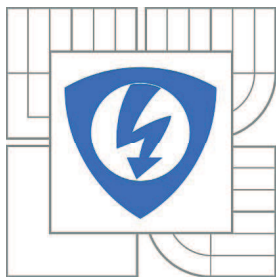


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A  
ELEKTRONIKY

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

## ANALÝZA A OPTIMALIZACE ENERGETICKÝCH PARAMETRŮ ASYNCHRONNÍCH STROJŮ MALÉHO VÝKONU

ANALYSIS AND OPTIMISATION POWER PARAMETER OF SMALL INDUCTION MOTORS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

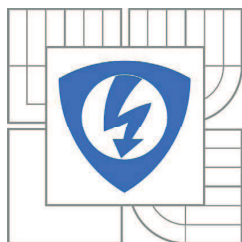
Bc. JIŘÍ PAŘÍZEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. VÍTĚZSLAV HÁJEK, CSc.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

**Student:** Bc. Jiří Pařízek

**ID:** 77960

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2010/2011

## NÁZEV TÉMATU:

**Analýza a optimalizace energetických parametrů asynchronních strojů malého výkonu**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Zhodnoťte vybrané typy malých asynchronních motorků pro specifické aplikace.
2. Analyzujte jeden konkrétní typ stroje.
3. Navrhněte a ověřte možnosti optimalizace energetických parametrů -včetně návrhu funkčního vzorku.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího

**Termín zadání:** 23.9.2010

**Termín odevzdání:** 23.5.2011

**Vedoucí práce:** prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc.

**doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

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

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce pojednává o asynchronních motorech, popisuje jejich konstrukci, princip činnosti, vlastnosti, použití a stručně popisuje návrh třífázového asynchronního motoru. V první části je popsán nejběžnější třífázový asynchronní motor, vznik točivého magnetického pole a základní vztahy. Druhá část pojednává o asynchronních motorech pro specifické aplikace, jejich provedení a vlastnosti. V další části je provedena analýza zapůjčeného motoru od firmy ATAS elektromotory Náchod, a.s. V poslední části jsou uvedeny možnosti zlepšení základních parametrů indukčních motorů a navržen optimalizovaný motor.

## **Abstract**

This thesis deals with the asynchronous engines, describes their structure, principles, properties, use, and briefly describes the design of three-phase asynchronous motor. The first section describes the most common three-phase induction motor, the emergence of the rotating magnetic field and the basic relationships. The second part deals with asynchronous motors for specific applications, their design and features. The next section is an analysis engine borrowed from the electric company ATAS Náchod, and The last section lists ways to improve the basic parameters of induction motors designed and optimized engine.

## **Klíčová slova**

Asynchronní motor; Indukční motor; Třífázový asynchronní motor; Jednofázový asynchronní motor; Točivý moment; Lineární motor; Skluz, Ztráty; Návrh motoru.

## **Keywords**

Asynchronous motor; Induction motor; Three-phase asynchronous motor; Single-phase asynchronous motor; Torque, Linear motor; Slip, Losses; Engine design.

## **Bibliografická citace**

PAŘÍZEK, J. *Analýza a optimalizace energetických parametrů asynchronních strojů malého výkonu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 74 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc..

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Analýza a optimalizace energetických parametrů asynchronních strojů malého výkonu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne .....

Podpis autora .....

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Vítězslavu Hájkovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne .....

Podpis autora .....



## OBSAH

|                                                             |           |
|-------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 ASYNCHRONNÍ MOTORY .....</b>                           | <b>12</b> |
| <b>1.1 KONSTRUKCE ASM.....</b>                              | <b>12</b> |
| 1.1.1 Rotor s kotvou nakrátko .....                         | 13        |
| 1.1.2 Rotor s vinutou kotvou.....                           | 13        |
| <b>1.2 PRINCIP ČINNOSTI ASM.....</b>                        | <b>13</b> |
| <b>1.3 SPOUŠTĚNÍ ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ .....</b>             | <b>14</b> |
| <b>1.4 ZÁKLADNÍ VZTAHY.....</b>                             | <b>15</b> |
| 1.4.1 Otáčky pole statoru.....                              | 15        |
| 1.4.2 Skluz.....                                            | 15        |
| 1.4.3 Otáčky rotoru.....                                    | 15        |
| <b>1.5 OBVODOVÝ MODEL ASM.....</b>                          | <b>16</b> |
| <b>1.6 ODVOZENÍ MOMENTU.....</b>                            | <b>16</b> |
| 1.6.1 Momentová charakteristika ASM .....                   | 18        |
| 1.6.2 Ztráty ASM .....                                      | 19        |
| <b>1.7 ŘÍZENÍ OTÁČEK ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ .....</b>         | <b>19</b> |
| <b>2 TŘÍFÁZOVÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR.....</b>                   | <b>21</b> |
| <b>2.1 KONSTRUKCE.....</b>                                  | <b>21</b> |
| <b>2.2 PRINCIP ČINNOSTI .....</b>                           | <b>21</b> |
| <b>2.3 VÝKON A MOMENT TŘÍFÁZOVÉHO ASM .....</b>             | <b>23</b> |
| <b>2.4 PROVOZNÍ STAVY TŘÍFÁZOVÉHO STROJE .....</b>          | <b>23</b> |
| <b>3 MOTORY PRO SPECIFICKÉ APLIKACE .....</b>               | <b>24</b> |
| <b>3.1 JEDNOFÁZOVÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR .....</b>              | <b>24</b> |
| 3.1.1 Konstrukce .....                                      | 24        |
| 3.1.2 Princip činnosti jednofázového ASM .....              | 25        |
| 3.1.3 Pulsující magnetické pole .....                       | 25        |
| 3.1.4 Záběrový moment jednofázového ASM .....               | 26        |
| <b>3.2 LINEÁRNÍ TŘÍFÁZOVÉ ASM.....</b>                      | <b>29</b> |
| <b>3.3 ASM V TRAKCI .....</b>                               | <b>30</b> |
| <b>3.4 ASM V ELEKTROMOBILECH .....</b>                      | <b>31</b> |
| <b>3.5 NEVÝBUŠNÉ NÍZKONAPĚŤOVÉ ASYNCHRONNÍ MOTORY .....</b> | <b>31</b> |
| <b>3.6 DVOUFÁZOVÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR.....</b>                | <b>31</b> |
| <b>4 MOŽNOSTI ZVÝŠENÍ ÚČINNOSTI .....</b>                   | <b>32</b> |



---

|                                                            |           |
|------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4.1 ZTRÁTY ELEKTRICKÉ.....</b>                          | <b>32</b> |
| <b>4.2 ZTRÁTY V ŽELEZE .....</b>                           | <b>33</b> |
| <b>4.3 MECHANICKÉ ZTRÁTY .....</b>                         | <b>34</b> |
| <b>4.4 PŘÍDAVNÉ ZTRÁTY .....</b>                           | <b>35</b> |
| <b>4.5 KONSTRUKCE MOTORU A JEJÍ VLIV NA ÚČINNOST.....</b>  | <b>35</b> |
| <b>4.6 VLIV FREKVENČNÍHO MĚNIČE NA ASM.....</b>            | <b>35</b> |
| <b>4.7 URČENÍ ZTRÁT KONKRÉTNÍHO MOTORU .....</b>           | <b>36</b> |
| 4.7.1 Popis motoru .....                                   | 36        |
| 4.7.2 Měření, výpočty .....                                | 38        |
| 4.7.3 Možnosti zlepšení účinnosti konkrétního motoru ..... | 46        |
| <b>5 NÁVRH ASYNCHRONNÍHO MOTORU .....</b>                  | <b>47</b> |
| <b>5.1 ZÁKLADNÍ PARAMETRY .....</b>                        | <b>47</b> |
| <b>5.2 URČENÍ HLAVNÍCH ROZMĚRŮ STROJE .....</b>            | <b>47</b> |
| <b>5.3 NÁVRH STATORU .....</b>                             | <b>51</b> |
| 5.3.1 Výpočet drážek statoru.....                          | 54        |
| <b>5.4 NÁVRH ROTORU .....</b>                              | <b>57</b> |
| 5.4.1 Výpočet klece.....                                   | 57        |
| 5.4.2 Výpočet drážek.....                                  | 58        |
| <b>6 ZÁVĚR .....</b>                                       | <b>60</b> |
| <b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZNAČEK .....</b>                       | <b>61</b> |
| <b>PŘÍLOHY .....</b>                                       | <b>64</b> |
| <b>POUŽITÁ LITERATURA.....</b>                             | <b>72</b> |

## SEZNAM OBRÁZKŮ

|                                                                                             |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Obrázek 1: Klec ASM s kotvou nakrátko .....</i>                                          | <i>13</i> |
| <i>Obrázek 2: ASM s kroužkovou kotvou.....</i>                                              | <i>13</i> |
| <i>Obrázek 3: Napěťové a proudové poměry při použití přepínače Y-D.....</i>                 | <i>14</i> |
| <i>Obrázek 4: Obvodový model jedné fáze ASM.....</i>                                        | <i>16</i> |
| <i>Obrázek 5: Tok výkonu v asynchronním motoru.....</i>                                     | <i>16</i> |
| <i>Obrázek 6: Typický průběh momentové charakteristiky 3f ASM s kotvou nakrátko.....</i>    | <i>18</i> |
| <i>Obrázek 7: Průběh proudů v jednotlivých fázích statorového vinutí.....</i>               | <i>22</i> |
| <i>Obrázek 8: Vznik tažné síly u ASM .....</i>                                              | <i>23</i> |
| <i>Obrázek 9: Superpozice magnetických polí ve vzduchové mezeře.....</i>                    | <i>25</i> |
| <i>Obrázek 10: Momentová charakteristika jednofázového ASM.....</i>                         | <i>26</i> |
| <i>Obrázek 11: Momentová charakteristika jednofázového ASM s rozběhem pomocí C a R.....</i> | <i>26</i> |
| <i>Obrázek 12: Zapojení jednofázového ASM s kondenzátorem v pomocné fázi.....</i>           | <i>27</i> |
| <i>Obrázek 13: Zapojení jednofázového ASM s odporem v pomocné fázi .....</i>                | <i>28</i> |
| <i>Obrázek 14: Motor se stíněným pólem.....</i>                                             | <i>28</i> |
| <i>Obrázek 15: Zapojení třífázového ASM do jednofázové sítě .....</i>                       | <i>29</i> |
| <i>Obrázek 16: Lineární motor s dvěma induktory .....</i>                                   | <i>30</i> |
| <i>Obrázek 17: Procentuální rozložení ztrát v motoru.....</i>                               | <i>32</i> |
| <i>Obrázek 18: 3f ASM ATAS typ T22VV512.....</i>                                            | <i>36</i> |
| <i>Obrázek 19: Štítek měřeného motoru.....</i>                                              | <i>37</i> |
| <i>Obrázek 20: Výsledky měření naprázdno.....</i>                                           | <i>41</i> |
| <i>Obrázek 21: Určení mechanických ztrát.....</i>                                           | <i>42</i> |
| <i>Obrázek 22: Výsledky měření nakrátko .....</i>                                           | <i>45</i> |
| <i>Obrázek 23: Závislost výšky osy na výkonu a otáčkách.....</i>                            | <i>47</i> |
| <i>Obrázek 24: Velikost činitele <math>k_E</math> v závislosti na <math>D_e</math>.....</i> | <i>49</i> |
| <i>Obrázek 25: Lineární hustota proudu a indukce ve vzduchové mezeře.....</i>               | <i>49</i> |
| <i>Obrázek 26: Rozmezí stíhlostního poměru.....</i>                                         | <i>50</i> |
| <i>Obrázek 27: Velikosti drážkových roztečí.....</i>                                        | <i>51</i> |
| <i>Obrázek 28: Střední hodnoty součinu <math>AJ</math>.....</i>                             | <i>53</i> |
| <i>Obrázek 29: Délka vzduchové mezery v závislosti na vnitřním průměru statoru .....</i>    | <i>56</i> |



---

|                                                          |           |
|----------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Obrázek 30: Činitel <math>k_i</math>.....</i>         | <i>58</i> |
| <i>Obrázek 31: Náskres statorového plechu .....</i>      | <i>68</i> |
| <i>Obrázek 32: Detail statorové drážky .....</i>         | <i>68</i> |
| <i>Obrázek 33: Schéma trojfázového vinutí .....</i>      | <i>69</i> |
| <i>Obrázek 34: Náskres rotorového plechu .....</i>       | <i>70</i> |
| <i>Obrázek 35: Detail drážky rotoru .....</i>            | <i>70</i> |
| <i>Obrázek 36: Rozměrový výkres motoru T22VT512.....</i> | <i>71</i> |



## SEZNAM TABULEK

|                                                                               |           |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Tabulka 1: Parametry motoru.....</i>                                       | <i>36</i> |
| <i>Tabulka 2: Hodnoty naměřené při chodu naprázdno .....</i>                  | <i>38</i> |
| <i>Tabulka 3: Vypočtené hodnoty při měření naprázdno .....</i>                | <i>39</i> |
| <i>Tabulka 4: Hodnoty naměřené při chodu nakrátko .....</i>                   | <i>43</i> |
| <i>Tabulka 5: Vypočtené hodnoty při měření nakrátko .....</i>                 | <i>43</i> |
| <i>Tabulka 6: Normalizované výšky os a vnější průměry statorů.....</i>        | <i>48</i> |
| <i>Tabulka 7: Poměr <math>K_D</math> pro různé počty pólových dvojic.....</i> | <i>48</i> |
| <i>Tabulka 8: Činitel plnění železa.....</i>                                  | <i>54</i> |
| <i>Tabulka 9: Přídavky na skládání plechů.....</i>                            | <i>56</i> |
| <i>Tabulka 10: Činitel <math>k_h</math> .....</i>                             | <i>57</i> |
| <i>Tabulka 11: Normované rozměry drážek .....</i>                             | <i>64</i> |
| <i>Tabulka 12: Doporučené počty drážek .....</i>                              | <i>65</i> |
| <i>Tabulka 13: Normované průřezy izolovaných vodičů pro vinutí .....</i>      | <i>66</i> |
| <i>Tabulka 14: Dovolené hodnoty indukce.....</i>                              | <i>67</i> |



## ÚVOD

Asynchronní stroje jsou elektrické točivé stroje, které umožňují elektromechanickou přeměnu energie. Dělíme je na motory, u nichž dochází k přeměně elektrické energie na mechanickou a generátory, které mění mechanickou energii na elektrickou.

Asynchronní stroje se používají téměř výhradně jako motory, jejichž výstupem je mechanický pohyb otáčivý nebo lineární.

Díky současným trendům a také doporučení Evropské unie, je nutné zabývat se otázkou snižování spotřeby elektrické energie. Jedním z klíčových hledisek, které vedou ke snížení spotřeby elektrické energie je zvyšování účinnosti, které v případě motoru udává poměr mezi mechanickým výkonem získávaným na hřídeli a příkonem.

# 1 ASYNCHRONNÍ MOTORY

Asynchronní motory se jako pohony v průmyslu používají nejčastěji, jsou konstrukčně jednoduché, spolehlivé a nevyžadují zvláštní obsluhu a údržbu. Asynchronní motory se vyrábí v širokém rozsahu výkonů, od jednotek wattů v podobě jednofázových strojů až po desítky megawattů a také ve velkém rozsahu otáček, od desítek až po statisíce otáček za minutu.

Základní rozdělení asynchronních motorů, může být provedeno podle:

- a) směru toku energie:
  - i) motor
  - ii) generátor
  - iii) brzda
- b) provedení statorového vinutí:
  - i) jednofázové
  - ii) vícefázové (nejčastěji třífázové)
- c) provedení rotorového vinutí:
  - i) s kotvou nakrátko
  - ii) s vinutým rotorem
- d) podle druhu výstupní energie:
  - i) rotační
  - ii) lineární

## 1.1 Konstrukce ASM

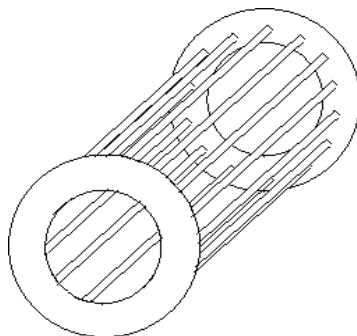
Magnetický obvod asynchronních motorů je rozdělen vzduchovou mezerou, na část statoru a rotoru.

Stator je obvykle vyroben z litinového pláště a dvou ložiskových štítů. V plášti statoru jsou zalisovány elektrotechnické plechy, které jsou navzájem izolovány a tvoří část magnetického obvodu stroje. V drážkách statorových plechů je uloženo vinutí stroje. Na statoru bývá jednofázové, dvoufázové nebo obvykle trojfázové vinutí. Začátky a konce vinutí jsou vyvedeny na svorkovnici.

Rotorové plechy jsou připevněny na hřídeli, jež se otáčí v ložiskách, které jsou upevněny v ložiskových štítech. Ložiska vymezují polohu rotoru uvnitř statoru. V drážkách rotoru je uloženo vinutí, kterému se říká kotva.

### 1.1.1 Rotor s kotvou nakrátko

U motoru s kotvou nakrátko jsou v drážkách rotoru neizolované měděné nebo mosazné, nejčastěji však hliníkové vodiče – tyče, které jsou spojeny kruhy nakrátko. Takovému vinutí se říká klec. U motorů menších výkonů se vinutí odlévá spolu s větracími lopatkami z hliníku metodou tlakového lití.

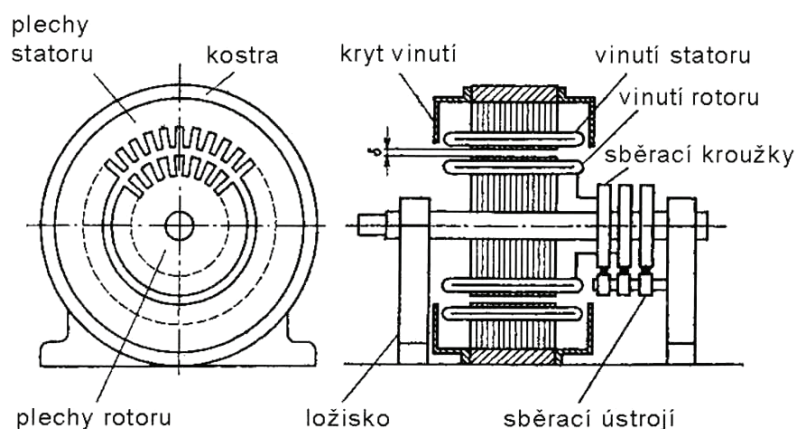


Obrázek 1: Klec ASM s kotvou nakrátko

### 1.1.2 Rotor s vinutou kotvou

U motoru s vinutým rotorem je v drážkách rotoru uloženo trojfázové vinutí z izolovaných vodičů, začátky fází jednotlivých vinutí (cívek) jsou spojeny do uzlu a konce připojeny ke třem sběracím kroužkům, ke kterým přiléhají kartáče.

Toto provedení vinutí rotoru umožňuje připojit zařízení, které slouží k regulaci otáček motoru a k omezení záběrného proudu. Použitím kartáčů však odpadá jedna z největších výhod ASM.



Obrázek 2: ASM s kroužkovou kotvou [1]

## 1.2 Princip činnosti ASM

Základem činnosti asynchronního motoru je vytvoření točivého magnetického pole, které vznikne průchodem střídavého proudu vinutím statoru. Toto rotující elektromagnetické pole pak

indukuje v rotoru napětí, toto napětí vytváří ve vinutí rotoru proud, který vyvolá druhé magnetické pole. Působením těchto polí vzniká moment a rotor se roztočí ve směru točivého pole statoru. Z uvedeného vyplývá, že energie se přenáší z vinutí statoru do vinutí rotoru jen elektromagnetickou indukcí, tj. bez vodivého spojení a proto jsou tyto motory označovány jako indukční.

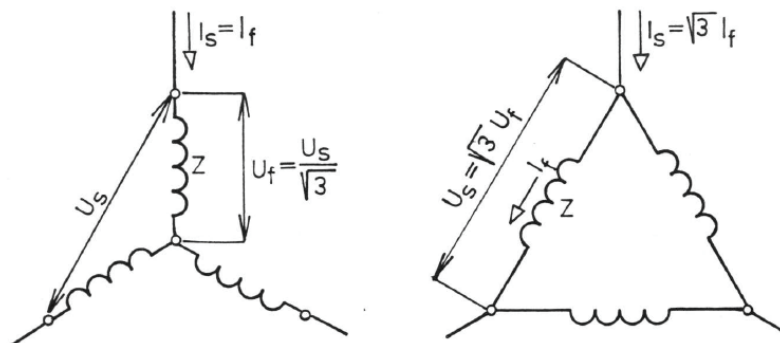
Konkrétněji bude princip činnosti vysvětlen dále, zvláště pro jednofázový ASM a zvláště pro častěji používaný třífázový ASM.

### 1.3 Spouštění asynchronních motorů

Při spouštění asynchronního motoru je záběrový proud až 7 krát vyšší než hodnota jmenovitého proudu, tak vznikají v síti velké proudové rázy. Proto je přímé spouštění povoleno pouze pro motory s výkonem přibližně do 3 kW.

