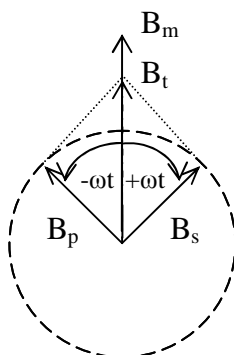
$p$  ... počet pólpárů [-]

Rozdíl mezi otáčkami točivého magnetického pole statoru a skutečnými otáčkami rotoru se vyjadřuje pomocí tzv. skluzu  $s$ .

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad [-] \quad (2.1)$$

Velikost skluzu  $s = 0$  znamená, že se z asynchronního motoru stává asynchronní generátor. Při hodnotě skluzu  $s = 1$  se motor nachází ve stavu nakrátko, tzn., že rotor motoru se neotáčí.

## 2.2 Jednofázový motor bez pomocné impedance



Obr. č.2: Rozklad stojatého pole na dvě točivá (převzato z [1])

Napájení motoru jednofázovým proudem způsobí pouze pole pulzující. Jednofázový motor lze vysvětlit na principu dvou magnetických točivých polí pohybujících se synchronní rychlostí proti sobě. Jedno pole se nazývá sousledné, které běží ve směru otáčení rotoru a druhé je protiběžné a otáčí se naopak. Obě pole mají hodnotu amplitudy rovnou polovině amplitudy rozkládaného pole  $V$  v klidovém stavu jsou velikosti obou polí stejné a motor se netočí. Při roztočení hřídele na jednu stranu dochází ke zvýšení vlivu pole v tomto směru a motor se začne točit. Vliv pole je větší s rostoucí rychlostí hřídele[1].

## 2.3 Jednofázový motor s pomocnou fází

Jednofázový motor bez pomocného vinutí se po připojení k elektrické síti nerozběhne, protože má nulový záběrný moment. K tomu, aby se rozběhl je potřeba mechanického impulsu vyvolaného vnější silou, např. trhnutím za řemen nebo klikou. Tento způsob se však nepoužívá, protože je nepraktický. Jestliže však připojíme k pomocnému vinutí rozběhovou impedanci, motor se sám roztočí z klidového stavu po připojení napájecího napětí. Ve velké většině případů se jako pomocná impedance používá elektrolytický kondenzátor na střídavé napětí, který se zapojí do série k vinutí rozběhovému, tím vznikne pomocná fáze. Reverzaci chodu motoru je možné dosáhnout přeplovaním svorek hlavního nebo rozběhového vinutí[1].

### 3 OBVODOVÝ MODEL ASYNCHRONNÍHO MOTORU

#### 3.1 Obvodový model jedné fáze 3f asynchronního motoru[4]

Za předpokladu harmonických průběhů napětí a proudů byl odvozen obvodový model asynchronního motoru na Obr.4 a platí pro jednu fázi statorového vinutí.

$$U_{i1} = 4,44 \cdot f_1 \cdot \Phi \cdot N_1 \cdot k_{v1} \quad (3.0)$$

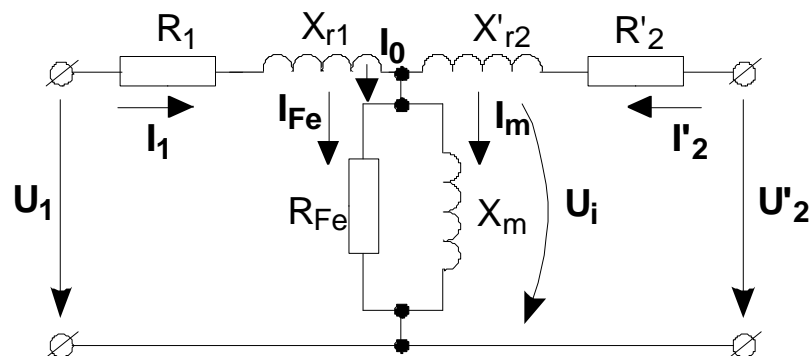
$$U_{i2} = 4,44 \cdot f_2 \cdot \Phi \cdot N_2 \cdot k_{v2} = 4,44 \cdot s \cdot f_1 \cdot \Phi \cdot N_2 \cdot k_{v2} = s \cdot U_{i20} \quad (3.1)$$

Odvozené vztahy (3.0) a (3.1) jsou prakticky shodné se vztahy pro indukované napětí ve vinutích transformátoru (3.2) a (3.3).

$$U_{i1} = 4,44 \cdot f_1 \cdot \Phi_m \cdot N_1 \quad (3.2)$$

$$U_{i2} = 4,44 \cdot f_2 \cdot \Phi_m \cdot N_2 \quad (3.3)$$

Společný magnetický obvod mají podobně jako u transformátoru obě vinutí (statorové a rotorové) a každé vinutí má činný odpor a vlastní a rozptylovou indukčnost. Veličiny rotoru přepočítáme na počet závitů vinutí statoru, abychom mohli použít stejný obvodový model jako na Obr.3.



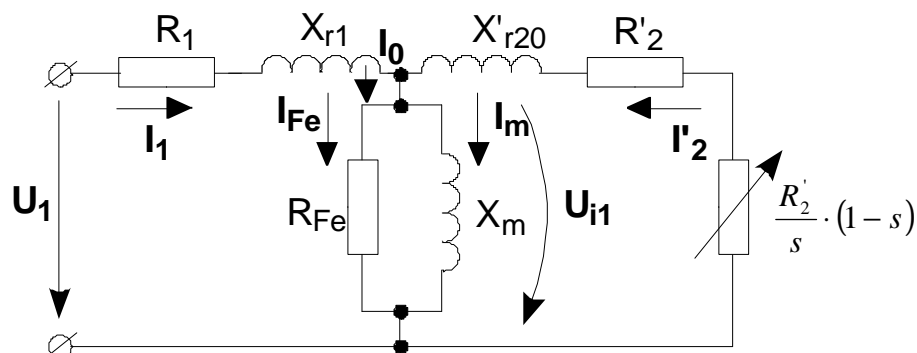
Obr. č.3: Obvodový model skutečného transformátoru při zatížení (převzato z [4])

Vztahy pro přepočet budou stejné jako u transformátoru (3.4), (3.5) a (3.6), pouze počet závitů obou vinutí se vynásobí příslušným činitelem vinutí  $k_v$ . Čárkou se značí přepočtené hodnoty Obr.4.

$$U_2' = \frac{1}{k} \cdot U_2 \quad (3.4)$$

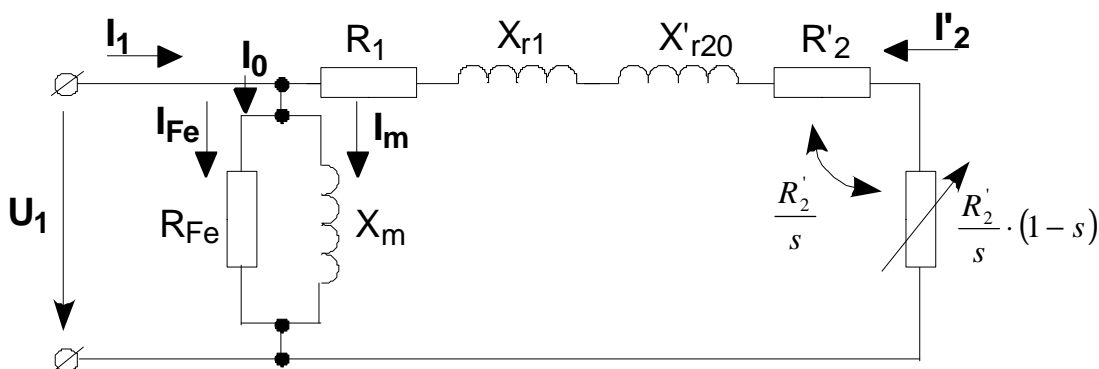
$$I_2' = k \cdot I_2 \quad (3.5)$$

$$Z_2' = \frac{1}{k^2} \cdot Z_2 \quad (3.6)$$



Obr. č.4: Obvodový model asynchronního motoru (převzato z [4])

Obvodový model zjednodušíme přemístěním magnetizační větve na vstupní svorky Obr.5 pro snadnější určení momentu.



Obr. č.5: Obvodový model asynchronního motoru s přemístěnou magnetizační větví na vstupní svorky (převzato z [4])

Na proměnném kmitočtu  $f_2$  závisí indukované napětí a rozptylová reaktance rotoru. Pomocí konstantního kmitočtu  $f_1$  napájecího napětí a skluzu lze vyjádřit kmitočet  $f_2$  (3.7) pro účely obvodového modelu. Vztah (3.8) pro indukované napětí rotoru je při uvážení přepočtených hodnot ze vztahu (3.1).

$$f_2 = s \cdot f_1 \quad (3.7)$$

$$U'_{i1} = s \cdot U'_{i20} = s \cdot U_{i1} \quad (3.8)$$

$$X'_{r2} = \omega_2 \cdot L'_{r2} = 2\pi f_2 \cdot L'_{r2} = 2\pi \cdot s \cdot f_1 \cdot L'_{r2} = s \cdot X'_{r20} \quad (3.9)$$

$X'_{r20}$  ... reaktance zabrzděného motoru ( $n = 0 \text{ min}^{-1}$ ,  $f_1 = f_2$ )

$$\text{Přepočtený proud rotoru: } I'_2 = \frac{s \cdot U'_{i20}}{\sqrt{R_2'^2 + (s \cdot X'_{r20})^2}} = \frac{U'_{i1}}{\sqrt{\frac{R_2'^2}{s^2} + (X'_{r2})^2}} \quad (3.10)$$

$$\mathbf{Z}'_2 = R_2' + jX'_{r20} \cdot s \quad (3.11)$$

$\frac{R_2'}{s}$  ... celkový činný odpor rotoru

Rozdělení celkového činného odporu na konstantní odpor vinutí a na proměnný odpor závislý na skluzu:

$$\frac{R_2'}{s} = R_2 + \frac{1-s}{s} \cdot R_2' \quad (3.12)$$

### 3.1.1 Moment a momentová charakteristika asynchronního motoru

Příkon motoru  $P_1$ :

$$P_1 = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi \quad [W] \quad (3.13)$$

$m_1$  ... počet fází statorového vinutí [-]

$U_1$  ... velikost napájecího napětí [V]

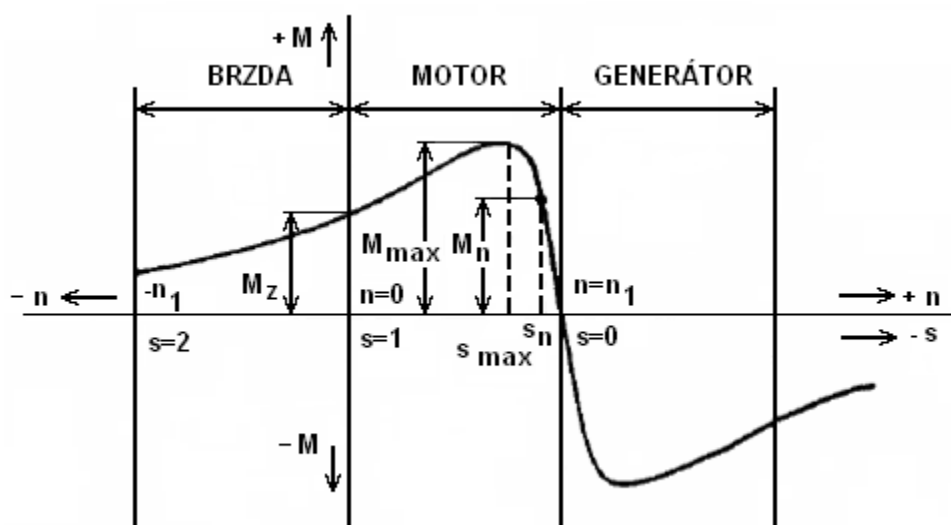
$I_1$  ... proud [A]

$\cos \varphi$  ... účinník [-]

Vzorec pro výpočet mechanického momentu  $M_{\text{mech}}$ :

$$M_{\text{mech}} = \frac{m_1 \cdot p \cdot U_1^2 \cdot \frac{R_2'}{s}}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left[ \left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_{r1} + X_{r20}')^2 \right]} \quad [N \cdot m] \quad (3.14)$$

$p$  ... počet pólpárů [-]



Obr. č.6: Momentová charakteristika asynchronního stroje (převzato z [4])

## 4 ANALYTICKÝ VÝPOČET PARAMETRŮ 3F MOTORU

Postupná metoda pro výpočet parametrů asynchronního motoru byla čerpána z literatury [8]. Pomocí analytického výpočtu byly vypočítávány parametry náhradního schématu 3f asynchronních motorů TM90-4S a TM71-2S z dodaných výrobních dokumentací[7].

### 4.1 Magnetizační proud $I_\mu$ [A]

Pólová rozteč  $t_p$ :

$$t_p = \frac{\pi D}{2p_1} [m] \quad (4.0)$$

D ... vnitřní průměr statoru (vrtání statoru) [m]

$2p_1$  ... počet pólů stroje [-]

Činitel zkrácení kroku statorového vinutí  $k_{y1}$ :

$$k_{y1} = \sin\left(\frac{y}{t_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right) [-] \quad (4.1)$$

y ... skutečný krok statorového vinutí [m]

$\frac{y}{t_p}$  ... zkrácení kroku statorového vinutí [-]

Počet drážek na pól a fázi statorového vinutí  $q_1$ :

$$q_1 = \frac{Q_1}{2p_1 m_1} [-] \quad (4.2)$$

$Q_1$  ... počet drážek na statoru [-]

$m_1$  ... počet fází statorového vinutí [-]

Činitel rozlohy statorového vinutí  $k_{r1}$ :

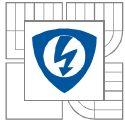
$$k_{r1} = \frac{0,5}{q_1 \cdot \sin \frac{30^\circ}{q_1}} [-] \quad (4.3)$$

Činitel statorového vinutí  $k_{v1}$ :

$$k_{v1} = k_{y1} k_{r1} [-] \quad (4.4)$$

Činitel tvaru pole  $k_B$ :

$$k_B = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} [-] \quad (4.5)$$



Magnetický tok  $\Phi$ :

$$\Phi = \frac{k_E U_{1N}}{4k_B N_1 k_{v1} f_1} [\text{Wb}] \quad (4.6)$$

$k_E$  ... poměr indukovaného napětí vinutí statoru k jmenovitému napětí [-]

$U_{1N}$  ... jmenovité fázové napájecí napětí sítě [V]

$N_1$  ... počet závitů v sérii jedné fáze statorového vinutí [-]

$f_1$  ... kmitočet (frekvence) napájecího napětí [Hz]

Magnetická indukce ve vzduchové mezeře  $B_\delta$ :

$$B_\delta = \frac{p_1 \Phi}{D l_i} [T] \quad (4.7)$$

$p_1$  ... počet pólpárů [-]

$l_i$  ... ideální délka vzduchové mezery [m]

Drážková rozteč statoru  $t_{d1}$ :

$$t_{d1} = \frac{\pi D}{Q_1} [m] \quad (4.8)$$

Vnější průměr rotoru  $D_2$ :

$$D_2 = D - 2\delta [m] \quad (4.9)$$

$\delta$  ... velikost vzduchové mezery [m]

Drážková rozteč rotoru  $t_{d2}$ :

$$t_{d2} = \frac{\pi D_2}{Q_2} [m] \quad (4.10)$$

$Q_2$  ... počet drážek na rotoru [-]

Magnetická indukce v zubech statoru  $B_{z1}$ :

$$B_{z1} = \frac{B_\delta t_{d1} l_i}{b_{z1} l_{Fe1} k_{Fe}} [T] \quad (4.11)$$

$b_{z1}$  ... šířka zubu statoru [m]

$l_{Fe1}$  ... aktivní délka statorového svazku [m]

$k_{Fe}$  ... činitel plnění železa [-]

Magnetická indukce v zubech rotoru  $B_{z2}$ :

$$B_{z2} = \frac{B_\delta t_{d2} l_i}{b_{z2} l_{Fe2} k_{Fe}} [T] \quad (4.12)$$

$b_{z2}$  ... šířka zubu rotoru [m]

$l_{Fe2}$  ... aktivní délka rotorového svazku [m]

Hloubka statorové drážky  $h_{d1}$ :

$$h_{d1} = \frac{D_e - D}{2} - h_{j1} \quad [m] \quad (4.13)$$

$D_e$  ... vnější průměr statoru [m]

$h_{j1}$  ... výška statorového jha [m]

Výpočtová výška jha statoru  $h'_{j1}$ :

$$h'_{j1} = \frac{D_e - D}{2} - h_{d1} - \frac{2}{3} d_{vk1} m_{vk1} \quad [m] \quad (4.14)$$

$d_{vk1}$  ... průměr axiálních ventilačních kanálů ve statoru [m]

$m_{vk1}$  ... počet řad axiálních ventilačních kanálů ve statoru [-]

Hloubka rotorové drážky  $h_{d2}$ :

$$h_{d2} = h'_0 + h_0 + \frac{b_1}{2} + h_1 + \frac{b_2}{2} \quad [m] \quad (4.15)$$

$h'_0$  ... výška můstku nad drážkou [m]

$h_0$  ... výška otevření rotorové drážky [m]

$h_1$  ... rozměr rotorové drážky [m]

$b_1$  ... rozměr rotorové drážky [m]

$b_2$  ... rozměr rotorové drážky [m]

Výpočtová výška jha rotoru  $h'_{j2}$ :

$$h'_{j2} = \frac{2 + p_1}{3,2 p_1} \left( \frac{D_2}{2} - h_{d2} \right) - \frac{2}{3} d_{vk2} m_{vk2} \quad [m] \quad (4.16)$$

$d_{vk2}$  ... průměr axiálních ventilačních kanálů v rotoru [m]

$m_{vk2}$  ... počet řad axiálních ventilačních kanálů v rotoru [-]

Magnetická indukce ve jhu statoru  $B_{j1}$ :

$$B_{j1} = \frac{\Phi}{2 h'_{j1} l_{Fe1} k_{Fe}} \quad [T] \quad (4.17)$$

Magnetická indukce ve jhu rotoru  $B_{j2}$ :

$$B_{j2} = \frac{\Phi}{2 h'_{j2} l_{Fe2} k_{Fe}} \quad [T] \quad (4.18)$$

Koeficienty pro výpočet Carterova činitele  $\gamma_1$  a  $\gamma_2$ :

$$\gamma_1 = \frac{\left( \frac{b_{01}}{\delta} \right)^2}{5 + \left( \frac{b_{01}}{\delta} \right)} \quad [-] \quad (4.19)$$

$b_{01}$  ... otevření statorové drážky [m]



$$\gamma_2 = \frac{\left(\frac{b_{02}}{\delta}\right)^2}{5 + \left(\frac{b_{02}}{\delta}\right)} [-] \quad (4.20)$$

$b_{02}$  ... otevření rotorové drážky [m]

Činitel vzduchové mezery (Carterův činitel) pro stator  $k_{c1}$ :

$$k_{c1} = \frac{t_{d1}}{t_{d1} - \gamma_1 \delta} [-] \quad (4.21)$$

Činitel vzduchové mezery (Carterův činitel) pro rotor  $k_{c2}$ :

$$k_{c2} = \frac{t_{d2}}{t_{d2} - \gamma_2 \delta} [-] \quad (4.22)$$

Výsledný Carterův činitel stroje  $k_c$ :

$$k_c = k_{c1} k_{c2} [-] \quad (4.23)$$

Magnetické napětí vzduchové mezery  $U_\delta$ :

$$U_\delta = 1,59 \cdot 10^6 B_\delta k_c \delta [A] \quad (4.24)$$

Výpočtová výška zubu statoru a rotoru  $h_{z1}$  a  $h_{z2}$ :

$$h_{z1} = h_{d1} - 0,1b_1 [m] \quad (4.25)$$

$$h_{z2} = h_{d2} - 0,1b_2 [m] \quad (4.26)$$

$b_1$  ... rozměr statorové drážky [m]

$b_2$  ... rozměr rotorové drážky [m]

Magnetické napětí zubů statoru  $U_{z1}$ :

$$U_{z1} = 2h_{z1}H_{z1} [A] \quad (4.27)$$

$H_{z1}$  ... intenzita magnetického pole při magnetické indukci v zubech statoru  $B_{z1}$  určená podle magnetizační křivky použité elektrotechnické oceli [ $A \cdot m^{-1}$ ]

