



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

ASYNCHRONNÍ MOTORY MALÉHO VÝKONU

SMALL INDUCTION MOTORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

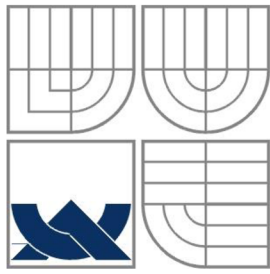
Štěpán Chvatík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

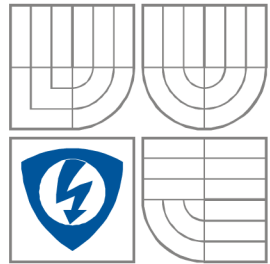
prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc.

BRNO 2016



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

ASYNCHRONNÍ MOTORY MALÉHO VÝKONU

SMALL INDUCTION MOTORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Štěpán Chvatík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc.

BRNO, 2016

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Štěpán Chvatík

ID: 164738

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Asynchronní motory malého výkonu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Uveďte a porovnejte způsoby získávání záběrového momentu u jednofázového asynchronního motoru
2. Popište motor s pomocnou fází a trvale připojeným kondenzátorem a způsob určení velikosti kondenzátoru.
3. Navrhněte hlavní zásady postupu výpočtu jednofázového asynchronního motoru s pomocnou fází a ověřte na kontrolním příkladu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] PETROV, G. N. Elektrické stroje 2: Asynchronní stroje - synchronní stroje. 1. vyd. Praha: Academia Praha, 1982. ISBN 509-21-857.

[3] CIGÁNEK, Ladislav. Stavba elektrických strojů. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1958. ISBN 36 174-57.

[3] ŠTĚPINA Jaroslav Jednofázové indukční motory. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1957. ISBN 36 174-57.

Termín zadání: 21.9.2015

Termín odevzdání: 31.5.2016

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

Konzultant bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá jednofázovým asynchronním motorem a je rozdělena do pěti kapitol. V úvodu je stručně popsána jeho konstrukce a provedeno srovnání s motorem trojfázovým.

První kapitola popisuje vznik točivého magnetického pole motoru, způsoby získávání záběrného momentu, vliv zapojení na vlastnosti motoru, a porovnání momentových charakteristik.

Ve druhé kapitole je rozebrán jednofázový asynchronní motor s pomocnou fází a trvale připojeným kondenzátorem, jeho výpočet a provozní optimalizace.

Třetí kapitola se pak zabývá stanovením obecných zásad a postupem výpočtu jednofázového asynchronního motoru s pomocnou fází.

Čtvrtá část je ověřuje správnost těchto postupů na vybraném motoru, kdy jsou provedeny výpočty na základě vstupních parametrů tohoto motoru, které jsou následně porovnávány s výstupními parametry předepsanými výrobcem.

Ověření relevantnosti deklarovaných parametrů je v poslední kapitole podpořena měřeními na samotném stroji a jeho následném vyhodnocení.

Abstract

This bachelor's thesis deals with a single-phase induction motor and is organized in five sections. In the introduction is briefly described its construction and compared with three-phase induction motor.

The first chapter describes the emergence of a rotating magnetic field of motor, methods of obtaining the starting torque, the influence on properties of different types of motors, comparing the torque characteristics of the different types of motors.

In the second chapter is discussed permanent-split capacitor induction motor, its calculation and operational optimization.

The third chapter deals with the determination of general principles of calculation and calculation method of single-phase induction motor with auxiliary winding.

The fourth part verified the accuracy of these procedures on the selected motor when we performed calculations based on the input parameters of the motor, and after that these calculations are compared with the output parameters which are prescribed by the manufacturer.

Verification of the relevance of declared parameters is supported by measurements on the mentioned device and their evaluation.

Klíčová slova

Jednofázový asynchronní motor; konstrukce; záběrný moment; trvale připojený kondenzátor; kondenzátorový motor; parametry motoru; vinutí; stator; rotor; výpočet; měření; účinnost

Keywords

Single-phase induction motor; construction; starting torque; permanent-split capacitor induction motor; capacitor induction motor; parameters of induction motor; winding; stator; rotor; calculation; measuring; efficiency

Bibliografická citace

CHVATÍK, Š. *Asynchronní motory malého výkonu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 53 s. Vedoucí semestrální práce prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Asynchronní motory malého výkonu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne

Podpis autora

Poděkování

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

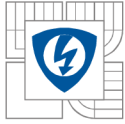
V Brně dne

Podpis autora

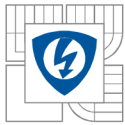


OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
ÚVOD	14
1 ZPŮSOBY ZÍSKÁVÁNÍ ZÁBĚRNÉHO MOMENTU	15
1.1 JEDNOFÁZOVÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR S ODPOREM V POMOCNÉ FÁZI	16
1.2 JEDNOFÁZOVÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR S TLUMIVKOU V POMOCNÉ FÁZI	16
1.3 JEDNOFÁZOVÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR S KONDENZÁTOREM V POMOCNÉ FÁZI	16
1.3.1 ZAPOJENÍ S ROZBĚHOVÝM KONDENZÁTOREM.....	16
1.3.2 ZAPOJENÍ S TRVALE PŘIPOJENÝM KONDENZÁTOREM	17
1.3.3 ZAPOJENÍ S ROZBĚHOVÝM A TRVALE PŘIPOJENÝM KONDENZÁTOREM.....	17
1.4 JEDNOFÁZOVÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR SE STÍNĚNÝM PÓLEM.....	18
1.5 TROJFÁZOVÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR PŘIPOJENÝ NA JEDNOFÁZOVOU SÍŤ.....	19
1.6 MOMENTOVÉ CHARAKTERISTIKY A SHRUTÍ KAPITOLY	20
2 JEDNOFÁZOVÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR S POMOCNOU FÁZÍ A TRVALE PŘIPOJENÝM KONDENZÁTOREM.....	21
2.1 URČENÍ VELIKOSTI KONDENZÁTORU	22
2.1.1 ZÁKLADNÍ ROVNICE PRO OBECNÝ VÝPOČET MOTORU S POMOCNÝM VINUTÍM.....	22
2.1.2 KONDENZÁTOROVÝ MOTOR	24
2.1.3 PROVOZNÍ OPTIMUM KONDENZÁTOROVÉHO MOTORU	25
2.1.4 VÝPOČET KONDENZÁTORU A POMOCNÉHO VINUTÍ	27
3 OBECNÝ POSTUP VÝPOČTU JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU S POMOCNOU FÁZÍ.....	29
3.1 ČINNÉ ODPORY	29
3.2 ČINITELÉ VINUTÍ.....	30
3.3 REAKTANCE	31
3.3.1 HLAVNÍ REAKTANCE.....	31
3.3.2 ROZPTYLOVÁ REAKTANCE STATORU.....	32
3.3.3 ROZPTYLOVÁ REAKTANCE ROTORU PŘEPOČÍTANÁ NA STATOR.....	34
3.4 HLAVNÍ ROZMĚRY ŽELEZA	35
3.5 PŘEDBĚŽNÝ VÝPOČET ROZMĚRŮ DRÁŽEK A VINUTÍ	37
4 VÝPOČET JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU S TRVALE PŘIPOJENÝM KONDENZÁTOREM.....	40
4.1 VÝPOČET HLAVNÍCH ROZMĚRŮ ŽELEZA	40
4.2 PŘEDBĚŽNÝ VÝPOČET ROZMĚRŮ DRÁŽEK A VINUTÍ	41
4.2.1 VÝPOČET ROZMĚRŮ DRÁŽEK A VINUTÍ STATORU	41
4.2.2 VÝPOČET ROZMĚRŮ DRÁŽEK A TYČÍ ROTORU	43

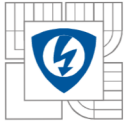


4.3 VÝPOČET VELIKOSTI KONDENZÁTORU MOTORU	44
5 MĚŘENÍ NA JEDNOFÁZOVÉM ASYNCHRONNÍM STROJI S TRVALE PŘIPOJENÝM KONDENZÁTOREM.....	45
5.1 MĚŘENÍ ČINNÝCH ODPORŮ VINUTÍ.....	45
5.2 MĚŘENÍ MOTORU NAKRÁTKO	45
5.3 MĚŘENÍ MOTORU NAPRÁZDNO	46
5.4 MĚŘENÍ ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKY.....	48
5.5 VYČÍSLLENÍ CELKOVÝCH ZTRÁT A VÝKON MOTORU PŘI JMENOVITÉM CHODU	48
5.6 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ VÝPOČTŮ A MĚŘENÍ S PARAMETRY UDÁVANÝMI VÝROBCEM MOTORU ..	49
6 ZÁVĚR.....	50
LITERATURA	51
PŘÍLOHA A	52
PŘÍLOHA B.....	53



