



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

## VLIV DÉLKY MAGNETICKÉHO OBVODU NA ÚČINNOST MALÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU

IMPACT OF CORE LENGTH ON EFFICIENCY OF A SMALL INDUCTION MACHINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Antonín Žalkovský

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. Martin Mach, Ph.D.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
TECHNICKÉ A KOMUNIKAČNÍCH  
V BRNĚ TECHNOLOGIÍ

## Bakalářská práce

studijní obor  
Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student:

Ročník: 0

ID: 0

Akademický rok: 2016/17

NAZEV TÉMATU:

Studium eroze kontaktů spínacích přístrojů za reálných podmínek

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popište problematiku eroze kontaktů během spínacího pochodu.
2. Na připraveném modelu kontaktního systému proveďte pokusy za reálných podmínek.
3. Získané výsledky přehledně vyhodnoťte a analyzujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Havelka, O. a kol.: Elektrické přístroje, SNTL, 1985
- [2] Havelka, O. a kol.: Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů, VUT v Brně, 1995
- [3] Slade P.G.: Electrical Contacts: Principles and Applications, 2. ed (2014), ISBN 978-1439881304

Termín zadání:

Termín odevzdání:

Vedoucí práce: Ing. Jiří Valenta, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce:

, předseda oborové rady

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do ožích 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**

Bakalářská práce se zabývá problematikou návrhu malého asynchronního motoru a analýzou vlivu změny délky magnetického obvodu na jeho účinnost. V teoretické části jsou popsány konstrukční prvky motoru a samotný princip práce motoru. Praktická část je zaměřena na výpočet prvků náhradního obvodu zadaného asynchronního motoru pro daný rozsah délek magnetického obvodu a počet vodičů v drážce statoru. Následuje výpočet momentové a proudové charakteristiky, výpočet ztrát ve všech částech motoru a nakonec jeho účinnosti. Další částí práce je měření na původním a prodlouženém motoru. Poslední fází je rozbor a porovnání jednotlivých výsledků.

## **Klíčová slova**

Asynchronní motor; ztráty; účinnost; momentová charakteristika; analýza asynchronního motoru

## **Abstract**

The bachelor's thesis deals with design issues of small induction machine, analyze the effects of changing length of the magnetic circuit on its efficiency. The theoretical part describes structural components of induction motor and working principle. The practical part focus on calculation of equivalent model of assigned induction machine for determined range of magnetic circuit lengths and the number of conductors in the stator groove. Follows calculations of torque characteristic and current characteristic, calculation of losses in all parts of induction machine and determine the efficiency. Another part of thesis is aim at measurement of original induction motor and motor with lengthened magnetic circuit. The last part is focused on analysis and comparing the calculated values.

## **Keywords**

Induction motor; losses; efficiency; torque characteristics; analysis of induction machine

## **Bibliografická citace:**

ŽALCOVSKÝ, A. *Vliv délky magnetického obvodu na účinnost malého asynchronního motoru.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 66s. Vedoucí bakalářské práce: Ing. Martin Mach, Ph.D.

# Prohlášení

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma *Vliv délky magnetického obvodu na účinnost malého asynchronního motoru* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne ..... Podpis autora .....

# Poděkování

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

V Brně dne ..... Podpis autora .....

# OBSAH

<b>1 ÚVOD</b> .....	<b>13</b>
<b>2 ASYNCHRONNÍ MOTOR</b> .....	<b>14</b>
<b>2.1 KONSTRUKCE ASYNCHRONNÍHO MOTORU</b> .....	<b>14</b>
<b>2.2 VINUTÍ</b> .....	<b>15</b>
2.2.1 STATOROVÉ VINUTÍ.....	15
2.2.2 ROTOROVÉ VINUTÍ .....	15
<b>2.3 MAGNETICKÝ OBVOD</b> .....	<b>16</b>
<b>2.4 PRINCIP ČINNOSTI</b> .....	<b>17</b>
<b>2.5 NÁHRADNÍ OBVOD</b> .....	<b>19</b>
<b>2.6 TOČIVÝ MOMENT</b> .....	<b>20</b>
2.6.1 MOMENTOVÁ CHARAKTERISTIKA .....	21
<b>2.7 ZTRÁTY</b> .....	<b>22</b>
2.7.1 ZTRÁTY V MAGNETICKÉM OBVODU .....	23
2.7.2 ZTRÁTY VE VINUTÍ .....	25
2.7.3 MECHANICKÉ A DODATEČNÉ ZTRÁTY .....	25
<b>3 ANALYTICKÝ VÝPOČET MOTORU</b> .....	<b>26</b>
<b>3.1 VÝPOČET MAGNETICKÉHO OBVODU</b> .....	<b>28</b>
<b>3.2 VÝPOČET PRVKŮ NÁHRADNÍHO OBVODU</b> .....	<b>32</b>
3.2.1 VÝPOČET ODPORU FÁZE STATOROVÉHO VINUTÍ .....	32
3.2.2 VÝPOČET ODPORU FÁZE ROTOROVÉHO VINUTÍ .....	34
3.2.3 VÝPOČET ROZPTYLOVÉ REAKTANCE FÁZE STATOROVÉHO VINUTÍ.....	35
3.2.4 VÝPOČET ROZPTYLOVÉ REAKTANCE FÁZE ROTOROVÉHO VINUTÍ .....	36
3.2.5 VÝPOČET PŘÍČNÉ VĚTVY NÁHRADNÍHO OBVODU .....	37
<b>3.3 VÝPOČET PROUDOVÉ CHARAKTERISTIKY</b> .....	<b>38</b>
<b>3.4 VÝPOČET MOMENTOVÉ CHARAKTERISTIKY</b> .....	<b>39</b>
<b>3.5 VÝPOČET ZTRÁT A ÚČINNOSTI</b> .....	<b>40</b>
<b>4 ANALÝZA PRODLOUŽENÉHO MAGNETICKÉHO OBVODU</b> .....	<b>41</b>
<b>4.1 VÝPOČET UPRAVENÉHO MOTORU</b> .....	<b>42</b>
<b>5 VÝPOČET V PROSTŘEDÍ MAXWELL RMXprt</b> .....	<b>44</b>
<b>6 MĚŘENÍ ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ</b> .....	<b>45</b>
<b>6.1 ZKOUŠKA PŘI JMENOVITÉM ZATÍŽENÍ</b> .....	<b>45</b>
<b>6.2 ZKOUŠKA KŘIVKY ZATÍŽENÍ</b> .....	<b>46</b>
<b>6.3 ZKOUŠKA NAPRÁZDNO</b> .....	<b>47</b>
<b>6.4 VÝSLEDKY MĚŘENÍ DLE NORMY [21]</b> .....	<b>51</b>
<b>7 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ</b> .....	<b>54</b>
<b>7.1 JMENOVITÝ BOD</b> .....	<b>54</b>
<b>7.2 CHARAKTERISTIKY MOTORŮ</b> .....	<b>55</b>
<b>7.3 MAPA ÚČINNOSTÍ A VÝKONŮ</b> .....	<b>60</b>

---

<b>8 ZÁVĚR .....</b>	<b>63</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>65</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2.1: Konstrukce asynchronního motoru (převzato z [5]).....</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 2.2: Klecové vinutí kotvy nakrátko (převzato z [10]).....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 2.3: Indukovaný proud v tyčích rotoru (převzato z [16]) .....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 2.4: Náhradní obvod jedné fáze asynchronního motoru (převzato z [3]).....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 2.5: Momentová charakteristika asynchronního motoru (převzato z [3]) .....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 2.6: Tok výkonu asynchronního motoru [3].....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 2.7: B-H křivka (převzato z [22]) .....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3.1: Drážka statoru .....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 3.2: Drážka rotoru .....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 3.3: Blokové schéma postupu návrhu asynchronního motoru.....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 3.4: Magnetizační křivka materiálu M700-50A (hodnoty převzaty z [19]) .....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 3.5: Rozměry kruhů nakrátko (převzato z [18]) .....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 3.6: Statorová drážka pro výpočet činitele mag. vodivosti drážky (převzato z [7]).....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 4.1: Ukázka výpočtu motoru .....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 4.2: Funkce nahrazující magnetizační charakteristiku .....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 5.1: Ukázka prostředí RMxprt .....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 6.1: Určení mechanických ztrát motoru 1 .....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 6.2: Určení mechanických ztrát motoru 2 .....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 6.3: Určení ztrát v železe motoru 1 .....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 6.4: Určení ztrát v železe motoru 2 .....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 6.5: Porovnání pracovní oblasti momentových charakteristik obou motorů .....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 6.6: Porovnání pracovní oblasti proudových charakteristik obou motorů.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 6.7: Porovnání účinníků v závislosti na skluzu obou motorů.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 7.1: Srovnání momentových charakteristik motoru 1 .....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 7.2: Srovnání momentových charakteristik motoru 2 .....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 7.3: Momentové charakteristiky určené analytickým výpočtem.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 7.4: Srovnání proudových charakteristik motoru 1 .....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 7.5: Srovnání proudových charakteristik motoru 2 .....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 7.6: Proudové charakteristiky určené analytickým výpočtem.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 7.7: Srovnání účinníku motoru 1 .....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 7.8: Srovnání účinníku motoru 2.....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 7.9: Účinník určený analytickým výpočtem .....</i>	<i>60</i>



---

<i>Obr. 7.10: Mapa účinností z analytického výpočtu.....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 7.11: Mapa výkonů z analytického výpočtu.....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 7.12: Mapa účinností z hodnot programu RMxpřt.....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 7.13: Mapa výkonů z hodnot programu RMxpřt .....</i>	<i>62</i>

## SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 3.1: Štítkové hodnoty analyzovaného motoru.....</i>	<i>26</i>
<i>Tab. 3.2: Parametry motoru pro výpočet .....</i>	<i>26</i>
<i>Tab. 6.1: Měřené motory .....</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 6.2: Odpory vinutí při teplotě okolí.....</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 6.3: Změřené hodnoty při jmenovitém zatížení.....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 6.4: Odpory vinutí ve jmenovitém bodě .....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 6.5: Změřené hodnoty křivky zatížení motoru 1 .....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 6.6: Změřené hodnoty křivky zatížení motoru 2 .....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 6.7: Změřené hodnoty ze zkoušky naprázdno motoru 1 .....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 6.8: Změřené hodnoty ze zkoušky naprázdno motoru 2 .....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 6.9: Vypočtené hodnoty ztrát ve jmenovitých bodech obou motorů .....</i>	<i>51</i>
<i>Tab. 6.10: Vypočtené hodnoty ze zatěžovací charakteristiky motoru 1 .....</i>	<i>51</i>
<i>Tab. 6.11: Vypočtené hodnoty ze zatěžovací charakteristiky motoru 2 .....</i>	<i>51</i>
<i>Tab. 6.12: Vypočtené hodnoty z měření naprázdno motoru 1.....</i>	<i>51</i>
<i>Tab. 6.13: Vypočtené hodnoty z měření naprázdno motoru 2.....</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 7.1: Porovnání výsledků ve jmenovitém bodě.....</i>	<i>54</i>

**SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$a$	[-]	počet paralelních větví vinutí
$B$	[T]	magnetická indukce
$B_{\delta}$	[T]	magnetická indukce ve vzduchové mezeře
$B_j$	[T]	magnetická indukce ve jhu
$B_m$	[T]	maximální hodnota magnetická indukce
$B_z$	[T]	magnetická indukce v zubu
$c_1$	[-]	Hopkinsonův činitel rozptylu
$\cos\phi$	[-]	účinník
$F$	[N]	Lorentzova síla
$F_m$	[A]	magnetomotorická síla (napětí)
$f_1$	[Hz]	síťová frekvence
$H$	[A·m <sup>-1</sup> ]	intenzita magnetického pole
$H_j$	[A·m <sup>-1</sup> ]	intenzita magnetického pole ve jhu
$H_z$	[A·m <sup>-1</sup> ]	intenzita magnetického pole v zubu
$I$	[A]	elektrický proud procházející vinutím
$I_0$	[A]	proud naprázdno
$I_1$	[A]	proud statoru
$I_2$	[A]	proud rotoru
$I_n$	[A]	jmenovitý proud statoru
$I_m$	[A]	magnetizační proud
$k_B$	[-]	činitel tvaru pole
$k_c$	[-]	Carterův činitel
$k_r$	[-]	činitel rozlohy
$k_v$	[-]	činitel vinutí
$k_{\gamma}$	[-]	činitel krácení kroku
$l$	[m]	délka střední magnetické indukční čáry
$L$	[m]	délka magnetického obvodu
$m_j$	[kg]	hmotnost jha
$m_z$	[kg]	hmotnost zubů
$M$	[Nm]	moment motoru na hřídeli
$M_{mech}$	[Nm]	mechanický moment motoru

---

$N$	[-]	počet závitů cívky
$N_1$	[-]	počet závitů cívky statorového vinutí
$n$	[min <sup>-1</sup> ]	otáčky motoru na hřídeli
$n_1$	[min <sup>-1</sup> ]	synchrónní otáčky
$p$	[-]	počet pólových dvojic
$PF$	[-]	účinník
$P_1$	[W]	příkon
$P_2$	[W]	výkon
$P_n$	[W]	jmenovitý výkon
$P_{mech}$	[W]	mechanický výkon
$P_\delta$	[W]	výkon procházející vzduchovou mezerou
$\Delta P_{celk}$	[W]	celkové ztráty motoru
$\Delta P_{j1}$	[W]	ztráty ve vinutí statoru
$\Delta P_{j2}$	[W]	ztráty ve vinutí rotoru
$\Delta P_k$	[W]	konstantní ztráty
$\Delta P_{Fe}$	[W]	ztráty v železe
$\Delta P_{Feh}$	[W]	hlavní ztráty v železe
$\Delta P_{mech}$	[W]	mechanické ztráty
$\Delta P_d$	[W]	dodatečné ztráty
$q$	[-]	počet drážek na pól a fázi
$R_1$	[Ω]	odpor vinutí statoru
$R_2'$	[Ω]	přepočtený odpor vinutí rotoru na počet závitů statoru
$R_f$	[Ω]	odpor fáze statorového vinutí
$R_{Fe}$	[Ω]	odpor reprezentující ztráty v železe
$R_{kn}$	[Ω]	odpor kruhu nakrátko
$R_t$	[Ω]	odpor tyče rotoru
$s$	[-], [%]	skluz
$td$	[m]	drážková rozteč
$tp$	[m]	pólová rozteč
$U_{1f}$	[V]	fázová hodnota vstupního napětí
$U_i$	[V]	indukované napětí
$U_j$	[A]	magnetické napětí jha
$U_z$	[A]	magnetické napětí zubu

---

$U_m$	[A]	magnetické napětí
$U_\delta$	[A]	magnetické napětí vzduchové mezery
$X_m$	[ $\Omega$ ]	magnetizační reaktance
$X_{r1}$	[ $\Omega$ ]	rozptylová reaktance vinutí statoru
$X_{r2}'$	[ $\Omega$ ]	rozptylová reaktance vinutí rotoru přepočtená na počet závitů statoru
$Z$	[ $\Omega$ ]	impedance
$\alpha_\delta$	[-]	činitel pólového krytí
$\Lambda$	[H]	magnetická vodivost
$\mu_r$	[-]	relativní permeabilita prostředí
$\mu_0$	[ $H \cdot m^{-1}$ ]	permeabilita vakua
$\rho$	[ $\Omega m$ ]	hustota
$\delta$	[m]	délka vzduchové mezery
$\Phi$	[Wb]	magnetický tok
$\lambda_d$	[-]	činitel magnetické vodivosti drážky
$\lambda_\varepsilon$	[-]	činitel magnetické vodivosti čel
$\lambda_{dif}$	[-]	činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu
$\eta$	[%]	účinnost
$\omega$	[rad/s]	úhlová rychlost

# 1 ÚVOD

Bakalářská práce je celkem rozdělena do čtyř hlavních celků. První část je čistě teoretická, je zde popsána konstrukce a princip činnosti asynchronního motoru. Zmiňuje se také o náhradním obvodu, momentové charakteristice a ztrátách uvnitř motoru.

V druhé části probíhá analytický výpočet zadaného trojfázového asynchronního motoru a jeho následná modifikace pro možnost úpravy délky magnetického obvodu a počtu vodičů v drážce statoru. Součástí je i návrh zadaného motoru v programu RMXprt. K dispozici byla kompletní výkresová dokumentace od výrobce motoru, na kterém proběhlo měření v další části práce. Později bylo provedeno měření i na upraveném motoru. Úprava motoru spočívala ve změně délky magnetického obvodu a změně počtu vodičů v drážce statoru, tak aby bylo dosaženo vyšší účinnosti. V poslední části práce je rozbor a porovnání jednotlivých výsledků.

Cílem práce je dospět jak výpočty, tak i měřením k výsledné účinnosti jak původního tak i upraveného motoru. Třídy účinnosti asynchronních motorů napájených ze sítě s kmitočtem 50 Hz nebo 60 Hz stanovuje norma ČSN EN (IEC) 60034-30. Nové třídy účinnosti stanovuje tato norma následovně [1]:

- IE1 standartní účinnost
- IE2 zvýšená účinnost
- IE3 vysoká účinnost
- IE4 velmi vysoká účinnost

Motory se standartní účinností IE1 nesmí být dodávány na evropské trhy. U motorů s výkony 7,5 až 375 kW musí být zákonem dodržena minimální účinnost třídy IE3, alternativně je pro motory napájených a řízených z měničů minimální účinnost třídy IE2 [2]. Změnu v určování účinnosti přinesla norma IEC 60034-2-1, kdy se velikost přídatných ztrát nadále nestanovuje jako 0,5% příkonu, ale nepřímo se vypočítávají při měření [1].

## 2 ASYNCHRONNÍ MOTOR

Asynchronní motor je točivý elektrický stroj umožňující elektromechanickou přeměnu energie, přeměna mechanické energie na energii elektrickou. V případě přeměny mechanické energie na elektrickou se hovoří o synchronním či asynchronním generátoru [3].

### 2.1 Konstrukce asynchronního motoru

Jako všechny točivé stroje i asynchronní motor je tvořen z pevné části - statoru a pohyblivé části – rotoru. Stator se obecně skládá z litinové, svařované nebo hliníkové konstrukce s dvěma ložiskovými štíty. Rotor je složen z tenkých plechů nalisovaných na hřídeli, tvořící vnitřní část magnetického obvodu stroje.

Krom rotoru a statoru obsahují elektrické stroje i další důležité části. První z nich je magnetický obvod, jedná se o feromagnetický válec tvořený z několika nalisovaných a izolovaných plechů. Vnější část tohoto válce je umístěna na vnitřní straně statoru a je oddělena vzduchovou mezerou od vnitřní části na rotoru. Další částí je elektrický obvod, což může být jedno nebo několik vinutí umístěných v drážkách rotoru a statoru podél vzduchové mezery. Elektrický stroj obsahuje různá zařízení pro chlazení. Jedná se zejména o samotný ventilátor a ventilační kanály ve statoru a rotoru, jimiž prochází chladicí médium. Poslední částí jsou mechanické uzly, kam se řadí ložiska, hřídele, spojky nebo řemenice pro spojení s poháněným zařízením [3], [4].

Magnetický obvod a vinutí asynchronního motoru jsou podrobně zpracovány v dalších částech práce. Příklad provedení asynchronního motoru od firmy Siemens je na Obr 2.1.



Obr. 2.1: Konstrukce asynchronního motoru (převzato z [5])

## 2.2 Vinutí

V elektrickém obvodu stroje plní vinutí dvě funkce. Vytváří elektromotorickou sílu, nutnou pro práci stroje a vytvářejí magnetické pole pro přeměnu energie. Vinutí jsou uložena v drážkách magnetického obvodu statoru a rotoru [6]. Dle konstrukce se střídavá vinutí dělí na:

- Vsypávaná vinutí s měkkými cívkami – ukládá se do polozavřených drážek s největším průměrem vodiče 1,8 mm. Vyšších průřezů se dosahuje použitím více dílčích, paralelních vodičů.
- Vinutí s polotuhými a tuhými cívkami – používají se vodiče nejčastěji s pravoúhlým průřezem z důvodu dosažení vyšší mechanické pevnosti. Cívky se tvarují a upravují před uložením do drážek motoru. Používají se v motorech o výkonech vyšších než 100 kW.
- Tyčová vinutí – určujícím prvkem je namísto cívky neizolovaná tyč, představující polovinu cívky. Tyče jsou na koncích spojeny, čím vytváří závity vinutí. Používají se jako statorová vinutí velkých elektrických strojů nebo jako rotorová vinutí nakrátko [7].

### 2.2.1 Statorové vinutí

V drážkách statoru trojfázového asynchronního motoru je uloženo souměrné trojfázové vinutí. V případě, že vinutím protéká souměrná soustava proudů s vzájemným fázovým posunem 120°, vzniká uvnitř motoru točivé magnetické pole. Otáčky točivého magnetického pole se nazývají synchronní, závisí na kmitočtu napájecí sítě a počtu pólových dvojic motoru.

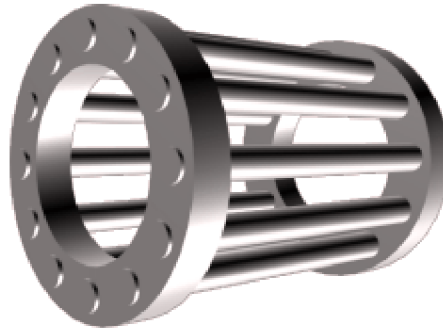
$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} \quad [\text{min}^{-1}] \quad (2.1)$$

Konce vinutí jsou vyvedeny na statorovou svorkovnici motoru. Na svorkovnici lze snadno měnit konfiguraci zapojení vinutí do hvězdy a do trojúhelníku [3].

### 2.2.2 Rotorové vinutí

V drážkách rotoru je uloženo rotorové vinutí, nazývané kotva. Prvním typem je rotor s kotvou nakrátko. Rotorové vinutí s kotvou nakrátko je tvořeno z několika tyčových vinutí, na konci zakončených kruhy nakrátko. Vhodný počet tyčí je dán zejména počtem drážek statoru a počtem pólů motoru [9]. U motorů větších výkonů jsou tyče měděné nebo mosazné. Motory menších výkonů mají vinutí odlévané spolu s větracími lopatkami z hliníku. Takové vinutí se nazývá klec nebo klecové vinutí [3]. Příklad hliníkového klecového vinutí je na Obr. 2.2.





Obr. 2.2: Klecové vinutí kotvy nakrátko (převzato z [10])

Pokud je rotorové vinutí tvořeno pomocí třífázového vinutí z izolovaných vodičů, jedná se o motor s vinutým rotorem nebo také kroužkový motor. U tohoto typu jsou jedny konce rotorového vinutí spojeny do jednoho uzlu, druhé jsou připevněny ke třem kroužkům umístěných izolovaně na hřídeli. Vodivý styk obstarávají přiléhající kartáče, upevněné v držáku kartáčů na statoru. Odtud jsou vyvedeny na rotorovou svorkovnici, odkud lze měnit parametry rotorového vinutí [8].

## 2.3 Magnetický obvod

Magnetický obvod elektrického stroje se skládá ze čtyř částí: vzduchová mezera, zuby statoru a rotoru, jho statoru a jho rotoru [6]. Magnetický tok vychází ze zubů statoru, prochází vzduchovou mezerou do zubů rotoru a obrací se rotorovým jhem a zuby zpět do vzduchové mezery. Přes statorové zuby a jho se nakonec uzavírá. Uspořádání výše zmiňovaných částí magnetického obvodu se magnetický tok soustředí do prostoru, ve kterém probíhá změna energie elektromagnetickou indukcí. Magnetický tok, který se této přeměny nezúčastní, se nazývá rozptylový magnetický tok. Čím je rozptylový magnetický tok menší, tím lépe se elektrický stroj magneticky využije.

Pro výpočet magnetického obvodu platí Hopkinsonův zákon

$$F_m = \frac{\Phi}{\Lambda} = \sum U_m = \oint H \, dl = \sum N \cdot I \quad [\text{A}] \quad (2.2)$$

Výsledná magnetomotorická síla  $F_m$  je dána podílem magnetického toku  $\Phi$  a magnetické vodivosti obvodu  $\Lambda$  [9]. Magnetomotorickou sílu lze určit součtem magnetických napětí v každé části magnetického obvodu

$$F_m = \sum U_m = U_\delta + U_{z1} + U_{z2} + U_{j1} + U_{j2} \quad [\text{A}] \quad (2.3)$$

kde  $U_{z1}$ ,  $U_{z2}$ ,  $U_{j1}$ ,  $U_{j2}$  jsou magnetická napětí zubů a jha statoru a rotoru,  $U_\delta$  je magnetické napětí vzduchové mezery.

Magnetická napětí jednotlivých částí obvodu, krom magnetického napětí vzduchové mezery, jsou samostatně určena součinem intenzity magnetického pole dané části magnetického obvodu  $H_x$  a délkou střední magnetické indukční čáry v této části  $l_x$  [6]

$$U_{mx} = H_x \cdot l_x \quad [\text{A}] \quad (2.4)$$

Intenzita magnetického pole je dána vztahem [9]

$$H = \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu_r} \quad [\text{A}\cdot\text{m}^{-1}] \quad (2.5)$$

kde  $B$  je velikost magnetické indukce určité části magnetického obvodu,  $\mu_r$  je relativní permeabilita materiálu a  $\mu_0$  permeabilita vakua. Permeabilita vakua je konstanta s hodnotou  $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$ .