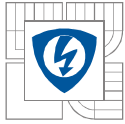
Magnetické napětí zubů rotoru  $U_{z2}$ :

$$U_{z2} = 2h_{z2}H_{z2} [A] \quad (4.28)$$

$H_{z2}$  ... intenzita magnetického pole při magnetické indukci v zubech rotoru  $B_{z2}$  určená podle magnetizační křivky použité elektrotechnické oceli [ $A \cdot m^{-1}$ ]

Činitel nasycení zubů  $k_z$ :

$$k_z = 1 + \frac{U_{z1} + U_{z2}}{U_\delta} [-] \quad (4.29)$$



Vnitřní průměr rotorového svazku  $D_i$ :

$$D_i = D_h \text{ [m]} \quad (4.30)$$

$D_h$  ... průměr hřídele [m]

Výška rotorového jha  $h_{j2}$ :

$$h_{j2} = \frac{D_2 - D_i}{2} - h_{d2} \text{ [m]} \quad (4.31)$$

Délka střední magnetické indukční čáry ve jhu statoru  $l_{j1}$ :

$$l_{j1} = \frac{\pi(D_e - h_{j1})}{2p_1} \text{ [m]} \quad (4.32)$$

Délka střední magnetické indukční čáry ve jhu rotoru  $l_{j2}$ :

$$l_{j2} = \frac{\pi(D_h + h_{j2})}{2p_1} \text{ [m]} \quad (4.33)$$

Magnetické napětí jha statoru  $U_{j1}$ :

$$U_{j1} = l_{j1} H_{j1} \text{ [A]} \quad (4.34)$$

$H_{j1}$  ... intenzita magnetického pole při magnetické indukci ve statorovém jhu  $B_{j1}$  určená podle magnetizační křivky použité elektrotechnické oceli [ $A \cdot m^{-1}$ ]

Magnetické napětí jha rotoru  $U_{j2}$ :

$$U_{j2} = l_{j2} H_{j2} \text{ [A]} \quad (4.35)$$

$H_{j2}$  ... intenzita magnetického pole při magnetické indukci v rotorovém jhu  $B_{j2}$  určená podle magnetizační křivky použité elektrotechnické oceli [ $A \cdot m^{-1}$ ]

Výsledné magnetické napětí celého magnetického obvodu (na jednu pólovou dvojici)  $F_m$ :

$$F_m = U_\delta + U_{z1} + U_{z2} + U_{j1} + U_{j2} \text{ [A]} \quad (4.36)$$

Činitel nasycení magnetického obvodu  $k_\mu$ :

$$k_\mu = \frac{F_m}{U_\delta} \text{ [-]} \quad (4.37)$$

Magnetizační proud  $I_\mu$ :

$$I_\mu = \frac{pF_m}{0,9m_1 N_1 k_{v1}} \text{ [A]} \quad (4.38)$$

## 4.2 Odpor a reaktance asynchronního stroje

### 4.2.1 Odpor vinutí statoru $R_1$ [ $\Omega$ ]

Průřez vodiče cívky statorového vinutí  $S_1$ :

$$S_1 = \pi \left( \frac{d_1}{2} \right)^2 [m^2] \quad (4.39)$$

$d_1$  ... průměr vodiče cívky statorového vinutí [m]

Střední délka závitů vinutí  $l_{av}$ :

$$l_{av} = 2(l_d + l_\xi) [m] \quad (4.40)$$

$l_d$  ... délka drážkové části [m] (odpovídá konstrukční délce statorového, resp. rotorového svazku -  $l_d = l_{1(2)}$  [m])

$l_\xi$  ... délka čela cívky [m]

Celková délka efektivních vodičů jedné fáze vinutí  $L$ :

$$L = l_{av} N_1 [m] \quad (4.41)$$

$N_1$  ... počet závitů v sérii jedné fáze [-]

Odpor vinutí statoru  $R_1$ :

$$R_1 = k_\sim \rho_\theta \frac{L}{S_1 a} [\Omega] \quad (4.42)$$

$k_\sim$  ... činitel zvětšení odporu působením povrchového jevu [-]

$\rho_\theta$  ... rezistivita materiálu vinutí při uvažované teplotě [ $\Omega \cdot m$ ]

$a$  ... počet paralelních větví vinutí [-]

### 4.2.2 Odpor vinutí rotoru $R_2$ [ $\Omega$ ]

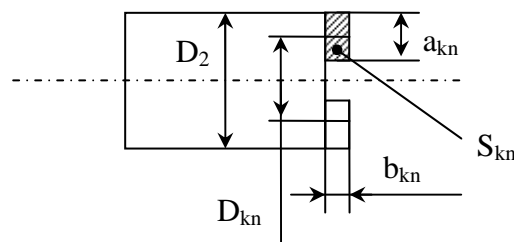
Odpor rotorové tyče  $R_t$ :

$$R_t = \rho_t \frac{l_t}{S_t} k_\sim [\Omega] \quad (4.43)$$

$\rho_t$  ... rezistivita materiálu rotorové tyče při uvažované pracovní teplotě [ $\Omega \cdot m$ ]

$l_t$  ... celková délka rotorové tyče (odpovídající vzdálenosti mezi kruhy nakrátko) [m]

$S_t$  ... průřez tyče rotoru [ $m^2$ ]



Obr. č.7: Rozměry kruhu rotoru – podélný řez rotorem (převzato z [1])

Příčný průřez kruhů nakrátko  $S_{kn}$ :

$$S_{kn} = a_{kn} b_{kn} [m^2] \quad (4.44)$$

$a_{kn}$  ... střední výška kruhů nakrátko [m]

$b_{kn}$  ... střední šířka kruhů nakrátko [m]

Střední průměr kruhů nakrátko  $D_{kn}$ :

$$D_{kn} \approx D_2 - a_{kn} [m] \quad (4.45)$$

Odpor části kruhu nakrátko mezi dvěma sousedními tyčemi  $R_{kn}$ :

$$R_{kn} = \rho_{kn} \frac{\pi D_{kn}}{Q_2 S_{kn}} [\Omega] \quad (4.46)$$

$\rho_{kn}$  ... rezistivita materiálu kruhu nakrátko při uvažované pracovní teplotě [ $\Omega \cdot m$ ]

$D_{kn}$  ... střední průměr kruhů nakrátko [m]

Činitel přepočtu proudů v kruhu na proud v tyči  $\Delta$ :

$$\Delta = 2 \sin \frac{\pi p_1}{Q_2} [-] \quad (4.47)$$

Proud v kruhu nakrátko  $I_{kn}$ :

$$I_{kn} = \frac{I_t}{\Delta} = \frac{I_2}{\Delta} [A] \quad (4.48)$$

$I_t$  ... proud v tyči rotoru [A]

Proud  $I_t$  je považován za rotorový proud a ve výpočtech se označuje  $I_2$ [8].

Odvození vzorce pro výpočet  $R_2$ :

$$R_2 I_t^2 = R_t I_t^2 + 2 R_{kn} I_{kn}^2 [W] \quad (4.49)$$

$$R_2 I_2^2 = R_t I_2^2 + 2 R_{kn} I_{kn}^2 [W]$$

$$R_2 I_2^2 = R_t I_2^2 + 2 R_{kn} \frac{I_2^2}{\Delta^2} [W]$$

$$R_2 I_2^2 = I_2^2 \left( R_t + \frac{2 R_{kn}}{\Delta^2} \right) [W]$$

$$R_2 = R_t + \frac{2 R_{kn}}{\Delta^2} [\Omega]$$

$$R_2 = R_t + \frac{2 R_{kn}}{\left( 2 \sin \frac{\pi p_1}{Q_2} \right)^2} [\Omega] \quad (4.50)$$

Odvození přepočítacího činitele pro rotorové klecové vinutí  $p_z$ :

$$p_z = \frac{m_1 (N_1 k_{v1})^2}{m_2 (N_2 k_{v2})^2} [-] \quad (4.51)$$

|                                       |                     |     |
|---------------------------------------|---------------------|-----|
| počet fází rotoru                     | $m_2 = Q_2$         | [-] |
| počet závitů vinutí každé fáze rotoru | $N_2 = \frac{1}{2}$ | [-] |
| činitel rotorového vinutí             | $k_{v2} = 1$        | [-] |

Tab. č.1: Zvláštnosti klecového rotorového vinutí[3]

$$p_z = \frac{m_1 (N_1 k_{v1})^2}{Q_2 \left(\frac{1}{2} \cdot 1\right)^2} [-]$$

$$p_z = \frac{m_1 (N_1 k_{v1})^2}{\frac{Q_2}{4}} [-]$$

$$p_z = \frac{4m_1 (N_1 k_{v1})^2}{Q_2} [-] \quad (4.52)$$

Přepočtený odpor vinutí rotoru na počet závitů statorového vinutí  $R_2'$ :

$$R_2' = R_2 p_z [\Omega] \quad (4.53)$$

### 4.2.3 Rozptylová reaktance fáze statorového vinutí $X_{1\sigma} [\Omega]$

Činitel magnetické vodivosti drážky statoru  $\lambda_{d1}$ :

$$\lambda_{d1} = \frac{h_3}{3b} k_\beta + \left( \frac{h_2}{b} + \frac{3h_1}{b+2b_0} + \frac{h_0}{b_0} \right) k'_\beta [-] \quad (4.54)$$

$h_0$  ... výška otevření statorové drážky [m]

$h_1$  ... rozměr statorové drážky [m]

$h_2$  ... rozměr statorové drážky [m]

$h_3$  ... rozměr statorové drážky [m]

$b_0$  ... otevření statorové drážky [m]

$b$  ... rozměr statorové drážky [m]

$k_\beta$  ... činitel závislý na kroku vinutí [-]

$k'_\beta$  ... činitel závislý na kroku vinutí [-]

Při plném kroku dvouvrstvých vinutí a pro všechna jednovrstvá vinutí platí:  $k_\beta = k'_\beta = 1 [-]$ .

Poměrné zkrácení kroku vinutí  $\beta$ :

$$\beta = \frac{2}{3} \cdot \frac{q_1 + 1}{q_1} [-] \quad (4.55)$$

Výpočtová délka vzduchové mezery  $l_i'$ :

$$l_i' = l_i [\text{m}] \quad (4.56)$$

Činitel magnetické vodivosti rozptylu čel statoru  $\lambda_{\epsilon 1}$ :

$$\lambda_{\epsilon 1} = 0,34 \frac{q_1}{l_i'} (l_\epsilon - 0,64 \beta t_p) [-] \quad (4.57)$$

$l_\epsilon$  ... délka čela cívky [m]

Činitel natočení drážek  $\beta_\gamma$ :

$$\beta_\gamma = \frac{b_\gamma}{t_{d2}} [-] \quad (4.58)$$

$b_\gamma$  ... natočení drážek [m]

Činitel  $\xi_1$  pro výpočet  $\lambda_{dif1}$ :

$$\xi_1 = 2k'_\gamma k_\beta - k_{v1}^2 \left( \frac{t_{d2}}{t_{d1}} \right)^2 (1 + \beta_\gamma^2) [-] \quad (4.59)$$

$k'_\gamma$  ... činitel, který se určí z křivek na obr. 6.39e v závislosti na poměru  $t_{d2}/t_{d1}$  a poměrného natočení drážek  $\beta_\gamma$  [-]

$k_\beta$  ... činitel, který se počítá ze vztahu 6.153

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu statoru  $\lambda_{dif1}$ :

$$\lambda_{dif1} = \frac{t_{d1}}{12\delta k_c} \xi_1 [-] \quad (4.60)$$

Rozptylová reaktance fáze statorového vinutí  $X_{1\sigma}$ :

$$X_{1\sigma} = 15,8 \frac{f_1}{100} \left( \frac{N_1}{100} \right)^2 \frac{l_2'}{p_1 q_1} (\lambda_{d1} + \lambda_{\epsilon 1} + \lambda_{dif1}) [\Omega] \quad (4.61)$$

$l_2'$  ... celková délka rotoru (konstrukční délka rotorového svazku) [m]

#### 4.2.4 Rozptylová reaktance fáze rotorového vinutí $X_{2\sigma} [\Omega]$

Činitel magnetické vodivosti drážkového rozptylu rotorového klecového vinutí  $\lambda_{d2}$ :

$$\lambda_{d2} = \left[ \frac{h_1}{3b} \left( 1 - \frac{\pi b^2}{8S_t} \right) + 0,66 - \frac{b_0}{2b} \right] k_d + \frac{h_0}{b_0} [-] \quad (4.62)$$

$h_0$  ... výška otevření rotorové drážky [m]

$h_1$  ... rozměr rotorové drážky [m]

$b_0$  ... otevření rotorové drážky [m]

$b$  ... rozměr rotorové drážky [m]

$k_d$  ... činitel - pro jmenovitý chod = 1 [-]

Činitel magnetické vodivosti rozptylu čel rotoru  $\lambda_{\epsilon 2}$ :

$$\lambda_{\epsilon 2} = \frac{2,3D_{kn}}{Q_2 l_i' \Delta^2} \log \frac{4,7D_{kn}}{2a_{kn} + b_{kn}} [-] \quad (4.63)$$

Činitel  $\xi_2$  pro výpočet  $\lambda_{dif2}$ :

$$\xi_2 = 1 + \frac{1}{5} \left( \frac{\pi p_1}{Q_2} \right)^2 - \frac{\Delta_z}{1 - \left( \frac{p_1}{Q_2} \right)^2} [-] \quad (4.64)$$

$\Delta_z$  ... se vyhledá se z křivek na obr. 6.39a

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu klecového rotorového vinutí  $\lambda_{dif2}$ :

$$\lambda_{dif2} = \frac{t_{d2}}{12\delta k_c} \xi_2 [-] \quad (4.65)$$

Rozptylová reaktance fáze rotorového vinutí  $X_{2\sigma}$ :

$$X_{2\sigma} = 7,9 f_1 l_i' (\lambda_{d2} + \lambda_{e2} + \lambda_{dif2}) \cdot 10^{-6} [\Omega] \quad (4.66)$$

Přepočtená rozptylová reaktance fáze rotorového vinutí  $X'_{2\sigma}$ :

$$X'_{2\sigma} = X_{2\sigma} p_z [\Omega] \quad (4.67)$$

### 4.2.5 Vliv natočení drážek

Snížení indukovaného napětí  $U_{i1}$  vlivem natočení drážek se v praxi přímo nepočítá. Vliv natočení se uvažuje zvětšením rozptylových reaktancí statorového i rotorového vinutí  $X_{1\sigma}$  a  $X_{2\sigma}$ [8].

Přibližná hodnota činitele  $\sigma_\gamma$ :

$$\sigma_\gamma \approx 1 + 0,41 \left( \frac{b_\gamma}{t_p} \right)^2 \frac{U_{1N}}{X_{1\sigma} I_\mu} [-] \quad (4.68)$$

$b_\gamma$  ... natočení drážek [m]

Rozptylová reaktance při natočených drážkách  $X_{1\sigma\gamma}$  a  $X_{2\sigma\gamma}$ :

$$X_{1\sigma\gamma} = X_{1\sigma} \sigma_\gamma [\Omega] \quad (4.69)$$

$$X_{2\sigma\gamma} = X_{2\sigma} \sigma_\gamma [\Omega] \quad (4.70)$$

### 4.3 Celkové ztráty v železe asynchronních motorů $\Delta P_{Fe} [\Omega]$

Minimální a maximální šířka statorového zubu  $b_{z1min}$  a  $b_{z1max}$ :

$$b_{z1min} = t_{d1} - b_{d1} [m] \quad (4.71)$$

$b_{d1}$  ... šířka statorové drážky [m]

$$b_{z1max} = t_{d1} \left( 1 + \frac{2h_{d1}}{D} \right) - b_{d1} [m] \quad (4.72)$$

Střední šířka zubu statoru  $b_{z1av}$ :

$$b_{z1av} = \frac{b_{z1min} + b_{z1max}}{2} [m] \quad (4.73)$$

Magnetické indukce v různých průřezech statorového zubu  $B_{z1min}$  a  $B_{z1max}$ :

$$B_{z1min} = \frac{B_\delta t_{d1} l_i}{b_{z1max} l_{Fe1} k_{Fe}} [T] \quad (4.74)$$

$$B_{z1\max} = \frac{B_{\delta} t_{d1} l_i}{b_{z1\min} l_{Fe1} k_{Fe}} [T] \quad (4.75)$$

Střední magnetická indukce v zubech statoru  $B_{z1av}$ :

$$B_{z1av} = \frac{B_{z1\min} + B_{z1\max}}{2} [T] \quad (4.76)$$

Minimální šířka rotorového zubu  $b_{z2\min}$ :

$$b_{z2\min} = \frac{\pi(D_2 - 2h_{d2})}{Q_2} - b_{d2} [m] \quad (4.77)$$

Pro výpočet  $b_{z2\min}$  se hloubka rotorové drážky  $h_{d2}$  rovná výšce zubů rotoru  $h_{z2}$ :

$$h_{d2} = h_{z2} [m] \quad (4.78)$$

$b_{d2}$ ... šířka rotorové drážky [m]

Maximální šířka rotorového zubu  $b_{z2\max}$ :

$$b_{z2\max} = \frac{\pi[D_2 - 2(h_0 + h_k)]}{Q_2} - b_{d2} [m] \quad (4.79)$$

$h_k$  ... rozměr rotorové drážky [m]

Střední šířka zubu rotoru  $b_{z2av}$ :

$$b_{z2av} = \frac{b_{z2\min} + b_{z2\max}}{2} [m] \quad (4.80)$$

Magnetické indukce v různých průřezích rotorového zubu  $B_{z2\min}$  a  $B_{z2\max}$ :

$$B_{z2\min} = \frac{B_{\delta} t_{d2} l_i}{b_{z2\max} l_{Fe2} k_{Fe}} [T] \quad (4.81)$$

$$B_{z2\max} = \frac{B_{\delta} t_{d2} l_i}{b_{z2\min} l_{Fe2} k_{Fe}} [T] \quad (4.82)$$

Střední magnetická indukce v zubech rotoru  $B_{z2av}$ :

$$B_{z2av} = \frac{B_{z2\min} + B_{z2\max}}{2} [T] \quad (4.83)$$

Hmotnost železa statorového jha  $m_{j1}$ :

$$m_{j1} = \pi(D_e - h_{j1}) h_{j1} l_{Fe1} k_{Fe} \gamma_{Fe} [kg] \quad (4.84)$$

$\gamma_{Fe}$  ... hustota oceli ( $\gamma_{Fe} = 7,8 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

Hmotnost zubů statoru a rotoru  $m_{z1}$  a  $m_{z2}$ :

$$m_{z1} \cong h_{z1} b_{z1av} Q_1 l_{Fe1} k_{Fe} \gamma_{Fe} [kg] \quad (4.85)$$

$h_{z1}$  ... výpočtová výška zubu statoru [m]



$$m_{z2} = h_{z2} b_{z2av} Q_2 l_{Fe2} k_{Fe} \gamma_{Fe} \text{ [kg]} \quad (4.86)$$

$h_{z2}$  ... výpočtová výška zubu rotoru [m]

Hlavní ztráty v železe statoru  $\Delta P_{Feh}$ :

$$\Delta P_{Feh} = \Delta p_{1,0} \left( \frac{f_1}{50} \right)^\beta (k_{dj} B_{j1}^2 m_{j1} + k_{dz} B_{z1av}^2 m_{z1}) \text{ [W]} \quad (4.87)$$

$\Delta p_{1,0}$  ... měrné ztráty v železe [ $\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]

$\beta$  ... exponent závislý na druhu použité oceli [-]

$k_{dj}$ ,  $k_{dz}$  ... činitelé uvažující vliv nerovnoměrnosti rozložení toku v částech magnetického obvodu a vliv technologie výroby statorového svazku [-]

Činitelé  $\beta_{01}$  a  $\beta_{02}$ :

$$\beta_{01} = f \left( \frac{b_{02}}{\delta} \right) \text{ [-]} \quad (4.88)$$

$b_{02}$  ... otevření rotorové drážky [m]

$$\beta_{02} = f \left( \frac{b_{01}}{\delta} \right) \text{ [-]} \quad (4.89)$$

$b_{01}$  ... otevření statorové drážky [m]

Amplituda pulzací magnetické indukce ve vzduchové mezeře nad hlavami zubů statoru a rotoru  $B_{01}$  a  $B_{02}$ :

$$B_{01} = \beta_{01} k_c B_\delta \text{ [T]} \quad (4.90)$$

$$B_{02} = \beta_{02} k_c B_\delta \text{ [T]} \quad (4.100)$$

Hustota povrchových ztrát statoru a rotoru  $p_{\delta p1}$  a  $p_{\delta p2}$ :

$$p_{\delta p1} = 0,5 k_{01} \left( \frac{Q_2 n}{10000} \right)^{1,5} (B_{01} t_{d2} 10^3)^2 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (4.101)$$

$$p_{\delta p2} = 0,5 k_{02} \left( \frac{Q_1 n}{10000} \right)^{1,5} (B_{02} t_{d1} 10^3)^2 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (4.102)$$

$k_{01}$ ,  $k_{02}$  ... činitelé respektující vliv opracování povrchu hlav zubů statoru a rotoru [-]

$n$  ... otáčky rotoru [ $\text{min}^{-1}$ ]

Celkové povrchové ztráty ve statoru a rotoru  $\Delta P_{\delta p1}$  a  $\Delta P_{\delta p2}$ :

$$\Delta P_{\delta p1} = p_{\delta p1} (t_{d1} - b_{01}) Q_1 l_{Fe1} \text{ [W]} \quad (4.103)$$

$$\Delta P_{\delta p2} = p_{\delta p2} (t_{d2} - b_{02}) Q_2 l_{Fe2} \text{ [W]} \quad (4.104)$$

Pokud jsou na statoru nebo na rotoru otevřené drážky, dosazuje se do vztahů pro  $\gamma_1$  a  $\gamma_2$  (1.19) a (1.20) místo otevření  $b_{01}$  nebo  $b_{02}$ , tzv. náhradní otevření  $b'_{01}$  a  $b'_{02}$  [1].