Při spouštění motoru s kotvou nakrátko je možné záběrný proud snížit pouze snížením rozběhového napětí. V praxi se používají tyto způsoby spouštění:

- Statorový spouštěč – v sérii se statorovým vinutím se zapojí omezovací odpory, které se během spouštění postupně vyřazují. Pro omezení tepelných ztrát na jednotlivých odporech se do obvodu zařazují předřadné cívky, které mají za následek zhoršení účinníku. Tento způsob je vhodný pro rozběh málo zatížených motorů [4].
- Rozběhové transformátory – napájení statoru je připojené přes transformátory, které snižují rozběhové napětí a tím i rozběhový proud. Z ekonomických důvodů se nejčastěji používají autotransformátory. Tento způsob rozběhu se používá převážně pro motory velkých výkonů [4].
- Přepínač hvězda-trojúhelník (Y-D) – statorové vinutí motoru je běžně spojeno do trojúhelníku, při rozběhu do hvězdy se napětí na vinutí zmenší  $\sqrt{3}$  krát, tím klesne odebíraný proud, tedy i výkon klesne na třetinu. Takový rozběh se používá jen při malém zatížení motoru [4].



Obrázek 3: Napěťové a proudové poměry při použití přepínače Y-D [4]

- Polovodičový regulátor napětí – jde o moderní postup, který se používá čím dál častěji. Při tomto rozběhu lze dosáhnout plynulého rozběhu motoru, zlepšení účinníku.

- Speciální úprava klece:
  - Kotvy s dvojitou klecí – jedna klec je nazývána rozběhová a druhá, která je umístěna blíže ke středu, se nazývá doběhová.
  - Odporová klec – klec vyrobená z materiálu s větším měrným odporem.
  - Vírová kotva – speciální tvary drážek a tyčí vinutí jsou umístěny po celém obvodu rotoru, každý z těchto vodičů má stejný odpor, ale různé rozptylové indukčnosti.

Při spuštění motoru s kroužkovou kotvou se přes kartáče připojuje tzv. rotorový spouštěč. Rotorový spouštěč je sestaven ze tří stejně velkých odporů, které jsou postupně vyřazovány. Na konci rozběhu je vinutí spojeno nakrátko. Motory mohou být při tomto rozběhu zatíženy.

## 1.4 Základní vztahy

### 1.4.1 Otáčky pole statoru

Rychlost otáčení magnetického pole statoru je závislá na kmitočtu napájecího napětí a na počtu pólových dvojic stroje. Skutečné otáčky motoru jsou nižší právě o skluz.

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

### 1.4.2 Skluz

Silové působení mezi magnetickým polem statoru a polem rotoru vyvoluje za chodu motoru na hřídeli točivý moment. Aby k tomuto jevu došlo, musí se rotor otáčet o něco pomaleji než je točivé pole statoru. Relativní rozdíl mezi otáčkami pole a rotoru se nazývá skluz.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 [\%] \quad (2)$$

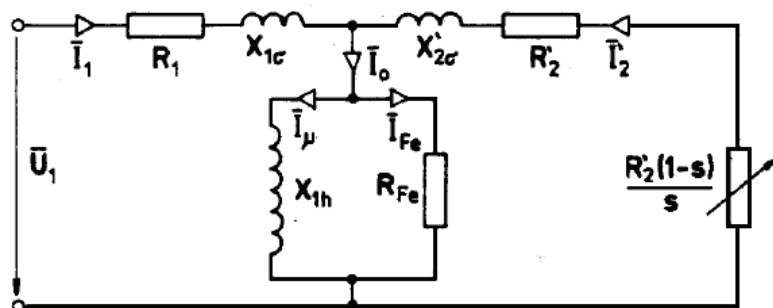
Skluz motoru závisí také na mechanickém zatížení motoru. Se vzrůstajícím zatěžovacím momentem roste. Při překročení určité hranice zatěžovacího momentu naroste skluz natolik, že se motor značně zahřívá a jeho účinnost klesá. V tomto režimu není vhodné motor provozovat.

### 1.4.3 Otáčky rotoru

Otáčky samotného rotoru lze pak jednoduše určit z následující rovnice.

$$n = (1 - s) \cdot n_s [\text{min}^{-1}] \quad (3)$$

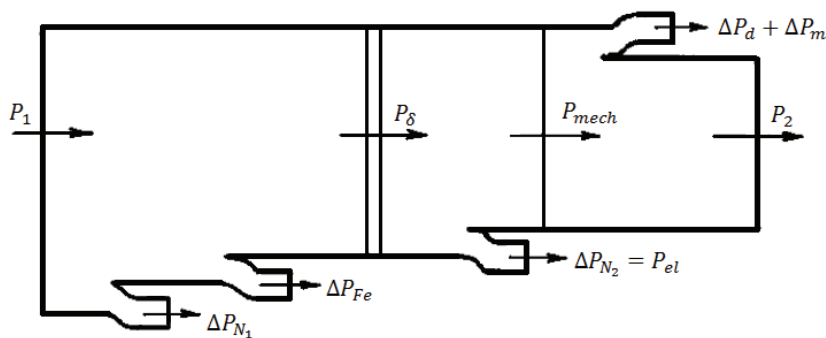
## 1.5 Obvodový model ASM



Obrázek 4: Obvodový model jedné fáze ASM [3]

## 1.6 Odvození momentu

Pro odvození momentu vyjdeme z diagramu toku výkonů, viz obrázek 5, a z obvodového modelu ASM, viz obrázek 4. Vznik a rozdělení ztrát je uvedeno dále v samostatné kapitole.



Obrázek 5: Tok výkonu v asynchronním motoru [3]

Ze zdroje odebíráme motorem příkon  $P_1$ :

$$P_1 = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi \quad (4)$$

Ten pokrývá činné ztráty ve vinutí statoru  $\Delta P_{N_1}$  a ztráty v magnetickém obvodu motoru  $\Delta P_{Fe}$ . Hlavní část příkonu však prochází vzduchovou mezerou – výkon  $P_\delta$  do rotoru.

$$P_\delta = M \cdot \omega_1 = M \cdot 2\pi \cdot \frac{f}{p} = M \cdot 2\pi \cdot n_s \quad (5)$$

Odečteme-li od  $P_\delta$  činné ztráty ve vinutí rotoru  $\Delta P_{N_2}$ , dostaneme mechanický výkon stroje  $P_{mech}$ .

$$P_{mech} = M \cdot \omega = M \cdot \omega_1 \cdot (1 - s) \quad (6)$$

Dále z Obrázek 5: Tok výkonu v asynchronním motoru můžeme určit:

$$P_{el} = P_{\delta} - P_{mech} \quad (7)$$

$P_{el}$  je elektrický výkon, který se spotřebuje na všech činných odporech rotoru. V případě, že v rotoru kroužkového motoru je zapojen spouštěč, je v hodnotě  $P_{el}$  zahrnutý i činný odpor spouštěče. Z uvedených vztahů vyplývá:

$$\frac{P_{el}}{P_{\delta}} = M \cdot \frac{\omega_1 - \omega}{M \cdot \omega_1} = s \quad (8)$$

$$P_{el} = P_{\delta} \cdot s \quad (9)$$

Elektrickému výkonu  $P_{el}$  se říká skluzový. V další kapitole uvidíme, že můžeme změnou skluzového výkonu řídit otáčky asynchronního motoru.

Na hřídeli stroje nedostaneme celý mechanický výkon  $P_{mech}$ , který stroj vytváří, ale výkon  $P_2$ , menší o vlastní mechanické ztráty stroje  $\Delta P_m$  a ztráty dodatečné  $\Delta P_d$ .

$$P_2 = P_{mech} - \Delta P_m - P_{\delta} \quad (10)$$

Velikost výkonu  $P_{mech}$  určíme z obvodového modelu na obr. 2.3-14b a je roven činnému výkonu spotřebovanému na odporu  $\frac{R_2}{s}(1 - s)$ .

$$P_{mech} = m_1 \cdot I_2'^2 \cdot \frac{R_2}{s} (1 - s) \quad (11)$$

Mechanický moment je určen rovnicí

$$M_{mech} = \frac{P_{mech}}{\omega} \quad (12)$$

Z obvodového modelu s ohledem na parametry statoru určíme velikost proudu  $I_2'$

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{r1} + X_{r20}')^2}} \quad (13)$$

$$M_{mech} = \frac{U_1^2 \cdot m_1 \cdot p \cdot \frac{R'_2}{s}}{2\pi \cdot f \cdot \left[ \left( R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_{r1} + X_{r20})^2 \right]} \quad (14)$$

### 1.6.1 Momentová charakteristika ASM

Graph of torque  $M$  versus speed  $n$  for an asynchronous motor. The vertical axis is torque  $M$ , and the horizontal axis is speed  $n$ . The curve starts at a high torque for low speed ( $s > 1$ ), decreases to a minimum torque  $M_n$  at synchronous speed  $n = n_s$  ( $s = 0$ ), and then increases to a maximum torque  $M_{\max}$  at speed  $n_{\max}$  ( $s = s_{\max}$ ). The region to the left of  $n = n_s$  is labeled "motor" and the region to the right is labeled "generátor". The region to the left of  $n = 0$  is labeled "protisměrné brždění". The region between  $n = 0$  and  $n = n_s$  is labeled  $s = 1$ . The region between  $n = n_s$  and  $n = n_{\max}$  is labeled  $s = 0$ . The region to the right of  $n = n_{\max}$  is labeled  $s < 0$ .

Obrázek 6: Typický průběh momentové charakteristiky 3f ASM s kotvou nakrátko [2]

Pro praktické použití se dá charakteristika vypočítat pomocí tzv. zjednodušeného Klossova vztahu:

$$M = \frac{2 \cdot M_{max}}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}} [Nm] \quad (15)$$

### 1.6.2 Ztráty ASM

Z obrázku 5, tok výkonu v asynchronním motoru lze určit, kde vznikají dílčí ztráty. Jak již bylo uvedeno výše, z příkonu stroje  $P_1$  jsou pokryty ztráty na statorovém vinutí  $\Delta P_{N_1}$  a ztráty v magnetickém obvodu motoru  $\Delta P_{Fe}$ .

$$\Delta P_{N_1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \quad (16)$$

Z rovnice 5 určíme výkon ve vzduchové mezeře, pak můžeme vyjádřit ztráty v magnetickém obvodu  $\Delta P_{Fe}$ .

$$\Delta P_{Fe} = P_1 - P_\delta - \Delta P_{N_1} \quad (17)$$

Z výkonu ve vzduchové mezeře jsou pokryty ztráty ve vinutí rotoru.

$$\Delta P_{N_2} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 \quad (18)$$

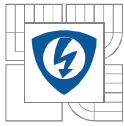
## 1.7 Řízení otáček asynchronních motorů

Jak bylo uvedeno výše, otáčky rotoru popisuje rovnice (3), po úpravě platí:

$$n = (1 - s) \cdot n_s = \frac{60 \cdot f}{p} (1 - s) [\text{min}^{-1}] \quad (19)$$

Otáčky rotoru jsou tedy dány skluzem, kmitočtem napájecího napětí a počtem pólových dvojic. Z toho plyne, že regulaci otáček můžeme provést změnou jednotlivých veličin:

- **Změna skluzu** – změnu velikosti skluzu provádíme [2]:
  - Změnou napájecího napětí – podle rovnice (14) je moment závislý na kvadrátu napájecího napětí, snížením napájecího napětí výrazně klesá moment
  - Změnou odporu  $R_2$  – zvýšením odporu rotoru se zvětšuje skluz a tím i ztráty. Tento způsob regulace je neekonomický, používá se pro motory s vinutou kotvou.
- **Změna frekvence napájecího napětí** – tato změna ovlivňuje magnetický tok, proud a tedy i moment motoru. Současně se změnou kmitočtu se mění i napájecí napětí pomocí nepřímého měniče. Je to ekonomický, plynulý, v současnosti nejvíce používaný způsob regulace otáček [2]:
  - Skalární řízení – lze nastavovat velikost magnetického toku.
  - Vektorové řízení – kromě velikosti magnetického toku lze nastavovat i jeho směr a tím můžeme docílit plynulou změnu otáček při jakémkoliv režimu práce



a zatížení. Jde o nejdokonalejší způsob řízení otáček a lze jím docílit i otáček nadsynchronních.

- **Změna počtu pólů** – statory takových strojů jsou konstrukčně složité, obsahují několik samostatných vinutí nebo se provádí změnou zapojení statorového vinutí. Používá se pro motory s kotvou nakrátko, takové řízení je stupňovité, otáčky se mění po skocích.[4]

## 2 TŘÍFÁZOVÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR

Třífázový asynchronní motor je výrobně nejjednodušší a proto nejlevnější elektrický motor s vysokou spolehlivostí. Je nejčastěji používaným motorem, nevýhodou je pouze velký proudový náraz při rozběhu a induktivní účinník  $\cos \varphi$ , způsobující jalové zatížení sítě. Vyrábí se pro široké rozpětí výkonů (od desítek wattů po megawatty).

### 2.1 Konstrukce

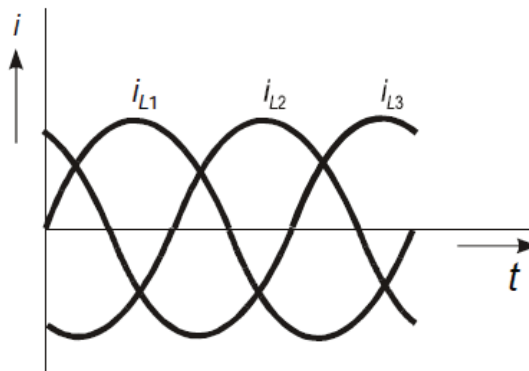
Hlavní části motoru jsou stator a rotor, mezi nimi je konstantní vzduchová mezera. Asynchronní motory se vyrábějí nejčastěji jako zavřené s vlastním povrchovým chlazením v provedení minimálně IP 44.

Stator se skládá z nosného tělesa (krytu) motoru, svazku statorových plechů a statorového vinutí, které je umístěno v drážkách. Statorové cívky jsou rozmístěny po obvodu statoru a vzájemně posunuty o  $120^\circ$ . Konce statorového vinutí jsou vyvedeny na svorkovnici.

Rotor je tvořen z elektrotechnických plechů, které jsou připevněny na hřídeli. Ve svazku rotorových plechů jsou vyraženy drážky, ve kterých je uloženo vinutí. Rotor bývá proveden s kroužkovou kotvou, nebo dnes častěji s kotvou nakrátko. Jednotlivá provedení kotvy jsou popsány v kapitole 1.1.1 a 1.1.2.

### 2.2 Princip činnosti

Po připojení trojfázového statorového vinutí na trojfázovou napájecí síť o frekvenci  $f$  proudy vytvářejí v každé cívce magnetické pole o magnetické indukci  $B(t)$ , časový průběh takového magnetického pole odpovídá průběhu proudu, viz obrázek 7. Vektorovým součtem okamžitých hodnot magnetických indukcí od všech cívek, získáváme výsledný vektor magnetické indukce. Jeho velikost je stálá, vektor se otáčí rovnoměrně, v rovině kolmé na osu rotoru, tím vzniká točivé magnetické pole.



Obrázek 7: Průběh proudů v jednotlivých fázích statorového vinutí [2]

Rychlost otáčení tohoto magnetického pole (synchronní otáčky) závisí podle rovnice (1) na frekvenci napájecí sítě  $f$  a na počtu pólových dvojic. Magnetické pole statoru prochází přes vzduchovou mezeru do rotoru.

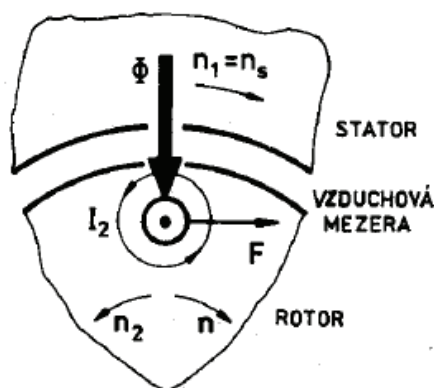
Indukční čáry točivého magnetického pole protínají vodiče rotorového vinutí a indukují v nich napětí – proto je ASM nazýván i strojem indukčním. Napětí indukované ve statorovém vinutí působí proti napětí sítě, čímž omezuje statorový proud na hodnotu, pro kterou je stroj navržen.

Napětí indukované v rotoru vyvolá v uzavřeném rotorovém vinutí průtok proudu. Na rotorové vinutí, nacházející se v magnetickém poli a protékané proudem, působí mechanická síla. Na základě Lenzova zákona se vodiče začnou vychylovat ve směru otáčení magnetického pole. Rotorové proudy rovněž vytvářejí točivé magnetické pole ve vzduchové mezeře s otáčkami  $n_2$  vzhledem k rotoru.

$$n_2 = \frac{60 \cdot f_2}{p} [\text{min}^{-1}] \quad (20)$$

Při postupném narůstání otáček se snižuje relativní pohyb vodičů vůči poli, snižuje se indukované napětí a proud, v důsledku čeho se sníží i síla působící na vodič. Tak dochází k ustálení otáček rotoru na určité hodnotě menší, než jsou synchronní otáčky. Motor ani nemůže dosáhnout synchronních otáček, protože při nich by se neindukovalo napětí a nepůsobila by mechanická síla vyvolující točivý moment. V nezatíženém stavu se rotor otáčí otáčkami naprázdno  $n_0$ , které jsou téměř shodné se synchronními otáčkami  $n_s$ . [4]

V zatíženém stavu jsou otáčky rotoru  $n$  menší než synchronní otáčky  $n_s$  o skluz, viz kapitola 1.4.2.



Obrázek 8: Vznik tažné síly u ASM [4]

## 2.3 Výkon a moment třífázového ASM

Z pohledu napájecí sítě se třífázový motor chová jako souměrný spotřebič. Jeho příkon lze vyjádřit vztahem z rovnic uvedených v kapitole 1.6.

$$P_1 = 3 \cdot U_{1f} \cdot I_{1f} \cdot \cos\varphi \quad (21)$$

Vyjádření pro sdružené napětí a sdružené proudy:

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot U_S \cdot I_S \cdot \cos\varphi \quad (22)$$

## 2.4 Provozní stavy třífázového stroje

- **motor** – elektrická energie odebíraná ze sítě a vstupující do statoru se prostřednictvím magnetického pole přenáší na rotor a odtud v mechanické formě na hřídel hnaného stroje. Stroj pracuje jako motor a vytváří na hřídeli hnací točivý moment
- **generátor** – je-li stroj poháněn hnacím strojem nadsynchronními otáčkami,  $n > n_s$  (např. spouštění břemene jeřábem, jízda lokomotivy ze svahu, vodní elektrárna), pak se mechanická energie přivádí hřídelí do rotoru, z rotoru prostřednictvím magnetického pole do statoru a ze statoru v elektrické formě do sítě.
- **brzda** – pokud jsou stroji vnucené otáčky proti smyslu otáčení točivého magnetického pole ve vzduchové mezeře, změní se směr mechanických otáček a vzniká brzdný moment.[4]

## 3 MOTORY PRO SPECIFICKÉ APLIKACE

Jak bylo uvedeno výše, v současnosti se v průmyslu, hlavně díky rozvoji výkonové elektroniky, nejčastěji používají třífázové asynchronní motory s kroužkovou kotvou. Podstatnou část ovšem zabírají také další různá provedení asynchronních motorů, v tomto směru je hlavním motorem jednofázový asynchronní motor v různých provedeních.

Díky potřebám dalších druhů speciálních pohonů však výrobci uvádějí na trh asynchronní motory nízkého napětí, asynchronní motory v nevýbušném provedení, asynchronní motory nízkého napětí určené k pohonu různých průmyslových zařízení jako jsou ventilátory, čerpadla, obráběcí stroje, hydraulické komponenty a dřevoobráběcí stroje. Obsahem této kapitoly bude nastínění možností využití asynchronních motorů a jejich stručný popis.

### 3.1 Jednofázový asynchronní motor

Jednofázové asynchronní motory (jednofázové indukční motory) jsou využívány k pohonu průmyslových a jiných zařízení například v domácnostech, u kterých výkon zpravidla nepřesahuje 1000 W. U vyšších výkonů by docházelo k nevhodnému zatížení pouze jedné fáze, což by mělo negativní vliv na distribuční síť.

Běžně jsou jednofázové ASM využívány jako pohon pro čerpadla, ventilátory, pračky, ledničky apod. Pro všechna tato zařízení postačuje jednofázové napájecí napětím. Jednofázové asynchronní motory se zpravidla používají tam, kde není nutné během provozu regulovat otáčky.

#### 3.1.1 Konstrukce

Jednofázový ASM se liší od trojfázového asynchronního motoru především provedením statoru.

Stator je opět sestaven z plechů, které jsou naskládány na sebe do tvaru dutého válce. Na vnitřním obvodu jsou drážky. Dvě třetiny drážek statoru jsou obsazeny pracovním vinutím, tzv. hlavní fáze, ve zbývajících jedné třetině je uloženo vinutí rozběhové, tzv. pomocná fáze. Rozběhové vinutí je obvykle připojeno paralelně k pracovnímu.

Rotor je tvořen svazkem elektrotechnických plechů, svazek plechů je podélně drážkovaný. V drážkách je uloženo vinutí, v podobě klece. Jednotlivé vodiče jsou tvořeny hliníkovými tyčemi spojenými kroužky.

Provedení rotoru s vinutou kotvou se v praxi nepoužívá, protože při výkonech do 1000 W, kterých tyto motory dosahují, není nutné snižovat záběrný proud.

### 3.1.2 Princip činnosti jednofázového ASM

Přestože je konstrukce jednofázového ASM jednoduchá, podrobné vysvětlení principu činnosti je obtížnější než u třífázového ASM.

Jednofázový asynchronní motor se po připojení k síti nerozběhne, neboť jeho vinutí, napájené jednofázovým napětím, nevyvolá točivé magnetické pole, ale pouze pulsující magnetické pole, které nedokáže vyvolat točivý moment.