V případě, že relativní permeabilita materiálu není známa, lze zjistit intenzitu magnetického pole pomocí magnetizační křivky ( $B = f(H)$ ) pro feromagnetický materiál, ze kterého je počítaná část magnetického obvodu vyrobena. Magnetizační křivka předpokládá, že všechny magnetický tok prochází přes zuby rotoru a statoru. Hraniční hodnota velikosti magnetické indukce v zubech statoru a rotoru je 1,8 T. Pro vyšší hodnoty magnetické indukce v zubech než 1,8 T se musí brát v úvahu i magnetický tok procházející drážkou. Výsledkem tohoto jevu je, že skutečná velikost magnetické indukce v zubu a tedy i intenzita magnetického pole v zubu bude menší než hodnota původně určená z magnetizační křivky [6].

## 2.4 Princip činnosti

Princip funkce asynchronních strojů vychází ze dvou zákonů elektrotechniky. Prvním je Faradayův zákon elektromagnetické indukce, v němž je zahrnut i Lenzův zákon v podobě záporného znaménka. Druhým je Lorentzův zákon popisující silové účinky na vodič protékající proudem uvnitř magnetického pole [11].

### Faradayův zákon elektromagnetické indukce

*Změní-li se magnetický indukční tok  $\Phi$  ve vodiči za dobu  $dt$  o  $d\Phi$ , vzniká ve vodiči indukované elektromotorické napětí se střední hodnotou*

$$U_i = - \frac{d\Phi}{dt} \quad [\text{V}] \quad (2.6)$$

Tedy čím vyšší je změna magnetického pole a čím kratší dobu trvá, tím bude indukované napětí vyšší. Záporné znaménko ve vztahu 2.6 zahrnuje Lenzův zákon, dle kterého indukovaný elektrický proud působí svým magnetickým polem proti změně magnetického indukčního toku, která jej vyvolala [12], [13].

### Lorentzův zákon

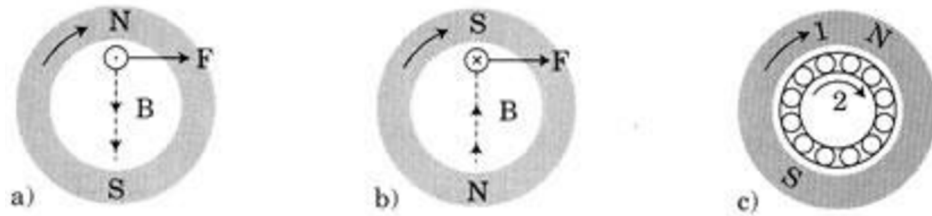
*Prochází-li vodičem umístěným v magnetickém poli proud  $I$ , působí na něj síla  $F$  úměrná velikosti procházejícího proudu. Tato síla se nazývá Lorentzova síla a je dána vztahem*

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha \quad [\text{N}] \quad (2.7)$$

kde  $B$  je velikost magnetické indukce,  $l$  je délka vodiče umístěného v magnetickém poli a  $\alpha$  je úhel mezi vodičem a indukčními čarami magnetického pole. Směr Lorentzovy síly lze určit pomocí Flemingovým pravidlem levé ruky, kdy máme otevřenou levou ruku natočenou tak, aby prsty ukazovali směr tekoucího proudu a indukční čáry vstupovali do dlaně. Potom odtažený palec ukazuje směr síly, působící magnetické pole na vodič [14].

Přiložením střídavého napětí na svorky statoru asynchronního motoru vzniká točivé magnetické pole se synchronními otáčkami  $n_1$  dle vztahu (2.1). V případě asynchronního

motoru s kotvou nakrátko, točivé magnetické pole indukuje v rotorových tyčích napětí dle Faradayova zákona. Jelikož jsou rotorové tyče na konci zkratované kroužky, protéká jimi indukovaný proud ve směru podle Lenzova zákona, viz Obr. 2.3. Kvůli elektřině indukované v tyčích rotoru se často asynchronní motory nazývají indukční motory.



Obr. 2.3: Indukovaný proud v tyčích rotoru (převzato z [16])

Nyní se uvnitř točivého magnetického pole nachází vodiče (klecové vinutí rotoru), kterými protéká elektrický proud. Vzájemným působením točivého magnetického pole statoru a magnetického pole indukované proudem v tyčích rotoru vzniká Lorentzova síla  $F$ , důsledkem které se rotor otáčí.

Otáčky rotoru nemohou dosáhnout hodnoty synchronních otáček točivého magnetického pole statoru. V případě shodných otáček by byla změna magnetického pole statoru vůči vinutí rotoru nulová. Podle Faradayova zákona pokud je změna magnetického pole nulová, potom se ve vinutí rotoru neindukuje žádné napětí a proud. Neteče-li vinutím rotoru elektrický proud, potom na něj nepůsobí žádná síla [15].

Z důvodu zachování relativního pohybu magnetického pole statoru vůči vodičům rotoru jsou otáčky rotoru asynchronního motoru vždy o trochu nižší než otáčky točivého magnetického pole statoru. Rozdíl synchronních otáček  $n_1$  a otáček rotoru  $n$ , vztažený na synchronní otáčky točivého pole statoru se nazývá skluz  $s$

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad [-] \quad (2.8)$$

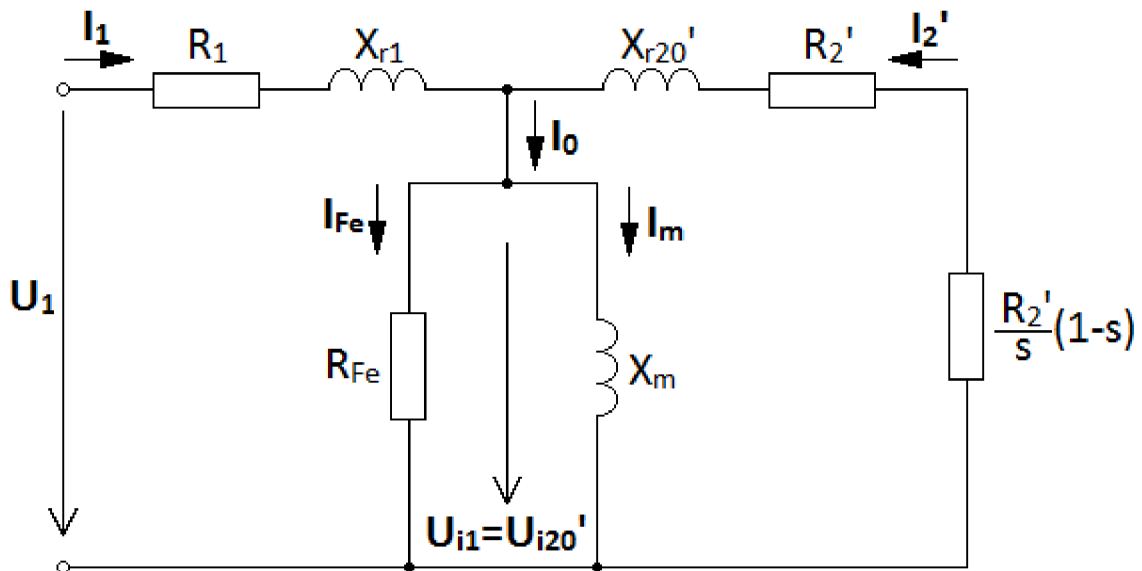
Často se skluz vyjadřuje v procentech

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.9)$$

Hodnota skluzu je závislá na mechanickém zatížení motoru. Při jmenovitém zatížení malých motorů hodnota skluzu dosahuje do 10 %, u velkých motorů kolem 1 % [3].

## 2.5 Náhradní obvod

Pro rozbor práce asynchronního stroje má náhradní obvod značný význam. Náhradní obvod umožňuje názorně vyjádřit závislosti mezi veličinami, charakterizující jednotlivé stavy stroje [6]. Náhradní obvod asynchronního stroje je sestaven na základě převedení dějů točícího stroje na stojící stroj. Kompletní schéma jedné fáze asynchronního motoru zobrazuje obr. 2.4, ve tvaru T článku [7].



Obr. 2.4: Náhradní obvod jedné fáze asynchronního motoru (převzato z [3])

Význam veličin náhradního obvodu:

$R_1$  odpor jedné fáze statorového vinutí

$R_2'$  odpor jedné fáze rotorového vinutí přepočtený na počet závitů statorového vinutí

$R_{Fe}$  odpor reprezentující ztráty v magnetickém obvodu (v železe)

$X_{r1}$  rozptylová reaktance jedné fáze statorového vinutí

$X_{r20}'$  rozptylová reaktance jedné fáze rotorového vinutí při stojícím rotoru, přepočtená na počet závitů statorového vinutí

$X_m$  magnetizační reaktance

$\frac{R_2'}{s}(1-s)$  fiktivní odpor reprezentující elektrický výkon, jenž se přemění v mechanický výkon

Hodnota indukovaného napětí ve statorovém vinutí  $U_{i1}$  je rovna přepočtenému indukovanému napětí v rotorovém vinutí při stojícím rotoru  $U_{i20}'$  [3]. Odporů a reaktancí náhradního obvodu nejsou konstanty, v závislosti na různých pracovních režimech stroje se mění. S rostoucím zatížením stroje se zvyšuje i rozptylový tok, důsledkem toho se s růstem nasycení jednotlivých částí magnetického obvodu od rozptylových polí zmenšují rozptylové reaktance statorových i rotorových vinutí.

Změna odporů a reaktancí nastává zejména při rozběhu motoru, kdy se uplatňuje vliv skin efektu. Při rozběhu jsou proudy motoru několikrát vyšší než při jmenovitém provozu a frekvence proudu v rotoru je blízká napájecí frekvenci [7].

## 2.6 Točivý moment

Přeměnou energie v elektrickém stroji vznikají vzájemným působením magnetického pole a proudů elektromagnetické síly, působící na statot i rotor. Tyto síly vytváří momenty, které se snaží otáčet statorem a rotorem v opačných směrech. Ve skutečnosti se otáčí pouze rotor elektrického stroje. Ve statoru, který je upevněn na pevném základu, vznikají vlivem elektromagnetických sil odpovídající mechanická napětí [6].

Pro mechanický moment asynchronního motoru platí následující vztah

$$M_{mech} = \frac{P_{mech}}{\omega} \quad [\text{Nm}] \quad (2.10)$$

kde  $P_{mech}$  značí mechanický výkon motoru a  $\omega$  je úhlová rychlost, kterou se motor otáčí. Úhlová rychlost je dána otáčkami motoru vztahem

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad [\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}] \quad (2.11)$$

Výsledný moment na hřídeli motoru je dán poměrem výkonu motoru na hřídeli  $P_2$  a úhlové rychlosti  $\omega$ . Výkon na hřídeli je dán mechanickým výkonem, od něhož jsou odečteny vlastní mechanické ztráty stroje  $\Delta P_{mech}$  a ztráty dodatečné  $\Delta P_d$ .

$$M = \frac{P_2}{\omega} = \frac{P_{mech} - \Delta P_{mech} - \Delta P_d}{\omega} \quad [\text{Nm}] \quad (2.12)$$

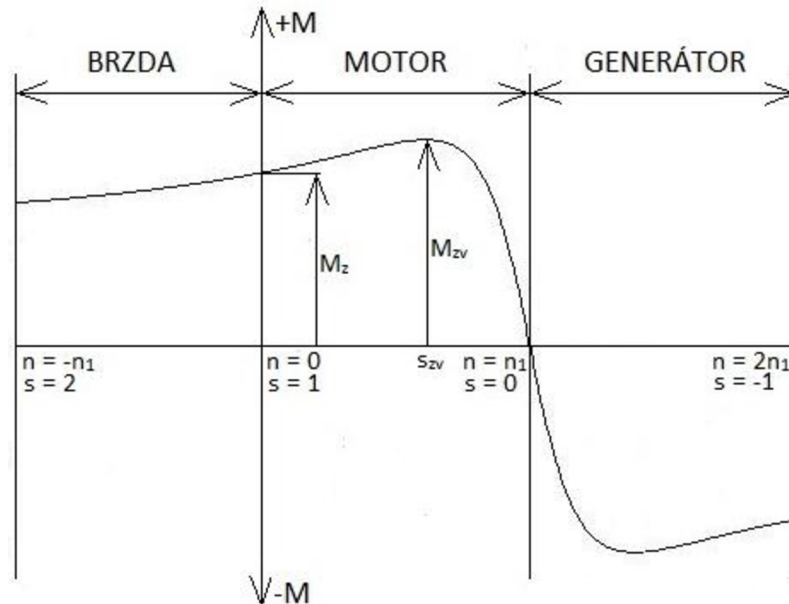
K výpočtu točivého momentu se s výhodou využívá náhradní obvod asynchronního stroje popsany v kapitole 2.5. Výpočet vychází z rovnice (2.10), kde mechanický výkon motoru je vyjádřen pomocí veličin a prvků náhradního obvodu. Úhlová rychlost  $\omega$  je vyjádřena pomocí skluzu a úhlové rychlosti točivého magnetického pole statoru  $\omega_1$  [3].

$$M_{mech} = \frac{p \cdot m \cdot \frac{R_2'}{s} \cdot U_1^2}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left[ \left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_{r1} + X'_{r20})^2 \right]} \quad [\text{Nm}] \quad (2.13)$$

Z rovnice 2.13 vyplývá, že velikost mechanického momentu asynchronního motoru je závislá na druhé mocnině efektivní hodnoty napětí na svorkách statoru. Klesne-li napájecí napětí na polovinu, mechanický moment motoru bude vzhledem k původní hodnotě čtvrtinový [6].

### 2.6.1 Momentová charakteristika

Momentová charakteristika asynchronního motoru je zobrazena na obr. 2.5. Jedná se o závislost momentu stroje buďto na skluzu,  $M = f(s)$ , otáčkách motoru,  $M = f(n)$  nebo úhlové rychlosti motoru,  $M = f(\omega)$ .



Obr. 2.5: Momentová charakteristika asynchronního motoru (převzato z [3])

Momentová charakteristika mechanického momentu vychází z rovnice (2.13), kde jedinou neznámou je skluz  $s$ . Výsledná charakteristika momentu na hřídeli motoru je dána zohledněním mechanických a dodatečných ztrát podle rovnice (2.12) [3].

Základní oblasti asynchronního stroje jsou vyznačeny v momentové charakteristice na Obr. 2.5. Při běžném provozu se motor vyskytuje v oblasti motorické. Motorická oblast má počátek v nulových otáčkách motoru a končí synchronní otáčkami  $n_1$ . V době připojení motoru k napájecí síti, kdy jsou otáčky nulové, vyvíjí motor záběrný moment  $M_z$ . Záběrný moment lze určit dosazením za  $s = 1$  do rovnice (2.13). Maximální hodnota motorické oblasti momentové charakteristiky se nazývá moment zvratu  $M_{zv}$ . Moment zvratu rozděluje motorický úsek charakteristiky na nestabilní a stabilní (pracovní) oblast. Je určen hodnotou skluzu zvratu  $s_{zv}$ , který je dán derivací rovnice (2.13) podle  $s$  položenou rovno 0.

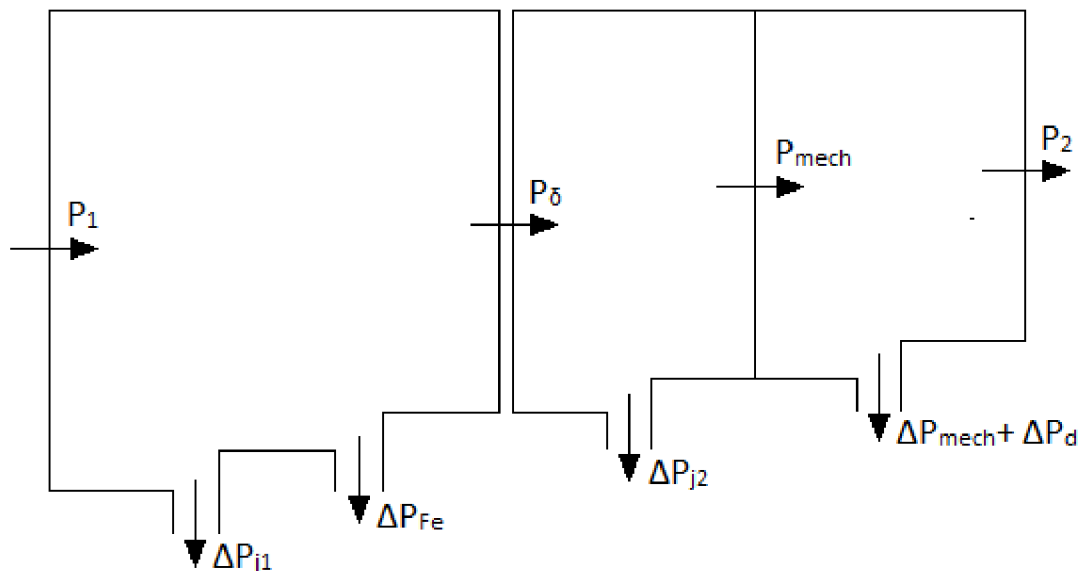
Pokud motor překročí synchronní otáčky, dostane se do generátorické oblasti, kde je moment záporný. Aby asynchronní motor pracoval v generátorické oblasti, musí být na hřídel motoru připojeno další zařízení otáčející rotorem. Jako brzda motor pracuje, jsou-li otáčky motoru záporné a moment kladný nebo jsou-li otáčky vyšší než  $2n_1$  a moment záporný [6].

## 2.7 Ztráty

Ztráty vznikají při přeměně energie ve stroji. Ztráty energie vyvolávají oteplení elektrického stroje, je tedy nutné rovnoměrné chlazení všech částí stroje. Nejcitlivější částí motoru na zvýšené oteplení jsou izolační materiály, které při přetížení mohou rychle ztratit potřebné izolační i mechanické vlastnosti a tím znatelně snížit životnost stroje [4]. Ztráty v elektrickém stroji lze rozdělit do těchto skupin [3]:

- Ztráty v magnetickém obvodu  $\Delta P_{Fe}$
- Ztráty ve vinutí statoru  $\Delta P_{j1}$
- Ztráty ve vinutí rotoru  $\Delta P_{j2}$
- Mechanické ztráty  $\Delta P_{mech}$
- Dodatečné ztráty  $\Delta P_d$

Tok výkonu v asynchronním motoru je znázorněn na obr. 2.6.



Obr. 2.6: Tok výkonu asynchronního motoru [3]

### Účinnost

Obecně pro účinnost nejen asynchronního motoru, ale všech elektrických strojů platí vztah

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad [-] \quad (2.14)$$

kde  $P_1$  značí příkon motoru. Účinnost elektrického stroje je vždy menší než 1. Ze znalosti všech ztrát uvnitř motoru lze účinnost určit následovně [6]

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P_{Fe} + \Delta P_{j1} + \Delta P_{j2} + \Delta P_{mech} + \Delta P_d}{P_1} \quad [-] \quad (2.15)$$

### 2.7.1 Ztráty v magnetickém obvodu

Ztráty v magnetickém obvodu se skládají z hysterezních ztrát  $\Delta P_h$  a ztrát vířivými proudy  $\Delta P_v$ . Oba typy těchto ztrát závisí na frekvenci, magnetické indukci, jakosti použitého materiálu v magnetickém obvodu a tloušťce plechů. Dohromady tvoří hlavní ztráty v železe. Pro frekvenci proudu v rotorovém vinutí platí

$$f_2 = s \cdot f_1 \quad [\text{Hz}] \quad (2.16)$$

Vzhledem k takto nízké rotorové frekvenci v okolí jmenovitých otáček, pohybující se řádově v jednotkách Hertzů, se ztráty v magnetickém obvodu rotoru běžně zanedbávají. Vyšších hodnot dosahují pouze při spouštění motoru, kdy se frekvence proudu v rotoru blíží k hodnotám síťové frekvence [7].

Krom ztrát hysterezních a vířivými proudy vznikají v magnetickém obvodu přidavné vířivé ztráty  $\Delta P_{pv}$ , vyvolané kmity magnetického pole. Kmity magnetického toku vznikají vlivem nerovnoměrnosti vzduchové mezery způsobené drážkováním [6]. Platí tedy

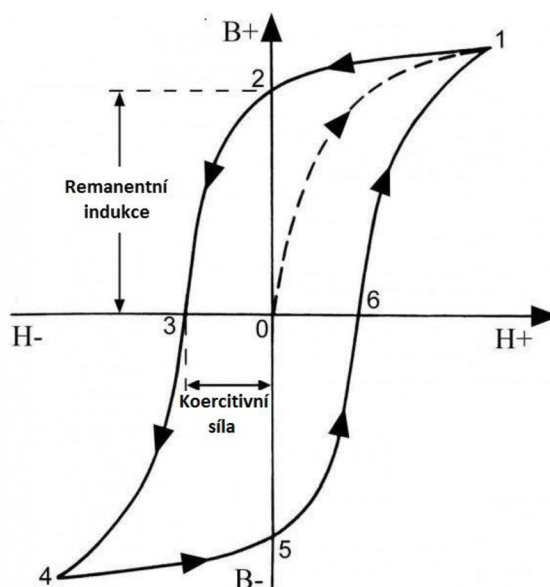
$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_h + \Delta P_v + \Delta P_{pv} \quad [\text{W}] \quad (2.17)$$

#### Hysterezní ztráty

Hysterezní ztráty lze charakterizovat jako energii, která je přeměněna v teplo oběhem pracovního bodu hysterezní smyčky materiálu, jak je znázorněno na Obr. 2.7. Jednoduše řečeno se jedná o energii nutnou na přemagnetování materiálu [17]. Vyčíslení hysterezních ztrát je možné dle následujícího vztahu

$$\Delta P_h = k_h \cdot f \cdot B_m^n \cdot m \quad [\text{W}] \quad (2.18)$$

kde  $k_h$  a  $n$  jsou koeficienty závislé na tloušťce plechů a materiálu a  $m$  je hmotnost magnetického materiálu [3].



Obr. 2.7: B-H křivka (převzato z [22])

Hysterezní smyčka, která se také běžně nazývá magnetizační nebo B-H křivka, je závislost magnetické indukce na intenzitě magnetického pole uvnitř feromagnetické látky. Z hlediska tvaru hysterezní smyčky platí, že čím větší je plocha hysterezní smyčky, tím větší



práci musíme dodat, aby feromagnetické látka dosáhla výchozího stavu. Hysterezní ztráty tedy úměrně odpovídají velikosti plochy hysterezní smyčky.

### **Popis magnetizace dle hysterezní smyčky**

Vložením nezmagnetovaného feromagnetického materiálu do magnetického pole je tento materiál magnetován podle křivky prvotní magnetizace. Ta je zobrazená na Obr. 2.7 čárkovanou křivkou z bodu 0 do bodu 1. V bodě 1 je dosaženo nejvyšší magnetické indukce, jedná se o tzv. bod nasycení. V tomto bodě jsou usměrněny všechny domény feromagnetické látky, důsledkem čehož nelze dále zvýšit magnetickou indukci materiálu. Jakmile magnetické pole zanikne, hodnota intenzity magnetického pole je nulová, látka stále zůstane částečně zmagnetovaná, čemuž odpovídá remanentní (zbytková) indukce, bod 2 v Obr. 2.7. K odstranění zbytkového magnetismu je nutné látku demagnetizovat působením opačným magnetickým polem až do bodu, kdy je indukce nulová, bod 3 na Obr. 2.7. Intenzita magnetického pole potřebná pro odstranění remanentní indukce se nazývá koercitivní intenzita nebo též koercitivní síla. Další magnetizací se dosáhne nového zmagnetování feromagnetické látky, bod 4 na Obr. 2.7. V tomto bodě jsou magnetické póly usměrněných domén opačné vzhledem k jejich stavu v bodě 1. Působením opět opačného magnetického pole se obdobně dostaneme z bodu 4 do bodu 1.

Dle tvaru hysterezní smyčky se feromagnetické materiály dělí na magneticky tvrdé a magneticky měkké. Magneticky tvrdé látky mají širokou hysterezní smyčku a vyšší hodnoty koercitivní síly a remanentní indukce, která bez působení magnetického pole nikdy nezaniká. Magneticky měkké materiály mají hysterezní smyčku úzkou a malé hodnoty koercitivní síly a remanentní indukce, která po dlouhé době zaniká vlivem tepelných pohybů částic. Remanentní indukce a koercitivní síla jsou charakteristické hodnoty pro každý feromagnetický materiál [23].

### **Ztráty vířivými proudy**

Druhou významnou složkou ztrát v železe jsou ztráty vířivými proudy. Ztráty vířivými proudy vznikají, pokud se těleso pohybuje uvnitř magnetického pole či statické těleso je umístěné v pohyblivém magnetickém poli. Vlivem tohoto relativního pohybu je způsoben pohyb elektronů v tělese, čímž se v něm indukuje proud způsobující ztráty [18]. Podobně jako hysterezní ztráty, ztráty vířivými proudy také zvyšují teplotu magnetického materiálu. Matematicky lze ztráty vířivými proudy vyjádřit následovně

$$\Delta P_v = k_v \cdot f^2 \cdot B_m^2 \cdot m \quad [W] \quad (2.19)$$

kde  $k_v$  je obdobně jako u hysterezních ztrát koeficient závisící na materiálu a tloušťce plechů [3].

