

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

VÝPOČET JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU

DIPLOMOVÁ PRÁCE

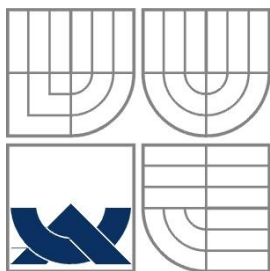
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

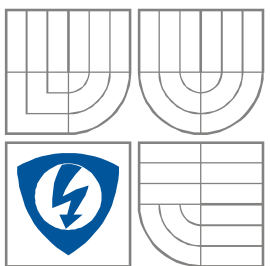
Bc. LUKÁŠ VOLF

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

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

VÝPOČET JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU

SINGLE-PHASE INDUCTION MOTOR CALCULATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

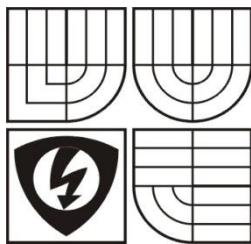
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Lukáš Volf

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc.

BRNO, 2012



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Semestrální práce

magisterský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Lukáš Volf

Ročník: 2

ID: 109743

Akademický rok: 2011/12

NÁZEV TÉMATU:

Výpočet jednofázového asynchronního motoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Analyzujte teoreticky jednofázový asynchronní motor a možnosti získání záběrového momentu.
2. Navrhněte jednoduchý program výpočtu jednofázového asynchronního motoru s pomocnou fází.
3. Vypracujte příklad výpočtu vyráběného motoru a porovnejte výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Termín zadání: 21.09.2011

Termín odevzdání: 21.5.2012

Vedoucí projektu: prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc.

Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální 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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Abstrakt

Tato práce se v první kapitole zabývá základními vlastnostmi trojfázových a jednofázových asynchronních motorů. Dále jsou popsány způsoby získávání záběrového momentu jednofázového asynchronního motoru. V druhé části práce je proveden výpočet jednofázového asynchronního motoru s trvale připojeným kondenzátorem, jeho kontrola, výpočet výstupních hodnot, navrženo programové řešení tohoto výpočtu v programu Microsoft Excel 2007 a vypočtené parametry sestavenou metodou výpočtu porovnány s naměřenými, dodanými hodnotami firmou ATAS Náchod.

Abstract

This work is in the first chapter deals with the basic properties of single phase and three-phase induction motors. The following describes the procedure for obtaining a starting torque of single-phase asynchronous motor. In the second part of the calculation is carried out single-phase induction motor with a permanently connected capacitor and its control, calculation of output values, the program proposed solution to this calculation in Microsoft Excel 2007 and calculated parameters of the development of methods of calculation were compared with measured, the values supplied by ATAS Náchod.

Klíčová slova

Jednofázový asynchronní motor, pomocná fáze, kondenzátor, program, analýza, návrh

Keywords

Single phase induction motor, split phase, capacitor, program, analysis, proposal

Bibliografická citace

Volf, L. Výpočet jednofázového asynchronního motoru. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 69 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Výpočet jednofázového asynchronního motoru 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 práci 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 za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne

Podpis autora



OBSAH:

Obsah

1 ÚVOD	17
1.1 PARAMETRY ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ	17
1.2 VINUTÍ ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ	17
1.3 TOČIVÝ MOMENT ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ	18
1.4 ROZDĚLENÍ VÝKONŮ, ÚČINNOST A ÚČINÍK	18
1.5 REGULACE OTÁČEK ASYNCHRONNÍHO MOTORU	20
1.6 ASYNCHRONNÍ TROJFÁZOVÝ MOTOR	21
1.6.1 ROZDĚLENÍ TROJFÁZOVÝCH ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ PODLE ROTORŮ	21
1.6.2 PRINCIP ČINNOSTI TROJFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU	24
1.6.3 SPOUŠTĚNÍ TROJFÁZOVÝCH ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ	25
1.7 MOMENTOVÁ CHARAKTERISTIKA TROJFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU	27
1.8 JEDNOFÁZOVÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR	27
1.8.1 JEDNOFÁZOVÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR S POMOCNOU FÁZÍ	27
1.8.2 PRINCIP ČINNOSTI JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU	28
1.8.3 RYCHLOST OTÁČENÍ JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU	28
1.8.4 MOMENT JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU	28
1.9 ZPŮSOBY ZÍSKÁVÁNÍ ZÁBĚROVÉHO MOMENTU	29
1.9.1 TROJFÁZOVÝ MOTOR ZAPOJENÝ JAKO JEDNOFÁZOVÝ	29
1.9.2 KONSTRUKCE A ROZDĚLENÍ JEDNOFÁZOVÝCH MOTORŮ S POMOCNOU FÁZÍ	30
1.9.3 JEDNOFÁZOVÉ MOTORKY SE STÍNĚNÝMI PÓLY	31
1.10 SROVNÁNÍ TROJFÁZOVÉHO A JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU	32
2 ANALÝZA JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU	32
2.1 VÝPOČET JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU FCJ4C82A	33
2.1.1 VÝPOČET HLAVNÍCH ROZMĚRŮ ŽELEZA	33
2.1.2 VÝPOČET HLAVNÍHO VINUTÍ STATORU	36
2.1.3 VÝPOČET ROZMĚRŮ STATORU A JEHO DRÁŽKY	38
2.1.4 POMOCNÉ VINUTÍ STATORU	40
2.1.5 VÝPOČET TYČÍ ROTORU	43
2.1.6 VÝPOČET ROZMĚRŮ DRÁŽKY ROTORU	45
2.1.7 VÝPOČET KAPACITY KONDENZÁTORU	47
2.2 KONTROLA NÁVRHU VÝPOČTENÉHO JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU S TRVALE PŘIPOJENÝM KONDENZÁTOREM FCJ4C82A	47
2.2.1 VÝPOČET ČINNÉHO ODPORU HLAVNÍHO VINUTÍ	47
2.2.2 VÝPOČET HLAVNÍ REAKTANCE STATORU	49
2.2.3 ROZPTYLOVÁ REAKTANCE STATORU	51
2.2.4 ROZPTYLOVÁ REAKTANCE ROTORU	52
2.2.5 ZJEDNODUŠENÉ NÁHRADNÍ SCHÉMA PRO SOUMĚRNÝ DVOJFÁZOVÝ STROJ	53
2.3 HMOTNOST MOTORU	53
2.4 VÝPOČET ZTRÁT, ÚČINNOSTI A MOMENTU	55



3 MĚŘENÍ NA MOTORKU FCJ4C82A	57
3.1 SCHÉMA ZAPOJENÍ.....	57
3.2 SEZNAM POUŽITÝCH PŘÍSTROJŮ.....	58
3.3 TABULKY NAMĚŘENÝCH HODNOT	58
3.3.1 MĚŘENÍ ČINNÉHO A POMOCNÉHO VINUTÍ STATORU	58
3.3.2 MĚŘENÍ NAPRAZDNO	58
3.3.3 MĚŘENÍ NAKRÁTKO	59
3.3.4 MĚŘENÍ PŘI ZATĚŽOVÁNÍ.....	60
3.3.5 POMĚR ZÁVITŮ HLAVNÍHO A POMOCNÉHO VINUTÍ.....	61
3.3.6 UKÁZKA Z MĚŘENÍ MOTORKU FCJ4C82A.....	62
3.4 POROVNÁNÍ A ZHODNOCENÍ VYPOČTENÝCH A ZMĚŘENÝCH PARAMETRŮ A DODANÝCH PARAMETRŮ FIRMOU ATAS NÁCHOD.....	63
4 PROGRAMOVÉ ŘEŠENÍ PRO NÁVRH JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU 	64
4.1 POPIS PROGRAMU	64
4.2 PRÁCE S PROGRAMEM	65
5 ZÁVĚR.....	66
LITERATURA	67
PŘÍLOHA 1: PRŮMĚRY VODIČŮ SE SMALTEM A BEZ SMALTU	68
PŘÍLOHA 2	69

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1.1: Cívka vinutí.....</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 1.2: Energetická bilance výkonů a ztrát asynchronního motoru</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 1.3: Momentová charakteristika asynchronního motoru při různé velikosti odporu v rotoru:.....</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 1.4: Klecové vinutí</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 1.5: Tvary drážek</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 1.6: Schematické znázornění dvojité klece</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 1.7: Momentová charakteristika motoru s dvojitou klecí:</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 1.8: Tyč vírové klece</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 1.9: Momentová charakteristika motoru s odporovou klecí</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 1.10: Princip činnosti asynchronního motoru</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 1.11: Momentová charakteristika trojfázového asynchronního motoru.....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 1.12: Momentová charakteristika rozběhu jednofázového asynchronního motoru.....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 1.13: Momentová charakteristika jednofázového asynchronního motoru.....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 1.14: Zapojení trojfázového asynchronního motoru s připojeným kondenzátorem na jednofázovou síť v zapojení: a) do hvězdy b) do trojúhelníku.....</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 1.15: Zapojení jednofázového asynchronního motoru</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 1.16: a) Funkce stíněného pólu.....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 1.17: b) Momentová charakteristika motoru se stíněným pólem</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 2.1: Jednofázový asynchronní motor FCJ4C82A</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 2.2: Rozměry jednofázového asynchronního motoru FCJ4C82A.....</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 2.3 Součin účinnosti a účinníku pro trojfázové motory</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 2.4 Součin účinnosti a účinníku na svorkách sítě pro jednofázové motory s trvale připojeným kondenzátorem.</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 2.5 Návrh statoru z vypočtených parametrů</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 2.6 Návrh drážek statoru</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 2.7 Model navrženého statoru jednofázového asynchronního motoru (FCJ4C82A)</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 2.8 Návrh rotoru z vypočtených parametrů</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 2.9 Model navrženého rotoru.....</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 2.10 Magnetizační křivka plechů o měrných ztrátách $p_{1,0}=2,6\text{W/kg}$</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 2.11 Zjednodušené náhradní schéma pro fiktivní souměrný dvojfázový stroj</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 3.1 Schéma zapojení při měření motorku FCJ4C82A</i>	<i>57</i>



<i>Obrázek 3.2 Měření pomocného vinutí</i>	<i>Obrázek 3.3 Měření hlavního vinutí</i>	62
<i>Obrázek 3.4 Měření motorku FCJ4C82A</i>		62
<i>Obrázek 3.5 Měření motorku FCJ4C82A</i>		62
<i>Obrázek 4.1 Ukázka programu pro návrh jednofázového asynchronního motoru s trvale připojeným kondenzátorem</i>		65
<i>Obrázek 4.2 Ukázka programu pro návrh jednofázového asynchronního motoru s trvale připojeným kondenzátorem-odkaz na tabulku 2</i>		65



SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 2.1 Používané počty drážek</i>	<i>36</i>
<i>Tabulka 2.2 Ztrátové číslo pro indukci $1T$ a frekvenci $50Hz$</i>	<i>38</i>
<i>Tabulka 2.3 Činitelé plnění plechů.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabulka 2.4 Plnění drážek.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabulka 2.5 Sousedná složka proudové hustoty v rotoru.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabulka 2.6 Empirická tabulka kapacit kondenzátorů pro různé výkony strojů.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabulka 2.7 Měrná vodivost.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabulka 2.8 Hodnoty $\sigma_{A0} \cdot 100$ pro vinutí s plným krokem</i>	<i>51</i>
<i>Tabulka 3.1 Měření činného odporu statorového vinutí</i>	<i>58</i>
<i>Tabulka 3.2 Měření naprázdno</i>	<i>58</i>
<i>Tabulka 3.3 Měření nakrátko</i>	<i>59</i>
<i>Tabulka 3.4 Měření při zatěžování.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabulka 3.5 Měření napětí pomocného vinutí.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabulka 3.6 Měření napětí hlavního vinutí</i>	<i>61</i>
<i>Tabulka 3.7 Porovnání naměřených a vypočtených a dodaných hodnot firmou ATAS Náchod.....</i>	<i>63</i>



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Jednotka	Název
A	[A/cm]	Proudové zatížení
B_{zs}	[T]	Sycení v zubech statoru
B_{j1}	[T]	Sycení statorového jha
B_{zr}	[T]	Sycení v zubech rotoru
B_d	[T]	Maximální indukce ve vzduchové mezeře
B_{j2}	[T]	Magnetická indukce v jha rotoru
b_{1s}	[mm]	Šířka horní části drážky
b_{2s}	[mm]	Šířka dolní části drážky
b_{4r}	[mm]	Otevření rotorové drážky
b_{iz}	[mm]	Šířka izolace drážky
b_{z2r}	[mm]	Šířka zubu rotoru
b_{4s}	[mm]	Otevření drážky statoru
b_{z1s}	[mm]	Šířka zubu statoru
c	[μ F]	Kapacita trvale připojeného kondenzátoru
C	[F]	Kapacita kondenzátoru
C_e	[-]	Essonská výkonová konstanta
d	[mm]	Vrtání statoru
d_A	[mm]	Průměr vodiče
d_{Av}	[mm]	Průměr vodiče volený
d_{kr}	[mm]	Střední průměr kroužku rotoru
d_{1s}	[mm]	Vnější průměr statorových plechů
d_{2s}	[mm]	Průměr statoru na dně drážky
d'_A	[mm]	Průměr vodiče pomocného vinutí
d'_{Av}	[mm]	Skutečný vyráběný průměr drátu
d_{1r}	[mm]	Vnější průměr rotoru
d_{dr}	[mm]	Průměr drážky rotoru
d_{2r}	[mm]	Vnitřní průměr rotoru
f_1	[Hz]	Kmitočet střídavého pole
H_{z1}	[A/m]	Intenzita magnetického pole
h_{js}	[mm]	Šířka jha statoru
h_{cs}	[mm]	Předběžná hloubka drážky statoru
h_{1s}	[mm]	Aktivní hloubka statorové drážky
h'_{cs}	[mm]	Celková hloubka drážky statoru



h_k	[mm]	Hloubka klínu hřídele
h_{cr}	[mm]	Celková hloubka drážky rotoru
I_{tk}	[A]	Proud tyče rotoru
I_A	[A]	Proud hlavním vinutím
I_f	[A]	Proud ve fázi
I_z	[A]	Záběrný proud
I_{drt}	[A]	Sousledná složka proudu rotoru
I_{DKR}	[A]	Proud v rotorovém kruhu
$k_{\delta 1}$	[-]	Cartelův činitel pro stator
$k_{\delta 2}$	[-]	Cartelův činitel pro rotor
k_{cu}	[-]	Poměr drážkového prostoru obou vinutí
k_d	[-]	Činitel využití plochy
k	[-]	Konstanta závislá na napětí sítě
K_n	[mm]	Délka zešíkmení rotorových drážek
k_d	[-]	Činitel využití plochy drážky bez drážkové izolace
k_s	[-]	Poměr mezi vrtáním statoru a vnějším průměrem statoru
k_1	[-]	Poměr mezi hlavním a pomocným vinutím
l	[mm]	Délka železa
l_z	[mm]	Střední délka závitů statorového vinutí
l_k	[mm]	Šířka klínu rotoru
M_{max}/M_z	[Nm]	Momentová přetížitelnost
M	[N.m]	Moment stroje
M_n	[N.m]	Jmenovitý moment
M_{max}	[N.m]	Maximální moment
M_z	[N.m]	Záběrný moment
m	[-]	Počet fází statorového vinutí
m_s	[kg]	Hmotnost jha statoru a rotoru
m_r	[kg]	Hmotnost zubů statoru a rotoru
m_c	[kg]	Celková hmotnost plechů statoru a rotoru
N'_A	[-]	Počet závitů pomocného vinutí
N'_{d1}	[-]	Počet vodičů v jedné drážce
N'_{Av}	[-]	Zvolený počet závitů pomocného vinutí
N_A	[-]	Závity hlavního vinutí
N_{d1}	[-]	Počet vodičů v jedné drážce
n_1	[min ⁻¹]	Otáčky točivého magnetického pole statoru
n_s	[min ⁻¹]	Synchronní rychlost



O_{dr}	[mm]	Obvod drážky rotoru
ΔP_{FE}	[W]	Zráty v železe
ΔP_{CU1}	[W]	Ztráty ve vinutí statoru
ΔP_{CU2}	[W]	Zráty ve vinutí rotoru
P_1	[W]	Příkon motoru
P_{δ}	[W]	Výkon přes vzduchovou mezeru
P	[W]	Výkon stroje
p	[-]	Počet pólových dvojic
P_3	[W]	Výkon trojfázového motoru
ΔP	[W]	Celkové ztráty stroje
Q_{np}	[-]	Počet drážek statoru na pól
Q_p	[-]	Počet drážek pro pomocné vinutí
Q_h	[-]	Počet drážek pro hlavní vinutí
Q_{cs}	[-]	Celkový počet drážek statoru
Q_{cr}	[-]	Celkový počet drážek rotoru
q	[-]	počet drážek hlavního vinutí na pól
q_p	[-]	Počet drážek pomocného vinutí na pól
R_A	[Ω]	Činný odpor hlavního vinutí statoru
R_t	[Ω]	Činný odpor samostatné rotorové tyče
R_{kR}	[Ω]	Činný odpor spojovacího kruhu
R'_t	[Ω]	Odpor rotoru jedné tyče s přírážkou na spojovací kruh
R_2	[Ω]	Odpor rotoru přepočtený na stator
R	[W]	Odpor vinutí
R_1	[W]	Odpor fáze
S	[VA]	Zdánlivý výkon
S_{av}	[mm ²]	Průřez vodiče hlavního vinutí
S_d	[mm ²]	Plocha drážky bez izolace
S'_{AV}	[mm ²]	Průřez vodiče pomocného vinutí
S_{rt}	[mm ²]	Průřez rotorové tyče
S_{kr}	[mm ²]	Průřez rotorového kruhu
S_{idp}	[mm ²]	Plocha drážky s izolací
s	[-]	Skluz stroje
t_{1s}	[mm]	Drážková rozteč statoru

t_{1r}	[mm]	Drážková rozteč rotoru
$U_{m\delta}$	[A]	Magnetické napětí na vzduchové mezeře
U_{mz1}	[A]	Magnetické napětí na zubech statoru
U_{mj1}	[A]	Magnetické napětí jha statoru
U_{mz2}	[A]	Magnetické napětí na zubech rotoru
U_{mj2}	[A]	Magnetické napětí jha rotoru
U_m	[A]	Celkové magnetické napětí
U	[V]	Napájecí napětí sítě
U_s	[V]	Sdružené napětí
X_h	[Ω]	Hlavní reaktance statoru
X'_h	[Ω]	Hlavní reaktance pro samostatnou vzduchovou mezeru
X_{A0}	[Ω]	Diferenciální rozptylová reaktance
X_z	[Ω]	Rozptylová reaktance pro hlavy zubů
X_{Aq}	[Ω]	Rozptyl od natočení drážek statoru
X_{Ad}	[Ω]	Rozptylová reaktance statorové drážky
$X_{Ač}$	[Ω]	Rozptyl přes čela vinutí
X_{vs}	[Ω]	Celková rozptylová reaktance statoru
X_{20}	[Ω]	Diferenční rozptyl rotoru
X_{2d}	[Ω]	Rozptylová reaktance rotorové drážky
X_{2q}	[Ω]	Rozptyl natočení drážek rotoru
X_{vr}	[Ω]	Celková rozptylová reaktance statoru
Z	[W]	Impedance jedné fáze motoru
$Z_{1,0}$	[W/kp]	Měrné ztráty plechů
α	[°]	Úhel mezi drážkami
α_γ	[-]	Převrácená hodnota využití stroje
γ	[-]	Využití stroje
ε_1	[-]	Poměrný úbytek napětí na rozptylové reaktanci
ε_2	[-]	Poměrný úbytek napětí statoru na zpětné vnitřní impedanci
ω_1	[rad/s]	úhlová rychlost magnetického pole statoru
η	[%]	Účinnost
$\cos\varphi$	[-]	Účíník
Φ	[Wb]	Magnetický tok
ρ_{Fe}	[kg/m ³]	Hustota železa
δ''	[mm]	Ekvivalentní vzduchová mezera
δ'	[mm]	Efektivní vzduchová mezera



δ	[mm]	Šířka vzduchové mezery
σ_q	[-]	Součinitel rozptylu od natočení drážek
σ_{A0}	[%]	Součinitel diferenčního rozptylu
σ_{20}	[-]	Součinitel diferenčního rozptylu
σ_{tk}	[A/mm ²]	Předpokládaná efektivní proudová hustota rotorové tyče
σ_{drt}	[A/mm ²]	Proudová hustota v rotoru
σ_A	[A/mm ²]	Proudová hustota
χ_A	[-]	Činitel hlavního vinutí
χ'_A	[-]	Činitel pomocného vinutí
χ_B	[-]	Činitel vinutí statoru
λ_1	[-]	Poměr rozměrů drážky rotoru
λ_2	[-]	Poměr rotorového proudu a rozměru rotorové drážky
λ_{dr}	[-]	Rozptyl přes hlavy zubů
λ	[Sm/mm ²]	Měrná vodivost
λ_{ζ}	[-]	Vodivost přes čela vinutí
λ_4	[-]	Vodivost uzavřené drážky rotoru
λ_{ds}	[-]	Rozptyl přes hlavy zubů
λ_z	[-]	Rozptyl přes hlavy zubů

1 ÚVOD

Asynchronní motor je nejrozšířenějším typem elektromotoru. Někdy se mu říká také indukční, protože pracuje na principu elektromagnetické indukce. Asynchronní motor se skládá z pevné části statoru a pohyblivé části rotoru. Na vnějšku statoru jsou litinová chladicí žebra. Na vnitřku statoru jsou zalisovány plechy. V drážkách zalisovaných statorových plechů je uloženo vinutí z izolovaných vodičů (trojfázové, dvojfázové nebo jednofázové) konce vinutí jsou vyvedena na svorkovnici zapojené do hvězdy nebo do trojúhelníku. Plechy jsou 0,3 - 0,5mm tlusté a izolované lakem nebo chemickou vrstvou. Rotor je složen z rotorových plechů, ty jsou nalisovány na hřídeli, hřídel se otáčí v ložiskách (kluzných, valivých, elektromagnetických), upevněných v ložiskových štítech. V drážkách rotoru je uloženo vinutí nazývané kotva. Mezi statorem a rotorem je vzduchová mezera, která musí být co nejmenší, aby byl co nejmenší magnetický odpor, ale zároveň dost velká na to, aby zajistila spolehlivé otáčení rotoru uvnitř statoru. Větrák je umístěn na zadní straně rotoru a vhání vzduch na chladicí žebra na statoru. Asynchronní stroje se používají jako motory o výkonech v jednotkách wattů až 15 MW. Výjimečně se používají i jako generátory v malých vodních elektrárnách. Odpadají zde potíže s buzením a přifázováním. Mají velmi jednoduchou konstrukci. Nevýhodou je, že potřebují odebírat jalovou energii ze sítě.

1.1 Parametry asynchronních motorů ^[1]

Velké motory jsou vyráběny na napětí 3 nebo 6kV. Pro výkony nad 200kW se hodí napětí 6kV. Parametry běžných motorů platí pro nadmořskou výšku do 1000m a pro teploty do 35°C. Při vyšší teplotě okolí se snižuje výkon motoru. Pro vyšší polohy (nad 1000m) se zmenší výkon na každých 100 m o 1%. Účinnost motoru se mění se zatížením.