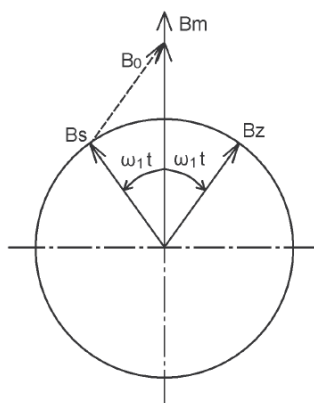
Z uvedeného vyplývá, že jednofázový asynchronní motor lze roztočit pouze vnějším impulsem, který může být mechanický nebo vytvořený pomocí točivého elektromagnetického pole na statoru. K vytvoření točivého elektromagnetického pole je nutná soustava alespoň dvou fází neboli vinutí, kterými musí procházet vzájemně fázově posunuté proudy.

Pro vznik točivého elektromagnetického pole je tedy fázové posunutí mezi proudy v hlavním a pomocném vinutí. Motory se rozbíhají jako dvoufázové. Pomocné vinutí (fáze) má kapacitní, odporový, nebo induktivní charakter, tím vzniká potřebný fázový posuv. Po rozběhu se pomocná fáze zpravidla odpojí (nejčastěji odstředivým vypínačem) [3].

### 3.1.3 Pulsující magnetické pole

Pulsující magnetické pole indukuje ve vodičích rotorového vinutí napětí, vodiči prochází proud, který vytvoří magnetické pole, působící v každém okamžiku proto poli statoru. Jeho osa je však totožná s osou pole statoru a motor nevytváří výsledný moment. Stroj se potom chová jako transformátor, jehož sekundární svorky jsou zkratovány.

Pulsující magnetické pole vzniká superpozicí dvou točivých kruhových magnetických polí (sousedního –  $B_S$  a zpětného –  $B_Z$ ), která se otáčejí proti sobě stejnou úhlovou rychlostí  $\omega_1$ . Tato pole indukují ve vinutí rotoru proudy.



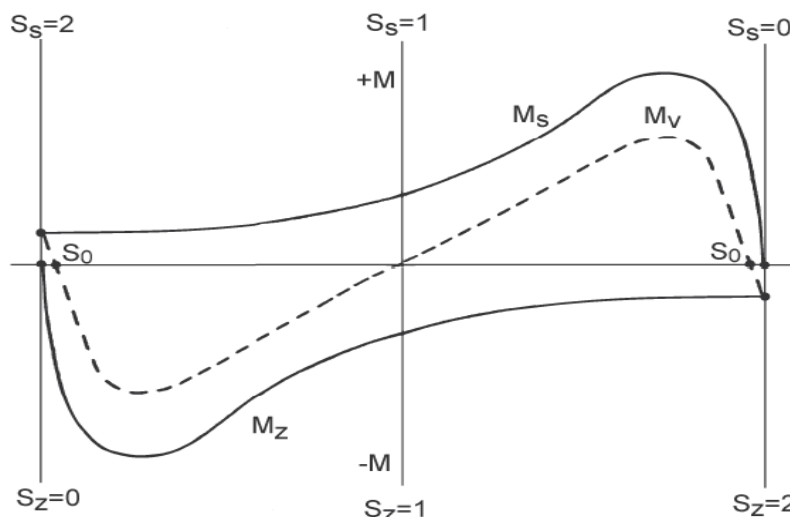
Obrázek 9: Superpozice magnetických polí ve vzduchové mezeře [2]

#### 3.1.3.1 Momentová charakteristika jednofázového ASM

Typický průběh momentové charakteristiky jednofázového asynchronního motoru je dán působením magnetického pole statoru a pulsujícím magnetickým polem, které indukují proudy

v rotoru a vytvářejí tak momenty  $M_S$  a  $M_Z$  (sousedný a zpětný), které působí proti sobě. Výsledný moment motoru je dán součtem momentových charakteristik obou složek.

Z výsledné momentové charakteristiky je patrné (obrázek 10), že jednofázový ASM vytváří nulový záběrný moment, to potvrzuje, že motor se sám nerozběhne – průběh  $M_V$ .

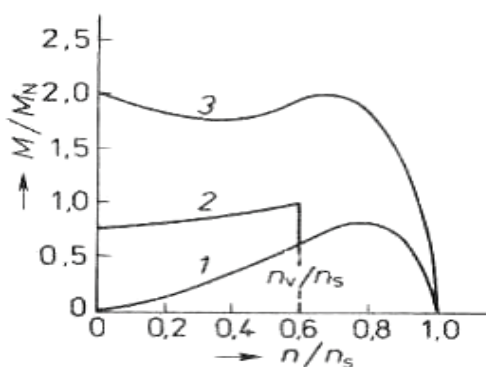


Obrázek 10: Momentová charakteristika jednofázového ASM [14]

### 3.1.4 Záběrový moment jednofázového ASM

Jak již bylo uvedeno, pro vznik záběrového momentu je u jednofázového asynchronního motoru potřeba vytvořit točivé magnetické pole statoru.

Abychom se vyhnuli mechanickému roztáčení rotoru, využíváme jiné způsoby jak dosáhnout vzniku záběrného momentu. Nejjednodušší je využití statoru, který bude obsahovat vinutí z hlavní a pomocné fáze. Fázový posun proudu ve druhém (pomocném) vinutí je zajištěn připojením kondenzátoru, tlumivky, nebo vlastním odporem vinutí.

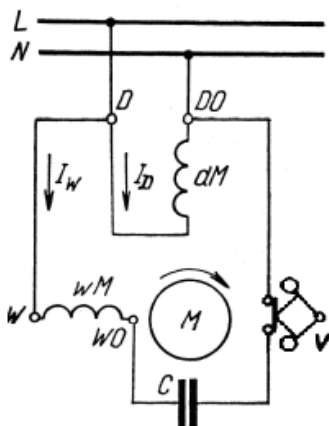


Obrázek 11: Momentová charakteristika jednofázového ASM s rozběhem pomocí C a R [1]

Dále také můžeme využít konstrukci jednofázového asynchronního motoru se stíněným pólem, nebo zapojit třífázový asynchronní motor jako jednofázový.

### 3.1.4.1 Jednofázový ASM s kondenzátorem v pomocné fázi

Zapojením kondenzátoru C do pomocné fáze, viz obrázek 12, vzniká mezi proudy v jednotlivých fázích statoru fázový posun, který vyvolá točivé magnetické pole.



Obrázek 12: Zapojení jednofázového ASM s kondenzátorem v pomocné fázi [1]

Kondenzátor je nutný jen pro rozběh motoru, po dosažení určitých otáček se kondenzátor může odpojit zpravidla odstředivým vypínačem V.

Pokud je záběrný moment menší než přibližně 30 % jmenovitého momentu  $M_n$ , lze pomocnou fázi navrhnout tak, aby mohla být stále připojena přes kondenzátor, který má obvykle papírové dielektrikum. Toto řešení zlepšuje účinnost motoru.

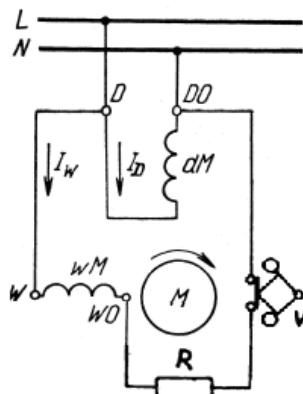
Pokud je kondenzátor použitý jen pro rozběh, používá se elektrolytický silnoproudý kondenzátor. Z důvodu střídavého napětí, které tento kondenzátor snese jen krátkodobě, je nutné jej po rozběhu odpojit. Navíc díky ztrátám na kondenzátoru by mohlo dojít k jeho zničení.

Jednofázový asynchronní motor s kondenzátorem v pomocné fázi se využívá jako pohon, kde je nutný velký záběrný moment, například u pračky nebo u kompresoru chladničky – viz obrázek 12, průběh číslo 3.

### 3.1.4.2 Jednofázový ASM s odporem v pomocné fázi

Rozběh pomocí odporu je možné použít u motorů, kde nepotřebujeme velký záběrný moment (až 1,3 násobek  $M_n$ ). Potřebný fázový posuv mezi proudy v hlavní a pomocné fázi vzniká zvětšením odporu a tedy i napětí v pomocné fázi (zařazení odporu do pomocné fáze viz obrázek 13). Po rozběhu stroje se proud zmenšuje pomalu, veškerý výkon na odporu se přeměňuje na teplo a mohlo by dojít k jeho zničení, je nutné pomocné vinutí rozpojit. V praxi se do pomocného vinutí nepřipojuje odpor, ale vinutí se navine z odporového drátu.

Na obrázku 11 je vidět na průběhu č. 2 rozpojení odporové fáze, momentová charakteristika pak pokračuje po průběhu charakteristiky bez pomocné fáze.



Obrázek 13: Zapojení jednofázového ASM s odporem v pomocné fázi [1]

### 3.1.4.3 Jednofázový ASM s tlumivkou v pomocné fázi

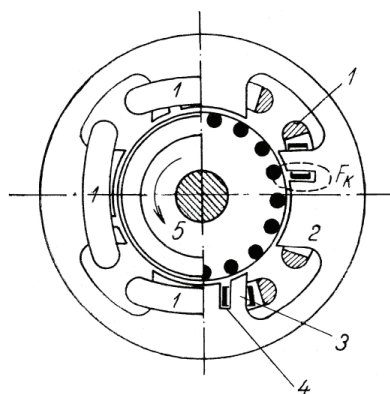
Vřazením tlumivky se dosahuje podstatně většího záběrného momentu, protože fázový rozdíl mezi proudy je mnohem větší než u odporu v pomocném vinutí. V praxi se takový rozběh nepoužívá, protože zhoršuje účinnost motoru.

### 3.1.4.4 Jednofázový ASM se stíněným pólem

Toto provedení jednofázového motoru se používá jako pohon malého výkonu například u ventilátorů. Má malý záběrný moment a účinnost. Jejich konstrukce je jednoduchá, výroba je ekonomicky výhodná.

Vinutí je provedeno tzv. stíněnými póly. V pólu je nesouměrný zářez, ve kterém je umístěn závit nakrátko. Rotor bývá zpravidla v provedení nakrátko, viz obrázek 14.

V závitě na krátko, který je umístěn v magnetickém poli, které indukuje proud v hlavním vinutí, se indukuje proud, který v závitě nakrátko vyvolává opačný magnetický tok a tím zeslabuje magnetické pole pod hlavní částí pólu. Tok vytvořený závitěm nakrátko je fázově i prostorově posunutý. Ve vzduchové mezeře eliptické točivé pole, které umožní rozběh stroje.



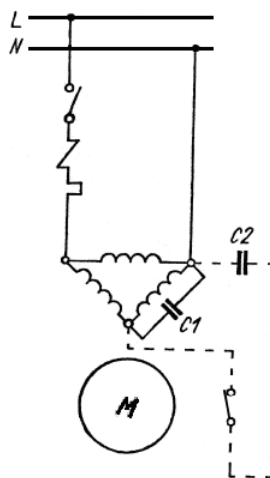
Obrázek 14: Motor se stíněným pólem [1]

1 – Cívky hlavního vinutí (připojené na síť). 2 – vyniklé póly, 3 – rozštěpená část pólu,  
4 – závit nakrátko, 5 – klec

### 3.1.4.5 Třífázový ASM zapojený jako jednofázový

Další specifickou aplikací asynchronních motorů je zapojení třífázového motoru na jednofázovou síť.

V tomto zapojení, viz obrázek 15, je motor zapojen do trojúhelníku, třetí svorka je zapojena přes kondenzátor buď trvale, nebo se po rozběhu může odpojit, pak motor běží jako jednofázový, kdy dosahuje přibližně 50 % výkonu trojfázového motoru. Při trvale připojeném kondenzátoru dosahuje motor až 80 % jmenovitého výkonu třífázového motoru. Pokud je potřeba, aby byl záběrný moment větší než 66 % momentu jmenovitého, lze ke kondenzátoru připojit paralelně druhý kondenzátor –  $C_2$ , který se po rozběhu odpojuje, viz obrázek 15.



Obrázek 15: Zapojení třífázového ASM do jednofázové sítě [1]

## 3.2 Lineární třífázové ASM

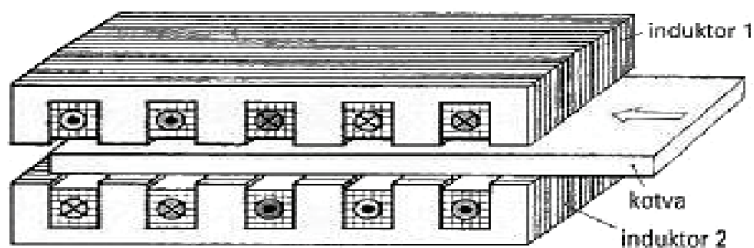
Lineární motory jsou pohony, které vyvolávají lineární pohyb. Jedná se vlastně o motor, kde satorové vinutí není umístěno do kruhu, ale je rozloženo do roviny. Nevzniká tím točivé magnetické pole ale posuvné (postupné) magnetické pole. V této oblasti pohonů se s výhodou používají asynchronní (indukční) motory, protože energie se do pohyblivé části indukuje, odpadá tím nutnost pohyblivých přívodních vodičů.

Budicí část motoru, která vytváří postupné magnetické pole, odpovídá statoru trojfázového motoru, nazývá se induktor. Induktor se skládá ze svazku elektrotechnických plechů, které mají tvar hřebene, v drážkách je uloženo a trojfázové vinutí. V praxi se používají dva induktory umístěné proti sobě, nebo pouze jeden induktor. Pohyblivá část lineárního motoru, která odpovídá rotoru zapojenému nakrátko, se nazývá kotva.

Kotva je uložena mezi oběma induktory, je tvořena plným vodivým materiálem, např. hliníkovou deskou.

Pokud je kotva motoru z feromagnetického materiálu, např. z oceli, lze použít pouze jeden z induktorů, protože magnetický tok mezi póly se uzavírá přes kotvu mezi póly jednoho induktoru

(a nemusí se uzavírat mezi protějšními póly dvou induktorů). Ocelová kotva může být potažena vodivým materiálem, např. hliníkem.



Obrázek 16: Lineární motor s dvěma induktory [2]

Pro praktické použití lineárních motorů je potřeba, aby se induktor a kotva navzájem přesahovali.

Rychlost lineárního motoru závisí na kmitočtu budicího proudu, uspořádání a vzájemné vzdálenosti pólů induktoru. K činnosti motoru a vzniku postupného pole je nutný skluz. Při zatížení může skluz přesáhnout 50 %, neboť lineární motory mají velkou vzduchovou mezeru a velký odpor kotvy. Proto bývá rychlost pohybu mnohem menší než rychlost postupného pole.

Lineární motory pracují s velkým skluzem, maximální moment mají při rozběhu. Jsou používány jako pohon pro transport materiálu, pásových dopravníků, ovládání pohybu supportu při obrábění nebo například pro pohon magnetických vlaků vznášejících se (levitujících) nad kolejnicí [2].

### 3.3 ASM v trakci

V posledních letech se díky rozvoji výkonové elektroniky začínají využívat přednosti asynchronních motorů také v trakci. Hlavní výhody použití ASM jsou opět v jednoduché konstrukci bez komutátoru, celková hmotnost motoru je pak nižší, tzn. zatížení jednotlivých náprav vozidla je nižší a tak má taková soustava delší životnost.

Jednoduchá konstrukce asynchronních motorů ve srovnání s motory stejnosměrnými znamená menší požadavky na údržbu. Asynchronní motory umožňují vyšší mezní výkony, vyšší otáčky a vyznačují se malým momentem setrvačnosti. Díky menším rozměrům lze motory osazovat přímo na hřídele náprav, tím se snižuje prostor nutný pro zástavbu, což dovoluje například snížení podlah u tramvajových vozidel.

Řízení takových pohonů se provádí převážně díky vektorovému řízení (Vector Control) nebo přímým řízením momentu (DTC – Direct Torque Control). Tyto metody se také častěji rozšiřují o moderní systémy řízení, které využívají umělou inteligenci. Využitím moderních způsobů řízení je možné optimálního řešení rekuperace energie do sítě.[10]

### 3.4 ASM v elektromobilech

Předpokládá se, že elektromobily se budou v budoucnosti stále více využívat. Jejich největší výhodou je převádění akumulované energie na pohyb s účinností až 90 % (v případě asynchronního motoru) oproti 30–40 % účinnosti spalovacího motoru. Celková účinnost pohonu samozřejmě také závisí na účinnosti výroby elektřiny pro pohon z primárního zdroje a energetické účinnosti použitých akumulátorů či palivových článků.

Na rozdíl od běžného automobilu lze ale zvyšovat využití energie tzv. rekuperací, v praktickém provozu až o přibližně 25 % – to je možné zvláště v městském provozu nebo členitém terénu. Vyřešení problému rekuperace energie je zásadní pro masivnější rozvoj elektromobilů, protože jako zdroj energie se využívá obvykle akumulátor, který musí být před jízdou nabit a na jehož kapacitě závisí dojezdová vzdálenost elektromobilu.

### 3.5 Nevýbušné nízkonapětové asynchronní motory

Nevýbušné nízkonapětové asynchronní motory s kotovou nakrátko jsou určeny k pohonu průmyslových zařízení, např. ventilátorů, čerpadel apod. v místech, kde se vyrábějí, zpracovávají nebo skladují hořlavé kapaliny nebo plyny a kde je pravděpodobný vznik výbušné atmosféry.

Provedení takových motorů je klasické, ovšem konstrukční uspořádání má znemožnit vznícení výbušné atmosféry v důsledku místního povrchového přehřátí, a dále musí zabránit šíření požáru z vnitřního prostoru motoru do vnějšího prostředí s výbušnou atmosférou.

Základní provedení takových motorů je opatřeno krytím minimálně IP54, respektive IP55, svorkovnice je oddělena od prostoru motoru litinovou svorkovnicovou deskou, ve které jsou umístěny nevýbušné průchodky z izolační hmoty, jimiž procházejí přípojovací svorníky. Motory musí být jištěny proti přetížení a zkratu [6].

### 3.6 Dvoufázový asynchronní motor

Dvoufázové asynchronní motory s kotvou nakrátko se využívají jako výkonové členy v systémech automatické regulace. Dvoufázový asynchronní servomotor má v drážkách statoru uloženo dvoufázové vinutí posunuté navzájem o 90°. Rotor bývá buď klecového typu, nebo ve tvaru dutého válečku. Servomotor musí mít co nejmenší moment setrvačnosti.

Stator je složen ze dvou svazků plechů. Vnitřní svazek je v dutině vnějšího a jsou od sebe odděleny poměrně velkou vzduchovou mezerou, neboť v ní je uložen otočný dutý váleček (hrníček) z elektricky vodivého materiálu. Váleček je rotorem servomotoru. Nevýhodou tohoto uspořádání je podstatně menší mechanický výkon ve srovnání s klecovou kotvou. Výhodou je naopak malý moment setrvačnosti. Tento druh asynchronního motoru lze velmi snadno reversovat i při vysokých otáčkách a dobře sledovat změny na řídicí fázi [6].

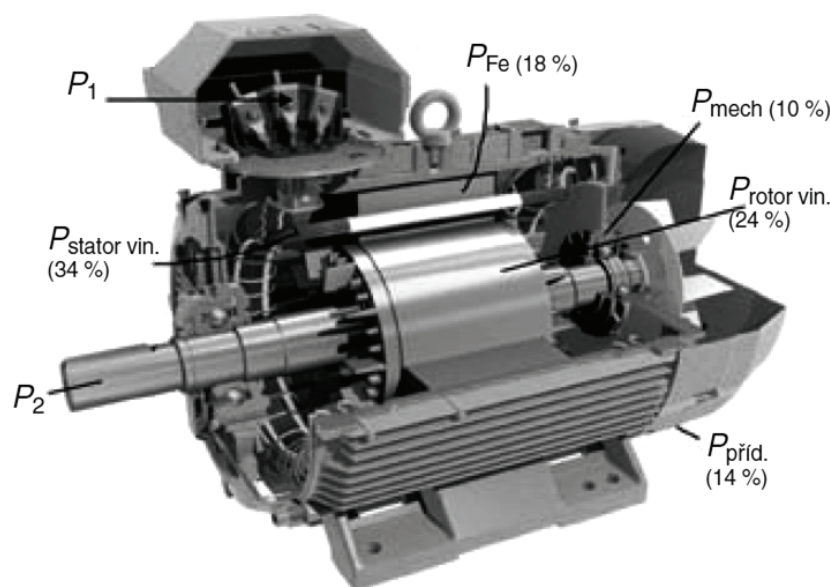
## 4 MOŽNOSTI ZVÝŠENÍ ÚČINNOSTI

Současným trendem je snižování spotřeby elektrické energie. Jedním z klíčových hledisek, které vedou ke snížení spotřeby elektrické energie je zvyšování účinnosti. Účinnost v případě motoru udává poměr mezi mechanickým výkonem získávaným na hřídeli a příkonem. Ztráty, které vznikají v tomto procesu elektromechanické přeměny, se přeměňují na teplo.

Ztráty v elektrických strojích je možné rozdělit na ztráty mechanické, elektromagnetické respektive elektrické a magnetické.

V této kapitole budou uvedeny a popsány ztráty, které mají zásadní vliv na účinnost asynchronních motorů. V další části kapitoly je zpracováno měření asynchronního motoru zapůjčeného od firmy ATAS elektromotory Náchod, a. s. Na tomto motoru budou nastíněny možnosti zvýšení účinnosti.

Obrázek 17 znázorňuje přibližné procentuální rozložení ztrát v běžném asynchronním motoru.