Snížení ztrát vířivými proudy lze docílit dvěma způsoby. Prvním možností je snížení velikosti vířivých proudů pomocí rozdělení magnetického jádra na tenké vrstvy tzv. laminace. Při laminování magnetického jádra se plocha, přes níž vířivé proudy prochází, zmenší a zvýší se tak odpor kladený vířivým proudům. Jednotlivé plechy jsou navzájem izolovány tenkou vrstvou laku nebo oxidu. Druhou možností snížení ztrát vířivými proudy je použití magnetických materiálů s vyšší hodnotou odporu, jako je například křemíková ocel. V běžné praxi se využívá obou zmíněných způsobů společně [24].

## 2.7.2 Ztráty ve vinutí

Ztráty ve vinutí se řadí mezi elektrické ztráty obecně známy jako Joulovy. Joulovy ztráty zaujímají největší část z celkových ztrát uvnitř motoru. Počítají se pro statorové i rotorové vinutí motoru. Vznikají při průchodu elektrického proudu daným materiálem, čímž dochází k oteplení jak samotného vodiče, tak i jeho okolí díky části tepelné energie odvedené jeho povrchem [3]. Joulovy ztráty jsou závislé na druhé mocnině efektivní hodnoty procházejícího proudu dle následujícího vztahu

$$\Delta P_j = m \cdot R \cdot I^2 \quad [\text{W}] \quad (2.20)$$

kde  $m$  je počet fází statorového či rotorového vinutí a  $R$  je odpor jedné fáze vinutí. Pro odpor jedné fáze vinutí platí

$$R = \rho_\vartheta \cdot \frac{l}{S} \quad [\Omega] \quad (2.21)$$

kde  $\rho_\vartheta$  je měrný odpor vodiče závislý na teplotě,  $l$  je délka vinutí a  $S$  průřez vodiče vinutí.

Často se využívá výpočet Joulových ztrát pomocí proudové hustoty  $\sigma$  odvozený z rovnice 2.20 a 2.21.

$$\Delta P_j = \rho_\vartheta \cdot V \cdot \sigma^2 \quad [\Omega] \quad (2.22)$$

kde  $V$  je objem vodiče, pro proudovou hustotu platí vztah [6]

$$\sigma = \frac{I}{S} \quad [\text{Am}^{-2}] \quad (2.23)$$

## 2.7.3 Mechanické a dodatečné ztráty

### Mechanické ztráty

Mechanické ztráty v sobě zahrnují ztráty ventilační a ztráty třením v ložiskách motoru. Ventilační ztráty obsahují ztráty třením rotujících částí motoru o vzduch a ztráty ventilátoru na vytvoření proudu chladicího vzduchu.

Mechanické ztráty závisí na otáčkách motoru, velikosti motoru, počtu pólů motoru, množství a typu ventilačních kanálů, velikosti ventilátoru, průtoku a typu chladicího média a řadě dalších činitelů. Důsledkem všech těchto faktorů je výpočet mechanických ztrát náročný a často pouze přibližný. Přesných výsledků lze dosáhnout až při měření na hotovém stroji [7].

### Dodatečné ztráty

Dodatečné ztráty nebo také přídatné ztráty při zatížení vznikají v asynchronním motoru zejména vlivem rozptylových toků a pulsacemi magnetické indukce ve vzduchové mezeře způsobené drážkováním rotoru a statoru.

Starší normy uvádí hodnotu přídatných ztrát jako 0,5 % jmenovitého výkonu [7], u motorů se jmenovitým výkonem nižším než 1 kW se uvádí přídatné ztráty 2,5 % jmenovitého výkonu. Výsledky měření z praxe však ukázaly, že takto vypočtené dodatečné ztráty jsou nižší než ztráty odpovídající běžnému provozu. Nové normy předepisují určení dodatečných ztrát na základě lineární regresní analýzy zbytkových ztrát a druhé mocniny zatěžovacího momentu motoru [21].

### 3 ANALYTICKÝ VÝPOČET MOTORU

Analyzovaným motorem je třífázový asynchronní motor od firmy ATAS elektromotory Náchod a.s. Jedná se o dvoupólový motor s kotvou nakrátko, jednovrstvým vinutím, krytím IP56, trvale zapojený do konfigurace hvězdy. Štítkové údaje motoru jsou zapsány v Tab. 3.1.

Tab. 3.1: Štítkové hodnoty analyzovaného motoru

$U_1$ [V]	$P_n$ [W]	$I_n$ [A]	$\cos \phi$ [-]	$n$ [min <sup>-1</sup> ]	$f_1$ [Hz]
340 - 460	600	1,6	0,83	2830	50

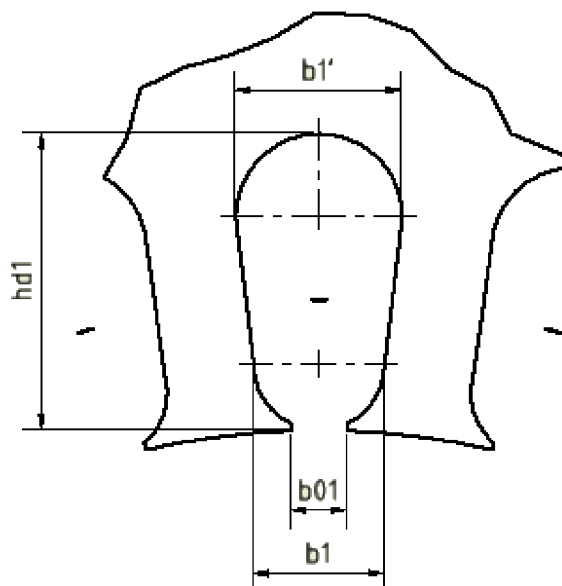
Ve všech výpočtech se bere v úvahu hodnota napájecího napětí 400 V. Pro vypracování práce byla od výrobce k dispozici kompletní výkresová dokumentace motoru. Detail a značení důležitých rozměrů statorové drážky je na Obr. 3.1, detail rotorové drážky je na Obr. 3.2. Parametry motoru potřebné k výpočtům jsou v Tab. 3.2. Jelikož se jedná o stále komerčně vyráběný motor, není možné zveřejnit všechny parametry motoru. Pro výpočty celé této kapitoly jsou využity vztahy z literatury [7], v případě čerpání z jiného literárního zdroje, je citace uvedena samostatně.

Tab. 3.2: Parametry motoru pro výpočet

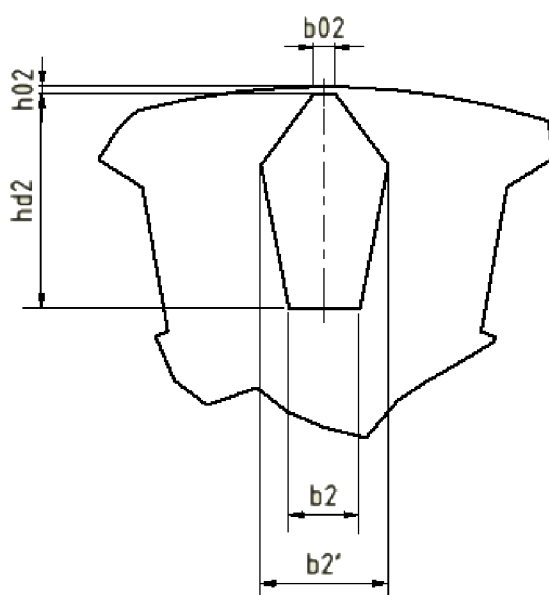
Velikost vzduchové mezery	$\delta$	0,3 mm
Délka magnetického obvodu	L	60 mm
Počet drážek statoru	$Q_1$	24
Vnější průměr statoru	$D_{1e}$	120,6 mm
Vnitřní průměr statoru	$D_1$	64 mm
Výška jha statoru	$h_{j1}$	15,8 mm
Výška zubu statoru	$h_{z1}$	-
Šířka zubu statoru	$b_{z1}$	-
Plocha drážky statoru	$S_1$	-
Průměr vodiče ve statoru	$d_1$	-
Počet vodičů v drážce statoru	$V_d$	-
Počet drážek rotoru	$Q_2$	17
Vnější průměr rotoru	$D_{2e}$	63,4 mm
Vnitřní průměr rotoru	$D_2$	20 mm
Výška jha rotoru	$h_{j2}$	12,275 mm
Výška zubu rotoru	$h_{z2}$	-
Šířka zubu rotoru	$b_{z2}$	-

POZN.: Z důvodu stále komerčně vyráběného motoru nelze uvést všechny hodnoty, ze kterých se při výpočtu vycházelo.

Následující dva obrázky, Obr. 3.1 a Obr. 3.2, zobrazují tvar a hlavní rozměry drážek, potřebné pro správný návrh motoru. Rozměry drážek také není možné zveřejnit, avšak značení dílčích rozměrů obou drážek na těchto obrázcích je dodrženo i při výpočtech v následujících kapitolách.

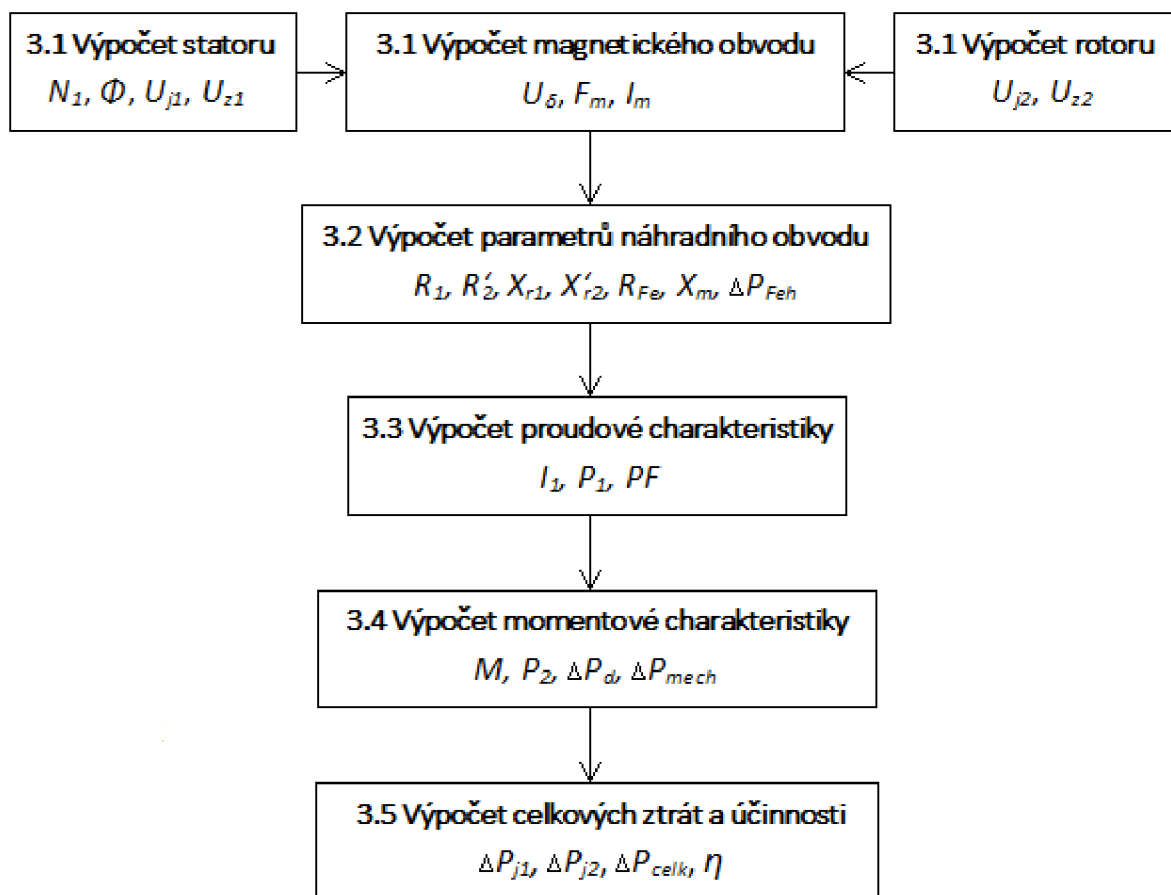


Obr. 3.1: Drážka statoru



Obr. 3.2: Drážka rotoru

Při návrhu zadaného asynchronního motoru se postupovalo dle blokového schématu na Obr. 3.3. Schéma uvádí čísla jednotlivých podkapitol, ve kterých se daná část návrhu motoru zabývá a také nejdůležitější veličiny, kterých je v každé části dosaženo.



Obr. 3.3: Blokové schéma postupu návrhu asynchronního motoru

Jedná se však o pouze zjednodušené schéma návrhu, které má čtenáři poskytnout základní informaci o problematice návrhu asynchronního motoru. Pro dosažení kompletního návrhu motoru je nutné provést mnoho výpočtů, kterými se zabývají následující části této kapitoly. Připomínám, že všechny následující výpočty čerpají z literatury [7], pokud není uvedeno jinak.

### 3.1 Výpočet magnetického obvodu

Magnetický obvod statoru i rotoru analyzovaného motoru je vyroben z plechů materiálu M700-50A. Cílem této části je určit magnetický tok motoru, magnetické indukce v jednotlivých částech magnetického obvodu, výsledné magnetomotorické napětí a magnetizační proud.

K určení magnetického toku se dospěje následujícími výpočty:

Počet závitů v jedné fázi statorového vinutí

$$N_1 = \frac{V_d \cdot Q_1}{2 \cdot a \cdot m_1} \quad (3.1)$$

kde  $a$  je počet paralelních větví vinutí.

Počet drážek na pól a fázi statorového vinutí

$$q_1 = \frac{Q_1}{2 \cdot p \cdot m_1} = \frac{24}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 4 \quad (3.2)$$

Pólová rozteč motoru udávající vzdálenost os sousedních pólů

$$t_p = \frac{\pi \cdot D_1}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot 0,064}{2 \cdot 1} = 0,1005 \text{ m} \quad (3.3)$$

Činitel zkrácení kroku je dán poměrem vzdálenosti cívkových stran jedné cívky a pólovou roztečí, pro jednovrstvá statorová vinutí je vždy roven 1

$$k_{y1} = 1$$

Činitel rozlohy statorového vinutí

$$k_{r1} = \frac{0,5}{q_1 \cdot \sin \frac{30^\circ}{q_1}} = \frac{0,5}{4 \cdot \sin \frac{30^\circ}{4}} = 0,9577 \quad (3.4)$$

Činitel zkrácení kroku uvažuje zmenšení napětí indukovaného v závitu vlivem zkrácení kroku. Činitel rozlohy uvažuje zmenšení indukovaného napětí vlivem rozložení vinutí do více drážek. Součinem těchto dvou činitelů je dán celkový činitel statorového vinutí

$$k_{v1} = k_{y1} \cdot k_{r1} = 1 \cdot 0,9577 = 0,9577 \quad (3.5)$$

Činitel tvaru pole je dán zploštěním křivky magnetického pole ve vzduchové mezeře, způsobeném nasycením zubů statoru a rotoru. Dle literatury [7] se volí se přibližná hodnota

$$k_B = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cong 1,11$$

Poslední neznámou pro výpočet indukčního toku je činitel  $k_E$ , respektující poměr indukovaného napětí statoru ke jmenovitému napětí. Hodnota tohoto činitele byla zjištěna z grafu v literatuře [7], závisí na vnějším průměru statoru a počtu pólů motoru.

$$k_E = 0,977$$

Magnetický tok generovaný točivým magnetickým polem statoru

$$\Phi = \frac{k_E \cdot U_{1f}}{4 \cdot k_B \cdot N_1 \cdot f_1 \cdot k_{v1}} = 2,882 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} \quad (3.6)$$

Dalším cílem je určení magnetických indukcí v jednotlivých částech magnetického obvodu počínaje magnetickou indukcí ve vzduchové mezeře.

Hodnota činitele pólového krytí  $\alpha_\delta$  závisí na tvaru křivky magnetického pole ve vzduchové mezeře. Pro sinusové rozložení magnetické indukce po délce pólové rozteče má hodnotu přibližně 0,64. Při nasycení se křivka pole zplošťuje a hodnota  $\alpha_\delta$  narůstá. U strojů se středním nasycením nabývá hodnot 0,7 – 0,74 [4]. Zvolená hodnota činitele pólového krytí

$$\alpha_\delta = 0,74$$

Magnetická indukce ve vzduchové mezeře

$$B_{\delta} = \frac{\Phi}{\alpha_{\delta} \cdot t_p \cdot L} = \frac{2,882 \cdot 10^{-3}}{0,74 \cdot 0,1005 \cdot 0,06} \cong 0,646 \text{ T} \quad (3.7)$$

Magnetická indukce ve jhu statoru

$$B_{j1} = \frac{\Phi}{2 \cdot h_{j1} \cdot k_{Fe} \cdot L_{Fe1}} = \frac{2,882 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,0158 \cdot 0,97 \cdot 0,06} \cong 1,567 \text{ T} \quad (3.8)$$

kde  $k_{Fe}$  je činitel plnění železa, který má hodnotu 0,97 pro osovou výšku motoru od 50 mm do 250 mm a pro napětí nižší než 660 V. Délka  $L_{Fe1}$  udává aktivní délku statorového svazku. Takto malý motor je sestaven z jednoho svazku magnetických plechů bez ventilačních kanálů, platí tedy

$$L_{Fe1} = L_{Fe2} = L = 0,06 \text{ m} \quad (3.9)$$

Drážková rozteč statoru

$$t_{d1} = \frac{\pi \cdot D_1}{Q_1} = \frac{\pi \cdot 0,064}{24} = 0,0084 \text{ m} \quad (3.10)$$

Magnetická indukce v zubech statoru

$$B_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d1} \cdot L}{b_{z1} \cdot L_{Fe1} \cdot k_{Fe}} \cong 1,491 \text{ T} \quad (3.11)$$

Magnetická indukce ve jhu rotoru

$$B_{j2} = \frac{\Phi}{2 \cdot h_{j2} \cdot k_{Fe} \cdot L_{Fe2}} = \frac{2,882 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,012275 \cdot 0,97 \cdot 0,06} \cong 2,017 \text{ T} \quad (3.12)$$

Drážková rozteč rotoru

$$t_{d2} = \frac{\pi \cdot D_{2e}}{Q_2} = \frac{\pi \cdot 0,0634}{17} = 0,0117 \text{ m} \quad (3.13)$$

Magnetická indukce v zubech rotoru

$$B_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d2} \cdot L}{b_{z2} \cdot L_{Fe2} \cdot k_{Fe}} \cong 1,5 \text{ T} \quad (3.14)$$

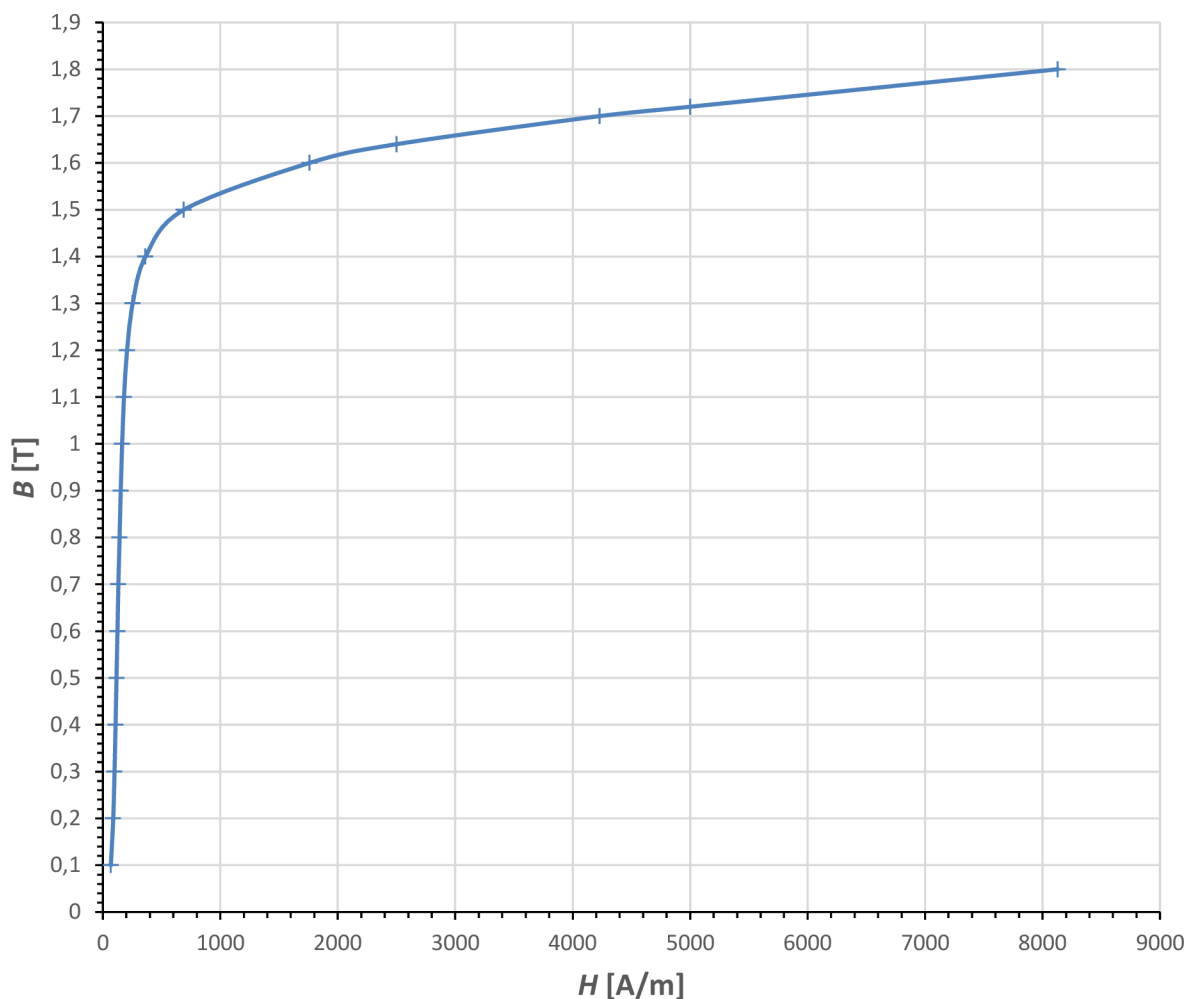
Ze znalosti magnetických indukcí v jednotlivých částech magnetického obvodu a z magnetizační křivky materiálu M700-50 zobrazené na Obr. 3.1 byly odečteny intenzity magnetického pole pro dané části magnetického obvodu.

$$H_{j1} \cong 1400 \text{ A/m}$$

$$H_{z1} \cong 680 \text{ A/m}$$

$$H_{j2} \cong 8130 \text{ A/m}$$

$$H_{z2} \cong 690 \text{ A/m}$$



Obr. 3.4: Magnetizační křivka materiálu M700-50A (hodnoty převzaty z [19])

Pro výsledné magnetomotorické napětí motoru je nutné zjistit magnetická napětí v dílčích částech magnetického obvodu včetně magnetického napětí vzduchové mezery.

Délka střední magnetické indukční čáry jha statoru

$$l_{j1} = \frac{\pi \cdot (D_{e1} - h_{j1})}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot (0,1206 - 0,0158)}{2 \cdot 1} = 0,1646 \text{ m} \quad (3.15)$$

Magnetické napětí jha statoru

$$U_{j1} = l_{j1} \cdot H_{j1} = 0,1646 \cdot 1400 \cong 230,47 \text{ A} \quad (3.16)$$

Magnetické napětí zubů statoru

$$U_{z1} = 2 \cdot h_{z1} \cdot H_{z1} \cong 17 \text{ A} \quad (3.17)$$

Délka střední indukční čáry jha rotoru

$$l_{j2} = 2 \cdot h_{j2} = 2 \cdot 0,0123 = 0,0246 \text{ m} \quad (3.18)$$

platí pouze pro dvoupólové motory s rotorem přímo nasazeným na hřídeli.



Magnetické napětí jha rotoru

$$U_{j2} = l_{j2} \cdot H_{j2} = 0,0246 \cdot 8130 \cong 199,59 \text{ A} \quad (3.19)$$

Magnetické napětí zubů rotoru

$$U_{z2} = 2 \cdot h_{z2} \cdot H_{z2} \cong 12,18 \text{ A} \quad (3.20)$$

Pro výpočet magnetického napětí ve vzduchové mezeře je nejdříve nutné určit Carterův činitel  $k_c$ . Carterův činitel zohledňuje nerovnoměrné rozdělení magnetické indukce ve vzduchové mezeře vzniklé drážkováním statoru a rotoru. V tomto případě má rotor drážky uzavřené, jeho povrch je hladký, Carterův činitel se počítá pouze pro stator.

Pro výpočet Carterova činitele je zapotřebí nejdříve určit činitel  $\gamma_1$

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{b_{01}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{01}}{\delta}} = 4,6404 \quad (3.21)$$

Carterův činitel pro stator

$$k_{c1} = \frac{t_{d1}}{t_{d1} - \gamma_1 \cdot \delta} = \frac{0,0084}{0,0084 - 4,6404 \cdot 0,0003} = 1,1993 \quad (3.22)$$

Magnetické napětí vzduchové mezery

$$U_{\delta} = \frac{2}{\mu_0} \cdot B_{\delta} \cdot \delta \cdot k_{c1} = \frac{2}{4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0,646 \cdot 0,0003 \cdot 1,1993 \cong 369,73 \text{ A} \quad (3.23)$$

Magnetomotorické napětí (síla) celého magnetického obvodu

$$\begin{aligned} F_m &= U_{\delta} + U_{j1} + U_{z1} + U_{j2} + U_{z2} = \\ &= 369,73 + 230,47 + 17 + 199,59 + 12,18 \cong 829 \text{ A} \end{aligned} \quad (3.24)$$

Magnetizační proud

$$I_m = \frac{p \cdot F_m}{0,9 \cdot m_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1}} \cong 0,8712 \text{ A} \quad (3.25)$$

## 3.2 Výpočet prvků náhradního obvodu

V této části je proveden výpočet všech odporů a reaktancí náhradního obvodu na Obr. 2.6.