1.2 Vinutí asynchronních motorů statoru ^[2]

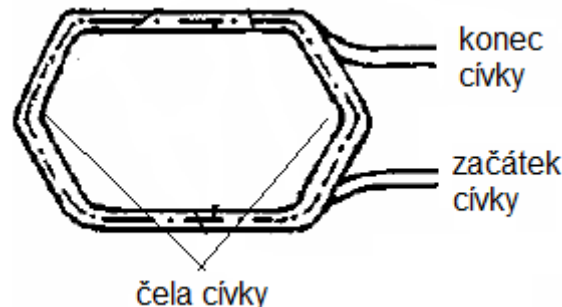
1. Rozložená vinutí (se stejnými cívkami) – čela cívek tvoří věnec. Používá se ho u malých strojů. Vinutí je souměrné a pravidelně rozložené.
 - a) Jednovrstvová vinutí se stejnými cívkami – počet cívek rovná se polovině počtu drážek.
 - b) Dvouvrstvá vinutí se stejnými cívkami – počet cívek rovná se počtu drážek
2. Soustředná vinutí (se stejnými cívkovými skupinami)- lze zhotovit také jako polohové, říká se mu soustředné vinutí se stejnými svazky. Použití je u jednofázových motorů, kde v jedné poloze je vinutí hlavní fáze a v druhé poloze je vinutí rozběhové. Soustředná vinutí mají cívky uspořádány do skupin, mohou to být

¹ JAGER, Vladimír, et al. Elektrotechnika : pro střední průmyslové školy. Praha : SNTL, 1969. 368 s. 04-519-69.

² KNOTEK, Jaroslav . Navíjení a převíjení asynchronních elektromotorků. Praha : SNTL, 1970. 316 s. 04-518-70.

skupiny se dvěma třemi i více cívkami. Cívky skupin se vzájemně na čele nekřížují. Takové vinutí je dražší na výrobu, ale zaručuje motoru delší životnost.

- a) Jednovrstvá vinutí se soustřednými cívkami
- b) Dvouvrstvá vinutí se soustřednými cívkami.



[3]

Obrázek 1.1: Cívka vinutí

1.3 Točivý moment asynchronních motorů

Točivý moment (M) vznikne působením točivého magnetického pole ϕ na proud I_2 indukovaný v rotoru (klec, vinutí) díky rozdílným otáčkám pole n_s a otáčkám rotoru n_n . Rozdíl otáček $n_s - n_n$ je nazýván skluzová rychlost. Největší je při rozběhu motoru a nejmenší po ustálení otáček, lze jej vyjádřit skluzem s .

$$s = \frac{n_s - n_n}{n_n} \cdot 100 [\%] \quad (1.1)$$

Malé stroje mají skluz do 8 % a velké do 1%.

1.4 Rozdělení výkonů, účinnost a účinník [4 5]

Příkon odebíraný motorem P_1 ze sítě je vždy větší jak výkon stroje P . Rozdíl těchto dvou výkonů určuje celkové ztráty stroje.

$$\Delta P = P_1 - P \quad [W] \quad (1.2)$$

Ztráty stroje se skládají ze ztrát Joulových ΔP_{Cu} , které vznikají průchodem proudu ve vinutí statoru případně i ve vinutí rotoru, ztrát v železe ΔP_{Fe} , ztrát mechanických ΔP_{mech} (třením a větráním) a ze ztrát přídavných (dodatečných) ΔP_d (0,5-1% výkonu stroje). Všechny tyto ztráty se přeměňují ve stroji na teplo a stoj tím zahřívají.

Joulové ztráty se skládají ze ztrát ve vinutí statoru ΔP_{j1} a rotoru ΔP_{j2} . Výpočty těchto ztrát jsou dány vztahy

$$\Delta P_{j1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \quad [W] \quad (1.3)$$

kde m_1 je počet fází statorového vinutí, R_1 je odpor fáze přepočítaný na dovolené oteplení podle třídy izolace a I_1 je proud procházející vinutím statoru.

³ ONDRŮŠEK, Čestmír . Elektrické stroje. VUT, 199?. 79 s. Skriptum. VUT.

⁴ JAGER, Vladimír, et al. Elektrotechnika : pro střední průmyslové školy. Praha : SNTL, 1969. 368 s. 04-519-69.

⁵ KNOTEK, Jaroslav. Navíjení a převíjení asynchronních elektromotorků. Praha : SNTL, 1970. 316 s. 04-518-70.

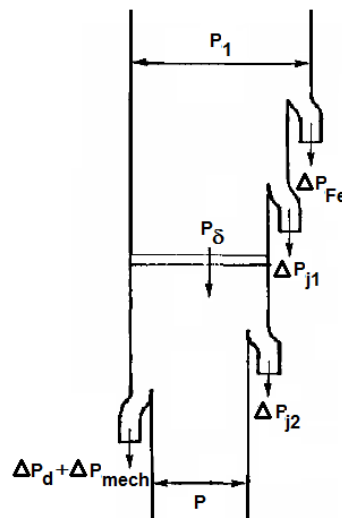
$$\Delta P_{j2} = s \cdot P_{\delta} \quad [W] \quad (1.4)$$

kde P_{δ} je výkon přes vzduchovou mezeru a s je skluz

Výkon přes vzduchovou mezeru se vypočte ze vztahu:

$$P_{\delta} = M \cdot \omega_1 = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{f_1}{p} = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_1 \quad [W] \quad (1.5)$$

kde M je moment stroje, ω_1 - úhlová rychlost magnetického pole statoru, f_1 - kmitočet střídavého proudu, p – počet pólových dvojic, n_1 -otáčky točivého magnetického pole statoru



[6]

Obrázek 1.2: Energetická bilance výkonů a ztrát asynchronního motoru

kde P_1 je příkon ze sítě, ΔP_{Fe} – ztráty v železe, ΔP_{j1} – ztráty v mědi statoru, P_{δ} – Elektromagnetický výkon přes vzduchovou mezeru, ΔP_{j2} – ztráty v mědi, rotoru, ΔP_d – přidavné ztráty, ΔP_{mech} – mechanické ztráty, P - výkon

Účinnost (η) je poměr výkonu P ku příkonu P_p stroje. $\eta = \frac{P}{P_p} \cdot 100 \quad [\%]$ (1.6)

Dodávaný příkon stroji je vždy větší než výkon stroje, proto je účinnost vždy menší než jedna. Účinnost můžeme vynásobit stem, pak dostaneme procentuální účinnost.

Účinník ($\cos\varphi$) – Elektromotor připojený na síť působí indukční zatížení. U tohoto spotřebiče není proud ve fázi s napětím. Mezi proudem a napětím je úhel φ , který se zvětšuje tím více, čím více převládá reaktance indukčního odporu nad činným odporem.

$$\cos\varphi = \frac{P_p}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I} \quad [-] \quad (1.7)$$

kde P_p je příkon stroje, U – napětí sítě, I – proud sítě

Výraz ve jmenovateli je zdánlivý výkon $S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad [V \cdot A]$ (1.8)

⁶ ONDRUŠEK, Čestmír . Elektrické stroje. VUT, 199?. 79 s. Skriptum. VUT.

1.5 Regulace otáček asynchronního motoru

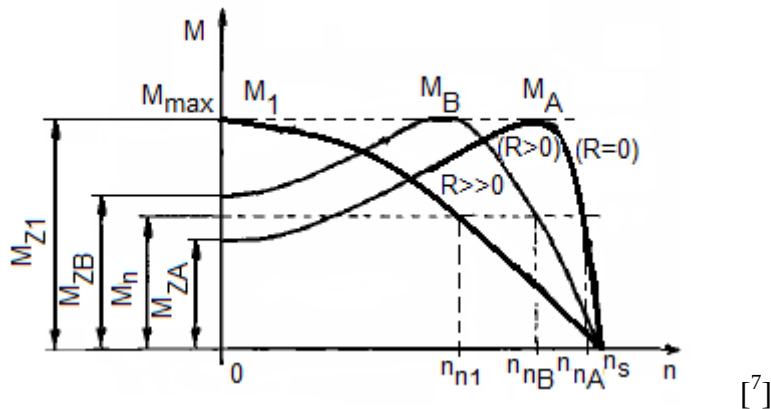
Rychlost otáčení asynchronního motoru je dána vztahem:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \cdot (1 - s) \quad [\text{min}^{-1}] \quad (1.9)$$

kde f je frekvence, p – počet pólových dvojic (2 pólový stroj má $2p=2 \rightarrow p=1$) a s je skluz

Rychlost indukčního motoru řídíme:

- Změnou frekvence (kmitočtu) pomocí měničů v rozsahu 0-400Hz $\rightarrow$ lze dosáhnout vyšších otáček než 3000 ot/min (při běžném napájení ze sítě 50Hz). Použití je tedy u rychloběžných pohonů, výhodou je hospodárné řízení. (plynulá regulace)
- Změnou počtu pólů- s možností přepínání např.: 8 $\rightarrow$ 4 $\rightarrow$ 2 ($p=4, 2, 1$). (skoková regulace)
- Změnou skluzu - Realizuje se zapojením odporového regulátoru (spouštěče) do obvodu rotoru. Změnou skluzu lze řídit rychlost jen u kroužkových motorů. Výhodou je jednoduchost řízení, nevýhodou pak ztráta energie na rezistorech, které se mění v teplo a zhoršuje účinnost. (plynulá regulace)



Obrázek 1.3: Momentová charakteristika asynchronního motoru při různé velikosti odporu v rotoru:

kde n_s je synchronní rychlost, $n_{nA,B,1}$ - jmenovité otáčky, $M_{zA, zB}$ – záběrové momenty (při zapnutí), M_n – jmenovitý moment, M_{max} – maximální moment, R – odpor vinutí rotoru

Z grafů je vidět že s rostoucím R rotoru roste záběrový moment M_z a klesají otáčky n_{n1nBnA} .

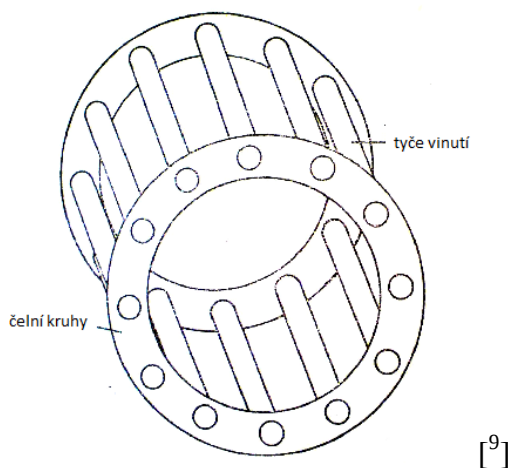
⁷ JAGER, Vladimír, et al. Elektrotechnika : pro střední průmyslové školy. Praha : SNTL, 1969. 368 s. 04-519-69.

1.6 Asynchronní trojfázový motor

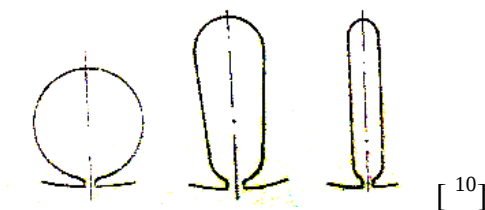
1.6.1 Rozdělení trojfázových asynchronních motorů podle rotorů ^[8]

a) S kotvou na krátko “klecové vinutí“

Motor nakrátko je válec složený z dynamových plechů, jehož vinutí je vyrobeno z tyčí, které jsou uloženy v neizolovaných drážkách rotoru a po obou stranách jsou spojeny čelními kryty. U velkých motorů se tyče do kruhů přivažují, u menších se kruhy s tyčemi spájejí cínovou pájkou. Další způsob výroby těchto rotorů je odléváním z hliníku přímo do drážek rotoru. Na obrázku (1.4) je znázorněno klecové vinutí s čelními kruhy a různé tvary používaných drážek (1.5). Výhodou motorů je, že mají malý odpor rotorové klece a tím mají malý skluz a dobrou účinnost, ale zároveň malý záběrový moment a velký záběrný proud na začátku rozběhu.



Obrázek 1.4: Klecové vinutí



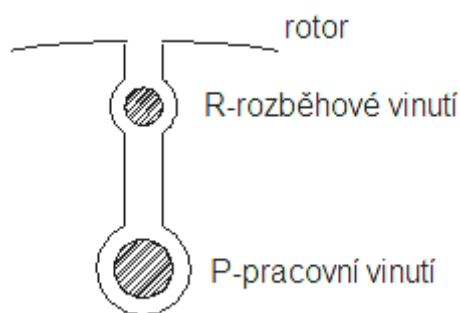
Obrázek 1.5: Tvary drážek

⁸ KNOTEK, Jaroslav. Navíjení a převíjení asynchronních elektromotorků. Praha : SNTL, 1970. 316 s. 04-518-70.

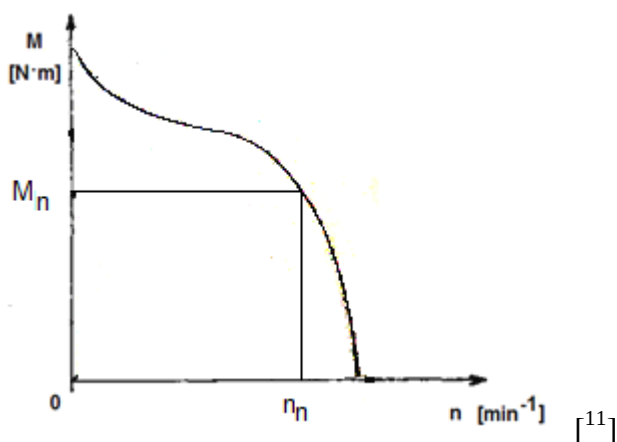
^{9, 10} KNOTEK, Jaroslav. Navíjení a převíjení asynchronních elektromotorků. Praha : SNTL, 1970. 316 s. 04-518-70.

b) Motor s dvojitou klecí

Na rotoru jsou pod sebou dvě samostatné klece. Rozběhové vinutí zhotovené z tenkých tyčí (mosazných) je uloženo v drážkách blízko povrchu rotoru. Pracovní vinutí je naopak zhotovené z tlustých tyčí (měděných) a je uloženo dále od povrchu rotoru. Pracovní klec má malý činný odpor a velkou reaktanci u rozběhového vinutí to je naopak. Po připojení k síti se v rotoru indukuje napětí s plným kmitočtem sítě (50 Hz) a pracovní klec má mnohem větší reaktanci než klec rozběhová. Proud prochází tedy rozběhovou klecí a motor se rozbíhá s velkým záběrným momentem. Při normálním chodu je kmitočet proudu menší a vliv reaktancí je zanedbatelný. Proud rotoru se rozdělí v nepřímém poměru odporů obou klecí. Běhovou klecí teče tedy převážná část proudu a účinník a účinnost jsou při jmenovitém zatížení o trochu horší než u běžných motorů nakrátko.



Obrázek 1.6: Schematické znázornění dvojité klece



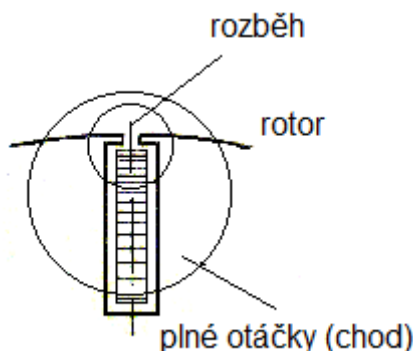
Obrázek 1.7: Momentová charakteristika motoru s dvojitou klecí:

kde M_n je jmenovitý moment a n_n jmenovité otáčky

¹¹ JAGER, Vladimír, et al. Elektrotechnika : pro střední průmyslové školy. Praha : SNTL, 1969. 368 s. 04-519-69.

c) Motor s vírovou klecí

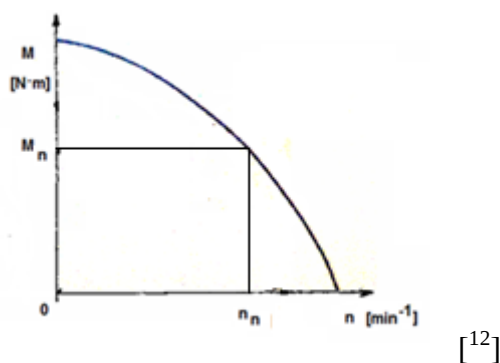
Tyče jsou uloženy v tenkých hlubokých drážkách. V drážkách jsou zasunuty dlouhé úzké tyče rotorového vinutí, které jsou spojeny kruhy nakrátko. Tyče (řada tenkých vodičů) jsou spojeny paralelně. Mají stejný odpor. Čím jsou zasunuty hlouběji v drážce, tím mají větší rozptylovou indukčnost. Při rozběhu je rozptylová reaktance dolních vodičů větší, tedy proud je vytlačen do horní části vodičů, což odpovídá snížení efektivního průřezu vodiče a tudíž zvětšení jeho odporu. Při normálním chodu protéká proud celou délkou vodičů. Vírové klece mají drážky různého tvaru.



Obrázek 1.8: Tyč vírové klece

d) Motor s odporovou klecí

Materiál klece není z mědi, ale z mosazi. Mosaz má větší odpor a tím dosahují tyto motory většího záběrového momentu. Motor má horší účinnost a větší skluz. Používají se hlavně tam, kde motor musí spolupracovat se setrvačником (jeřáby, zdviže).



Obrázek 1.9: Momentová charakteristika motoru s odporovou klecí

kde M_n je jmenovitý moment a n_n jmenovité otáčky

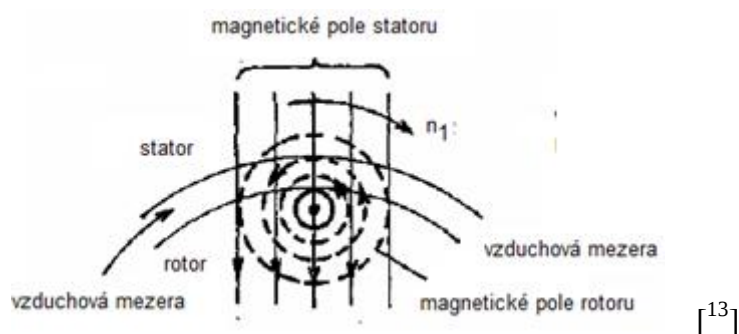
¹² JAGER, Vladimír, et al. Elektrotechnika : pro střední průmyslové školy. Praha : SNTL, 1969. 368 s. 04-519-69.

- e) S vinutím s vyvedenými konci na kroužky “kroužkový motor”

Výhodou je dobrý záběrový moment (1,5 až 2,5 násobek jmenovitého momentu). Nevýhodou je větší poruchovost, dražší náklady na výrobu, údržba kroužků, kartáčů a držáků. Vinutí rotoru je složeno z izolovaných vodičů uložených v izolovaných drážkách. Provedení vinutí rotoru je stejné jako vinutí statoru, kruhovým nebo tvarovým vodičem, zhotovuje se v jedné nebo ve dvou vrstvách nebo ve dvou, třech polohách. Konec rotorového vinutí se připojuje ke sběracím kroužkům a proud se z nich odvádí kartáči do odporového spouštěče.

1.6.2 Princip činnosti trojfázového asynchronního motoru

Po připojení motoru k elektrické síti začne trojfázový proud budit ve statorovém vinutí točivé magnetické pole díky vzájemně posunutým cívkám o 120° . Magnetické točivé pole protíná vodiče rotoru. Ve vodičích se indukují napětí a protéká jím proud, který vytváří magnetické pole rotoru. Točivé magnetické pole statoru působí silou na vodiče rotoru, kterými protéká proud a tím se rotor roztočí ve směru působení magnetického pole statoru. Napětí a proud se budou indukovat ve vodičích rotoru pouze v případě vzájemného pohybu magnetického pole statoru a rotoru. Z toho důvodu nemůžou být otáčky magnetického pole statoru a rotoru stejné. Rotor se za magnetickým polem statoru zpožďuje o takzvaný skluz s.



Obrázek 1.10: Princip činnosti asynchronního motoru

¹³ ONDRUŠEK, Čestmír . Elektrické stroje. VUT, 199?. 79 s. Skriptum. VUT.

1.6.3 Spouštění trojfázových asynchronních motorů [¹⁴ ¹⁵]

Motory s kotvou nakrátko mají záběrový proud až šestkrát větší než je jmenovitý proud motoru. Aby nepřekročil určitou velikost a nezpůsobil v elektrických sítích větší pokles napětí, smí se přímo spouštět motory na síť do 3kW. Motory o větším výkonu lze na síť připojovat pomocí vhodných spouštěčů. Pro snížení nákladů na spouštěcí zařízení, jednoduchost obsluhy, omezení záběrného proudu a zvětšení záběrného momentu motoru se používají různé způsoby spouštění asynchronních motorů.

A. Spouštění motorů s kotvou nakrátko

1. Přímé připojení k napájecí síti

Na síť lze přímo připojit motory se spouštěcím příkonem 22kVA po dohodě s energetickým podnikem až 42kVA. U běžných motorů odpovídá spouštěcímu příkonu výkon asi 3kW. V sítích o napětí 380V nesmí záběrový proud překročit

$$I_z = \frac{P_p}{U} = \frac{22000}{\sqrt{3} \cdot 380} = 33,4 \text{ A} \quad (1.10)$$

kde I_z je záběrný proud, P_p – spouštěcí příkon motoru [VA], U – napájecí napětí ze sítě

V průmyslových závodech, které jsou napájeny ze samostatného transformátoru lze přímo připojit motor s kotvou nakrátko, jehož jmenovitý výkon není větší než 50% jmenovitého výkonu transformátoru.

2. Spouštění sníženým napětím na statoru

Při snížení napětí na statoru se snižuje záběrný proud, ale i záběrový moment. Existují různé způsoby snížení napětí na statoru:

a) Spouštění statorovým spouštěčem

Do série se statorovým vinutím je zapojen trojfázový symetrický spouštěcí odpor (u motorů menších výkonů) nebo tlumivka (u větších). Při rozběhu se odpory postupně vyřazují a motor je poté plně zapojen na plné napětí.

b) Spouštění pomocí autotransformátoru

Funguje podobně jako předešlé spouštění s tím rozdílem, že velikost napětí při spouštění se reguluje autotransformatorem zapojeným do série se statorovým vinutím. Po rozběhu je autotransformátor vyřazen.

¹⁴JAGER, Vladimír, et al. Elektrotechnika : pro střední průmyslové školy. Praha : SNTL, 1969. 368 s. 04-519-69.

¹⁵ KNOTEK, Jaroslav. Navíjení a převíjení asynchronních elektromotorků. Praha : SNTL, 1970. 316 s. 04-518-70.

c) Spuštění pomocí přepínače hvězda-trojúhelník

Motor je při normálním chodu spojen do trojúhelníku. Při rozběhu (spouštění) motoru je satorové vinutí spojeno do hvězdy. Spouštěcí proud pak je:

$$I_y = \frac{U_f}{Z} = \frac{U_s}{\sqrt{3} \cdot Z} \quad (1.11)$$

kde Z je impedance jedné fáze motoru, U_f je fázové napětí a U_s sdružené napětí. Při spouštění satorové vinutí spojeného do trojúhelníku by byl spouštěcí proud:

$$I_D = \sqrt{3} I_f = \sqrt{3} \frac{U_s}{Z} \quad (1.12)$$

kde Z je impedance jedné fáze motoru, I_f je fázový proud a U_s je sdružené napětí. Poměrem spouštěcího proudu do hvězdy a spouštěcího proudu do trojúhelníku dostaneme:

$$\frac{I_y}{I_D} = \frac{\frac{U_s}{\sqrt{3} \cdot Z}}{\frac{U_s}{Z} \cdot \sqrt{3}} = \frac{1}{3} ; \quad I_y = \frac{I_D}{3} \quad (1.13)$$

Proudy i momenty při zapojení vinutí do hvězdy jsou během spouštění v celém rozsahu třikrát menší, než při spojení vinutí do trojúhelníku. Při přepínání z hvězdy do trojúhelníku musí mít motor určitou rychlost otáčení, aby nový proudový náraz nepřekročil záběrný proud při zapojení do hvězdy. Motor se přepíná, když přestane zrychlovat.

d) Spouštění pomocí polovodičového regulátoru napětí

Ke spouštění se používá tyristorových regulátorů střídavého napětí. Lze s ním dosáhnout měkkého rozběhu a vhodnou regulací napětí i zlepšení účinnosti motoru.