Obrázek 17: Procentuální rozložení ztrát v motoru [9]

### 4.1 Ztráty elektrické

Ztráty ve vinutí statoru a rotoru jsou určeny proudovou hustotou ve vodiči, tedy proudem, který prochází vodičem, počtem závitů, délkou vinutí a měrným odporem použitého materiálu pro vinutí. Je známo, že vodič se průchodem proudu ohřívá, elektrická energie se mění na Joulovo teplo, proto se někdy nazývají Joulovy ztráty. Množství tepla, které proud ve vodiči vyvolá je dáno vztahem:

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \text{ [J]} \quad (23)$$

Odpor vodiče je závislý na teplotě, s rostoucí teplotou se odpor vodiče zvyšuje. Zahříváním vodiče se tedy parametry vinutí zhoršují, navíc vinutí se složitě chladí, protože je umístěno v drážkách. Ze vztahu pro výpočet odporu vodiče

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \text{ [\Omega]} \quad (24)$$

Lze odvodit, že snížení odporu vinutí můžeme provést zvětšením průřezu vodiče. Další možností je snížení rezistivity materiálu, popřípadě použitím supravodivého materiálu. Provedení vinutí ze stříbra by však znamenalo značné zvýšení ceny vinutí.

Ztráty ve vinutích ovlivníme použitím kvalitních materiálů, u statoru bychom se měli zabývat především velikostí drážek a zmenšením izolace vodičů – tím můžeme zvýšit průřez vodiče a použití elektricky čisté mědi.

U vinutí rotoru lze odpor snížit zvětšením průřezu tyčí a kroužků, změnou materiálu. Pro odlévání klecového rotoru nakrátko se zpravidla používá hliník, jehož teplota tání je 660 °C. Jako alternativa se jeví použití mědi, která má až o 35 % lepší vodivost, jejíž teplota tání je 1 083 °C. Zde nastává problém s výrobou patřičně odolné formy pro odlévání. Na Hannover Messe 2003 představila firma SEW Eurodrive první řadu motorů s novým druhem rotorů. [11] Vyšší měrná vodivost měděného rotoru přispívá ke snižování ztrát motoru.

Průchod proudu vodičem dále vyvolává ztráty vířivými proudy. Ztráty vzniklé vířivými proudy jsou značně závislé na frekvenci a lze je vyjádřit následujícím vztahem [4].

$$P_v \approx f^2 \cdot B^2 \text{ [\Omega]} \quad (25)$$

## 4.2 Ztráty v železe

Ztráty v železe, respektive v magnetickém obvodu stroje tvoří ztráty magnetizační a ztráty vířivými proudy. Magnetizační (hysterezní) ztráty lze popsat, jako ztráty potřebné k cyklickému přemagnetování feromagnetického materiálu, jsou úměrné ploše hysterezní smyčky.

$$P_{Fe,h} \approx f \cdot B_m \text{ [\Omega]} \quad (26)$$

Vířivé ztráty vznikají naindukováním napětí v železném obvodu stroje, který je uzavřen a je tak umožněn průchod proudu. Tyto vířivé proudy jsou kolmé na směr magnetického toku. Ztráty v železe jsou závislé především na magnetické indukci, frekvenci a hysterezní materiálové konstantě [4].

$$P_{Fe,v} \approx \frac{(f \cdot B_m \cdot t)^2}{P} \text{ [\Omega]} \quad (27)$$

Určení ztrát v železe je obtížné z důvodu nelineárních charakteristik materiálů, ze kterých je sestaven magnetický obvod.

Vlastnosti magnetického obvodu, respektive elektrotechnických plechů je možné zlepšit zvýšením příměsí křemíku. Křemík přidávaný do nízkouhlíkové oceli způsobí významné zvýšení elektrického odporu oceli, zvýšení permeability, což má za následek potlačení ztrát vířivými proudy a tedy snížení celkových střídavých magnetických ztrát. Největší odpor oceli je při obsahu 11 % křemíku, tato ocel je však pro výrobu nevhodná, je velmi křehká a tvrdá. V praxi se používají plechy s obsahem křemíku 0,3 až 4,6 %. Vlastnosti plechů lze také změnit vhodnou technologií výroby, válcování za tepla, za studena atd. Z důvodů snížení ztrát vířivými proudy je magnetický obvod složen s navzájem elektricky izolovaných plechů.

### 4.3 Mechanické ztráty

Mezi mechanické ztráty patří zejména ztráty třením v ložiskách a ventilační ztráty. Ztráty v ložiskách jsou při stálé teplotě prakticky lineárně závislé na otáčkách, zatímco ventilační ztráty jsou závislé na třetí mocnině otáček [5].

$$\Delta P_m = k_1 \cdot \omega + k_2 \cdot \omega^3 [W] \quad (28)$$

K odstranění, respektive snížení ztrát třením v ložiskách lze použít kvalitnější ložiska. Dále je třeba při provozu motoru pamatovat na pravidelnou údržbu a kontrolu ložisek. Vlastnosti ložisek také zhoršuje průchod elektrického proudu ložisky stroje, rozvedení tohoto jevu však je mimo rozsah této práce. Elektrické opotřebení ložisek vzniká působením čistě elektrického, elektroerozivního a elektrolytického opotřebení.

- Čistě elektrické opotřebení – opotřebení vznikající trvalým průchodem elektrického proudu ložiskem. To je umožněno trvalým stykem kroužků a valivých tělísek. Styková místa jsou tvořena jednotlivými malými ploškami. K tomu může docházet např. i při velkém mechanickém přetížení ložisek.
- Elektroerozivní opotřebení – opotřebení způsobené jiskrovými, popř. obloukovými výboji. Přitom je lhostejné, zda jiskření či elektrické oblouky vzniknou vlivem velkého napětí či výboji kapacit v obvodu napájení stroje. Jiskřením je znehodnoceno i mazivo.
- Elektrolytické opotřebení je opotřebení vzniklé elektrochemickými ději v ložisku. [7]

Je známo několik možností zamezení průchodu proudu ložisky elektrických strojů:

- odstranění všech nesymetrií elektrického i magnetického obvodu již při návrhu a konstrukci,
- správná montáž zařízení – vhodný napájecí kabel a zemnicí systém,
- sinusový průběh napájecího napětí – použití filtrů při napájení z měničů,

- preventivní prostředky a konstrukční úpravy (izolace ložisek nebo ložiskových štítů)
- použití keramických nebo hybridních ložisek. [8]

Ventilační ztráty lze snížit optimalizovaným návrhem chladicího ventilátoru, použitím menšího ventilátoru, pokud je ostatními parametry asynchronního motoru dosaženo vyšší účinnosti.

#### **4.4 Přídavné ztráty**

Ztráty přídavné jsou obvykle vířivého charakteru a jsou způsobovány rozptylovými toky prostorových harmonických, nerovnoměrnostmi ve vzduchové mezeře a pulzací toku. Definovat přídavné ztráty je proto velmi složité. Pro výpočet stroje se zpravidla uvažují ztráty přídavné jako 1 % z jmenovitého výkonu. [9]

#### **4.5 Konstrukce motoru a její vliv na účinnost**

Na účinnosti motoru má velký vliv i konstrukční provedení motoru, především velikost vzduchové mezery. Malá vzduchová mezera zlepšuje účinnost a účinník motoru, zvyšuje se však výrobní cena motoru, protože je potřeba pracovat s velkou přesností, musí se použít kvalitní ložiska a omezit vibrace motoru.

Při změně konstrukce je dále možné uvažovat prodloužení stroje, což při zachování parametrů motoru (výkon, moment) dovoluje použití nižší magnetické indukce, čímž se zabrání přesycení částí magnetického obvodu, tím nedojde k poklesu magnetického toku v obvodu [8].

#### **4.6 Vliv frekvenčního měniče na ASM**

Pokud není asynchronní motor napájen ze sinusového napětí, ale z frekvenčního měniče, které v dnešní době používají nejčastěji pulsně šířkovou modulaci, dochází v napájení k prudkým změnám vlivem spínacích pulsů, které mají velkou strmost. Tyto pulsy vyvolávají vyšší harmonické složky, které se zpravidla negativně projevují v činnosti asynchronního motoru.

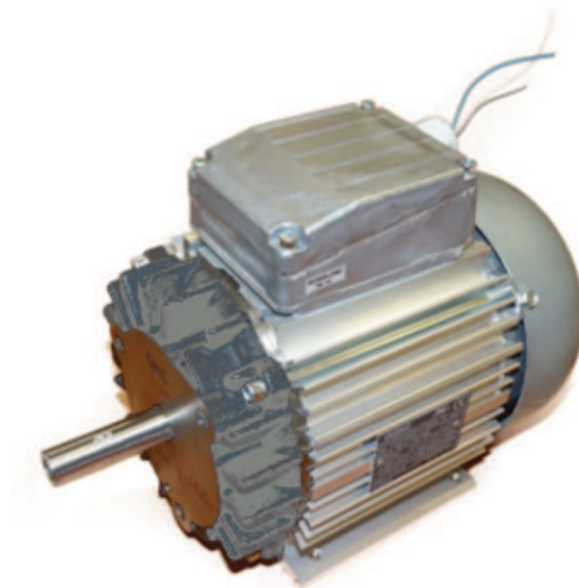
Harmonické složky se tedy mohou objevovat v napájecím napětí, dále pak v proudu, které protéká vinutím, harmonické složky se pak projeví i v magnetickém poli ve vzduchové mezeře atd. Vliv frekvenčního měniče (vyšší harmonické složky) se pak projevují zvýšením namáháním celého stroje.

## 4.7 Určení ztrát konkrétního motoru

V rámci řešení projektu snižování spotřeby a zvyšování účinnosti elektrických strojů je v této kapitole zpracováno měření za účelem vyhodnocení ztrát asynchronního motoru od firmy ATAS elektromotory Náchod, a. s. Na základě tohoto měření a určení dílčích ztrát bude stanoveno několik oblastí, na které je nutné se z hlediska snižování ztrát a zvýšení účinnosti zaměřit.

### 4.7.1 Popis motoru

Pro měření byl zapůjčen trojfázový dvoupólový asynchronní motor typ T22VT512 určený pro vývěvu. Fotografie motoru a štítku je vložena jako Obrázek 18: 3f ASM ATAS typ T22VV512 respektive Obrázek 19: Štítek měřeného motoru.



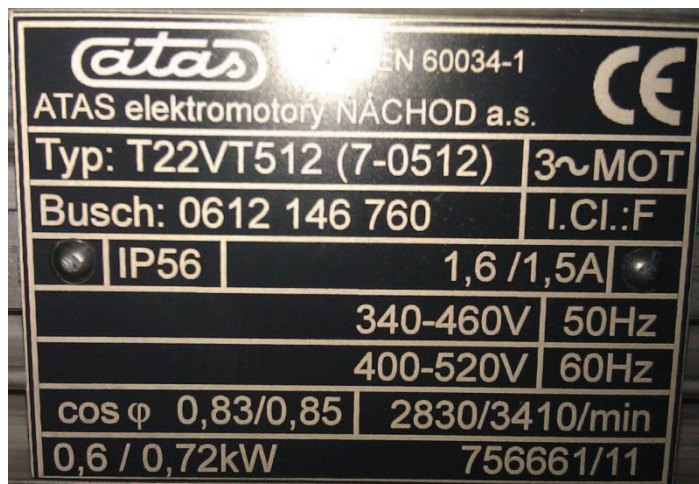
Obrázek 18: 3f ASM ATAS typ T22VV512

Parametry měřeného motoru:

Tabulka 1: Parametry motoru

|                                  |                                        |
|----------------------------------|----------------------------------------|
| Jmenovité napětí a kmitočet:     | 340-460 V / 50Hz<br>400-520 V / 60 Hz  |
| Zkušební napětí pro 50 Hz:       | 400 V                                  |
| Zkušební napětí pro 60 Hz:       | 460 V                                  |
| Jmenovité napětí při 50 (60) Hz: |                                        |
| Výkon:                           | 600 (720) W                            |
| Příkon:                          | 830 (980) W + 10%                      |
| Otáčky:                          | 2820 (3400) ot/min <sup>-1</sup> - 3 % |

|                           |                                        |
|---------------------------|----------------------------------------|
| Proud:                    | 1,45 (1,5) A + 10 %                    |
| Druha zatížení:           | S1                                     |
| Krytí:                    | IP56                                   |
| Tvar:                     | IM B3T                                 |
| Chlazení:                 | IC411                                  |
| Třída izolace:            | F                                      |
| Smysl točení:             | oba (v zařízení vpravo)                |
| Hmotnost:                 | 9,8 kg                                 |
| cos φ:                    | 0,83/0,85                              |
| Ochranné spojení se zemí: | zemní svorka v tělese svorkovnice      |
| Ložiska:                  | strana D: 6203 ZZ<br>strana N: 6202 ZZ |



Obrázek 19: Štítek měřeného motoru

Rozměrový výkres motoru je uveden v příloze jako Obrázek 36: Rozměrový výkres motoru T22VT512 [16]

## 4.7.2 Měření, výpočty

Měření bylo provedeno v laboratořích VUT v Brně, pro sběr dat byl použit přístroj Yokogawa ET1600 a dynamometr s řídicí jednotkou M-350 od firmy VUES. Naměřené hodnoty jsou zpracovány podle knihy Měření na asynchronním motoru [15].

### 4.7.2.1 Měření naprázdno

Měřením při chodu naprázdno zjišťujeme příkon  $P_{p10}$  a síťový proud  $I_{10}$ . Zpracováním naměřených hodnot získáváme ztráty v železe statoru  $\Delta P_{Fe1}$ , mechanické ztráty  $\Delta P_m$  a účinník naprázdno  $\cos\varphi_{10}$ . Motor je nezatížen, příkon ze sítě kryje pouze jeho vlastní ztráty. Měření bylo provedeno od jmenovitého napětí do labilního stavu.

Odpor statorového vinutí byl změřen multimetrem Metex M-4650CR.

$$R_1 = \frac{R_{m\check{c}} + R_{mh} + R_{h\check{c}}}{3} = \frac{24,7 + 25,6 + 25,8}{3} = 25,36 \, \Omega \quad (29)$$

Tabulka 2: Hodnoty naměřené při chodu naprázdno

| naměřené hodnoty |         |         |        |        |        |        |        |        |          |          |          |
|------------------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|----------|----------|
| URMS,1           | URMS,2  | URMS,3  | IRMS,1 | IRMS,2 | IRMS,3 | P,1    | P,2    | P,3    | LAMBDA,1 | LAMBDA,2 | LAMBDA,3 |
| [V]              | [V]     | [V]     | [A]    | [A]    | [A]    | [W]    | [W]    | [W]    | [-]      | [-]      | [-]      |
| 229,800          | 231,670 | 233,960 | 0,849  | 0,854  | 0,891  | 20,960 | 31,500 | 27,910 | 0,107    | 0,159    | 0,134    |
| 219,820          | 221,930 | 224,180 | 0,763  | 0,758  | 0,796  | 18,280 | 27,280 | 25,220 | 0,109    | 0,162    | 0,141    |
| 209,740          | 211,460 | 213,120 | 0,686  | 0,686  | 0,708  | 17,590 | 23,260 | 21,320 | 0,122    | 0,160    | 0,141    |
| 199,750          | 201,010 | 202,970 | 0,619  | 0,630  | 0,653  | 17,210 | 24,140 | 20,720 | 0,139    | 0,191    | 0,156    |
| 189,680          | 191,830 | 193,140 | 0,571  | 0,579  | 0,595  | 15,660 | 20,640 | 17,520 | 0,145    | 0,186    | 0,153    |
| 179,910          | 181,210 | 182,580 | 0,522  | 0,530  | 0,548  | 13,510 | 18,280 | 15,780 | 0,144    | 0,190    | 0,158    |
| 169,600          | 170,750 | 171,520 | 0,477  | 0,487  | 0,500  | 12,390 | 15,990 | 13,670 | 0,153    | 0,192    | 0,159    |
| 161,680          | 162,540 | 163,320 | 0,446  | 0,456  | 0,469  | 11,390 | 14,620 | 12,770 | 0,158    | 0,198    | 0,167    |
| 150,700          | 151,600 | 152,600 | 0,410  | 0,409  | 0,426  | 10,070 | 12,730 | 12,040 | 0,163    | 0,205    | 0,185    |
| 140,680          | 141,630 | 142,150 | 0,374  | 0,379  | 0,390  | 9,630  | 11,690 | 10,630 | 0,183    | 0,218    | 0,192    |
| 130,540          | 131,560 | 131,940 | 0,341  | 0,348  | 0,355  | 8,990  | 10,640 | 9,590  | 0,202    | 0,233    | 0,205    |
| 118,900          | 119,020 | 119,440 | 0,308  | 0,309  | 0,316  | 8,230  | 9,070  | 9,040  | 0,225    | 0,247    | 0,239    |
| 109,380          | 109,970 | 109,480 | 0,286  | 0,288  | 0,286  | 9,150  | 8,970  | 8,870  | 0,292    | 0,283    | 0,283    |
| 109,450          | 109,900 | 109,500 | 0,287  | 0,288  | 0,285  | 9,110  | 8,780  | 8,840  | 0,290    | 0,278    | 0,284    |
| 99,910           | 99,860  | 100,080 | 0,260  | 0,259  | 0,264  | 7,690  | 7,930  | 8,210  | 0,296    | 0,307    | 0,311    |
| 91,180           | 90,880  | 90,860  | 0,242  | 0,236  | 0,239  | 7,360  | 7,030  | 7,610  | 0,334    | 0,327    | 0,351    |
| 80,000           | 80,000  | 79,950  | 0,215  | 0,217  | 0,213  | 6,880  | 6,680  | 6,650  | 0,401    | 0,384    | 0,390    |
| 71,950           | 71,730  | 71,600  | 0,202  | 0,200  | 0,196  | 6,610  | 6,110  | 6,380  | 0,454    | 0,427    | 0,454    |
| 61,110           | 61,540  | 61,310  | 0,182  | 0,187  | 0,181  | 6,010  | 5,990  | 5,730  | 0,541    | 0,522    | 0,516    |
| 50,360           | 50,680  | 50,330  | 0,173  | 0,178  | 0,169  | 5,680  | 5,570  | 5,280  | 0,651    | 0,616    | 0,619    |
| 40,570           | 40,170  | 39,470  | 0,187  | 0,179  | 0,172  | 5,680  | 5,000  | 5,120  | 0,749    | 0,696    | 0,753    |
| 31,190           | 31,330  | 31,030  | 0,211  | 0,211  | 0,204  | 5,310  | 5,140  | 5,040  | 0,807    | 0,779    | 0,797    |
| 20,007           | 20,425  | 19,756  | 0,336  | 0,335  | 0,317  | 4,630  | 4,435  | 4,227  | 0,689    | 0,649    | 0,674    |

Tabulka 3: Vypočtené hodnoty při měření naprázdno

| vypočítané hodnoty |           |          |           |                     |                 |                               |
|--------------------|-----------|----------|-----------|---------------------|-----------------|-------------------------------|
| $U_{10}$           | $U_{S10}$ | $I_{10}$ | $P_{P10}$ | $\cos \varphi_{10}$ | $\Delta P_{j1}$ | $\Delta P_{Fe1} + \Delta P_m$ |
| [V]                | [V]       | [A]      | [W]       | [-]                 | [W]             | [W]                           |
| 231,810            | 401,507   | 0,865    | 80,370    | 0,134               | 25,792          | 54,578                        |
| 221,977            | 384,475   | 0,772    | 70,780    | 0,137               | 20,585          | 50,195                        |
| 211,440            | 366,225   | 0,693    | 62,170    | 0,141               | 16,570          | 45,600                        |
| 201,243            | 348,564   | 0,634    | 62,070    | 0,162               | 13,859          | 48,211                        |
| 191,550            | 331,774   | 0,582    | 53,820    | 0,161               | 11,674          | 42,146                        |
| 181,233            | 313,905   | 0,533    | 47,570    | 0,164               | 9,811           | 37,759                        |
| 170,623            | 295,528   | 0,488    | 42,050    | 0,168               | 8,215           | 33,835                        |
| 162,513            | 281,481   | 0,457    | 38,780    | 0,174               | 7,206           | 31,574                        |
| 151,633            | 262,637   | 0,415    | 34,840    | 0,185               | 5,941           | 28,899                        |
| 141,487            | 245,062   | 0,381    | 31,950    | 0,198               | 5,006           | 26,944                        |
| 131,347            | 227,499   | 0,348    | 29,220    | 0,213               | 4,171           | 25,049                        |
| 119,120            | 206,322   | 0,311    | 26,340    | 0,237               | 3,342           | 22,998                        |
| 109,610            | 189,850   | 0,287    | 26,990    | 0,286               | 2,839           | 24,151                        |
| 109,617            | 189,862   | 0,287    | 26,730    | 0,284               | 2,834           | 23,896                        |
| 99,950             | 173,118   | 0,261    | 23,830    | 0,305               | 2,347           | 21,483                        |
| 90,973             | 157,570   | 0,239    | 22,000    | 0,337               | 1,970           | 20,030                        |
| 79,983             | 138,535   | 0,215    | 20,210    | 0,392               | 1,595           | 18,615                        |
| 71,760             | 124,292   | 0,199    | 19,100    | 0,445               | 1,373           | 17,727                        |
| 61,320             | 106,209   | 0,183    | 17,730    | 0,526               | 1,158           | 16,572                        |
| 50,457             | 87,394    | 0,174    | 16,530    | 0,628               | 1,041           | 15,489                        |
| 40,070             | 69,403    | 0,179    | 15,800    | 0,733               | 1,111           | 14,689                        |
| 31,183             | 54,011    | 0,209    | 15,490    | 0,794               | 1,500           | 13,990                        |
| 20,063             | 34,750    | 0,329    | 13,292    | 0,671               | 3,743           | 9,549                         |