### 3.2.1 Výpočet odporu fáze statorového vinutí

Střední šířka cívky určená na oblouku kružnice, procházející středy hloubky statorových drážek

$$b_c = \frac{\pi \cdot (D_1 + h_{d1})}{2 \cdot p} \cdot \beta_1 = 0,1198 \text{ m} \quad (3.26)$$

kde  $\beta_1$  je poměrné krácení kroku. Stejně jako činitel krácení kroku, má pro jednovrstvá vinutí hodnotu rovnu 1.

Délka čela cívky

$$l_{\xi} = K_{\xi} \cdot b_c + 2 \cdot B' = 1,2 \cdot 0,1198 + 2 \cdot 0,01 = 0,1637 \text{ m} \quad (3.27)$$

kde  $K_{\xi}$  je činitel, který má hodnotu 1,2 pro dvoupólový stroj s neizolovanými čely vinutí statoru.  $B'$  je délka přímé části cívky od čela statorového svazku do začátku ohybu čela. U vyspávaných vinutí, zakládaných do drážek před zalisováním navinutého svazku do kostry má  $B'$  hodnotu 0,01 m.

Střední délka závitů cívky statoru

$$l_{av} = 2 \cdot (L + l_{\xi}) = 2 \cdot (0,06 + 0,1637) = 0,4475 \text{ m} \quad (3.28)$$

Celková délka vodičů jedné fáze

$$L_c = l_{av} \cdot N_1 \quad [\text{m}] \quad (3.29)$$

Průřez vodiče statoru

$$S_v = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \quad [\text{m}^2] \quad (3.30)$$

Rezistivita mědi při teplotě 57°C

$$\begin{aligned} \rho_{Cu57} &= \rho_{Cu} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot \Delta T) = \\ &= 16,9 \cdot 10^{-9} \cdot [1 + 4 \cdot 10^{-3} \cdot (57 - 20)] = 19,4 \cdot 10^{-9} \Omega\text{m} \end{aligned} \quad (3.31)$$

kde  $\rho_{Cu}$  je rezistivita mědi při 20°C a  $\alpha$  je teplotní součinitel odporu pro měď. Provozní teplota 57 °C byla změřena v laboratoři při měření na navrhovaném motoru.

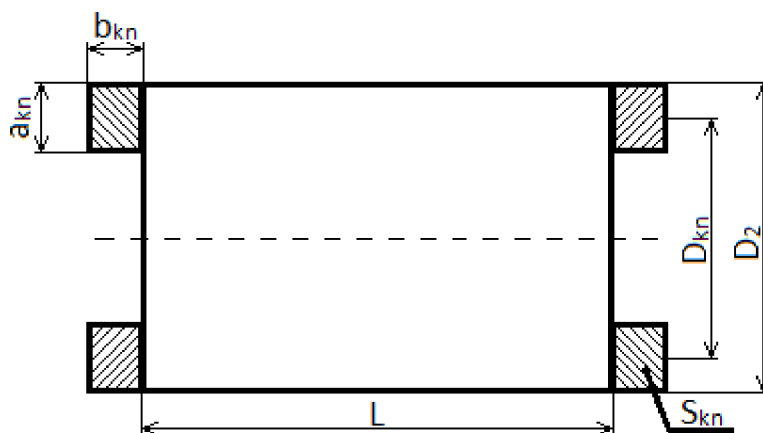
Odpor fáze statorového vinutí

$$R_1 = k_{\sim} \cdot \rho_{Cu57} \cdot \frac{L_c}{S_v \cdot a} = 14,4818 \Omega \quad (3.32)$$

kde  $k_{\sim}$  je činitel zvětšení odporu vlivem skin efektu. Jelikož se ve vodičích statoru projevuje povrchový jev jen nepatrně, má tento činitel hodnotu rovnu 1.

### 3.2.2 Výpočet odporu fáze rotorového vinutí

Za jednu fázi klecového vinutí je považována jedna tyč a dvě části kruhů nakrátko. Nákres řezu rotorového vinutí s vyznačenými rozměry kruhů nakrátko je na Obr. 3.4.



Obr. 3.5: Rozměry kruhů nakrátko (převzato z [18])

Délka rotorové tyče

$$l_t = \frac{L}{\cos \gamma} \quad [\text{m}] \quad (3.33)$$

kde  $\gamma$  je úhel natočení rotorové tyče.

Rezistivita hliníku při teplotě 57°C

$$\begin{aligned} \rho_{Al57} &= \rho_{Al} \cdot (1 + \alpha_{Al} \cdot \Delta T) = \\ &= 33 \cdot 10^{-9} \cdot [1 + 4 \cdot 10^{-3} \cdot (57 - 20)] = 37,88 \cdot 10^{-9} \Omega\text{m} \end{aligned} \quad (3.34)$$

Odpor rotorové tyče

$$R_t = k_{\sim} \cdot \rho_{Al57} \cdot \frac{l_t}{S_t} = 66,678 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (3.35)$$

kde činitel  $k_{\sim}$  má opět hodnotu 1.  $S_t$  je průřez tyče rotoru.

Odpor kruhu nakrátko mezi dvěma tyčemi

$$R_{kn} = \rho_{Al57} \cdot \frac{\pi \cdot D_{kn}}{Q_2 \cdot S_{kn}} = 26,167 \cdot 10^{-7} \Omega \quad (3.36)$$

Činitel přepočtu mezi proudem v tyči a proudem v kruhu nakrátko

$$\Delta = 2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot p}{Q_2} = 2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot 1}{17} = 0,3675 \quad (3.37)$$

Odpor fáze rotorového vinutí

$$R_2 = R_t + 2 \cdot \frac{R_{kn}}{\Delta^2} = 66,678 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot \frac{23,137 \cdot 10^{-7}}{0,3675^2} = 105,43 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (3.38)$$

Odpor fáze rotoru přepočtený na počet závitů statoru

$$R'_2 = R_2 \cdot 4 \cdot m_1 \cdot \frac{(N_1 \cdot k_{v1})^2}{Q_2} = 9,2429 \Omega \quad (3.39)$$

### 3.2.3 Výpočet rozptylové reaktance fáze statorového vinutí

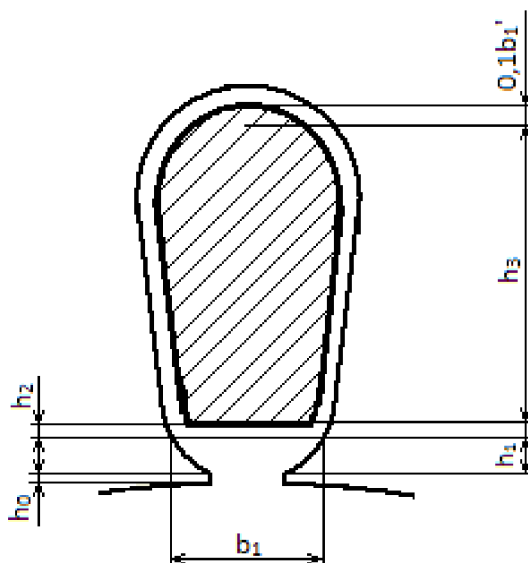
Činitel magnetické vodivosti drážky statoru

$$\lambda_{d1} = \frac{h_3}{3b_1} \cdot k_\beta + \left(0,785 - \frac{b_{01}}{2b_1} + \frac{h_2}{b_1} + \frac{h_0}{b_{01}}\right) \cdot k'_\beta = 1,3542 \quad (3.40)$$

kde činitelé  $k_\beta$  a  $k'_\beta$  jsou opět pro jednovrstvá vinutí rovny 1. Použité rozměry statorové drážky jsou zobrazeny na Obr. 3.1 a Obr. 3.6.

Činitel magnetické vodivosti čel statorového vinutí

$$\begin{aligned} \lambda_{\zeta 1} &= 0,34 \cdot \frac{q_1}{L} \cdot (l_\zeta - 0,64 \cdot \beta_1 \cdot t_p) = \\ &= 0,34 \cdot \frac{4}{0,06} \cdot (0,1637 - 0,64 \cdot 1 \cdot 0,1005) = 2,2532 \end{aligned} \quad (3.41)$$



Obr. 3.6: Statorová drážka pro výpočet činitele mag. vodivosti drážky (převzato z [7])

Pro výpočet činitele magnetické vodivosti diferenčního rozptylu je nutné provést následující výpočty.

Natočení drážek rotoru

$$b_\gamma = L \cdot \tan \gamma \quad [\text{m}] \quad (3.42)$$

Činitel natočení drážek

$$\beta_\gamma = \frac{b_\gamma}{t_{d2}} \quad [-] \quad (3.43)$$

Činitel  $\xi_1$  uvažující vliv polo zavřených drážek statoru a natočených drážek rotoru

$$\xi_1 = 2k'_\gamma \cdot k_\beta - k_{v1}^2 \cdot \left(\frac{t_{d2}}{t_{d1}}\right)^2 \cdot (1 + \beta_\gamma^2) = 1,4319 \quad (3.44)$$

kde činitel  $k'_\gamma$  je dán v grafickou závislostí  $\beta_\gamma$  a poměru  $t_{d2}/t_{d1}$  v literatuře [7].

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu statoru

$$\lambda_{dif1} = \frac{t_{d1}}{12 \cdot \delta \cdot k_c} \cdot \xi_1 = \frac{0,0084}{12 \cdot 0,0003 \cdot 1,1993} \cdot 1,4319 = 2,7784 \quad (3.45)$$

v případě uzavřených drážek rotoru, pro Carterův činitel platí  $k_c = k_{c1}$

Rozptylová reaktance fáze statoru

$$X_{r1} = 15,8 \cdot \frac{f_1}{100} \cdot \left(\frac{N_1}{100}\right)^2 \cdot \frac{L}{p \cdot q_1} \cdot (\lambda_{d1} + \lambda_{c1} + \lambda_{dif1}) \cong 10,248 \Omega \quad (3.46)$$

### 3.2.4 Výpočet rozptylové reaktance fáze rotorového vinutí

K určení činitel magnetické vodivosti drážky rotoru je nutné nejdříve určit přibližný proud tekoucí tyčí motoru.

Činitel přepočtu proudů mezi proudem statorového vinutí a proudem rotoru

$$p_i = \frac{2 \cdot m_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1}}{Q_2} \quad (3.47)$$

Předběžný proud ve vinutí rotoru

$$I_2 = k_i \cdot I_n \cdot p_i \cong 173,14 \text{ A} \quad (3.48)$$

kde  $k_i$  je činitel uvažující vliv magnetizačního proudu a odporů vinutí na poměr  $I_1/I_2$ . Hodnota tohoto činitele byla určena z grafické závislosti na účinnku motoru v literatuře [7].

Činitel magnetické vodivosti drážky rotoru

$$\begin{aligned} \lambda_{d2} &= \left[ \frac{h_1}{3b_2'} \left( 1 - \frac{\pi b_2'^2}{8S_t} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{02}}{2b_2'} \right] k_d + \left( \frac{h_0}{b_{02}} + 1,12 \left( \frac{h_{02}}{I_2} \right) 10^6 \right) = \\ &= 2,6893 \end{aligned} \quad (3.49)$$

kde  $k_d$  je činitel, jenž má pro jmenovitý chod motoru hodnotu 1. Potřebné rozměry rotorové drážky jsou zakresleny v Obr. 3.2.

Činitel magnetické vodivosti rozptylu čel rotoru závisí na rozměrech a uspořádání kruhů nakrátko

$$\lambda_{c2} = \frac{2,3 \cdot D_{kn}}{Q_2 \cdot L \cdot \Delta^2} \cdot \log \frac{4,7 \cdot D_{kn}}{2 \cdot a_{kn} + b_{kn}} = 0,6495 \quad (3.50)$$

Činitel  $\xi_2$

$$\xi_2 = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left( \frac{\pi \cdot p}{Q_2} \right)^2 - \frac{\Delta_z}{1 - \left( \frac{p}{Q_2} \right)^2} = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left( \frac{\pi \cdot 1}{17} \right)^2 - \frac{0,017}{1 - \left( \frac{1}{17} \right)^2} = 0,9898 \quad (3.51)$$

kde činitel  $\Delta_z$  byl určen z grafické závislosti v literatuře [7].

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu klecového vinutí

$$\lambda_{dif2} = \frac{t_{d2}}{12 \cdot \delta \cdot k_c} \cdot \xi_2 = \frac{0,0117}{12 \cdot 0,0003 \cdot 1,1993} \cdot 0,9898 = 2,686 \quad (3.52)$$

Rozptylová reaktance fáze rotoru bez uvažování natočení drážek

$$\begin{aligned} X_{r2} &= 7,9 \cdot f_1 \cdot L \cdot (\lambda_{d2} + \lambda_{\epsilon 2} + \lambda_{dif2}) \cdot 10^{-6} = \\ &= 7,9 \cdot 50 \cdot 0,06 \cdot (2,6893 + 0,6495 + 2,686) \cdot 10^{-6} = 142,79 \cdot 10^{-6} \Omega \end{aligned} \quad (3.53)$$

Činitel uvažující vliv natočení drážek na rozptylovou reaktanci fáze rotoru

$$\sigma_\gamma \approx 1 + 0,41 \cdot \left( \frac{b_\gamma}{t_p} \right)^2 \cdot \frac{U_{1f}}{X_{r1} \cdot I_m} = 1,2348 \quad (3.54)$$

Rozptylová reaktance fáze rotoru uvažující natočení drážek

$$X_{r2\gamma} = X_{r2} \cdot \sigma_\gamma = 142,79 \cdot 10^{-6} \cdot 1,2348 = 176,32 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (3.55)$$

Rozptylová reaktance fáze rotoru přepočtená na satorové vinutí

$$X_{r2}' = X_{r2\gamma} \cdot 4 \cdot m_1 \cdot \frac{(N_1 \cdot k_{v1})^2}{Q_2} = 15,458 \Omega \quad (3.56)$$

### 3.2.5 Výpočet příčné větve náhradního obvodu

Pro určení odporu představující ztráty v železe je nutné nejdříve určit ztráty v železe statoru.

Hmotnost jha statoru

$$\begin{aligned} m_{j1} &= \pi \cdot (D_{1e} - h_{j1}) \cdot h_{j1} \cdot L \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = \\ &= \pi \cdot (0,1206 - 0,0158) \cdot 0,0158 \cdot 0,06 \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 2,3615 \text{ kg} \end{aligned} \quad (3.57)$$

kde  $\rho_{Fe}$  je hustota železa.

Hmotnost zubů statoru

$$m_{z1} \cong h_{z1} \cdot b_{z1} \cdot Q_1 \cdot L \cdot k_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = 0,5093 \text{ kg} \quad (3.58)$$

Hlavní ztráty v železe

$$\begin{aligned} \Delta P_{Feh} &= \Delta P_{1,0} \cdot \left( \frac{f_1}{50} \right)^\beta \cdot (k_{dj} \cdot B_{j1}^2 \cdot m_{j1} + k_{dz} \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1}) = \\ &= 2,57 \cdot \left( \frac{50}{50} \right)^{1,5} \cdot (1,6 \cdot 1,567^2 \cdot 2,36 + 1,8 \cdot 1,491^2 \cdot 0,51) \cong 29,08 \text{ W} \end{aligned} \quad (3.59)$$

kde exponent  $\beta$  je dán typem použité oceli, činitelé  $k_{dj}$  a  $k_{dz}$  uvažují vliv nerovnoměrností rozložení toku v částech magnetického obvodu pro stroje do výkonu 250 kW. Měrné ztráty  $\Delta p_{1,0}$  při hodnotě magnetické indukce 1 T byly zjištěny z literatury [19].

Sériový odpor příčné větve náhradního obvodu nahrazující paralelní odpor  $R_{Fe}$

$$R_{12} = \frac{P_{Feh}}{m_1 \cdot I_m^2} = \frac{29,08}{3 \cdot 0,87^2} \cong 12,77 \Omega \quad (3.60)$$

Sériová reaktance příčné větve náhradního obvodu nahrazující paralelní reaktanci  $X_m$

$$X_{12} = \frac{U_{1f}}{I_m} - X_{r1} = \frac{230}{0,87} - 10,25 \cong 254,84 \Omega \quad (3.61)$$

Magnetizační reaktance

$$X_m \cong X_{12} \cong 254,84 \Omega \quad (3.62)$$

Odpor představující ztráty v železe

$$R_{Fe} = \frac{\frac{X_m^2}{R_{12}} + \sqrt{\left(\frac{X_m^2}{R_{12}}\right)^2 - 4 \cdot X_m^2}}{2} = \frac{\frac{255,84^2}{12,77} + \sqrt{\left(\frac{255,84^2}{12,77}\right)^2 - 4 \cdot 255^2}}{2} \cong 5071 \Omega \quad (3.63)$$

### 3.3 Výpočet proudové charakteristiky

Výpočet celkové proudu vinutí statoru vychází ze znalosti celkové impedance náhradního obvodu. Následuje výpočet jednoho bodu proudové charakteristiky pro hodnotu jmenovitého skluzu

$$s_n = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{3000 - 2830}{3000} = 0,0567 \quad (3.64)$$

Impedance vinutí statoru

$$\mathbf{Z}_1 = (R_1 + jX_{r1}) = (14,48 + j10,25) \Omega \quad (3.65)$$

Impedance vinutí rotoru přepočtená na vinutí statoru

$$\mathbf{Z}'_2 = \left( \frac{R_2'}{s} + jX_{r2}' \right) = \left( \frac{9,24}{0,0567} + j15,46 \right) = (162,96 + j15,46) \Omega \quad (3.66)$$

Impedance příčné větve

$$\mathbf{Z}_p = (R_{12} + jX_{12}) = (12,77 + j254,84) \Omega \quad (3.67)$$

Celková impedance náhradního obvodu

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_c &= \mathbf{Z}_1 + \frac{\mathbf{Z}'_2 \cdot \mathbf{Z}_p}{\mathbf{Z}'_2 + \mathbf{Z}_p} = (14,48 + j10,25) + \frac{(162,96 + j15,46) \cdot (12,77 + j254,84)}{(162,96 + j15,46) + (12,77 + j254,84)} = \\ &= (119,89 + j85,71) \Omega \end{aligned} \quad (3.68)$$

Komplexní hodnota proudu statorového vinutí

$$I_1 = \frac{U_{1f}}{Z_c} = \frac{230}{(119,89 + j85,71)} \cong (1,27 - j0,91) \text{ A} \quad (3.69)$$

Absolutní hodnota proudu statorového vinutí

$$I_1 = \sqrt{I_\xi^2 + I_j^2} = \sqrt{1,27^2 + 0,91^2} = 1,56 \text{ A} \quad (3.70)$$

kde  $I_\xi$  je činná složka proudu vinutí fáze statoru a  $I_j$  je složka jalová.

Účinník motoru (power factor)  $PF$

$$PF = \frac{I_\xi}{I_1} = \frac{1,27}{1,56} = 0,814 \quad (3.71)$$

Příkon motoru

$$P_1 = m_1 \cdot U_{1f} \cdot I_1 \cdot PF = 3 \cdot 230 \cdot 1,56 \cdot 0,814 = 876,19 \text{ W} \quad (3.72)$$

### 3.4 Výpočet momentové charakteristiky

Pro přesnější výsledky se při výpočtu momentové charakteristiky využívá Hopkinsonův činitel rozptylu respektující fázový posun fázorů  $U_1$  a  $U_{i1}$ .

Hopkinsonův činitel rozptylu

$$c_1 \approx 1 + \frac{X_{r1}}{X_m} = 1 + \frac{10,25}{254,84} \cong 1,06 \quad (3.73)$$

Mechanický moment motoru pro jmenovitou hodnotu skluzu

$$\begin{aligned} M_{mech} &= \frac{p \cdot m_1 \cdot \frac{R_2'}{s} \cdot U_{1f}^2}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left[ \left( R_1 + c_1 \cdot \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_{r1} + c_1 \cdot X'_{r2})^2 \right]} = \\ &= \frac{1 \cdot 3 \cdot \frac{9,24}{0,0567} \cdot 230^2}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \left[ \left( 14,48 + 1,06 \cdot \frac{9,24}{0,0567} \right)^2 + (10,25 + 1,06 \cdot 15,46)^2 \right]} = \\ &\cong 2,32 \text{ Nm} \end{aligned} \quad (3.74)$$

Mechanické a ventilační ztráty pro jmenovité otáčky motoru

$$\Delta P_{mech} = K_T \cdot \left( \frac{n}{1000} \right)^2 \cdot (10 \cdot D_1)^3 = 5 \cdot \left( \frac{2830}{1000} \right)^2 \cdot (10 \cdot 0,064)^3 \cong 10,5 \text{ W} \quad (3.75)$$

kde činitel  $K_T$  je dán vnějším průměrem statoru a počtem pólových dvojic.

Přídavné ztráty při jmenovitém zatížení

$$\Delta P_{dn} = 0,025 \cdot P_n = 0,025 \cdot 600 = 15 \text{ W} \quad (3.76)$$



Přídavné ztráty při zatížení

$$\Delta P_d = \Delta P_{dn} \cdot \left(\frac{I_1}{I_n}\right)^2 = 15 \cdot \left(\frac{1,56}{1,6}\right)^2 = 14,26 \text{ W} \quad (3.77)$$

Moment na hřídeli motoru při jmenovitých otáčkách

$$M = M_{mech} - \frac{\Delta P_{mech} + \Delta P_d}{\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}} = 2,32 - \frac{10,5 + 14,26}{\frac{2 \cdot \pi \cdot 2830}{60}} = 2,23 \text{ Nm} \quad (3.78)$$

Výkon motoru při jmenovitých otáčkách

$$P_2 = M \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = 2,23 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot 2830}{60} = 661 \text{ W} \quad (3.79)$$

### 3.5 Výpočet Ztrát a účinnosti

Hlavní ztráty v železe statoru byly vypočteny části 3.2.5 *Výpočet příčné větve náhradního obvodu*. Dodatečné ztráty v železe statoru lze zanedbat, stejně jako ztráty v železe magnetického obvodu rotoru. Mechanické a dodatečné ztráty při jmenovitém chodu byly určeny v části 3.3 *Výpočet momentové charakteristiky*.

Ztráty ve vinutí statoru

$$\Delta P_{j1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2 = 3 \cdot 14,48 \cdot 1,56^2 = 105,72 \text{ W} \quad (3.80)$$

Přepočtená hodnota proudu rotoru na vinutí statoru [6]

$$I_2' = \frac{U_{1f}}{\sqrt{\left[ \left( R_1 + c_1 \cdot \frac{R_2'}{S} \right)^2 + (X_{r1} + c_1 \cdot X_{r2}')^2 \right]}} \quad (3.81)$$

$$= \frac{230}{\sqrt{\left[ \left( 14,48 + 1,06 \cdot \frac{9,24}{0,0567} \right)^2 + (10,25 + 1,06 \cdot 15,46)^2 \right]}} = 1,22 \text{ A}$$

Ztráty ve vinutí rotoru

$$\Delta P_{j2} = m_1 \cdot R_2' \cdot I_2'^2 = 3 \cdot 9,24 \cdot 1,22^2 = 41,26 \text{ W} \quad (3.82)$$

Celkové ztráty motoru při jmenovitém chodu

$$\begin{aligned} \Delta P_{celk} &= \Delta P_{j1} + \Delta P_{j2} + \Delta P_{Feh} + \Delta P_{mech} + \Delta P_d = \\ &= 105,75 + 41,26 + 29,08 + 10,5 + 14,26 = 200,85 \text{ W} \end{aligned} \quad (3.83)$$

Účinnost motoru při jmenovitých otáčkách

$$\eta = \left(1 - \frac{\Delta P_{celk}}{P_1}\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{200,85}{876,19}\right) \cdot 100 = 77,07 \% \quad (3.84)$$

## 4 ANALÝZA PRODLOUŽENÉHO MAGNETICKÉHO OBVODU

Délku magnetického obvodu lze měnit úpravou počtu plechů ve statorovém a rotorovém svazku magnetického obvodu. V důsledku pevné tloušťky jednotlivých plechů, lze měnit délku magnetického obvodu pouze o násobky této hodnoty. Je zřejmé, že změna délky magnetického obvodu, ovlivní i celkové ztráty v motoru a jeho celkovou účinnost.