Náhradní otevření  $b'_{01}$  a  $b'_{02}$ :

$$b'_{01} = \frac{b_{01}}{3} \left( 1 + \frac{0,5t_{d1}}{t_{d1}b_{01} + \kappa_{\delta}} \right) [m] \quad (4.105)$$

Hodnoty činitele  $\kappa_{\delta}$  v závislosti na poměru  $b_d/\delta$  pro otevřené drážky jsou vyneseny v křivce na obr. 6. 42[1].

$b_d$  ... šířka drážky [m]

$$b'_{02} = \frac{b_{02}}{3} \left( 1 + \frac{0,5t_{d2}}{t_{d2}b_{02} + \kappa_{\delta}} \right) [m] \quad (4.106)$$

Amplituda pulzací magnetické indukce ve středním průřezu zubu statoru a rotoru  $B_{p1}$  a  $B_{p2}$ :

$$B_{p1} \approx \frac{\gamma_2 \delta}{2t_{d1}} B_{z1av} [T] \quad (4.107)$$

$$B_{p2} \approx \frac{\gamma_1 \delta}{2t_{d2}} B_{z2av} [T] \quad (4.108)$$

Pulzní ztráty v zubech statoru a rotoru  $\Delta P_{p1}$  a  $\Delta P_{p2}$ :

$$\Delta P_{p1} \approx 0,11 \left( \frac{Q_2 n}{1000} B_{p1} \right)^2 m_{z1} [W] \quad (4.109)$$

$$\Delta P_{p2} \approx 0,11 \left( \frac{Q_1 n}{1000} B_{p2} \right)^2 m_{z2} [W] \quad (4.110)$$

Dodatečné ztráty v železe  $\Delta P_{Fed}$ :

$$\Delta P_{Fed} = \Delta P_{\delta p1} + \Delta P_{\delta p2} + \Delta P_{p1} + \Delta P_{p2} [W] \quad (4.111)$$

Celkové ztráty v železe asynchronních motorů  $\Delta P_{Fe}$ :

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Feh} + \Delta P_{Fed} [W] \quad (4.112)$$

#### 4.4 Mechanické a ventilační ztráty $\Delta P_{mech}$ [W]

Činitel  $K_T$  pro výpočet  $\Delta P_{mech}$ :

$$K_T = 1,3(1 - D_e) [-] \quad (4.113)$$

Mechanické a ventilační ztráty  $\Delta P_{mech}$ :

$$\Delta P_{mech} = K_T \left( \frac{n}{10} \right)^2 D_e^4 [W] \quad (4.114)$$

#### 4.5 Elektrické ztráty ve statorovém vinutí při chodu naprázdno (Jouleovy ztráty) $\Delta P_{j0}$ [W]

Vzorec pro výpočet Jouleových ztrát ve statorovém vinutí při chodu naprázdno  $\Delta P_{j0}$ :

$$\Delta P_{j0} \approx m_1 R_1 I_{\mu}^2 [W] \quad (4.115)$$

## 4.6 Proud naprázdno motoru $I_0$ [A]

Jalová složka proudu naprázdno  $I_{0j}$ :

$$I_{0j} \approx I_\mu \text{ [A]} \quad (4.116)$$

Činná (aktivní) složka proudu naprázdno  $I_{0\check{c}}$ :

$$I_{0\check{c}} = \frac{\Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{j0}}{m_1 U_{1N}} \text{ [A]} \quad (4.117)$$

Při výpočtu  $I_{0\check{c}}$  se předpokládá, že ztráty v železe, třením a ventilační při chodu naprázdno jsou stejné jako při jmenovitém chodu.

$$I_{0\check{c}} = I_{Fe} \text{ [A]} \quad (4.118)$$

Proud naprázdno motoru  $I_0$ :

$$I_0 = \sqrt{I_{0\check{c}}^2 + I_{0j}^2} \text{ [A]} \quad (4.119)$$

Účinitík při chodu naprázdno  $\cos\varphi_0$ :

$$\cos\varphi_0 = \frac{I_{0\check{c}}}{I_0} \text{ [-]} \quad (4.120)$$

## 5 VÝPOČET PARAMETRŮ PRO MOTOR TM90-4S[7]

Postupným dosazováním velikostí údajů z dokumentace k 3f motoru do připravených vzorců byly vypočítány parametry náhradního schématu podle kapitoly 4.

Štítkové údaje 3f asynchronního motoru TM90-4S:

|       |         |  |             |
|-------|---------|--|-------------|
| Motor | TM90-4S | 3~50Hz; 1100W; 400/230V; $\cos\varphi=0,83$ ; 1400 min-1 | EMP Slavkov |
|-------|---------|--|-------------|

$$2p_1 = 4 \Rightarrow p_1 = 2 \text{ [-]}$$

$$t_p = \frac{\pi D}{2p_1} = \frac{\pi \cdot 84 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 2} = \underline{65,973 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

$$k_{y1} = \sin\left(\frac{y}{t_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(1 \cdot \frac{\pi}{2}\right) = \underline{1 \text{ [-]}}$$

$$q_1 = \frac{Q_1}{2p_1 m_1} = \frac{36}{2 \cdot 2 \cdot 3} = \underline{3 \text{ [-]}}$$

$$k_{r1} = \frac{0,5}{q_1 \cdot \sin \frac{30^\circ}{q_1}} = \frac{0,5}{3 \cdot \sin \frac{30^\circ}{3}} = \underline{0,96 \text{ [-]}}$$

$$k_{v1} = k_{y1} k_{r1} = 1 \cdot 0,96 = \underline{0,96 \text{ [-]}}$$

$$k_B = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = \underline{1,111 [-]}$$

$$U_{1N} = \frac{U_N}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = \underline{230,94 V}$$

$$\Phi = \frac{k_E U_{1N}}{4k_B N_1 k_{v1} f_1} = \frac{0,96 \cdot 230,94}{4 \cdot 1,111 \cdot 390 \cdot 0,96 \cdot 50} = \underline{2,665 \cdot 10^{-3} Wb}$$

Hodnota koeficientu  $k_E$  byla odečtena z grafu[8]. Velikost počtu závitů v sérii jedné fáze statorového vinutí  $N_1$  byla vypočítána z poskytnuté dokumentace k motoru TM90-4S[7]. Jedná se o dvě trojčívky po 65 závitěch zapojené do série.

$$N_1 = 2 \times 3 \times 65 = \underline{390 (-)}$$

$$B_\delta = \frac{p_1 \Phi}{D l_i} = \frac{2 \cdot 2,665 \cdot 10^{-3}}{84 \cdot 10^{-3} \cdot 78 \cdot 10^{-3}} = \underline{0,813 T}$$

$$t_{d1} = \frac{\pi D}{Q_1} = \frac{\pi \cdot 84 \cdot 10^{-3}}{36} = \underline{7,33 \cdot 10^{-3} m}$$

$$D_2 = D - 2\delta = 84 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} = \underline{83,5 \cdot 10^{-3} m}$$

$$t_{d2} = \frac{\pi D_2}{Q_2} = \frac{\pi \cdot 83,5 \cdot 10^{-3}}{28} = \underline{9,369 \cdot 10^{-3} m}$$

$$b_{z1av} = \frac{b_{z1min} + b_{z1max}}{2} = \frac{3,716 \cdot 10^{-3} + 3,721 \cdot 10^{-3}}{2} = \underline{3,719 \cdot 10^{-3} m}$$

$$B_{z1av} = \frac{B_\delta t_{d1} l_i}{b_{z1av} l_{Fe1} k_{Fe}} = \frac{0,813 \cdot 7,33 \cdot 10^{-3} \cdot 78 \cdot 10^{-3}}{3,719 \cdot 10^{-3} \cdot 78 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = \underline{1,652 T}$$

Činitel plnění železa  $k_{Fe}$  [-] byl odečten z [8] - byla zvolena vrstva oxidu.

$$b_{z2av} = \frac{b_{z2min} + b_{z2max}}{2} = \frac{4,692 \cdot 10^{-3} + 4,704 \cdot 10^{-3}}{2} = \underline{4,698 \cdot 10^{-3} m}$$

$$B_{z2av} = \frac{B_\delta t_{d2} l_i}{b_{z2av} l_{Fe2} k_{Fe}} = \frac{0,813 \cdot 9,369 \cdot 10^{-3} \cdot 78 \cdot 10^{-3}}{4,698 \cdot 10^{-3} \cdot 78 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = \underline{1,671 T}$$

$$h_{d1} = \frac{D_e - D}{2} - h_{j1} = \frac{135 \cdot 10^{-3} - 84 \cdot 10^{-3}}{2} - 11,85 \cdot 10^{-3} = \underline{13,65 \cdot 10^{-3} m}$$

$$h'_{j1} = \frac{D_e - D}{2} - h_{d1} = \frac{135 \cdot 10^{-3} - 84 \cdot 10^{-3}}{2} - 13,65 \cdot 10^{-3} = \underline{11,85 \cdot 10^{-3} m}$$

$$h_{d2} = h'_0 + h_0 + \frac{b_1}{2} + h_1 + \frac{b_2}{2} [m]$$

Velikost hloubky rotorové drážky byla odečteno z dokumentace:  $\underline{h_{d2} = 14,45 \cdot 10^{-3} m}$

$$h'_{j2} = \frac{2 + p_1}{3,2 p_1} \left( \frac{D_2}{2} - h_{d2} \right) = \frac{2 + 2}{3,2 \cdot 2} \left( \frac{83,5 \cdot 10^{-3}}{2} - 14,45 \cdot 10^{-3} \right) = \underline{17,063 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

$$B_{j1} = \frac{\Phi}{2h'_{j1} l_{Fe1} k_{Fe}} = \frac{2,665 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 11,85 \cdot 10^{-3} \cdot 78 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = \underline{1,486 \text{ T}}$$

$$B_{j2} = \frac{\Phi}{2h'_{j2} l_{Fe2} k_{Fe}} = \frac{2,665 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 17,063 \cdot 10^{-3} \cdot 78 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = \underline{1,032 \text{ T}}$$

$$\gamma_1 = \frac{\left( \frac{b_{01}}{\delta} \right)^2}{5 + \left( \frac{b_{01}}{\delta} \right)} = \frac{\left( \frac{2,4 \cdot 10^{-3}}{0,25 \cdot 10^{-3}} \right)^2}{5 + \left( \frac{2,4 \cdot 10^{-3}}{0,25 \cdot 10^{-3}} \right)} = \underline{6,312 [-]}$$

$$\gamma_2 = \frac{\left( \frac{b_{02}}{\delta} \right)^2}{5 + \left( \frac{b_{02}}{\delta} \right)} = \frac{\left( \frac{1 \cdot 10^{-3}}{0,25 \cdot 10^{-3}} \right)^2}{5 + \left( \frac{1 \cdot 10^{-3}}{0,25 \cdot 10^{-3}} \right)} = \underline{1,778 [-]}$$

$$k_{c1} = \frac{t_{d1}}{t_{d1} - \gamma_1 \delta} = \frac{7,33 \cdot 10^{-3}}{7,33 \cdot 10^{-3} - 6,312 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3}} = \underline{1,274 [-]}$$

$$k_{c2} = \frac{t_{d2}}{t_{d2} - \gamma_2 \delta} = \frac{9,369 \cdot 10^{-3}}{9,369 \cdot 10^{-3} - 1,778 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3}} = \underline{1,05 [-]}$$

$$k_c = k_{c1} k_{c2} = 1,274 \cdot 1,05 = \underline{1,338 [-]}$$

$$U_\delta = 1,59 \cdot 10^6 B_\delta k_c \delta = 1,59 \cdot 10^6 \cdot 0,813 \cdot 1,338 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} = \underline{432,398 \text{ A}}$$

$$h_{z1} = h_{d1} - 0,1b_1 = 13,65 \cdot 10^{-3} - 0,1 \cdot 5,5 \cdot 10^{-3} = \underline{13,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

$$h_{z2} = h_{d2} - 0,1b_2 = 14,45 \cdot 10^{-3} - 0,1 \cdot 1,6 \cdot 10^{-3} = \underline{14,29 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

$$U_{z1} = 2h_{z1} H_{z1} = 2 \cdot 13,1 \cdot 10^{-3} \cdot 2860 = \underline{74,932 \text{ A}}$$

Velikost  $H_{z1}$  byla odečtena z BH křivky materiálu M700-50A[5] pro  $B_{z1av}$ .

Pozn.: BH křivka materiálu M700-50A je uvedena v příloze.

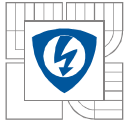
$$U_{z2} = 2h_{z2} H_{z2} = 2 \cdot 14,29 \cdot 10^{-3} \cdot 3350 = \underline{95,743 \text{ A}}$$

Velikost  $H_{z2}$  byla odečtena z BH křivky materiálu M700-50A[5] pro  $B_{z2av}$ .

$$k_z = 1 + \frac{U_{z1} + U_{z2}}{U_\delta} = 1 + \frac{26,331 + 30,438}{432,398} = \underline{1,131 [-]}$$

Vnitřní průměr rotorového svazku:  $D_i = D_h = \underline{30 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$

$$h_{j2} = \frac{D_2 - D_i}{2} - h_{d2} = \frac{83,5 \cdot 10^{-3} - 30 \cdot 10^{-3}}{2} - 14,45 \cdot 10^{-3} = \underline{12,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$



$$l_{j1} = \frac{\pi(D_e - h_{j1})}{2p_1} = \frac{\pi(135 \cdot 10^{-3} - 11,85 \cdot 10^{-3})}{2 \cdot 2} = \underline{96,722 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

$$l_{j2} = \frac{\pi(D_h + h_{j2})}{2p_1} = \frac{\pi(30 \cdot 10^{-3} + 12,3 \cdot 10^{-3})}{2 \cdot 2} = \underline{33,222 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

$$U_{j1} = l_{j1} H_{j1} = 96,722 \cdot 10^{-3} \cdot 610 = \underline{59 \text{ A}}$$

Velikost  $H_{j1}$  byla odečtena z BH křivky materiálu M700-50A[5] pro  $B_{j1}$ .

$$U_{j2} = l_{j2} H_{j2} = 33,222 \cdot 10^{-3} \cdot 168 = \underline{5,581 \text{ A}}$$

Velikost  $H_{j2}$  byla odečtena z BH křivky materiálu M700-50A[5] pro  $B_{j2}$ .

$$F_m = U_\delta + U_{z1} + U_{z2} + U_{j1} + U_{j2} \text{ [A]}$$

$$F_m = 432,398 + 74,932 + 95,743 + 59 + 5,581 = \underline{667,654 \text{ A}}$$

$$k_\mu = \frac{F_m}{U_\delta} = \frac{667,654}{432,398} = \underline{1,544 \text{ [-]}}$$

$$I_\mu = \frac{p_1 F_m}{0,9 m_1 N_1 k_{v1}} = \frac{2 \cdot 667,654}{0,9 \cdot 3 \cdot 390 \cdot 0,96} = \underline{1,321 \text{ A}}$$

$$S_1 = \pi \left( \frac{d_1}{2} \right)^2 = \pi \left( \frac{0,475 \cdot 10^{-3}}{2} \right)^2 = \underline{1,772 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2} \quad (2.0)$$

Průměr vodiče cívky statorového vinutí  $d_1$  [m] byl odečten z dokumentace k TM90-4S[7].

$$l_{vni\_3} = 2(l_{d1\_vni} + l_{\check{c}1\_vni}) + 2(l_{d2\_vni} + l_{\check{c}2\_vni}) + 2(l_{d3\_vni} + l_{\check{c}3\_vni}) \text{ [m]}$$

$$l_{vni\_3} = 2(56 \cdot 10^{-3} + 122 \cdot 10^{-3}) + 2(72 \cdot 10^{-3} + 136 \cdot 10^{-3}) + 2(90 \cdot 10^{-3} + 138 \cdot 10^{-3})$$

$$l_{vni\_3} = \underline{1,228 \text{ m}}$$

$$l_{vne\_3} = 2(l_{d1\_vne} + l_{\check{c}1\_vne}) + 2(l_{d2\_vne} + l_{\check{c}2\_vne}) + 2(l_{d3\_vne} + l_{\check{c}3\_vne})$$

$$l_{vne\_3} = 2(56 \cdot 10^{-3} + 130 \cdot 10^{-3}) + 2(72 \cdot 10^{-3} + 136 \cdot 10^{-3}) + 2(90 \cdot 10^{-3} + 146 \cdot 10^{-3})$$

$$l_{vne\_3} = \underline{1,26 \text{ m}}$$

$$l_{celk} = l_{vni\_3} + l_{vne\_3} = 1,228 + 1,26 = \underline{2,488 \text{ m}}$$

$l_{d1\_vni-d3\_vni}$ ,  $l_{d1\_vne-d3\_vne}$  ... délky jednotlivých stran trojčívky [m]

$l_{\check{c}1\_vni-\check{c}3\_vni}$ ,  $l_{\check{c}1\_vni-\check{c}3\_vni}$  ... délky jednotlivých čel trojčívky [m]

$l_{d1\_vni-d3\_vni}$ ,  $l_{d1\_vne-d3\_vne}$  ... délky jednotlivých stran trojčívky [m]

$l_{vni\_3}$ ,  $l_{vne\_3}$  ... délka vodiče trojčívek [m]

$l_{celk}$ ... celková délka vodičů obou trojčívek [m]

Velikost  $\rho_{Cu75^\circ C} = (1/47) \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m$  byla odečtena z [8].

$$R_1 = 1 \cdot \frac{1}{47} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{2,488 \cdot 65}{1,772 \cdot 10^{-7} \cdot 2} = \underline{\underline{9,709 \Omega}}$$

V vzorci je zohledněno zapojení dvou trojčívek jedné fáze statoru do série a 2 paralelní větve ( $a = 2[-]$ ).