Ukázka výpočtu pro první řádek tabulky:

$$U_{10} = \frac{U_{RMS,1} + U_{RMS,2} + U_{RMS,3}}{3} = \frac{229,8 \text{ V} + 231,67 \text{ V} + 233,96 \text{ V}}{3} = 231,81 \text{ V} \quad (30)$$

$$U_{S10} = \sqrt{3} \cdot U_{10} = \sqrt{3} \cdot 231,81 \text{ V} = 401,5 \text{ V} \quad (31)$$

$$I_{10} = \frac{I_{RMS,1} + I_{RMS,2} + I_{RMS,3}}{3} = \frac{0,849 \text{ A} + 0,854 \text{ A} + 0,891 \text{ A}}{3} = 0,86 \text{ A} \quad (32)$$

$$P_{p10} = P_1 + P_2 + P_3 = 20,96 \text{ W} + 31,50 \text{ W} + 27,91 \text{ W} = 80,37 \text{ W} \quad (33)$$

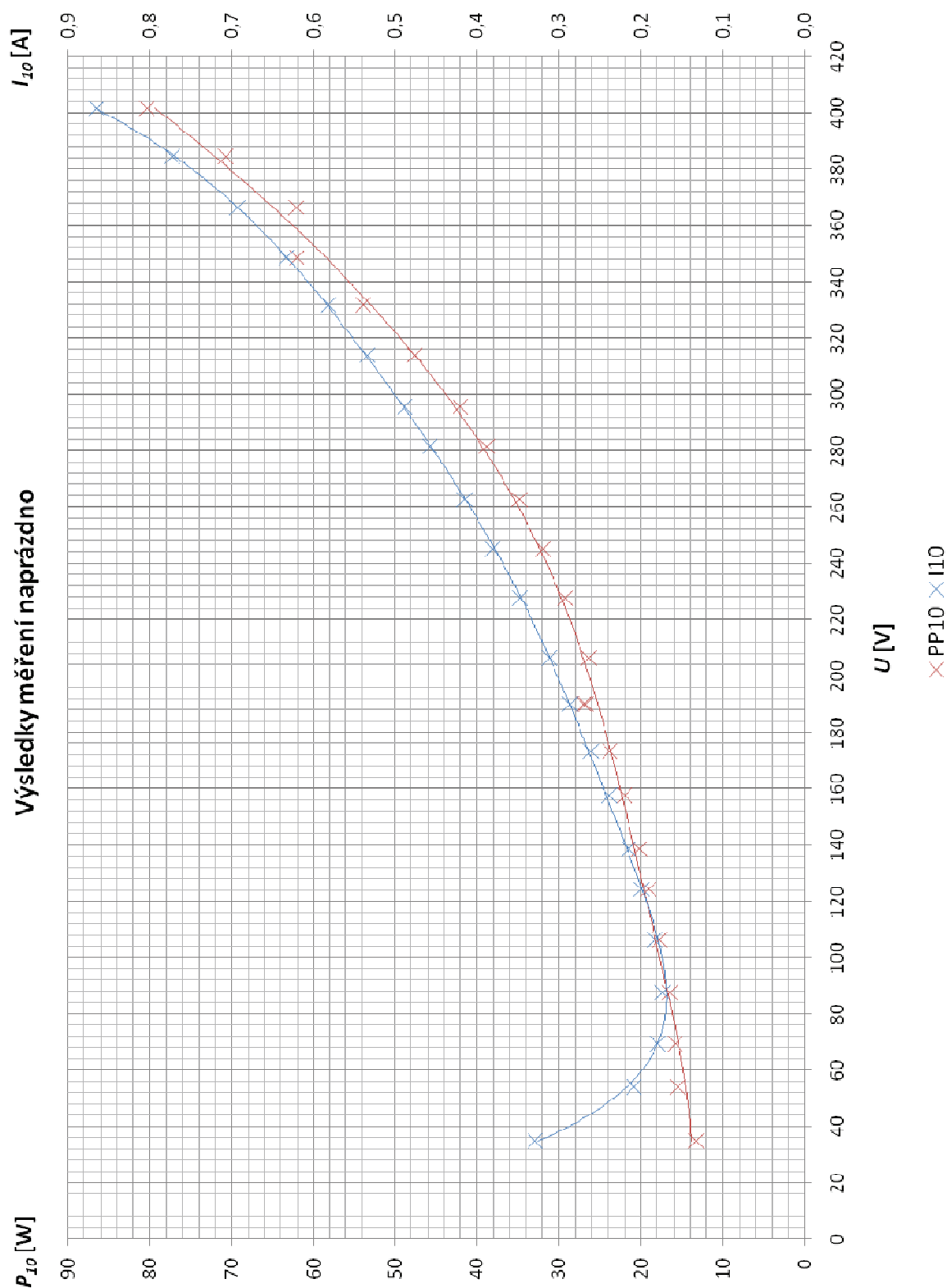
$$\Delta P_{j1} = 3 \cdot R_{1S} \cdot I_{10}^2 = 3 \cdot 11,5 \Omega \cdot 0,865^2 \text{ A} = 25,79 \text{ W} \quad (34)$$

$$\Delta P_{Fe1} + \Delta P_m = P_{p0} - \Delta P_{j1} = 80,37 \text{ W} - 25,79 \text{ W} = 54,57 \text{ W} \quad (35)$$

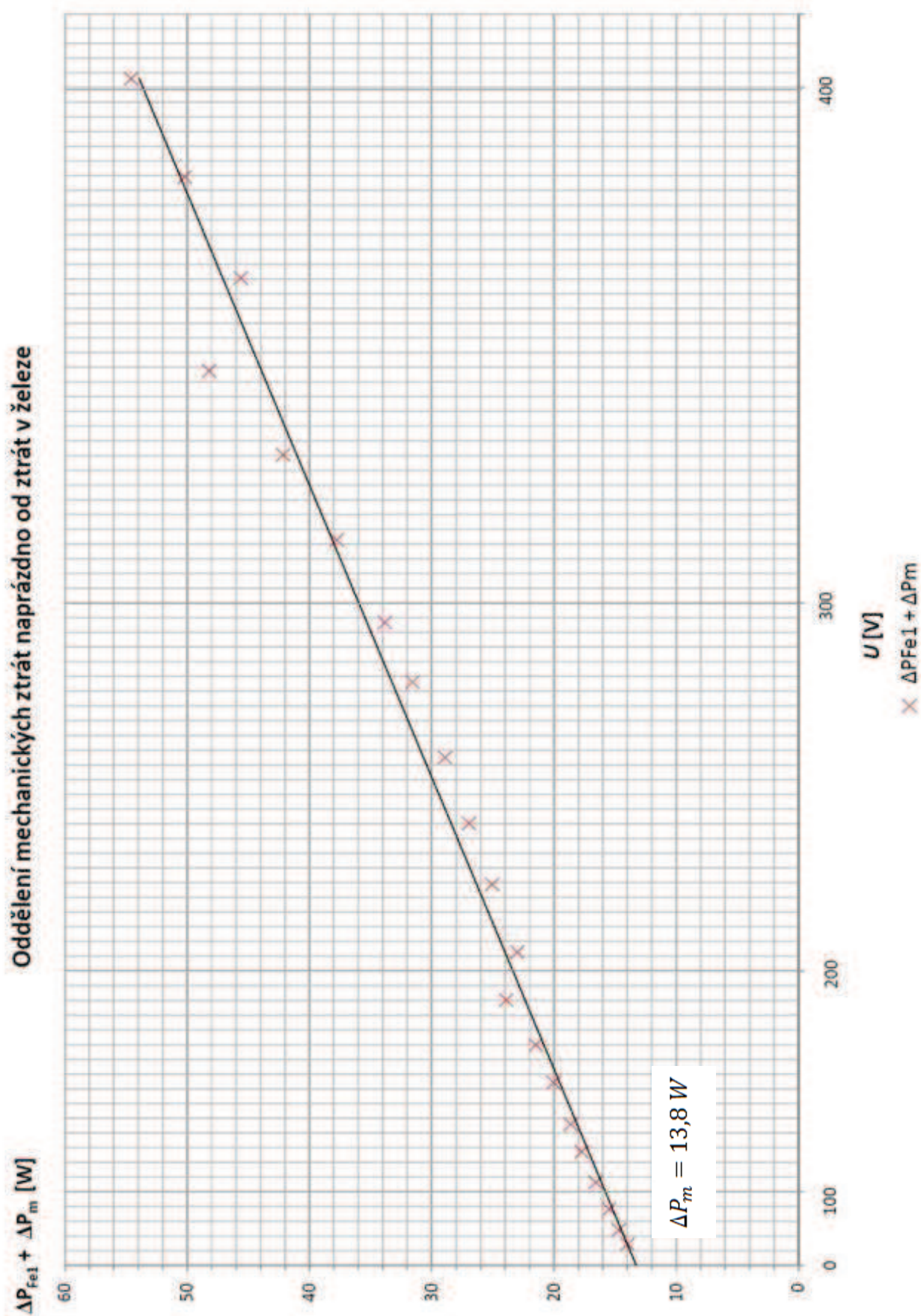
$$\cos \varphi_{10} = \frac{LAMBDA_1 + LAMBDA_2 + LAMBDA_3}{3} = \frac{0,107 + 0,159 + 0,134}{3} = 0,134 \quad (36)$$

Vypočtené hodnoty proudu naprázdno  $I_{10}$  a příkon motoru  $P_{p10}$  jsou vyneseny v závislosti na sdružené hodnotě svorkového napětí jako Obrázek 20: Výsledky měření naprázdno.

Vzhledem k tomu, že při nulovém svorkovém napětí stroje nemohou vznikat ztráty v železe, je možné rozdělit mechanické ztráty a ztráty v železe extrapolací přímky  $\Delta P_{Fe1} + \Delta P_m = f(U_1)$  na nulové napětí. Křivka je svým průběhem blízká parabole, překreslením při použití kvadratické stupnice pro napětí, přechází parabola v přímku. Při nulovém napětí lze z přímky odečíst mechanické ztráty, viz Obrázek 21: Určení mechanických ztrát.



Obrázek 20: Výsledky měření naprázdno



Obrázek 21: Určení mechanických ztrát

Mechanické ztráty motoru  $\Delta P_m = 13,8 \text{ W}$  činí 2,3 % štítkového výkonu 600 W, tato hodnota je zatížena navíc ztrátami ventilačními, neboť při měření nemohl být demontován ventilátor motoru.

Z měření naprázdno při jmenovitém napětí po odečtení konstantních mechanických ztrát dostaneme ztráty v železe statoru.

$$\Delta P_{Fe1} = \Delta P_{Fe1} + \Delta P_{m400V} - \Delta P_m = 54,57 \text{ W} - 13,8 \text{ W} = 40,77 \text{ W} \quad (37)$$

Dále z měření naprázdno při jmenovitém napětí dostaneme ztráty ve vinutí statoru.

$$\Delta P_{j1} = 3 \cdot R_{1S} \cdot I_{10}^2 = 3 \cdot 11,5 \Omega \cdot 0,86^2 \text{ A} = 25,79 \text{ W} \quad (38)$$

#### 4.7.2.2 Měření nakrátko

Měřením za chodu nakrátko zjišťujeme napětí  $U_{1k}$  a proud nakrátko  $I_{1k}$ . Z naměřených hodnot určíme příkon nakrátko  $P_{pk}$  a účinník nakrátko  $\cos \varphi_{1k}$ .

Tabulka 4: Hodnoty naměřené při chodu nakrátko

| naměřené hodnoty |         |         |        |        |        |         |         |         |          |          |          |
|------------------|---------|---------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| URMS,1           | URMS,2  | URMS,3  | IRMS,1 | IRMS,2 | IRMS,3 | P,1     | P,2     | P,3     | LAMBDA,1 | LAMBDA,2 | LAMBDA,3 |
| [V]              | [V]     | [V]     | [A]    | [A]    | [A]    | [W]     | [W]     | [W]     | [-]      | [-]      | [-]      |
| 20,285           | 20,146  | 19,937  | 0,460  | 0,456  | 0,450  | 4,866   | 4,356   | 4,646   | 0,522    | 0,474    | 0,518    |
| 30,621           | 30,344  | 29,673  | 0,777  | 0,763  | 0,737  | 13,723  | 12,321  | 12,428  | 0,577    | 0,533    | 0,568    |
| 40,842           | 40,997  | 40,774  | 1,103  | 1,089  | 1,064  | 27,170  | 25,420  | 25,911  | 0,603    | 0,570    | 0,597    |
| 52,187           | 52,444  | 51,781  | 1,464  | 1,446  | 1,404  | 47,910  | 44,800  | 45,010  | 0,627    | 0,591    | 0,619    |
| 61,713           | 62,035  | 61,657  | 1,780  | 1,752  | 1,708  | 70,520  | 66,160  | 66,720  | 0,642    | 0,609    | 0,633    |
| 70,900           | 71,680  | 70,740  | 2,081  | 2,064  | 1,997  | 97,000  | 92,220  | 91,550  | 0,657    | 0,623    | 0,648    |
| 79,960           | 80,670  | 80,680  | 2,383  | 2,356  | 2,296  | 127,780 | 122,070 | 123,050 | 0,671    | 0,642    | 0,664    |
| 90,290           | 91,610  | 91,020  | 2,724  | 2,707  | 2,626  | 169,670 | 163,680 | 162,700 | 0,690    | 0,660    | 0,681    |
| 101,640          | 102,270 | 101,660 | 3,093  | 3,055  | 2,965  | 222,740 | 211,270 | 210,840 | 0,708    | 0,676    | 0,699    |

Tabulka 5: Vypočtené hodnoty při měření nakrátko

| vypočítané hodnoty |          |          |          |                  |
|--------------------|----------|----------|----------|------------------|
| $U_{1k}$           | $U_{1k}$ | $I_{1k}$ | $P_{pk}$ | $\cos \varphi_k$ |
| [V]                | [V]      | [A]      | [W]      | [-]              |
| 20,123             | 34,853   | 0,455    | 13,868   | 0,505            |
| 30,213             | 52,330   | 0,759    | 38,472   | 0,559            |
| 40,871             | 70,791   | 1,085    | 78,501   | 0,590            |
| 52,137             | 90,305   | 1,438    | 137,720  | 0,612            |
| 61,802             | 107,044  | 1,747    | 203,400  | 0,628            |
| 71,107             | 123,160  | 2,047    | 280,770  | 0,643            |
| 80,437             | 139,320  | 2,345    | 372,900  | 0,659            |
| 90,973             | 157,570  | 2,686    | 496,050  | 0,677            |
| 101,857            | 176,421  | 3,038    | 644,850  | 0,695            |

Ukázka výpočtu pro první řádek tabulky:

$$U_{1k} = \frac{U_1 + U_2 + U_3}{3} = \frac{20,28 \text{ V} + 20,14 \text{ V} + 19,93 \text{ V}}{3} = 20,12 \text{ V} \quad (39)$$

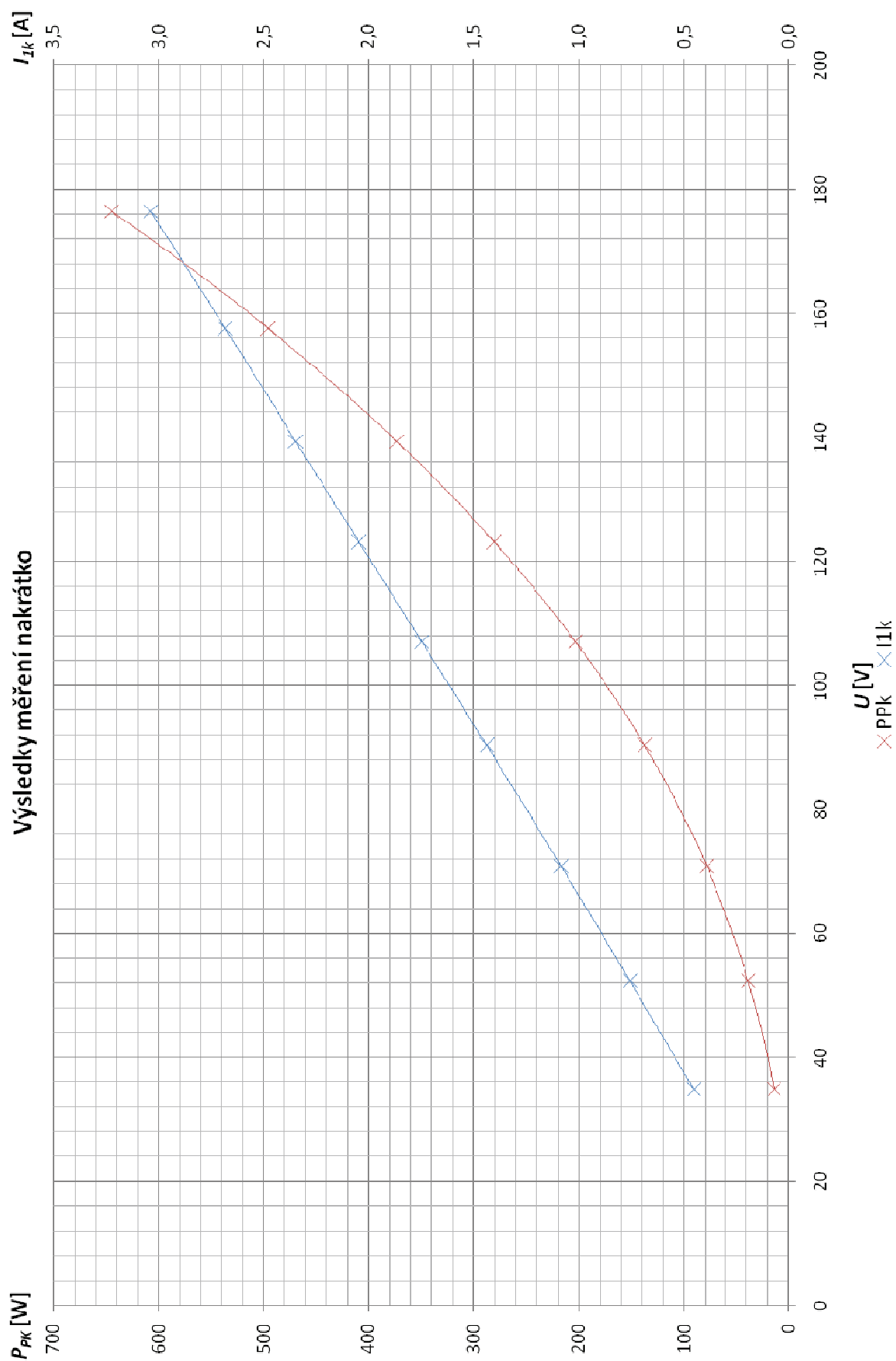
$$U_{s1k} = \sqrt{3} \cdot U_{1k} = \sqrt{3} \cdot 20,12 \text{ V} = 34,85 \text{ V} \quad (40)$$

$$I_{1k} = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3} = \frac{0,46 \text{ A} + 0,45 \text{ A} + 0,45 \text{ A}}{3} = 0,45 \text{ A} \quad (41)$$

$$P_{pk} = P_1 + P_2 + P_3 = 4,86 \text{ W} + 4,35 \text{ W} + 4,64 \text{ W} = 13,86 \text{ W} \quad (42)$$

$$\cos\varphi_{1k} = \frac{LAMBDA_1 + LAMBDA_2 + LAMBDA_3}{3} = \frac{0,522 + 0,474 + 0,518}{3} = 0,505 \quad (43)$$

Vypočtené hodnoty příkonu nakrátko a proud nakrátko jsou vyneseny v diagramu jako  
Obrázek 22: Výsledky měření nakrátko.



### 4.7.3 Možnosti zlepšení účinnosti konkrétního motoru

Na základě změřených a vypočítaných hodnot je patrné, že při jmenovitém výkonu dochází k největším ztrátám v magnetickém obvodu statoru. U měřeného motoru je statorový svazek vysoký 60 mm a je složen ze 120 plechů. Jak již bylo uvedeno výše, celkové ztráty v železe jsou složeny ze ztrát hysterezních a ze ztrát vířivými proudy.

Zmenšení ztrát vířivými proudy lze dosáhnout zvětšením hodnoty odporu cesty vířivých proudů, použijí se materiály s velkou rezistivitou a malou tloušťkou plechu. Pro snížení ztrát tedy navrhuji použít pro statorový svazek plechy s tloušťkou 0,35 mm a s vyšším obsahem křemíku (dnes prakticky používané jsou s obsahem Si až 4,6 %).

## 5 NÁVRH ASYNCHRONNÍHO MOTORU

Na základě třetího bodu zadání je v této části práce popsán návrh asynchronního motoru, jehož hlavní parametry byly zvoleny dle měřeného motoru T22VT512 od firmy ATAS elektromotory Náchod, a.s. Změnou oproti měřenému motoru je po konzultaci s firmou ATAS volba vyšší hodnoty účinnosti o 10 %. Zjednodušený návrh včetně použitých obrázků a tabulek je zpracován dle knihy Stavba elektrických strojů od autora Kopylov I. P [13].