Důležitou podmínkou při manipulaci s délkou magnetického obvodu je minimální změna hodnoty momentu, tedy i výkonu motoru. Zejména v pracovní oblasti motoru je žádoucí, aby byl moment konstantní a pokud možno i odebíraný proud ze sítě by měl zůstat nezměněn. Moment motoru je závislý na veličinách dle následujícího vztahu [25]

$$M \approx L \cdot B_{\delta} \cdot I_2' \quad [\text{Nm}] \quad (4.1)$$

Rovnice 4.1 není přesným vztahem pro výpočet momentu motoru, zobrazuje závislost momentu na veličinách, které jsou závislé na délce magnetického obvodu. Vystupuje zde samotná délka magnetického obvodu, magnetická indukce ve vzduchové mezeře, pro kterou platí rovnice 4.2 a proud v rotoru daný vztahem 4.3.

$$B_{\delta} = \frac{\Phi}{\alpha_{\delta} \cdot t_p \cdot L} \quad [\text{T}] \quad (4.2)$$

$$I_2' = \frac{U_{1f}}{\sqrt{\left[ \left( R_1 + c_1 \cdot \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_{r1} + c_1 \cdot X_{r2}')^2 \right]}} \quad [\text{A}] \quad (4.3)$$

Prodlužováním magnetického obvodu klesá magnetická indukce ve vzduchové mezeře důsledkem nepřímé úměrné závislosti na délce magnetického obvodu. Klesá i proud v rotoru důsledkem zvýšených odporů vinutí a zvýšené rozptylové reaktance rotoru. I když se rozptylová reaktance statoru s narůstající délkou magnetického obvodu snižuje, nestačí kompenzovat zvýšenou hodnotu odporů a rozptylové reaktance rotoru [7]. Výsledkem pouze prodloužení magnetického obvodu je tedy i nežádoucí snížení momentu motoru. Při změně délky magnetického obvodu je nutné měnit další parametr motoru, který by kompenzoval změnu momentu.

Ke zjištění tohoto parametru uvažujme konstantní délku magnetického obvodu s cílem dosáhnout navýšení momentu. Z rovnice 4.1 je patrné, že dosažením vyššího sycení magnetického obvodu nebo vyššího proudu v rotoru dojde k navýšení momentu. Nárůstu proudu v rotoru je dosaženo dle rovnice 4.3, snížením hodnot odporů vinutí a rozptylových reaktancí v motoru. Jelikož je nežádoucí jakákoli změna tvaru drážek, či typu vodiče ve vinutí statoru, jediný způsob jak změnit tyto parametry je změna počtu vodičů (počtu závitů) v drážce statoru. Konkrétně pro dosažení vyššího proudu v rotoru je nutné snížení počtu závitů ve vinutí statoru. Snížením závitů ve statoru naroste magnetický tok generovaný vinutím statoru a tedy i sycení magnetického obvodu.

Výsledkem této analýzy je, že při změně délky magnetického obvodu je nutné měnit i počet závitů ve vinutí statoru, pro udržení konstantního momentu a výkonu motoru [25].

## 4.1 Výpočet upraveného motoru

Výpočet upraveného motoru byl proveden v prostředí programu Matlab společnosti MathWorks, stejně jako původní výpočet motoru. Hlavní úpravou původního programu je přidání dvou cyklů typu *for*. Jeden cyklus prochází hodnoty ze zadaného vektoru délek magnetického obvodu. Druhý cyklus prochází vektor udávající počty vodičů v drážce statoru. Část kódu je zobrazena na Obr. 4.1.

```

93
94 - for i=1:length(Vd)
95 -     for j=1:length(L)
96 -         Fi(i) = ( kE * (Un / sqrt( 3 ) ) ) / ( 4 * kB * N1(i) * f * kv);
97 -         Bd(i,j) = Fi(i) / ( alfad * tp * L(j));
98 -         Bj1(i,j) = Fi(i) / ( 2 * hj1 * L(j) * kfe);
99 -         Bz1(i,j) = ( Bd(i,j) * td1 * L(j) ) / ( bz1 * L(j) * kfe);
100 -     end;
101 - end;
102

```

Obr. 4.1: Ukázka výpočtu motoru

Ukázka zápisu na Obr. 4.1 zobrazuje výpočet magnetického toku, magnetické indukce ve jhu statoru a magnetické indukce v zubech statoru motoru. Rozsah počtu vodičů v drážce statoru  $V_d$  je  $\pm 10$  vodičů od původní hodnoty s krokem 1 vodič. Rozsah délky magnetického obvodu  $L$  je od 60 mm do 70 mm s krokem 0,5 mm, odpovídající tloušťce plechu magnetického obvodu.

Při výpočtu byly využity vztahy uvedené v kapitole 3. Zde však veličiny, které jsou závislé jak na délce magnetického obvodu, tak na počtu vodičů v drážce statoru, jsou dány čtvercovou maticí o rozměrech  $21 \times 21$ . Řádky této matice odpovídají rozsahu vodičů v drážce statoru a sloupce jednotlivým délkám magnetického obvodu. Je tak možné zjistit hodnotu dané veličiny pro libovolnou kombinaci počtu vodičů v drážce statoru a délky magnetického obvodu ze zadaných rozsahů. Hodnoty v 11. řádku a v 1. sloupci dané veličiny odpovídají hodnotám veličin původního motoru vypočteného v kapitole 3.

Při výpočtu magnetického obvodu již nebylo možné ručně odečítat a dosazovat hodnoty intenzit jednotlivých částí obvodu z magnetizační charakteristiky. Bylo proto nutné vytvořit funkci uvedenou na Obr. 4.2 nahrazující magnetizační charakteristiku.

```
function [ H ] = intenzita( B )  
  
    B1 = [0.1:0.1:1.8];  
    H1 = [67.8 88.3 99.2 108 116 124 132 142 152 164 180 206 254 363 690 1760 4230 8130];  
  
    for i = 2:18  
        if B1(i) >= B && B1(i-1) <= B  
            H = H1(i-1) + (H1(i) - H1(i-1)) / (B1(i) - B1(i-1)) * (B - B1(i-1));  
        else if B > B1(18)  
            H = H1(18);  
        end;  
    end;  
end
```

Obr. 4.2: Funkce nahrazující magnetizační charakteristiku

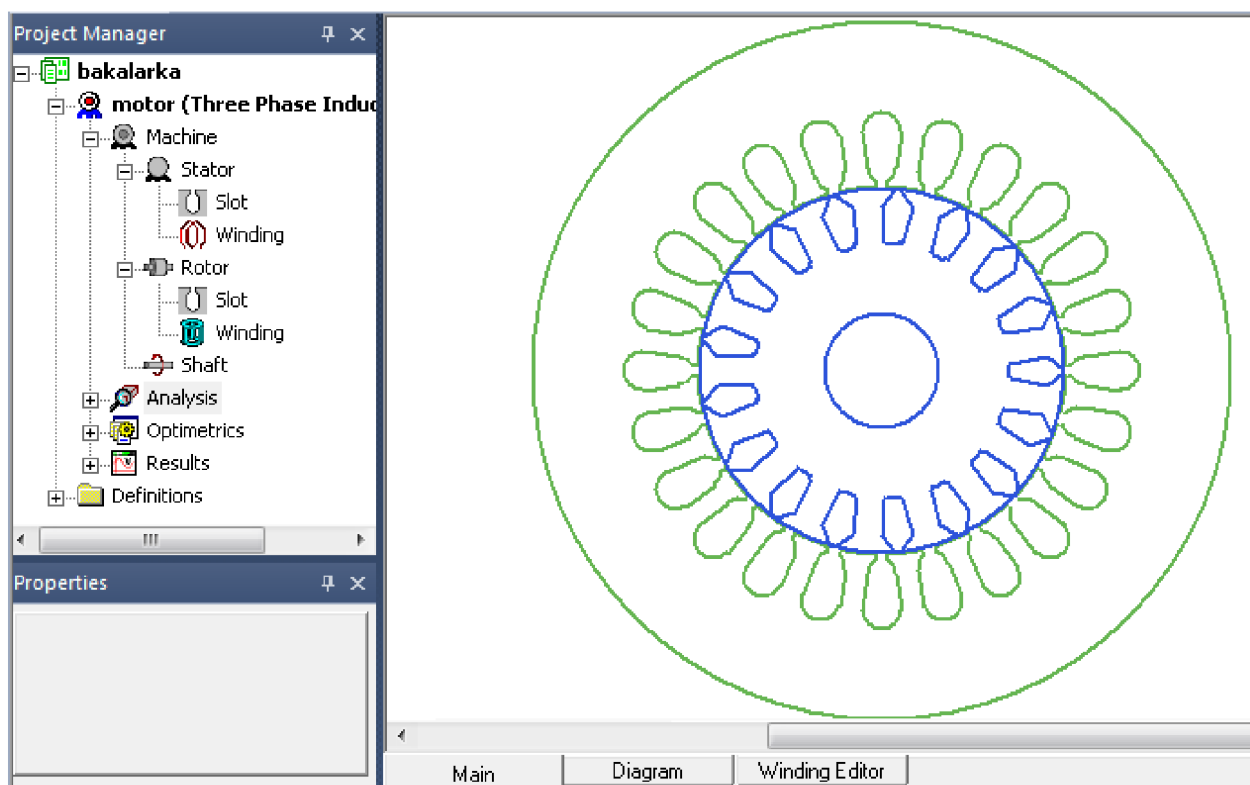
Hodnoty vektorů B1 a H1 na Obr. 4.2 byly odečteny z literatury [19], kde vektor B1 znázorňuje magnetické indukce materiálu M700-50A a vektor H1 zobrazuje intenzity magnetického pole. Platí, že magnetická indukce v *i-tém* sloupci vektoru B1 odpovídá intenzitě v *i-tém* sloupci vektoru H1 dle magnetizační charakteristiky materiálu M700-50A. Vstupem funkce je magnetická indukce dané části magnetického obvodu, výstupem je odpovídající intenzita magnetického pole. Hodnoty výstupní intenzity magnetického pole je dosaženo pomocí interpolace dvou okolních bodů magnetizační charakteristiky a zadané magnetické indukce. Součástí funkce je i kontrola maximální hodnoty intenzity při nadměrném sycení.

## 5 VÝPOČET V PROSTŘEDÍ MAXWELL RMXprt

Program RMXprt je zaměřený na návrh a optimalizaci točivých elektrických strojů. Díky svému přehlednému grafickému rozhraní je vhodný pro rychlý návrh stroje. Při výpočtech charakteristik využívá náhradního schématu, zároveň obsahuje šablony řady různých typů motorů včetně asynchronních strojů. Výpočty provádí na základě konstrukčních parametrů a požadovaných vlastností stroje [26].

Ukázka grafického rozhraní programu je na Obr. 5.1. Při návrhu bylo po výběru šablony stroje nutné v záložce *Machine* zadat mechanické ztráty pro určité otáčky a dodatečné ztráty jako procentní část ze jmenovitého výkonu stroje. Následovalo zadání geometrie statoru a rotoru včetně rozměrů drážek. Dále bylo nutné určit materiály magnetického obvodu a obou vinutí motoru. Samotný program RMXprt obsahuje rozsáhlou knihovnu materiálů s možností úpravy jejich parametrů, či možnost vložení vlastního materiálu společně s jeho magnetizační charakteristikou, závislostí ztrát na magnetické indukci a řadou dalších parametrů. Posledním krokem návrhu bylo zadání jmenovitých hodnot, výkonu, otáček, napětí a počtu pólů v záložce *Analysis*. Další užitečnou funkcí programu RMXprt je možnost parametrizace většiny zadaných rozměrů pomocí záložky *Optimetrics*, což opět urychluje práci s tímto programem.

Výsledky návrhu motoru v programu RMXprt jsou uvedeny v kapitole 7.



Obr. 5.1: Ukázka prostředí RMXprt

## 6 MĚŘENÍ ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ

Měření bylo provedeno na dvou vzorcích motorů. Motor č. 1 je původní motor s délkou magnetického obvodu 60 mm a původním počtem vodičů v drážce statoru. Motor č. 2 je stejného typu, se stejnými štítkovými parametry jako motor č. 1, s těmi rozdíly, že motor č. 2 má prodlouženou délku magnetického obvodu na 70 mm a snížený počet vodičů v drážce statoru o 5, viz Tab. 6.1.

Oba motory byly měřeny podle stejného postupu v různých časech. Hlavním cílem měření bylo určení účinnosti obou vzorků motorů. Při měření a následujícím zpracování výsledků se postupovalo dle normy ČSN EN 60034-2-1 (35000), ze které pochází všechny vztahy v této kapitole [21]. Účinnost motorů byla stanovena pomocí jednotlivých složek ztrát v motorech.

Tab. 6.1: Měřené motory

	$L$ [mm]	$\Delta V_d$ [-]
Motor 1	60	0
Motor 2	70	-5

POZN.: Veličina  $\Delta V_d$  značí změnu počtu vodičů v drážce statoru oproti původnímu motoru

### 6.1 Zkouška při jmenovitém zatížení

Jako první byla vždy provedena zkouška při jmenovitém zatížení motoru. Pro zvýšení přesnosti bylo měření u motoru č. 1 opakováno desetkrát, u motoru č. 2 čtyřikrát. Výsledné hodnoty byly zprůměrovány. Ještě před začátkem zkoušky byly změřeny odpory statorového vinutí motoru Tab. 4.1. Jelikož byla statorová vinutí motorů zapojena do hvězdy, byly vždy změřeny odpory pro dvě fáze dohromady. Poloviční hodnota z průměru hodnot změřených odporů udává odpor jedné fáze vinutí. Vlivem ručního navíjení statorového vinutí u motoru č. 2 jsou hodnoty těchto odporů mnohem vyrovnanější.

Tab. 6.2: Odpory vinutí při teplotě okolí

	Motor 1	Motor 2
$R_{1-2}$ [ $\Omega$ ]	22,983	22,872
$R_{1-3}$ [ $\Omega$ ]	24,238	22,863
$R_{2-3}$ [ $\Omega$ ]	23,905	22,894
$R_{\text{prum}}$ [ $\Omega$ ]	23,709	22,876
$R_f$ [ $\Omega$ ]	11,854	11,438

Následovalo zatěžování motorů jmenovitým momentem. Po uplynutí dostatečně dlouhé doby, po kterou se motory stačily zahřát na provozní teplotu, byly odečteny hodnoty v Tab. 4.2. Opět byly změřeny hodnoty odporů vinutí, viz Tab. 4.3.

Tab. 6.3: Změřené hodnoty při jmenovitém zatížení

	$U$ [V]	$I$ [A]	$PF$ [-]	$P_1$ [W]	$n$ [min <sup>-1</sup> ]	$f$ [Hz]	$M$ [Nm]
Motor 1	400,2	1,408	0,791	772,47	2846,1	50,001	2,029
Motor 2	400,1	1,339	0,816	756,54	2847,3	50,001	2,019

Tab. 6.4: Odporů vinutí ve jmenovitém bodě

	Motor 1	Motor 2
$R_{1-2}$ [ $\Omega$ ]	26,210	25,780
$R_{1-3}$ [ $\Omega$ ]	28,090	25,730
$R_{2-3}$ [ $\Omega$ ]	27,400	25,740
$R_{prum}$ [ $\Omega$ ]	27,233	25,750
$R_f$ [ $\Omega$ ]	13,617	12,875

Ze znalosti teploty okolí 22°C a hodnot odporů vinutí při vypnutém a zatíženém motoru byla vypočtena provozní teplota vinutí motoru č. 1 na 57°C, při měření motoru č. 2 byla naměřena teplota okolí 23°C a vypočtena provozní teplota 55°C [21]. Jak při teplotě okolí, tak i ve jmenovitém bodě má motor č. 2 nižší hodnotu odporu fáze statorového vinutí než motor č. 1. Jedná se o důsledek sníženého počtu závitů vinutí statoru motoru č. 2.

## 6.2 Zkouška křivky zatížení

Měření zatěžovací charakteristiky bylo provedeno pro šest bodů zatížení, od 25% po 125% hodnoty jmenovitého zatížení, v krocích které udává norma. Opět byly změřeny odpory vinutí jako v předchozím případě, před začátkem měření a po dokončení měření. Poté byly interpolací dopočítány hodnoty odporů vinutí pro všechna zatížení. Změřené veličiny a vypočtené odpory vinutí fáze statoru pro motor č. 1 jsou v Tab. 6.5, pro motoru č. 2 v Tab. 6.6.

Tab. 6.5: Změřené hodnoty křivky zatížení motoru 1

$M$ [Nm]	$P_1$ [W]	$I$ [A]	$U$ [V]	$f$ [Hz]	$n$ [min <sup>-1</sup> ]	$s$ [-]	$R_f$ [ $\Omega$ ]
2,533	959,533	1,656	400,19	50,001	2804,11	0,065	13,636
2,331	890,811	1,563	400,198	49,999	2821,78	0,059	13,629
2,232	849,156	1,508	400,200	50,001	2830,00	0,057	13,625
1,518	561,522	1,170	400,221	50,008	2890,22	0,037	13,597
1,004	396,411	1,017	400,231	49,981	2928,78	0,023	13,576
0,500	236,000	0,915	400,241	49,985	2964,78	0,011	13,557

Tab. 6.6: Změřené hodnoty křivky zatížení motoru 2

$M$ [Nm]	$P_1$ [W]	$I$ [A]	$U$ [V]	$f$ [Hz]	$n$ [min <sup>-1</sup> ]	$s$ [-]	$R_f$ [Ω]
2,547	927,750	1,581	400,000	50,002	2798,000	0,067	12,945
2,330	894,925	1,533	400,000	50,000	2820,750	0,060	12,916
2,226	844,025	1,461	400,000	50,000	2830,500	0,056	12,903
1,519	575,033	1,122	400,100	50,006	2890,000	0,037	12,808
0,997	401,375	0,924	400,125	50,006	2929,500	0,024	12,738
0,498	239,967	0,786	400,200	50,007	2964,667	0,012	12,672

Pro každý bod zatěžovací charakteristiky byly určeny ztráty ve vinutí statoru dle vztahu

$$\Delta P_{j1} = 3 \cdot R_f \cdot I^2 \quad [\text{W}] \quad (6.1)$$

Ztráty v rotorovém vinutí se určili podle

$$\Delta P_{j2} = (P_1 - \Delta P_{j1} - \Delta P_{Fe}) \cdot s \quad [\text{W}] \quad (6.2)$$

Ztráty v železe  $\Delta P_{Fe}$  a mechanické ztráty  $\Delta P_{mech}$  byly zjištěny ze zkoušky naprázdno [21].

### 6.3 Zkouška naprázdno

Při zkoušce naprázdno je motor odpojen od zátěže a veškerý příkon je spotřebován na krytí ztrát v železe, mechanických ztrát a malých ztrát naprázdno ve vinutí, způsobené proudem  $I_0$ . Zkouška proběhla pro osm napětíových hodnot, kdy vyšší hodnoty napětí byly použity ke stanovení ztrát v železe a nižší pro mechanické ztráty. Opět se určili odpory vinutí fází statoru na začátku a konci zkoušky, které se následně interpolovaly i pro ostatní měřené body. Změřené veličiny a vypočtené hodnoty odporů vinutí fáze statoru motoru č. 1 jsou v Tab. 6.7, motoru č. 2 v Tab. 6.8.

Tab. 6.7: Změřené hodnoty ze zkoušky naprázdno motoru 1

$U_0$ [V]	$I_0$ [A]	$P_0$ [W]	$R_{f0}$ [Ω]
441,06	1,23	125,87	12,99
400,26	0,88	85,06	12,96
380,98	0,78	73,09	12,95
360,83	0,69	63,77	12,95
240,67	0,39	34,20	12,93
200,56	0,31	28,51	12,92
160,44	0,25	24,48	12,92
120,33	0,21	21,54	12,92



Tab. 6.8: Změřené hodnoty ze zkoušky naprázdno motoru 2

$U_0$ [V]	$I_0$ [A]	$P_0$ [W]	$R_{f0}$ [Ω]
441,00	0,89	91,13	12,37
399,40	0,71	69,90	12,36
380,90	0,65	62,40	12,35
361,20	0,59	55,18	12,34
241,40	0,36	31,20	12,29
201,68	0,30	26,50	12,27
159,70	0,24	22,33	12,26
119,90	0,20	18,83	12,24

Porovnáním změřených proudů a příkonů mezi motory v Tab. 6.7 a Tab. 6.8 lze vypožorovat, že motor č. 2 bude mít konstantní ztráty nižší než motor č. 1.

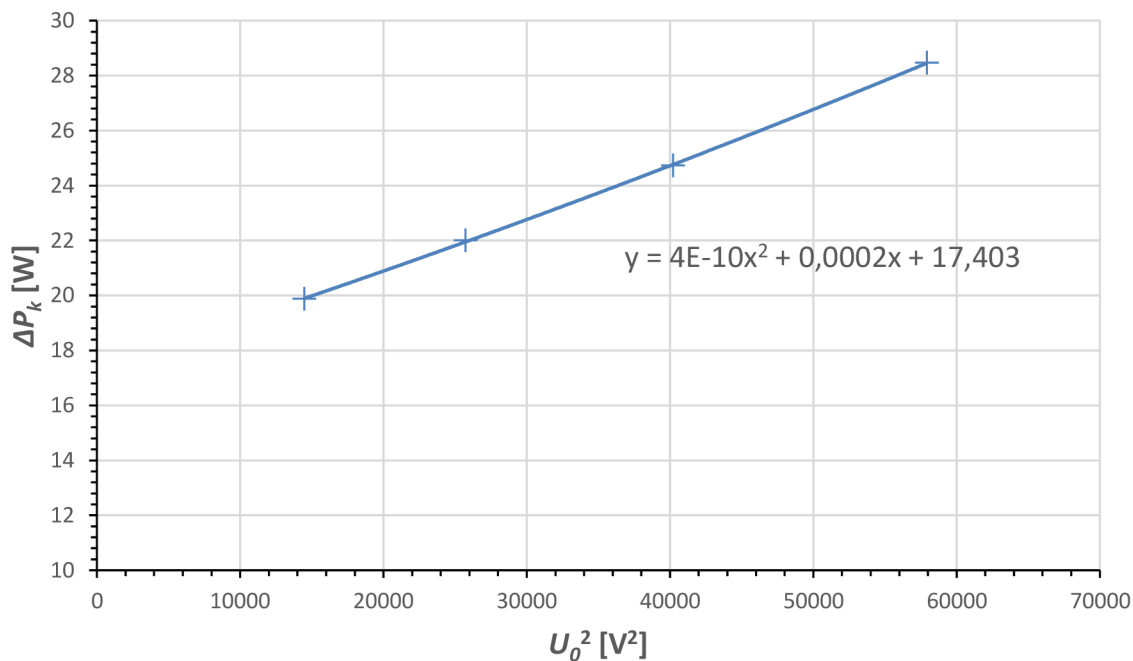
Ztráty ve vinutí způsobené proudem  $I_0$  se vypočetli z

$$\Delta P_{j10} = 3 \cdot R_{f0} \cdot I_0^2 \quad [\text{W}] \quad (6.3)$$

Pro konstantní ztráty, které jsou dány ztrátami v železe a mechanickými ztrátami, platí

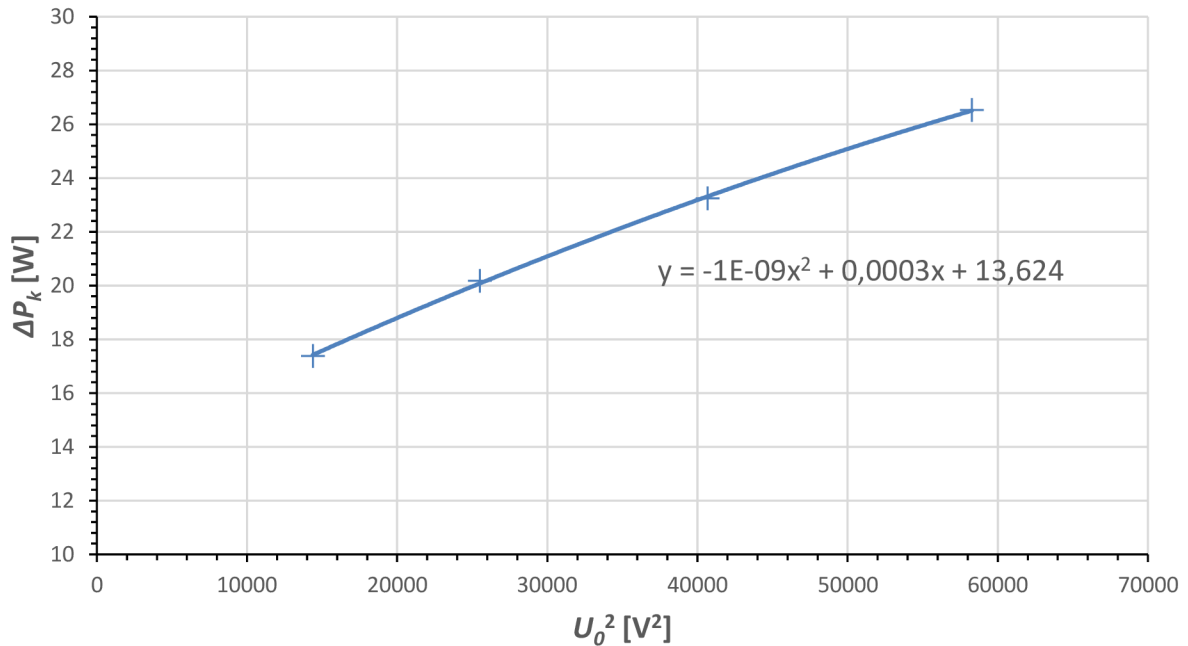
$$\Delta P_k = P_0 - \Delta P_{j10} \quad [\text{W}] \quad (6.4)$$

Mechanické ztráty motoru č. 1 při přibližně synchronních otáčkách  $\Delta P_{mech0}$  jsou zjištěny z Obr. 6.1, kdy jsou tyto ztráty určeny průsečíkem vynesené křivky a osou konstantních ztrát, kdy je nulové napětí. Dle rovnice v Obr. 6.1 odpovídají mechanické ztráty hodnotě 17,403 W.