Velikost průřezu rotorové tyče  $S_t$  bylo vypočítáno pomocí programu Femm:  $S_t = 40,098 \text{ mm}^2$

$$R_t = \rho_t \frac{l_t}{S_t} k_{\sim} = \frac{1}{21,5} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{78 \cdot 10^{-3}}{40,098 \cdot 10^{-6}} \cdot 1 = \underline{\underline{9,048 \cdot 10^{-5} \Omega}}$$

Hodnota rezistivity materiálu rotorové tyče  $\rho_t$  [ $\Omega \cdot \text{m}$ ] byla odečtena z [8].

$$\rho_t = (1/21,5) \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$$

$$S_{kn} = a_{kn} b_{kn} = 17,88 \cdot 10^{-3} \cdot 9,73 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{1,74 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2}}$$

Velikosti střední výšky kruhů nakrátko  $a_{kn}$  [m] a střední šířky kruhů nakrátko  $b_{kn}$  [m] byly změřeny přímo na reálném rotoru TM90-4S.

$$D_{kn} \approx D_2 - a_{kn} = 83,5 \cdot 10^{-3} - 17,88 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{65,62 \cdot 10^{-3} \text{ m}}}$$

$$R_{kn} = \rho_{kn} \frac{\pi D_{kn}}{Q_2 S_{kn}} = \frac{1}{21,5} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\pi \cdot 65,62 \cdot 10^{-3}}{28 \cdot 1,74 \cdot 10^{-4}} = \underline{\underline{1,968 \cdot 10^{-6} \Omega}}$$

Uvažováno:  $\rho_{kn} = \rho_t = (1/21,5) \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ .

$$\Delta = 2 \sin \frac{\pi p_1}{Q_2} = 2 \sin \frac{\pi \cdot 2}{28} = \underline{\underline{0,445 [-]}}$$

$$R_2 = R_t + \frac{2R_{kn}}{\left(2 \sin \frac{\pi p_1}{Q_2}\right)^2} = 9,048 \cdot 10^{-5} + \frac{2 \cdot 1,968 \cdot 10^{-6}}{\left(2 \sin \frac{\pi \cdot 2}{28}\right)^2} = \underline{\underline{1,104 \cdot 10^{-4} \Omega}}$$

$$p_z = \frac{4m_1 (N_1 k_{v1})^2}{Q_2} = \frac{4 \cdot 3 \cdot (390 \cdot 0,96)^2}{28} = \underline{\underline{60075,154 [-]}}$$

$$R_2' = R_2 p_z = 1,104 \cdot 10^{-4} \cdot 60075,154 = \underline{\underline{6,632 \Omega}}$$

Zvolen byl typ drážky f) podle [8].

$$\lambda_{d1} = \frac{h_3}{3b} k_{\beta} + \left( \frac{h_2}{b} + \frac{3h_1}{b+2b_0} + \frac{h_0}{b_0} \right) k_{\beta}' [-]$$

$$\lambda_{d1} = \frac{10,95 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 3,9 \cdot 10^{-3}} \cdot 1 + \left( \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{3,9 \cdot 10^{-3}} + \frac{3 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{3,9 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 2,4 \cdot 10^{-3}} + \frac{0,65 \cdot 10^{-3}}{2,4 \cdot 10^{-3}} \right) \cdot 1 = \underline{\underline{1,68 [-]}}$$

Při plném kroku dvouvrstvých vinutí a pro všechna jednovrstvá vinutí platí:  $k_{\beta} = k_{\beta}' = 1 [-]$ .

Uvažováno, že vinutí nemá zkrácený krok, takže:  $\beta = 1$ .

Výpočtová délka vzduchové mezery  $l_i = l_i = \underline{\underline{78 \cdot 10^{-3} \text{ m}}}$ .

$$\lambda_{\varepsilon 1} = 0,34 \frac{q_1}{l_i'} (l_{\varepsilon} - 0,64 \beta t_p) = 0,34 \cdot \frac{3}{78 \cdot 10^{-3}} \cdot (72,667 \cdot 10^{-3} - 0,64 \cdot 1 \cdot 65,973 \cdot 10^{-3}) = \underline{0,398 [-]}$$

Velikost délky čela cívky  $l_{\varepsilon}$  [m] byla vypočítána jako aritmetický průměr čel v dokumentaci [7] k TM90-4S.

Hodnota natočení drážek byla zvolena:  $b_{\gamma} = 9,369 \cdot 10^{-3}$  m.

$$\xi_1 = 2k_{\gamma}' k_{\beta} - k_{v1}^2 \left( \frac{t_{d2}}{t_{d1}} \right)^2 (1 + \beta_{\gamma}^2) = 2 \cdot 2,25 \cdot 1 - 0,96^2 \left( \frac{9,369 \cdot 10^{-3}}{7,33 \cdot 10^{-3}} \right)^2 (1 + 1^2) = \underline{1,489 [-]}$$

Činitel  $k_{\gamma}'$  byl určen z [8] v závislosti na poměru  $t_{d2}/t_{d1}$  a poměrného natočení drážek  $\beta_{\gamma}$  [-] - odečteno  $k_{\gamma} =$  přibližně 2,25 [-].

$$\frac{t_{d2}}{t_{d1}} = \frac{9,369 \cdot 10^{-3}}{7,33 \cdot 10^{-3}} = \underline{1,278 [-]}$$

Činitel  $k_{\beta} = 1$  - předpokládáno [8].

$$\lambda_{dif1} = \frac{t_{d1}}{12 \delta k_c} \xi_1 = \frac{7,33 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot 1,338} \cdot 1,489 = \underline{2,719 [-]}$$

$$X_{1\sigma} = 15,8 \frac{f_1}{100} \left( \frac{N_1}{100} \right)^2 \frac{l_2'}{p_1 q_1} (\lambda_{d1} + \lambda_{\varepsilon 1} + \lambda_{dif1}) [\Omega]$$

$$X_{1\sigma} = 15,8 \frac{50}{100} \left( \frac{390}{100} \right)^2 \frac{78 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3} \cdot (1,68 + 0,398 + 2,719) = \underline{\underline{7,493 \Omega}}$$

Byl zvolen typ drážky a) podle [8].

$$\lambda_{d2} = \left[ \frac{h_1}{3b} \left( 1 - \frac{\pi b^2}{8S_t} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_0}{2b} \right] k_d + \frac{h_0}{b_0} [-]$$

$$\lambda_{d2} = \left[ \frac{12,232 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 4,211 \cdot 10^{-3}} \left( 1 - \frac{\pi (4,211 \cdot 10^{-3})^2}{8 \cdot 40,098 \cdot 10^{-6}} \right)^2 + 0,66 - \frac{1 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 4,211 \cdot 10^{-3}} \right] \cdot 1 + \frac{0}{1 \cdot 10^{-3}} = \underline{1,202 [-]}$$

$$\lambda_{\varepsilon 2} = \frac{2,3 D_{kn}}{Q_2 l_i' \Delta^2} \log \frac{4,7 D_{kn}}{2 a_{kn} + b_{kn}} = \frac{2,3 \cdot 65,62 \cdot 10^{-3}}{28 \cdot 78 \cdot 10^{-3} \cdot 0,445^2} \log \frac{4,7 \cdot 65,62 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 17,88 \cdot 10^{-3} + 9,73 \cdot 10^{-3}} = \underline{0,29 [-]}$$

$$\frac{b_{02}}{\delta} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{0,25 \cdot 10^{-3}} = \underline{4 [-]}$$

$$\frac{b_{02}}{t_{d2}} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{9,369 \cdot 10^{-3}} = \underline{0,107 [-]}$$

$$\xi_2 = 1 + \frac{1}{5} \left( \frac{\pi p_1}{Q_2} \right)^2 - \frac{\Delta_z}{1 - \left( \frac{p_1}{Q_2} \right)^2} = 1 + \frac{1}{5} \left( \frac{\pi \cdot 2}{28} \right)^2 - \frac{0,025}{1 - \left( \frac{2}{28} \right)^2} = \underline{0,985 [-]}$$



Velikost  $\Delta_z$  se vyhledá z křivek[8] - odečten  $\Delta_z = 0,025$  (-).

$$\lambda_{dif2} = \frac{t_{d2}}{12\delta k_c} \xi_2 = \frac{9,369 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot 1,338} \cdot 0,985 = \underline{3,076 [-]}$$

$$X_{2\sigma} = 7,9 f_1 l_i' (\lambda_{d2} + \lambda_{\varepsilon 2} + \lambda_{dif2}) \cdot 10^{-6} = 7,9 \cdot 50 \cdot 78 \cdot 10^{-3} \cdot (1,202 + 0,29 + 3,076) \cdot 10^{-6} = \underline{1,407 \cdot 10^{-4} \Omega}$$

$$X'_{2\sigma} = X_{2\sigma} p_z = 1,407 \cdot 10^{-4} \cdot 60075,154 = \underline{8,453 \Omega}$$

$$\sigma_\gamma \approx 1 + 0,41 \left( \frac{b_\gamma}{t_p} \right)^2 \frac{U_{1N}}{X_{1\sigma} I_\mu} = 1 + 0,41 \left( \frac{9,369 \cdot 10^{-3}}{65,973 \cdot 10^{-3}} \right)^2 \frac{230,94}{7,493 \cdot 1,321} = \underline{1,193 [-]}$$

$$X_{1\sigma\gamma} = X_{1\sigma} \sigma_\gamma = 7,493 \cdot 1,193 = \underline{8,939 \Omega}$$

$$X'_{2\sigma\gamma} = X'_{2\sigma} \sigma_\gamma = 8,453 \cdot 1,193 = \underline{10,084 \Omega}$$

$$m_{j1} = \pi(D_e - h_{j1}) h_{j1} l_{Fe1} k_{Fe} \gamma_{Fe} \text{ [kg]}$$

$$m_{j1} = \pi(135 \cdot 10^{-3} - 11,85 \cdot 10^{-3}) \cdot 11,85 \cdot 10^{-3} \cdot 78 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = \underline{2,706 \text{ kg}}$$

$\gamma_{Fe}$  ... hustota oceli ( $\gamma_{Fe} = 7,8 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

$$m_{z1} \cong h_{z1} b_{z1av} Q_1 l_{Fe1} k_{Fe} \gamma_{Fe} \text{ [kg]}$$

$$m_{z1} \cong h_{z1} b_{z1av} Q_1 l_{Fe1} k_{Fe} \gamma_{Fe} = 13,1 \cdot 10^{-3} \cdot 3,719 \cdot 10^{-3} \cdot 36 \cdot 78 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = \underline{1,035 \text{ kg}}$$

$$m_{z2} = h_{z2} b_{z2av} Q_2 l_{Fe2} k_{Fe} \gamma_{Fe} = 14,29 \cdot 10^{-3} \cdot 4,698 \cdot 10^{-3} \cdot 28 \cdot 78 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = \underline{1,109 \text{ kg}}$$

$$\Delta P_{Feh} = \Delta p_{1,0} \left( \frac{f_1}{50} \right)^\beta (k_{dj} B_{j1}^2 m_{j1} + k_{dz} B_{z1av}^2 m_{z1}) \text{ [W]}$$

$$\Delta P_{Feh} = 2,57 \cdot \left( \frac{50}{50} \right)^\beta (1,6 \cdot 1,486^2 \cdot 2,706 + 1,8 \cdot 1,652^2 \cdot 1,035) = \underline{37,637 \text{ W}}$$

Měrné ztráty v železe  $\Delta p_{1,0} = 2,57 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$  byly odečteny z dokumentace k materiálu M700-50A[5].

$$\frac{b_{01}}{\delta} = \frac{2,4 \cdot 10^{-3}}{0,25 \cdot 10^{-3}} = \underline{9,6 [-]}$$

$$\frac{b_{02}}{\delta} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{0,25 \cdot 10^{-3}} = \underline{4 [-]}$$

$$\beta_{01} = f \left( \frac{b_{02}}{\delta} \right) [-]$$

$\beta_{01} = 0,27 [-]$  - odečteno z grafu[8]

$$\beta_{02} = f \left( \frac{b_{01}}{\delta} \right) [-]$$

$\beta_{02} = 0,4 [-]$  - odečteno z grafu[8]

$$B_{01} = \beta_{01} k_c B_\delta = 0,27 \cdot 1,338 \cdot 0,813 = \underline{0,294 T}$$

$$B_{02} = \beta_{02} k_c B_\delta = 0,4 \cdot 1,338 \cdot 0,813 = \underline{0,435 T}$$

$$p_{\delta p1} = 0,5 k_{01} \left( \frac{Q_2 n}{10000} \right)^{1,5} (B_{01} t_{d2} 10^3)^2 [W \cdot m^{-2}]$$

$$p_{\delta p1} = 0,5 \cdot 1,4 \left( \frac{28 \cdot 1500}{10000} \right)^{1,5} (0,294 \cdot 9,369 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3)^2 = \underline{45,714 W \cdot m^{-2}}$$

$$p_{\delta p2} = 0,5 k_{02} \left( \frac{Q_1 n}{10000} \right)^{1,5} (B_{02} t_{d1} 10^3)^2 [W \cdot m^{-2}]$$

$$p_{\delta p2} = 0,5 \cdot 1,5 \left( \frac{36 \cdot 1500}{10000} \right)^{1,5} (0,435 \cdot 7,33 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3)^2 = \underline{95,684 W \cdot m^{-2}}$$

$k_{01}, k_{02} \dots$  činitele respektující vliv opracování povrchu hlav zubů statoru a rotoru[8]  
 $n \dots$  otáčky rotoru [ $\text{min}^{-1}$ ] - zvoleno synchronní[8]

$$\Delta P_{\delta p1} = p_{\delta p1} (t_{d1} - b_{01}) Q_1 I_{Fe1} = 45,714 \cdot (7,33 \cdot 10^{-3} - 2,4 \cdot 10^{-3}) \cdot 36 \cdot 78 \cdot 10^{-3} = \underline{0,633 W}$$

$$\Delta P_{\delta p2} = p_{\delta p2} (t_{d2} - b_{02}) Q_2 I_{Fe2} = 95,684 \cdot (9,369 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-3}) \cdot 28 \cdot 78 \cdot 10^{-3} = \underline{1,749 W}$$

Náhradní otevření  $b'_{01}$  a  $b'_{02}$  nebylo uvažováno.

Koeficienty pro výpočet Carterova činitele  $\gamma'_1 = \gamma_1$  a  $\gamma'_2 = \gamma_2$ .

$$B_{p1} \approx \frac{\gamma'_2 \delta}{2t_{d1}} B_{z1av} = \frac{1,778 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 7,33 \cdot 10^{-3}} \cdot 1,652 = \underline{0,05 T}$$

$$B_{p2} \approx \frac{\gamma'_1 \delta}{2t_{d2}} B_{z2av} = \frac{6,312 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 9,369 \cdot 10^{-3}} \cdot 1,671 = \underline{0,141 T}$$

$$\Delta P_{p1} \approx 0,11 \left( \frac{Q_2 n}{1000} B_{p1} \right)^2 m_{z1} = 0,11 \left( \frac{28 \cdot 1500}{1000} \cdot 0,05 \right)^2 \cdot 1,035 = \underline{0,502 W}$$

$$\Delta P_{p2} \approx 0,11 \left( \frac{Q_1 n}{1000} B_{p2} \right)^2 m_{z2} = 0,11 \left( \frac{36 \cdot 1500}{1000} \cdot 0,141 \right)^2 \cdot 1,109 = \underline{7,072 W}$$

$$\Delta P_{Fed} = \Delta P_{\delta p1} + \Delta P_{\delta p2} + \Delta P_{p1} + \Delta P_{p2} = 0,633 + 1,749 + 0,502 + 7,072 = \underline{9,956 W}$$

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Feh} + \Delta P_{Fed} = 37,637 + 9,956 = \underline{47,593 W}$$

$$K_T = 1,3(1 - D_e) = 1,3(1 - 135 \cdot 10^{-3}) = \underline{1,125 [-]}$$

$$\Delta P_{mech} = K_T \left( \frac{n}{10} \right)^2 D_e^4 = 1,125 \left( \frac{1500}{10} \right)^2 (135 \cdot 10^{-3})^4 = \underline{8,408 W}$$

$$\Delta P_{j0} \approx m_1 R_1 I_\mu^2 = 3 \cdot 9,709 \cdot 1,321^2 = \underline{50,828 W}$$

$$I_{0j} \approx I_\mu = \underline{1,321 A}$$

$$I_{0\varepsilon} = \frac{\Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{j0}}{m_1 U_{1N}} = \frac{47,593 + 8,408 + 50,828}{3 \cdot 230,94} = \underline{0,154 \text{ A}}$$

Při výpočtu  $I_{0\varepsilon}$  se předpokládá, že ztráty v železe, třením a ventilační při chodu naprázdno jsou stejné jako při jmenovitém chodu.

$$I_{0\varepsilon} = I_{Fe} = \underline{0,154 \text{ A}}$$

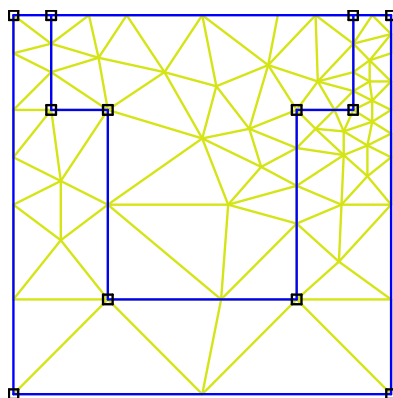
$$I_0 = \sqrt{I_{0\varepsilon}^2 + I_{0j}^2} = \sqrt{0,154^2 + 1,321^2} = \underline{1,33 \text{ A}}$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{I_{0\varepsilon}}{I_0} = \frac{0,154}{1,33} = \underline{0,116 [-]}$$

## 6 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ (MKP)

### 6.1 Obecně k metodě konečných prvků

Tato numerická metoda je založena na rozdělení spojitého kontinua do určitého konečného počtu prvků. Tímto způsobem vznikne síť elementů skládající se z propojených uzlů, ve kterých probíhá zjišťování výsledných parametrů. Pomocí této metody lze simulovat jevy v různých oborech lidské činnosti na vytvořeném fyzikálním modelu. Její principy jsou známy již delší dobu, avšak k rozšíření výpočtů pomocí metody konečných prvků bylo umožněno až s moderní výpočetní technikou, protože jsou výpočty modelů simulovaných pomocí této metody značně časově náročné. Rozsah výpočtů je ovlivněn počtem elementů, s jejichž rostoucím množstvím také roste výpočetní čas[9]. Mezi výpočetní programy sloužící k simulaci prostřednictvím fyzikálních modelů patří relativně jednoduchý na seznámení a práci program FEMM[11]. Pomocí této aplikace byly provedeny simulace obou zadaných asynchronních motorů.



Obr. č. 8: Ukázka sítě uzlů a elementů (mesh) v programu FEMM[11]

### 6.2 Simulace motorů v programu FEMM

Simulace 3f asynchronních motorů vychází z literatury[10], případně[11], kde se autoři zabývali modelováním asynchronních motorů pomocí MKP v programu FEMM. Pomocí daného postupu lze pomocí vytvořené geometrie provést výpočet sloužící k určení jednotlivých parametrů z náhradního schématu.

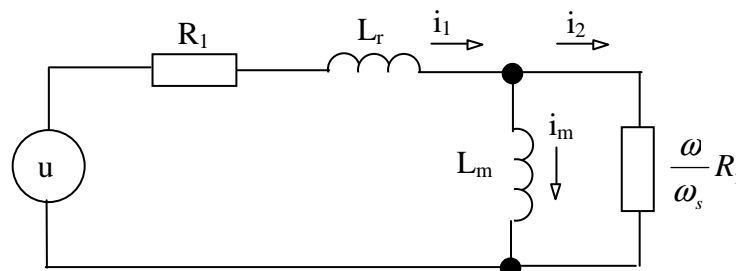
## 6.3 Vytvoření modelů motorů

Pro simulaci zadaných 3f asynchronních motorů[7] byl použit program FEMM[11], který slouží pro výpočty magnetických obvodů pomocí metody konečných prvků. Jednotlivé geometrie motorů byly naimportovány do programu přes výkresový formát .dxf. Pro simulaci bylo potřeba linearizovat použité materiály. Linearizace byla provedena pro všechny použité materiály. Simulace byly prováděny pomocí Lua skriptu pro frekvenci od 0,1 Hz do 5 Hz s krokem 0,5 Hz při respektování zadané hodnoty frekvence do  $1,5 \times f_s$ . Z každé série výpočtů pro oba simulované motory (TM90-4S a TM71-2S)[7] se potom následně vypočítávaly parametry náhradního schématu motoru.

## 6.4 Modelování asynchronního motoru TM90-4S a TM71-2S[7]

### 6.4.1 Náhradní schéma jedné fáze indukčního motoru v ustáleném stavu

Program FEMM umožňuje vypočítat magnetický tok ze zadané geometrie motoru a proudu protékajícím drážkami stroje. Jelikož je proud v modelu jednotkový, získaný magnetický tok bude odpovídat indukčnosti. Předpokládá se, že je v náhradním schématu konstantní kmitočet napájení a konstantní rychlost rotoru[10].