3. Spouštění pomocí zvláštní konstrukce kotvy nakrátko.

Toto zapojení použijeme, když potřebujeme záběrný moment větší než má motor s běžnou klecí, hledisko snížení nárazového proudu je druhotné.

- a) Motor s odporovou klecí
- b) Motor s dvojitou klecí
- c) Motor s vírovou klecí

4. Spouštění změnou počtu pólů (jen u vícepólových strojů s vyvedenými konci všech cívek). Jedná se o bezztrátový způsob spouštění.

5. Spouštění pomocí rozběhové spojky

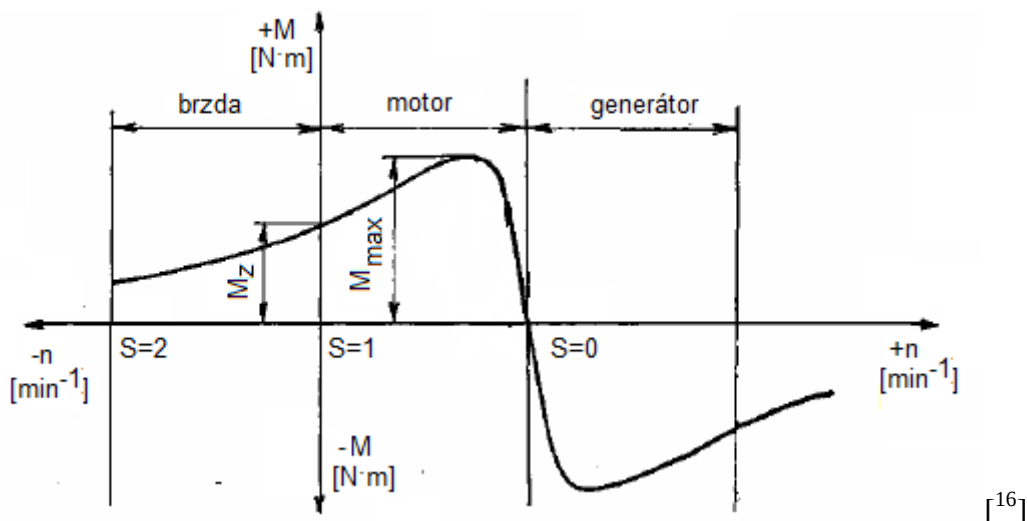
Jde o rozběhnutí motoru zcela odlehčeného. Rozběhová spojka zapíná, až když motor dosáhne plné rychlosti.

B. Spouštění kroužkového motoru

Motory jsou spouštěny rotorovým spouštěčem, kterým se zvětšuje odpor rotorového obvodu. Motory zabírají i s největším momentem při vhodném záběrném proudu. Trojfázové vinutí rotoru je vyvedeno ke třem kroužkům s kartáči. Z kartáčů se odvádí proud do trojfázového

rotorového spouštěče, který je tvořen třemi stejně velkými odpory. Stator se připojí na síť s plně zařazenými odpory spouštěče, které se postupně při rozběhu motoru vyřazují. U větších motorů existuje odklápeč kartáčů, jímž se po dokončení rozběhu kroužky spojí nakrátko, čím se vyloučí přechodové odpory na kartáčích a odpory ke spouštěči. Nakonec se nadzvednou kartáče, aby se zbytečně neopotřebovávaly.

1.7 Momentová charakteristika trojfázového asynchronního motoru



Obrázek 1.11: Momentová charakteristika trojfázového asynchronního motoru

kde M_z je záporný moment, M_{max} – maximální moment, s -skluz, n - otáčky

Zvýší-li se otáčky do nadsynchronní oblasti pracuje motor jako generátor. Dodává do sítě energii. (malé vodní elektrárny).

1.8 Jednofázový asynchronní motor

1.8.1 Jednofázový asynchronní motor s pomocnou fází [17 18 19]

Vzhledově se od trojfázového motoru s kotvou nakrátko téměř neliší. Liší se pouze vinutím statoru, které je zhotoveno jako dvě samostatná vinutí. Vinutí pracovní, které vytváří jmenovitý moment při zatížení a vinutí rozběhové (pomocná fáze), které nám roztočí motor z klidu určeným směrem. Smysl otáčení je dán záměnnou vývodu z pomocné fáze nebo hlavního vinutí. Používají se pro elektrické pohony malých výkonů (do 2kW), hlavně u neregulovaných pohonů domácích spotřebičů (ledničky, sekačky, v dřívější době i pračky).

¹⁶ ONDRŮŠEK, Čestmír. Elektrické stroje. VUT, 199?. 79 s. Skriptum. VUT.

¹⁷ KNOTEK, Jaroslav. Navíjení a převíjení asynchronních elektromotorků. Praha : SNTL, 1970. 316 s. 04-518-70.

¹⁸ http://cs.wikipedia.org/wiki/Asynchronní_motor

¹⁹ http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=40420

1.8.2 Princip činnosti jednofázového asynchronního motoru ^[20]

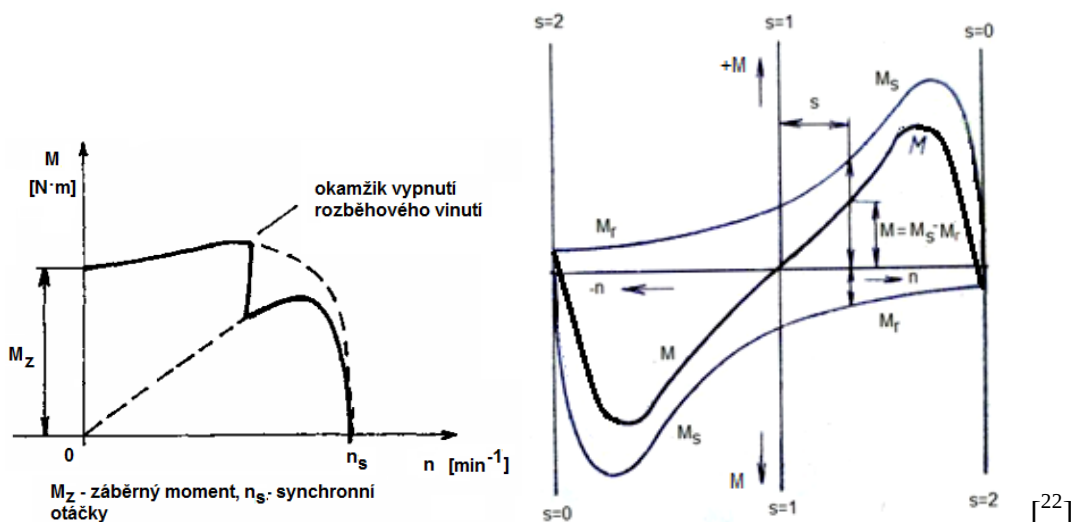
V jednofázovém statorovém vinutí vytváří střídavý proud pulsující magnetický tok Φ_1 , který do rotoru, jenž je v klidu, indukuje transformační napětí a ve vodičích klece rotoru spojených na krátko začne protékat velký proud, který vybudí magnetický tok Φ_2 opačného směru než je magnetický tok Φ_1 . Jelikož magnetické toky Φ_1 a Φ_2 mezi sebou svírají úhel 180° nevznikne na rotoru točivý moment a proto se motor z klidu sám nerozběhne. Pootočíme-li motorem v kterémkoli směru. V rotoru se začne indukovat pohybové napětí, které se začne skládat s transformačním napětím ve výsledné napětí. Proud rotoru, pak vybudí magnetický tok, který s magnetickým tokem statoru svírá úhel menší než 180° vznikne tedy točivý moment a motor se rozběhne ve směru pootočení.

1.8.3 Rychlost otáčení jednofázového asynchronního motoru.

Rychlost otáčení závisí jako u trojfázového indukčního motoru na skluzu, kmitočtu a počtu pólů stroje.

1.8.4 Moment jednofázového asynchronního motoru ^[21]

Na rotor působí proti sobě dva točivé momenty a to moment souběžný M_s a protiběžný M_r . Výsledný moment M je dán rozdílem obou momentů. Je-li rotor v klidu ($s=1$) je výsledný moment nulový, protože se oba momenty navzájem ruší. Protiběžný moment brzdí tím méně, čím větší rychlost má rotor. Výsledný moment se zvětšuje z klidu na obě strany, takže motor se otáčí v tom směru, ve kterém dostal počáteční impuls.



Obrázek 1.12: Momentová charakteristika rozběhu jednofázového asynchronního motoru

Obrázek 1.13: Momentová charakteristika jednofázového asynchronního motoru

²⁰ JAGER, Vladimír, et al. Elektrotechnika : pro střední průmyslové školy. Praha : SNTL, 1969. 368 s. 04-519-69.

²¹ JAGER, Vladimír, et al. Elektrotechnika : pro střední průmyslové školy. Praha : SNTL, 1969. 368 s. 04-519-69.

²² JAGER, Vladimír, et al. Elektrotechnika : pro střední průmyslové školy. Praha : SNTL, 1969. 368 s. 04-519-69.

1.9 Způsoby získávání záběrového momentu

Pro vznik momentu je nutné zajistit vytvoření točivého magnetického pole statoru, to lze zajistit pomocnou fází odporovou, kapacitní nebo induktivní. Zařazením jednoho z těchto charakterů vznikne fázový posuv mezi hlavní a pomocnou fází. Další možnosti získání záběrového momentu jsou motorky se stíněnými póly a zapojením trojfázového motoru jako jednofázového.

1.9.1 Trojfázový motor zapojený jako jednofázový. ^[23]

Při běžném chodu trojfázového asynchronního motoru se při odpojení jedné, nebo dvou fází, motor bude i nadále točit, ale s menším výkonem (asi o 20%). Motor se sám však z klidu neroztočí. Aby se motor mohl sám rozběhnout, připojuje se pomocný rozběhový kondenzátor do odpojené fáze motoru. Kapacitu kondenzátoru pro zapojený do hvězdy vypočteme ze vztahu

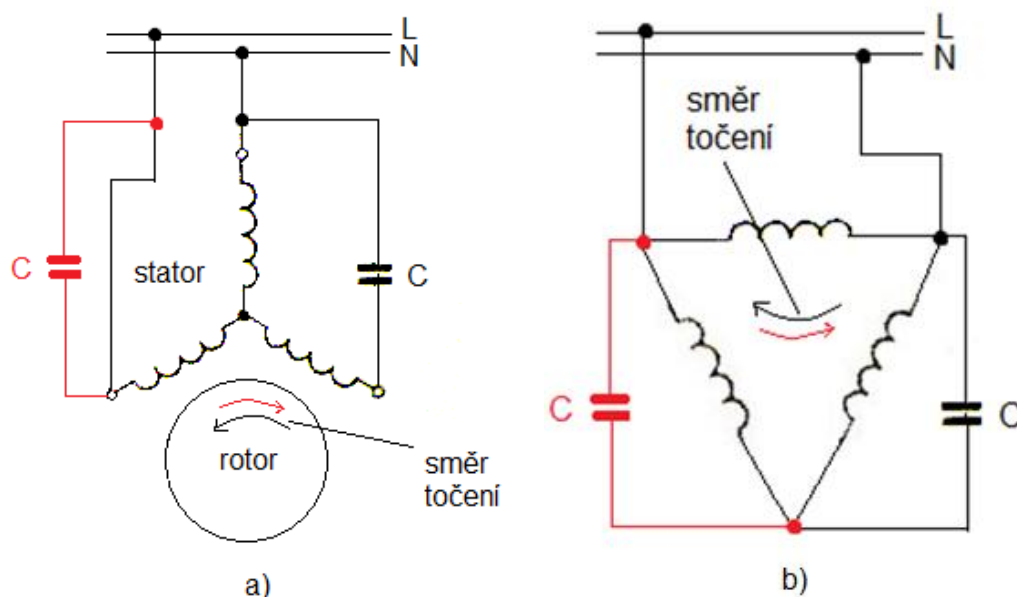
$$C = \frac{3180}{U} \cdot I_f \quad (1.14)$$

kde U je napětí sítě a I_f proud ve fázi.

Pro zapojení do trojúhelníka platí vzorec:
$$C = \frac{3180}{U} \cdot I_s \quad (1.15)$$

kde I_s je sdružený proud a U je napětí sítě.

Na 1kW výkonu motoru je třeba kapacita kondenzátoru asi 70μF při napětí 230V. Chceme-li zvětšit záběrný moment motoru, připojíme paralelně kondenzátor 50 až 200μF ke kondenzátoru rozběhovému. Tento kondenzátor bývá po rozběhu odpojen.



Obrázek 1.14: Zapojení trojfázového asynchronního motoru s připojeným kondenzátorem na jednofázovou síť v zapojení: a) do hvězdy b) do trojúhelníku.

²³ KNOTEK, Jaroslav. Navíjení a převíjení asynchronních elektromotorků. Praha : SNTL, 1970. 316 s. 04-518-70.

1.9.2 Konstrukce a rozdělení jednofázových motorů s pomocnou fází

Jednofázové asynchronní motory s pomocnou fází odporovou nebo kondenzátorovou mají vždy dvoufázové vinutí. Pomocnou fází a hlavním vinutím statoru se z jednofázové přípojky budí fázově navzájem posunutými proudy dvě vzájemně posunutá střídavá magnetická pole, která dávají výsledné točivé magnetické pole. Posunutí proudu v pomocné fázi dosáhneme zapojením činného odporu (odporový drát), tlumivky nebo kondenzátoru do obvodu pomocné fáze. Hlavní vinutí je dimenzováno na trvalé zatížení a je uloženo ve 2/3 všech drážek statoru. Vinutí pomocné rozběhové fáze vyplňuje zbývající třetinu drážek statoru a je dimenzováno pouze pro krátkodobé zatížení. Je obvykle navinuto tenčím vodičem a po rozběhnutí je odpojeno ručně nebo samočinným odstředivým, nebo elektromagnetickým vypínačem.

Rozdělení jednofázových asynchronních motorů:

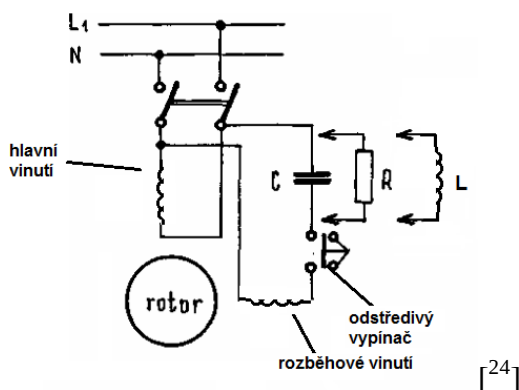
a) Motory s pomocnou (rozběhovou) fází odporovou

Vinutí pomocné fáze mívají z mosazných nebo i železných izolovaných vodičů, někdy se také používá nikelin nebo cekas. Tyto motory mívají záběrný moment stejný jako moment jmenovitý. Záběrný proud je však sedminásobkem až desetinásobkem jmenovitého proudu.

b) Motory s pomocnou (rozběhovou) fází kondenzátorovou mají rozběhové momenty lepší. Při rozběhu lze dosáhnout až čtyřnásobku jmenovitého momentu. K rozběhu se používá bipolárních elektrolytických kondenzátorů. Použití normálních elektrolytických kondenzátorů lze jedině při spojení dvou stejných kondenzátorů stejnými póly proti sobě. Jsou náchylné na přetížení, proto je lze použít jen při krátkodobém zapínání.

c) Motory s pomocnou (rozběhovou) fází tlumivkovou

Zařazením tlumivky do pomocné fáze dojde významně ke zhoršení účinníku. Tudíž se toto spojení moc nepoužívá. Oproti motorům s pomocnou fází odporovou, ale mají proud v pomocné fázi víc posunut než proud ve vinutí hlavním.



Obrázek 1.15: Zapojení jednofázového asynchronního motoru

²⁴ ONDRUŠEK, Čestmír. Elektrické stroje. VUT, 199?. 79 s. Skriptum. VUT.

1.9.3 Jednofázové motorky se stíněnými póly [25]

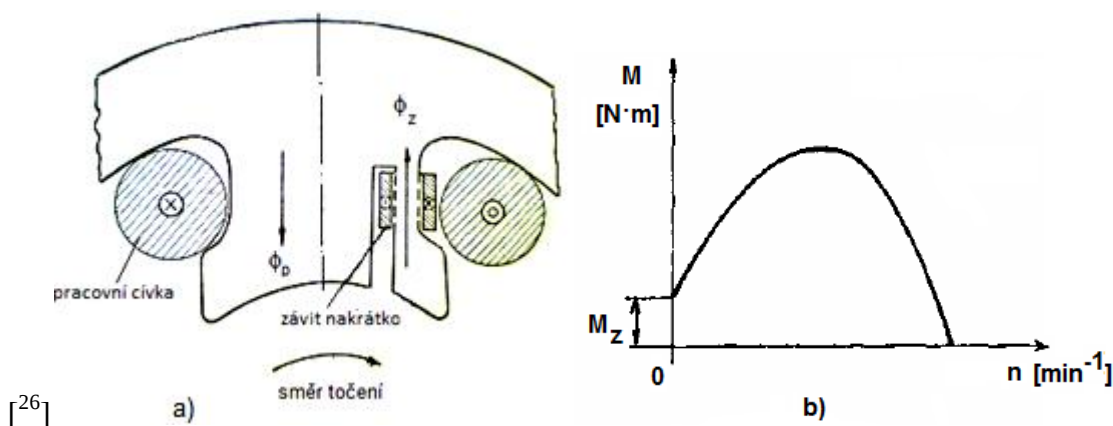
Nejjednodušší a v provozu nejspolehlivější motorek jen pro výkony, asi do 100W. Používá se pro jednoduché pohony (šlehače, ventilátory), tam kde stačí malý záběrový moment (asi 25% momentu jmenovitého) a kde nevádí malá účinnost ($\eta=0,1$ až $0,2$), malý účinník ($\cos\varphi=0,6$) a jeho velká teplota. V dnešní době se používá jako levný servomotor. Motor pro toto použití má však upravený magnetický obvod a závit nakrátko je nahrazen řídicím vinutím, umožňuje i reverzaci otáček.

1.9.3.1 Konstrukce

Rotor má obvykle provedení klecové a jeho drážky bývají natočeny o jednu drážkovou rozteč, aby se dosáhlo rozběhu z jakékoliv polohy rotoru. Statorové vinutí není uloženo v drážkách, ale na vyniklých pólech. Stínění části pólu je provedeno nesouměrným zářezem, v němž je uložen závit z měděného pásku spojený nakrátko.

1.9.3.2 Princip funkce jednofázového asynchronního motorku se stíněným pólem

Statorovým proudem se budí hlavní magnetický tok Φ_p , který indukuje v závitě proud opačného smyslu, než má proud ve statorovém vinutí. Proud v závitě budí v části pólu magnetický tok Φ_z , který směřuje proti hlavnímu toku pólu. Toky se liší navzájem polohou i časem a tím dostane rotor impuls k roztočení. Motor se otáčí jen v jednom směru.



Obrázek 1.16: a) Funkce stíněného pólu

Obrázek 1.17: b) Momentová charakteristika motoru se stíněným pólem

²⁵ KNOTEK, Jaroslav. Navíjení a převíjení asynchronních elektromotorků. Praha : SNTL, 1970. 316 s. 04-518-70.

²⁶ KNOTEK, Jaroslav. Navíjení a převíjení asynchronních elektromotorků. Praha : SNTL, 1970. 316 s. 04-518-70.

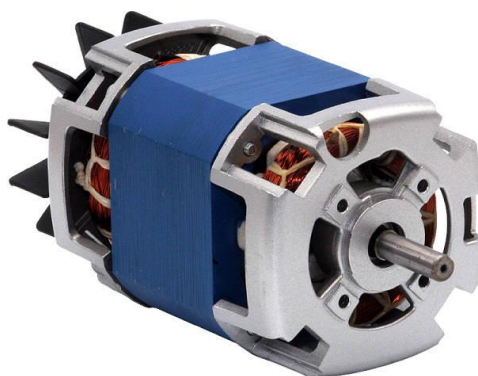
1.10 Srovnání trojfázového a jednofázového asynchronního motoru

Trojfázový asynchronní motor je konstrukčně jednodušší, než jednofázový, který musí mít k rozběhu pomocnou fázi. Má jinak rozložené vinutí ve statoru než jednofázový. Jednofázové motory mají menší účinnost, účinník a hlavně menší výkon.

2 ANALÝZA JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU

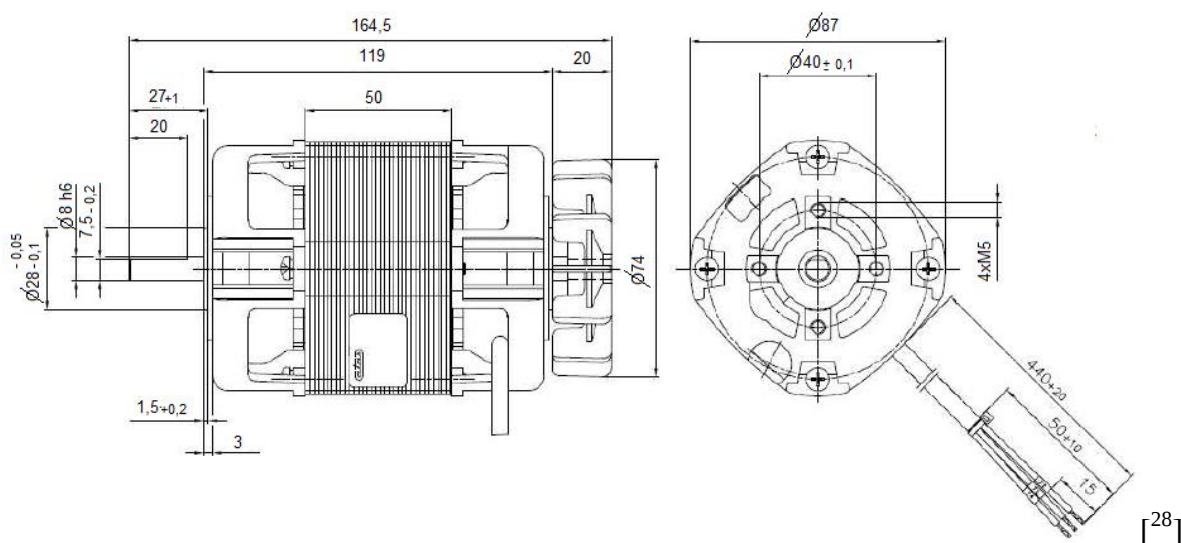
Pro analýzu byl vybrán jednofázový asynchronní motor s trvale připojeným kondenzátorem FCJ4C82A. Výrobce motoru je firma Atas Náchod.