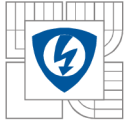
SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: Jednofázový asynchronní motor s trvale připojeným kondenzátorem [6]</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 2: Jednofázový asynchronní motor s pomocným vinutím [5]</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 3: Zapojení s rozběhovým kondenzátorem v pomocném vinutí [4]</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 4: Zapojení s trvale připojeným kondenzátorem v pomocném vinutí [4]</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 5: Zapojení s rozběhovým a trvale připojeným kondenzátorem v pomocném vinutí [4].....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 6: Jednofázový asynchronní motor se stíněným pólem (4 pólová konstrukce) [8].....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 7: Trojfázový asynchronní motor připojený na jednofázovou síť.....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 8: Porovnání záběrných momentů různých zapojení jednofázových asynchronních motorů (ideální chod naprázdno s malým skluzem s_0) [9]</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 9: Momentové charakteristiky jednofázového asynchronního motoru bez pomocné fáze a s kondenzátorem v pomocné fázi [4]</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 10: Schéma motoru s pomocným vinutím [3]</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 11: Schéma z Obr. 10 přepočtené na stejné závity [3]</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 12: Určení počtu závitů pomocného vinutí a potřebné kapacity [3]</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 13: Diagram pro určení součinu účinnosti a účinníku trojfázového stroje [3].....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 14: Diagram pro určení součinu účinnosti a účinníku jednofázového stroje s rozběhovým vinutím [3].....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 15: Diagram pro určení součinu účinnosti a účinníku jednofázového stroje s trvale připojeným kondenzátorem v pomocném vinutí [3]</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 16: Určení mechanických ztrát</i>	<i>47</i>



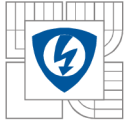
SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1: Velikosti trvale připojených a rozběhových kondenzátorů [10]</i>	<i>19</i>
<i>Tab. 2: Měrná vodivost γ v závislosti na materiálu vodiče a jeho teplotě [3]</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 3: Hodnoty součinitelů diferenčního rozptylu $\sigma_0 \cdot 100$ pro vinutí s plným krokem [3]</i>	<i>33</i>
<i>Tab. 4: Sousedná složka proudové hustoty v rotoru [3]</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 5: Naměřené hodnoty činného odporu hlavního a pomocného statorového vinutí motoru ...</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 6: Naměřené hodnoty motoru ve stavu nakrátko</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 7: Naměřené hodnoty motoru ve stavu naprázdno</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 8: Vyčíslení ztrát při měření motoru ve stavu naprázdno</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 9: Měření zatěžovací charakteristiky motoru.....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 10: Měření zatěžovací charakteristiky motoru.....</i>	<i>49</i>

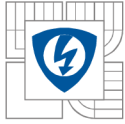


SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	[A/cm]	proudové zatížení obvodu statoru
B_{j1}	[T]	maximální magnetická indukce (sycení) statorového jha
B_{j2}	[T]	maximální magnetická indukce (sycení) rotorového jha
B_z	[T]	maximální magnetická indukce (sycení) zubu
B_δ	[T]	maximální magnetická indukce ve vzduchové mezeře
b'	[mm]	otevření drážky ve vzduchové mezeře
b_1'	[mm]	otevření drážky statoru ve vzduchové mezeře
b_2'	[mm]	otevření drážky rotoru ve vzduchové mezeře
b_z	[mm]	šířka zubu
C	[μ F]	kapacita
C_1	[F]	kapacita trvale připojeného kondenzátoru
d	[m]	vrtání statoru
d_A	[mm]	průměr vodiče hlavního vinutí A bez izolace
d_A'	[mm]	průměr vodiče hlavního vinutí A s izolací
d_1	[m]	vnější průměr statorových plechů
d_2	[m]	průměr statoru na dně drážky
d_{kr}	[m]	střední průměr spojovacího kruhu rotorových tyčí
f	[Hz]	frekvence
h_{js}	[mm]	šířka statorového jha
I_2	[A]	proud rotoru přepočtený na stator
I_{d2}, I_{i2}	[A]	sousledná a zpětná složka přepočteného proudu rotoru
I_A, I_B	[A]	proudy vinutí A a B
I_{dA}, I_{dB}	[A]	sousledné složky proudů I_A, I_B
I_{iA}, I_{iB}	[A]	zpětné složky proudů I_A, I_B
I_{dB}', I_{iB}'	[A]	přepočtená sousledná a zpětná složka proudu I_B
I_B	[A]	proud vinutí B
I_B'	[A]	proud vinutí B přepočtený na vinutí A
I_{dt}	[A]	sousledná složka proudu v rotorové tyči
I_t	[A]	efektivní hodnota proudu v tyči rotoru
I_0	[A]	proud naprázdno
I_k	[A]	proud nakrátko
I_μ	[A]	magnetizační proud
j	[-]	imaginární jednotka
k_1	[-]	poměr efektivních závitů pomocného a hlavního vinutí
k_{Cu}	[-]	poměr hmot mědi pomocného a hlavního vinutí
k_d	[-]	činitel využití plochy drážky bez drážkové izolace
k_i	[-]	činitel u zpětné impedance závislý na poměru hmot v mědi
k_s	[-]	poměr vnitřního a vnějšího průměru statoru
$k_{\delta 1}$	[-]	Carterův činitel pro stator
$k_{\delta 2}$	[-]	Carterův činitel pro rotor
l	[cm]	ideální délka statorového železa
l_z	[m]	střední délka závitů vinutí
l_t	[m]	délka tyče rotorové klece
M	[Nm]	moment
M_i	[Nm]	moment zpětné složky
M_m	[Nm]	moment zvratu
M_{dmC}	[Nm]	moment zvratu sousledné složky kondenzátorového motoru
M_{dm}	[Nm]	moment zvratu sousledné složky motoru bez pomocného vinutí
M_n	[Nm]	jmenovitý moment motoru
M_z	[Nm]	záběrný moment
m	[-]	počet fází statorového vinutí
m_A, m_B	[kg]	hmoty mědi vinutí A a B
N	[-]	počty závitů vinutí



N_I	[-]	počty závitů jednoho statorového vinutí
N_A, N_B	[-]	počty závitů vinutí A a B
n	[min ⁻¹]	otáčky
n_s	[min ⁻¹]	synchrónní otáčky
p	[-]	počet pólových dvojic
P	[kW]	výkon
P_I	[W]	příkon
P_n	[W]	jmenovitý mechanický výkon na hřídeli
P_δ	[W]	výkon přenášený přes vzduchovou mezeru
Q	[-]	počet drážek
Q_I	[-]	počet drážek statoru
Q_2	[-]	počet drážek rotoru (počet tyčí klece)
Q_{IA}	[-]	počet drážek připadajících na hlavní vinutí
Q_{IB}	[-]	počet drážek připadajících na hlavní vinutí
Q_p	[-]	počet drážek statoru na pól
q	[-]	počet drážek na pól a fázi
R_I	[Ω]	odpor jedné fáze souměrného statoru
R_2	[Ω]	přepočtený odpor rotoru
R_A	[Ω]	odpor vinutí A
R_B	[Ω]	odpor vinutí B
R_B'	[Ω]	přepočtený odpor vinutí B
R_{kr}	[Ω]	odpor spojovacího kruhu rotorových tyčí
R_t	[Ω]	odpor samostatné rotorové tyče
R_t'	[Ω]	odpor rotorové tyče při uvažování vlivu odporu spojovacích kruhů
S_3	[VA]	zdánlivý příkon trojfázového stroje
S	[mm ²]	průřez vodiče vinutí
S_A	[mm ²]	průřez statorového vodiče hlavního vinutí A
S_A'	[mm ²]	průřez statorového vodiče hlavního vinutí A s izolací
S_d	[mm ²]	plocha drážky bez izolace
S_{kr}	[mm ²]	plocha spojovacího kruhu
S_t	[mm ²]	průřez rotorové tyče
S_δ	[mm ²]	plocha jednoho pólu ve vzduchové mezeře
s	[-]	skluz
δ	[mm]	délka zešíkmení drážek
U	[V]	napětí
U_n	[V]	jmenovité napětí
U_A, U_B	[V]	napětí na vinutí A a B
U_{Cl}	[V]	napětí na kondenzátoru
U_{dA}, U_{dB}	[V]	sousledné složky napětí U_A, U_B
U_{iA}, U_{iB}	[V]	zpětné složky napětí U_A, U_B
U_{dB}', U_{iB}'	[V]	přepočtená sousledná a zpětná složka napětí U_B
U_B'	[V]	napětí vinutí B přepočtené na vinutí A
U_m	[A]	magnetické napětí
$U_{m\delta}$	[A]	magnetické napětí ve vzduchové mezeře
U_{mz1}	[A]	magnetické napětí zubů statoru
U_{mz2}	[A]	magnetické napětí zubů rotoru
U_{mj1}	[A]	magnetické napětí jha statoru
U_{mj2}	[A]	magnetické napětí jha rotoru
X_{rA}	[Ω]	rozptylová reaktance hlavního vinutí
X_{A0}	[Ω]	diferenční rozptyl statorového vinutí
X_{Ad}	[Ω]	rozptyl v drážce statoru
$X_{A\epsilon}$	[Ω]	rozptyl přes čela vinutí statoru
X_{Aq}	[Ω]	rozptyl statoru způsobený natočením drážek rotoru
X_{Az}	[Ω]	rozptyl přes hlavy zubů
X_{r2}	[Ω]	rozptylová reaktance rotoru přepočítaná na stator
X_{20}	[Ω]	diferenční rozptyl klecového rotoru