Obr. 6.1: Určení mechanických ztrát motoru 1

Mechanické ztráty motoru č. 2 při přibližně synchronních otáčkách  $\Delta P_{mech0}$  jsou podobně určeny z Obr. 6.2. Dle rovnice v Obr. 6.2 odpovídají mechanické ztráty motoru č. 2 hodnotě 13,624 W.



Obr. 6.2: Určení mechanických ztrát motoru 2

Korigované mechanické ztráty jsou dány rovnicí

$$\Delta P_{mech} = \Delta P_{mech0} \cdot (1 - s)^{2,5} \quad [\text{W}] \quad (6.5)$$

Ztráty v železe jsou pro každý motor určeny pomocí závislostí na Obr. 6.3 nebo Obr. 6.4 a vnitřního napětí  $U_i$  dané

$$U_i = \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R \cdot \cos \varphi\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R \cdot \sin \varphi\right)^2} \quad [\text{V}] \quad (6.6)$$

kde hodnoty  $U$ ,  $I$ ,  $\cos \varphi$  a  $R$  odpovídají zkoušce při zatížení pro každý motor.

Výsledné ztráty v železe byly určeny dosazením hodnot napětí  $U_i$  do rovnice v Obr. 6.3 pro motor č. 1, pro motor č. 2 do rovnice v Obr. 6.4.

Poslední typ ztrát, které bylo třeba určit, byly ztráty přídavné při zatížení

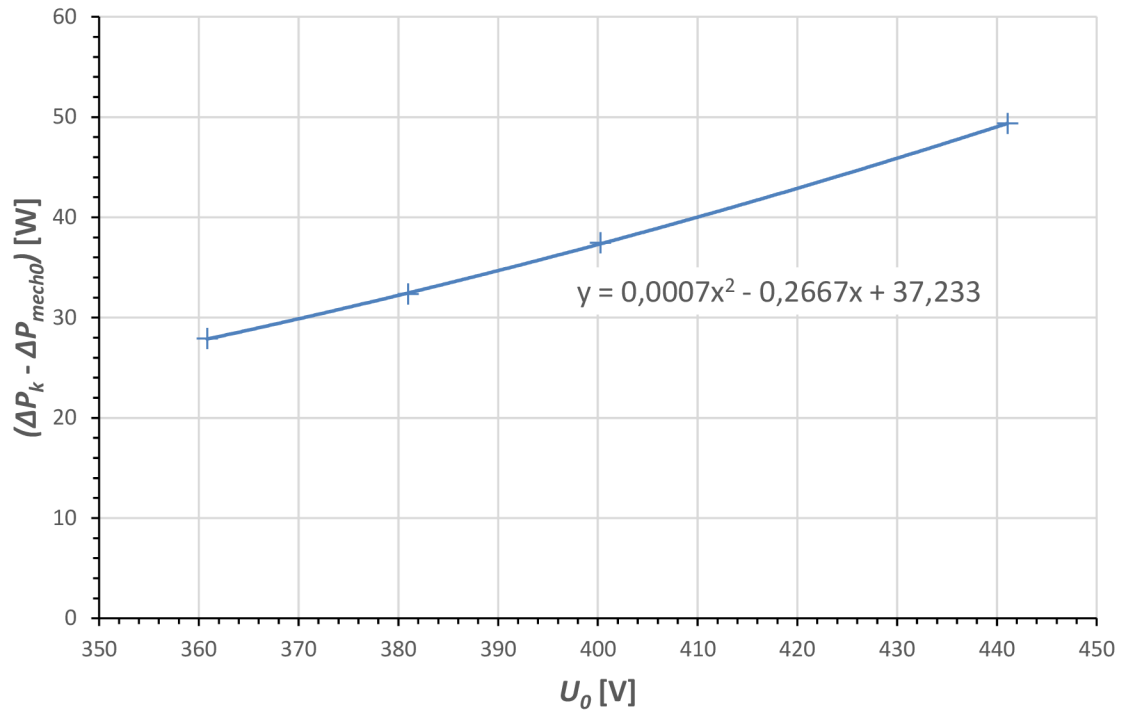
$$\Delta P_d = P_1 - P_2 - \Delta P_{j1} - \Delta P_{j2} - \Delta P_{Fe} - \Delta P_{mech} \quad [\text{W}] \quad (6.7)$$

Celkové ztráty v motoru jsou

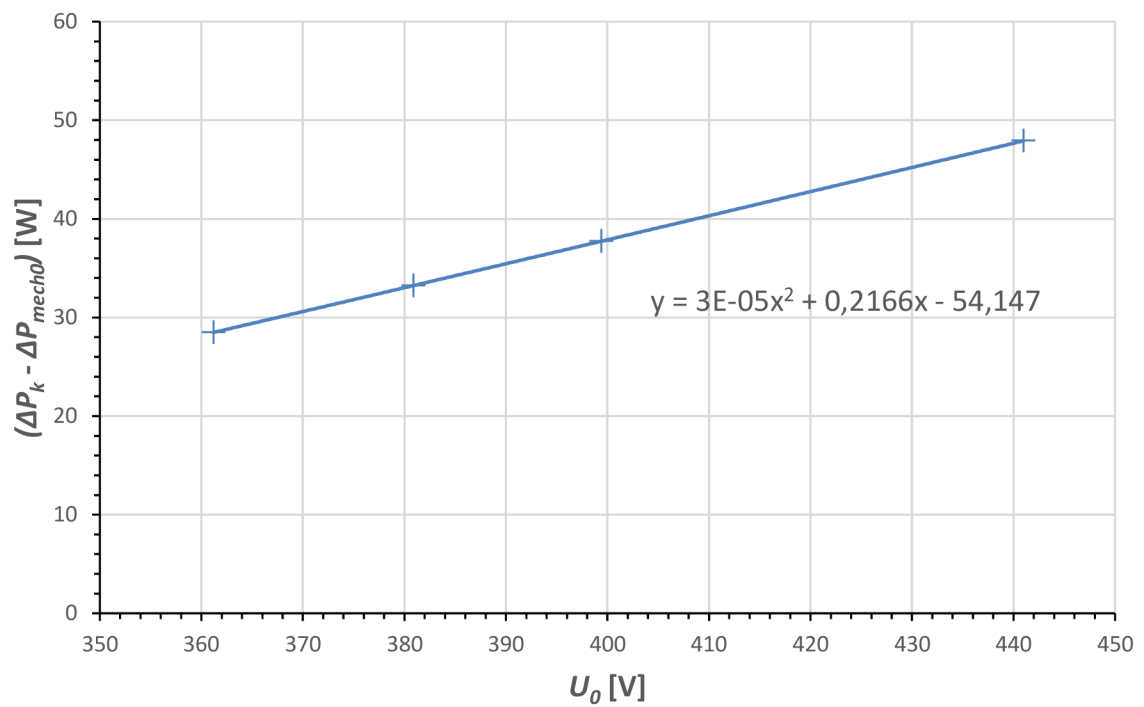
$$\Delta P_{celk} = \Delta P_{j1} + \Delta P_{j2} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_d \quad [\text{W}] \quad (6.8)$$

Výsledná účinnost motoru je dána vztahem [19]

$$\eta = \frac{P_1 - \Delta P_{celk}}{P_1} \cdot 100 \quad [\%] \quad (6.9)$$



Obr. 6.3: Určení ztrát v železe motoru 1



Obr. 6.4: Určení ztrát v železe motoru 2

## 6.4 Výsledky měření dle normy [21]

Tab. 6.9: Vypočtené hodnoty ztrát ve jmenovitých bodech obou motorů

	M [Nm]	P <sub>1</sub> [W]	P <sub>2</sub> [W]	ΔP <sub>j1</sub> [W]	ΔP <sub>j2</sub> [W]	ΔP <sub>Fe</sub> [W]	ΔP <sub>mech</sub> [W]	ΔP <sub>d</sub> [W]	ΔP <sub>celk</sub> [W]	η [%]
Motor 1	2,029	773,6	594,4	81,8	33,9	35,5	15,2	13,1	179,2	76,8
Motor 2	2,019	757,1	602,1	69,6	33,6	31,5	11,9	4,5	151,2	80,0

Tab. 6.10: Vypočtené hodnoty ze zatěžovací charakteristiky motoru 1

M [Nm]	s [-]	P <sub>1</sub> [W]	P <sub>2</sub> [W]	ΔP <sub>j1</sub> [W]	ΔP <sub>j2</sub> [W]	ΔP <sub>mech</sub> [W]	ΔP <sub>Lr</sub> [W]	ΔP <sub>celk</sub> [W]	η [%]
2,53	0,065	961,1	743,7	113,3	53,5	14,7	19,7	236,7	75,4
2,33	0,059	892,2	688,8	100,9	45,3	14,9	16,6	213,3	76,1
2,23	0,057	850,5	661,4	93,8	41,2	15,0	15,3	200,9	76,4
1,52	0,037	562,2	459,4	56,4	17,4	15,8	7,1	132,3	76,5
1,00	0,023	396,9	308	42,5	7,5	16,4	3,1	105,1	73,5
0,50	0,011	236,4	155,1	34,4	1,9	16,9	0,8	89,5	62,1

Tab. 6.11: Vypočtené hodnoty ze zatěžovací charakteristiky motoru 2

M [Nm]	s [-]	P <sub>1</sub> [W]	P <sub>2</sub> [W]	ΔP <sub>j1</sub> [W]	ΔP <sub>j2</sub> [W]	ΔP <sub>mech</sub> [W]	ΔP <sub>Lr</sub> [W]	ΔP <sub>celk</sub> [W]	η [%]
2,55	0,067	928,6	746,2	97,6	54,1	11,4	7,2	201,8	78,3
2,33	0,060	895,7	688,2	91,5	46,4	11,7	6,0	187,1	79,1
2,23	0,056	844,7	659,9	83,1	41,4	11,8	5,5	173,3	79,5
1,52	0,037	575,4	459,6	48,7	18,3	12,4	2,5	113,5	80,3
1,00	0,024	401,6	305,8	32,8	8,0	12,8	1,1	86,3	78,5
0,50	0,012	240,1	154,7	23,6	2,2	13,2	0,3	70,9	70,5

Tab. 6.12: Vypočtené hodnoty z měření naprázdno motoru 1

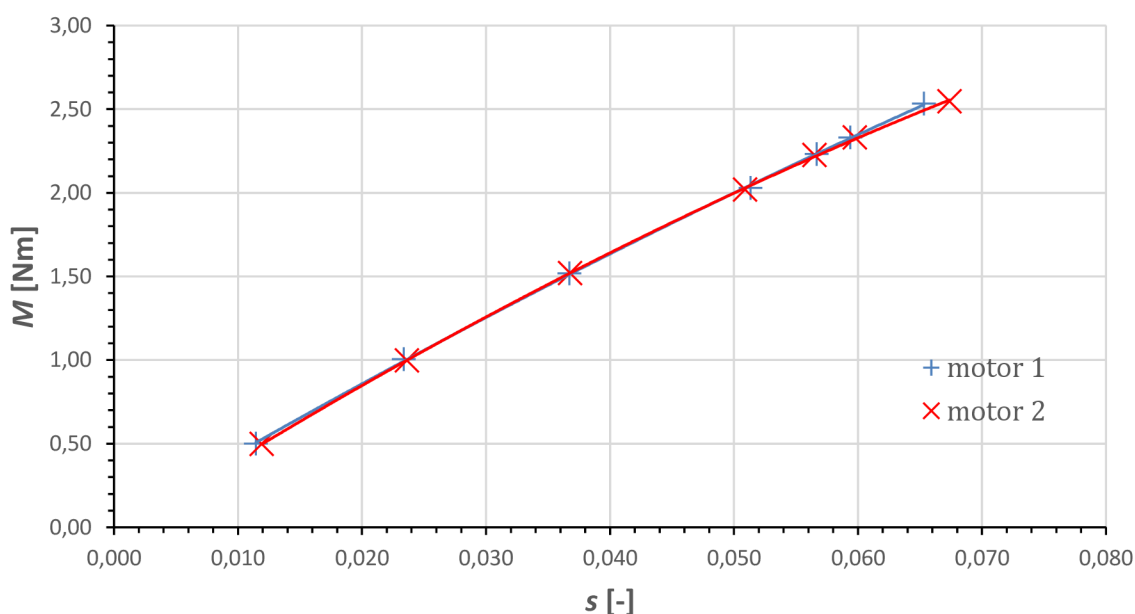
U <sub>0</sub> [V]	ΔP <sub>j10</sub> [W]	ΔP <sub>k</sub> [W]	ΔP <sub>mech0</sub> [W]	ΔP <sub>Fe</sub> [W]
441	59,1	66,8	17,4	49,4
400	30,2	54,8	17,4	37,4
381	23,4	49,7	17,4	32,3
361	18,5	45,3	17,4	27,9
241	5,7	28,5	17,4	11,1
201	3,8	24,7	17,4	7,3
160	2,5	22,0	17,4	4,6
120	1,7	19,9	17,4	2,5

Tab. 6.13: Vypočtené hodnoty z měření naprázdno motoru 2

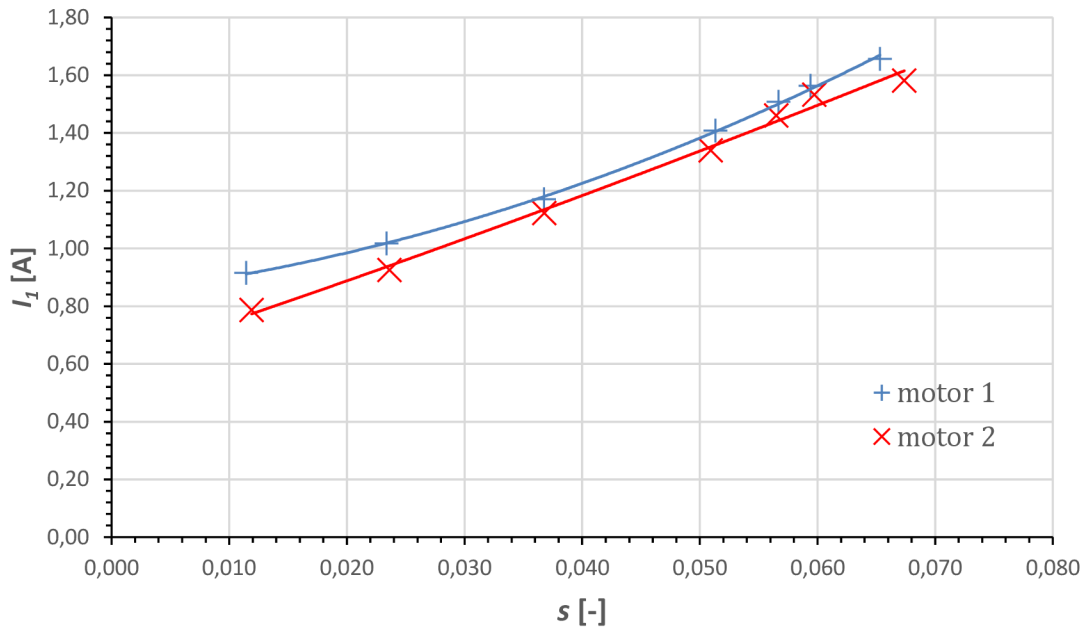
$U_0$ [V]	$\Delta P_{j10}$ [W]	$\Delta P_k$ [W]	$\Delta P_{mech0}$ [W]	$\Delta P_{Fe}$ [W]
441	29,6	61,5	13,6	47,9
399	18,5	51,4	13,6	37,7
381	15,6	46,8	13,6	33,2
361	13,1	42,1	13,6	28,5
241	4,7	26,5	13,6	12,9
202	3,3	23,2	13,6	9,6
160	2,2	20,2	13,6	6,5
120	1,4	17,4	13,6	3,8

Z vypočtených hodnot uvedených v Tab. 6.9 – 6.13 je patrný vliv prodlouženého magnetického obvodu a sníženého počtu vodičů ve satorové drážce na jednotlivé druhy ztrát uvnitř motoru. Ztráty ve vinutí statoru jsou vlivem sníženého počtu závitů vinutí statoru motoru č. 2 nižší, ztráty ve vinutí rotoru jsou téměř stejné, vlivem prodloužené klece rotoru mohlo dojít k jejich mírnému nárůstu. I přes zvýšené množství použitých plechů magnetického obvodu jsou ztráty v železe stejné nebo nižší. Tento nárůst objemu materiálu je kompenzován menší magnetickou indukcí ve všech částech magnetického obvodu. V případě mechanických i dodatečných ztrát došlo u motoru č. 2 k poklesu. Celkově se účinnost upraveného motoru zvedla místy až o 3 %, zejména vlivem poklesu Joulových ztrát ve vinutí statoru, dále pak i vlivem poklesu mechanických a dodatečných ztrát.

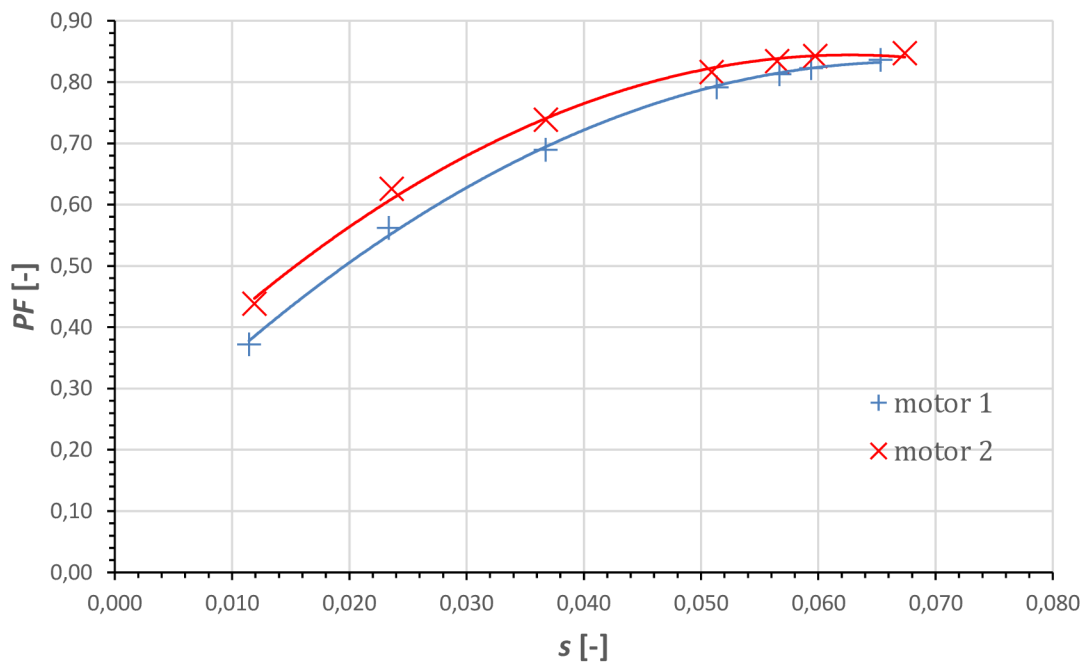
Obr. 6.5 zobrazuje porovnání momentových charakteristik v pracovních oblastech obou motorů. Obr. 6.6 porovnává proudové charakteristiky a Obr. 6.7 porovnává závislost účinníku na skluzu v pracovních oblastech motorů. Závislosti na Obr. 6.5 – 6.7 vychází z hodnot v Tab. 6.3, 6.5 a 6.6.



Obr. 6.5: Porovnání pracovní oblasti momentových charakteristik obou motorů



Obr. 6.6: Porovnání pracovní oblasti proudových charakteristik obou motorů



Obr. 6.7: Porovnání účinnků v závislosti na skluzu obou motorů

Z Obr. 6.5 je patrné, že upravený motor č. 2 má momentovou charakteristiku téměř totožnou s původním motorem. Obr. 6.6 ukazuje mírný pokles proudu statoru upraveného motoru, naopak v Obr. 6.7 je vidět, že účinník prodlouženého motoru je větší než účinník původního motoru. Z těchto změn proudu fáze statoru a účinníku se dá usoudit, že došlo ke snížení magnetizačního proudu motoru č. 2 i přes snížený počet závitů ve vinutí statoru. Důsledkem nižšího magnetizačního proudu je menší sycení upraveného motoru.

## 7 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

V této kapitole je provedeno porovnání výsledků z měření na reálných motorech, výsledků získaných analytickým výpočtem a výsledků získaných při návrhu motorů v programu RMxprt. Stále platí značení motorů dle Tab. 6.1, motor 1 je s původní délkou magnetického obvodu, motor 2 je upravený.

### 7.1 Jmenovitý bod

Tab. 7.1: Porovnání výsledků ve jmenovitém bodě

	Měření		Matlab		RMxprt	
	motor 1	motor 2	motor 1	motor 2	motor 1	motor 2
$P_1$ [W]	772,5	756,5	808,4	829,3	762,5	754,2
$I_l$ [A]	1,408	1,339	1,469	1,410	1,307	1,237
$PF$ [-]	0,791	0,815	0,794	0,847	0,826	0,862
$R_f$ [ $\Omega$ ]	13,62	12,88	14,48	14,31	13,02	12,96
$s$ [-]	0,051	0,051	0,051	0,051	0,051	0,05
$n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	2846	2847	2847	2847	2846	2850
$\Delta P_{j1}$ [W]	81,8	69,7	93,8	85,8	66,7	59,6
$\Delta P_{j2}$ [W]	34,0	33,6	34,0	34,1	33,4	32,6
$\Delta P_{Fe}$ [W]	35,5	31,5	29,1	27,9	28,7	27,6
$\Delta P_{mech}$ [W]	15,2	11,9	10,6	10,6	15,2	15,3
$\Delta P_d$ [W]	13,1	4,5	12,7	11,8	15,0	15,0
$\Delta P_T$ [W]	179,9	151,2	180,7	171,6	159,0	150,0
$P_2$ [W]	604,8	602,1	609,7	610,6	603,5	604,2
$M$ [Nm]	2,029	2,019	2,045	2,048	2,028	2,024
$\eta$ [%]	76,8	80,0	77,1	78,1	79,1	80,1

Dle Tab. 7.1 bylo úpravou motoru dosaženo nižších celkových ztrát v motoru a nárůstu účinnosti pomocí všech tří způsobů analýzy. V případě analytického výpočtu a návrhu v RMxprt došlo k navýšení účinnosti o 1 %. Z výsledků měření v laboratoři tento nárůst činí asi 3 %. Jednou z příčin tohoto značného navýšení účinnosti je rozdíl v hodnotách odporů fáze statorového mezi původním a upraveným motorem.

Výsledkem všech tří analýz je, že vlivem sníženého počtu závitů ve vinutí statoru dojde u upraveného motoru ke snížení odporu vinutí statoru. Důležité ale je, o kolik tato hodnota odporu vinutí statoru po úpravě motoru klesne, což je možné vyčíst z Tab. 7.1. V případě laboratorního měření klesl změřený odpor fáze vinutí statoru o 0,74  $\Omega$ . Z analytického výpočtu vychází pokles tohoto odporu o 0,14  $\Omega$  a z návrhu v programu RMxprt klesl odpor

fáze vinutí statoru o pouhých  $0,06 \Omega$ . Tyto malé rozdíly mezi odpory vinutí původního a upraveného motoru jsou pravděpodobně důsledkem nepřesností analytických výpočtů, zejména problematickým určováním délky čel vinutí a jejich tvaru. K jejich určení bylo při analytickém výpočtu využito pouze přibližného vztahu. Program RMxprt si rozměry čel vinutí počítá podle vlastního vnitřního algoritmu.