Parametry motoru: $U = 230V$, $P = 105W$, $n = 2740 \text{ min}^{-1}$, $I = 0,79A$, kondenzátor $5\mu F/400V$, hmotnost $2,1 \text{ kg}$, krytí IP 00



[27]

Obrázek 2.1: Jednofázový asynchronní motor FCJ4C82A



[28]

Obrázek 2.2: Rozměry jednofázového asynchronního motoru FCJ4C82A

²⁷ <http://www.atas.cz/products.php?sekce=2&menuid=13&lng=cz>

²⁸ <http://www.atas.cz/files/FCJ4C82A.pdf>

2.1 Výpočet jednofázového asynchronního motoru FCJ4C82A

[²⁹ ³⁰ ³¹ ³² ³³ ³⁴ ³⁵]

Návrh motoru je prováděn podle jmenovitých hodnot již běžně vyráběného motoru (FCJ4C82A) firmou Atas Náhod. Postup výpočtu jednofázového asynchronního motoru je vytvořen kombinací metod návrhů motorů různých autorů z jejich odborných literatur a to především z publikace Dr. Jaroslava Štěpiny- Jednofázové indukční motory.

2.1.1 Výpočet hlavních rozměrů železa

Při výrobě jednofázových asynchronních motorů se obvykle používá stejných statorů a rotorů jako při výrobě třífázových asynchronních motorů. Z tohoto důvodu je jednodušší spočítat rozměry železa pro trojfázový motor, kde výkon P je α krát větší. Výpočet rozměrů železa jednofázového motoru bude tedy prováděn jako pro trojfázový motor o následujícím výkonu:

$$P_3 = \frac{1}{\gamma} \cdot P = \frac{1}{0,95} \cdot 105 = 111W \quad (2.1)$$

kde γ je využití stroje volené v rozmezí 0,85 až 1 pro motory s trvale připojeným kondenzátorem. Moje volba 0,95 a P je výkon jednofázového stroje FCJ4C82A.

Činitel α_c se vypočte jako převrácená hodnota využití stroje γ

$$\alpha_c = \frac{1}{\gamma} = \frac{1}{0,95} = 1,05 \quad (2.2)$$

²⁹ ŠEVČÍK, Pavel. Výpočet jednofázového asynchronního motoru. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 80 s.

³⁰ ŠTĚPINA, Jaroslav. Jednofázové indukční motory. Praha : SNTL, 1957. 200s

³¹ SCHLESINGER, P. Návrh jednofázového asynchronního motoru s pomocnou fází. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 43 s.

³² VÁCHA, Pavel. Výpočet jednofázového asynchronního motoru. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 74s

³³ KOTAL, Miroslav; NOVOTNÝ, Petr; VOŽENÍLEK, Petr. Příklady výpočtu elektrických strojů točivých. první. Praha 1, Husova 5 : ČVUT, 1974. 140 s.

³⁴ CIGÁNEK, Ladislav. Stavba elektrických strojů. Praha : SNTL, 1958. 714 s.

³⁵ SVOREŇ, J. Návrh a analýza třífázového asynchronního motoru. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 55 s.

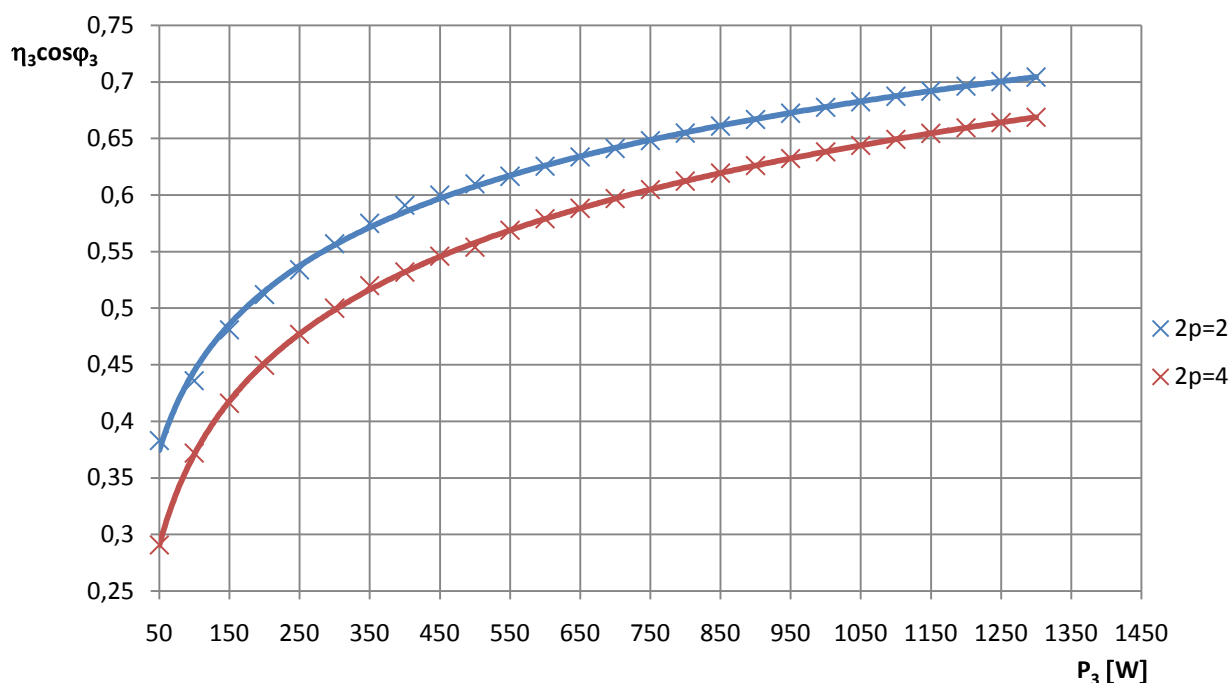
Zdánlivý příkon trojfázového asynchronního motoru se stejnými rozměry se vypočte ze vztahu:

$$S_3 = \frac{\alpha_c \cdot P}{\cos \varphi_3 \eta_3} = \frac{1,05 \cdot 105}{0,452} = 244 \text{ VA} \quad (2.3)$$

kde α_c je převrácená hodnota využití stroje γ , P je výkon jednofázového stroje FCJ4C82A a $\cos \varphi_3 \eta_3$ je odečtena z grafu na obrázku 2.3, pro výkon třífázového stroje 111 W a počet pólových dvojic, které lze určit ze vztahu:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \rightarrow p = \frac{60 \cdot f}{n_s} = \frac{60 \cdot 50}{3000} = 1 \rightarrow 2p = 2 \quad (2.4)$$

kde n_s jsou synchronní otáčky, f je kmitočet sítě a p je počet pólových dvojic



Obrázek 2.3 Součin účinnosti a účinku pro trojfázové motory

Máme-li zdánlivý výkon trojfázového stroje, můžeme vypočíst hlavní rozměry železa, vyjdeme ze vztahu:

$$d^2 l = \frac{8,6 \cdot (1 - \varepsilon_1) \cdot S_3 \cdot 10^4}{B_\delta \cdot A \cdot x_1 \cdot n_s} \quad (2.5)$$

kde ε_1 je poměrný úbytek napětí na rozptylové reaktanci a činném odporu statoru, S_3 je zdánlivý výkon trojfázového motoru, B_δ je maximální indukce ve vzduchové mezeře, A je proudové zatížení obvodu statoru, x_1 je činitel vinutí statoru, n_s jsou synchronní otáčky, d je vtání statoru a l délka statorového železa.

U dvojpólových a čtyřpólových strojů lze zkrátit ε_1 a x_1 , protože jsou si rovny. Proudové zatížení A obvodu statoru se volí v rozmezí 120-200 A/cm a maximální indukce (B_δ) ve

vzduchové mezeře se volí v rozsahu 0,5 - 0,6 T. Moje volba A je 155 A/cm a volba indukce B_δ je 0,54T. Po úpravách a dosazení dostaneme hodnotu:

$$d^2 l = \frac{8,6 \cdot 10^4}{B_\delta \cdot A} \cdot \frac{S_3}{n_s} = \frac{8,6 \cdot 10^4}{0,54 \cdot 155} \cdot \frac{244}{3000} = 83,57 \text{ cm}^3 \quad (2.6)$$

Essonská výkonová konstanta se vypočte ze vztahu:

$$C_e = \frac{8,6 \cdot 10^4}{B_\delta \cdot A} = \frac{8,6 \cdot 10^4}{0,54 \cdot 155} = 1027,48 \quad (2.7)$$

Jde o měrný výkon stroje, kde elektrické využití je dáno obvodovou proudovou hustotou A a magnetické využití je dáno magnetickou indukcí ve vzduchové mezeře B_δ .

Při volbě $d=l$, je pak d:

$$d^2 d = 83,57 \text{ cm}^3 \rightarrow d = \sqrt[3]{83,57} = 4,4 \text{ cm} = 44 \text{ mm} \quad (2.8)$$

Průměr vrtání statoru je tedy 44mm.

U dvoupólových a u čtyřpólových strojů přibližně platí poměr vnějšího průměru d_{1s} statorových plechů k vrtání statoru:

$$\frac{d}{d_{1s}} = k_s \approx 0,5 \text{ u } 2p = 2 \text{ a } \approx 0,6 \text{ u } 2p = 4 \quad (2.9)$$

potom předběžný výpočet vnějšího průměru statoru je:

$$d_{1s} = \frac{d}{k_s} = \frac{44}{0,5} = 88 \text{ mm} \quad (2.10)$$

Poměr délky železa l k pólové rozteči τ , značíme λ :

$$\tau = \frac{\pi \cdot d}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot 44}{2 \cdot 1} = 69,12 \text{ mm} \quad \text{a } \lambda \text{ je tedy:} \quad (2.11)$$

$$\lambda = \frac{l}{\tau} = \frac{44}{69,12} = 0,64 \quad (2.12)$$

Vypočtený poměr délky železa k pólové rozteči (0,64) odpovídá běžným hodnotám u dvoupólových strojů (0,6-1).

2.1.2 Výpočet hlavního vinutí statoru

Firma ATAS Náchod používá pro tento stroj 12 drážek na statoru (Q_{cs}) z toho 6 drážek pro hlavní vinutí (Q_h) a 6 drážek pro pomocné vinutí (Q_p). Na rotoru je použito 16 drážek (Q_{cr}). Některé další volby používaných drážek jsou v tabulce 2.1

2p	Q_{cs}	Q_{cr}	Poznámka
2; 4	24	30	drážky natočeny pro Q_{cr}
2	18	30	
4; 6; 8	36	48	
2; 4; 8	24	36	
4	32	26	
2	24	18	

Tabulka 2.1 Používané počty drážek

Činitel hlavního vinutí:

$$\chi_A = \frac{\sin q \frac{\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin 3 \frac{30^\circ}{2}}{3 \sin \frac{30^\circ}{2}} = 0,91 \quad (2.13)$$

kde q je počet drážek hlavního vinutí na pól a fázi

vypočte se ze vztahu:

$$g = \frac{Q_h}{2 \cdot p} = \frac{14}{2 \cdot 1} = 3 \quad (2.14)$$

kde Q_h je počet drážek pro hlavní vinutí na statoru, p je počet pólových dvojic

a α je úhel mezi drážkami.

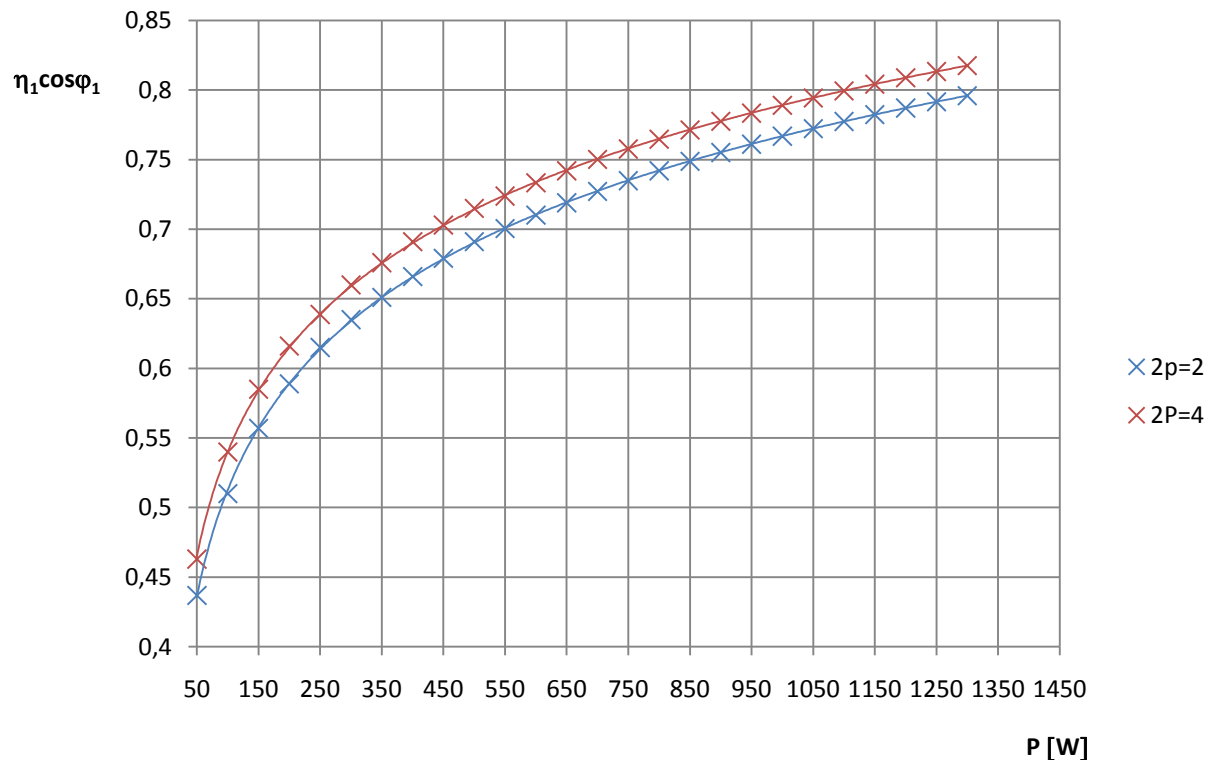
$$\alpha = \frac{360}{Q_{cs}} = \frac{360}{12} = 30^\circ \quad (2.15)$$

kde Q_{cs} je celkový počet drážek statoru

U motoru s trvale zapojeným kondenzátorem vypočteme proud hlavním vinutím pomocí vztahu:

$$I_A = \frac{P}{\eta_1 \cos \varphi_1 \cdot U \cdot (1 + k_{cu})} = \frac{105}{0,517 \cdot 230 \cdot (1 + 0,5)} = 0,59A \quad (2.16)$$

kde P je jmenovitý výkon jednofázového motoru FCJ4C82A, $\eta_1 \cos \varphi_1$ je odečteno z grafu na obrázku 2.4, pro výkon jednofázového motoru 105W a pro počet pólových dvojic $2p=2$, U je napětí na svorkách a k_{cu} je poměr drážkového prostoru obou vinutí. Volí se podle typu vinutí a technologie navíjení.



Obrázek 2.4 Součin účinnosti a účinku na svorkách sítě pro jednofázové motory s trvale připojeným kondenzátorem.

Magnetický tok ve vzduchové mezeře vypočteme ze vztahu:

$$\Phi = \frac{l \cdot d \cdot B_{\delta} \cdot 10^{-4}}{p} = \frac{4,4 \cdot 4,4 \cdot 0,54 \cdot 10^{-4}}{1} = 1,05 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} \quad (2.17)$$

kde l je délka železa statoru, d je vrtání statoru, B_{δ} je maximální indukce ve vzduchové mezeře (už dříve zvolena 0,54 T) a p je počet pólových dvojic.

Průřez vodiče hlavního vinutí vypočteme ze vztahu:

$$S_A = \frac{I_A}{\sigma_A} = \frac{0,59}{6,5} = 0,09 \text{ mm}^2 \quad (2.18)$$

kde I_A je proud hlavním vinutím a σ_A je proudová hustota volená v rozmezí 6-8,5 A/mm². Čím vyšší zvolená hodnota, tím vyšší ztráty v mědi stroje. Moje volba je 6,5 A/mm².

potom průměr jednoho holého vodiče v hlavním vinutí je

$$S_A = \frac{\pi \cdot d_A^2}{4} \rightarrow d_A = \sqrt{\frac{4 \cdot S_A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,09}{\pi}} = 0,338 \text{ mm} \quad (2.19)$$

Pro sestavení stroje volím vyráběný měděný vodič se smaltovou izolací o průměru $d_{AV}=0,365 \text{ mm}$. (tabulka - příloha 1)

Předběžné závity hlavního vinutí vypočteme ze vztahu:

$$N_{Ap} = \frac{U \cdot (1 - \varepsilon_1)}{4,44 \cdot f \cdot \chi_A \cdot \Phi} = \frac{230 \cdot (1 - 0,2)}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,91 \cdot 1,05 \cdot 10^{-3}} = 867 \rightarrow \text{zaokrouhлено na 870 závitů} \quad (2.20)$$

kde ε_1 je poměrný úbytek napětí na rozptylové impedanci statoru (provádí se odhad podle provedených strojů), moje volba je 0,2, U je svorkové napětí, f je kmitočet, χ_A je činitel hlavního vinutí a Φ je magnetický tok ve vzduchové mezeře. N_{Ap} zaokrouhлено tak, aby se do každé drážky vešel celý počet závitů. Pak závity hlavního vinutí $N_A = 870$ závitů.

Poměr závitů hlavního vinutí ku počtu drážek na pól statoru, udává počet závitů v jedné drážce

$$N_{d1} = \frac{N_A}{q} = \frac{870}{3} = 290 \text{ závitů} \quad (2.21)$$

2.1.3 Výpočet rozměrů statoru a jeho drážky

Pro stator se použijí lakované plechy tloušťky 0,5mm se ztrátovým číslem $p_{1,0} = 2,6$ W/kg. Voleno z tabulky 2.2.

Tloušťka plechů	Δp
mm	W/kg
0,5	1,6 až 3
0,35	1,2-2

Tabulka 2.2 Ztrátové číslo pro indukci 1T a frekvenci 50Hz

Drážková rozteč horní části zubu statoru:

$$\tau_{1s} = \frac{\pi \cdot d}{Q_{cs}} = \frac{\pi \cdot 44}{12} = 11,52 \text{ mm} \quad (2.22)$$

kde d je vrtání statoru a Q_{cs} je celkový počet drážek statoru

Potom šířka zubu statoru je dána vztahem:

$$b_{z1s} = \frac{B_\delta}{B_{zs} \cdot k_{Fe}} \cdot \tau_{1s} = \frac{0,54}{1,6 \cdot 0,92} \cdot 11,52 = 4,23 \text{ mm} \quad (2.23)$$

kde B_δ je maximální indukce ve vzduchové mezeře (už dříve zvolena 0,54 T), d je vrtání statoru, k_{Fe} je činitel plnění plechů zvolen z tabulky 2.3, B_{zs} je sycení železa v zubech (volí se v rozmezí 1,5-1,8T), moje volba je 1,6T a τ_{1s} drážková rozteč horní části zubu statoru

Tloušťka plechů	k_{Fe}	
[mm]	Plechý lakované	Chemická vrstva izolace
0,5	0,92 až 0,95	0,95 až 0,97
0,35	0,89 až 0,93	0,93 až 0,97

Tabulka 2.3 Činitelé plnění plechů

Plocha drážky bez izolace:

$$S_d = \frac{2 \cdot N_A \cdot S_{AV}}{Q_h \cdot k_d} = \frac{2 \cdot 870 \cdot 0,105}{6 \cdot 0,41} = 74,01 \text{ mm}^2 \quad (2.24)$$

kde N_A jsou závitů hlavního vinutí, S_{AV} průřez vodiče hlavního vinutí ze zvoleného průměru vodiče d_{AV} , určí ze vztahu $S_{AV} = \frac{\pi \cdot d_{AV}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,365^2}{4} = 0,105 \text{ mm}^2$, Q_h je počet drážek obsazených hlavním vinutím a k_d je činitel využití plochy drážky bez drážkové izolace zvolen z tabulky 2.4 pro $2p=2$

počet pólů $2p$	plnění drážky k_d
2	0,41
4	0,39
6	0,37

Tabulka 2.4 Plnění drážek

Šířka výložníku (otevření) drážky se volí v rozmezí $b_{4s}=1,5$ až 4 mm a jeho výška v rozmezí $h_{4s}=0,3$ až 1 mm. Pro náš případ volím $b_{4s}=1,5$ mm a $h_{4s}=0,7$ mm.

Potřebná šířka jha statoru:

$$h_{js} = \frac{\phi \cdot 10^4}{B_{j1} \cdot l \cdot 0,9} = \frac{B_\delta}{B_{j1}} \cdot \frac{d}{p \cdot k_{Fe}} = \frac{0,54}{1,4} \cdot \frac{44}{1 \cdot 0,92} = 18,9 \text{ mm} \quad (2.25)$$

kde B_{j1} je syčení jha statoru, volí se v rozmezí 1,3 až 1,5 T. Čím vyšší volba, tím menší permeabilita, ale větší hmotnost a rozměry stroje, d je průměr vrtání statoru, B_δ maximální indukce ve vzduchové mezeře a p je počet pólových dvojic $2p=2$ a k_{Fe} je činitel plnění plechů volen z tabulky 2.3

Předběžná hloubka drážky statoru:

$$h_{cs} = \frac{d_{1s} - d}{2} - h_{js} = \frac{88 - 44}{2} - 18,9 = 3,1 \quad (2.26)$$

kde d_{1s} je vnější průměr rotoru, d je průměr vrtání statoru a h_{js} je šířka jha statoru

Šířka drážky u paty zubu:

$$b_{1s} = \frac{\pi \cdot (d + (2 \cdot h_{cs}))}{Q_{cs}} - b_{z1s} + b_{iz} = \frac{\pi \cdot (44 + (2 \cdot 3,1))}{12} - 4,23 + 0,15 = 9,1 \text{ mm} \quad (2.27)$$

kde d je vrtání statoru, h_{cs} je předběžná hloubka drážky statoru, b_{z1s} je šířka zubu statoru, Q_{cs} je celkový počet drážek statoru, b_{iz} je tloušťka izolace volená v rozmezí 0,15-0,2 mm

Šířka v horní části drážky statoru:

$$b_{2s} = \frac{\pi \cdot (d + (2 \cdot h_{4s}) - b_{4s}) - (Q_{cs} \cdot b_{z1s})}{Q_{cs} - \pi} + b_{iz} = \frac{\pi \cdot (44 + (2 \cdot 0,7) - 1,5) - (12 \cdot 4,23)}{12 - \pi} + 0,15 = 10mm \quad (2.28)$$

kde d je vrtání statoru, h_{4s} je výška výložníku drážky, b_{4s} je šířka výložníku drážky, b_{z1s} je šířka zubu statoru, Q_{cs} je celkový počet drážek statoru, b_{iz} je tloušťka izolace volená v rozmezí 0,15-0,2mm

Aktivní hloubka statorové drážky:

$$h_{1s} = \frac{2 \cdot S_d}{b_{1s} + b_{2s}} = \frac{2 \cdot 74,09}{9,1 + 10} = 7,8mm \quad (2.29)$$

kde, S_d je plocha drážky statoru, b_{1s} je šířka drážky u paty zubu, b_{2s} je šířka horní části drážky

Potom celkovou hloubku drážky lze vypočíst ze vztahu:

$$h'_{cs} = h_{1s} + \left(\frac{b_{2s} - b_{4s}}{2} \right) + h_{4s} + B_{iz} = 7,8 + \frac{10 - 1,5}{2} + 0,7 + 0,15 = 12,9mm \quad (2.30)$$

kde h_{1s} je aktivní hloubka drážky, b_{2s} je šířka horní části drážky, h_{4s} je výška výložníku drážky a b_{4s} je šířka výložníku drážky

Průměr vrtání statoru + délka drážek je tedy:

$$d_{2s} = h'_{cs} + d = (2 \cdot 12,9) + 44 = 70mm \quad (2.31)$$

kde h'_{cs} je hloubka drážky statoru a d je průměr vrtání statoru

Konečný vnější průměr statoru:

$$d_{1s} = d_{2s} + (2 \cdot h_{js}) = 70 + (2 \cdot 18,9) = 108mm \quad (2.32)$$

kde d_{2s} je průměr vrtání statoru + délka drážek statoru a h_{js} je šířka jha statoru

2.1.4 Pomocné vinutí statoru

Činitel pomocného vinutí:

$$\chi'_A = \frac{\sin q_p \frac{\alpha}{2}}{q_p \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin 3 \frac{30^\circ}{2}}{3 \sin \frac{30^\circ}{2}} = 0,91 \quad (2.33)$$

kde q je počet drážek pomocného vinutí na pól a fázi

vypočte se ze vztahu:

$$q_p = \frac{Q_p}{2} = \frac{6}{2} = 3 \quad (2.34)$$

kde Q_p je počet drážek pro pomocné vinutí na statoru

a α je úhel mezi drážkami (vypočten v 2.15)

Výpočet počtu závitů pomocného vinutí:

$$N'_A = \frac{\chi_A \cdot N_A \cdot k_1}{\chi'_A} = \frac{0,91 \cdot 870 \cdot 1}{0,91} = 870 \text{ závitů} \quad (2.35)$$

kde χ'_A je činitel pomocného vinutí, N_A počet závitů hlavního vinutí a k_1 je poměr mezi hlavním a pomocným vinutím volen z rozmezí hodnot 0,8 až 1,2. Moje volba je 1.