X_{2d}	[Ω]	rozptyl v drážce klecového rotoru
X_{2q}	[Ω]	rozptyl způsobený natočením drážek rotoru
X_h	[Ω]	hlavní magnetizační reaktance
X_h'	[Ω]	hlavní magnetizační reaktance samotné vzduchové mezery
X_{vA}	[Ω]	rozptylová reaktance vinutí A
X_{vB}'	[Ω]	přepočtená rozptylová reaktance vinutí B
y	[-]	krok cívky
Z_d	[Ω]	sousledná impedance
Z_i	[Ω]	zpětná impedance
Z_p	[Ω]	pomocná impedance
Z_p'	[Ω]	přepočtená pomocná impedance
α	[-]	úhel mezi sousedními drážkami v elektrických stupních
γ	[S·m·mm ⁻²]	měrná vodivost vodiče vinutí
γ_s	[-]	využití rozměrů stroje
δ	[mm]	vzduchová mezera
δ'	[mm]	efektivní vzduchová mezera
δ''	[mm]	ekvivalentní vzduchová mezera
ε_1	[-]	poměrný úbytek napětí na rozptylové impedanci statoru
ε_2	[-]	poměrný úbytek napětí statoru na zpětné vnitřní impedanci
η_1	[-]	účinnost jednofázového motoru
η_3	[-]	účinnost trojfázového motoru
λ	[-]	poměr délky železa k pólové rozteči
λ_ε	[-]	vodivost přes čela vinutí
λ_d	[-]	vodivost drážky
λ_z	[-]	vodivost zubu
σ_A	[A/mm ²]	proudová hustota hlavního vinutí A
σ_{dt}	[A/mm ²]	sousledná složka proudové hustoty v rotoru
σ_{A0}	[-]	součinitel diferenčního rozptylu statoru
σ_{20}	[-]	součinitel diferenčního rozptylu klecového rotoru
σ_q	[-]	součinitel rozptylu způsobený natočením drážek rotoru
σ_q'	[-]	součinitel rozptylu statoru způsobený natočením drážek rotoru
τ	[mm]	pólová rozteč
τ_d	[mm]	rozteč drážky
τ_{d2}	[mm]	rozteč drážky rotoru
φ_1	[°]	fázový posun jednofázového motoru
φ_3	[°]	fázový posun trojfázového motoru
Φ	[Wb]	indukční tok
χ	[-]	činitel vinutí
χ'	[-]	činitel rozlohy
χ''	[-]	činitel zkrácení kroku
χ_l	[-]	činitel vinutí statoru
χ_A, χ_B	[-]	činitelé vinutí A a B
χ_r	[-]	činitel natočení drážky rotoru
ω	[rad·s ⁻¹]	úhlový kmitočet
$\Delta''P_{Cui}$	[W]	část ztrát v mědi odbrzděná mechanicky
ΔP_{jA}	[W]	Jouleovy ztráty ve statorovém vinutí A ve stavu naprázdno
ΔP_{ji0}	[W]	ztráty způsobené zpětnou složkou proudu v rotoru
ΔP_k	[W]	konstantní ztráty
ΔP_{Fe}	[W]	ztráty v železe
ΔP_{mech}	[W]	mechanické ztráty
ΔP_{j1}	[W]	Jouleovy ztráty ve vinutí statoru při jmenovitém zatížení motoru
ΔP_{j2}	[W]	ztráty v rotoru
ΔP_{celk}	[W]	celkové ztráty
ΔR	[Ω]	rozdíl mezi odporem hlavního a pomocného vinutí
ΔX_v	[Ω]	rozdíl mezi rozptylovou reaktancí hlavního a pomocného vinutí

ÚVOD

Asynchronní motory patří v současné době mezi nejrozšířenější elektromotory. Mezi jejich největší přednosti patří jednoduchost, spolehlivost a nízká cena. Mají širokou škálu využití zejména v průmyslových aplikacích, kde jsou jimi poháněny zařízení, jako jsou čerpadla, ventilátory, kompresory a jiné.



Obr. 1: Jednofázový asynchronní motor s trvale připojeným kondenzátorem [6]

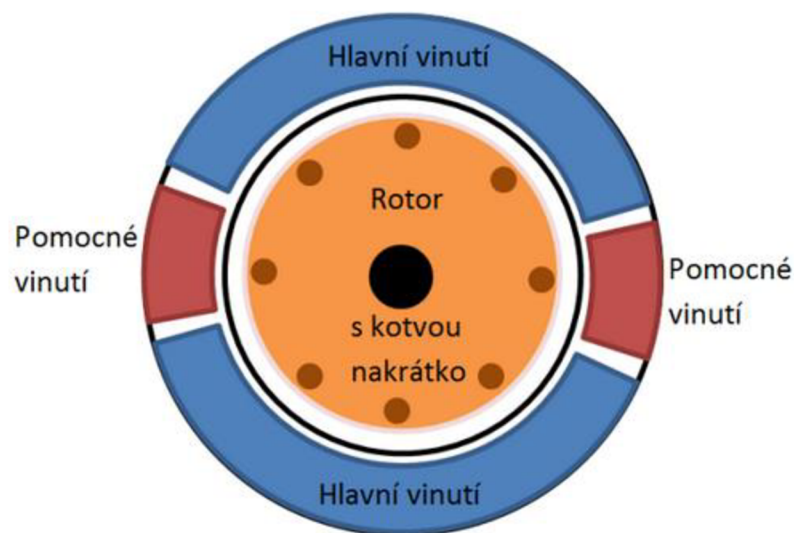
Tato bakalářská práce se zabývá asynchronními motory jednofázovými. Možnost napájení asynchronního motoru z jedné fáze se jeví jako výhodné zejména v místech, kde nemáme k dispozici trojfázový napájecí přívod, ale také pro zajištění vyšší bezpečnosti při použití nižšího napájecího napětí. Příkladem může být domácnost, kde je tento druh motoru využíván k napájení chladničkových kompresorů, praček, sekaček, a jiných zařízení, u kterých nepotřebujeme regulovat otáčky. Jednofázové napájení s sebou však nese jistou nevýhodu, jež spočívá v nerovnoměrné zátěži trojfázové napájecí sítě, což může mít, v případě většího zatížení, negativní vliv na její symetrii. Z uvedeného důvodu se jednofázové asynchronní motory vyrábějí zpravidla ve výkonech nepřesahujících 2 kW. Pro přenos vyšších výkonů se používá asynchronní motor trojfázový. [1]

1 ZPŮSOBY ZÍSKÁVÁNÍ ZÁBĚRNÉHO MOMENTU

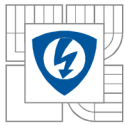
Proud ve statorovém vinutí, po připojení na síť, vytváří střídavé pulsující magnetické pole. Toto pole indukuje ve statorovém vinutí a rotorové kleci napětí s magnetickými toky vzájemně posunutými o 180 stupňů, takže při nulových otáčkách nevytváří žádný točivý moment, potřebný pro rozběh motoru (motor se chová jako transformátor).

Aby se motor mohl z klidového stavu samočinně roztočit, je nutné mu zajistit točivé magnetické pole. Toho lze dosáhnout umístěním dvojího vinutí do statoru, z nichž jedno označujeme jako hlavní a druhé jako pomocné vinutí. Hlavní vinutí je uloženo do 2/3 drážek statoru, pomocné do zbývajících 1/3. Hlavní statorové vinutí připojujeme na síť přímo, avšak u pomocného musíme zajistit fázový posun proudu o 90° oproti proudu tekoucím v hlavním vinutí. Toho docílíme zapojením přes kapacitu, indukčnost nebo odpor vhodné velikosti. Pomocné vinutí s odporem a indukčností lze použít pouze pro rozběh, tedy do okamžiku, než motor nabyde dostatečných otáček, poté jej odpojujeme. Odpojení vinutí zajistí odstředivý, magnetický, případně statický spínač. Kondenzátor lze použít jak pro rozběhové, tak i pro trvale připojené pomocné vinutí.