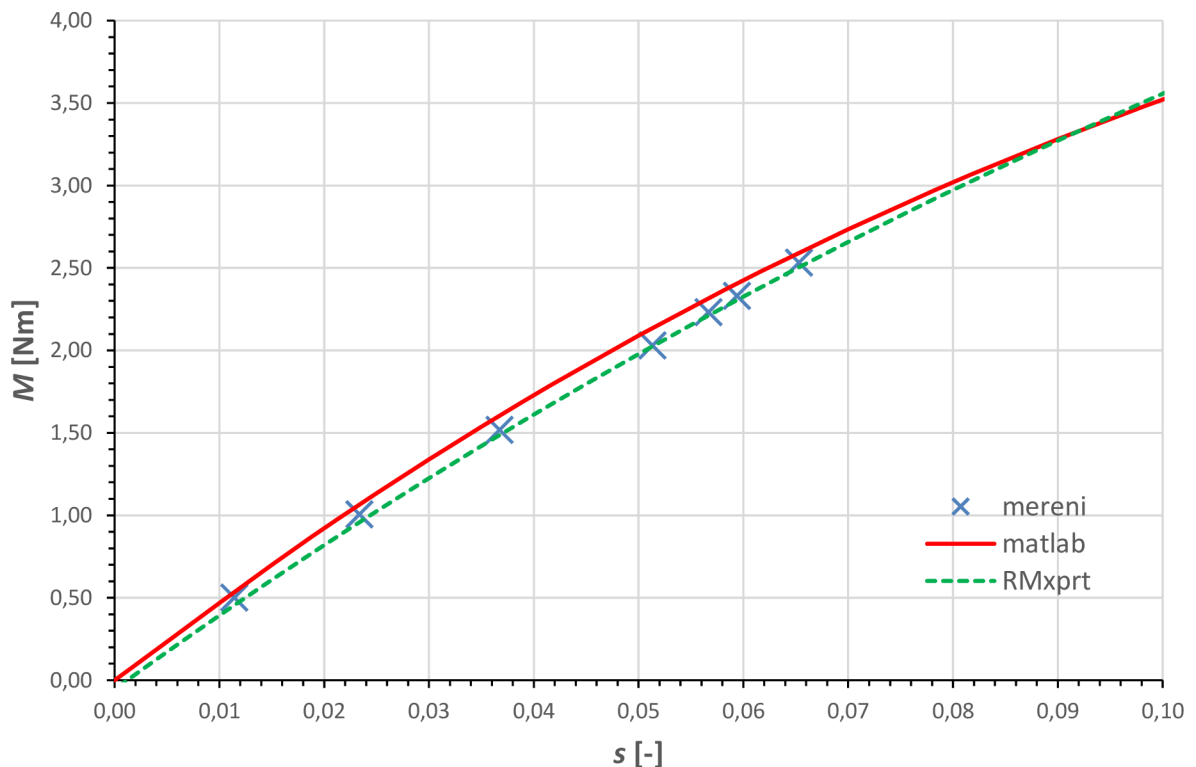
Dalším faktorem určující velikost odporu fází vinutí statoru je teplota. Při analytickém výpočtu a návrhu je nutné uvažovat pouze jednu hodnotu teploty v celém motoru, zatímco teplota reálného motoru se mění se zatížením a v různých částech motoru se může lišit. Průřez, typ a čistota materiálu vodiče jsou další parametry ovlivňující velikost odporu vinutí.

Hodnoty proudů ve fázi vinutí statoru klesnou vlivem úpravy motoru ve všech případech jednotlivých analýz asi o  $0,06 - 0,07$  A. Vlivem tohoto poklesu proudu a menšího odporu vinutí fáze statoru došlo i ke snížení Joulových ztrát ve vinutí statoru, které tvoří značnou část ztrát motoru.

Nezanedbatelný vliv na určování účinnosti mají také mechanické a dodatečné ztráty motoru. V případě analytického výpočtu dle literatury [7] a návrhu v programu RMxprt jsou tyto ztráty téměř konstantní, měření ale ukázalo, že úprava motoru měla na hodnotu těchto ztrát nemalý vliv. Značné snížení mechanických a zejména dodatečných ztrát, viz Tab. 7.1, je také příčinou výrazného nárůstu účinnosti v případě měřených motorů.

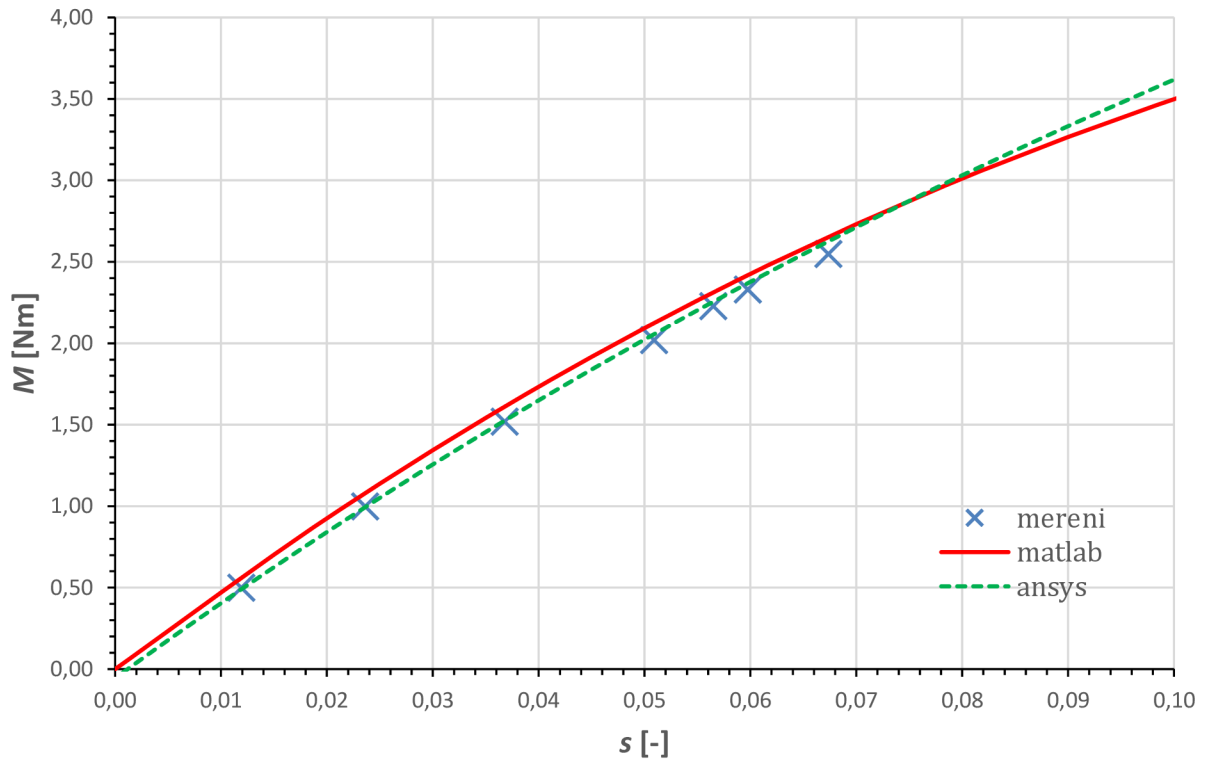
## 7.2 Charakteristiky motorů

Na Obr. 7.1 a 7.2 je zobrazena pracovní oblast momentové charakteristiky určená ze změřených hodnot, hodnot zjištěných analytickým výpočtem a hodnot z programu RMxprt. Obr. 7.1 zobrazuje charakteristiky původního motoru, Obr. 7.2 upraveného motoru.



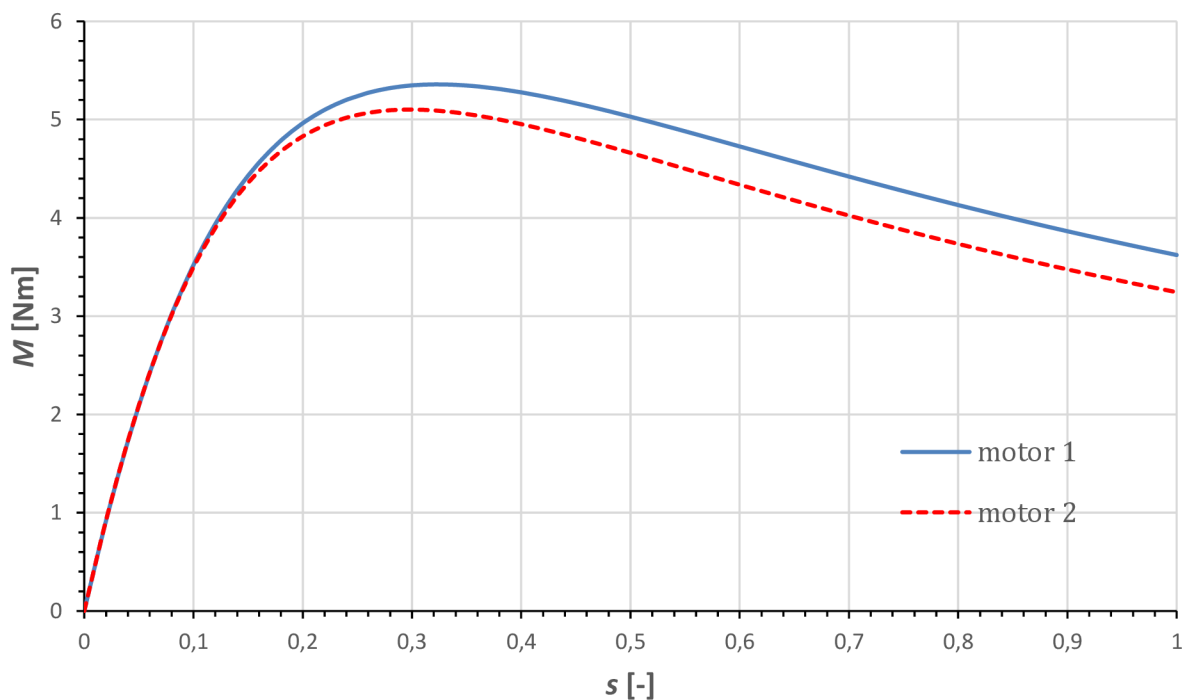
Obr. 7.1: Srovnání momentových charakteristik motoru 1





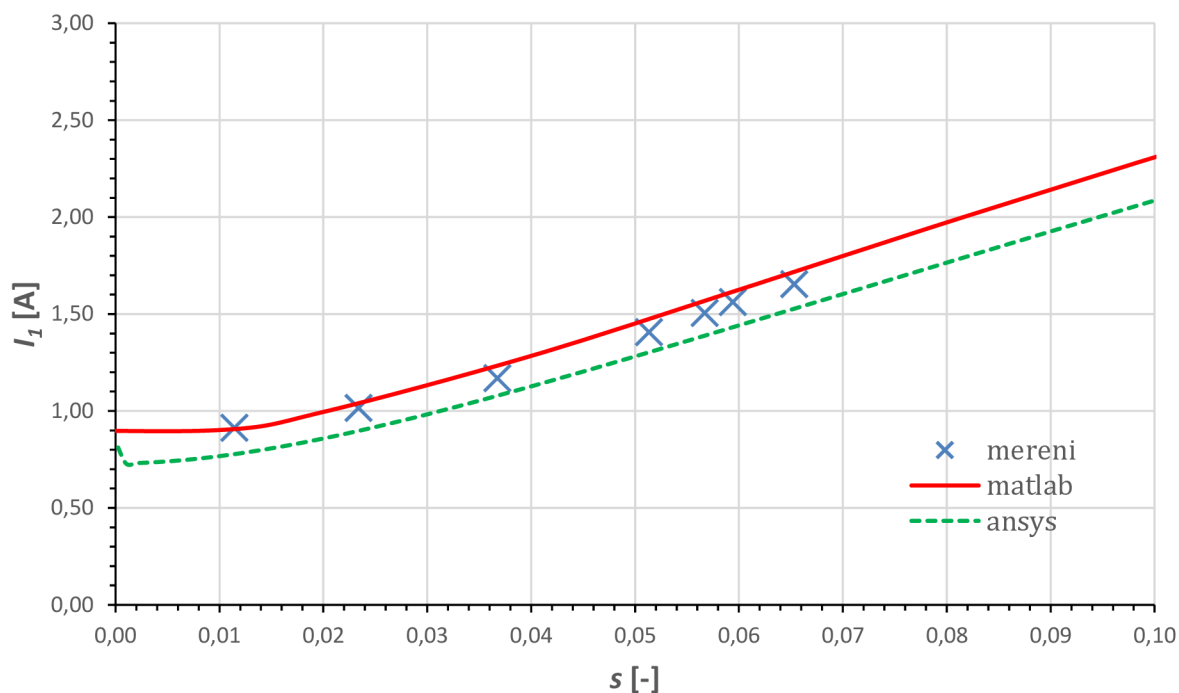
Obr. 7.2: Srovnání momentových charakteristik motoru 2

Po prostudování Obr. 7.1 a 7.2 je patrné, že vlivem úpravy motoru č. 2 nedošlo k významné změně momentu v pracovní oblasti motoru. Výsledky dosažené z jednotlivých způsobů návrhu se též příliš neliší. Srovnání kompletních momentových charakteristik obou motorů zjištěných analytickým výpočtem je na Obr. 7.3.

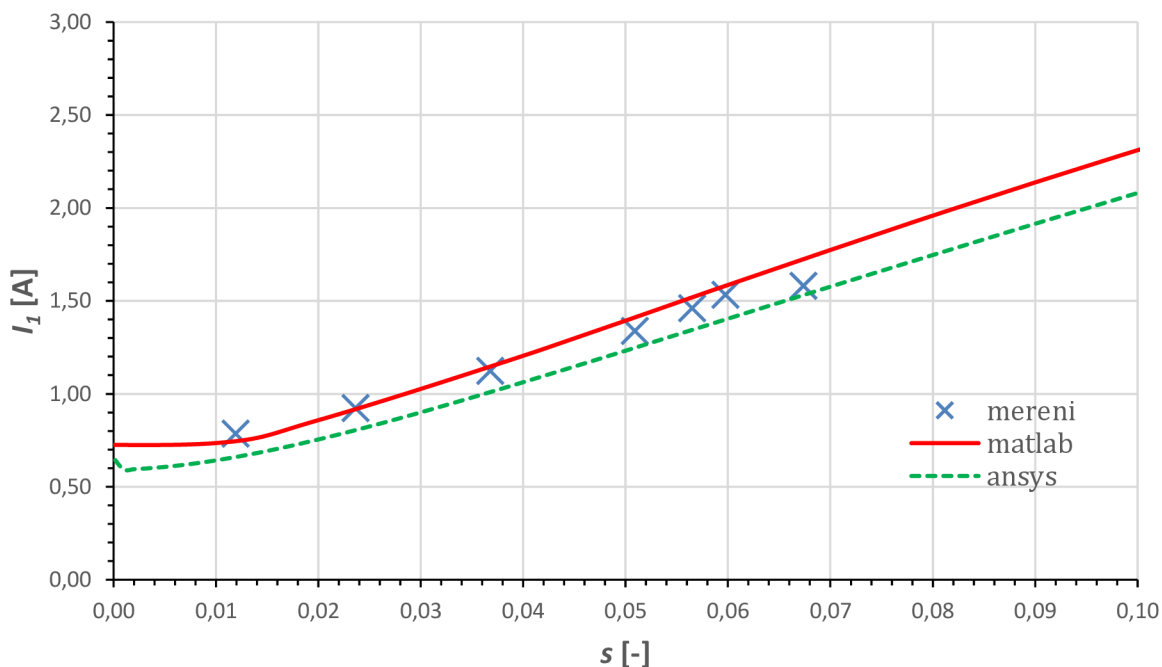


Obr. 7.3: Momentové charakteristiky určené analytickým výpočtem

Prodloužením magnetického obvodu vzrostl také odpor tyčí klecového vinutí motoru. Vyšší odpor vinutí rotoru znamená menší proud tekoucí vinutím rotoru a menší záběrný moment, což ukazuje Obr. 7.3.



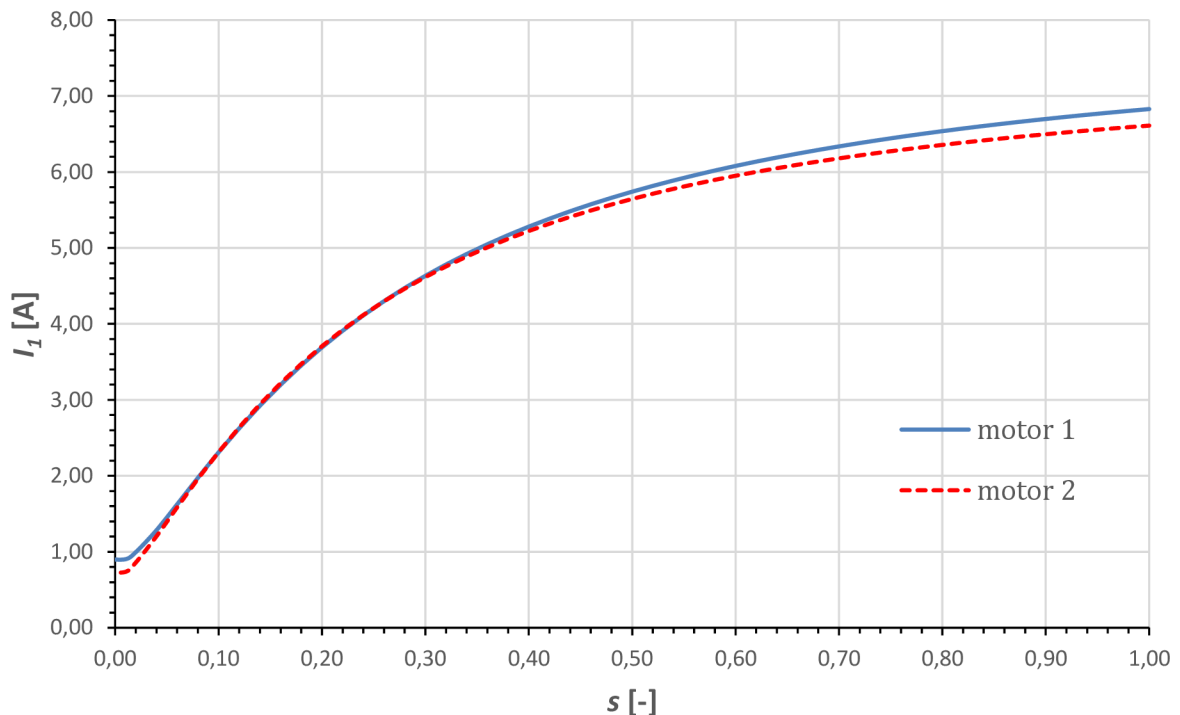
Obr. 7.4: Srovnání proudových charakteristik motoru 1



Obr. 7.5: Srovnání proudových charakteristik motoru 2

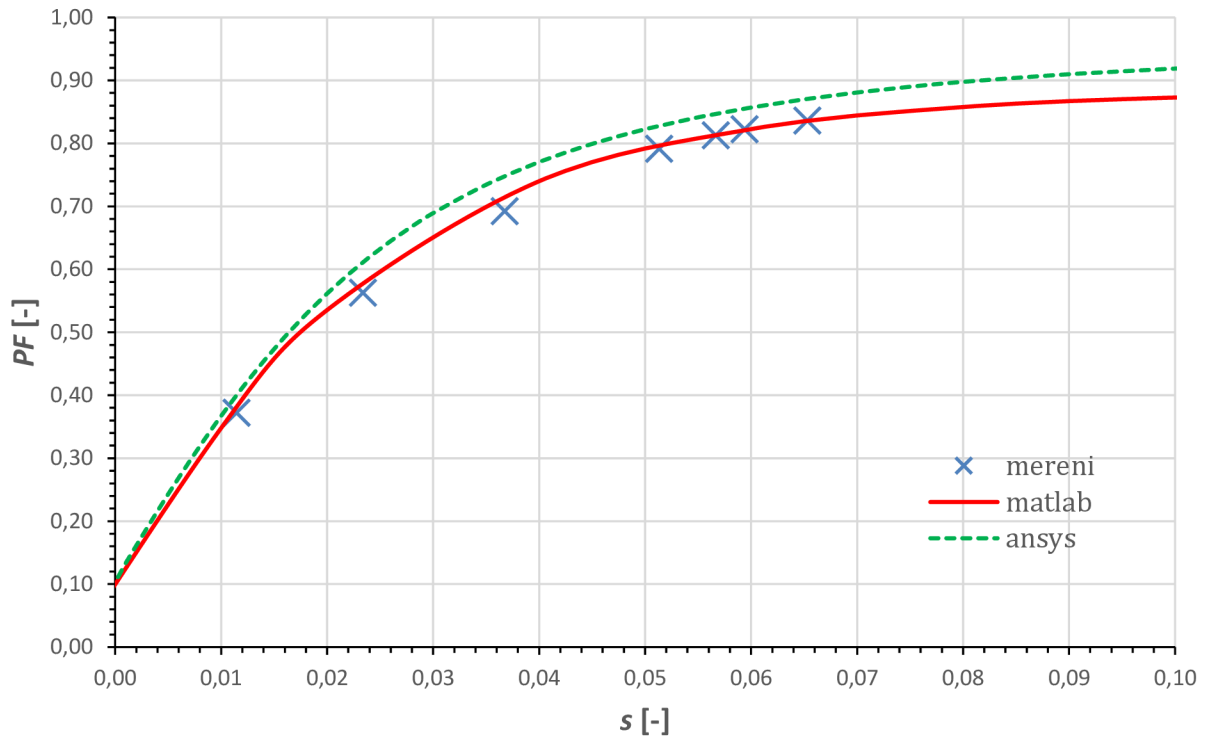
Obr. 7.4 a 7.5 zobrazují průběhy proudů ve fázi vinutí statoru. Návrh motoru v programu RMxprt byl zaměřen zejména na získání správné hodnoty jmenovitého momentu při jmenovitých otáčkách. Důsledkem toho je proud fáze statoru z programu RMxprt přibližně o 100 – 150 mA nižší, než je naměřená hodnota. Naopak účinník motoru z RMxprt je mírně vyšší, viz Obr. 7.8 a 7.9. Úprava motoru snížila proud fáze vinutí statoru v pracovní oblasti o již výše zmíněných 0,06 - 0,07 A, což dokazují i Obr. 7.4 a 7.5, mírně se naopak urychlil nárůst účinníku v pracovní oblasti vyplývající z Obr. 7.7 a 7.8.

Srovnání proudových charakteristik obou motorů zjištěných analytickým výpočtem je na Obr. 7.6. Záběrný proud upraveného motoru je asi o 200 mA nižší než proud původního motoru, což má také neblahý vliv na velikost záběrného momentu.

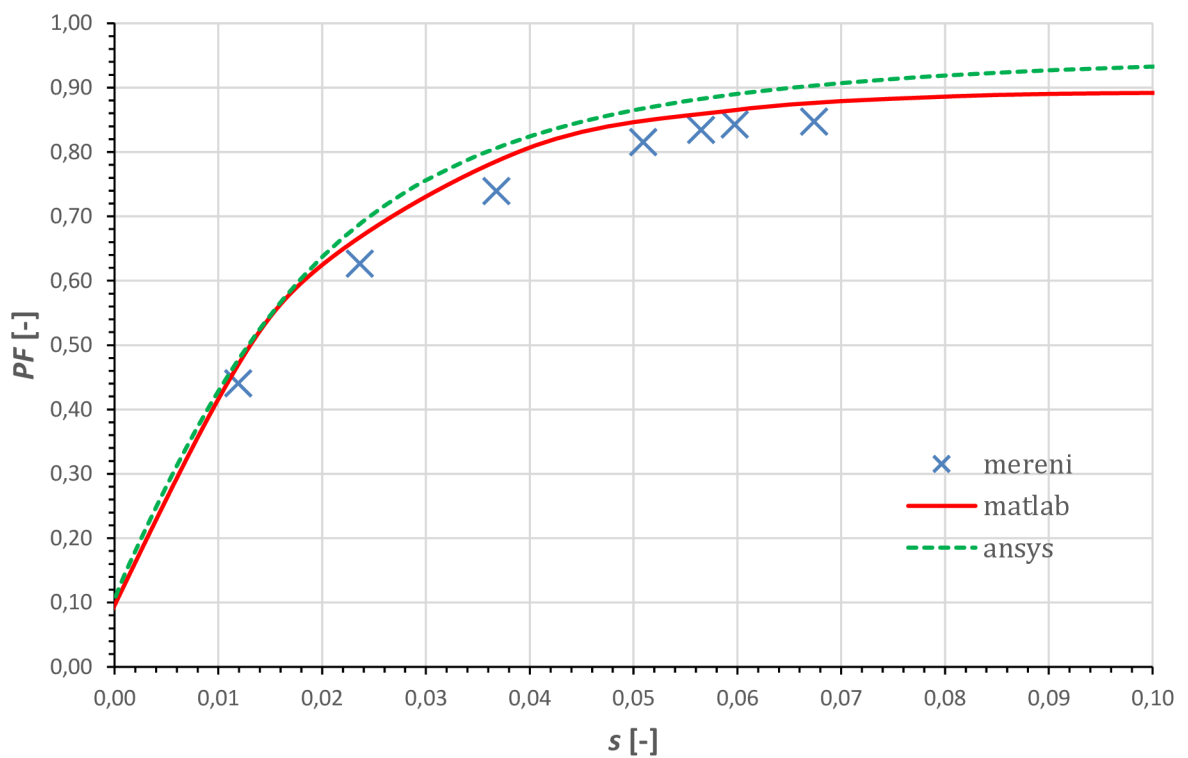


Obr. 7.6: Proudové charakteristiky určené analytickým výpočtem

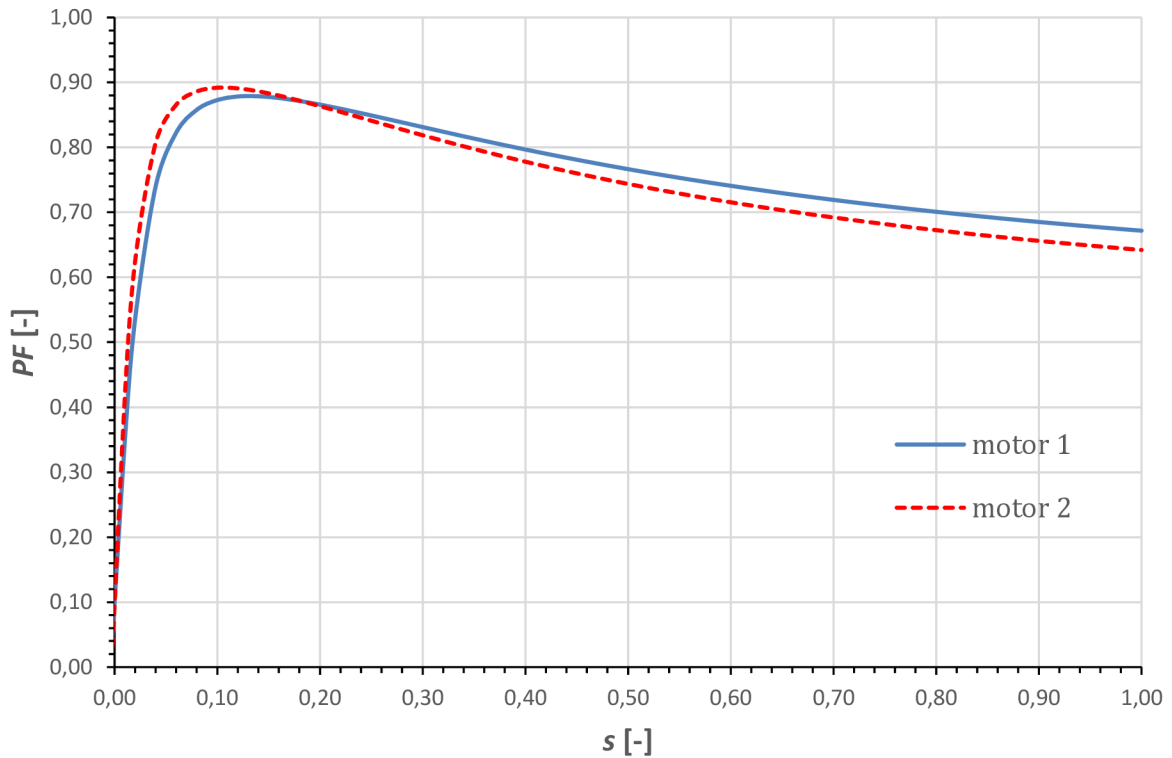
V oblasti vyšších skluzů z Obr. 7.9 je účinník prodlouženého motoru nižší než u původního motoru. Pokud je hodnota účinníku i proudu fáze statoru motoru č. 2 nižší, muselo dojít i ke snížení hodnoty magnetizačního proudu, tedy i ke snížení sycení magnetického obvodu upraveného motoru.