Obr. č.9: Náhradní schéma jedné fáze indukčního motoru v ustáleném stavu (převzato z [10])

### 6.4.2 Odvození momentu $M$ [N·m] z náhradního schématu[10]:

Skuzová rychlost  $\omega_s$ :

$$\omega_s = \omega_1 - \omega_2 \cdot p \text{ [rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (6.0)$$

$\omega_1$  ... synchronní rychlost otáčivého pole [rad·s<sup>-1</sup>]

$\omega_2$  ... rychlost rotoru [rad·s<sup>-1</sup>]

$p$  ... počet pólů [-]

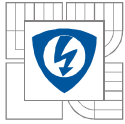
Celková impedance  $Z$ :

$$Z = R_1 + j\omega_1 L_r + \frac{j\omega_1 L_r \cdot \frac{\omega_1}{\omega_s} \cdot R_2}{j\omega_1 L_r + \frac{\omega_1}{\omega_s} \cdot R_2} \text{ [\Omega]} \quad (6.1)$$

$R_1$  ... prvek reprezentující ztráty [Ω]

$L_r$  ... prvek reprezentující ztráty [H]

$R_2$  ... prvek reprezentující práci motoru na hřídeli [Ω]



Časová konstanta rotoru  $\tau$ :

$$\tau = \frac{L_m}{R_2} [s] \quad (6.2)$$

$L_m$  ... vzájemná indukčnost [H]

Úpravou předchozích rovnic lze získat:

$$Z = R_1 + j\omega_1 \left( L_r + \frac{L_m}{1 + j\tau\omega_s} \right) [\Omega] \quad (6.3)$$

Tok  $\Phi$  libovolné fáze:

$$\phi = \left( L_r + \frac{L_m}{1 + j\tau\omega_s} \right) \cdot i [Wb] \quad (6.4)$$

Indukčnost závislá na skluzové frekvenci  $L(\omega_s)$ :

$$L(\omega_s) = \left( L_r + \frac{L_m}{1 + (\tau\omega_s)^2} \right) - j \left( \frac{\tau\omega_s L_m}{1 + (\tau\omega_s)^2} \right) [H] \quad (6.5)$$

Výkon na odporu:

$$P = 3 \left( \frac{\omega_1}{\omega_s} \right) R_2 |i_2|^2 = 3 \left( \frac{\omega_1 - \omega_s}{\omega_s} \right) R_2 |i_2|^2 + 3R_2 |i_2|^2 [W] \quad (6.6)$$

Mechanický výkon  $P_{\text{mech}}$ :

$$P_{\text{mech}} = 3 \left( \frac{p \cdot \omega_2}{\omega_s} \right) R_2 |i_2|^2 [W] \quad (6.7)$$

Výraz pro moment  $M$ :

$$M = 3 \left( \frac{pR_2}{\omega_s} \right) |i_2|^2 [Nm] \quad (6.8)$$

Porovnávání napětí na magnetizační indukčnosti a odporu rotoru:

$$\left( \frac{\omega_1}{\omega_s} \right) R_2 i_2 = j\omega_1 L_m i_m \quad (6.9)$$

Vyjádření proudu  $i_2$ :

$$i_2 = j\tau\omega_s i_m [A] \quad (6.10)$$

Vyjádření proudu  $i_1$ :

$$i_1 = i_m + i_2 [A] \quad (6.11)$$

Získaný vztah pro proud  $i_2$ :

$$i_2 = \left( \frac{j\tau\omega_s}{1 + j\tau\omega_s} \right) \cdot i_1 \text{ [A]} \quad (6.12)$$

Výsledný moment M:

$$M = 3pL_m i_1^2 \left( \frac{\tau\omega_s}{1 + (\tau\omega_s)^2} \right) \text{ [Nm]} \quad (6.13)$$

## 6.5 Výsledky simulací - výpočet momentu M

Výsledky z Lua skriptů:

A) Motor TM90-4S:

| č. simulace | f [Hz] | M [Nm]      | $\Phi_1$ [Wb] |              |
|-------------|--------|-------------|---------------|--------------|
|             |        |             | Re            | Im           |
| 1           | 0,5    | 0,502847045 | 0,482622557   | -0,15645916  |
| 2           | 1      | 0,730905333 | 0,368079865   | -0,236084567 |
| 3           | 1,5    | 0,761675944 | 0,268271884   | -0,248960179 |
| 4           | 2      | 0,712373052 | 0,199199782   | -0,234094306 |
| 5           | 2,5    | 0,643508079 | 0,153820922   | -0,212055455 |
| 6           | 3      | 0,576622879 | 0,123735383   | -0,190319005 |
| 7           | 3,5    | 0,517634198 | 0,103229293   | -0,171021398 |
| 8           | 4      | 0,467174396 | 0,088809092   | -0,154459878 |
| 9           | 4,5    | 0,424322926 | 0,078362461   | -0,140373317 |
| 10          | 5      | 0,387859182 | 0,070588862   | -0,128379514 |

Tab. č. 2: Výsledné vypočítané hodnoty z Lua skriptů - TM90-4S

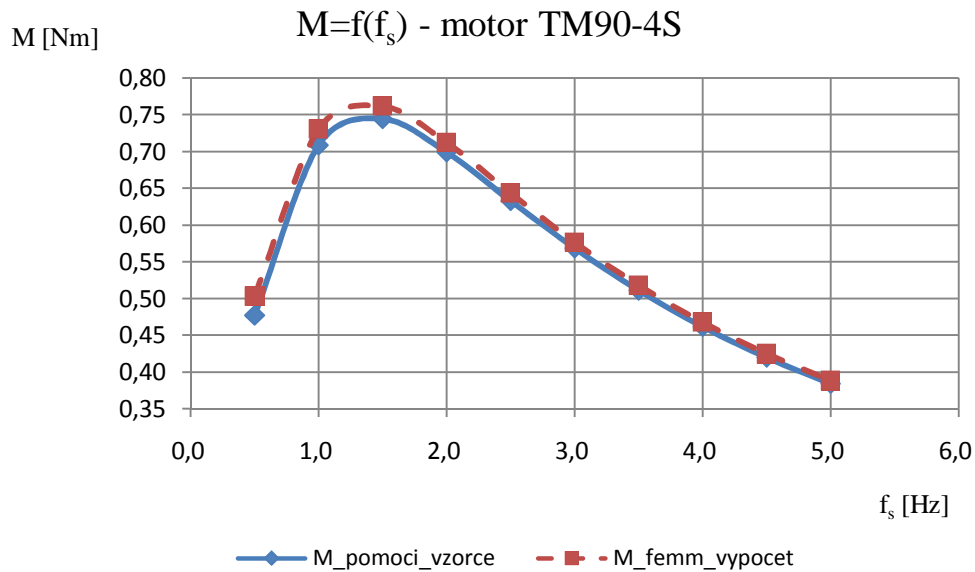
B) Motor TM71-2S:

| č. simulace | f [Hz] | M [Nm]      | $\Phi_1$ [Wb] |              |
|-------------|--------|-------------|---------------|--------------|
|             |        |             | Re            | Im           |
| 1           | 0,5    | 0,779720152 | 1,338863594   | -0,517549453 |
| 2           | 1      | 1,090722208 | 0,95880823    | -0,726245657 |
| 3           | 1,5    | 1,090958196 | 0,662136596   | -0,727546281 |
| 4           | 2      | 0,99171649  | 0,472847468   | -0,6622438   |
| 5           | 2,5    | 0,879405735 | 0,35487811    | -0,588031815 |
| 6           | 3      | 0,778406256 | 0,279255785   | -0,521236066 |
| 7           | 3,5    | 0,692920103 | 0,22882853    | -0,464701066 |
| 8           | 4      | 0,621615188 | 0,193880928   | -0,41756328  |
| 9           | 4,5    | 0,56206397  | 0,168813385   | -0,378218372 |
| 10          | 5      | 0,511976143 | 0,150287451   | -0,345147664 |

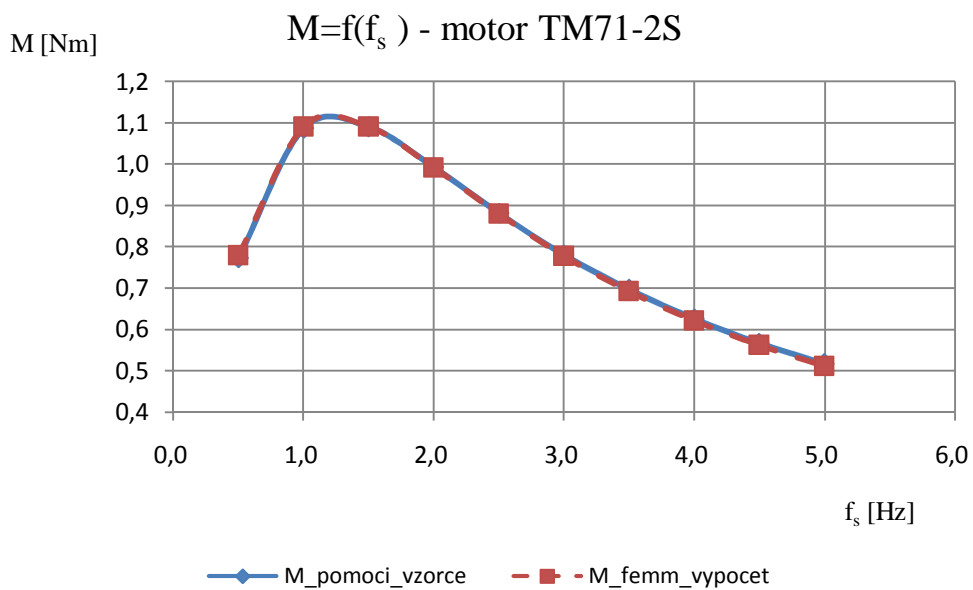
Tab. č. 3: Výsledné vypočítané hodnoty z Lua skriptů - TM71-2S

Srovnání momentu vypočítaného programem FEMM a momentu vypočítaného pomocí vzorce (6.13) je zobrazeno pomocí následujících grafických závislostí.

a) Grafická závislost momentů na skluzové frekvenci - motor TM90-4S



b) Grafická závislost momentů na skluzové frekvenci - motor TM71-2S



Ze zobrazených grafických závislostí a) i b) vyplývá, že vypočítané velikosti momentů pomocí programu FEMM a pomocí vzorce (6.13) si odpovídají.

## 7 MĚŘENÍ 3F ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ

Pro zadané 3f asynchronní motory TM90-4S a TM71-2S[7] byla provedena zkouška naprázdno, nakrátko a dále byla změřena momentová charakteristika  $M=f(n)$ , případně po přepočtení  $M=f(s)$ . Zkouška naprázdno se provádí pro velikost skluzu menší než  $s=1(-)$ .

### 7.1 Zkouška naprázdno - TM90-4S

Tabulky naměřených (vypočtených) hodnot při zkoušce naprázdno - motor TM90-4S:

| č.m. | %Un | $\alpha_1$ | $K_1$ | $I_1$ | $\alpha_2$ | $K_2$ | $I_2$ | $\alpha_3$ | $K_3$ | $I_3$ | $\alpha_4$ | $K_4$      | $U_1$ |
|------|-----|------------|-------|-------|------------|-------|-------|------------|-------|-------|------------|------------|-------|
|      | [%] | [d]        | [A/d] | [A]   | [d]        | [A/d] | [A]   | [d]        | [A/d] | [A]   | [d]        | [V/d]      | [V]   |
| 1    | 110 | 1,85       | 5     | 1,85  | 1,9        | 5     | 1,9   | 1,95       | 5     | 1,95  | 88         | 600<br>120 | 440   |
| 2    | 100 | 1,35       |       | 1,35  | 1,4        |       | 1,4   | 1,5        |       | 1,5   | 80         |            | 400   |
| 3    | 90  | 1,1        |       | 1,1   | 1,15       |       | 1,15  | 1,2        |       | 1,2   | 72         |            | 360   |
| 4    | 80  | 0,91       | 1     | 0,91  | 0,99       | 1     | 0,99  | 0,98       | 1     | 0,98  | 64         | 240<br>120 | 320   |
| 5    | 70  | 0,76       |       | 0,76  | 0,83       |       | 0,83  | 0,8        |       | 0,8   | 56         |            | 280   |
| 6    | 60  | 0,63       |       | 0,63  | 0,7        |       | 0,7   | 0,66       |       | 0,66  | 48         |            | 240   |
| 7    | 50  | 0,5        |       | 0,5   | 0,56       |       | 0,56  | 0,53       |       | 0,53  | 100        |            | 200   |
| 8    | 40  | 0,4        |       | 0,4   | 0,45       |       | 0,45  | 0,42       |       | 0,42  | 80         |            | 160   |
| 9    | 30  | 0,29       |       | 0,29  | 0,35       |       | 0,35  | 0,32       |       | 0,32  | 60         |            | 120   |
| 10   | 20  | 0,23       |       | 0,23  | 0,26       |       | 0,26  | 0,22       |       | 0,22  | 40         |            | 80    |

Tab. č.4: Naměřené hodnoty při zkoušce naprázdno motoru TM90-4S - 1.část

| $\alpha_1$ | $K_1$                     | $P_1$ | $\alpha_2$ | $K_2$                     | $P_2$ | $I_{10}$ | $U_{10}$ | $P_{10}$ | n                    | $\cos\varphi_{10}$ | $\Delta P_{Cu10}$ | $\Delta P_m$ | s     |
|------------|---------------------------|-------|------------|---------------------------|-------|----------|----------|----------|----------------------|--------------------|-------------------|--------------|-------|
| [d]        | [W/d]                     | [W]   | [d]        | [W/d]                     | [W]   | [A]      | [V]      | [W]      | [min <sup>-1</sup> ] | [-]                | [W]               | [W]          | [%]   |
| 55         | $\frac{360 \cdot 2}{120}$ | -330  | 84         | $\frac{360 \cdot 2}{120}$ | 504   | 1,9      | 440      | 174      | 1498                 | 0,120              | 100,49            | 9            | 0,133 |
| 39         | 120                       | -234  | 59         | 120                       | 354   | 1,42     | 400      | 120      | 1498                 | 0,122              | 55,867            | 9            | 0,133 |
| 49         | $\frac{360 \cdot 1}{120}$ | -147  | 81         | $\frac{360 \cdot 1}{120}$ | 243   | 1,15     | 360      | 96       | 1498                 | 0,134              | 36,814            | 9            | 0,133 |
| 55         | $\frac{240 \cdot 1}{120}$ | -110  | 91         | $\frac{240 \cdot 1}{120}$ | 182   | 0,96     | 320      | 72       | 1497                 | 0,135              | 25,655            | 9            | 0,200 |
| 76         | 120                       | -76   | 65         | 120                       | 130   | 0,8      | 280      | 54       | 1497                 | 0,140              | 17,668            | 9            | 0,200 |
| 51         |                           | -51   | 94         |                           | 94    | 0,66     | 240      | 43       | 1497                 | 0,156              | 12,249            | 9            | 0,200 |
| 30         |                           | -30   | 61         |                           | 61    | 0,53     | 200      | 31       | 1497                 | 0,169              | 7,8194            | 9            | 0,200 |
| 17         |                           | -17   | 39         |                           | 39    | 0,42     | 160      | 22       | 1496                 | 0,188              | 4,9887            | 9            | 0,267 |
| 7          |                           | -7    | 23         |                           | 23    | 0,32     | 120      | 16       | 1494                 | 0,241              | 2,8505            | 9            | 0,400 |
| 0          |                           | 0     | 11         |                           | 11    | 0,24     | 80       | 11       | 1485                 | 0,335              | 1,5592            | 9            | 1,000 |

Tab. č. 5: Naměřené a vypočtené hodnoty při zkoušce naprázdno motoru TM90-4S - 2.část



## 7.2 Zkouška naprázdno - TM71-2S

Tabulky naměřených (vypočtených) hodnot při zkoušce naprázdno - motor TM71-2S:

| č.m. | %U <sub>n</sub> | U   | U <sub>1</sub> | I <sub>1</sub> | P <sub>1</sub> | U <sub>2</sub> | I <sub>2</sub> | P <sub>2</sub> | I <sub>10</sub> | U <sub>10</sub> | P <sub>10</sub> | n                    | cosφ <sub>10</sub> | ΔP <sub>Cu10</sub> |
|------|-----------------|-----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------|--------------------|--------------------|
|      | [%]             | [V] | [V]            | [A]            | [W]            | [V]            | [A]            | [W]            | [A]             | [V]             | [W]             | [min <sup>-1</sup> ] | [-]                | [W]                |
| 1    | 110             | 440 | 443            | 0,723          | -105           | 440            | 0,713          | 192,4          | 0,718           | 441,5           | 87,1            | 2989                 | 0,159              | 43,51              |
| 2    | 100             | 400 | 402            | 0,543          | -70,1          | 400            | 0,513          | 131,7          | 0,528           | 401             | 61,6            | 2989                 | 0,168              | 23,53              |
| 3    | 90              | 360 | 362            | 0,424          | -45,1          | 359            | 0,404          | 93             | 0,414           | 360,5           | 47,9            | 2989                 | 0,185              | 14,46              |
| 4    | 80              | 320 | 320            | 0,348          | -33,9          | 319            | 0,333          | 72,4           | 0,341           | 319,5           | 38,5            | 2987                 | 0,204              | 9,784              |
| 5    | 70              | 280 | 281            | 0,287          | -22,9          | 280            | 0,286          | 56,2           | 0,287           | 280,5           | 33,3            | 2985                 | 0,239              | 6,927              |
| 6    | 60              | 240 | 241            | 0,24           | -12,8          | 240            | 0,233          | 41,1           | 0,237           | 240,5           | 28,3            | 2982                 | 0,287              | 4,72               |
| 7    | 50              | 200 | 202            | 0,205          | -5,1           | 199            | 0,184          | 29,3           | 0,195           | 200,5           | 24,2            | 2975                 | 0,358              | 3,192              |

Tab. č.6: Naměřené a vypočtené hodnoty při zkoušce naprázdno motoru TM71-2S

## 7.3 Zkouška nakrátko - TM90-4S

Tabulky naměřených (vypočtených) hodnot při zkoušce nakrátko - motor TM90-4S:

| č.m. | I <sub>n</sub> | α <sub>1</sub> | K <sub>1</sub> | I <sub>1</sub> | α <sub>2</sub> | K <sub>2</sub> | I <sub>2</sub> | α <sub>3</sub> | K <sub>3</sub> | I <sub>3</sub> | α <sub>4</sub> | K <sub>4</sub>    | U <sub>1</sub> |
|------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|
|      | [A]            | [d]            | [A/d]          | [A]            | [d]            | [A/d]          | [A]            | [d]            | [A/d]          | [A]            | [d]            | [V/d]             | [V]            |
| 1    | 2,5            | 2,4            | $\frac{5}{5}$  | 2,4            | 2,44           | $\frac{5}{5}$  | 2,44           | 2,5            | $\frac{5}{5}$  | 2,5            | 87             | $\frac{120}{120}$ | 87             |

Tab. č.7: Naměřené hodnoty při zkoušce nakrátko motoru TM90-4S - 1.část

| α <sub>1</sub> | K <sub>1</sub>            | P <sub>1</sub> | α <sub>2</sub> | K <sub>2</sub>            | P <sub>2</sub> | I <sub>1k</sub> | U <sub>1k</sub> | P <sub>1k</sub> | n                    | cosφ <sub>1k</sub> |
|----------------|---------------------------|----------------|----------------|---------------------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------|--------------------|
| [d]            | [W/d]                     | [W]            | [d]            | [W/d]                     | [W]            | [A]             | [V]             | [W]             | [min <sup>-1</sup> ] | [-]                |
| 24             | $\frac{120 \cdot 2}{120}$ | 48             | 52             | $\frac{240 \cdot 2}{120}$ | 208            | 2,45            | 87              | 256             | 0                    | 0,6944             |

Tab. č. 8: Naměřené a vypočtené hodnoty při zkoušce nakrátko motoru TM90-4S - 2.část

| ΔP <sub>Cu1k</sub> | R <sub>k</sub> | X <sub>k</sub> | R' <sub>2</sub> | Z <sub>1k</sub> | X <sub>r1</sub> |
|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| [W]                | [Ω]            | [Ω]            | [Ω]             | [Ω]             | [Ω]             |
| 166,64             | 14,26          | 14,774         | 4,976           | 20,53           | 7,38688         |

Tab. č. 9: Vypočtené hodnoty při zkoušce nakrátko motoru TM90-4S - 3.část

## 7.4 Zkouška nakrátko - TM71-2S

Tabulky naměřených (vypočtených) hodnot při zkoušce nakrátko - motor TM71-2S:

| č.m. | I <sub>n</sub> | U   | U <sub>1</sub> | I <sub>1</sub> | P <sub>1</sub> | U <sub>2</sub> | I <sub>2</sub> | P <sub>2</sub> | I <sub>1k</sub> | U <sub>1k</sub> |
|------|----------------|-----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
|      | [A]            | [V] | [V]            | [A]            | [W]            | [V]            | [A]            | [W]            | [A]             | [V]             |
| 1    | 1,03           | -   | 127            | 1,033          | 45,1           | 125            | 1,031          | 127,2          | 1,032           | 126             |

Tab. č. 10: Naměřené hodnoty při zkoušce nakrátko motoru TM71-2S - 1.část

| $P_{1k}$ | $n$                  | $\cos\varphi_{1k}$ | $\Delta P_{Cu1k}$ | $R_k$ | $X_k$ | $R'_2$ | $Z_{1k}$ | $X_{r1}$ |
|----------|----------------------|--------------------|-------------------|-------|-------|--------|----------|----------|
| [W]      | [min <sup>-1</sup> ] | [-]                | [W]               | [Ω]   | [Ω]   | [Ω]    | [Ω]      | [Ω]      |
| 172      | 0                    | 0,765              | 89,88             | 54    | 45,4  | 25,797 | 70,49    | 22,698   |

Tab. č. 11: Vypočtené hodnoty při zkoušce nakrátko motoru TM71-2S - 2.část

## 8 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

### A) TM90-4S

| Parametry 3f asynchronního motoru            |                   |        | Způsob identifikace |        |          |
|--|-------------------|--------|---------------------|--------|----------|
| Název  | Značka            | Rozměr | Analyticky          | Měření | Simulace |
| Odpor vinutí statoru                         | $R_1$             | [Ω]    | 9,709               | 9,279  | n        |
| Přepočtený odpor vinutí rotoru               | $R'_2$            | [Ω]    | 6,632               | 4,976  | 4,33     |
| Rozptylová reaktance fáze statorového vinutí | $X_{1\sigma}$     | [Ω]    | 8,939               | 7,387  | 5,899    |
| Rozptylová reaktance fáze rotorového vinutí  | $X_{2\sigma}$     | [Ω]    | 10,084              | 7,387  | 5,899    |
| Ztráty v železe                              | $\Delta P_{Fe}$   | [W]    | 47,593              | 64,339 | n        |
| Mechanické ztráty                            | $\Delta P_{mech}$ | [W]    | 8,408               | 9      | n        |
| Ztráty ve vinutí statoru při chodu naprázdno | $\Delta P_{j0}$   | [W]    | 50,828              | 46,661 | n        |
| Proud naprázdno motoru                       | $I_0$             | [A]    | 1,33                | 1,42   | n        |
| Účinník při chodu naprázdno                  | $\cos\varphi_0$   | [-]    | 0,116               | 0,133  | n        |

Tab. č. 12: Srovnání výsledků - asynchronní motor TM90-4S

Pozn.: n ... parametr nebyl pomocí této identifikace určen.