Jako další možnost se nabízí zapojení trojfázového asynchronního motoru na jednofázovou síť, případně je možné pro samočinný rozběh a chod motoru, avšak bez pomocného vinutí, použít statoru se stíněným pólem. Všechny možné způsoby jsou podrobněji popsány v následujících podkapitolách. [2]



Obr. 2: Jednofázový asynchronní motor s pomocným vinutím [5]



1.1 Jednofázový asynchronní motor s odporem v pomocné fázi

Vinutí s odporem v pomocné fázi je možné využít pouze pro rozběh motoru. Pro získání fázového posunu, tedy i záběrného momentu je využíváno pomocného vinutí s větší rezistivitou, než má vinutí hlavní. Hlavní vinutí bývá nejčastěji z mědi. Jako materiál pro pomocné vinutí může posloužit mosaz, která má pětkrát vyšší odpor než měď. Hodnoty záběrného momentu, které v tomto případě nejsou moc velké, lze ještě zvýšit snížením počtu závitů pomocného vinutí. Počet závitů však nelze snižovat neomezeně, z důvodu značného ohřívání tohoto vinutí v době rozběhu. Odpor lze zvýšit také zařazením odporové součástky do obvodu pomocné fáze. Tato součástka bude opět vystavena vysokému ohřevu, proto musí být značně teplotně odolná.

Zapojení s odporem je výhodné pro stroje s malým účínkem hlavního vinutí nakrátko. Pro příliš velké ztráty v odporovém vinutí, nízkou účinnost a celkově malou výkonovou zatížitelnost se zapojení s odporovou pomocnou fází prakticky nevyužívá. [3]

1.2 Jednofázový asynchronní motor s tlumivkou v pomocné fázi

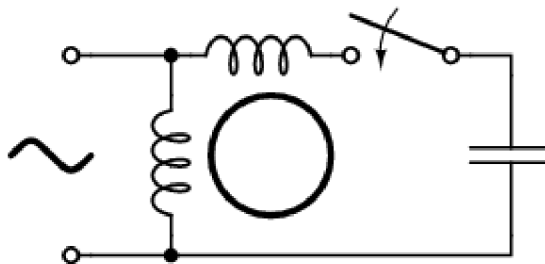
Stejně jako v předchozím případě je možné využití pomocné fáze s tlumivkou pouze při rozběhu motoru. Rozběhový charakter je téměř totožný jako v případě zapojení s odporovou pomocnou fází, s tím rozdílem, že směr otáčení bude opačný, z důvodů vyšší velikosti zpětné složky oproti sousledné. Tato varianta je poměrně nákladná (cena tlumivky) a její použití je výhodné pouze pro zařízení s velkým účínkem hlavního vinutí při zapojení nakrátko ($\cos \varphi_k \geq 0,8$). [3]

1.3 Jednofázový asynchronní motor s kondenzátorem v pomocné fázi

Kapacitní rozběh dosahuje zdaleka nejlepších vlastností v porovnání s předchozími způsoby zapojení, proto je v praxi využíván nejvíce. V praxi se můžeme setkat s různými variantami zapojení s kondenzátorem. [3]

1.3.1 Zapojení s rozběhovým kondenzátorem

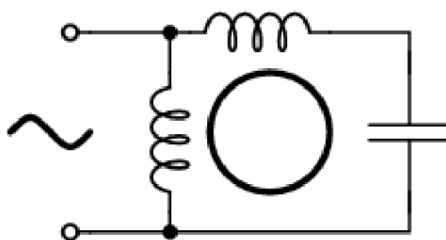
Toto zapojení má v pomocném vinutí připojený kondenzátor s rozběhovým spínačem v sérii. Kondenzátor o vysoké hodnotě kapacity, připojený při rozběhu, zajistí v pomocném vinutí posun fázového proudu o 90° oproti proudu ve vinutí hlavním. Tento kondenzátor zajistí silné točivé magnetické pole a zároveň velké záběrné momenty motoru při připojení na síťové napájecí napětí. Velký záběrný moment je nutný pro zařízení s těžkými rozběhy, například kompresory klimatizací. Vysoká hodnota kapacity kondenzátoru však není výhodná pro ustálený chod, jelikož zhoršuje účinník a celkovou účinnost motoru. Z těchto důvodů pomocný obvod, po rozběhu, ihned rozpojeme již zmíněným spínačem. [2,4]



Obr. 3: Zapojení s rozběhovým kondenzátorem v pomocném vinutí [4]

1.3.2 Zapojení s trvale připojeným kondenzátorem

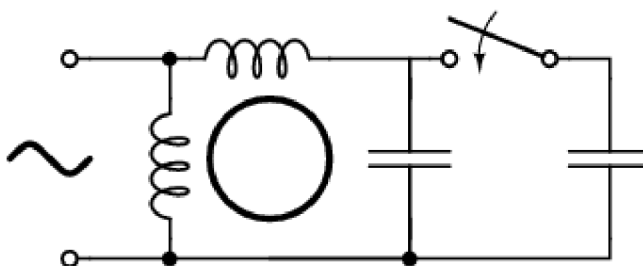
Aby bylo možné kondenzátor použít k trvalému chodu, musí být velikost jeho kapacity dostatečně velká, aby umožňovala rozběh, avšak ne příliš velká, aby nezhoršovala účinnost motoru. Záběrné momenty u tohoto zapojení jsou poměrně nízké, proto se využívá pouze pro nízké výkony (do 200 W). Tato varianta je také výhodná, pokud chceme jednoduchým způsobem měnit směr otáčení motoru. Pro dosažení změny směru otáčení pouze přepojíme kondenzátor do série s hlavním vinutím. Kondenzátor nesmí být elektrolytický, ale jiného druhu s nižšími ztrátami (př. plastový kondenzátor). Varianta s trvale připojeným kondenzátorem bude podrobněji rozebrána v kapitole 2. [2,4]



Obr. 4: Zapojení s trvale připojeným kondenzátorem v pomocném vinutí [4]

1.3.3 Zapojení s rozběhovým a trvale připojeným kondenzátorem

Tato varianta je kombinací zapojení s trvale připojeným a s rozběhovým kondenzátorem, kdy pro získání vysokého záběrného momentu máme připojen kondenzátor o velké kapacitě paralelně s kondenzátorem kapacity nízké. Po rozběhu motoru je kondenzátor s vyšší kapacitou odpojen, zatímco kondenzátor s nižší kapacitou zůstává v obvodu pomocného vinutí trvale zapojen. Získáme tak motor s velkým záběrným momentem a dobrým výkonem při jmenovitých otáčkách s poměrně vysokou účinností. [2,4]



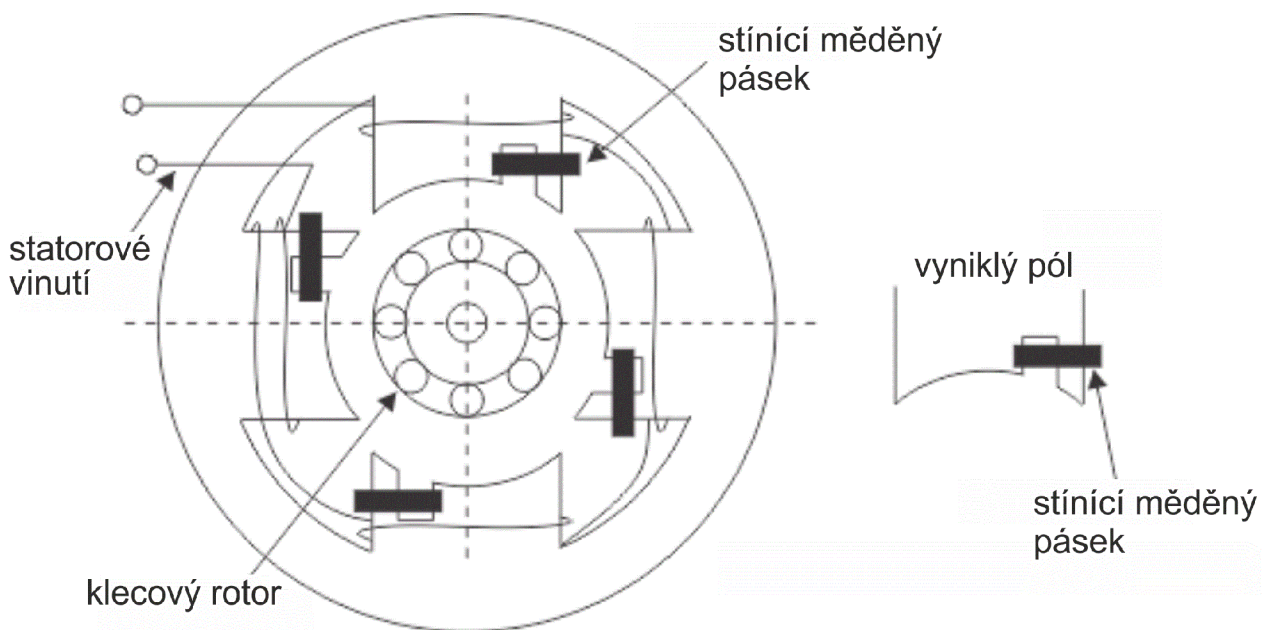
Obr. 5: Zapojení s rozběhovým a trvale připojeným kondenzátorem v pomocném vinutí [4]

1.4 Jednofázový asynchronní motor se stíněným pólem

Jednofázový asynchronní motor se stíněným pólem označujeme jako motor s úhlově nesouměrným vinutím statoru. Pro rozběh tohoto motoru se nevyužívá pomocné fáze. Statorové vinutí je navinuto na speciálně upravených pólech. Přibližně v jedné třetině každého pólového oblouku je výřezem vytvořena menší drážka, na kterou je navinut měděný pásek spojený nakrátko.