### 5.1 Základní parametry

$$P_2 = 0,6 \text{ kW}$$

$$U_{N1} = 230 \text{ V}$$

$$2p = 2$$

$$n_1 = 3000 \text{ min}^{-1}$$

$$h = 71 \text{ mm}$$

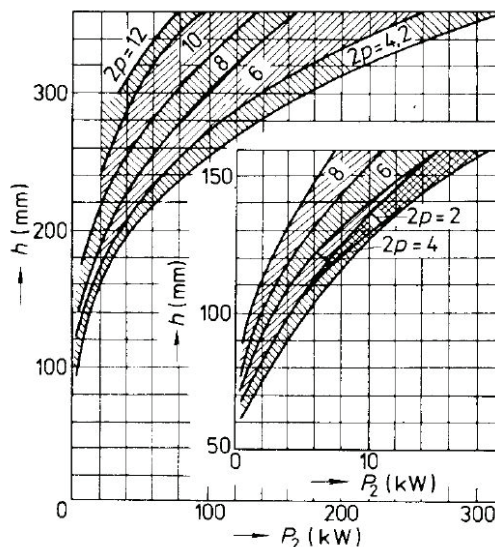
$$\cos \varphi = 0,83$$

$$\eta = 0,85$$

### 5.2 Určení hlavních rozměrů stroje

Pro návrh asynchronního motoru je nutné ze strojové konstanty určit hlavní rozměry stroje, vrtání statoru  $D$  a délku vzduchové mezery  $l_i$ .

$$\frac{D^2 \cdot l_i \cdot \omega_s}{P_i} = \frac{2}{\pi \cdot \alpha_\delta \cdot k_b \cdot k_v \cdot A \cdot B_\delta} \quad (44)$$



Obrázek 23: Závislost výšky osy na výkonu a otáčkách [13]

Výška osy  $h$  je zvolena dle měřeného motoru. Výšce osy  $h = 71 \text{ mm}$  odpovídá dle tabulky 6 průměr statoru  $D_e = 0,116 \text{ m}$ .

Tabulka 6: Normalizované výšky os a vnější průměry statorů [13]

|                   |       |     |       |       |       |       |       |       |
|-------------------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $h \text{ (mm)}$  | 56    | 63  | 71    | 80    | 90    | 100   | 112   | 132   |
| $D_e \text{ (m)}$ | 0,089 | 0,1 | 0,116 | 0,131 | 0,149 | 0,168 | 0,191 | 0,225 |

Podle tabulky 7 lze určit poměr  $K_D$  pro zadaný počet pólových dvojic.

Tabulka 7: Poměr  $K_D$  pro různé počty pólových dvojic [13]

|       |              |              |              |              |              |
|-------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| $2p$  | 2            | 4            | 6            | 8            | 10 až 12     |
| $K_D$ | 0,52 až 0,57 | 0,62 až 0,68 | 0,70 až 0,72 | 0,74 až 0,75 | 0,75 až 0,77 |

Z tabulky bylo odečteno  $K_D = 0,56$ . Pak vnitřní průměr statoru  $D$  je dle rovnice:

$$K_D = \frac{D}{D_E} \quad (45)$$

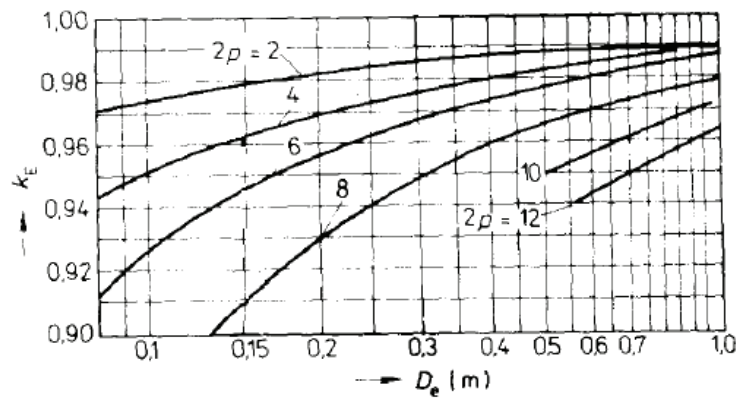
Vnitřní průměr statoru se určí dle vztahu:

$$D = K_D \cdot D_E = 0,56 \cdot 0,116 \text{ m} = 0,06496 \text{ m} \quad (46)$$

Pólová rozteč:

$$t_p = \frac{\pi \cdot D}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,06496 \text{ m}}{2} = 0,102 \text{ m} \quad (47)$$

Hodnota činitele  $k_E$ , tedy poměr indukovaného napětí vinutí statoru k jmenovitému napětí, je zvolena dle obrázku 24.



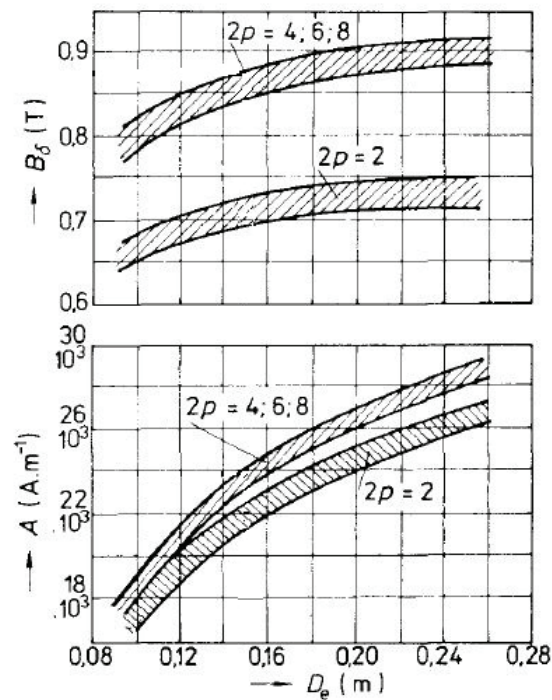
Obrázek 24: Velikost činitele  $k_E$  v závislosti na  $D_e$  [13]

Činitel  $k_E$  odečten z grafu  $k_E = 0,97$ .

Elektromagnetický výkon:

$$P_i = P_2 \cdot \frac{k_E}{\eta \cdot \cos \varphi} = 600 \text{ W} \cdot \frac{0,97}{0,85 \cdot 0,83} = 824,9 \text{ W} \quad (48)$$

Z obrázku 23 se volí indukce ve vzduchové mezeře  $B_\delta = 0,67 \text{ T}$  a lineární hustota proudu  $A = 22 \cdot 10^3 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ .



Obrázek 25: Lineární hustota proudu a indukce ve vzduchové mezeře [13]

Činitel tvaru pole  $k_B$  se volí dle následujícího vztahu:

$$k_B = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cong 1,11 \quad (49)$$

Činitel statorového vinutí  $k_{v1} = 0,95$ .

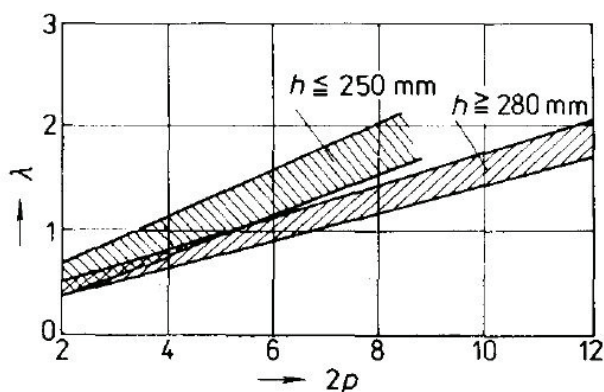
Synchronní úhlová rychlost hřídele je:

$$\omega_s = 2\pi \cdot \frac{f_1}{p} = 2\pi \cdot \frac{50 \text{ Hz}}{1} = 314,159 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \quad (50)$$

Ideální délka vzduchové mezery:

$$\begin{aligned} l_i &= \frac{P_i}{D^2 \cdot \omega_s \cdot k_B \cdot k_{v1} \cdot A \cdot B_\delta} \\ &= \frac{824,9 \text{ W}}{0,06496^2 \text{ m} \cdot 314,159 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 1,11 \cdot 0,95 \cdot 22 \cdot 10^3 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} \cdot 0,67 \text{ T}} \\ &= 0,0434 \text{ m} \end{aligned} \quad (51)$$

Kontrola štíhlostního poměru podle obrázku 26.



Obrázek 26: Rozmezí štíhlostního poměru [13]

$$\lambda = \frac{l_i}{t_p} = \frac{0,0434 \text{ m}}{0,102 \text{ m}} = 0,425 \quad (52)$$

$\lambda$  je v daném rozmezí, je možné pokračovat v návrhu motoru.

### 5.3 Návrh statoru

Protože délka statorového svazku nepřesahuje 300 mm, je možné předpokládat, že celková délka statoru je:

$$l_1 = l_{Fe1} = l_i = 0,0434 \text{ m} \quad (53)$$

kde:  $l_{Fe1}$  je aktivní délka statoru, pro délku rotorového svazku platí:

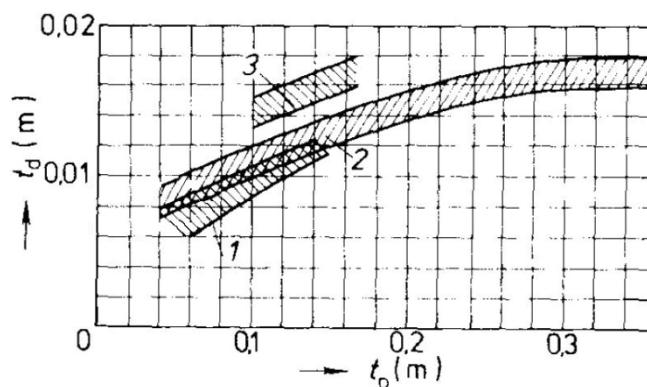
$$l_2 = l_1 = l_{Fe2} = 0,0434 \text{ m} \quad (54)$$

kde:  $l_{Fe2}$  je aktivní délka rotoru

Volba možné drážkové rozteče dle obrázku 27.

$$t_{d1min} = 0,008 \text{ m}$$

$$t_{d1max} = 0,01 \text{ m}$$



Obrázek 27: Velikosti drážkových roztečí [13]

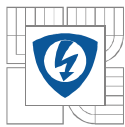
Rozmezí možného počtu drážek:

$$Q_{1max} = \frac{\pi \cdot D}{t_{d1min}} = \frac{\pi \cdot 0,06496 \text{ m}}{0,008 \text{ m}} \cong 25 \quad (55)$$

$$Q_{1min} = \frac{\pi \cdot D}{t_{d1max}} = \frac{\pi \cdot 0,06496 \text{ m}}{0,01 \text{ m}} \cong 20 \quad (56)$$

Počet drážek se vybere tak, aby byl dělitelný počtem fází a počet drážek na pól a fázi byl celočíselný.

volím počet statorových drážek  $Q_1 = 24$



Počet drážek na pól a fázi:

$$q = \frac{Q_1}{2p \cdot m} = \frac{24}{1 \cdot 3} = 8 \quad (57)$$

Drážková rozteč:

$$t_{d1} = \frac{\pi \cdot D}{2p \cdot m \cdot q} = \frac{\pi \cdot 0,06496 \text{ m}}{1 \cdot 3 \cdot 8} = 0,0085 \text{ m} = 8,5 \text{ mm} \quad (58)$$

Jmenovitý proud vinutí statoru se určí dle vztahu:

$$I_{N1} = \frac{P_2}{m \cdot U_{N1} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{600 \text{ W}}{3 \cdot 230 \text{ V} \cdot 0,85 \cdot 0,83} = 1,232 \text{ A} \quad (59)$$

Předběžný počet vodičů v drážce za předpokladu, že vinutí nemá paralelní větve:

$$V'_d = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_{N1} \cdot Q_1} = \frac{\pi \cdot 0,06496 \text{ m} \cdot 22 \cdot 10^3 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}}{1,232 \text{ A} \cdot 24} \cong 152 \quad (60)$$

Pro získanou hodnotu  $V'_d$  se najde takový počet paralelních větví  $a$ , aby  $V_d$  bylo celé číslo, v případě dvouvrstvého vinutí dělitelné dvěma.

Volím počet paralelních větví  $a = 1$ .

$$V_d = a \cdot V'_d = 1 \cdot 152 = 152 \quad (61)$$

Číslo získané z výše uvedeného vztahu se zaokrouhlí na celé číslo, v případě dvouvrstvého vinutí na celé sudé číslo.

Počet závitů na fázi:

$$N_1 = \frac{V_d \cdot Q_1}{2 \cdot a \cdot m} = \frac{152 \cdot 24}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 608 \quad (62)$$

Lineární hustota proudu, musí odpovídat původně zvolené hustotě proudu  $A$ .

$$A = \frac{2 \cdot m \cdot N_1 \cdot I_{N1}}{\pi \cdot D} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 500 \cdot 1,232 \text{ A}}{\pi \cdot 0,06496 \text{ m}} = 22,022 \cdot 10^3 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} \quad (63)$$

Pro jednovrstvé vinutí je činitel kroku  $k_{vy} = 1$ .

Činitel rozlohy:

$$k_{vr} = \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{q \cdot \sin \frac{\pi}{6 \cdot q}} = \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{3 \cdot \sin \frac{\pi}{6 \cdot 3}} = 0,96 \quad (64)$$

Činitel vinutí:

$$k_{v1} = k_{vy} \cdot k_{vr} = 1 \cdot 0,96 = 0,96 \quad (65)$$

Magnetický tok:

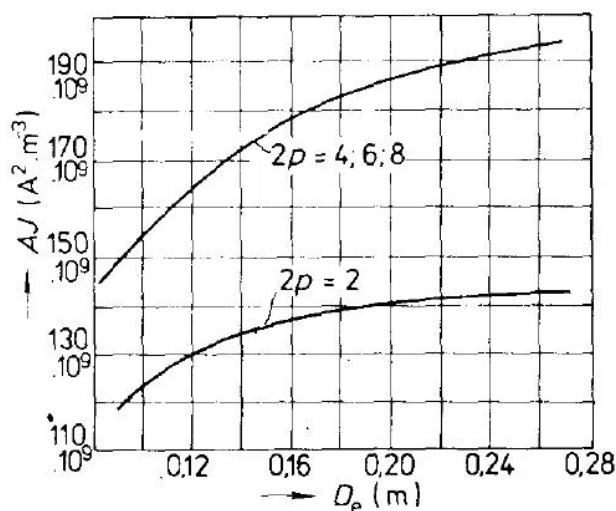
$$\Phi = \frac{k_E \cdot U_{1N}}{4 \cdot k_B \cdot N_1 \cdot k_{v1} \cdot f_1} = \frac{0,97 \cdot 230 \text{ V}}{4 \cdot 1,11 \cdot 608 \cdot 0,96 \cdot 50 \text{ Hz}} = 1,72 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} \quad (66)$$

Velikost magnetické indukce ve vzduchové mezeře:

$$B_\delta = \frac{p \cdot \Phi}{D \cdot l_i} = \frac{1 \cdot 1,72 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}}{0,06496 \text{ m} \cdot 0,0434 \text{ m}} = 0,61 \text{ T} \quad (67)$$

Vypočtená hodnota odpovídá podle obrázku 25.

Proudovou hustotu, volíme co nejvyšší, ovšem nesmí být překročena dovolená hodnota pro oteplení vinutí.  $AJ = 135 \cdot 10^9 \text{ A}^2 \cdot \text{m}^{-3}$  podle obrázku 2.6



Obrázek 28: Střední hodnoty součinu  $AJ$  [13]

$$J_1 = \frac{AJ}{A} = \frac{135 \cdot 10^9 \text{ A}^2 \cdot \text{m}^{-3}}{22,022 \cdot 10^3 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}} = 6,13 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} \quad (68)$$

Efektivní průřez vodiče:

$$S_{ef1} = \frac{I_{N1}}{a \cdot J_1} = \frac{1,232 \text{ A}}{1 \cdot 6,13 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}} = 1,558 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 = 0,156 \text{ mm}^2 \quad (69)$$

Z tabulky Tabulka 13: Normované průřezy izolovaných vodičů pro vinutí, viz příloha, vybereme nejbližší průřez vodiče  $S_{vi} = 0,154 \text{ mm}^2$  a k němu odpovídající průřez drátu  $d_v = 0,140 \text{ mm}$ , průměr drátu s izolací a lakem  $d_{vi} = 0,150 \text{ mm}$ .

Skutečná proudová hustota:

$$J_1 = \frac{I_{N1}}{a \cdot S_{vi}} = \frac{1,232 \text{ A}}{1 \cdot 1,558 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2} = 6,152 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^2 \quad (70)$$

### 5.3.1 Výpočet drážek statoru

Drážka je volena typu L.

Činitel plnění železa  $k_{Fe} = 0,97$  zvolen pro  $h = 71 \text{ mm}$  dle tabulky 8. Hodnota indukce  $B_{j1} = 1,5 \text{ T}$  a  $B_{z1} = 1,8 \text{ T}$  byla zvolena podle tabulky Tabulka 14: Dovolené hodnoty indukce [13], viz příloha.

Tabulka 8: Činitel plnění železa [13]

| $h \text{ (mm)}$ | $U \text{ (V)}$ | Stator         |          | Rotor nakrátko |          | Rotor kroužkový |          |
|------------------|-----------------|----------------|----------|----------------|----------|-----------------|----------|
|                  |                 | způsob izolace | $k_{Fe}$ | způsob izolace | $k_{Fe}$ | způsob izolace  | $k_{Fe}$ |
| 50 až 250        | $\leq 660$      | vrstva oxidu   | 0,97     | vrstva oxidu   | 0,97     | —               | —        |
| 280 až 355       | $\leq 660$      | lakování       | 0,95     | vrstva oxidu   | 0,97     | lakování        | 0,95     |
| 400 až 560       | 6 000           | lakování       | 0,95     | lakování       | 0,95     | lakování        | 0,95     |

Předběžná šířka zubů:

$$b_{z1} = \frac{B_\delta \cdot t_{d1} \cdot l_i}{B_{z1} \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,61 \text{ T} \cdot 0,0085 \text{ m} \cdot 0,0434 \text{ m}}{1,8 \text{ T} \cdot 0,0434 \text{ m} \cdot 0,97} = 0,00296 \text{ m} = 2,96 \text{ mm} \quad (71)$$

Výška statorového jha:

$$h_{j1} = \frac{\Phi}{2 \cdot B_{j1} \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe}} = \frac{1,72 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}}{2 \cdot 1,5 \text{ T} \cdot 0,0434 \text{ m} \cdot 0,97} = 0,0136 \text{ m} = 13,62 \text{ mm} \quad (72)$$

Předběžná hloubka drážky:

$$h_d = \frac{D_E - D}{2} - h_{j1} = \frac{0,116 \text{ m} - 0,06496 \text{ m}}{2} - 0,0136 \text{ m} = 0,01192 \text{ m} = 11,92 \text{ mm} \quad (73)$$

Šířka drážky u paty zubu:

$$\begin{aligned} b_1 &= \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_d)}{Q_1} - b_{z1} = \frac{\pi \cdot (0,06496 \text{ m} + 2 \cdot 0,01077 \text{ m})}{24} - 0,00296 \text{ m} \\ &= 0,0084 \text{ m} = 8,44 \text{ mm} \end{aligned} \quad (74)$$

Hodnota otevření drážky se určí v rozmezí 1,8 mm až 4 mm. Šířka v horní části, která je v rozmezí 0,5 mm až 1 mm. Volíme  $b_0 = 2 \text{ mm}$  a  $h_0 = 0,7 \text{ mm}$ .

Šířka horní části drážky:

$$\begin{aligned} b_2 &= \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_0 - b_0) - Q_1 \cdot b_{z1}}{Q_1 - \pi} \\ &= \frac{\pi \cdot (0,06496 \text{ m} + 2 \cdot 0,0007 \text{ m} - 0,002 \text{ m}) - 24 \cdot 0,00296 \text{ m}}{24 - \pi} \\ &= 0,00628 \text{ m} = 6,28 \text{ mm} \end{aligned} \quad (75)$$

Aktivní hloubka drážky:

$$\begin{aligned} h_1 &= h_d - \left( h_0 + \frac{b_2 - b_0}{2} \right) = 0,01192 \text{ m} - \left( 0,0007 \text{ m} + \frac{0,00628 \text{ m} - 0,002 \text{ m}}{2} \right) \\ &= 0,00908 \text{ m} = 9,08 \text{ mm} \end{aligned} \quad (76)$$

Podle tabulky Tabulka 11: Normované rozměry drážek [13], viz příloha, volím  $h_1 = 10 \text{ mm}$

Celková hloubka drážky:

$$\begin{aligned} h_d &= h_1 + \frac{b_2 - b_0}{2} + h_0 = 0,01 \text{ m} + \frac{0,00628 \text{ m} - 0,002 \text{ m}}{2} + 0,0007 \text{ m} = 0,01284 \text{ m} \\ &= 12,84 \text{ mm} \end{aligned} \quad (77)$$

Činitel plnění drážky, ke světlosti drážky je nutné připočítat vůli při skládání plechů  $\Delta b_d = 0,1 \text{ mm}$ ,  $\Delta h_d = 0,1 \text{ mm}$  podle tabulky 9.