### B) TM71-2S

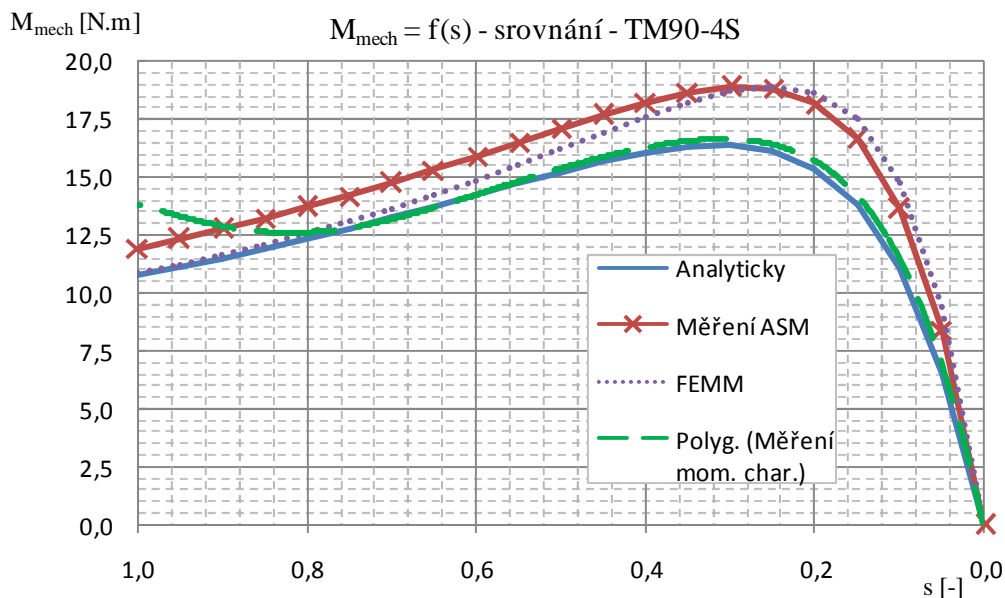
| Parametry 3f asynchronního motoru            |                   |        | Způsob identifikace |        |          |
|--|-------------------|--------|---------------------|--------|----------|
| Název  | Značka            | Rozměr | Analyticky          | Měření | Simulace |
| Odpor vinutí statoru                         | $R_1$             | [Ω]    | 29,102              | 28,13  | n        |
| Přepočtený odpor vinutí rotoru               | $R'_2$            | [Ω]    | 22,774              | 25,797 | 11,481   |
| Rozptylová reaktance fáze statorového vinutí | $X_{1\sigma}$     | [Ω]    | 19,325              | 22,698 | 10,237   |
| Rozptylová reaktance fáze rotorového vinutí  | $X_{2\sigma}$     | [Ω]    | 21,812              | 22,698 | 10,237   |
| Ztráty v železe                              | $\Delta P_{Fe}$   | [W]    | 22,709              | 15,07  | n        |
| Mechanické ztráty                            | $\Delta P_{mech}$ | [W]    | 13,454              | 23     | n        |
| Ztráty ve vinutí statoru při chodu naprázdno | $\Delta P_{j0}$   | [W]    | 22,089              | 23,53  | n        |
| Proud naprázdno motoru                       | $I_0$             | [A]    | 0,519               | 0,528  | n        |
| Účinník při chodu naprázdno                  | $\cos\varphi_0$   | [-]    | 0,243               | 0,367  | n        |

Tab. č. 13: Srovnání výsledků - asynchronní motor TM71-2S

Pozn.: n ... parametr nebyl pomocí této identifikace určen.

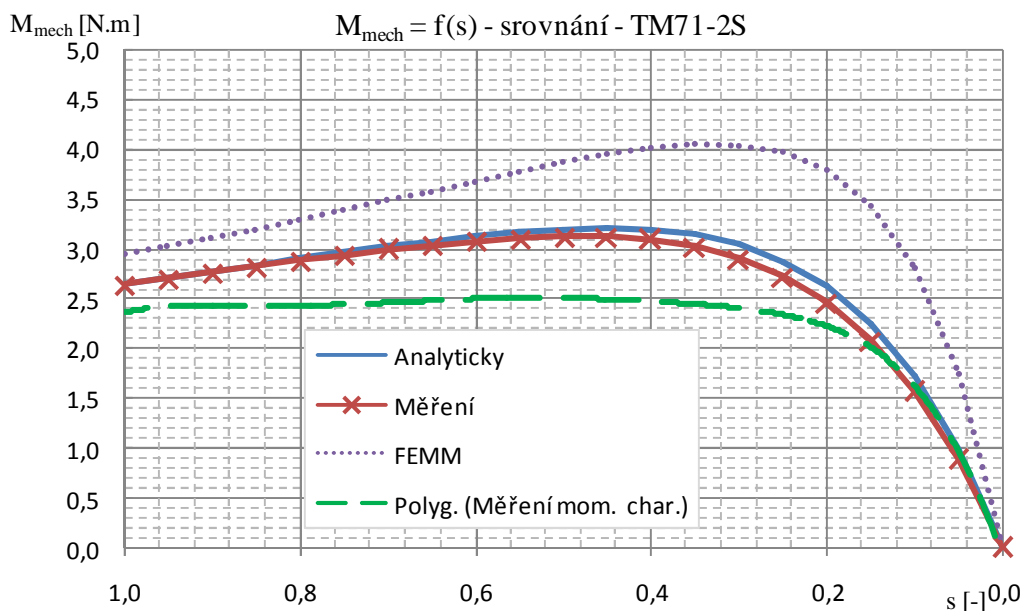
Vynesení grafických závislostí momentu  $M_{\text{mech}}$  na skluzu  $s$  pro motor TM90-4S a TM71-2S:

A) Motor - TM90-4S



Obr. č. 10: Srovnání momentových charakteristik - TM90-4S

B) Motor - TM71-2S



Obr. č. 11: Srovnání momentových charakteristik - TM71-2S

## 9 ZÁVĚR

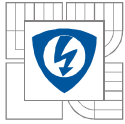
Parametry náhradního schématu 3f asynchronního motoru TM90-4S a TM71-2S byly vypočítány numericky, pomocí hodnot získaných z měření tohoto motoru naprázdno a nakrátko a pomocí simulace. První z uvedených motorů je čtyřpólový stroj ( $2p=4$ ) o výkonu  $P_2 = 1,1$  kW a druhý dvoupólový stroj ( $2p=2$ ) s výkonem  $P_2 = 370$ W.

Při řešení pomocí analytického výpočtu byly postupně získávány parametry náhradních schémat výše uvedených motorů. Návrhová metoda byla čerpána z literatury[8]. Pro výpočet a ověření, že dosazované velikosti geometrických rozměrů jsou správné bylo potřeba některé hodnoty získat také podle měření na reálném motoru v laboratoři. Jako materiál, ze kterého bylo vyrobeno jeho statoru a rotoru, byl použit M700-50A[5]. Velikosti jednotlivých parametrů získaných výpočtem jsou uvedeny v tab. č.12 a č.13.

Pro získání parametrů náhradního schématu z měření bylo potřeba provést zkoušku naprázdno a nakrátko. Z výsledných naměřených hodnot byly vypočteny parametry obou motorů TM90-4S a TM71-2S. Zkouška naprázdno byla prováděna do velikosti skluzu, který nepřekročil velikost  $s=1$  (%). Při zkoušce nakrátko byl rotor obou motorů mechanicky zabrzděn a proud protékající statorovým vinutím se nastavil na jmenovitou hodnotu  $I_n$ . Velikost odporu statorového vinutí byla změřena za studena i za tepla, případně byla přepočítána na hodnotu  $75^\circ\text{C}$ . Výsledné hodnoty parametrů jsou uvedeny ve stejné tabulce jako pro získání jejich hodnot pomocí analytického výpočtu. V rámci měření bylo také provedeno měření momentových charakteristik obou motorů. Při tomto měření se postupovalo tak, že velikost napájecího napětí se snižovala, aby netekl motor velkým proudem. Výsledné hodnoty z měření musely být proto přepočteny. Vliv na získání přesných hodnot parametrů výpočtem z měření naprázdno a nakrátko může mít přesnost měřicích přístrojů, volba měřicí metody a správnost odečtu hodnot z měřicích přístrojů, zaokrouhlování vypočtených hodnot a další možné chyby.

Pomocí simulací v programu FEMM byl proveden výpočet parametrů náhradního schématu výše uvedených asynchronních motorů. K tomuto způsobu získání velikostí prvků ve schématu bylo potřeba vytvořit geometrii ve formátu .dxf obou motorů a nainportovat ji do aplikace FEMM, kde byla provedena série simulací, jejichž výsledky jsou dány do tabulek č.1 a č.2. Tyto získané hodnoty byly zpracovány podle literatury[10].

Celkové srovnání získaných parametrů je uvedeno v tab. č.12 pro motor TM90-4S a v tab. č.13 pro motor TM71-2S. Vypočtená velikost odporu statorového vinutí  $R_1$  se přibližně shoduje s naměřenou a případně přepočtenou (na  $75^\circ\text{C}$ ) hodnotou v obou tabulkách pro oba motory. Velikosti rozptylových reaktancí získaných pomocí měření a ze simulací jsou brány jako poloviční z celkové získané rozptylové reaktanci. Jejich velikosti jsou také přibližně stejné. Velikosti hodnot získaných parametrů pomocí všech uvedených metod si přibližně odpovídají, kromě provedených simulací, kde se velikost parametrů už výrazně odlišuje, to je poté vidět na charakteristikách zobrazujících srovnání závislosti momentu na skluzu v grafu na obr. č.10 pro motor TM90-4S a v grafu na obr. č.11 pro TM71-2S, vynesenu pomocí hodnot parametrů získaných z jednotlivých metod. Z toho zjištění vyplývá, že velikosti parametrů získaných pomocí simulací nejsou přesné. Velikost nepřesnosti mohla být způsobena způsobem definováním použitých materiálů s ohledem na jejich linearizaci a další nastavení simulace.



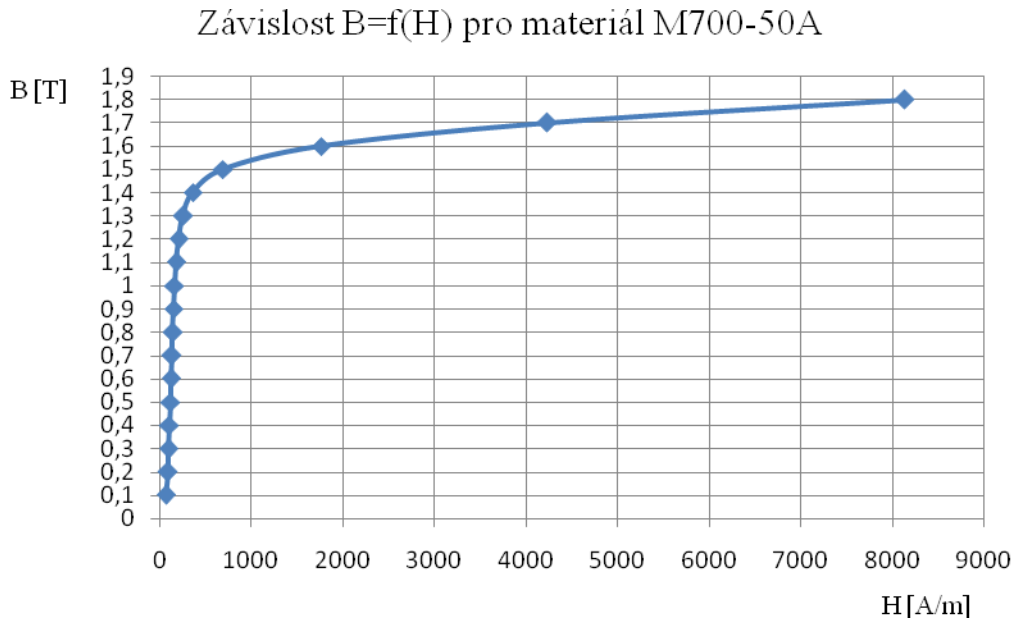
## LITERATURA

### Seznam použité literatury:

- [1] CIGÁNEK, Ladislav. *Elektrické stroje : Působení, provedení a navrhování*. 6. upravené vydání. Praha : Technicko-vědecké vydavatelství, 1951. 816 s.
- [2] CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů*. 1. vydání . Praha : Sntl, 1958. 716 s.
- [3] PETROV, G. N. *Elektrické stroje 2 : Asynchronní stroje - synchronní stroje*. 1. vydání . Praha : Academia, 1982. 732 s.
- [4] ONDRUŠEK, Čestmír. *Skripta : elektricke stroje*, 18.5.2012 [cit. 2012-05-18].
- [5] PDF Dokument. *2011\_NOFP\_Cogent\_plech.pdf*, 18.5.2012 [cit. 2012-05-18].
- [6] ŠTĚPINA, Jaroslav. *Jednofázové indukční motory*. 1. vydání . Praha : Sntl, 1957. 198 s.
- [7] EMP s.r.o. *Slavkov u BRNA* [online]. 2007 [cit. 2012-05-18]. Trojfázové a jednofázové asynchronní motory typu TM a JMC. Dostupné z WWW: <[http://www.emp-slavkov.cz/tm\\_jmc.html](http://www.emp-slavkov.cz/tm_jmc.html)> + poskytnuté dokumentace k 3f asynchronnímu motoru TM90-4S a TM71-2S.
- [8] IGOR PETROVIČ KOPYLOV A KOL. *Stavba elektrických strojů*. 1. vydání. Praha: SNTL, 1988. 688 s.
- [9] Metoda konečných prvků. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-18]. Dostupné z WWW: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda\\_kone%C4%8Dn%C3%BDch\\_prvk%C5%AF](http://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda_kone%C4%8Dn%C3%BDch_prvk%C5%AF)
- [10] 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..
- [11] MEEKER, David. Finite Element Method Magnetics: Download [online].[cit. 2012-05-18]. Program FEMM. Dostupné z WWW: < <http://www.femm.info/Archives/bin/femm42bin.exe>>.

## PŘÍLOHY

BH křivka materiálu M700-50A[5]:



Lua skripty určené pro simulaci podle literatury[10]:

### a) Motor TM90-4S:

```
-- Simulace 1 - motor TM90-4S

showconsole()                --zobrazí Lua konzoli
print("ASM: TM90-4S - simulace1")  --výpis textu do okna
open("simulace1_mot_TM90-4S.fem")  --otevření souboru pro simulaci

mi_saveas("simulace1-docasny_soubor.fem")
--uložení v dočasném souboru pro účely vykonávání analýzy

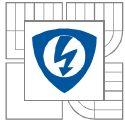
for frekvence = 0.5,5,0.5 do      --hodnoty od 0.5 do 5 po 0.5Hz
    --změna frekvence s krokem 0.5

mi_probdef(frekvence,"millimeters","planar",1e-8,78,30)

mi_analyze()                    --spuštění analýzy
mi_loadsolution()              --nahrání řešení
il,u1,tok1=mo_getcircuitproperties("faze_L1")
--the flux linkage pro fazi L1

    mo_groupselectblock(1)      --výběr rotoru
    moment=mo_blockintegral(22) --výpočet momentu
    print("Moment M=",moment,"Nm pro f=",frekvence,"Hz")
--vypsání velikosti momentu a frekvence do Lua konzole

handle=openfile("TM90-4S-vysledky.txt","a");
--zápis hodnot do souboru TM90-4S-vysledky.txt
    write(handle,frekvence," ",moment," ",il," ",u1," ",tok1,"\n")
closefile(handle)
```



```
mo_close()  
end
```

### b) Motor TM71-2S:

```
-- Simulace 2 - motor TM71-2S  
  
showconsole() --zobrazí Lua konzoli  
print("ASM: TM71-2S - simulace2") --výpis textu do Lua konzole  
open("TM71-2S-simulace2.fem") --otevrení souboru pro simulaci  
mi_saveas("simulace2-docasny_soubor.fem")  
--uložení v dočasném souboru pro účely vykonávání analýzy  
  
for frekvence = 0.5,5,0.5 do --hodnoty od 0.5 po 5 po 0.5Hz  
--změna frekvence s krokem 0.5  
  
mi_probdef(frekvence,"millimeters","planar",1e-8,45,30)  
  
mi_analyze() --spuštění analýzy  
mi_loadsolution() --nahrání řešení  
il,u1,tok1=mo_getcircuitproperties("faze_L1")  
--the flux linkage pro fazi L1  
  
mo_groupselectblock(1) --výběr rotoru  
moment=mo_blockintegral(22) --výpočet momentu  
print("Moment M=",moment,"Nm pro f=",frekvence,"Hz")  
--vypsání velikosti momentu a frekvence do Lua konzole  
  
handle=openfile("TM71-2S-vysledky.txt","a");  
--zápis hodnot do souboru TM71-2S-vysledky.txt  
write(handle,frekvence," ",moment," ",il," ",u1," ",tok1,"\n")  
closefile(handle)  
mo_close()  
end
```

### Výpočet parametrů motoru TM71-2S podle[8]:

$$2p_1 = 2 \Rightarrow p_1 = \underline{1[-]}$$

$$k_{y1} = \sin\left(\frac{y}{t_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(1 \cdot \frac{\pi}{2}\right) = \underline{1[-]}$$

$$q_1 = \frac{Q_1}{2p_1 m_1} = \frac{24}{2 \cdot 1 \cdot 3} = \underline{4[-]}$$

$$k_{r1} = \frac{0,5}{q_1 \cdot \sin \frac{30^\circ}{q_1}} = \frac{0,5}{4 \cdot \sin \frac{30^\circ}{4}} = \underline{0,958[-]}$$

$$k_{v1} = k_{y1} k_{r1} = 1 \cdot 0,958 = \underline{0,958[-]}$$

$$k_B = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = \underline{1,111[-]}$$

$$U_{1N} = \frac{U_N}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = \underline{230,94 \text{ V}}$$

Dvě dvojčívky (nebo jedna čtyřčívka) po 145 závitů zapojené do série - dokumentace k motoru TM71-2S[7].