Připojením napájecího napětí vzniká ve statorovém vinutí magnetické pole, které indukuje elektrický proud v závitě nakrátko. Tento proud vytváří magnetický tok působící proti směru magnetického toku statorového vinutí. Díky prostorovému posunu závitů a fázovému posunu proudu v něm indukovaném, se naruší rovnováha sil proti sobě působících a motor se roztočí. Směr otáčení určuje poloha závitů a nelze jej změnit. Rotor bývá klecového vinutí.

Motor se stíněným pólem má velmi nízký záběrný moment, nízkou účinnost (pod 30%) a účinník (0,6). Avšak díky své jednoduchosti, nízkým výrobním nákladům a velmi tichému chodu se výhodně používá pro pohon ventilátorů a jiných menších spotřebičů, které pro svoji funkci nevyžadují velké záběrné momenty. Výkony těchto strojů většinou nepřesahují 50 W. [1, 7]

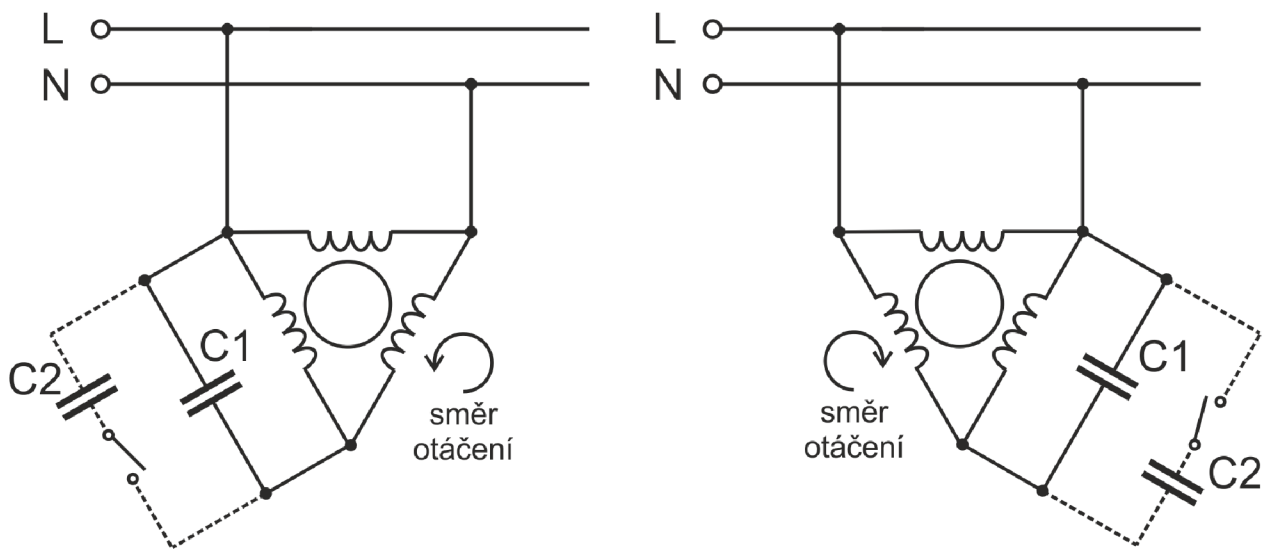


Obr. 6: Jednofázový asynchronní motor se stíněným pólem (4 pólová konstrukce) [8]

1.5 Trojfázový asynchronní motor připojený na jednofázovou síť

Možnost připojení trojfázového asynchronního stroje na jednofázovou napájecí síť uvítáme, pokud nemáme k dispozici napájecí síť trojfázovou. Aby bylo možné motor provozovat na síťovém napětí 230 V, je nutné jej nejprve zapojit do trojúhelníka, s tím že na svorky prvního vinutí přivádíme přímo jednofázové napětí, a na svorky druhého vinutí, které slouží jako pomocné, připojujeme kondenzátor vhodné kapacity. Svorky třetího vinutí zůstávají volné. Vznikne nám tak motor s hlavním a pomocným vinutím. Oproti napájení z trojfázové sítě získáme cca jen 30-40% záběrného momentu a výkon cca 70-80%, což je způsobeno jednak tím, že třetina statorových drážek zůstává nevyužita a také působením zpětného pole.

K rozběhu nezatížených motorů, nebo motorů malých výkonů je dostačující trvale připojený kondenzátor (C1). Pro rozběh trvale zatížených motorů vyšších výkonů je nutné použít navíc kondenzátor rozběhový (C2), který připojíme paralelně ke kondenzátoru trvale připojenému, tento je po rozběhu motoru odpojen. Směr otáčení stanovíme podle toho, na které vinutí jej připojíme. [10]



a) Směr otáčení vlevo

b) směr otáčení vpravo

Obr. 7: Trojfázový asynchronní motor připojený na jednofázovou síť

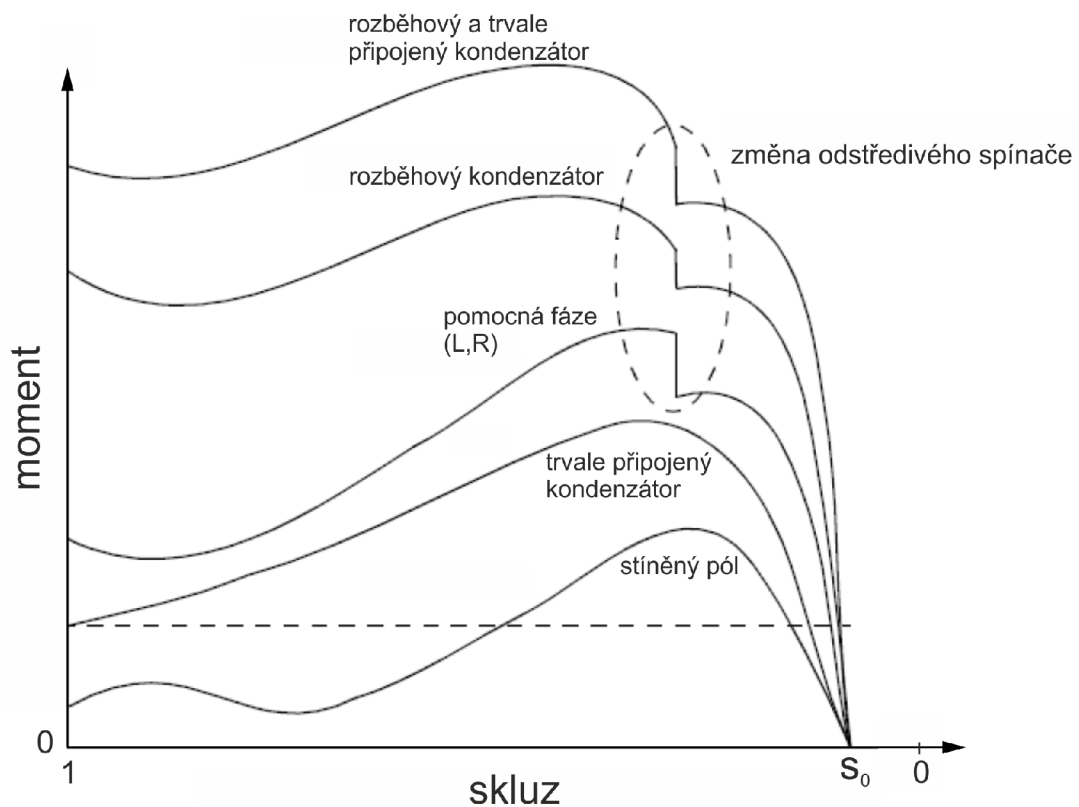
Tab. 1: Velikosti trvale připojených a rozběhových kondenzátorů [10]

Příkon motoru [W]	Trvale připojený kondenzátor C1 [μ F]	Rozběhový kondenzátor C2 [μ F]
100 - 200	5 až 8	8 až 10
200 - 300	8 až 12	10 až 16
300 - 500	10 až 16	16 až 24
500 - 750	16 až 25	25 až 40
750 - 1000	25 až 35	40 až 60

1.6 Momentové charakteristiky a shrnutí kapitoly

Na obrázku (Obr. 8) je vidět grafické znázornění záběrných momentů výše popsanych zapojení. Je zřejmé, že nejvyšších záběrných momentů dosáhneme při dvou kapacitním rozběhu. V praxi se přesto nejčastěji setkáme s jednofázovým motorem s trvale připojeným kondenzátorem v pomocné fázi. Důvodem je dostatečný záběrný moment, jednodušší konstrukce (odpadá nutnost spínače) a tedy i nižší cena a vyšší provozní spolehlivost než u předchozích zapojení s rozběhovou pomocnou fází.