Tabulka 9: Přídavky na skládání plechů [13]

| výška osy<br>$h$ mm | Přídavky (mm)            |                          |
|---------------------|--------------------------|--------------------------|
|                     | na šířku<br>$\Delta b_d$ | na výšku<br>$\Delta h_d$ |
| 50 až 132           | 0,1                      | 0,1                      |
| 160 až 250          | 0,2                      | 0,2                      |
| 280 až 355          | 0,3                      | 0,3                      |
| 400 až 560          | 0,4                      | 0,3                      |

$$b'_1 = b_1 - \Delta b_d = 8,44 \text{ mm} - 0,1 \text{ mm} = 8,34 \text{ mm} \quad (78)$$

$$b'_2 = b_2 - \Delta b_d = 6,28 \text{ mm} - 0,1 \text{ mm} = 6,18 \text{ mm} \quad (79)$$

$$h'_1 = h_1 - \Delta h_d = 10 \text{ mm} - 0,1 \text{ mm} = 9,9 \text{ mm} \quad (80)$$

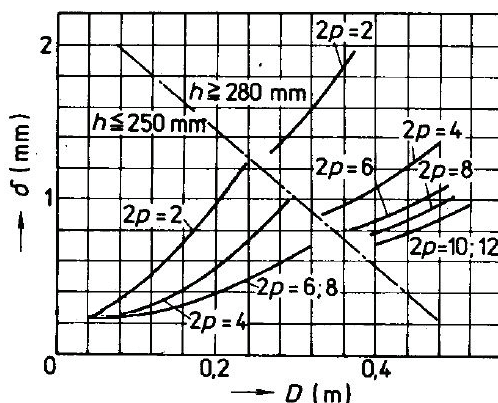
Plocha pro vinutí je:

$$S_d = \frac{b'_1 + b'_2}{2} \cdot h'_1 = \frac{8,34 \text{ mm} + 6,18 \text{ mm}}{2} \cdot 9,9 \text{ mm} = 71,874 \text{ mm}^2 \quad (81)$$

Činitel plnění:

$$k_{dr} = \frac{\pi \cdot d_{vi}^2 \cdot V_d}{4 \cdot S_d} = \frac{\pi \cdot d_{vi}^2 \cdot V_d}{4 \cdot 65,65 \text{ mm}^2} = \frac{\pi \cdot 0,150 \text{ mm}^2 \cdot 152}{4 \cdot 71,874 \text{ mm}^2} \cong 0,35 \quad (82)$$

Volba vzduchové mezery  $\delta = 0,0003 \text{ m} = 0,3 \text{ mm}$  dle obrázku 29



Obrázek 29: Délka vzduchové mezery v závislosti na vnitřním průměru statoru [13]

Náčrtek statorového plechu je vložen jako příloha P5 Obrázek 31: Náčrtek statorového plechu. Schéma trojfázového vinutí je přiloženo jako příloha P6 Obrázek 33: Schéma trojfázového vinutí.

## 5.4 Návrh rotoru

### 5.4.1 Výpočet klece

Dle tabulky Tabulka 12: Doporučené počty drážek [13], viz příloha, volím počet drážek rotoru  $Q_2 = 18$ .

Z délky vzduchové mezery se určí vnější průměr rotoru:

$$D_2 = D - 2 \cdot \delta = 0,06496 \text{ m} - 2 \cdot 0,0003 \text{ m} = 0,06436 \text{ m} = 64,36 \text{ mm} \quad (83)$$

Pro průměr hřídele určím z tabulky 10 činitel  $k_h = 0,23$

Tabulka 10: Činitel  $k_h$  [13]

| $h$ (mm) | 50 až 63 | 71 až 250 | 280 až 355 |         | 400 až 500 |      |         |
|----------|----------|-----------|------------|---------|------------|------|---------|
| $2p$     | 2 až 6   | 2 až 8    | 2          | 4 až 12 | 4          | 6    | 8 až 12 |
| $k_h$    | 0,19     | 0,23      | 0,22       | 0,23    | 0,20       | 0,23 | 0,25    |

$$D_h = k_h \cdot D_E = 0,23 \cdot 0,116 \text{ m} = 0,02668 \text{ m} = 26,68 \text{ mm} \quad (84)$$

Délka rotoru je stejná jako statoru:

$$l_2 = l_1 = 0,0434 \text{ m} = 43,4 \text{ mm} \quad (85)$$

Drážková rozteč:

$$t_{d2} = \frac{\pi \cdot D_2}{Q_2} = \frac{\pi \cdot 0,06436 \text{ m}}{18} = 0,0112 \text{ m} = 11,2 \text{ mm} \quad (86)$$

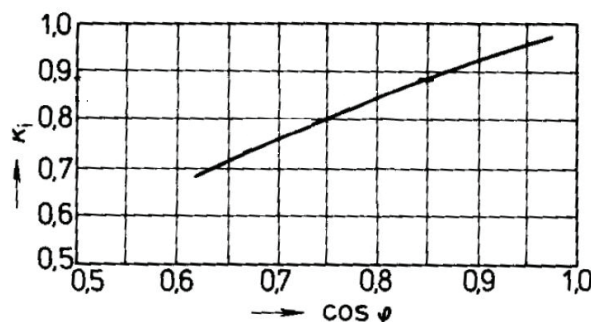
Činitel přepočtu proudů:

$$p_i = \frac{2 \cdot m_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1}}{Q_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 608 \cdot 0,96}{18} = 194,56 \quad (87)$$

Proud v jedné tyči klece rotoru:

$$I_{N2} = k_i \cdot I_{N1} \cdot p_i = 0,87 \cdot 1,232 \text{ A} \cdot 194,56 = 204,97 \text{ A} \quad (88)$$

Činitel  $k_i = 0,87$  je určen z obrázku 30.



Obrázek 30: Činitel  $k_i$  [13]

Proudová hustota hliníku  $J_2 = 4,5 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$

Předběžný průřez tyče z litého hliníku

$$S_t = \frac{I_{N2}}{J_2} = \frac{204,97 \text{ A}}{4,5 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}} = 4,55 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 = 45,5 \text{ mm}^2 \quad (89)$$

## 5.4.2 Výpočet drážek

pro  $h < 100$  volím  $b_0 = 1 \text{ mm}$ ,  $h_0 = 0,5 \text{ mm}$

Šířka zubu je dána vztahem, který respektuje maximální magnetickou indukci, která je dle tabulky Tabulka 14: Dovolené hodnoty indukce [13], viz příloha, určena  $B_{z2} = 1,75 \text{ T}$

$$b_{z2} = \frac{B_\delta \cdot t_{d2}}{B_{z2} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,61 \text{ T} \cdot 0,0135 \text{ m}}{1,75 \text{ T} \cdot 0,97} = 0,00485 \text{ m} = 4,85 \text{ mm} \quad (90)$$

Rozměry drážky:

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_0) - Q_2 \cdot b_{z2}}{\pi + Q_2} = \frac{\pi \cdot (0,06436 \text{ m} - 2 \cdot 0,0005 \text{ m}) - 18 \cdot 0,00485 \text{ m}}{\pi + 18} \quad (91)$$

$$= 0,00528 \text{ m} = 5,28 \text{ mm}$$

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2 \cdot \left(\frac{Q_2}{\pi} + \frac{\pi}{2}\right) - 4 \cdot S_t}{\frac{Q_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} = \sqrt{\frac{0,00528^2 \text{ m}^2 \cdot \left(\frac{18}{\pi} + \frac{\pi}{2}\right) - 4 \cdot 4,55 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2}{\frac{18}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} \quad (92)$$

$$= 0,00699 \text{ m} = 6,99 \text{ mm}$$

$$h_1 = (b_1 - b_2) \cdot \frac{Q_2}{2 \cdot \pi} = (0,00699 \text{ m} - 0,00528 \text{ m}) \cdot \frac{18}{2 \cdot \pi} = 0,00489 \text{ m} = 4,89 \text{ mm} \quad (93)$$

K vypočítaným rozměrům drážek se zvolí normalizované hodnoty  $h_1 = 5 \text{ mm}$  dle tabulky Tabulka 11: Normované rozměry drážek [13], viz příloha.

Celková hloubka drážky:

$$h_{d2} = h_0 + \frac{b_1}{2} + h_1 + \frac{b_2}{2} = 0,5 \text{ mm} + \frac{5,28 \text{ mm}}{2} + 5 \text{ mm} + \frac{6,99 \text{ mm}}{2} = 11,64 \text{ mm} \quad (94)$$

Průřez tyče:

$$\begin{aligned} S_t &= \frac{\pi}{8} \cdot (b_1^2 + b_2^2) + \frac{\pi}{2} \cdot (b_1 + b_2) \cdot h_1 \\ &= \frac{\pi}{8} \cdot (5,28^2 \text{ mm} + 6,99^2 \text{ mm}) + \frac{\pi}{2} \cdot (5,28 \text{ mm} + 6,99 \text{ mm}) \cdot 5 \text{ mm} \\ &= 9,148 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 = 91,48 \text{ mm}^2 \end{aligned} \quad (95)$$

Proudová hustota:

$$J_t = \frac{I_{N2}}{S_t} = \frac{204,97 \text{ A}}{9,148 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2} = 2,240 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} \quad (96)$$

Průřez kruhu nakrátko

$$\Delta = 2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot p}{Q_2} = 2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot 1}{18} = 0,347 \quad (97)$$

$$I_{kn} = \frac{I_{N2}}{\Delta} = \frac{204,97 \text{ A}}{0,347} = 590,69 \text{ A} \quad (98)$$

$$J_{kn} = 0,85 \cdot J_t = 0,85 \cdot 2,240 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} = 1,904 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} \quad (99)$$

$$S'_{kn} = \frac{I_{kn}}{J_{kn}} = \frac{492,72 \text{ A}}{1,904 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 258 \text{ mm}^2 \quad (100)$$

Rozměry kruhu:

$$b_{kn} = 1,25 \cdot h_{d2} = 1,25 \cdot 11,64 \text{ mm} = 14,55 \text{ mm} \quad (101)$$

$$a_{kn} = \frac{S'_{kn}}{b_{kn}} = \frac{2,58 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2}{0,01455 \text{ m}} = 0,01773 \text{ m} = 17,73 \text{ mm} \quad (102)$$

$$S_{kn} = a_{kn} \cdot b_{kn} = 17,73 \text{ mm} \cdot 14,55 \text{ mm} = 257,97 \text{ mm}^2 \quad (103)$$

$$D_{kn} = D_2 - b_{kn} = 64,36 \text{ mm} - 14,55 \text{ mm} = 49,81 \text{ mm} \quad (104)$$

Náčrtek rotorového plechu je vložen jako příloha P6 Obrázek 34: Nákres rotorového plechu.

## 6 ZÁVĚR

Diplomová práce pojednává o asynchronních motorech malého výkonu. První částí je rešerší pojednávající o asynchronních motorech, obsahuje souhrnné informace o běžně používaných třífázových asynchronních motorech, popisuje konstrukci těchto strojů, princip činnosti, vznik točivého magnetického pole a způsoby získávání záběrného momentu včetně jeho odvození a znázornění v podobě momentové charakteristiky. Dále jsou popsány motory pro specifické aplikace, je zde uvedeno několik provedení jednofázového asynchronního motoru, včetně motoru se stíněným pólem. U těchto zapojení je rozveden způsob získávání záběrného momentu. Provedení motorů pro specifické aplikace je dáno především jejich konstrukcí (nevýbušnost atd.). Díky modernímu způsobu řízení se nabízí použití asynchronních motorů v trakci, díky dobře realizovatelné rekuperaci se hodí také jako pohon v elektromobilech.

V druhé části práce jsou nastíněny popsány jednotlivé ztráty a možnosti zlepšení základních parametrů asynchronních motorů. Z uvedeného vyplývá, že pro návrh motorů je třeba najít vhodný kompromis mezi požadovanou účinností stroje a cenou vyrobeného motoru. Při projektování pohonu je třeba znát parametry celé soustavy, aby motor mohl pracovat v oblasti jmenovitých hodnot, neboť právě tam má nejlepší vlastnosti.

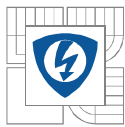
Ve spolupráci s firmou ATAS elektromotory Náchod, a.s. byla v rámci diplomové práce provedena analýza běžně vyráběného motoru typ T22VV512 za účelem změření ztrát a navržení možnosti zlepšení účinnosti. Na základě měření naprázdno a nakrátko, byly určeny ztráty ve vinutí statoru  $\Delta P_{j10}$  dosahují přibližně 26 W, ztráty v železe  $\Delta P_{FE}$  byly vypočteny přibližně 55 W. Z uvedených naměřených a vypočtených hodnot je patrné, že pro zvýšení účinnosti je třeba omezit zejména ztráty v železe. Pro konkrétní motor navrhuji použít pro statorový svazek plechy s tloušťkou 0,35 mm místo 0,5 mm a také plechy s vyšším obsahem křemíku Si až 4,6 %.

V rámci optimalizace energetických parametrů je v poslední části práce uveden návrh motoru. Vstupní hodnoty byly zvoleny podle měřeného třífázového, dvoupólového motoru typu T22VV512, podle dohody s firmou ATAS elektromotory Náchod, a.s, byl návrh realizován s předpokládanou účinností 85 %. Výsledkem návrhu jsou vypočtené parametry pro konstrukci motoru, včetně výkresů pro výrobu plechů statoru a rotoru. Předpokladem je opět použití elektrotechnických plechů s tloušťkou 0,35 mm. Funkční vzorky optimalizovaného motoru jsou ve výrobě, tudíž nebylo možné před dokončením této diplomové práce provést další měření, za účelem ověření výsledků optimalizace.



## SEZNAM SYMBOLŮ A ZNAČEK

|                   |                                  |
|-------------------|----------------------------------|
| $A$               | intenzita proudu                 |
| $B$               | magnetická indukce               |
| $b$               | šířka drážky                     |
| $B_{j1}$          | indukce ve jhu                   |
| $B_z$             | střední indukce v zubech statoru |
| $b_{z1}$          | šířka zubu rotoru                |
| $b_{z2}$          | šířka zubu statoru               |
| $\cos \varphi$    | účinník                          |
| $D$               | průměr                           |
| $\delta$          | velikost vzduchové mezery        |
| $D_e$             | vnější průměr plechů             |
| $\Delta P_{Fe1}$  | ztráty v železe statoru          |
| $\Delta P_{Fe2}$  | ztráty v železe rotoru           |
| $\Delta P_{j1}$   | ztráty ve vinutí statoru         |
| $\Delta P_{j2}$   | ztráty ve vinutí rotoru          |
| $\Delta P_{mech}$ | mechanické ztráty                |
| $D_s$             | střední průměr jha statoru       |
| $f$               | frekvence sítě                   |
| $f_1$             | frekvence                        |
| $f_2$             | rotorová frekvence               |
| $h$               | výška drážky                     |
| $I$               | proud                            |
| $I_{1f}$          | hodnota fázového proudu          |
| $I_k$             | proud nakrátko                   |
| $I_m$             | magnetizační proud               |
| $J$               | proudová hustota                 |
| $k$               | činitel                          |
| $k_{dr}$          | činitel plnění drážky            |



|             |                                                         |
|-------------|---------------------------------------------------------|
| $k_v$       | činitel vinutí                                          |
| $l$         | délka vodiče                                            |
| $l_i$       | ideální délka vzduchové mezery                          |
| $l_{Fe1}$   | délka magnetického obvodu statoru                       |
| $l_{Fe2}$   | délka magnetického obvodu rotoru                        |
| $M$         | moment                                                  |
| $M$         | moment motoru                                           |
| $m_1$       | počet fází stroje                                       |
| $M_{max}$   | maximální moment                                        |
| $M_{mech}$  | mechanický moment                                       |
| $M_n$       | nominální moment                                        |
| $M_z$       | moment zvratu                                           |
| $n$         | otáčky rotoru                                           |
| $n_0$       | otáčky naprázdno                                        |
| $n_1$       | otáčky pole statoru                                     |
| $n_2$       | otáčky točivého pole vyvolané proudy v rotoru           |
| $n_s$       | otáčky pole statoru (synchronní)                        |
| $N_1$       | počet závitů statoru                                    |
| $p$         | počet pólových dvojic                                   |
| $P_1$       | příkon motoru                                           |
| $P_\delta$  | výkon ve vzduchové mezeře                               |
| $P_{el}$    | výkon, který se spotřebovává na činných odporech motoru |
| $P_h$       | hysterezní ztráty                                       |
| $P_{mech}$  | mechanický výkon na hřídeli                             |
| $P_v$       | ztráty vířivými proudy                                  |
| $Q$         | teplo                                                   |
| $Q_1$       | počet drážek statoru                                    |
| $Q_2$       | počet drážek rotoru                                     |
| $R$         | činný odpor představující odpor mědi                    |
| $\rho_{cu}$ | měrný odpor mědi                                        |



---

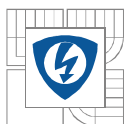
|             |                                                |
|-------------|------------------------------------------------|
| $R_{Fe}$    | odpor představující ztráty v železe            |
| $s$         | skluz                                          |
| $S$         | průřez vodiče                                  |
| $S_{kn}$    | průřez kruhů                                   |
| $s_k$       | skluz zvratu                                   |
| $S_{vi}$    | průřez drátu se smaltováním                    |
| $S_t$       | průřez rotorové tyče                           |
| $t$         | čas                                            |
| $t_{d1}$    | drážková rozteč statoru                        |
| $t_{d2}$    | drážková rozteč rotoru                         |
| $t_d$       | drážková rozteč                                |
| $\tau_p$    | pólová rozteč                                  |
| $U$         | napětí                                         |
| $U_{1f}$    | hodnota fázového napětí                        |
| $\lambda_m$ | jednotková magnetická vodivost můstku          |
| $\rho$      | měrný elektrický odpor (rezistivita materiálu) |
| $\Phi$      | magnetický tok                                 |
| $\omega$    | otáčky hřídele                                 |
| $\omega_1$  | otáčky statoru                                 |

## PŘÍLOHY

### Příloha 1

Tabulka 11: Normované rozměry drážek [13]

|       | Drážka S a L |       |       |      |             | Drážka V |       |             | Drážka K |       |       |             |       |     |       |       |  |  |  |  |  |  |  |
|-------|--------------|-------|-------|------|-------------|----------|-------|-------------|----------|-------|-------|-------------|-------|-----|-------|-------|--|--|--|--|--|--|--|
| $b_1$ | $b_0$        | $h_0$ | $h_1$ | $u$  | $\lambda_z$ | $b_0$    | $h_0$ | $\lambda_z$ | $d$      | $b_0$ | $h_0$ | $\lambda d$ |       |     |       |       |  |  |  |  |  |  |  |
| 2,6   | —            | —     | —     | —    | —           | 0,8      | 0,5   | 1,435       | 3        | 0,8   | 0,5   | 1,248       |       |     |       |       |  |  |  |  |  |  |  |
| 2,8   |              |       |       |      |             |          |       | 1,460       | 3,3      |       |       |             |       |     |       |       |  |  |  |  |  |  |  |
| 3     |              |       |       |      |             |          |       | 1,484       | 3,5      |       |       |             |       |     |       |       |  |  |  |  |  |  |  |
| 3,2   |              |       |       |      |             |          |       | 1,505       | 3,7      |       |       |             |       |     |       |       |  |  |  |  |  |  |  |
| 3,4   |              |       |       |      |             |          |       | 1,524       | 4        |       |       |             |       |     |       |       |  |  |  |  |  |  |  |
| 3,6   | 2,2          | 0,5   | 0,90  | 1,50 | 0,561       | 1,0      | 0,7   | 1,542       | 4,2      | 1,0   | 0,7   | 1,323       |       |     |       |       |  |  |  |  |  |  |  |
| 3,8   |              |       |       |      |             |          |       | 1,558       | 4,4      |       |       |             |       |     |       |       |  |  |  |  |  |  |  |
| 4     |              |       |       |      |             |          |       | 1,573       | 4,6      |       |       |             |       |     |       |       |  |  |  |  |  |  |  |
| 4,2   |              |       |       |      |             |          |       | 1,595       | 5        |       |       |             |       |     |       |       |  |  |  |  |  |  |  |
| 4,4   |              |       |       |      |             |          |       | 1,610       | 5,2      |       |       |             |       |     |       |       |  |  |  |  |  |  |  |
| 4,6   | 2,5          |       |       |      |             |          |       | 1,623       | 5,5      |       |       |             | 1,5   | 1,0 | 1,090 |       |  |  |  |  |  |  |  |
| 4,8   |              |       |       |      |             |          |       | 1,636       | 6        |       |       |             |       |     |       |       |  |  |  |  |  |  |  |
| 5     |              |       |       |      |             |          |       | 1,648       | 6,5      |       |       |             |       |     |       |       |  |  |  |  |  |  |  |
| 5,2   | 2,8          |       |       |      |             |          |       | 1,659       | 7        | 1,5   |       | 1,0         |       |     |       | 1,290 |  |  |  |  |  |  |  |
| 5,5   |              |       |       |      |             |          |       | 1,674       | 7,5      |       |       |             |       |     |       |       |  |  |  |  |  |  |  |
| 5,8   |              |       |       |      |             |          |       | 1,689       | 8        |       |       |             |       |     |       |       |  |  |  |  |  |  |  |
| 6     | 3,0          |       |       |      |             | 1,5      | 0,7   | 1,697       | 8,5      |       | 1,0   |             | 1,290 |     |       |       |  |  |  |  |  |  |  |
| 6,2   |              |       |       |      |             |          |       | 1,357       | 9        |       |       |             |       |     |       |       |  |  |  |  |  |  |  |
| 6,5   |              |       |       |      |             |          |       | 1,372       | 9,5      |       |       |             |       |     |       |       |  |  |  |  |  |  |  |
| 6,8   | 3,2          |       |       |      |             |          |       | 1,385       | 10       | 1,0   |       | 1,290       |       |     |       |       |  |  |  |  |  |  |  |
| 7     |              |       |       |      |             |          |       | 1,394       | 10,5     |       |       |             |       |     |       |       |  |  |  |  |  |  |  |
| 7,2   |              |       |       |      |             |          |       | 1,402       | 11       |       |       |             |       |     |       |       |  |  |  |  |  |  |  |
| 7,5   | 3,5          |       |       |      |             |          |       | 1,414       | 11,5     |       | —     |             | —     | —   |       |       |  |  |  |  |  |  |  |
| 7,8   |              |       |       |      |             |          |       | 1,425       | 12       |       |       |             |       |     |       |       |  |  |  |  |  |  |  |
| 8     |              |       |       |      |             |          |       | 1,433       | 12,5     |       |       |             |       |     |       |       |  |  |  |  |  |  |  |
| 8,5   | 4,0          |       |       |      |             | —        | —     | 1,649       | —        |       |       |             |       |     |       |       |  |  |  |  |  |  |  |
| 9     |              |       |       |      |             |          |       | 1,663       | —        |       |       |             |       |     |       |       |  |  |  |  |  |  |  |
| 9,5   |              |       |       |      |             |          |       | 1,678       | —        |       |       |             |       |     |       |       |  |  |  |  |  |  |  |
| 10    | 4,5          |       |       |      |             |          |       | 1,690       | —        |       |       |             |       |     |       |       |  |  |  |  |  |  |  |
| 10,5  |              |       |       |      |             |          |       | —           | —        |       |       |             |       |     |       |       |  |  |  |  |  |  |  |
| 11    |              |       |       |      |             |          |       | —           | —        |       |       |             |       |     |       |       |  |  |  |  |  |  |  |
| 11,5  | 5,0          | 0,7   |       |      |             |          |       | —           | —        |       |       |             |       |     |       |       |  |  |  |  |  |  |  |
| 12    |              |       |       |      |             |          |       | —           | —        |       |       |             |       |     |       |       |  |  |  |  |  |  |  |
| 12,5  |              |       |       |      |             |          |       | —           | —        |       |       |             |       |     |       |       |  |  |  |  |  |  |  |
| 13    | 5,5          |       |       |      |             |          |       | —           | —        |       |       |             |       |     |       |       |  |  |  |  |  |  |  |
| 13,5  |              |       |       |      |             |          |       | —           | —        |       |       |             |       |     |       |       |  |  |  |  |  |  |  |
| 14    |              |       |       |      |             |          |       | —           | —        |       |       |             |       |     |       |       |  |  |  |  |  |  |  |
| 14,5  | 2,0          |       |       |      |             |          |       | —           | —        |       |       |             |       |     |       |       |  |  |  |  |  |  |  |
| 15    |              |       |       |      |             |          |       | —           | —        |       |       |             |       |     |       |       |  |  |  |  |  |  |  |