Poměr závitů pomocného vinutí ku počtu drážek na pól statoru, udává počet závitů v jedné drážce

$$N'_{d1} = \frac{N'_A}{q_p} = \frac{870}{3} = 290 \text{ závitů} \quad (2.36)$$

Průřez vodiče pomocného vinutí vypočteme ze vztahu:

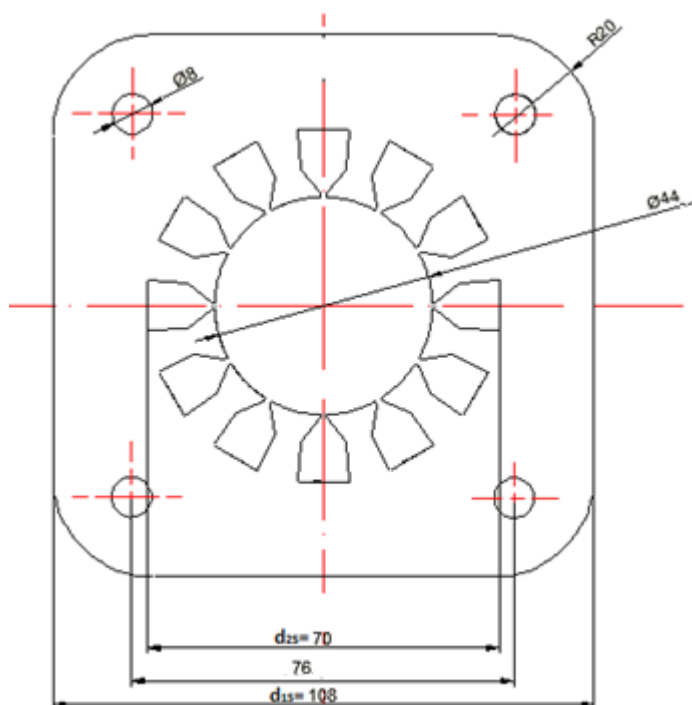
$$S'_{AV} = \frac{Q_p \cdot k_d \cdot S_d}{2 \cdot N'_A} = \frac{6 \cdot 0,41 \cdot 74,09}{2 \cdot 870} = 0,105 \text{ mm}^2 \quad (2.37)$$

kde Q_p je počet drážek pro pomocné vinutí na statoru, určeno z přílohy 3 - Uspořádání vinutí ve statoru, k_d je činitel využití plochy drážky bez drážkové izolace zvolen z tabulky 2.2 pro $2p=2$, S_d plocha drážky bez izolace a N'_A je počet závitů pomocného vinutí.

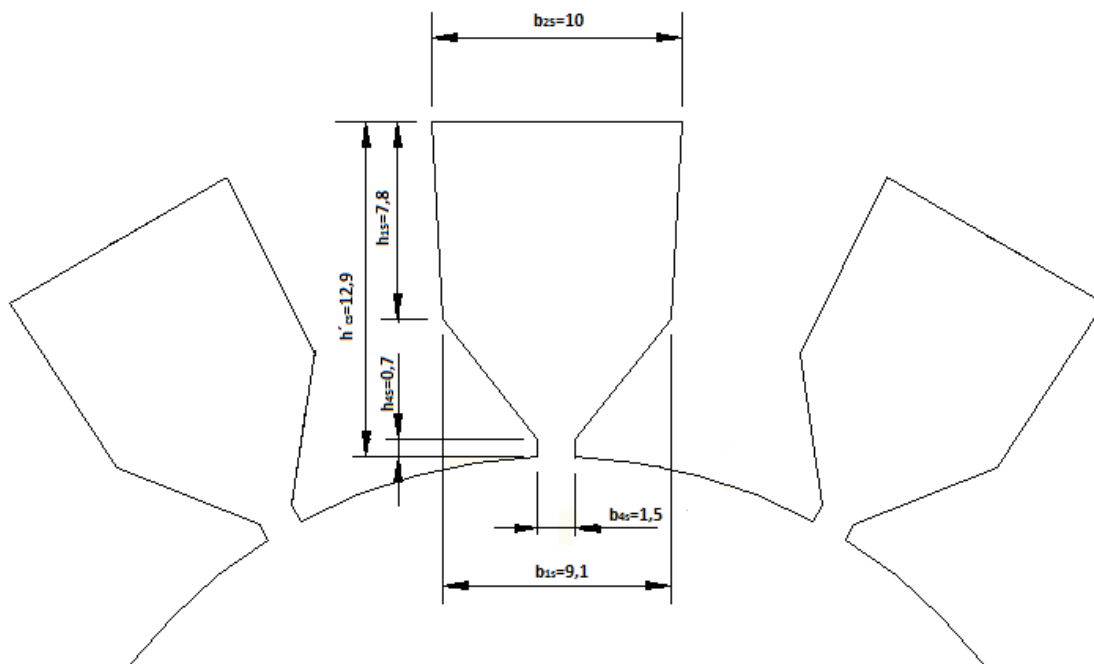
potom průměr jednoho vodiče se smaltem v pomocném vinutí je

$$S'_{AV} = \frac{\pi \cdot d_A^2}{4} \rightarrow d'_A = \sqrt{\frac{4 \cdot S'_{AV}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,105}{\pi}} = 0,365 \text{ mm} \quad (2.38)$$

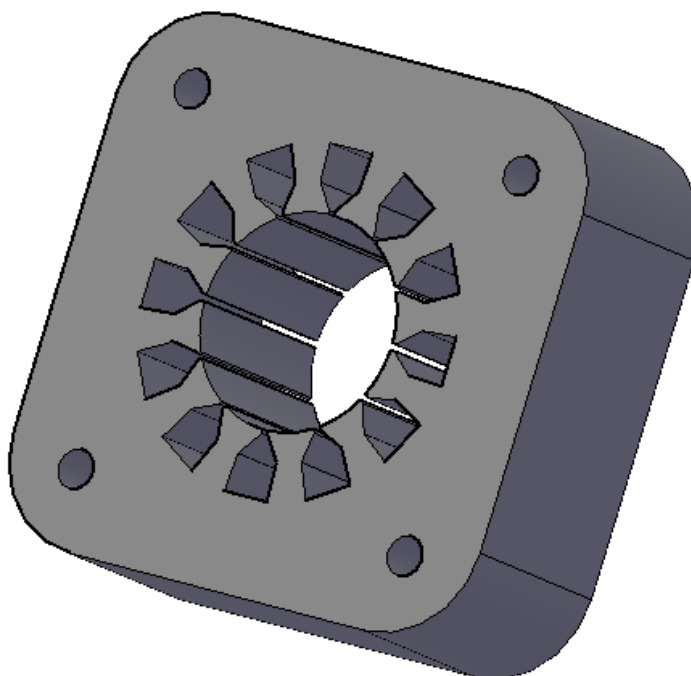
Pro pomocné vinutí stroje volím vyráběný měděný vodič se smaltovou izolací o průměru $d'_{AV}=0,365 \text{ mm}$. (tabulka - příloha 1)



Obrázek 2.5 Návrh statoru z vypočtených parametrů



Obrázek 2.6 Návrh drážek statoru



Obrázek 2.7 Model navrženého statoru jednofázového asynchronního motoru (FCJ4C82A)

2.1.5 Výpočet tyčí rotoru

Délka železa rotoru se volí stejná jako délka železa statoru ($l_r=l$). Vzduchová mezera se volí v rozmezí 0,25-0,3 mm. Čím je vzduchová mezera menší, tím lepší, protože má menší magnetizační proud a tím menší jalovou zátěž pro síť. Moje volba $\delta=0,3\text{mm}$.

Výpočet vnějšího průměru rotoru

$$d_{1r} = d - (2 \cdot \delta) = 44 - (2 \cdot 0,3) = 43,4\text{mm} \quad (2.39)$$

kde d je vrtání statoru a δ je zvolená šířka vzduchové mezery

Činitel vinutí:

$$\chi_B = \frac{\sin \frac{k_n \cdot \pi}{2 \cdot \tau}}{\frac{k_n \cdot \pi}{2 \cdot \tau}} = \frac{\sin \frac{8 \cdot \pi}{2 \cdot 69,24}}{\frac{8 \cdot \pi}{2 \cdot 69,24}} = 0,994 \quad (2.40)$$

kde τ je pólová rozteč (rovnice 2.11) a k_n je délka zešíkmení rotorových drážek, byla zvolena na $k_n=8\text{mm}$. Volí se podle rozměrů rotoru.

Výpočet odporu rotoru jedné tyče klece s přírážkou na spojovací kruh:

$$\begin{aligned} R'_t &= \frac{(1-s) \cdot s \cdot U^2 \cdot (1-\varepsilon_1-\varepsilon_2)^2 \cdot Q_{cr} \cdot \chi_B}{4 \cdot N_A^2 \cdot \chi_A^2 \cdot (P + 2 \cdot \Delta P_{mec h})} \\ &= \frac{(1-0,086) \cdot 0,086 \cdot 230^2 \cdot (1-0,2-0,1)^2 \cdot 16 \cdot 0,994}{4 \cdot 870^2 \cdot 0,91^2 \cdot (105 + 2 \cdot 8,4)} = \\ &= 1,07 \cdot 10^{-4} \Omega \end{aligned} \quad (2.41)$$

kde s je skluz vypočtený ($s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{3000 - 2740}{3000} \cdot 100 = 8,6\%$), U je napětí na svorkách stroje, ε_1 je poměrný úbytek napětí na rozptylové impedanci statoru (provádí se odhad podle provedených strojů), moje volba je 0,2, ε_2 je poměrný úbytek napětí statoru na zpětné vnitřní impedanci (provádí se odhad podle provedených strojů), moje volba je 0,1, Q_{cr} je celkový počet drážek rotoru, χ_B činitel vinutí rotoru, N_A počet závitů hlavního vinutí statoru, χ_A činitel vinutí statoru, P je výkon jednofázového stroje FCJ4C82A a $\Delta P_{mec h}$ jsou mechanické ztráty, vypočtené z rovnice $\Delta P_m = 0,08 \cdot P = 0,08 \cdot 105 = 8,4\text{W}$

Výpočet proudu rotorové tyče:

$$I_{drt} = \frac{s \cdot U \cdot (1-\varepsilon_1-\varepsilon_2) \cdot \chi_B}{2 \cdot N_A \cdot \chi_A \cdot R'_t} = \frac{0,086 \cdot 230 \cdot (1-0,2-0,1) \cdot 0,994}{2 \cdot 870 \cdot 0,91 \cdot 1,07 \cdot 10^{-4}} = 82,03\text{A} \quad (2.42)$$

kde s je zvolený skluz (8,6%) stroje, U je napětí na svorkách stroje, ε_1 je poměrný úbytek napětí na rozptylové impedanci statoru (provádí se odhad podle provedených strojů), moje volba je 0,2, ε_2 je poměrný úbytek napětí statoru na zpětné vnitřní impedanci (provádí se odhad podle provedených strojů), moje volba je 0,1, χ_B činitel vinutí rotoru, N_A počet závitů hlavního vinutí statoru a R'_t je odpor rotoru jedné tyče klece s přírážkou na spojovací kruh

Pak plocha rotorové tyče je:

$$S_{rt} = \frac{I_{drt}}{\sigma_{drt}} = \frac{82,03}{6} = 13,67 \text{ mm}^2 \quad (2.43)$$

kde I_{drt} je proud rotorové tyče a σ_{drt} je proudová hustota v rotoru zvolená z tabulky 2.5. Pro rotor s měděnou klecí - kondenzátorové motory. Moje volba 6 A/mm^2

Rotor	Druh stroje	σ_{drt}
		[A/mm ²]
Měděná klec	Dvoufázové nebo trojfázové souměrné stroje	7 až 8
	Kondenzátorové motory	6 až 7
	1f motory bez trvale připojeného pomocného vinutí	3,5 až 5
hliníková klec	Dvoufázové nebo trojfázové souměrné stroje	4 až 5
	Kondenzátorové motory	4 až 4,5
	1f motory bez trvale připojeného pomocného vinutí	2 až 3

Tabulka 2.5 Sousedná složka proudové hustoty v rotoru

Proud v rotorovém kruhu:

$$I_{dkr} = \frac{I_{drt}}{2 \cdot \sin \frac{p \cdot \pi}{Q_{cr}}} = \frac{82,03}{2 \cdot \sin \frac{1 \cdot \pi}{16}} = 210,24 \text{ A} \quad (2.44)$$

kde I_{drt} je proud rotorové tyče, p je počet pólových dvojic a Q_{cr} je celkový počet drážek rotoru

Průřez rotorového kruhu:

$$S_{kr} = \frac{I_{dkr}}{\sigma_{dkr}} = \frac{210,24}{6} = 35,04 \text{ mm}^2 \quad (2.45)$$

kde σ_{dkr} je proudová hustota kroužku, volí se stejná jako pro tyč.

Vnitřní průměr rotoru (hřídel) se volí podle potřeby uživatele, podle toho do jakého provozu, či zařízení, je daný motor konstruován. Moje volba je $d_{2r}=20 \text{ mm}$. Dále se volí šířka $l_k=4 \text{ mm}$ a hloubka $h_k=1 \text{ mm}$ klínu hřídele rotoru.

2.1.6 Výpočet rozměrů drážky rotoru

Drážková rozteč rotoru:

$$\tau_{1r} = \frac{\pi \cdot d_{1r}}{Q_{cr}} = \frac{\pi \cdot 43,4}{16} = 8,52 \text{ mm} \quad (2.46)$$

kde d_{1r} je vnější průměr rotoru, a Q_{cr} je celkový počet drážek rotoru

Šířka výložníku (otevření) drážky $b_{4r} = 0,8$ mm a šířka mezi vnějším průměrem rotoru a rotorovou drážkou se volí v rozmezí $h_{4r} = 0,3$ až 1 mm. Pro náš případ volím $h_{4r} = 0,5$ mm.

Průměr drážky rotoru:

$$d_{dr} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot S_{rt}} + 2 \cdot b_{iz} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot 13,69} + 2 \cdot 0,15 = 4,5 \text{ mm} \quad (2.47)$$

kde S_{rt} je plocha rotorové tyče, b_{iz} tloušťka izolace drážky, volí se v rozmezí 0,15-0,2 mm

Plocha drážky s izolací:

$$S_{idp} = \frac{\pi d_{dr}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 4,5^2}{4} = 15,71 \text{ mm}^2 \quad (2.48)$$

kde d_{dr} je průměr drážky rotoru

Šířka zubu rotoru je dána vztahem:

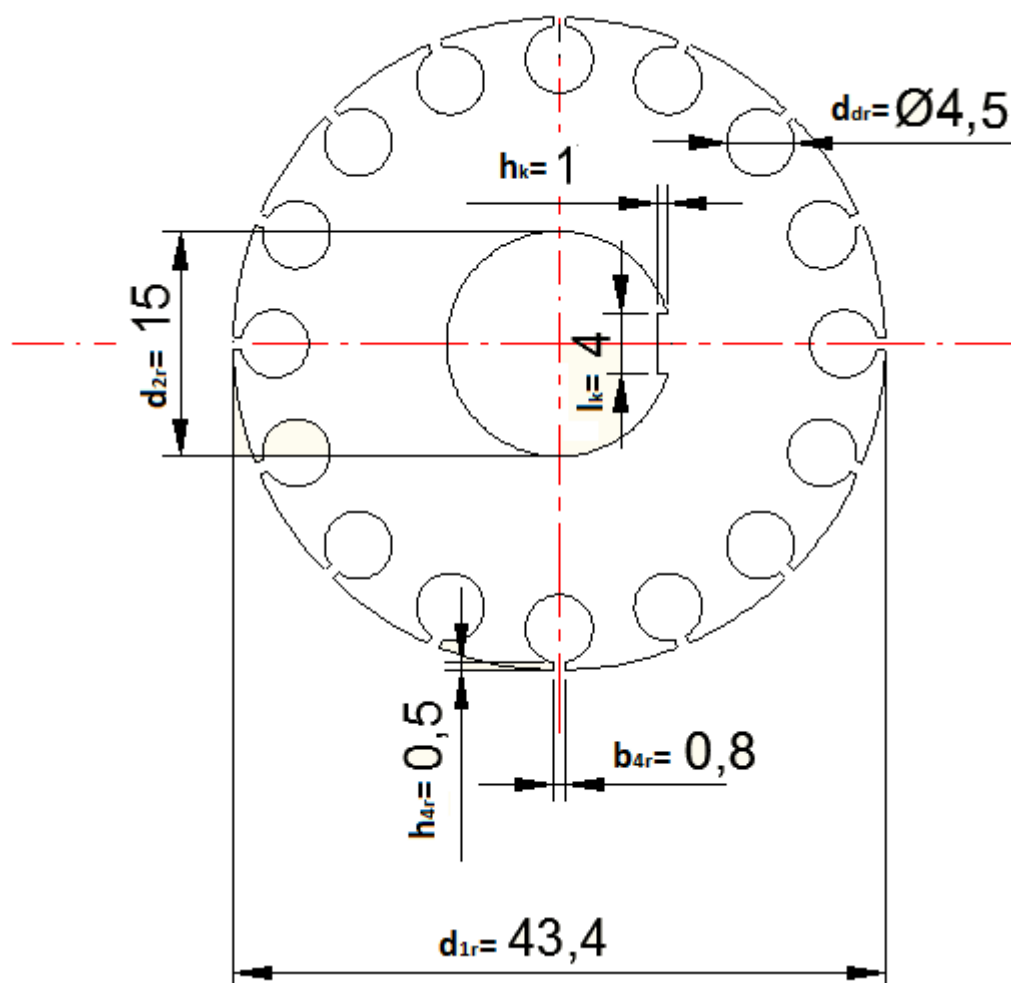
$$b_{z2r} = \frac{\pi \cdot (d_{1r} - (2 \cdot h_{4r}) - d_{dr})}{Q_{cr}} - d_{dr} = \frac{\pi \cdot (43,4 - (2 \cdot 0,5) - 4,5)}{16} - 4,5 = 3 \text{ mm} \quad (2.49)$$

kde d_{1r} je vnější průměr rotoru, h_{4r} je šířka mezi vnějším průměrem rotoru a rotorovou drážkou, d_{dr} je průměr drážky rotoru a Q_{cr} je celkový počet drážek rotoru

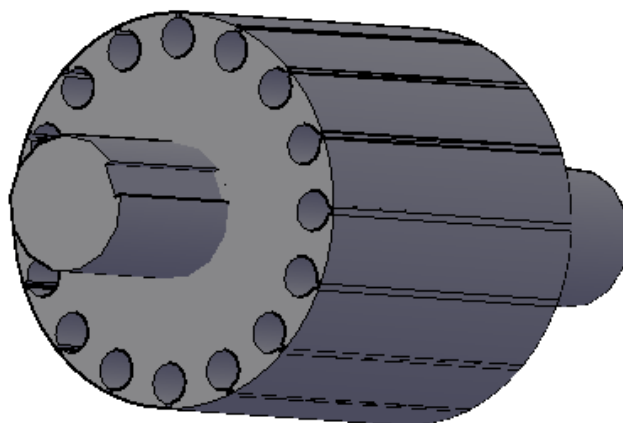
Potom celkovou hloubku drážky lze vypočíst ze vztahu:

$$h_{cr} = d_{dr} + h_{4r} = 4,5 + 0,5 = 5 \text{ mm} \quad (2.50)$$

kde d_{dr} je průměr drážky rotoru, a h_{4r} je šířka mezi vnějším průměrem rotoru a rotorovou drážkou



Obrázek 2.8 Návrh rotoru z vypočtených parametrů



Obrázek 2.9 Model navrženého rotoru

2.1.7 Výpočet kapacity kondenzátoru

Kapacitu trvale připojeného kondenzátoru vypočítáme z empirického vzorce:

$$c = k \cdot P = 68 \cdot 0,105 = 7,14\mu F \quad (2.51)$$

kde k je konstanta závislá na napětí sítě ($k=25$ pro $U=400V$, $k=68$ pro $U=230V$, $k=200$ pro $U=110V$) a P je výkon jednofázového asynchronního motoru v kW

Vypočítanou hodnotu kapacity lze porovnat praktiky sestavenou empirickou tabulkou 2.6. Naše vypočtená kapacita $7,14\mu F$ v empirické tabulce přibližně odpovídá výkonu 105W. Volím kondenzátor z vyráběné řady o kapacitě $7\mu F$

Výkon motoru	Rozběhový kondenzátor	Trvale připojený kondenzátor
W	μF	μF
100-200 (105)	8 až 10	5 až 8 (7,14)
200-300	10 až 16	8 až 12
300-500	16 až 24	10 až 16
500-750	25 až 40	16 až 25
750-1000	40 až 51	25 až 35

Tabulka 2.6 Empirická tabulka kapacit kondenzátorů pro různé výkony strojů

2.2 Kontrola návrhu vypočteného jednofázového asynchronního motoru s trvale připojeným kondenzátorem FCJ4C82A

2.2.1 Výpočet činného odporu hlavního vinutí

Délka čela vinutí:

$$l_{\epsilon} = k_{\epsilon} \cdot \frac{\pi \cdot (d + h'_{cs})}{2 \cdot p} + 2 \cdot B = 1,2 \cdot \frac{\pi \cdot (44 + 12,9)}{2 \cdot 1} + 2 \cdot 0,01 = 107,27mm \quad (2.52)$$

kde k_{ϵ} je konstanta čela, volená pro $2p=2$ je 1,2 a pro $2p=4$ je 1,3, d je vrtání statoru, h'_{cs} celková hloubka drážky statoru, p je počet pólových dvojic stroje a B je konstanta pro vsypávané vinutí navinuté před nalisováním do kostry.