Na momentové charakteristice je vidět skoková změna momentu při rozpojení rozběhové pomocné fáze. Dále je možné si všimnout sedla ve 2/3 skluzu momentové charakteristiky motoru se stíněným pólem, které je způsobeno vlivem vyšších harmonických.



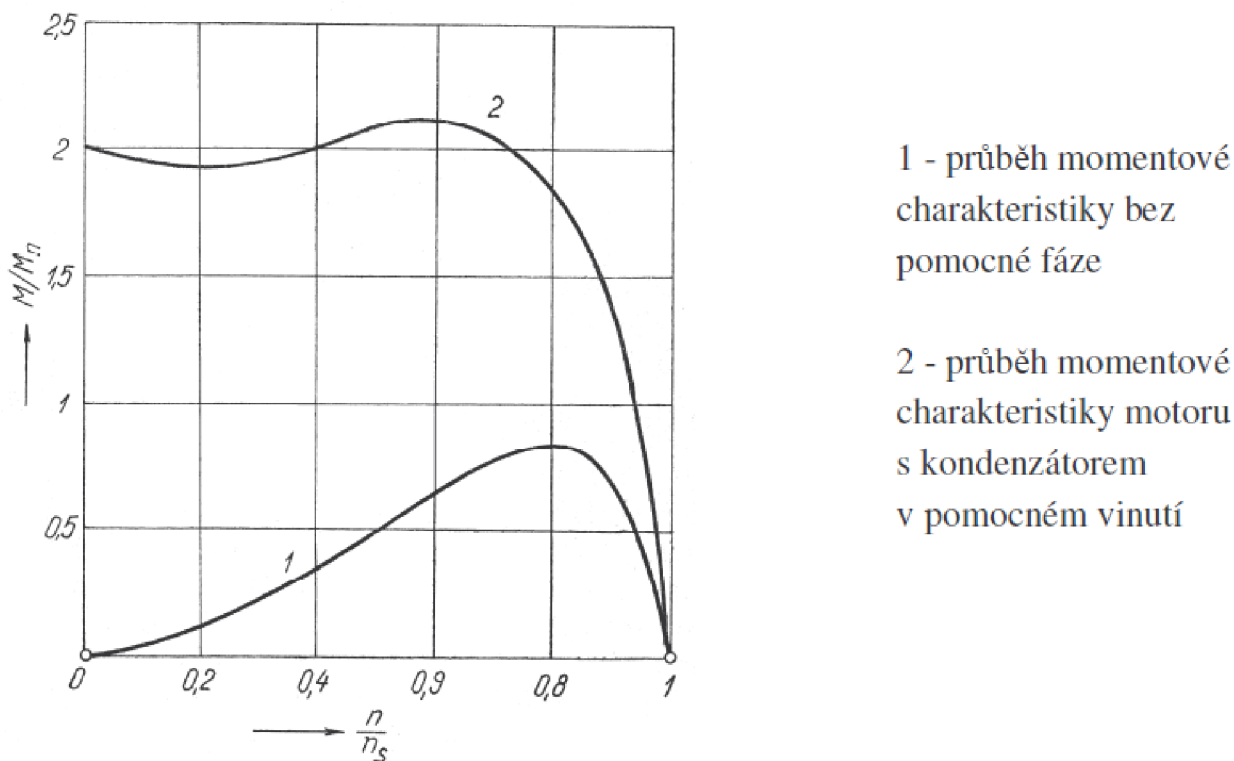
Obr. 8: Porovnání záběrných momentů různých zapojení jednofázových asynchronních motorů (ideální chod naprázdno s malým skluzem s_0) [9]

2 JEDNOFÁZOVÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR S POMOCNOU FÁZÍ A TRVALE PŘIPOJENÝM KONDENZÁTOREM

V této kapitole se pokusíme podrobně rozebrat zapojení s trvale připojeným kondenzátorem v pomocné fázi, které se v praxi vyskytuje nejčastěji. Oproti jiným druhům zapojení lze dosáhnout vyšších záběrných momentů při nižším odebíraném proudu a výkonů blízcích se výkonům trojfázového stroje stejné velikosti.

K trvalému připojení nelze použít elektrolytický kondenzátor, u kterého by mohlo vlivem trvale připojeného napětí dojít k průrazu dielektrika. Aby se kondenzátor dal použít k tomuto účelu, musí mít dielektrikum pevné (např. papírové), které lépe odolává účinkům trvale připojeného napětí.

Zkoumáním parametrů zjistíme, že u jednofázového motoru s trvale připojeným kondenzátorem můžeme dosáhnout přibližně 80% výkonu trojfázového motoru stejné velikosti. Velice důležitým parametrem motoru je také účinník, který nezávisí pouze na provedení zapojení, ale také na druhu impedance zapojené v pomocném vinutí. Je známo, že hodnota jalového příkonu impedance pomocného vinutí se přičítá k hodnotě jalového příkonu motoru. To znamená, že trvale připojená pomocná fáze s kondenzátorem zlepšuje celkový účinník motoru tím více, čím větší je velikost jalového výkonu tohoto kondenzátoru. [3]



Obr. 9: Momentové charakteristiky jednofázového asynchronního motoru bez pomocné fáze a s kondenzátorem v pomocné fázi [4]

2.1 Určení velikosti kondenzátoru

Možností jak zjistit vhodnou velikost připojeného kondenzátoru je hned několik. Nejlepších výsledků dosáhneme experimentálním měřením parametrů motoru při postupném zapojování různých velikostí kondenzátorů. Přibližnou hodnotu kondenzátoru lze vypočítat pomocí jednoduchého vzorce:

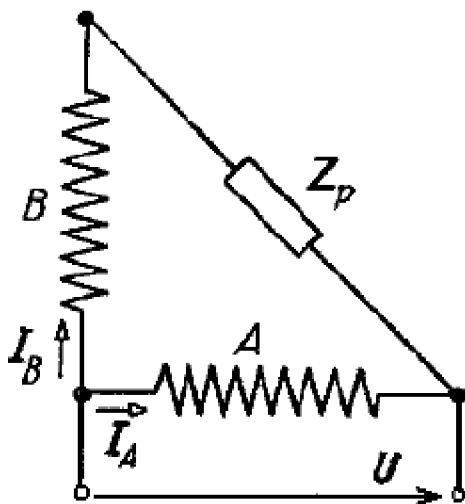
$$C = \frac{P}{0,0063 \cdot U^2 \cdot f} \quad [\mu\text{F}; \text{kW}; \text{V}; \text{Hz}] \quad (1) [11]$$

kde C je kapacita kondenzátoru, P je výkon motoru, U je síťové napětí a f je síťová frekvence.

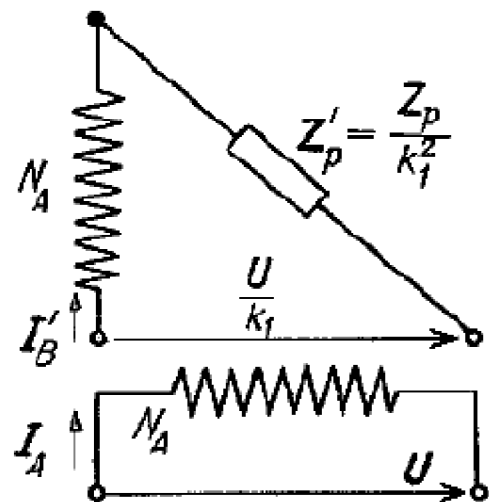
Nabízí se také možnost použití poměrně zdlouhavé metody provozního optima kondenzátorového motoru, kdy při výpočtu uvažujeme také vhodný počet závitů pomocného vinutí a poměr hmoty mědi mezi hlavním a pomocným vinutím. Přes náročnost této metody lze dosáhnout vysoce optimálního návrhu dle požadovaných vlastností motoru. (bude probráno v kapitole 2.1.3). [3]

2.1.1 Základní rovnice pro obecný výpočet motoru s pomocným vinutím

Nejprve odvodíme obecně platící vztahy, které lze aplikovat pro výpočet vhodné velikosti jakékoliv pomocné impedance z kapitoly 1. Předpokládáme různé počty efektivních závitů vinutí označených jako A (hlavní) a B (pomocné). Naopak hmotnosti mědi v drážkách obou vinutí budeme předpokládat za totožné, jelikož mají vliv pouze na velikost rozptylové impedance \bar{Z}_p , kterou budeme považovat stejnou pro obě vinutí. U vinutí B lze rozdíl předpokládané a skutečné hodnoty rozptylové (přečtené) impedance zahrnout do hodnoty pomocné impedance \bar{Z}_p . [3]



Obr. 10: Schéma motoru s pomocným vinutím [3]



Obr. 11: Schéma z Obr. 10 přečtené na stejné závity [3]

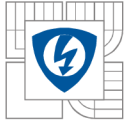


Schéma na obr. 10 (různými počet závitů vinutí A a B) lze přepočítat na schéma na obr. 11, kde jsou již obě vinutí stejná. Toho docílíme zavedením poměru efektivních závitů vinutí A a B označeného jako k_1 :

$$k_1 = \frac{\chi_B \cdot N_B}{\chi_A \cdot N_A} \quad (2) [3]$$

kde χ_A, χ_B jsou činitelé vinutí a N_A, N_B jsou počty závitů vinutí.