Příloha 2

Tabulka 12: Doporučené počty drážek [13]

| 2p | Q <sub>1</sub> | Q <sub>2</sub>          |                                                    | 2p | Q <sub>1</sub> | Q <sub>2</sub>                                                           |                                           |
|----|----------------|-------------------------|----------------------------------------------------|----|----------------|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
|    |                | drážky nenatočené       | drážky natočené                                    |    |                | drážky nenatočené                                                        | drážky natočené                           |
| 2  | 12             | 9*, 15*                 | —                                                  | 8  | 48             | (34), 36, 44, 62, 64                                                     | 35, 44, 61, 63, 65                        |
|    | 18             | 11*, 12*, 15*, 21*, 22* | 14*, (18), 19*, 22*, 26, 28*, (30), 31, 33, 34, 35 |    | 72             | 56, 58, 86, 88, 90                                                       | 56, 57, 59, 85, 87, 89                    |
|    | 24             | 15*, (16*), 17*, 19, 32 | 18, 20, 26, 31, 33, 34, 35                         |    | 84             | 66, (68), 70, 98, 100, 102, 104                                          | (68), (69), (71), (97), (99), (101)       |
|    | 30             | 22, 38                  | (18), 20, 21, 23, 24, 37, 39, 40                   | 10 | 96             | 78, 82, 110, 112, 114                                                    | 79, 80, 81, 83, 109, 111, 113             |
|    | 36             | 26, 28, 44, 46          | 25, 27, 29, 43, 45, 47                             |    | 60             | 44, 46, 74, 76                                                           | 57, 69, 77, 78, 79                        |
|    | 42             | 32, 33, 34, 50, 52      | —                                                  |    | 90             | 68, 72, 74, 76, 104, 106, 108, 110, 112, 114                             | 70, 71, 73, 87, 93, 107, 109              |
|    | 48             | 38, 40, 56, 58          | 37, 39, 41, 55, 57, 59                             |    | 120            | 86, 88, 92, 94, 96, 98, 102, 104, 106, 134, 136, 138, 140, 142, 144, 146 | 90, 101, 103, 117, 123, 137, 139          |
| 4  | 12             | 9*                      | 15*                                                | 12 | 72             | 56, 64, 80, 88                                                           | 69, 75, 80, 89, 91, 92                    |
|    | 18             | 10*, 14*                | 18*, 22*                                           |    | 90             | 68, 70, 74, 88, 98, 106, 108, 110                                        | (71), (73), 86, 87, 93, 94, (107), (109), |
|    | 24             | 15*, 16*, 17, (32)      | 16, 18, (20), 30, 33, 34, 35, 36                   |    | 108            | 86, 88, 92, 100, 116, 124, 128, 130, 132                                 | 84, 89, 91, 104, 105, 111, 112, 125, 127  |
|    | 36             | 26, 44, 46              | (24), 27, 28, 30, (32), 34, 45, 48                 |    | 144            | 124, 128, 136, 152, 160, 164, 166, 168, 170, 172                         | 125, 127, 141, 147, 161, 163              |
|    | 42             | (34), (50), 52, 54      | (33), 34, (38), (51), 53                           | 84 |                |                                                                          |                                           |
|    | 48             | 34, 38, 56, 58, 62, 64  | (36), (38), (39), 40, (44), 57, 59                 |    |                | 74, 94, 102, 104, 106                                                    | 75, 77, 79, 89, 91, 93, 103               |

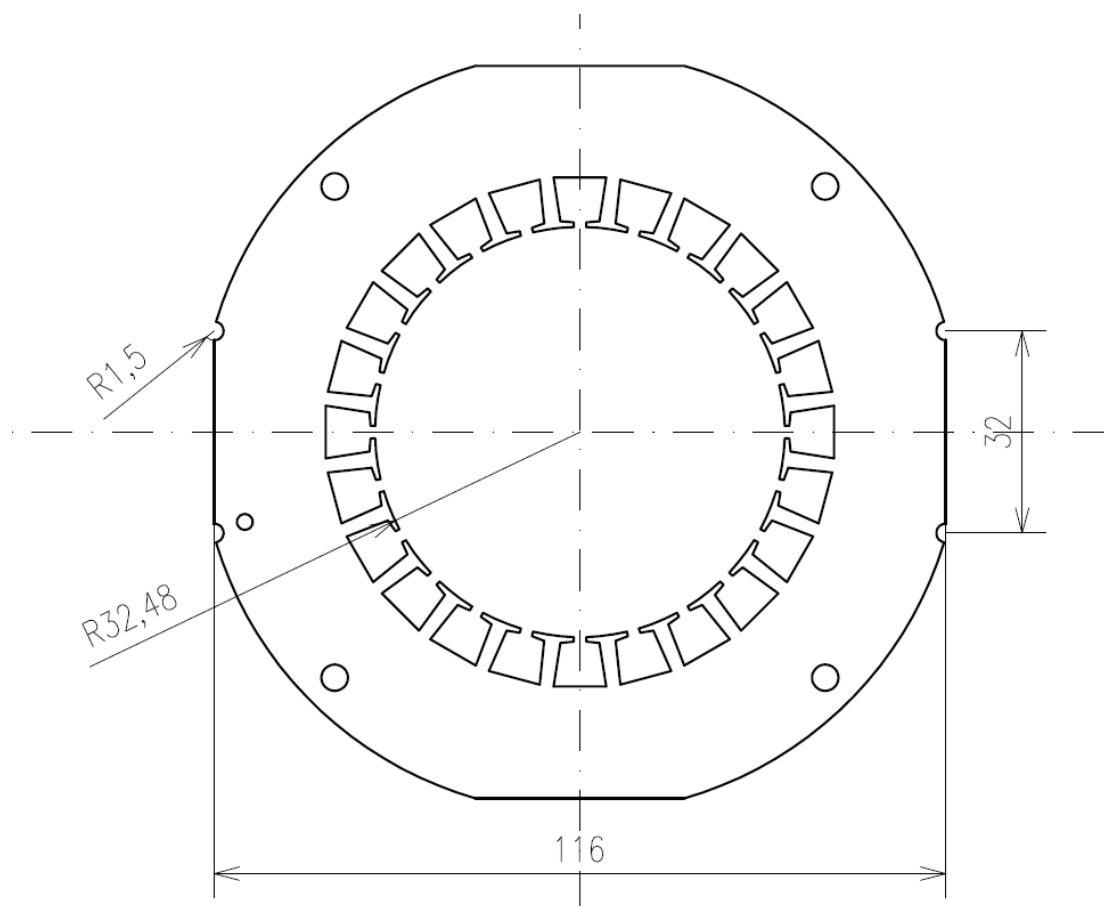


Příloha 4

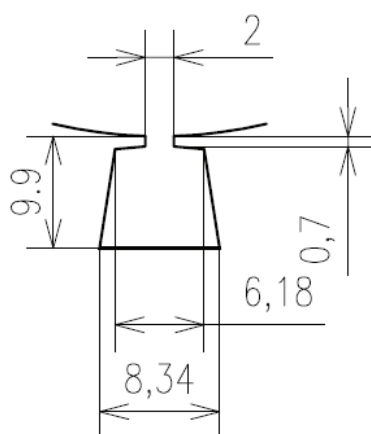
Tabulka 14: Dovolené hodnoty indukce [13]

| Část magnetického obvodu                                                         | Označení           | IP 44            |                            |                             |                           |            |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------|------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------|------------|
|                                                                                  | 2p                 | 2                | 4                          | 6                           | 8                         | 10 a 12    |
| Jho statoru                                                                      | B <sub>j1</sub>    | 1,4 až 1,6       |                            |                             | 1,15 až 1,35              | 1,1 až 1,2 |
| Zuby statoru s rovnoběžnými stěnami (vsypávané vinutí, drážky S, L)              | B <sub>z1</sub>    | 1,7 až 1,9       |                            |                             |                           | 1,6 až 1,8 |
| Zuby statoru v nejužším průřezu drážky polozavřené F<br><br>drážky otevřené N, M | B <sub>z1max</sub> | 1,75 až 1,95     |                            |                             |                           |            |
|                                                                                  |                    | 1,6 až 1,8       |                            |                             |                           |            |
| Jho rotoru nakrátko kroužkového motorů na 6 000 V                                | B <sub>j2</sub>    | ≤ 1,45<br>—<br>— | ≤ 1,25<br>≤ 1,25<br>≤ 1,55 | ≤ 1,15<br>≤ 1,05<br>≤ 1,30  | ≤ 0,85<br>≤ 0,75<br>≤ 1,0 |            |
| Zuby rotoru s rovnoběžnými stěnami (drážky V, W)                                 | B <sub>z2</sub>    | 1,75 až 1,85     |                            |                             |                           |            |
| Zuby v nejužším průřezu rotoru nakrátko kroužkového                              | B <sub>z2max</sub> | —<br>—           | 1,5 až 1,7<br>1,85 až 2,05 | 1,45 až 1,60<br>1,75 až 1,9 |                           |            |

Příloha 5

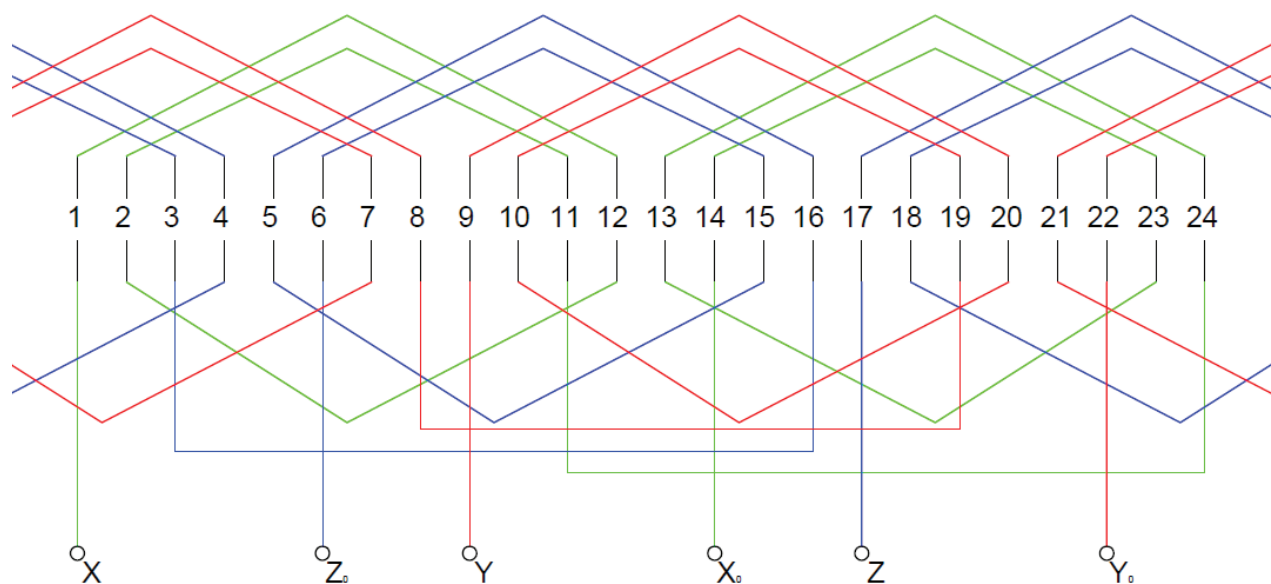


Obrázek 31: Náčrso satorového plechu



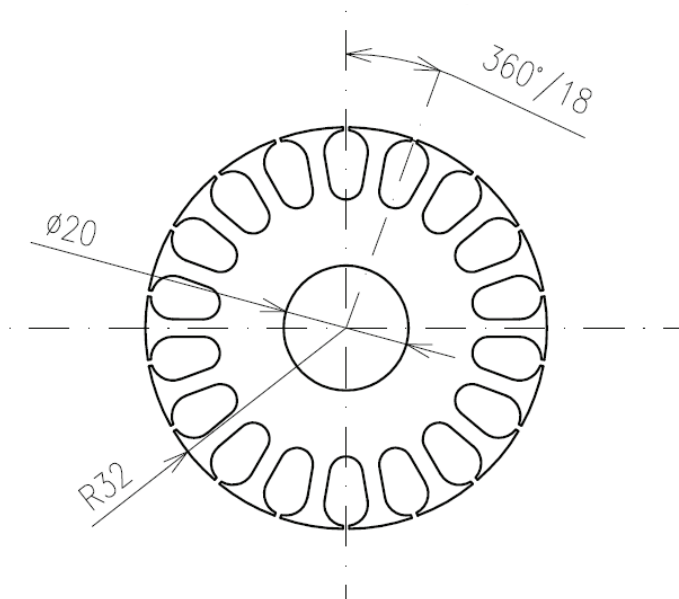
Obrázek 32: Detail satorové drážky

Příloha 6

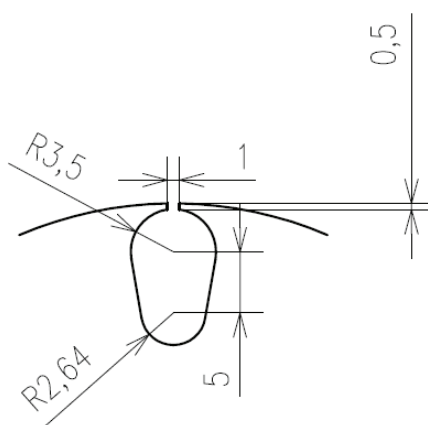


Obrázek 33: Schéma trojfázového vinutí

Příloha 7

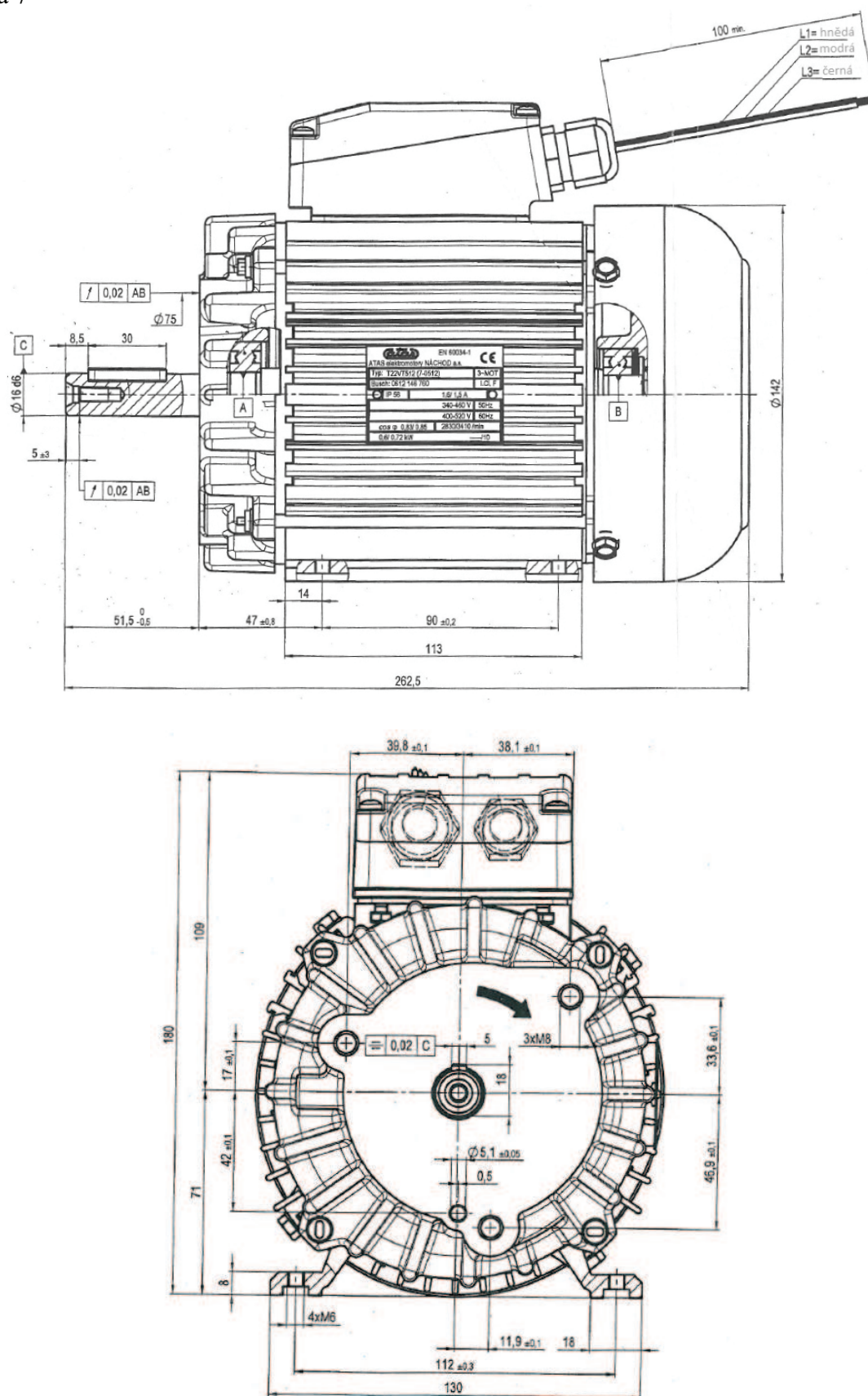


Obrázek 34: Náčres rotorového plechu



Obrázek 35: Detail drážky rotoru

Příloha 7



Obrázek 36: Rozměrový výkres motoru T22VT512 [16]

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] FETTER, F. *Asynchronní motory: stručný přehled o působení a použití asynchronních motorů k opakování a úvodnímu školení*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1966. 79 s.
- [2] KOČMAN, S. *Asynchronní stroje*. Ostrava: VŠB - Technická Univerzita v Ostravě, 2002. 36 s.
- [3] ŠTEPINA, J. *Fyzikální úvod do teorie elektrických strojů*. Praha: SNTL Praha, 1995. 42 s.
- [4] ONDRUŠEK, Č. *Učební texty do předmětu BESB*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
- [5] ZAHEDI, B.; VAEZ-ZADEH, S. *Analysis of Electrical Loss in Single Phase Induction Motors*. Conference, 2007. IEMDC '07. IEEE International , vol.2, no., pp.1621-1625, 3-5 May 2007. ISBN 1-4244-0742-7
- [6] HOMOLA, L. *Elektrické stroje na střídavý proud: příručka pro techniky a studující průmyslových škol. Díl II. Asynchronní stroje*. Praha: I. L. Kober, 1945. 191 s.
- [7] CHMELÍK, K.; SOJAK, J. Ložiskové proudy a jejich degradační působení. *ELEKTRO*. 2003, 08, s. 5.
- [8] IRIMIE, D. L.; RADULESCU, M. M.; SAINT-MICHEL, J.; PELTIER, F.; *Comparative loss analysis of small three-phase cage induction motors*; Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International Conference on, vol., no., pp.1-4, 6-8 Sept. 2010. ISBN 978-1-4244-4174-7
- [9] NADĚŽDA PAVELKOVÁ *Účinnost elektrických motorů a snižování spotřeby elektrické energie – odborný článek*, časopis ELEKTRO 2008/10, ABB s.r.o.
- [10] KUCHAR, M.; ŠTĚPANEK, L.; HLISNIKOVSKY, *Řízení trakčních pohonů dieselelektrické lokomotivy řady 179. AUTOMATIZACE*, 2009, 06, s. 3
- [11] *SEW-EURODRIVE* [online]. 2011 [cit. 2011-03-17]. Dostupné z WWW: <WWW.SEW-EURODRIVE.DE>.
- [12] BAŠTA; KULDA; PAVLÁSEK. *Měření na elektrických stojích 4 – měření na indukčních strojích*. Praha: SNTL, Praha 1962.
- [13] KOPYLOV, I. P. *Stavba elektrických strojů: celostátní vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988. 685 s.
- [14] ŠEVČÍK, P. *Výpočet jednofázového asynchronního motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 80 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc.



- 
- [15] LYÓCSA, Štefan. *Měření na asynchronním motoru*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1972. 126 s.
- [16] Technické výkresy, katalogové listy ATAS elektromotory Náchod, a.s.