Výpočet střední délky závitu statorového vinutí:

$$l_s = 2 \cdot (l_{\epsilon} + l) = 2 \cdot (107,27 + 44) = 302,55mm \quad (2.53)$$

kde l je délka železa statoru a l_{ϵ} je délka čela vinutí

Činný odpor hlavního i pomocného vinutí statoru lze vypočítat jako:

$$R_A = \frac{N_A \cdot l_s}{\gamma \cdot S_{AV}} = \frac{870 \cdot 0,30255}{56 \cdot 0,105} = 44,92\Omega \quad (2.54)$$

kde N_A je počet závitů hlavního vinutí, l_s střední délka závitu statorového vinutí, γ měrná vodivost určená z tabulky 2.7 a S_{AV} je průřez vodiče statorového vinutí ze zvoleného průměru d_{av}

Materiál	Teplota	γ
[-]	[°C]	[Sm/mm ²]
měď	20	56
	70	47
	20+Δ□	56
		1+0,0039Δ□
elektrolytický hliník	20	34
	70	28
	20+Δ□	34
		1+0,0037Δ□
mosaz	20	11
	70	12
	20+Δ□	11
		1+0,0015Δ□

Tabulka 2.7 Měrná vodivost

Činný odpor samostatné rotorové tyče

$$R_t = \frac{l}{\gamma \cdot S_{rt}} = \frac{0,044}{56 \cdot 13,67} = 5,75 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (2.55)$$

kde l je délka železa rotoru, γ měrná vodivost určená z tabulky 2.7 a S_{rt} průřez rotorové tyče

Činný odpor spojovacího kruhu:

$$R_{kr} = \frac{\pi \cdot d_{kr}}{\gamma \cdot S_{kr} \cdot Q_{cr}} = \frac{\pi \cdot 0,0384}{56 \cdot 35,04 \cdot 16} = 3,85 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (2.56)$$

kde $d_{kr} = d_{1r} - h_{cr} = 43,4 - 5 = 38,4 \text{ mm}$ je střední průměr kroužku rotoru, S_{rt} je průřez rotorového kruhu a Q_{cr} je celkový počet drážek rotoru

Odpor klece rotoru:

$$R_2 = R_t + \frac{R_{kr}}{2 \sin^2 \frac{p \cdot \pi}{Q_{cr}}} = 5,75 \cdot 10^{-5} + \frac{3,85 \cdot 10^{-6}}{2 \sin^2 \frac{1 \cdot \pi}{16}} = 1,08 \cdot 10^{-4} \Omega \quad (2.57)$$

kde R_{kr} je odpor spojovacího kruhu, R_t je odpor rotoru jedné tyče klece s přírážkou na spojovací kruh, p je počet pólových dvojic a Q_{cr} je celkový počet drážek rotoru

Odpor rotoru přepočtený na stator:

$$R'_2 = \frac{4 \cdot m \cdot (N_A \cdot \chi_A)^2}{Q_{cr} \cdot \chi_B^2} \cdot R_2 = \frac{4 \cdot 2 \cdot (870 \cdot 0,91)^2}{16 \cdot 0,994^2} \cdot 1,08 \cdot 10^{-4} = 34,3 \Omega \quad (2.58)$$

kde m je počet fází statorového vinutí, na který rotorový odpor přepočítáváme (nemusí souhlasit se skutečným počtem fázových vinutí, protože konstanty R_A , X_{vs} nezávisí matematicky na počtu fázových vinutí statoru, jsou dány jen uspořádáním vinutí samotného. Toto platí i pro přepočet konstant rotoru X_{vr} a R'_2 na stator. Pro jednofázové stroje je $m=2$ pro vinutí hlavní fáze), N_A je počet závitů hlavního vinutí, χ_A je činitel vinutí statoru, χ_B činitel vinutí rotoru a Q_{cr} je celkový počet drážek rotoru

2.2.2 Výpočet hlavní reaktance statoru

Carterův činitel pro stator:

$$k_{\delta 1} = \frac{\tau_{1s}}{\tau_{1s} + \delta - \frac{3}{4}b_{4s}} = \frac{11,52}{11,52 + 0,3 - \frac{3}{4} \cdot 1,5} = 1,08 \quad (2.59)$$

kde τ_{1s} je drážková rozteč statoru, δ je zvolená šířka vzduchové mezery, b_{4s} je zvolené otevření drážky statoru.

Carterův činitel pro rotor:

$$k_{\delta 2} = \frac{\tau_{1r}}{\tau_{1r} + \delta - \frac{3}{4}b_{4r}} = \frac{8,52}{8,52 + 0,3 - \frac{3}{4} \cdot 0,8} = 1,04 \quad (2.60)$$

Pak efektivní vzduchová mezera se vypočte ze vztahu:

$$\delta' = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2} \cdot \delta = 1,08 \cdot 1,04 \cdot 0,3 = 0,33 \text{ mm} \quad (2.61)$$

kde $k_{\delta 1}$ je carterův činitel pro stator, $k_{\delta 2}$ je carterův činitel pro rotor a δ je zvolená šířka vzduchové mezery

Magnetické napětí na vzduchové mezeře:

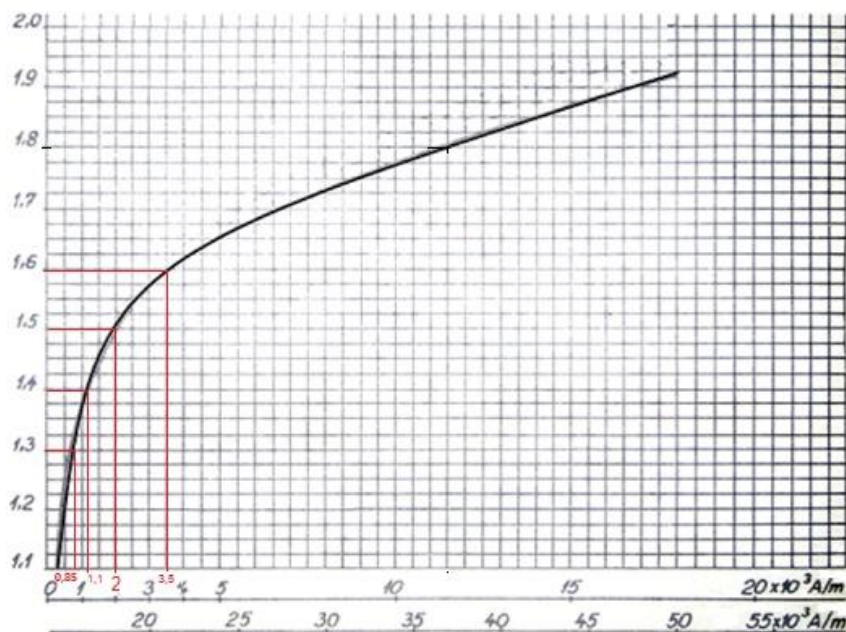
$$U_{m\delta} = 1,6 \cdot \delta' \cdot B_{\delta} \cdot 10^4 = 1,6 \cdot 0,033 \cdot 0,54 \cdot 10^4 = 285,12 \text{ A} \quad (2.62)$$

kde δ' je efektivní vzduchová mezera a B_{δ} je indukce ve vzduchové mezeře už dříve byla zvolena 0,54 T

Magnetické napětí na zubech statoru:

$$U_{mz1} = H_{z1} \cdot h'_{cs} = 3500 \cdot 0,0129 = 45,15 \text{ A} \quad (2.63)$$

kde H_{z1} je intenzita magnetického pole odečtená z obrázku 2.10 pro dříve zvolenou magnetickou indukci $B_{zs}=1,6\text{T}$ a h'_{cs} je celková hloubka drážky statoru.



Obrázek 2.10 Magnetizační křivka plechů o měrných ztrátách $p_{1,0}=2,6\text{W/kg}$

Magnetické napětí jha statoru:

$$U_{mj1} = H_{j1} \cdot d_{1s} = 1100 \cdot 0,108 = 118,8A \quad (2.64)$$

kde H_{j1} je intenzita magnetického pole odečtená z obrázku 2.10 pro dříve zvolenou magnetickou indukci $B_{j1}=1,4T$ a d_{1s} je vnější průměr statoru.

Magnetické napětí na zubech rotoru:

$$U_{mz2} = H_{z2} \cdot h_{cr} = 2000 \cdot 0,005 = 10A \quad (2.65)$$

kde H_{z2} je intenzita magnetického pole odečtená z obrázku 2.10 pro dříve zvolenou magnetickou indukci $B_{zr}=1,5T$ a h_{cr} je celková hloubka drážky rotoru

Magnetické napětí jha rotoru:

$$U_{mj2} = H_{j2} \cdot d_{1r} = 850 \cdot 0,0434 = 36,89A \quad (2.66)$$

kde H_{j2} je intenzita magnetického pole odečtená z obrázku 2.10 pro magnetickou indukci v jha rotoru $B_{j2}=1,3T$ (volí se v rozmezí 1,3 až 1,6 T) a d_{1r} je vnější průměr rotoru

Pak celkové magnetické napětí na obvodu je dáno součtem dílčích magnetických napětí:

$$\begin{aligned} U_m &= U_{m\delta} + U_{mz1} + U_{mz2} + U_{mj1} + U_{mj2} = 285,12 + 45,15 + 10 + 118,8 + 36,89 = \\ &= 495,9A \end{aligned} \quad (2.67)$$

Ekvivalentní vzduchová mezera je dána vztahem:

$$\delta'' = \delta' \cdot \frac{U_m}{U_{m\delta}} = 0,33 \cdot \frac{495,9}{285,12} = 0,57mm \quad (2.68)$$

kde U_m je celkové magnetické napětí na obvodu, $U_{m\delta}$ je magnetické napětí na vzduchové mezeře a δ' je efektivní vzduchová mezera

Hlavní reaktance:

$$\begin{aligned} X_h &= 1,6 \cdot m \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_A \cdot \chi_A}{100} \right)^2 \cdot \frac{\tau}{100 \cdot \delta''} \cdot \frac{l}{p} = 1,6 \cdot 2 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{870 \cdot 0,91}{100} \right)^2 \cdot \frac{6,912}{100 \cdot 0,057} \cdot \frac{4,4}{1} = \\ &= 535,85\Omega \end{aligned} \quad (2.69)$$

kde m je počet fází statorového vinutí, na který rotorový odpor přepočítáváme (nemusí souhlasit se skutečným počtem fázových vinutí), f je kmitočet sítě, N_A počet závitů hlavního vinutí statoru, χ_A činitel vinutí statoru, τ pólová rozteč, l délka železa statoru, δ'' ekvivalentní vzduchová mezera a p je počet pólových dvojic

Hlavní reaktance pro samostatnou vzduchovou mezeru:

$$X'_h = X_h \cdot \frac{\delta''}{\delta'} = 535,85 \cdot \frac{0,57}{0,33} = 925,56\Omega \quad (2.70)$$

kde X_h je hlavní reaktance, δ'' je ekvivalentní vzduchová mezera a δ' je efektivní vzduchová mezera

2.2.3 Rozptylová reaktance statoru

Součinitel diferenčního rozptylu:

$$\sigma_{A0} = 100 * \left(\frac{\pi^2 \cdot p}{\chi_A^2 \cdot Q_{cs}} \cdot \left[-\left(\frac{1}{6} \cdot q \right) + \left(\frac{1}{4} \cdot Q_{np} \right) + \frac{1}{6 \cdot q} \right] - 1 \right) =$$

$$= 100 * \left(\frac{\pi^2 \cdot 1}{0,912 \cdot 12} \cdot \left[-\left(\frac{1}{6} \cdot 3 \right) + \left(\frac{1}{4} \cdot 6 \right) + \frac{1}{6 \cdot 3} \right] - 1 \right) = 4,68\% \quad (2.71)$$

kde p je počet pólových dvojic, χ_A činitel vinutí statoru, Q_{cs} celkový počet drážek statoru, q počet drážek hlavního vinutí na pól, a Q_{np} je počet drážek statoru na pól

$$Q_{np} = \frac{Q_{cs}}{2 \cdot p} = \frac{12}{2 \cdot 1} = 6 \text{ drážek} \quad (2.72)$$

Tato vypočtená hodnota σ_{A0} odpovídá hodnotě v tabulce 2.8

Q_{np}	2	3	4	6	8	9	10	12	15	∞
jednofázové vinutí $q=2/3 Q_{np}$		9,7		2,85		1,41		0,88	0,65	0,22
Jednofázové nebo dvoufázové vinutí $q=1/2 Q_{np}$	23,4		8,45	4,68	3,3		2,65	2,29		1,64

Tabulka 2.8 Hodnoty $\sigma_{A0} \cdot 100$ pro vinutí s plným krokem

Diferenciální rozptylová reaktance:

$$X_{A0} = \sigma_{A0} \cdot X_h' = 0,0468 \cdot 925,26 = 43,3\Omega \quad (2.73)$$

kde σ_{A0} je součinitel diferenčního rozptylu, X_h' hlavní reaktance pro samostatnou vzduchovou mezeru

Rozptyl přes hlavy zubů:

$$\lambda_z = \frac{[\tau_{1r} - 0,75 \cdot (b_{4s} + b_{4r})]^2}{6 \cdot \tau_{1r} \cdot \delta} = \frac{[8,52 - 0,75 \cdot (1,5 + 0,8)]^2}{6 \cdot 8,52 \cdot 0,3} = 3,01 \quad (2.74)$$

kde τ_{1r} je drážková rozteč rotoru, b_{4s} je šířka otevření statorové drážky, b_{4r} je šířka otevření rotorové drážky a δ je šířka vzduchové mezery

Rozptylová reaktance pro hlavy zubů:

$$X_z = 0,158 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_A}{100} \right)^2 \cdot \frac{l}{p} \cdot \frac{\lambda_z}{q} = 0,158 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{870}{100} \right)^2 \cdot \frac{4,4}{1} \cdot \frac{3,01}{3} = 26,41\Omega \quad (2.75)$$

kde f je kmitočet sítě, N_A počet závitů hlavního vinutí statoru, χ_A činitel vinutí statoru, l délka železa statoru, p je počet pólových dvojic, λ_z je rozptyl přes hlavy zubů a q je počet drážek hlavního vinutí na pól a fázi

Součinitel rozptylu od natočení drážek:

$$\sigma_q = 1,64 \cdot \left(\frac{p}{Q_{cr}} \cdot \frac{k_n}{\tau_{1r}} \right)^2 = 1,64 \cdot \left(\frac{1}{16} \cdot \frac{8}{8,52} \right)^2 = 0,00565 \quad (2.76)$$

kde p je počet pólových dvojic, Q_{cr} je celkový počet drážek rotoru, τ_{1r} je drážková rozteč rotoru, k_n je délka zešíkmení rotorových drážek

Rozptyl od natočení drážek statoru:

$$X_{Aq} = \sigma_q \cdot X_h' = 0,00565 \cdot 925,56 = 5,23\Omega \quad (2.77)$$

kde σ_q je součinitel rozptylu od natočení drážek, X_h' hlavní reaktance pro samostatnou vzduchovou mezeru

Vodivost statorové drážky:

$$\lambda_{ds} = \frac{h_{1s}}{3 \cdot \frac{b_{1s} + b_{2s}}{2}} + 0,66 + \frac{h_{4s}}{b_{4s}} = \frac{7,8}{3 \cdot \frac{9,1 + 10}{2}} + 0,66 + \frac{0,7}{1,5} = 1,4 \quad (2.78)$$

kde h_{1s} je aktivní hloubka statorové drážky, b_{2s} šířka v horní části drážky statoru, b_{1s} šířka drážky u paty zubu, h_{4s} výška výložníku drážky b_{4s} otevření drážky statoru

Rozptylová reaktance statorové drážky:

$$X_{Ad} = 0,158 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_A}{100}\right)^2 \cdot \frac{l}{p} \cdot \frac{\lambda_{ds}}{q} = 0,158 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{870}{100}\right)^2 \cdot \frac{4,4}{1} \cdot \frac{1,4}{3} = 12,26\Omega \quad (2.79)$$

kde f je kmitočet sítě, N_A počet závitů hlavního vinutí statoru, χ_A činitel vinutí statoru, l délka železa statoru, p je počet pólových dvojic, λ_{ds} je vodivost statorové drážky a q je počet drážek hlavního vinutí na pól

Rozptyl přes čela vinutí:

$$X_{A\check{c}} = 0,158 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_A}{100}\right)^2 \cdot \frac{l_{\check{c}}}{p} \cdot \lambda_{\check{c}} = 0,158 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{870}{100}\right)^2 \cdot \frac{10,727}{1} \cdot 0,14 = 9\Omega \quad (2.80)$$

kde f je kmitočet sítě, N_A počet závitů hlavního vinutí statoru, χ_A činitel vinutí statoru, $l_{\check{c}}$ délka čela, p je počet pólových dvojic, $\lambda_{\check{c}}$ je vodivost přes čela vinutí, volí se v rozmezí 0,11 až 0,16 (moje volba je 0,14)

Celková rozptylová reaktance statoru je dána součtem všech dílčích rozptylových reaktancí:

$$X_{vs} = X_{A0} + X_{Aq} + X_{Ad} + X_{A\check{c}} = 43,3 + 5,23 + 12,26 + 9 = 69,79\Omega \quad (2.81)$$

2.2.4 Rozptylová reaktance rotoru:

Součinitel diferenčního rozptylu:

$$\sigma_{20} = 3,33 \cdot \left(\frac{p}{Q_{cr}}\right)^2 = 3,33 \cdot \left(\frac{1}{16}\right)^2 = 0,013 \quad (2.82)$$

kde p je počet pólových dvojic a Q_{cr} je celkový počet drážek rotoru

Diferenční rozptyl rotoru:

$$X_{20} = \sigma_{20} \cdot X_h' = 0,013 \cdot 925,26 = 12,04\Omega \quad (2.83)$$

kde σ_{20} je součinitel diferenčního rozptylu, X_h' hlavní reaktance pro samostatnou vzduchovou mezeru

Rozptyl přes hlavy zubů:

$$\lambda_{dr} = 0,66 + \frac{h_{4r}}{b_{4r}} = 0,66 + \frac{0,5}{0,8} = 1,29 \quad (2.84)$$

kde h_{4r} je rozměr mezi drážkou rotoru a vnějším průměrem rotoru a b_{4r} je otevření drážky

Drážkový rozptyl rotoru přepočtený na satorové vinutí:

$$X_{2d} = 0,316 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_A \cdot \chi_A}{100 \cdot \chi_B} \right)^2 \cdot l \cdot \frac{m \cdot \lambda_{dr}}{Q_{cr}} = 0,316 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{870 \cdot 0,91}{100 \cdot 0,994} \right)^2 \cdot 4,4 \cdot \frac{2 \cdot 1,29}{16} =$$

$$= 7,09\Omega \quad (2.85)$$

kde f je kmitočet sítě, N_A počet závitů hlavního vinutí statoru, χ_A činitel vinutí statoru, χ_B činitel vinutí rotoru, l délka železa rotoru, m je počet fází satorového vinutí, na který rotorový odpor přepočítáváme (nemusí souhlasit se skutečným počtem fázových vinutí), λ_{dr} je vodivost rotorové drážky a Q_{cr} je celkový počet drážek rotoru

Rozptyl od natočení drážek rotoru je stejný jako u statoru:

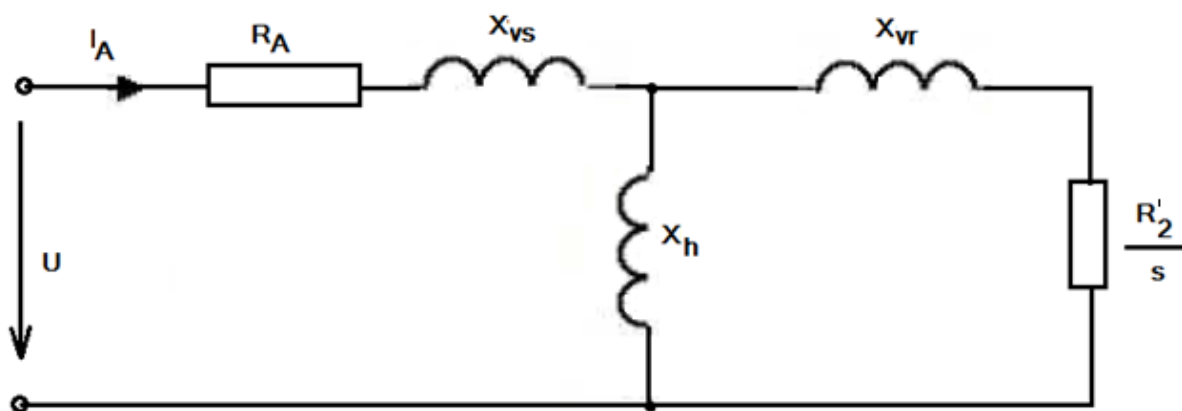
$$X_{2q} = X_{Aq} = 5,23\Omega \quad (2.86)$$

Celková rozptylová reaktance rotoru s uzavřenou rotorovou drážkou přepočtená na stator:

$$X_{vr} = X_{20} + X_{2d} + X_{2q} = 12,04 + 7,09 + 5,23 = 24,36\Omega \quad (2.87)$$

2.2.5 Zjednodušené náhradní schéma pro souměrný dvojfázový stroj:

$$R_A = 44,92\Omega; \quad X_h = 535,85\Omega; \quad X_{vs} = 69,79\Omega; \quad R'_2 = 34,3\Omega; \quad X_{vr} = 24,36\Omega$$



Obrázek 2.11 Zjednodušené náhradní schéma pro fiktivní souměrný dvojfázový stroj

2.3 Hmotnost motoru

Celková délka vodiče hlavního vinutí:

$$l_{ch} = N_A \cdot l_s = 870 \cdot 0,30255 = 263,2m \quad (2.88)$$

kde N_A je počet závitů hlavního vinutí statoru a l_s je střední délka závitu satorového vinutí

Celková délka vodiče pomocného vinutí:

$$l_{ch} = N'_A \cdot l_s = 870 \cdot 0,30255 = 263,2m \quad (2.89)$$

kde N_A je počet závitů pomocného vinutí statoru a l_s je střední délka závitu satorového vinutí

Hmotnost hlavního vinutí statoru:

$$m_{ch} = \rho_{cu} \cdot l_{ch} \cdot S_{AV} = 8900 \cdot 263,2 \cdot 0,105 \cdot 10^{-6} = 0,25kg \quad (2.90)$$

kde ρ_{cu} je hustota mědi (8900kg/m^3), l_{ch} je celková délka vodiče hlavního vinutí a S_{AV} je průřez vodiče hlavního vinutí

Hmotnost pomocného vinutí statoru:

$$m_{cp} = \rho_{cu} \cdot l_{cp} \cdot S'_{AV} = 8900 \cdot 263,2 \cdot 0,105 \cdot 10^{-6} = 0,25kg \quad (2.91)$$

kde ρ_{cu} je hustota mědi (8900kg/m^3), l_{cp} je celková délka vodiče pomocného vinutí a S'_{AV} je průřez vodiče pomocného vinutí

Hmotnost zubů statoru:

$$\begin{aligned} m_{zs} &= \rho_{Fe} \cdot Q_{cs} \cdot l \cdot b_{z1s} \cdot h'_{cs} = 7800 \cdot 12 \cdot 44 \cdot 10^{-3} \cdot 4,23 \cdot 10^{-3} \cdot 12,9 \cdot 10^{-3} \\ &= 0,21kg \end{aligned} \quad (2.92)$$

kde ρ_{Fe} je hustota železa (7800kg/m^3), Q_{cs} je celkový počet drážek statoru, l je délka železa statoru, b_{z1s} šířka zubu statoru a h'_{cs} je celková hloubka drážky statoru