Za pomoci tohoto poměru lze vyjádřit veličiny přepočteného schématu na obr. 11, které pro rozlišení označíme čárkou. Pro souměrné složky takto vzniklého dvoufázového stroje platí vztahy:

$$\overline{U_{dA}} = \overline{Z_d} \cdot \overline{I_{dA}} \quad \overline{U_{lA}} = \overline{Z_l} \cdot \overline{I_{lA}} \quad (3) [3]$$

$$\overline{U'_{dB}} = (\overline{Z'_p} + \overline{Z_d}) \cdot \overline{I'_{dB}} \quad \overline{U'_{lB}} = (\overline{Z'_p} + \overline{Z_l}) \cdot \overline{I'_{lB}} \quad (4) [3]$$

$$\overline{U} = \overline{U_A} = \overline{U_{dA}} + \overline{U_{lA}} \quad \frac{\overline{U}}{k_1} = \frac{\overline{U_A}}{k_1} = \overline{U'_{dB}} + \overline{U'_{lB}} \quad (5) [3]$$

Ze vztahů (3) a (5) plynou rovnice:

$$\overline{U} = \overline{Z_d} \cdot \overline{I_{dA}} + \overline{Z_l} \cdot \overline{I_{lA}} \quad \frac{\overline{U}}{k_1} = (\overline{Z'_p} + \overline{Z_d}) \cdot \overline{I'_{dB}} + (\overline{Z'_p} + \overline{Z_l}) \cdot \overline{I'_{lB}} \quad (6) [3]$$

Proudy vinutím B vyjádříme jako:

$$\overline{I'_{dB}} = k_1 \cdot \overline{I_{dA}} = j \overline{I_{dA}} \quad (7) [3]$$

$$\overline{I'_{lB}} = k_1 \cdot \overline{I_{lA}} = -j \overline{I_{lA}} \quad (8) [3]$$

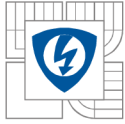
kde $\overline{I_{dB}}$ a $\overline{I_{lB}}$ jsou souměrné složky skutečného proudu a $\overline{I_{dB}'}$ a $\overline{I_{lB}'}$ jsou souměrné složky přepočteného proudu vinutí B.

Řešením rovnic (6), (7) a (8) získáme výsledný vztah pro výpočet sousledné a zpětné složky proudu I_A :

$$\overline{I_{dA}} = \frac{\overline{Z'_p} + \overline{Z_l} - \frac{j}{k_1} \cdot \overline{Z_l}}{\overline{Z_d} \cdot (\overline{Z'_p} + 2 \cdot \overline{Z_l}) + \overline{Z_l} \cdot \overline{Z'_p}} \cdot \overline{U} \quad (9) [3]$$

$$\overline{I_{lA}} = \frac{\overline{Z'_p} + \overline{Z_d} + \frac{j}{k_1} \cdot \overline{Z_d}}{\overline{Z_d} \cdot (\overline{Z'_p} + 2 \cdot \overline{Z_l}) + \overline{Z_l} \cdot \overline{Z'_p}} \cdot \overline{U} \quad (10) [3]$$

Výsledné vztahy (9) a (10) jsou platné jak pro záběr, tak i pro trvalý chod. [3]



2.1.2 Kondenzátorový motor

Takto se někdy nazývá motor s pomocnou fází a trvale připojeným kondenzátorem. V praxi se také můžeme setkat se zapojením s trvale připojeným kondenzátorem a s paralelně připojeným rozběhovým kondenzátorem, kterým docílíme (viz. kapitola 1.3.3) vyšších záběrných momentů. Velikost sousledné a zpětné složky proudu \bar{I}_A určíme výpočty pomocí vztahů (9) a (10) platnými pro obecnou pomocnou fázi motoru. Velikost pomocné impedance \bar{Z}_p' je pak pro tento případ dána vztahem:

$$\bar{Z}_p' = \frac{1}{j \cdot k_1^2 \cdot \omega \cdot C_1} + \Delta R + \Delta X_v \quad (11) [3]$$

kde ΔR a ΔX_v a značí rozdíl mezi přepočtenými rozptylovými hodnotami vinutí B a hodnotami vinutí A:

$$\Delta R = R_B' - R_A \quad \Delta X_v = X_{vB}' - X_{vA} \quad (12) [3]$$

Za předpokladu, že je v drážkách obou vinutí přibližně stejné množství mědi se stejným rozložením, pak platí:

$$\Delta R = \Delta X_v = 0 \quad (13) [3]$$

Také je však třeba si uvědomit, že pokud bychom kondenzátorový motor mechanicky odlehčili, zvýšil by se proud pomocného vinutí, které by mohlo být následně přetíženo.

U kondenzátorových motorů je hodnota zpětné složky vždy menší než hodnota složky sousledné, takže její vliv je daleko menší než u motorů bez pomocného vinutí. Pro lepší porovnání motoru s motorem bez pomocného vinutí upravíme vztah (9) na:

$$\bar{I}_{dA} = \frac{1}{\bar{Z}_d + \bar{Z}_l \cdot \frac{\bar{Z}_p'}{\bar{Z}_p' + 2 \cdot \bar{Z}_l}} \cdot \frac{\bar{Z}_p' + \left(1 - \frac{j}{k_1}\right) \cdot \bar{Z}_l}{\bar{Z}_p' + 2 \cdot \bar{Z}_l} \cdot \bar{U} \quad (14) [3]$$

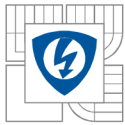
což lze zjednodušit zařazením komplexních činitelů α a β na:

$$\bar{I}_{dA} = \frac{1}{\bar{Z}_d + \bar{\alpha} \cdot \bar{Z}_l} \cdot \bar{\beta} \cdot \bar{U} \quad (15) [3]$$

kde:

$$\bar{\alpha} = \frac{\bar{Z}_p'}{\bar{Z}_p' + 2 \cdot \bar{Z}_l} \quad \bar{\beta} = \frac{\bar{Z}_p' + \left(1 - \frac{j}{k_1}\right) \cdot \bar{Z}_l}{\bar{Z}_p' + 2 \cdot \bar{Z}_l} \quad (16) [3]$$

Pokud bychom odpojili kondenzátor, pak by platilo $\bar{Z}_p' = \infty$, tzn. $\bar{\alpha} = \bar{\beta} = 1$ a rovnice by získala stejný tvar jako má rovnice pro výpočet motoru bez pomocného vinutí. [3]



U větších strojů s menším počtem pólových dvojic je vliv komplexního činitele α zanedbatelný, jelikož v takovém případě je hodnota \bar{Z}_l daleko větší než hodnota \bar{Z}_p' . Pak je moment zvratu sousledné složky kondenzátorového motoru roven přibližně:

$$M_{dmC} \cong |\bar{\beta}|^2 \cdot M_{dm} \quad (17) [3]$$

kde M_{zd} značí moment zvratu sousledné složky při odpojení kondenzátoru. Je tedy zřejmé, že zvětšení momentu zvratu vlivem trvale připojeného kondenzátoru bude o to větší, čím větší bude \bar{Z}_l (větší rotorová impedance) a \bar{Z}_p' naopak menší (větší kapacita kondenzátoru).