$$N_1 = 2 \times 2 \times 145 = \underline{580 (-)} \text{ nebo } N_1 = 4 \times 145 = \underline{580 (-)}$$

$$\Phi = \frac{k_E U_{1N}}{4k_B N_1 k_{v1} f_1} = \frac{0,975 \cdot 230,94}{4 \cdot 1,111 \cdot 580 \cdot 0,958 \cdot 50} = \underline{1,824 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}}$$

Činitel  $k_E$  byl odečten z grafu v literatuře[8].

$$B_\delta = \frac{p_1 \Phi}{D l_i} = \frac{1 \cdot 1,824 \cdot 10^{-3}}{55 \cdot 10^{-3} \cdot 45 \cdot 10^{-3}} = \underline{0,737 \text{ T}}$$

$$t_{d1} = \frac{\pi D}{Q_1} = \frac{\pi \cdot 55 \cdot 10^{-3}}{24} = \underline{7,199 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

$$D_2 = D - 2\delta = 55 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} = \underline{54,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

$$t_{d2} = \frac{\pi D_2}{Q_2} = \frac{\pi \cdot 54,5 \cdot 10^{-3}}{17} = \underline{10,072 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

$$b_{z1av} = \frac{b_{z1min} + b_{z1max}}{2} = \frac{3,318 \cdot 10^{-3} + 3,34 \cdot 10^{-3}}{2} = \underline{3,329 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

$$B_{z1av} = \frac{B_\delta t_{d1} l_i}{b_{z1av} l_{Fe1} k_{Fe}} = \frac{0,737 \cdot 7,199 \cdot 10^{-3} \cdot 45 \cdot 10^{-3}}{3,329 \cdot 10^{-3} \cdot 45 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = \underline{1,643 \text{ T}}$$

Činitel plnění železa  $k_{Fe}$  [-] byl odečten z [8] - zvoleno vrstva oxidu.

$$b_{z2av} = \frac{b_{z2min} + b_{z2max}}{2} = \frac{4,524 \cdot 10^{-3} + 4,736 \cdot 10^{-3}}{2} = \underline{4,63 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

$$B_{z2av} = \frac{B_\delta t_{d2} l_i}{b_{z2av} l_{Fe2} k_{Fe}} = \frac{0,737 \cdot 10,072 \cdot 10^{-3} \cdot 45 \cdot 10^{-3}}{4,63 \cdot 10^{-3} \cdot 45 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = \underline{1,653 \text{ T}}$$

$$h_{d1} = \frac{D_e - D}{2} - h_{j1} = \frac{106,5 \cdot 10^{-3} - 55 \cdot 10^{-3}}{2} - 13,25 \cdot 10^{-3} = \underline{12,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

$$h'_{j1} = \frac{D_e - D}{2} - h_{d1} = \frac{106,5 \cdot 10^{-3} - 55 \cdot 10^{-3}}{2} - 12,5 \cdot 10^{-3} = \underline{13,25 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

$$h_{d2} = h'_0 + h_0 + \frac{b_1}{2} + h_1 + \frac{b_2}{2} [m]$$

Velikost parametru  $h_{d2}$  byla odečtena z dokumentace[7]:  $h_{d2} = \underline{10,275 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$

$$h'_{j2} = \frac{2 + p_1}{3,2 p_1} \left( \frac{D_2}{2} - h_{d2} \right) = \frac{2 + 1}{3,2 \cdot 1} \left( \frac{54,5 \cdot 10^{-3}}{2} - 10,275 \cdot 10^{-3} \right) = \underline{15,914 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

$$B_{j1} = \frac{\Phi}{2h'_{j1} l_{Fe1} k_{Fe}} = \frac{1,824 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 13,25 \cdot 10^{-3} \cdot 45 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = \underline{1,577 \text{ T}}$$



$$B_{j2} = \frac{\Phi}{2h_{j2}l_{Fe2}k_{Fe}} = \frac{1,824 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 15,914 \cdot 10^{-3} \cdot 45 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = \underline{1,313 T}$$

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{b_{01}}{\delta}\right)^2}{5 + \left(\frac{b_{01}}{\delta}\right)} = \frac{\left(\frac{2,6 \cdot 10^{-3}}{0,25 \cdot 10^{-3}}\right)^2}{5 + \left(\frac{2,6 \cdot 10^{-3}}{0,25 \cdot 10^{-3}}\right)} = \underline{7,023 [-]}$$

$$\gamma_2 = \frac{\left(\frac{b_{02}}{\delta}\right)^2}{5 + \left(\frac{b_{02}}{\delta}\right)} = \frac{\left(\frac{1,2 \cdot 10^{-3}}{0,25 \cdot 10^{-3}}\right)^2}{5 + \left(\frac{1,2 \cdot 10^{-3}}{0,25 \cdot 10^{-3}}\right)} = \underline{2,351 [-]}$$

$$k_{c1} = \frac{t_{d1}}{t_{d1} - \gamma_1 \delta} = \frac{7,199 \cdot 10^{-3}}{7,199 \cdot 10^{-3} - 7,023 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3}} = \underline{1,323 [-]}$$

$$k_{c2} = \frac{t_{d2}}{t_{d2} - \gamma_2 \delta} = \frac{10,072 \cdot 10^{-3}}{10,072 \cdot 10^{-3} - 2,351 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3}} = \underline{1,062 [-]}$$

$$k_c = k_{c1} k_{c2} = 1,323 \cdot 1,062 = \underline{1,405 [-]}$$

$$U_\delta = 1,59 \cdot 10^6 B_\delta k_c \delta = 1,59 \cdot 10^6 \cdot 0,737 \cdot 1,405 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} = \underline{411,605 A}$$

$$h_{z1} = h_{d1} = \underline{12,5 \cdot 10^{-3} m}$$

$$h_{z2} = h_{d2} - 0,1b_2 = 10,275 \cdot 10^{-3} - 0,1 \cdot 2,1 \cdot 10^{-3} = \underline{10,065 \cdot 10^{-3} m}$$

$$U_{z1} = 2h_{z1}H_{z1} = 2 \cdot 12,5 \cdot 10^{-3} \cdot 2650 = \underline{66,25 A}$$

Velikost  $H_{z1}$  je odečtena z BH křivky materiálu M700-50A[5] pro  $B_{z1av}$ .

$$U_{z2} = 2h_{z2}H_{z2} = 2 \cdot 10,065 \cdot 10^{-3} \cdot 2900 = \underline{58,377 A}$$

Velikost  $H_{z2}$  je odečtena z BH křivky materiálu M700-50A[5] pro  $B_{z2av}$ .

$$k_z = 1 + \frac{U_{z1} + U_{z2}}{U_\delta} = 1 + \frac{66,25 + 58,377}{411,605} = \underline{1,303 [-]}$$

Vnitřní průměr rotorového svazku:  $D_i = D_h = \underline{18 \cdot 10^{-3} m}$

$$h_{j2} = \frac{D_2 - D_i}{2} - h_{d2} = \frac{54,5 \cdot 10^{-3} - 18 \cdot 10^{-3}}{2} - 10,275 \cdot 10^{-3} = \underline{7,975 \cdot 10^{-3} m}$$

$$l_{j1} = \frac{\pi(D_e - h_{j1})}{2p_1} = \frac{\pi(106,5 \cdot 10^{-3} - 13,25 \cdot 10^{-3})}{2 \cdot 1} = \underline{146,477 \cdot 10^{-3} m}$$

$$l_{j2} = \frac{\pi(D_h + h_{j2})}{2p_1} = \frac{\pi(18 \cdot 10^{-3} + 7,975 \cdot 10^{-3})}{2 \cdot 1} = \underline{40,801 \cdot 10^{-3} m}$$

$$U_{j1} = l_{j1}H_{j1} = 146,477 \cdot 10^{-3} \cdot 1415 = \underline{207,265 A}$$

Velikost  $H_{j1}$  je odečtena z BH křivky materiálu M700-50A[5] pro  $B_{j1}$ .

$$U_{j2} = l_{j2} H_{j2} = 40,801 \cdot 10^{-3} \cdot 265 = \underline{10,812 \text{ A}}$$

Velikost  $H_{j2}$  je odečtena z BH křivky materiálu M700-50A[5] pro  $B_{j2}$ .

$$F_m = U_\delta + U_{z1} + U_{z2} + U_{j1} + U_{j2} \text{ [A]}$$

$$F_m = 411,605 + 66,25 + 58,377 + 207,265 + 10,812 = \underline{754,309 \text{ A}}$$

$$k_\mu = \frac{F_m}{U_\delta} = \frac{754,309}{411,605} = \underline{1,833 [-]}$$

$$I_\mu = \frac{p_1 F_m}{0,9 m_1 N_1 k_{v1}} = \frac{1 \cdot 754,309}{0,9 \cdot 3 \cdot 580 \cdot 0,958} = \underline{\underline{0,503 \text{ A}}}$$

$$S_1 = \pi \left( \frac{d_1}{2} \right)^2 = \pi \left( \frac{0,425 \cdot 10^{-3}}{2} \right)^2 = \underline{1,419 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2}$$

Vnitřní čtyřcívka:

$$l_{vni\_A1} = 2 \cdot (l_{d1\_vni} + l_{\epsilon1\_vni}) \text{ [m]}$$

$$l_{vni\_A1} = 2 \cdot \left( 140 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 32,5 \cdot 10^{-3} + \frac{\pi \cdot 2 \cdot 32,5 \cdot 10^{-3}}{2} \right) = \underline{354,204 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

$$l_{vni\_A2} = 2 \cdot (l_{d2\_vni} + l_{\epsilon2\_vni}) \text{ [m]}$$

$$l_{vni\_A2} = 2 \cdot \left( 124 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 25 \cdot 10^{-3} + \frac{\pi \cdot 2 \cdot 25 \cdot 10^{-3}}{2} \right) = \underline{305,08 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

$$l_{vni\_celk\_4} = 2 \cdot (145 \cdot l_{vni\_A1} + 145 \cdot l_{vni\_A2}) \text{ [m]}$$

$$l_{vni\_celk\_4} = 2 \cdot (145 \cdot 354,204 \cdot 10^{-3} + 145 \cdot 305,08 \cdot 10^{-3}) = \underline{191,192 \text{ m}}$$

Vnější čtyřcívka:

$$l_{vne\_A1} = 2(l_{d1\_vne} + l_{\epsilon1\_vne}) \text{ [m]}$$

$$l_{vne\_A1} = 2 \cdot \left( 145 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 32,5 \cdot 10^{-3} + \frac{\pi \cdot 2 \cdot 32,5 \cdot 10^{-3}}{2} \right) = \underline{364,204 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

$$l_{vne\_A2} = 2(l_{d2\_vne} + l_{\epsilon2\_vne}) \text{ [m]}$$

$$l_{vne\_A2} = 2 \cdot \left( 129 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 25 \cdot 10^{-3} + \frac{\pi \cdot 2 \cdot 25 \cdot 10^{-3}}{2} \right) = \underline{315,08 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

$$l_{vne\_celk\_4} = 2 \cdot (145 \cdot l_{vne\_A1} + 145 \cdot l_{vne\_A2}) \text{ [m]}$$

$$l_{vne\_celk\_4} = 2 \cdot (145 \cdot 364,204 \cdot 10^{-3} + 145 \cdot 315,08 \cdot 10^{-3}) = \underline{196,992 \text{ m}}$$

Odpor vinutí statoru  $R_{1\_vni\_4}$  pro vnitřní čtyřcívku:

$$R_{1\_vni\_4} = k_{\sim} \rho_{\vartheta} \frac{l_{vni\_celk\_4}}{S_1 \cdot a} = 1 \cdot \frac{1}{47} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{191,192}{1,419 \cdot 10^{-7} \cdot 1} = \underline{28,667 \Omega}$$

Odpor vinutí statoru  $R_{1\_vne\_4}$  pro vnější čtyřcívku:

$$R_{1\_vne\_4} = k_{\sim} \rho_{\vartheta} \frac{l_{vne\_celk\_4}}{S_1 \cdot a} = 1 \cdot \frac{1}{47} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{196,992}{1,419 \cdot 10^{-7} \cdot 1} = \underline{29,537 \Omega}$$

Aritmetický průměr odporů statorů:

$$R_{1\_arit} = \frac{R_{1\_vni\_4} + R_{1\_vne\_4}}{2} = \frac{28,667 + 29,537}{2} = \underline{29,102 \Omega}$$

Ve vzorcích je zohledněno zapojení vnitřních a vnějších cívek jedné fáze statoru do série.

$$S_t = 30 \text{ mm}^2 - \text{odečteno z dokumentace k TM71-2S[7]}$$

$$R_t = \rho_t \frac{l_t}{S_t} k_{\sim} = \frac{1}{21,5} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{45 \cdot 10^{-3}}{30 \cdot 10^{-6}} \cdot 1 = \underline{6,977 \cdot 10^{-5} \Omega}$$

$$S_{kn} = a_{kn} b_{kn} = 12 \cdot 10^{-3} \cdot 13 \cdot 10^{-3} = \underline{1,56 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2}$$

$$D_{kn} \approx D_2 - a_{kn} = 54,5 \cdot 10^{-3} - 12 \cdot 10^{-3} = \underline{42,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

$$R_{kn} = \rho_{kn} \frac{\pi D_{kn}}{Q_2 S_{kn}} = \frac{1}{21,5} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\pi \cdot 42,5 \cdot 10^{-3}}{17 \cdot 1,56 \cdot 10^{-4}} = \underline{2,342 \cdot 10^{-6} \Omega}$$

$$\Delta = 2 \sin \frac{\pi p_1}{Q_2} = 2 \sin \frac{\pi \cdot 1}{17} = \underline{0,367 [-]}$$

$$R_2 = R_t + \frac{2R_{kn}}{\left(2 \sin \frac{\pi p_1}{Q_2}\right)^2} = 6,977 \cdot 10^{-5} + \frac{2 \cdot 2,342 \cdot 10^{-6}}{\left(2 \sin \frac{\pi \cdot 1}{17}\right)^2} = \underline{1,045 \cdot 10^{-4} \Omega}$$

$$p_z = \frac{4m_1 (N_1 k_{v1})^2}{Q_2} = \frac{4 \cdot 3 \cdot (580 \cdot 0,958)^2}{17} = \underline{217931,16 [-]}$$

$$R_2' = R_2 p_z = 1,045 \cdot 10^{-4} \cdot 217931,16 = \underline{22,774 \Omega}$$

Zvolena drážka - typ e)[8].

$$\lambda_{d1} = \frac{h_3}{3b} k_{\beta} + \left(0,785 - \frac{b_0}{2b} + \frac{h_2}{b} + \frac{h_0}{b_0}\right) k_{\beta}' [-]$$

$$\lambda_{d1} = \frac{9,193}{3 \cdot 4,502} \cdot 1 + \left(0,785 - \frac{2,6}{2 \cdot 4,502} + \frac{0,5}{4,502} + \frac{0,74}{2,6}\right) \cdot 1 = \underline{1,573 [-]}$$

Nezkrácený krok:  $\beta = 1 (-)$

$$l_i' = l_i = \underline{45 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

$$l_{\varepsilon} = \frac{\frac{2\pi r_{A1}}{2} + \frac{2\pi r_{A2}}{2}}{2} = \frac{\frac{2\pi \cdot 32,5 \cdot 10^{-3}}{2} + \frac{2\pi \cdot 25 \cdot 10^{-3}}{2}}{2} = \underline{90,321 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

$$\lambda_{\varepsilon 1} = 0,34 \frac{q_1}{l_i} (l_{\varepsilon} - 0,64 \beta t_p) = 0,34 \cdot \frac{4}{45 \cdot 10^{-3}} \cdot (90,321 \cdot 10^{-3} - 0,64 \cdot 1 \cdot 86,394 \cdot 10^{-3}) = \underline{1,059 [-]}$$

Při výpočtu se uvažuje aritmetický průměr délek čel cívek  $l_{\varepsilon}$  [m].

$$\beta_{\gamma} = \frac{b_{\gamma}}{t_{d2}} = \frac{13 \cdot 10^{-3}}{10,072 \cdot 10^{-3}} = \underline{1,291 [-]}$$

$$\xi_1 = 2k'_{\gamma} k_{\beta} - k_{v1}^2 \left( \frac{t_{d2}}{t_{d1}} \right)^2 (1 + \beta_{\gamma}^2) = 2 \cdot 3,1 \cdot 1 - 0,958^2 \left( \frac{10,072 \cdot 10^{-3}}{7,199 \cdot 10^{-3}} \right)^2 (1 + 1,291^2) = \underline{1,409 [-]}$$

Činitel  $k'_{\gamma}$  byl odečten z[8] -  $k'_{\gamma} = 3,1 [-]$ .

$$\frac{t_{d2}}{t_{d1}} = \frac{10,072 \cdot 10^{-3}}{7,199 \cdot 10^{-3}} = \underline{1,399 [-]}$$

$$\lambda_{dif1} = \frac{t_{d1}}{12\delta k_c} \xi_1 = \frac{7,199 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot 1,405} \cdot 1,409 = \underline{2,406 [-]}$$

$$X_{1\sigma} = 15,8 \frac{f_1}{100} \left( \frac{N_1}{100} \right)^2 \frac{l'_2}{p_1 q_1} (\lambda_{d1} + \lambda_{\varepsilon 1} + \lambda_{dif1}) [\Omega]$$

$$X_{1\sigma} = 15,8 \frac{50}{100} \left( \frac{580}{100} \right)^2 \frac{45 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 4} \cdot (1,573 + 1,059 + 2,406) = \underline{15,062 \Omega}$$

Zvolen byl typ drážky: a)[8].

$$\lambda_{d2} = \left[ \frac{h_1}{3b} \left( 1 - \frac{\pi b^2}{8S_t} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_0}{2b} \right] k_d + \frac{h_0}{b_0} [-]$$

$$\lambda_{d2} = \left[ \frac{7,457 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 4,32 \cdot 10^{-3}} \left( 1 - \frac{\pi (4,32 \cdot 10^{-3})^2}{8 \cdot 30 \cdot 10^{-6}} \right)^2 + 0,66 - \frac{1,2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 4,32 \cdot 10^{-3}} \right] \cdot 1 + \frac{0,64 \cdot 10^{-3}}{1,2 \cdot 10^{-3}} = \underline{1,383 [-]}$$

$$\lambda_{\varepsilon 2} = \frac{2,3D_{kn}}{Q_2 l_i \Delta^2} \log \frac{4,7D_{kn}}{2a_{kn} + b_{kn}} = \frac{2,3 \cdot 42,5 \cdot 10^{-3}}{17 \cdot 45 \cdot 10^{-3} \cdot 0,367^2} \log \frac{4,7 \cdot 42,5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 12 \cdot 10^{-3} + 13 \cdot 10^{-3}} = \underline{0,695 [-]}$$

$$\frac{b_{02}}{\delta} = \frac{1,2 \cdot 10^{-3}}{0,25 \cdot 10^{-3}} = \underline{4,8 [-]}$$

$$\frac{b_{02}}{t_{d2}} = \frac{1,2 \cdot 10^{-3}}{10,072 \cdot 10^{-3}} = \underline{0,119 [-]}$$

$$\xi_2 = 1 + \frac{1}{5} \left( \frac{\pi p_1}{Q_2} \right)^2 - \frac{\Delta_z}{1 - \left( \frac{p_1}{Q_2} \right)^2} = 1 + \frac{1}{5} \left( \frac{\pi \cdot 1}{17} \right)^2 - \frac{0,04}{1 - \left( \frac{1}{17} \right)^2} = \underline{0,967 [-]}$$

Činitel  $\Delta_z$  byl odečten jako 0,04 (-)[8].