Hmotnost jha statoru:

$$\begin{aligned} m_{js} &= \rho_{Fe} \cdot \left[\left(\frac{\pi \cdot d_{1s}^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_{2s}^2}{4} \right) \cdot l \right] = \\ &= 7800 \cdot \left[\left(\frac{\pi \cdot (108 \cdot 10^{-3})^2}{4} - \frac{\pi \cdot (70 \cdot 10^{-3})^2}{4} \right) \cdot 44 \cdot 10^{-3} \right] = 1,82kg \end{aligned} \quad (2.93)$$

kde d_{1s} je vnější průměr statoru, d_{2s} je vrtání statoru+délka drážky statoru, l je délka železa statoru a ρ_{Fe} hustota železa (7800kg/m^3)

Hmotnost rotoru:

$$\begin{aligned} m_r &= \rho_{Fe} \cdot \left[\left(\frac{\pi \cdot d_{1r}^2}{4} - Q_{cr} \cdot S_{idp} \right) \cdot l_r \right] = 7800 \cdot \left[\left(\frac{\pi \cdot 0,0434^2}{4} - 16 \cdot 15,71 \cdot 10^{-6} \right) \cdot 0,044 \right] = \\ &= 0,42kg \end{aligned} \quad (2.94)$$

kde l_r je délka železa rotoru, Q_{cr} je celkový počet drážek rotoru, d_{1r} je vnější průměr rotoru, S_{idp} je celková plocha drážky rotoru s izolací a ρ_{Fe} je hustota železa

Hmotnost ložisek a dalšího příslušenství:

Provádí se odhad $m_d = 0,3\text{kg}$

Celková hmotnost motoru:

$$\begin{aligned} m_c &= m_{ch} + m_{cp} + m_{zs} + m_{js} + m_r + m_d = 0,25 + 0,25 + 0,21 + 1,82 + 0,42 + 0,3 = \\ &= 3,24kg \end{aligned} \quad (2.95)$$

kde m_{ch} je hmotnost hlavního vinutí statoru, m_{cp} hmotnost pomocného vinutí statoru, m_{zs} hmotnost zubů statoru, m_{js} hmotnost jha statoru m_r hmotnost rotoru a m_d hmotnost ložisek a dalšího příslušenství

2.4 Výpočet ztrát, účinnosti a momentu

Ztráty v železe:

$$\begin{aligned}\Delta P_{Fe} &= p_{1,0} \cdot (k_{dj} \cdot B'_{j1}{}^2 \cdot m_{js} + k_{dz} \cdot B'_{zs}{}^2 \cdot m_{zs}) = \\ &= 2,6 \cdot (1,6 \cdot 1,33^2 \cdot 1,83 + 1,82 \cdot 1,52^2 \cdot 0,21) = 15,65W\end{aligned}\quad (2.96)$$

kde $p_{1,0}$ je ztrátové číslo pro použité plechy tloušťky 0,5mm, k_{dj} a k_{dz} jsou činitele respektující nerovnoměrnosti rozložení magnetického toku, m_{js} je hmotnost jha statoru, m_{zs} hmotnost zubů statoru, B'_{j1} je sycení statorového jha, B'_{zs} je sycení v zubech

Při výpočtu ztrát statoru je třeba si uvědomit, že maximální indukce celého statoru není stejná, neboť pole zpětné složky zmenšuje sycení v ose pomocného vinutí. Pro výpočet ztrát vezmeme indukci o 5% nižší. $B'_{zs} = 0,95 \cdot B_{zs} = 0,95 \cdot 1,6 = 1,52T$ a $B'_{j1} = 0,95 \cdot B_{j1} = 0,95 \cdot 1,4 = 1,33T$

Ztráty ve vinutí statoru:

$$\Delta P_{Cu1} = R_A \cdot I_A^2 = 44,92 \cdot 0,59^2 = 15,64W \quad (2.97)$$

kde R_A je činný odpor hlavního vinutí statoru a I_A je proud hlavním vinutí statoru

Magnetizační proud

$$I_\mu = \frac{p \cdot U_m}{1,8 \cdot \chi_A \cdot N_A} = \frac{1 \cdot 487,27}{1,8 \cdot 0,91 \cdot 870} = 0,34A \cong I_0 \quad (2.98)$$

Kde p je počet pólových dvojic, U_m je magnetické napětí, χ_A činitel hlavního vinutí, N_A počet závitů hlavního vinutí a I_0 proud naprázdno přibližně roven magnetizačnímu

Ztráty v mědi rotoru od zpětné složky naprázdno:

$$\Delta P_{cu0} \cong \frac{1}{2} \cdot R'_2 \cdot I_0^2 = \frac{1}{2} \cdot 34,3 \cdot 0,34^2 = 1,98W \quad (2.97)$$

kde R'_2 je odpor rotoru přepočtený na stator a I_0 je proud naprázdno

Ztráty v mědi rotoru od zpětné složky:

$$\Delta P_{cuz} \cong \Delta P_{cu0} \cdot \left(\frac{I_A}{I_0}\right)^2 = 1,98 \cdot \left(\frac{0,59}{0,34}\right)^2 = 5,95W \quad (2.99)$$

kde ΔP_{cu0} ztráty v mědi rotoru od zpětné složky naprázdno, I_A proud hlavním vinutím statoru, I_0 proud naprázdno

Ztráty v mědi rotoru od sousledné složky:

$$\Delta P_{cus} \cong \frac{s}{1-s} \cdot \left(P + \Delta P_{mec h} + \frac{1}{2} \cdot \Delta P_{cuz}\right) = \frac{0,0876}{1-0,0876} \cdot \left(105 + 8,4 + \frac{1}{2} \cdot 5,95\right) = 11,04W \quad (2.100)$$

kde s je skluz, P mechanický výkon na hřídeli, ΔP mechanické ztráty, ΔP_{cus} ztráty od zpětné složky

Mechanické ztráty:

$$\Delta P_{mec h} = 0,08 \cdot P = 0,08 \cdot 105 = 8,4W \quad (2.101)$$

kde P je výkon motoru

Dodatečné ztráty při jmenovitém chodu:

$$\Delta P_d = 0,005 \cdot P = 0,005 \cdot 105 = 0,525W \quad (2.102)$$

kde P je výkon motoru

Příkon motoru:

$$\begin{aligned} P_1 &= P + \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Cuz} + \Delta P_{cus} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_d + \Delta P_{mec h} = \\ &= 105 + 15,57 + 5,95 + 11,04 + 15,65 + 0,525 + 8,4 = 162,13W \end{aligned} \quad (2.103)$$

kde P je výkon motoru, ΔP_{Cu1} ztráty ve vinutí statoru, ΔP_{Cuz} ztráty ve vinutí rotoru od zpětné složky, ΔP_{cus} ztráty ve vinutí rotoru od sousledné složky, ΔP_{Fe} ztráty v železe, $\Delta P_{mec h}$ mechanické ztráty.

Účinnost motoru:

$$\eta = \frac{P}{P_1} = \frac{105}{162,13} \cdot 100 = 64,76\% \quad (2.104)$$

kde P je výkon motoru a P_1 je příkon motoru

Záběrový moment vypočteného motoru:

$$M_z = \frac{U^2 \cdot p \cdot R'_2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot [(R_A + R'_2)^2 + (X_{Vs} + X_{Vr})^2]} = \frac{230^2 \cdot 1 \cdot 34,3}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot [(44,92 + 34,3)^2 + (69,79 + 24,36)^2]} = 0,38Nm \quad (2.105)$$

kde U je napětí na svorkách stroje, p počet pólových dvojic, R'_2 odpor rotoru přepočtený na stator, f kmitočet, R_A činný odpor hlavního vinutí statoru, x_{vs} je celková rozptylová reaktance statoru a x_{vr} je celková rozptylová reaktance rotoru přepočtená na stator

Maximální moment motoru:

$$M_{max} = \frac{U^2 \cdot p}{4 \cdot \pi \cdot f \cdot [R_A + \sqrt{R_A^2 + (X_{Vs} + X_{Vr})^2}]} = \frac{230^2 \cdot 1}{4 \cdot \pi \cdot 50 \cdot [44,92 + \sqrt{44,92^2 + (69,79 + 24,36)^2}]} = 0,564Nm \quad (2.106)$$

kde U je napětí na svorkách stroje p počet pólových dvojic, f kmitočet, R_A činný odpor hlavního vinutí statoru, x_{vs} je celková rozptylová reaktance statoru a x_{vr} je celková rozptylová reaktance rotoru přepočtená na stator

Záběrný proud:

$$I_z = \frac{U}{\sqrt{(R_A + R'_2)^2 + (x_{vs} + x_{vr})^2}} = \frac{230}{\sqrt{(44,92 + 34,3)^2 + (69,79 + 24,36)^2}} = 1,87A \quad (2.107)$$

kde U je napětí na svorkách stroje, R_A činný odpor hlavního vinutí statoru, x_{vs} je celková rozptylová reaktance statoru a x_{vr} je celková rozptylová reaktance rotoru přepočtená na stator

Jmenovitý moment motoru:

$$M_n = \frac{U^2 \cdot p \cdot \frac{R'_2}{s}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot [(R_A + \frac{R'_2}{s})^2 + (X_{Vs} + X_{Vr})^2]} = \frac{230^2 \cdot 1 \cdot \frac{34,3}{0,087}}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot [(44,92 + \frac{34,3}{0,087})^2 + (69,79 + 24,36)^2]} = 0,328 Nm \quad (2.108)$$

kde U je napětí na svorkách stroje, p počet pólových dvojic, R'_2 je odpor rotoru přepočtený na stator, s je skluz stroje, f je kmitočet, R_A činný odpor hlavního vinutí statoru, x_{vs} je celková rozptylová reaktance statoru a x_{vr} je celková rozptylová reaktance rotoru přepočtená na stator

Momentová přetížitelnost:

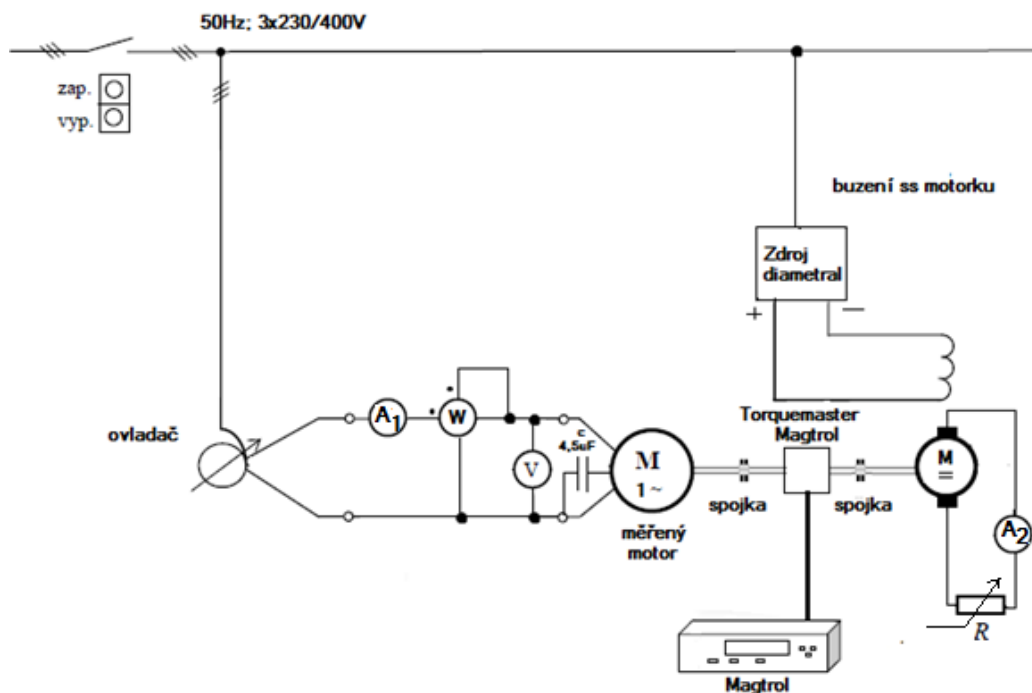
$$\frac{M_{max}}{M_n} = \frac{0,564}{0,328} = 1,72 \quad (2.109)$$

kde M_{max} je maximální moment a M_z je záběrný moment stroje

3 MĚŘENÍ NA MOTORKU FCJ4C82A

Měření motorku bylo prováděno v laboratořích elektrických strojů. Motorek zaslala na ústav Silnoproudé elektrotechniky a výkonové elektroniky firma ATAS NÁCHOD. Jedná se o speciální typ motorku, který firma ATAS vyváží především do Nizozemska.

3.1 Schéma zapojení:



Obrázek 3.1 Schéma zapojení při měření motorku FCJ4C82A

3.2 Seznam použitých přístrojů

A₁ – ampérmetr, METRA, t.p. 0,5, v.č.909398, feromagnetický přístroj

A₂ – ampérmetr, METRA, t.p. 1, v.č.461009, magnetoelektrický přístroj

W – wattmetr, METRA, t.p. 0,5, v.č.985398, 120V-12000Ω, elektrodynamický přístroj

V – voltmetr, METRA, t.p. 0,5, v.č.409851, magnetoelektrický přístroj

R – rezistor, METRA, v.č.1150502, 1200Ω

ss zdroj DIAMETRAL, U= 0-30V, I= 0-4A

Měřicí souprava MAGTROL, TORQUEMASTER, Model 6400, (n, P₂, M)

Multimetr – METEX, M3850D

Mechanický otáčkoměr

Pomocný kondenzátor 4,5μF

ss motor- U_a=24V, U_b=24V, I_a=3,7A, I_b= 0,3A, P=60W, n=3000ot. ATAS Náchod,

typ NK 3K8

1f motor-: U= 230V, P=105W, n=2740min⁻¹, I=0,79A, kondenzátor 5μF/400V, hmotnost 2,1kg, krytí IP 00, ATAS Náchod, typ FCJ4C82A

Vysvětlivky: t.p.-třída přesnosti, v.č –výrobní číslo.

3.3 Tabulky naměřených hodnot

3.3.1 Měření činného a pomocného vinutí statoru

Měření bylo provedeno na svorkách motorku FCJ4C82A před zahájením měření při cca20°C, a též po dokončení měření. Měření bylo provedeno multimetrem METEX.

	za studena	za tepla
	R _A [Ω]	R _A ' [Ω]
hlavní vinutí	43	47,3
pomocné vinutí	43	47,1

Tabulka 3.1 Měření činného odporu statorového vinutí

3.3.2 Měření naprázdno

Ovladačem nastaveno jmenovité napětí na U = 230V. Motorek bez zatížení. Odečten proud I₀ naprázdno (proud hlavním vinutím statoru); příkon P₀ a otáčky naměřeny mechanickým otáčkoměrem na hřídelce motorku.

U _N			I ₀			P ₀			n ₀
α	k	[V]	α	k	[A]	α	k	[W]	[min ⁻¹]
115	260/130	230	0,62	2/2	0,62	26	(240*1)/120	52	2975

Tabulka 3.2 Měření naprázdno

Z měření naprázdno lze vypočíst ztráty v železe, ztráty ve vinutí statoru a mechanické ztráty. Dále účinník naprázdno $\cos\varphi_0$ a magnetizační proud I_μ . Příkon naprázdno P_0 se spotřebuje na krytí ztrát ve vinutí statoru naprázdno ΔP_{Cu10} , ztrát mechanických ΔP_{mech} , ztrát v železe ΔP_{Fe} a ztrát v mědi rotoru od zpětné složky ΔP_{Cu0} . Ztráty v železe rotoru jsou zanedbatelné, protože skluz je při chodu naprázdno velmi malý.

Ztráty ve vinutí statoru naprázdno určíme z Jouleova zákona

$$\Delta P_{Cu10} = R_A \cdot I_0^2 = 43 \cdot 0,62^2 = 16,5W \quad (3.1)$$

kde R_A je činný odpor hlavního vinutí statoru a I_0 proud naprázdno (proud vinutím statoru)

Ztráty v mědi rotoru od zpětné složky naprázdno:

$$P_{Cu0} \cong \frac{1}{2} \cdot R'_2 \cdot I_0^2 = \frac{1}{2} \cdot 25,36 \cdot 0,62^2 = 4,87W \quad (3.2)$$

kde R'_2 je odpor rotoru přepočtený na stator a I_0 je proud naprázdno

Ztráty v železe:

$$\Delta P_{FE} = P_0 - \Delta P_m - \Delta P_{Cu10} - \Delta P_{Cu0} = 52 - 5,6 - 16,5 - 4,87 = 25W \quad (3.3)$$

kde P_0 je příkon naprázdno, ΔP_m ztráty mechanické. Změřené Torquemastrem při chodu naprázdno, kdy výkon motorku je přibližně dán krytím ztrát mechanických a ventilačních. Změřená hodnota $\Delta P_{mech}=5,6W$. ΔP_{Cu10} jsou ztráty ve vinutí statoru naprázdno a ΔP_{Cu0} ztráty v mědi rotoru od zpětné složky naprázdno

Účinník naprázdno:

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{U_N \cdot I_0} = \frac{52}{230 \cdot 0,62} = 0,36 \quad (3.4)$$

Magnetizační proud:

$$I_\mu = \sin\varphi_0 \cdot I_0 = 0,93 \cdot 0,62 = 0,57A \quad (3.5)$$

kde $\sin\varphi_0$ vypočteme z $\cos^2\varphi_0 + \sin^2\varphi_0 = 1 \rightarrow \sin\varphi_0 = \sqrt{1 - \cos^2\varphi_0} = \sqrt{1 - 0,36^2} = 0,93$ a I_0 je proud naprázdno

3.3.3 Měření nakrátko

Hřídelka mechanicky zabržděna. Proud I_{1k} nastaven pomocí ovladače na jmenovitou hodnotu 0,79A, Odečteno napětí U_{1K} nakrátko, příkon nakrátko P_{1K}

U_{1K}			I_{1k}			P_{1K}		
α	k	[V]	α	k	[A]	α	k	[W]
93	120/120	93	0,79	1/1	0,79	69,5	(120*1)/120	69,5

Tabulka 3.3 Měření nakrátko

Při zanedbání ztrát v železe a magnetizačních (proud) reakcích lze vypočíst z měření nakrátko odpor rotoru přepočtený na dvoufázový stator R'_2 . Záběrový moment změřen pomocí torquemastru při zabrzděném rotoru $M_z=0,21Nm$.

Odpor rotoru přepočtený na stator:

$$R'_2 = R_k - R_A - R_{Ap} = \frac{P_{1k}}{I_{1k}^2} - R_A - R_{Ap} = \frac{69,5}{0,79^2} - 43 - 43 = 25,36\Omega \quad (3.6)$$

kde R_k je odpor nakrátko, R_A odpor hlavního vinutí, R_{Ap} odpor pomocného vinutí, P_{1k} příkon nakrátko, I_{1k} proud nakrátko

3.3.4 Měření při zatěžování

Ovladačem nastaveno napětí na jmenovité $U_z = U_n = 230V$. Zapnuto buzení ss motorku pomocí zdroje. Pomocí rezistoru R zapojeného v obvodu kotvy docházelo k zatěžování a tím nastavování hodnot výkonu P_2 , které ukazoval torqueastr. Odečten proud I_z , příkon při různém zatížení P_1 , otáčky n a moment M pomocí torqueastru.

U_N			I_z			P_1			P_2	n	M	η	$\cos\varphi$
α	k	[V]	α	k	[A]	α	k	[W]	[W]	[min ⁻¹]	[Nm]	[%]	[-]
115	240/120	230	0,61	1/1	0,67	73	(240*1)/121	146	80	2816	0,271	54,79	0,947
			0,75		0,75	85	(240*1)/121	170	100	2779	0,351	58,82	0,986
			0,79		0,79	45	(240*2)/120	180	105,7	2775	0,337	58,72	0,991
			0,98		0,98	110	(240*1)/121	220	130	2638	0,465	59,09	0,976
			1,4		1,4	79	(240*2)/120	316	126,2	2328	0,540	39,94	0,981
			1,45		1,45	82	(240*2)/121	328	0	0	0,521	0,00	0,984

Tabulka 3.4 Měření při zatěžování

Z měření při zatěžování motorku lze zjistit moment zvratu, nazývaný také jako maximální moment $M_{\max}$. Zatížení se zvětšuje do doby, než se moment na měřící soupravě Torquemastru začne zmenšovat. Potom maximální hodnota momentu je moment zvratu. Změřený moment zvratu je tedy $M_{\max} = 0,540Nm$. Šedě označený řádek je měření při jmenovitých hodnotách motorku. Účinnost z měřených jmenovitých hodnot je 58,72% a účinník 0,991.

Výpočet účinnosti η a účinníku $\cos\varphi$ pro první řádek tabulky:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{80}{146} \cdot 100 = 54,79\% \quad (3.7)$$

kde P_2 je výkon a P_1 je je příkon zatěžovaného motorku

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{U \cdot I_z} = \frac{146}{230 \cdot 0,67} = 0,947 \quad (3.8)$$

kde P_1 je příkon, U_N napětí motorku jmenovité a I_z je proud ve fázi na vstupu do motorku

Skluz motorku při naměřených jmenovitých hodnotách:

$$s = \frac{n_s - n_n}{n_s} = \frac{3000 - 2775}{3000} = 0,075 \rightarrow 0,075 \cdot 100 = 7,5\% \quad (3.9)$$

kde n_s jsou synchronní otáčky stroje a n_n jsou naměřené jmenovité otáčky.

Ztráty v mědi statoru při jmenovitém chodu:

$$\Delta P_{Cu1} = R_A \cdot I_z^2 = 43 \cdot 0,79^2 = 26,84W \quad (3.10)$$

Ztráty v mědi rotoru od zpětné složky:

$$P_{cuz} \cong \Delta P_{cu0} \cdot \left(\frac{I_{An}}{I_0} \right)^2 = 4,87 \cdot \left(\frac{0,79}{0,62} \right)^2 = 7,9W \quad (3.11)$$

kde ΔP_{cu0} ztráty v mědi rotoru od zpětné složky naprázdno, I_{An} jmenovitý proud, I_0 proud naprázdno

Ztráty v mědi rotoru od sousledné složky:

$$P_{cus} \cong \frac{s}{1-s} \cdot \left(P + P_m + \frac{1}{2} \cdot \Delta P_{cuz} \right) = \frac{0,075}{1-0,075} \cdot \left(105,7 + 5,6 + \frac{1}{2} \cdot 7,9 \right) = 9,34W \quad (3.12)$$

Kde s je skluz vypočtený z měření jmenovitých hodnot, P mechanický výkon na hřídeli, ΔP_{mech} mechanické ztráty, ΔP_{cuz} ztráty od zpětné složky

3.3.5 Poměr závitů hlavního a pomocného vinutí

Měření je prováděno za stavu naprázdno a je odpojen pomocný kondenzátor. Rozběh se uskutečňuje pomocí síly (ruky) na hřídelce.