Obr. 7.7: Srovnání účinníku motoru 1



Obr. 7.8: Srovnání účinníku motoru 2



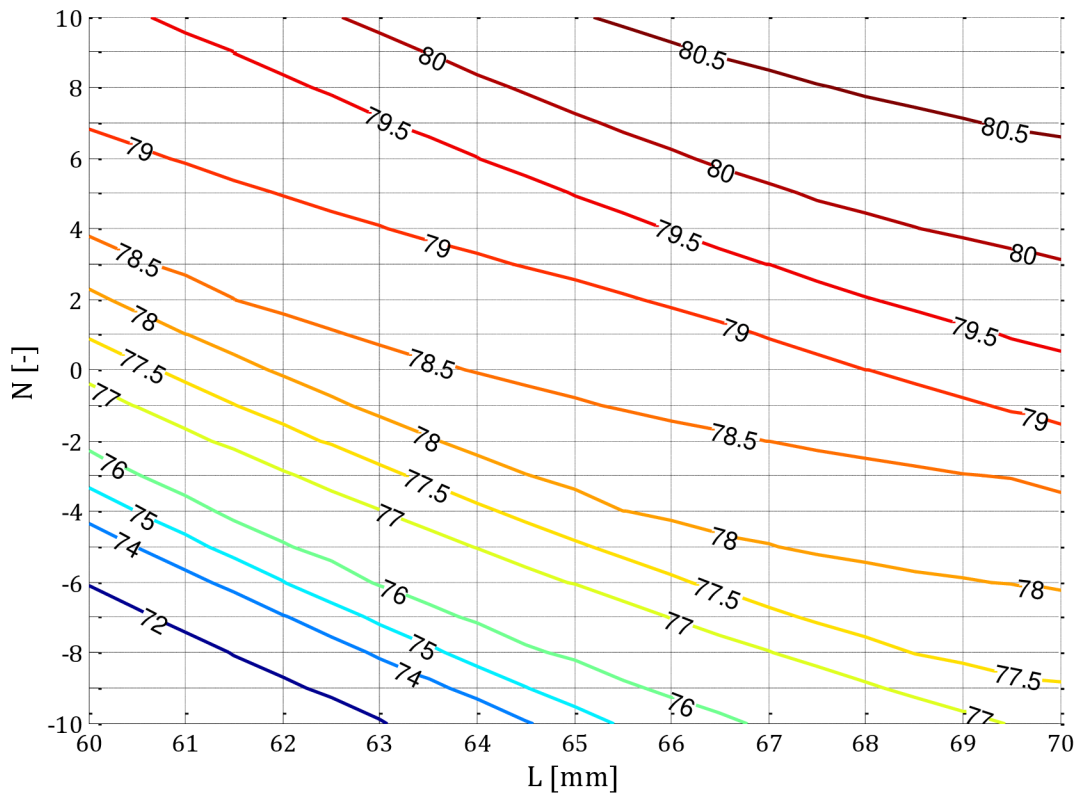
Obr. 7.9: Účinník určený analytickým výpočtem

### 7.3 Mapa účinností a výkonů

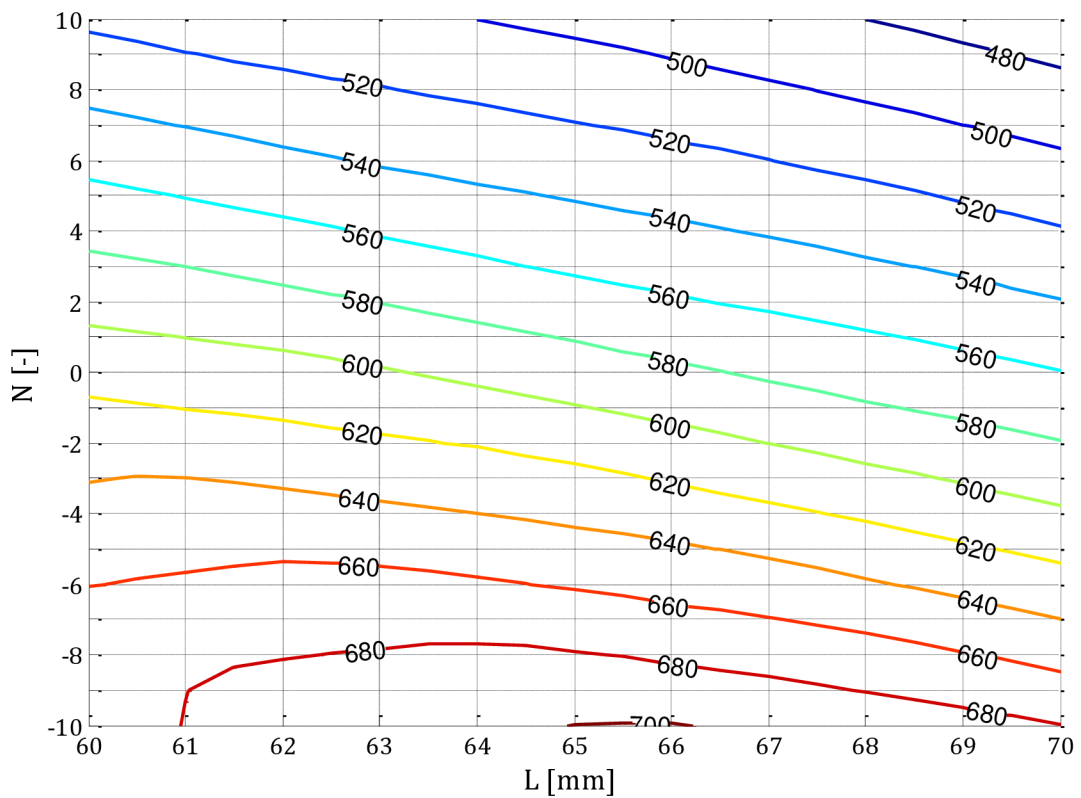
Hlavním cílem této práce bylo sestrojení mapy účinností analyzovaného motoru. Jedná se o grafickou závislost, zobrazující účinnost motoru v závislosti na délce magnetického obvodu a počtu vodičů v drážkách vinutí statoru. Výsledkem je vrstevnicový graf, kde každé vrstevnici odpovídá určitá hodnota účinnosti. Pro správné určení délky magnetického obvodu a počtu vodičů v drážce statoru je nutné použít i mapu momentů nebo výkonů, z důvodu udržení těchto parametrů pokud možno neměnných. Pokud jsou k dispozici obě tyto mapy lze již snadno určit vliv prodloužení magnetického obvodu a změny počtu vodičů v drážce statoru na účinnost upraveného motoru při stálém výkonu.

Mapa účinnosti určená pomocí analytických výpočtů je zobrazena na Obr. 7.10, jí odpovídající mapa výkonů je na Obr. 7.11. Mapa účinností zjištěná z hodnot programu RMxprt je na Obr. 7.12, jí odpovídající mapa výkonů je na Obr. 7.13. Všechny tyto mapy jsou sestrojeny pro hodnotu jmenovitého skluzu. Z důvodu některých utajených parametrů motoru, zobrazuje svislá osa na všech mapách pouze změnu počtu vodičů  $N$  namísto celkového počtu vodičů v drážce statoru.

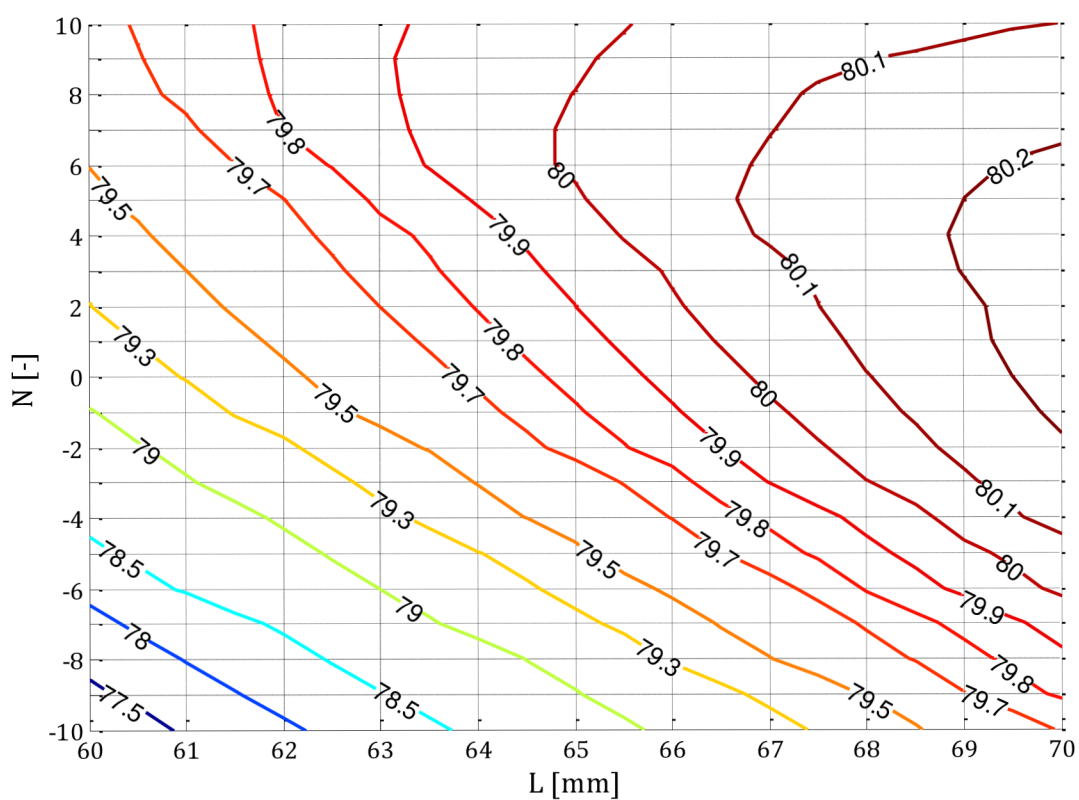
Porovnáním obou map účinností na Obr. 7.10 a 7.12 lze vypořadovat, že účinnost zjištěná pomocí RMxprt je v jednotlivých bodech mapy o 1 – 2 % vyšší než u mapy na Obr. 7.10. Jedná se o důsledek způsobený menším proudem ve fázi statoru zjištěným programem RMxprt, oproti hodnotě z analytického výpočtu. Vlivem tohoto proudu a také nižšího odporu fáze vinutí, viz Tab. 7.1, je rozdíl v Joulových ztrátách mezi analytickým výpočtem a výpočtem v prostředí RMxprt asi 27 W. Tento rozdíl odpovídá 4.5 % hodnoty jmenovitého výkonu, což se projevilo na jak účinnosti motoru tak i na samotné mapě účinností.



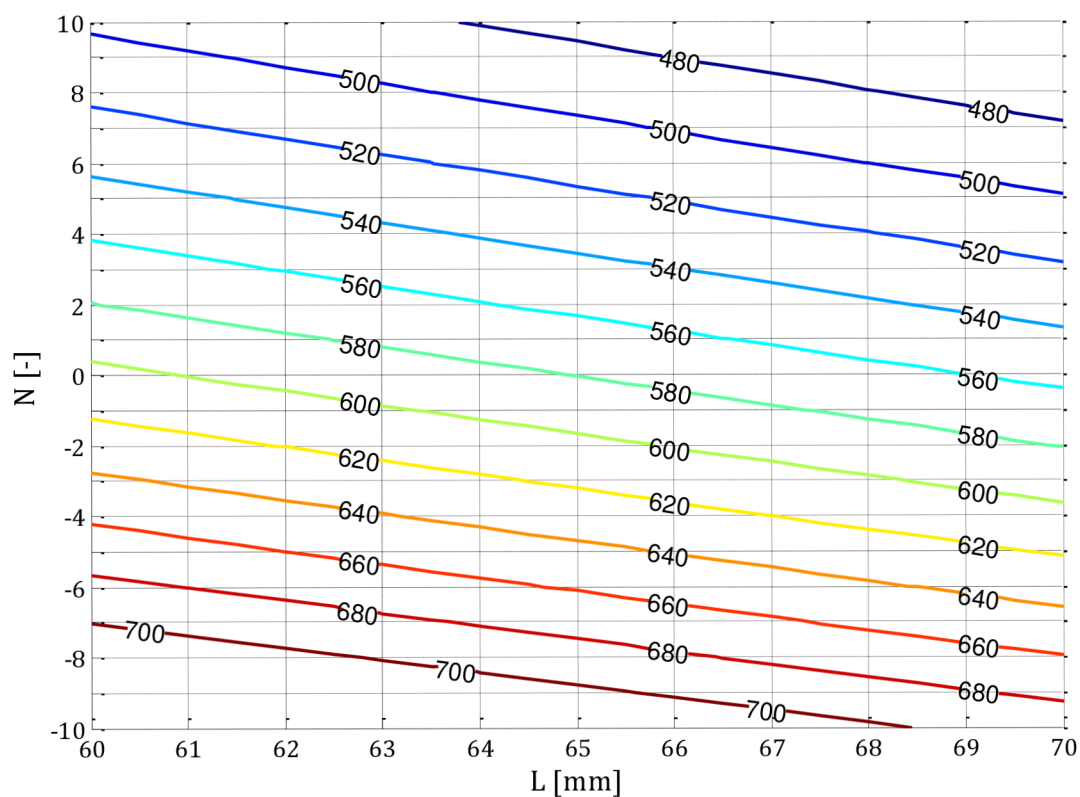
Obr. 7.10: Mapa účinností z analytického výpočtu



Obr. 7.11: Mapa výkonů z analytického výpočtu



Obr. 7.12: Mapa účinností z hodnot programu RMxpřt



Obr. 7.13: Mapa výkonů z hodnot programu RMxpřt

## 8 ZÁVĚR

Cílem práce bylo prozkoumání vlivu prodlouženého magnetického obvodu na účinnost motoru. První dvě kapitoly jsou věnovány úvodu a teorii asynchronních motorů. Je zde popsána základní konstrukce, princip činnosti, popis náhradního obvodu a ztráty uvnitř asynchronního motoru.

Kapitoly 3 a 4 se zabývají výpočtem zadaného motoru. Analytický výpočet byl proveden za pomoci výkresové dokumentace dodané výrobcem motoru. Cílem výpočtu bylo vyčíslení prvků náhradního schématu motoru, momentová a proudová charakteristika, ztráty a nakonec účinnost motoru. Po dokončení návrhu zadaného motoru bylo nutné program upravit, aby mohl pracovat s větším množstvím délek magnetického obvodu a počtem vodičů v drážce statoru. Nutnost zabývat se i vodiči v drážkách statoru plynula z potřeby zachování konstantního výkonu při prodlužování magnetického obvodu. V kapitole 5 je zmíněn program RMxprt, ve kterém byl taktéž navržen zadaný motor.

Kapitola 6 se zabývá měřením a výsledky měření dvou vzorků motorů. Prvním motorem byl navrhovaný zadaným motor dle výkresové dokumentace. Druhý motor byl stejného typu jako první, až na délku magnetického obvodu a počet vodičů v drážce statoru. Upravený motor měl prodloužený magnetický obvod o 10 mm a snížený počet vodičů v drážce statoru o 5 kusů. Měření a výpočty obou motorů byly provedeny dle normy [21]. Z měření křivky zatížení a zkoušky naprázdno byly určeny ztráty a účinnost v jednotlivých bodech zatížení včetně jmenovitého bodu každého motoru. Z výsledků měření se ukázalo, že úpravou motoru bylo dosaženo zvýšení účinnosti asi o 3%. Celkové ztráty ve jmenovitém bodě motoru se snížily ze 179 W na 151 W. Z celkových ztrát nejvíce klesly Joulovy ztráty ve vinutí statoru, asi o 20 W, kde se projevil vliv nižšího počtu závitů na snížení velikosti odporu fáze vinutí statoru. Na účinnosti se také značně projevil pokles mechanických a dodatečných ztrát, jež dohromady činil 11,5 W. Ztráty v železe se výrazně nezměnily, stejně tak i Joulovy ztráty v rotoru zůstaly stejné nebo se mírně navýšily vlivem prodloužené klece rotoru.

V poslední kapitole jsou rozebrány a porovnány výsledky z měření v laboratoři, výsledky analytického výpočtu a výsledky z návrhu motoru v programu RMxprt. V obou případech, jak z analytického výpočtu, tak z programu RMxprt nebylo navýšení účinnosti vlivem úpravy motoru tak výrazné jako u výsledku změřených hodnot účinností. Z analytického výpočtu došlo k navýšení účinnosti ze 77 % na 78 %, v případě návrhu v RMxprt došlo k navýšení ze 79 % na 80 %. Zásadní vliv na tento nižší přírůstek účinnosti mají mechanické a dodatečné ztráty. V obou případech se uvažují konstantní. Z výsledků měření upraveného motoru, bylo zjištěno, že došlo k poklesu mechanických a dodatečných ztrát o 11,5 W, což už je značná část pro snížení celkových ztrát motoru. U analytického výpočtu klesly celkové ztráty ze 181 W na 177 W, Joulovy ztráty ve vinutí statoru klesly z 94 W na 86 W. Výsledkem analýzy v programu RMxprt byl pokles celkových ztrát ze 159 W na 150 W, pokles Joulových ztrát ve vinutí z 67 W na 60 W. Na výslednou vysokou účinnost motoru z programu RMxprt má, krom nižšího odporu fáze vinutí statoru, vliv i nižší proud fáze statoru, což také významně snižuje ztráty ve vinutí.

Momentová charakteristika v pracovní oblasti upraveného motoru se výrazně nelišila od charakteristiky původního motoru. Z výsledků analytického výpočtu došlo ke snížení záběrného momentu asi o 0,4 Nm, vlivem vyššího odporu klece rotoru a malého poklesu záběrného proudu.



Výsledkem analytického výpočtu a výpočtu motoru v programu RMxpert jsou i dvě mapy účinností a dvě mapy výkonů. Tyto mapy názorně zobrazují vliv změny délky magnetického obvodu a změny počtu vodičů v drážce statoru na účinnost a výkon motoru.

Touto prací bylo zjištěno, že změna délky magnetického vede ke zvýšení účinnosti motoru, ale pro zachování stálého výkonu je nutné změněné délce přizpůsobit i počet vodičů ve statorové drážce. Toto tvrzení bylo ověřeno jak analytickými výpočty, jejichž výsledkem jsou zmíněné mapy účinností a výkonů, tak měřeními na upraveném motoru.

Mezi chyby, kterými mohl být ovlivněn analytický výpočet motoru, patří nerovnoměrný magnetický tok v částech magnetického obvodu, vzniklý nadměrným sycením. Dále nepřesný odečet intenzit magnetického pole z magnetizační křivky vlivem překročení jejího rozsahu. Stejně tak i odečet různých činitelů využitých při výpočtech je zatížen určitou nepřesností.

V případě návrhu v programu RMxpert je výpočet zatížen chybami způsobenými nedostatkem informací o některých materiálech uvnitř motoru, které je nutno programu zadat. Také tím, že si program některé hodnoty počítá dle vlastního neveřejného algoritmu, u kterého nelze určit přesnost výpočtu. Samotné měření stroje bylo zatíženo chybami přístrojů, čistotou vinutí motoru, či odlišnou teplotou v různých částech motoru a s ním související odlišné sycení v různých částech motoru.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] *Účinnost nízkonapěťových asynchronních motorů podle nových norem a nové třídy účinnosti* [online]. [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: [http://www.motorgear.cz/userfiles/file/p-1010\\_nove-tridy-ucinnosti-motor\\_2010.pdf](http://www.motorgear.cz/userfiles/file/p-1010_nove-tridy-ucinnosti-motor_2010.pdf)
- [2] HOLUB, Gustav. Nové třídy inovace asynchronních motorů. *Elektro* [online]. 2011 [cit. 2017-0-02]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/43677.pdf>
- [3] ONDRŮŠEK, Čestmír. *Elektrické stroje: Skriptum*. VUT.
- [4] PETROV, G.N. *Elektrické stroje 1: I. Úvod do elektrických strojů, II. Transformátory*. 3. Praha, 1980.
- [5] Nízkonapěťový standardní motor Simotics 1LE1. In: *Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/novinky-na-veletrhu-amp-2013.html>
- [6] PETROV, G.N. *Elektrické stroje 2: Asynchronní stroje, Synchronní stroje*. Praha: Academia, 1982.
- [7] KOPYLOV, Igor Petrovič. *Stavba elektrických strojů: celostátní vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [8] *Asynchronní stroje* [online]. [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://www.spse.dobruska.cz/download/sokol/AM.pdf>
- [9] CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů: Celost. vysokošk. učebnice*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1958. Řada elektrotechnické literatury.
- [10] *Kotva nakrátko* [online]. In: . [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://www.isstechn.cz/objekty/vy-32-inovace-h-3-17.pdf>
- [11] How does an induction motor work? *LearnEngineering* [online]. [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://www.learnengineering.org/2013/08/three-phase-induction-motor-working-squirrel-cage.html>
- [12] Faradayův zákon elektromagnetické indukce. In: *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/304-faradayuv-zakon-elektromagneticke-indukce>
- [13] Faradayův zákon elektromagnetické indukce. In: *Fyzika GJVJ* [online]. [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://fyzika.gjvj.cz/index.php/elektrina-a-magnetismus/nestac-mag-pole/20-faradayuv-zakon-elektromagneticke-indukce>
- [14] *Lorenzova síla* [online]. [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://labss2.fiit.stuba.sk/TeamProject/1998/team04/prototyp/Elektrina/lorentz.htm>
- [15] How does an induction motor work? *LearnEngineering* [online]. [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://www.learnengineering.org/2013/08/three-phase-induction-motor-working-squirrel-cage.html>

- 
- [16] Princip - asynchronní motor. In: *Pohonnatechnika.cz* [online]. [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: [www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/asynchronni-motor/princip-asynch-motoru](http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/asynchronni-motor/princip-asynch-motoru)
- [17] SCHNABL, J. *Měření ztrát feromagnetických materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 71s. Vedoucí diplomové práce doc. Dr. Ing. Miroslav Patočka.
- [18] PEKAŘ, M., M. SCHILLER a J. SEJKORA. *Vířivé (Foucaultovy) proudy* [online]. [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2006-2007/Leto07/proc/virivepr.pdf>
- [19] *Typical data fo Sura M700-50A* [online]. In: . 2008 [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://cogent-power.com/cms-data/downloads/m700-50a.pdf>
- [20] ŠIŠÁK, D. *Rozbor ztrát malých asynchronních motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 69 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Mach.
- [21] ČSN EN 60034-2-1 (350000). *Točivé elektrické stroje: Část 2-1: Standardní metody určování ztrát a účinnosti ze zkoušek (s výjimkou strojů pro trakční vozidla)*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [22] *Quora* [online]. [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: <https://www.quora.com/What-is-hysteresis-loss-Where-does-the-loss-actually-occur>
- [23] Magnetizační křivka. *ELUC* [online]. [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/459>
- [24] Eddy currnet lose. *Circuit globe* [online]. [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: <http://circuitglobe.com/what-is-eddy-current-loss.html>
- [25] Luigi Alberti, Nicola Bianchi, Aldo Boglietti a Andrea Cavagnino. *Core axial lengthening as effective solution to improve the induction motor efficiency classes*, 8 [cit. 2017-05-29].
- [26] ANSYS RMXprt. *TECHSOFT ENGINEERING* [online]. [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: <http://www.techsoft-eng.cz/ansys-2/elektromagnetismus/ansys-rmxprt/>