$$\lambda_{dif2} = \frac{t_{d2}}{12\delta k_c} \xi_2 = \frac{10,072 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot 1,405} \cdot 0,967 = \underline{2,311 [-]}$$

$$X_{2\sigma} = 7,9 f_1 l_i' (\lambda_{d2} + \lambda_{e2} + \lambda_{dif2}) \cdot 10^{-6} = 7,9 \cdot 50 \cdot 45 \cdot 10^{-3} \cdot (1,383 + 0,695 + 2,311) \cdot 10^{-6} = \underline{7,801 \cdot 10^{-5} \Omega}$$

$$X'_{2\sigma} = X_{2\sigma} p_z = 7,801 \cdot 10^{-5} \cdot 217931,16 = \underline{17,001 \Omega}$$

$$\sigma_\gamma \approx 1 + 0,41 \left( \frac{b_\gamma}{t_p} \right)^2 \frac{U_{1N}}{X_{1\sigma} I_\mu} = 1 + 0,41 \left( \frac{13 \cdot 10^{-3}}{86,394 \cdot 10^{-3}} \right)^2 \frac{230,94}{15,062 \cdot 0,503} = \underline{1,283 [-]}$$

$$X_{1\sigma\gamma} = X_{1\sigma} \sigma_\gamma = 15,062 \cdot 1,283 = \underline{19,325 \Omega}$$

$$X'_{2\sigma\gamma} = X'_{2\sigma} \sigma_\gamma = 17,001 \cdot 1,283 = \underline{21,812 \Omega}$$

$$m_{j1} = \pi(D_e - h_{j1}) h_{j1} l_{Fe1} k_{Fe} \gamma_{Fe} [kg]$$

$$m_{j1} = \pi(106,5 \cdot 10^{-3} - 13,25 \cdot 10^{-3}) \cdot 13,25 \cdot 10^{-3} \cdot 45 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = \underline{1,322 kg}$$

$\gamma_{Fe}$  ... hustota oceli ( $\gamma_{Fe} = 7,8 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$ )

$$m_{z1} \cong h_{z1} b_{z1av} Q_1 l_{Fe1} k_{Fe} \gamma_{Fe} [kg]$$

$$m_{z1} \cong h_{z1} b_{z1av} Q_1 l_{Fe1} k_{Fe} \gamma_{Fe} = 12,5 \cdot 10^{-3} \cdot 3,329 \cdot 10^{-3} \cdot 24 \cdot 45 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = \underline{0,34 kg}$$

$$m_{z2} = h_{z2} b_{z2av} Q_2 l_{Fe2} k_{Fe} \gamma_{Fe} = 10,065 \cdot 10^{-3} \cdot 4,63 \cdot 10^{-3} \cdot 17 \cdot 45 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = \underline{0,27 kg}$$

$$\Delta P_{Feh} = \Delta p_{1,0} \left( \frac{f_1}{50} \right)^\beta (k_{dj} B_{j1}^2 m_{j1} + k_{dz} B_{z1av}^2 m_{z1}) [W]$$

$$\Delta P_{Feh} = 2,57 \cdot \left( \frac{50}{50} \right)^\beta (1,6 \cdot 1,577^2 \cdot 1,322 + 1,8 \cdot 1,643^2 \cdot 0,34) = \underline{17,765 W}$$

Měrné ztráty v železe  $\Delta p_{1,0}$  jsou  $2,57 \text{ W.kg}^{-1}$  pro materiál M700-50A[5].

$$\frac{b_{01}}{\delta} = \frac{2,6 \cdot 10^{-3}}{0,25 \cdot 10^{-3}} = \underline{10,4 [-]}$$

$$\frac{b_{02}}{\delta} = \frac{1,2 \cdot 10^{-3}}{0,25 \cdot 10^{-3}} = \underline{4,8 [-]}$$

Činitelé  $\beta_{01}$  a  $\beta_{02}$ :

$$\beta_{01} = f \left( \frac{b_{02}}{\delta} \right) [-]$$

$\beta_{01} = 0,3 [-]$  - odečteno z grafu[8]

$$\beta_{02} = f \left( \frac{b_{01}}{\delta} \right) [-]$$

$\beta_{02} = 0,41 [-]$  - odečteno z grafu[8]

$$B_{01} = \beta_{01} k_c B_\delta = 0,3 \cdot 1,405 \cdot 0,737 = \underline{0,311 T}$$

$$B_{02} = \beta_{02} k_c B_\delta = 0,41 \cdot 1,405 \cdot 0,737 = \underline{0,425 T}$$

$$p_{\delta p1} = 0,5 k_{01} \left( \frac{Q_2 n}{10000} \right)^{1,5} (B_{01} t_{d2} 10^3)^2 [W \cdot m^{-2}]$$

$$p_{\delta p1} = 0,5 \cdot 1,4 \left( \frac{17 \cdot 3000}{10000} \right)^{1,5} (0,311 \cdot 10,072 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3)^2 = \underline{79,105 W \cdot m^{-2}}$$

$$p_{\delta p2} = 0,5 k_{02} \left( \frac{Q_1 n}{10000} \right)^{1,5} (B_{02} t_{d1} 10^3)^2 [W \cdot m^{-2}]$$

$$p_{\delta p2} = 0,5 \cdot 1,5 \left( \frac{24 \cdot 3000}{10000} \right)^{1,5} (0,425 \cdot 7,199 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3)^2 = \underline{135,638 W \cdot m^{-2}}$$

$k_{01}, k_{02} \dots$  činitele respektující vliv opracování povrchu hlav zubů statoru a rotoru [-][8]  
 $n \dots$  otáčky rotoru [ $\text{min}^{-1}$ ] - zvoleno synchronní - (2-pól:  $n_s = 3000 \text{ min}^{-1}$ )[8]

Celkové povrchové ztráty ve statoru a rotoru  $\Delta P_{\delta p1}$  a  $\Delta P_{\delta p2}$ :

$$\Delta P_{\delta p1} = p_{\delta p1} (t_{d1} - b_{01}) Q_1 l_{Fe1} = 79,105 \cdot (7,199 \cdot 10^{-3} - 2,6 \cdot 10^{-3}) \cdot 24 \cdot 45 \cdot 10^{-3} = \underline{0,393 W}$$

$$\Delta P_{\delta p2} = p_{\delta p2} (t_{d2} - b_{02}) Q_2 l_{Fe2} = 135,638 \cdot (10,072 \cdot 10^{-3} - 1,2 \cdot 10^{-3}) \cdot 17 \cdot 45 \cdot 10^{-3} = \underline{0,921 W}$$

Náhradní otevření  $b'_{01}$  a  $b'_{02}$  se neuvažuje.

Koeficienty pro výpočet Carterova činitele  $\gamma'_1 = \gamma_1$  a  $\gamma'_2 = \gamma_2$ :

$$B_{p1} \approx \frac{\gamma'_2 \delta}{2t_{d1}} B_{z1av} = \frac{2,351 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 7,199 \cdot 10^{-3}} \cdot 1,643 = \underline{0,067 T}$$

$$B_{p2} \approx \frac{\gamma'_1 \delta}{2t_{d2}} B_{z2av} = \frac{7,023 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10,072 \cdot 10^{-3}} \cdot 1,653 = \underline{0,144 T}$$

$$\Delta P_{p1} \approx 0,11 \left( \frac{Q_2 n}{1000} B_{p1} \right)^2 m_{z1} = 0,11 \left( \frac{17 \cdot 3000}{1000} \cdot 0,067 \right)^2 \cdot 0,34 = \underline{0,437 W}$$

$$\Delta P_{p2} \approx 0,11 \left( \frac{Q_1 n}{1000} B_{p2} \right)^2 m_{z2} = 0,11 \left( \frac{24 \cdot 3000}{1000} \cdot 0,144 \right)^2 \cdot 0,27 = \underline{3,193 W}$$

$$\Delta P_{Fed} = \Delta P_{\delta p1} + \Delta P_{\delta p2} + \Delta P_{p1} + \Delta P_{p2} = 0,393 + 0,921 + 0,437 + 3,193 = \underline{4,944 W}$$

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Feh} + \Delta P_{Fed} = 17,765 + 4,944 = \underline{22,709 W}$$

$$K_T = 1,3(1 - D_e) = 1,3(1 - 106,5 \cdot 10^{-3}) = \underline{1,162 [-]}$$

$$\Delta P_{mech} = K_T \left( \frac{n}{10} \right)^2 D_e^4 = 1,162 \left( \frac{3000}{10} \right)^2 (106,5 \cdot 10^{-3})^4 = \underline{13,454 W}$$

$$\Delta P_{j0} \approx m_1 R_1 I_\mu^2 = 3 \cdot 29,102 \cdot 0,503^2 = \underline{22,089 W}$$

$$I_{0j} \approx I_\mu = \underline{0,503 A}$$

$$I_{0\check{c}} = \frac{\Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{j0}}{m_1 U_{1N}} = \frac{22,709 + 13,454 + 22,089}{3 \cdot 230,94} = \underline{0,126 \text{ A}}$$

$$I_{0\check{c}} = I_{Fe} = \underline{0,126 \text{ A}}$$

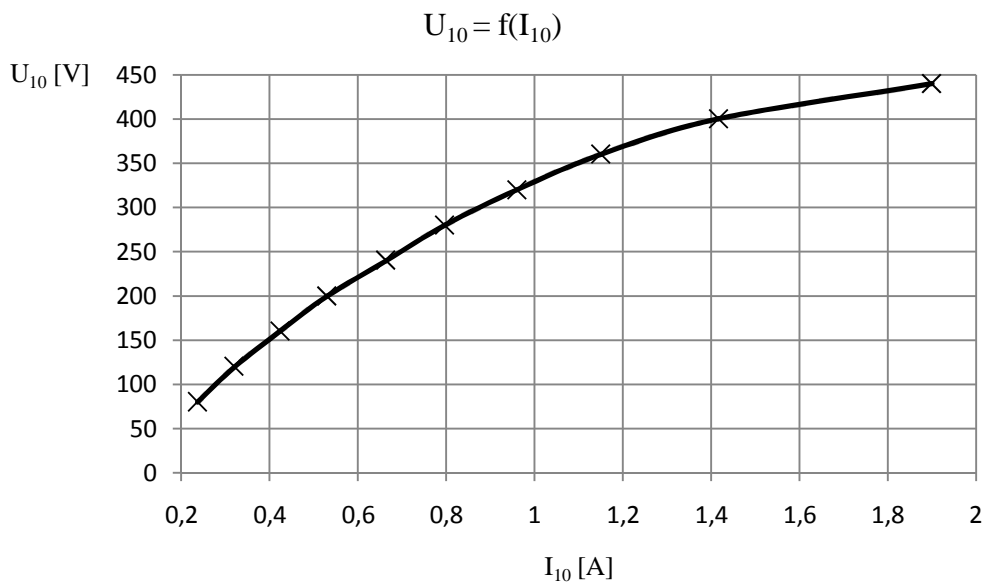
$$I_0 = \sqrt{I_{0\check{c}}^2 + I_{0j}^2} = \sqrt{0,126^2 + 0,503^2} = \underline{0,519 \text{ A}}$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{I_{0\check{c}}}{I_0} = \frac{0,126}{0,519} = \underline{0,243 [-]}$$

Grafické závislosti z měření naprázdno a nakrátko motoru TM90-4S a TM71-2S:

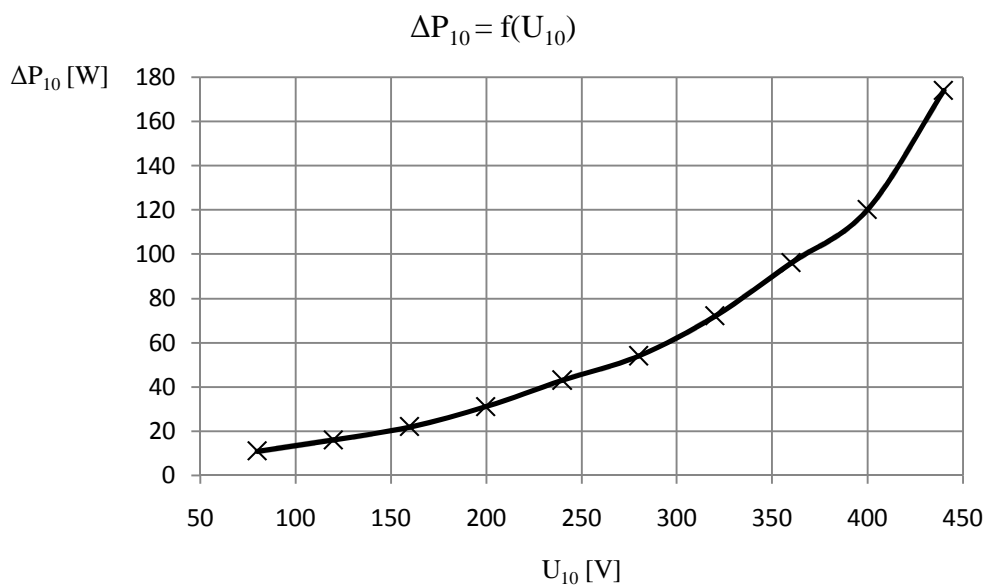
1) Motor TM90-4S:

a) Grafická závislost  $U_{10}=f(I_{10})$



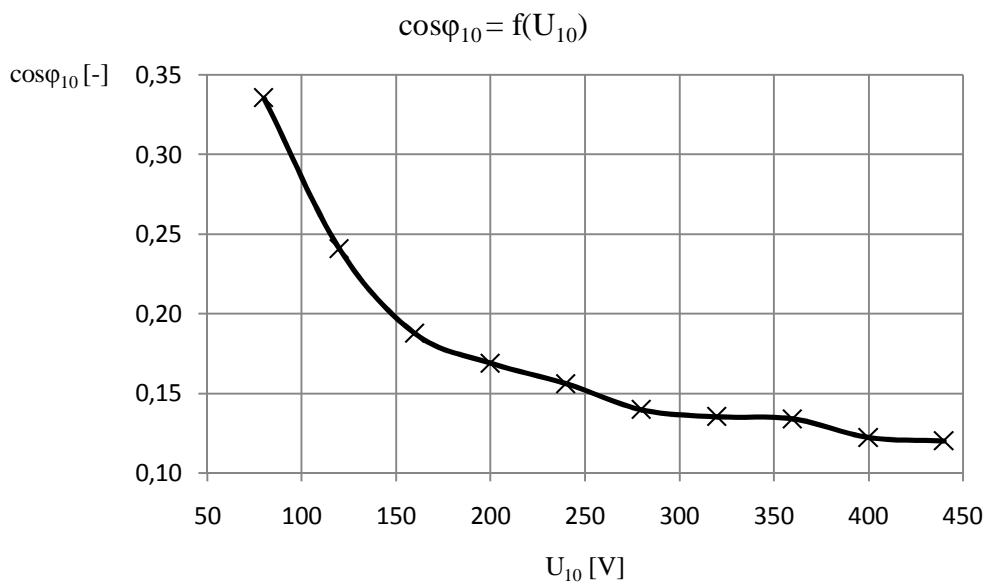
Obr. č. 12: Měření naprázdno - TM90-4S - graf a)

b) Grafická závislost  $\Delta P_{10}=f(U_{10})$



Obr. č. 13: Měření naprázdno - TM90-4S - graf b)

c) Grafická závislost  $\cos\varphi_{10}=f(U_{10})$

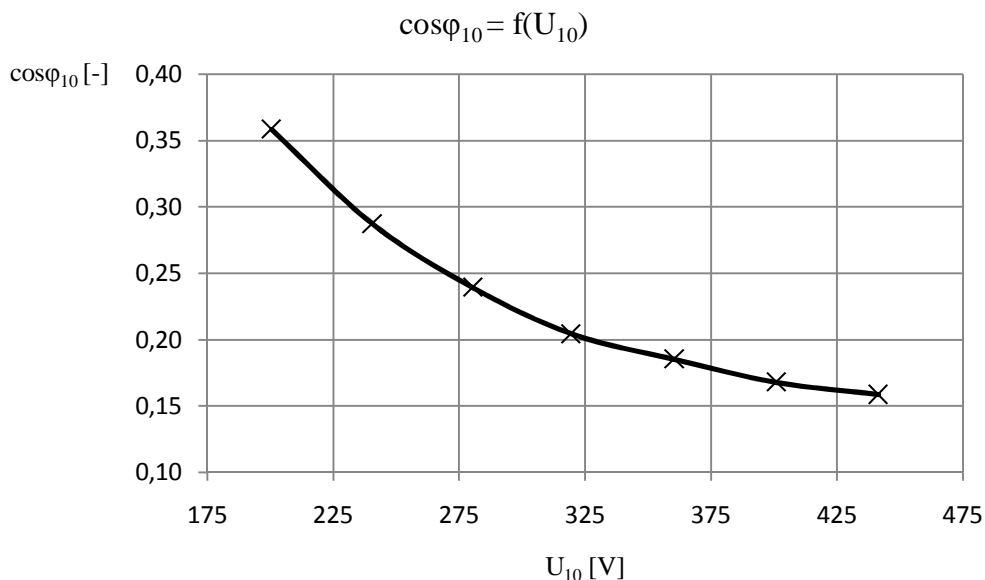


Obr. č. 14: Měření naprázdno - TM90-4S - graf c)



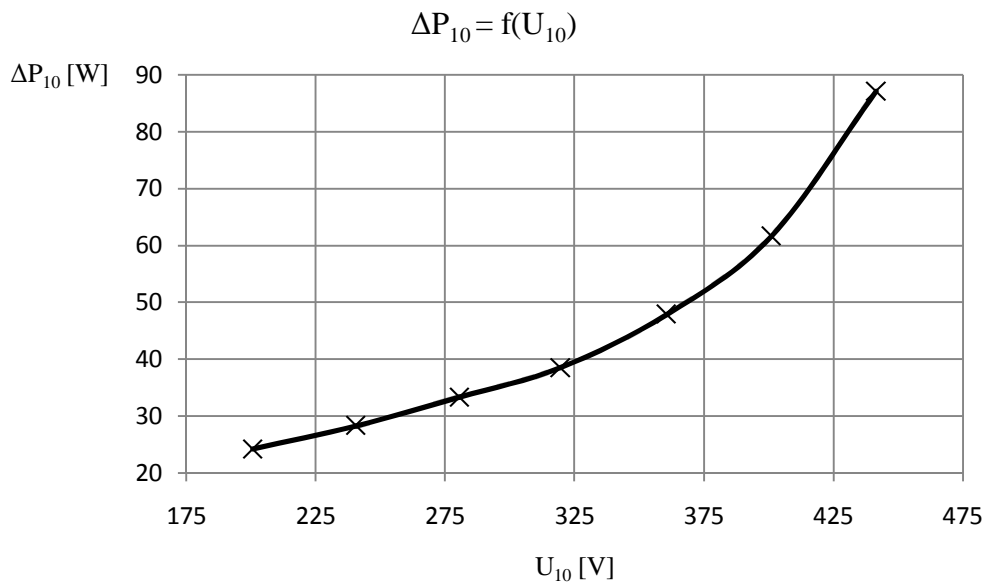
2) Motor TM71-2S:

a) Grafická závislost  $\cos\varphi_{10}=f(U_{10})$



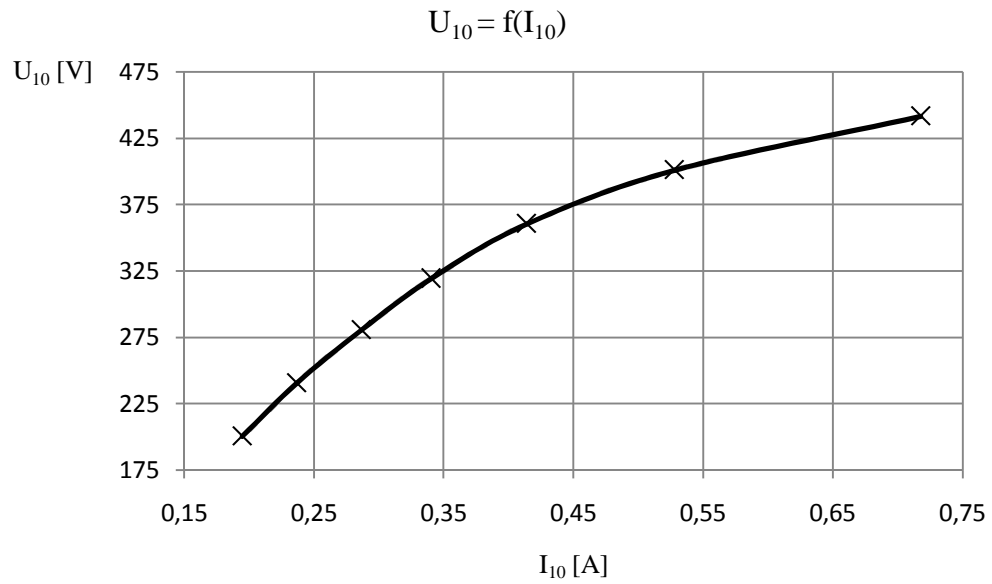
Obr. č. 15: Měření naprázdno - TM71-2S - graf d)

b) Grafická závislost  $\Delta P_{10}=f(U_{10})$



Obr. č. 16: Měření naprázdno - TM71-2S - graf e)

c) Grafická závislost  $U_{10}=f(I_{10})$



Obr. č. 17: Měření naprázdno - TM71-2S - graf f)