Měření napětí pomocného vinutí U_{B0} při napájení hlavního vinutí jmenovitým napětím U_N . Obrázek zapojení 3.2

U_N	U_{B0}	I_A
[V]	[V]	[A]
230	240	0,9A

Tabulka 3.5 Měření napětí pomocného vinutí

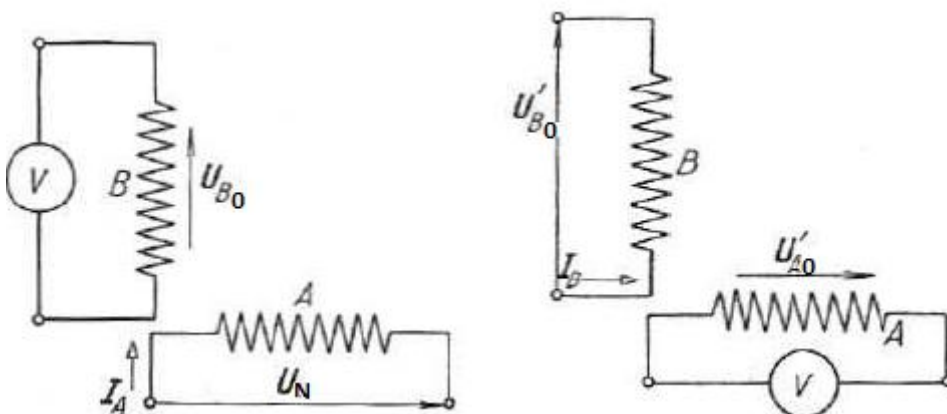
Měření napětí hlavního vinutí $U_{A0'}$ při napájení pomocného vinutí napětím 1,2 násobku změřeného napětí U_{B0} . Obrázek zapojení 3.3

$1,2 \cdot U_{B0'}$	$U_{A0'}$	I_B
[V]	[V]	[A]
288	200	0,52

Tabulka 3.6 Měření napětí hlavního vinutí

Poměr efektivních závitů hlavního a pomocného vinutí:

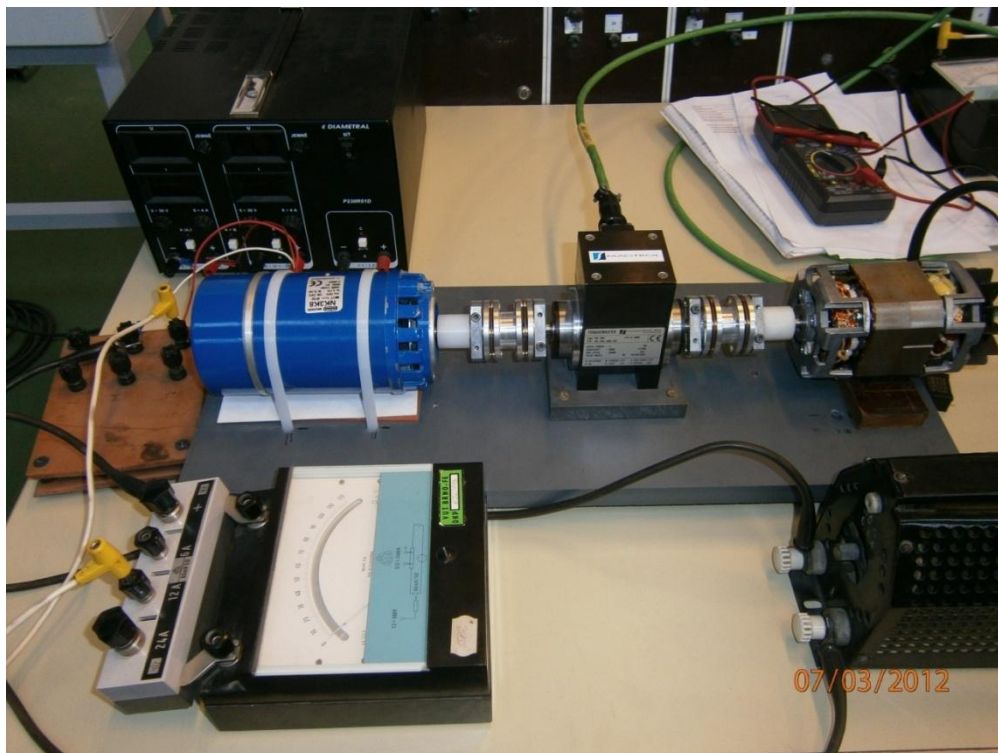
$$k_1 = \sqrt{\frac{U_{B0} \cdot U_{B0'}}{U_N \cdot U_{A0}}} = \sqrt{\frac{240 \cdot 288}{230 \cdot 200}} = 1,23 \quad (3.13)$$



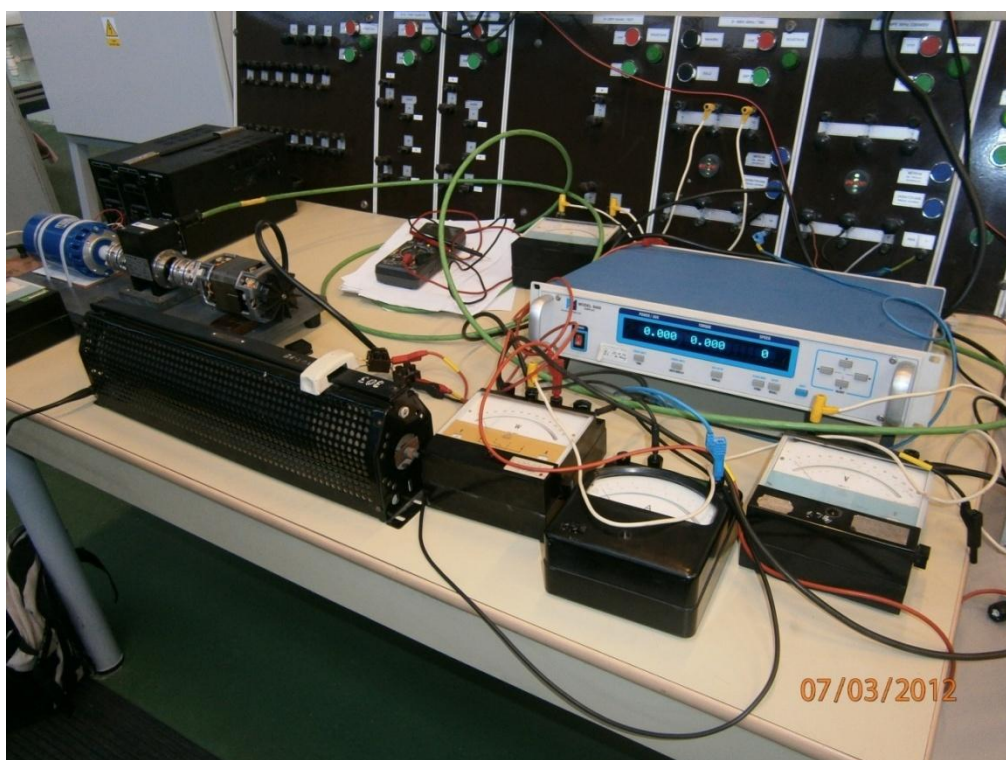
Obrázek 3.2 Měření pomocného vinutí

Obrázek 3.3 Měření hlavního vinutí

3.3.6 Ukázka z měření motorku FCJ4C82A



Obrázek 3.4 Měření motorku FCJ4C82A



Obrázek 3.5 Měření motorku FCJ4C82A

3.4 Porovnání a zhodnocení vypočtených a změřených parametrů a dodaných parametrů firmou ATAS Náchod

Název	Označení	Vypočtené	Udávané firmou ATAS	Změřené	Jednotka
Průměr vrtání statoru	d	44	38,5	-	[mm]
Délka železa statoru i rotoru	l	44	50	-	[mm]
Vnější průměr statoru	d_{1s}	108	85(hrany 72)	-	[mm]
Magnetický tok ve vzduchové mezeře	Φ	1,05E-03	-	-	[Wb]
Průměr drátu hlavního vinutí	d_{AV}	0,340	0,315	-	[mm]
Počet závitů hlavního vinutí	N_{AV}	0	696	-	[závitů]
Plocha drážky statoru	S_d	74	52	-	[mm ²]
Počet závitů pomocného vinutí	N'_{AV}	870	696	-	[závitů]
Šířka vzduchové mezery	δ	0,3	0,25	-	[mm]
Počet drážek statoru	Q_{cs}	12	12	-	[drážek]
Počet drážek hlavního vinutí statoru	Q_h	6	6	-	[drážek]
Počet drážek pomocného vinutí statoru	Q_p	6	6	-	[drážek]
Počet drážek rotoru	Q_{cr}	16	16	-	[drážek]
Vnější průměr rotoru	d_{1r}	43,4	38	-	[mm]
Plocha drážky rotoru	S_{idp}	15,71	10,31	-	[mm ²]
Činný odpor hlavního vinutí statoru	R_A	44,92	cca41,5	43	[Ω]
Odpor rotoru přepočtený na stator	R'_2	34,30	-	25,36	[Ω]
Poměr mezi hlavním a pomocným vinutím	k_1	1,00	-	1,23	[-]
Hmotnost motoru	m_c	3,24	2,1	-	[kg]
Ztráty v železe	ΔP_{FE}	15,64	-	25	[W]
Ztráty ve vinutí statoru	ΔP_{CU1}	15,57	-	26,84	[W]
Ztráty v mědi rotoru od zpětné složky	ΔP_{CUz}	5,95	-	7,9	[W]
Ztráty v mědi rotoru od sousledné složky	ΔP_{CUs}	11,04	-	9,34	[W]
Ztráty mechanické	ΔP_m	8,4	-	5,6	[W]
Příkon motoru	P_1	162,13	cca180	180	[W]
Účinnost	η	64,76	cca58	58,72	[%]
účinník	$\cos\varphi$	0,89	cca 0,98	0,991	[-]
Záběrný proud	I_Z	1,87	1,86	-	[A]
Záběrový moment	M_z	0,38	0,17	0,21	[Nm]
Jmenovitý moment	M_n	0,328	0,366	0,337	[Nm]
Maximální moment	M_{max}	0,564	cca0,555	0,54	[Nm]
Momentová přetížitelnost	M_{max}/M_n	1,72	1,5	1,60	[Nm]

Tabulka 3.7 Porovnání naměřených a vypočtených a dodaných hodnot firmou ATAS Náchod

V tabulce jsou uvedeny hodnoty získané výpočtem, měřením a dodané firmou ATAS Náchod. Naměřené hodnoty na motorku se téměř shodují s hodnotami dodanými firmou ATAS, malé odchylky byly způsobeny třídou přesnosti měřících přístrojů, dále pak kontakty mezi svorkami. Vypočtené parametry pomocí navržené metody se liší více. Při výpočtu sestavenou metodou vychází větší hmotnost motorku, což je dáno hlavně jeho větší velikostí. Nastává tak, protože se uvažuje poměr mezi vrtáním a vnějším průměrem statoru jako přibližná hodnota $k_s \approx 0,5$. To má za následek vyšší účinnost, záběrový moment a tím i přetížitelnost stroje. Sestavením kruhového diagramu a odečtením hodnot (příkonu, ztrátám, momentů...) by se dosáhlo přesnějších výsledků než výpočtem. Avšak úkolem bylo sestavit co nejjednodušší metodu návrhu jednofázového asynchronního motoru s trvale připojeným kondenzátorem. Sestavení kruhového diagramu a odečet hodnot z něj, by byl náročnější než samotný návrh a výpočet motoru. V metodě návrhu je zahrnut i výpočet rozměrů drážek rotoru a statoru. Tento výpočet může sloužit jako orientační a následně výpočtář může zvolit přímo vyráběné plechy nabízené různými výrobci, s přímo stanovenými rozměry. Pro tento postup je, třeba dosadit rozměry zvolených plechů do výpočtu a výpočet podle nich přepočíst. Sestavená metoda vede k určení parametrů blízkým se parametrům vyráběného motoru. Pro správný návrh a tím dosažení přesnějších výsledků, je zapotřebí výpočet přímo kontrolovat praxí, neboť ve výpočtech nelze uvažovat s výrobními odchylkami. To platí hlavně u motorků s malými výkony, protože odchylky u malých motorků mají značný vliv. V této sestavené metodě se navíc spousta hodnot volí nebo odečítá z tabulek a grafů a pro malé motorky o malých výkonech, jsou hodnoty voleny na začátku charakteristik a to značně ovlivňuje přesnost výpočtů.

4 PROGRAMOVÉ ŘEŠENÍ PRO NÁVRH JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU

4.1 Popis programu

Jednoduchý program pro výpočet jednofázového asynchronního motoru s trvale připojeným kondenzátorem byl navrhnut v programu Microsoft Office Excel 2007. Program se skládá ze tří částí (hlavní program, kontrola návrhu, výpočet parametrů), které jsou rozděleny do jednotlivých listů na spodní liště programu. Na dalších listech jsou grafy a tabulky potřebné pro volbu různých parametrů při výpočtu motoru. List s názvem hlavní program obsahuje vstupní zadávací parametry asynchronního motoru, výpočet hlavních rozměrů železa, hlavního vinutí statoru, výpočet rozměrů statoru a jeho drážky, pomocného vinutí statoru, tyčí rotoru, rozměrů drážky rotoru a kapacity kondenzátoru. List s názvem kontrola návrhu obsahuje výpočet činného odporu vinutí statoru, hlavní reaktance statoru, rozptylové reaktance statoru a rotoru. List s názvem výpočet parametrů obsahuje výpočet ztrát, momentů a účinnosti navrženého motoru. Vypočtené parametry se automaticky přepočítávají podle zadaných vstupních a volených hodnot. Vstupní parametry pro výpočet lze zadat jen v určitých mezích. Je to způsobeno volbou různých parametrů při výpočtu, které se buď volí v určitém rozmezí, nebo se hledají v tabulkách a grafech. Takto získané parametry jsou v této metodě návrhu jen pro dané výkony, napětí a počty pólových dvojic. Výkon (P) lze tedy zadat v rozmezí 50-1200W, napětí (U) 110, 230 a 400V a počet pólových dvojic (p) $2p=2$ a $2p=4$.

Uživatel nejdříve musí zadat vstupní parametry svého navrhovaného jednofázového motoru (napětí, kmitočet, počet pólových dvojic, a otáčky). Dále uživatel volí takzvané volené hodnoty, nutné pro výpočet, tyto parametry se volí v určitých mezích nebo se odečítají z tabulek a grafů v listách. Pro tyto volby a odečty je potřeba určitá citlivost a znalost (zkušenost) uživatele při návrhu motoru. Ke každé buňce s červeným trojúhelníčkem v pravém rohu je napsán komentář, který se zobrazí najetím kurzoru myši na danou buňku. V komentáři je popsán název a u volených hodnot i rozmezí jejich volby nebo to z jaké tabulky či grafu hodnotu zvolit.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	
5															
6			Parametry jednofázového asynchronního motoru-zadává uživatel												
7															
8			U	P	f	p	n								
9			[V]	[W]	[Hz]	[-]	[ot/min]								
10			230	105	50	1	2740								
11															
12															
13															
14			Výpočet hlavních rozměrů železa												
15			Vypočtené parametry												
16			P ₃	111	[W]										
17			α _c	1,05	[1]										
18			S ₃												
19			n _s												
20			d ² l												
21			q	3	[-]										
22			α	30	[°]										
			Volené hodnoty uživatelem												
			γ	0,95	[-]										
			cosφ ₃ η ₃	0,452	[1]										
			B _δ	0,54								155	[A/cm]		
			Q _h	6	[T]							6	[drážek]		
			Q _{cs}	12	[drážek]							16	[drážek]		

Obrázek 4.1 Ukázka programu pro návrh jednofázového asynchronního motoru s trvale připojeným kondenzátorem

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
	Výpočet pomocného vinutí statoru												
	χ'_A	0,91	[-]										
	q_p	3	[drážek]										
	N'_A	871	[závitů]				k_1	1	[-]				
	N'_{d1}	290	[závitů]										
	S'_{AV}	0,105	[mm ²]										
	d'_A	0,365	[mm]										
	Výpočet tyčí rotoru (vinutí)												
	d_{1r}	43,4	[mm]				δ	0,3	[mm]				
	χ_b	0,994	[-]				K_n	8	[mm]				
	s	0,0867	[-]				ΔP_m	8,4	[W]	ε_2	0,1	[-]	
	R_t'	1,06E-04	[Ω]										
	I_{dt}	82,13	[A]										
	S_{rt}	13,69	[mm ²]										
	I_{DKR}	210,49	[A]				σ_{dt}	6	[A/mm ²]				
	S_{kr}	35,08	[mm ²]										
	Výpočet rozměrů drážky rotoru												
	τ_{1r}	8,52	mm				b_{dr}	0,8	[mm]				
	d_{dr}	4,5	[mm]				R_{dr}	1,5	[T]				
	S_{dr}	15,73	[mm ²]										
	Hlavní program												
	Kontrola návrhu	Vypočtené parametry	Tabulka 1	Tabulka 2	Tabulka 3	Tabulka 4	Tabulka 5	Graf 1	Graf 2	Graf 3	Graf 4	Graf 5	Graf 6

Obrázek 4.2 Ukázka programu pro návrh jednofázového asynchronního motoru s trvale připojeným kondenzátorem-odkaz na tabulku 2

5 ZÁVĚR

První kapitola se zabývá základními principy, rozdělením, použitím trojfázových a jednofázových asynchronních motorů. Jsou zde uvedeny také možnosti získávání záběrného momentu jednofázového asynchronního motoru. O asynchronních motorech lze napsat mnoho údajů a dat, proto první kapitola je napsána, tak aby stručně a přehledně vysvětlila problematiku asynchronních motorů. První část kapitoly je společná jak pro trojfázový asynchronní motor, tak pro jednofázový asynchronní motor, potom je o každém motoru pojednáno zvlášť. Pro analýzu byl vybrán jednofázový asynchronní motor s trvale připojeným kondenzátorem (FCJ4C82A) od firmy Atas Náchod. Parametry motoru jsou: $U = 230\text{V}$, $P = 105\text{W}$, $n = 2740\text{min}^{-1}$, $I = 0,79\text{A}$, kondenzátor $5\mu\text{F}/400\text{V}$, hmotnost $2,1\text{kg}$, krytí IP 00. Po prostudování několika metod návrhů asynchronních motorů od různých autorů (literatura 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11), byl sestaven postup výpočtu jednofázového asynchronního motoru (FCJ4C82A). Postup výpočtu lze použít, pouze pro jednofázové motory o malém až středním výkonu. Je to způsobeno volbou mnoha parametrů, které lze u malých motorů odhadnout nebo popřípadě úplně zanedbat. Pro návrh motoru byly vypočteny hlavní rozměry železa statoru a rotoru, drážky rotoru i statoru, hlavní vinutí, pomocné vinutí statoru, tyče rotoru. Tvar drážek rotoru byl zvolen kulatý typu k. U statoru zvolen tvar drážek typu L. Dále byla provedena kontrola návrhu motoru, při které byly vypočteny parametry náhradního schématu motoru a vypočteny ztráty, účinnost, momenty navrhovaného motoru. Správnost sestaveného výpočtu, byla ověřena na motorku, který vyrábí firma Atas Náchod (FCJ4C82A). Porovnání vypočtených hodnot sestavenou metodou s naměřenými hodnotami na ústavu UVEE a dodanými hodnotami firmou ATAS. Účinnost motoru výpočtem vyšla $64,76\%$, což je o $6,76\%$ víc než udává firma Atas. Je to způsobeno tím, že navrhovaný motor je větší s větší hmotností (o $1,14\text{ kg}$) a tím pádem je i větší účinnost. Hlavním cílem práce bylo sestavit postup výpočtu a zaimplementovat ho do jednoduchého programu pro návrh jednofázového asynchronního motorku s pomocnou fází. Jednoduchý program byl sestaven v prostředí Microsoft Excel 2007. Navrhnutý jednoduchý program pro výpočet bude používat firma EMP s.r.o. Slavkov u Brna pro ulehčení návrhů motorů. Metodou sestaveného výpočtu se dosáhne celkem přesných hodnot hlavně pro motory o větších výkonech. Avšak pro její správnost a doladění je třeba metodu prověřit výpočty několika dalších motorů, které budou zároveň podloženy praxí.

LITERATURA

Internetové stránky:

1. Vlastnosti frekvenčně řízených pohonů s jednofázovými asynchronními motory [online]. 2010 [cit. 2012-05-09]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=40420
2. Asynchronní motor [online]. 2011 [cit. 2012-05-09]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Asynchronní_moto
3. Jednofázové asynchronní elektromotory [online]. 2009 [cit. 2012-05-09]. Dostupné z: <http://www.atas.cz/products.php?sekce=2&menuid=13&lng=cz>
4. FCJ4C82A [online]. [cit. 2012-05-09]. Dostupné z: <http://www.atas.cz/files/FCJ4C82A.pdf>
5. ČERVENÝ. Stavba elektrických strojů [online]. 2009 [cit. 2012-05-09]. Dostupné z: <http://webs.zcu.cz/fel/kev/SES1/SES1/SES-obecn%20%20%9F%A0st.pdf>

Knihy a skripta:

6. ŠTĚPINA, Jaroslav. Jednofázové indukční motory. Praha : SNTL, 1957. 200s
7. ŠEVČÍK, Pavel. Výpočet jednofázového asynchronního motoru. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 80 s.
8. SCHLESINGER, P. Návrh jednofázového asynchronního motoru s pomocnou fází. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 43 s.
9. VÁCHA, Pavel. Výpočet jednofázového asynchronního motoru. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 74s
10. KOTAL, Miroslav; NOVOTNÝ, Petr; VOŽENÍLEK, Petr. Příklady výpočtu elektrických strojů točivých. první. Praha 1, Husova 5 : ČVUT, 1974. 140 s.
11. CIGÁNEK, Ladislav. Stavba elektrických strojů. Praha : SNTL, 1958. 714 s.
12. SVOREŇ, J. Návrh a analýza třífázového asynchronního motoru. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 55 s.
13. Ing. JAGER, Vladimír, et al. Elektrotechnika : pro střední průmyslové školy. Praha : SNTL, 1969. 368 s. 04-19-69.
14. KNOTEK, Jaroslav. Navíjení a převíjení asynchronních elektromotorků. Praha : SNTL, 1970. 316 s. 04-518-70.
15. ONDRŮŠEK, Čestmír. Elektrické stroje. VUT, 199?. 79 s. Skriptum. VUT.

PŘÍLOHA 1: PRŮMĚRY VODIČŮ SE SMALTEM A BEZ SMALTU [³⁶]

Holý vodič	Vodič se smaltem	Holý vodič	Vodič se smaltem
d_a	d_{av}	d_a	d_{av}
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0,03	0,042	0,475	0,51
0,04	0,052	0,5	0,535
0,05	0,062	0,53	0,57
0,056	0,071	0,56	0,6
0,063	0,078	0,6	0,64
0,071	0,086	0,63	0,67
0,08	0,095	0,67	0,71
0,09	0,105	0,71	0,75
0,1	0,115	0,75	0,8
0,112	0,132	0,8	0,85
0,125	0,145	0,85	0,9
0,132	0,152	0,9	0,95
0,14	0,16	0,95	1
0,15	0,17	1	1,05
0,16	0,18	1,06	1,12
0,17	0,19	1,12	1,18
0,18	0,2	1,18	1,24
0,19	0,21	1,25	1,31
0,2	0,22	1,32	1,38
0,212	0,237	1,4	1,46
0,224	0,249	1,5	1,56
0,236	0,261	1,6	1,66
0,25	0,275	1,7	1,76
0,265	0,29	1,8	1,86
0,28	0,305	1,9	1,96
0,3	0,325	2	2,06
0,315	0,345	2,12	2,19
0,335	0,365	2,24	2,21
0,355	0,385	2,36	2,43
0,375	0,405	2,5	2,57
0,4	0,43	2,65	2,72
0,425	0,46	2,8	2,87
0,45	0,485	3	3,07

³⁶ KNOTEK, Jaroslav. Navíjení a převíjení asynchronních elektromotorků. Praha : SNTL, 1970. 316 s. 04-518-70.



PŘÍLOHA 2

Program v Excelu 2007 pro návrh jednofázového asynchronního motoru s trvale připojeným kondenzátorem je přiložen na CD.