Brzdny moment zpětné složky proudu je dán dle vztahů (9) a (10) rovnicí:

$$\bar{I}_{lA} = \frac{\bar{Z}_p' + \bar{Z}_d \cdot \left(1 + \frac{j}{k_1}\right)}{\bar{Z}_p' + \bar{Z}_l \cdot \left(1 - \frac{j}{k_1}\right)} \cdot \bar{I}_{dA} = \bar{\zeta} \cdot \bar{I}_{dA} \quad (18) [3]$$

Brzdny moment zpětné složky lze pak pro malé skluzy určit dle vztahu:

$$M_i \cong \frac{R_2}{n_s} \cdot I_{dA}^2 \cdot |\zeta|^2 \quad [\text{Nm}; \Omega; \text{min}^{-1}; \text{A}] \quad (19) [3]$$

odbrzděny výkon zpětné složky pak bude:

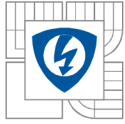
$$\Delta'' P_{Cui} \cong R_2 \cdot I_{dA}^2 \cdot |\zeta|^2 \quad [\text{W}; \Omega; \text{A}] \quad (20) [3]$$

Součtem sousledné a zpětné složky proudu vypočítaných dle vztahů (9) a (10) získáme celkový proud hlavního vinutí, stejně jako součtem složek proudů vypočítaných dle vztahů (7) a (8) získáme celkový proud vinutí pomocného. [3]

2.1.3 Provozní optimum kondenzátorového motoru

V předchozí kapitole jsme probrali vlastnosti motoru s trvale připojeným kondenzátorem. Aby byl zajištěn optimální provoz tohoto motoru, je nutné navrhnout správný počet závitů pomocného vinutí, vhodný poměr hmoty mědi obou vinutí a vhodnou velikost kondenzátoru.

Počet závitů pomocného vinutí přímo ovlivňuje výsledný záběrný moment, kdy snížením počtu závitů zvyšujeme záběrný moment. V případě, že nepožadujeme vysoké hodnoty záběrného momentu, navrhujeme počet závitů tak, abychom dosáhli co nejlepšího využití motoru. Zároveň platí, že čím menší bude počet závitů, tím větší musí být velikost kapacity kondenzátoru, který zároveň volíme tak, aby průřezy hlavního a pomocného vinutí byly přibližně stejně využity. [3]



Jestliže je počet závitů dán požadovaným záběrným momentem, můžeme vhodnou velikost kapacity zjistit experimentálně. Nejprve motor zatížíme jmenovitým výkonem a sledujeme jeho příkon při změně kapacity. Jakmile dosáhneme nejnižší hodnoty příkonu, tedy i nejnižších ztrát, víme, že jsme zvolili optimální kondenzátor.

Pro poměr hmoty mědi obou vinutí stanovíme konstantu k_{Cu} :

$$k_{Cu} = \frac{m_B}{m_A} \quad (21) [3]$$

kde m_A a m_B jsou hmoty mědi vinutí A a B.

Požadavkem na provozní optimum je, aby motor dosahoval co nejmenších ztrát. Nejmenších ztrát dosáhneme tehdy, budou-li proudy obou vinutí k sobě kolmé, pak bude velikost sousledné složky největší a velikost zpětné složky naopak nejmenší. Zároveň by měl proud obou vinutí dosahovat stejné hustoty. Pro výpočet budeme uvažovat stejný počet efektivních závitů obou vinutí. Skutečný počet závitů pomocného vinutí společně s hodnotou kapacity kondenzátoru vypočítáme dodatečně. Uvažujeme tedy souměrný dvoufázový stroj. [3]

Pro shodné proudové zatížení obou vinutí s proudy k sobě kolnými platí:

$$\bar{I}_B = k_{Cu} \cdot \bar{\alpha} \cdot \bar{I}_A \quad (22) [3]$$

kde $\alpha = \angle 90^\circ$.

Dále pro souměrné složky platí:

$$\bar{I}_{dA} = \frac{1 + k_{Cu}}{2} \cdot \bar{I}_A \quad \bar{I}_{lA} = \frac{1 - k_{Cu}}{2} \cdot \bar{I}_A \quad (23) [3]$$

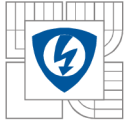
Síťové napětí (na vinutí A) udává vztah:

$$\begin{aligned} \bar{U} = \bar{U}_A &= \bar{U}_{dA} + \bar{U}_{lA} = \bar{Z}_d \cdot \bar{I}_{dA} + \bar{Z}_l \cdot \bar{I}_{lA} = \bar{Z}_d \cdot \frac{1 + k_{Cu}}{2} \cdot \bar{I}_A + \bar{Z}_l \cdot \frac{1 - k_{Cu}}{2} \cdot \bar{I}_A = \\ &= \bar{I}_{dA} \cdot \left(\bar{Z}_d + \frac{1 - k_{Cu}}{1 + k_{Cu}} \cdot \bar{Z}_l \right) = \bar{I}_{dA} \cdot (\bar{Z}_d + k_i \cdot \bar{Z}_l) \end{aligned} \quad (24) [3]$$

A přepočtená hodnota napětí pomocného vinutí B je dána vztahem:

$$\bar{U}_B = \bar{Z}_d \cdot \bar{I}'_{dB} + \bar{Z}_l \cdot \bar{I}'_{lB} = \bar{Z}_d \cdot \bar{I}_{dA} \cdot \bar{\alpha} + \bar{Z}_l \cdot \bar{I}_{lA} \cdot \bar{\alpha}^{-1} \quad (25) [3]$$

$$\begin{aligned} \frac{\bar{U}_B}{\bar{\alpha}} &= \bar{Z}_d \cdot \bar{I}_{dA} - \bar{Z}_l \cdot \bar{I}_{lA} = \left(\bar{Z}_d \cdot \frac{1 + k_{Cu}}{2} - \bar{Z}_l \cdot \frac{1 - k_{Cu}}{2} \right) \cdot \bar{I}_A = \\ &= \left(\bar{Z}_d - \frac{1 - k_{Cu}}{1 + k_{Cu}} \cdot \bar{Z}_l \right) \cdot \bar{I}_{dA} = \bar{I}_{dA} \cdot (\bar{Z}_d - k_i \cdot \bar{Z}_l) \end{aligned} \quad (26) [3]$$



Pokud bude platit vztah (22), musí zároveň pro pomocné vinutí s trvale připojeným kondenzátorem platit $0 < k_{Cu} \leq 1$ a zároveň $0 < k_i < 1$. [3]

Moment zpětné složky je dán vztahem:

$$M_i \cong \frac{R_2}{n_s} \cdot I_{dA}^2 \cdot k^2 \quad [\text{Nm}; \Omega; \text{min}^{-1}; \text{A}] \quad (27) [3]$$

Výkon zpětné složky udává vztah:

$$\Delta'' P_{Cui} \cong R_2 \cdot I_{dA}^2 \cdot \left(\frac{1 - k_{Cu}}{1 + k_{Cu}} \right)^2 = R_2 \cdot I_{dA}^2 \cdot k^2 \quad [\text{W}; \Omega; \text{A}] \quad (28) [3]$$

Efektivní hodnota přepočteného proudu:

$$I_2 = \sqrt{I_{d2}^2 + I_{i2}^2} \cong \sqrt{I_{d2}^2 + k_i^2 I_{dA}^2} \quad (29) [3]$$

Efektivní hodnota proudu v tyči rotoru:

$$I_t = \frac{2 \cdot m \cdot N_A \cdot \chi_A}{Q_2 \cdot \chi_t} \cdot I_2 \quad (30) [3]$$

2.1.4 Výpočet kondenzátoru a pomocného vinutí

V předchozí kapitole jsme odvodili předběžný výpočet provozního optima motoru s trvale připojeným kondenzátorem. Předpokládali jsme platnost vztahu (22), tedy shodné zatížení obou vinutí s proudy k sobě kolmými. Pro volbu počtu závitů je však třeba zvážit také požadavek na záběrný moment stroje. Pro přesnější výsledky vypočítáme hodnotu napětí \overline{U}_B , které se objeví na pomocném vinutí, za předpokladu že je toto vinutí stejné jako vinutí hlavní:

$$\begin{aligned} \frac{\overline{U}_B}{\alpha} &= \overline{I}_{dA} \cdot (\overline{Z}_d - k_i \cdot \overline{Z}_i) = \overline{I}_{dA} \cdot (\overline{Z}_d + k_i \cdot \overline{Z}_i) - 2 \cdot \overline{I}_{dA} \cdot k_i \cdot \overline{Z}_i = \\ &= \overline{U}_A - 2 \cdot \overline{I}_{dA} \cdot k_i \cdot \overline{Z}_i \end{aligned} \quad (31) [3]$$

Proud \overline{I}_B určíme ze vztahu (22).

Pokud nelze použít vztah (22), z důvodu nesouměrného rozložení pomocného a hlavního vinutí a odlišné váhy mědi obou vinutí, je nutné k napětí \overline{U}_B vektorově připočíst napětí vyvolaná proudem \overline{I}_B na rozdílech odporu (ΔR) a reaktance (ΔX_v) mezi oběma vinutími. Výsledkem bude vektor napětí \overline{U}_B'' , které by se objevilo na pomocném vinutí, pokud by jeho počet efektivních závitů byl stejný jako u hlavního vinutí. V této chvíli jsme získali všechny hodnoty potřebné k sestavení vektorového diagramu. [3]

Sestrojili jsme vektorový diagram naznačený na obr. 12. Z bodu A vedeme přímkou kolmou k vektoru proudu I'_B . Tato kolmice protne bod směr U''_B v bodě D, čímž získáme hodnotu skutečného napětí pomocného vinutí U_B . [3]

Počet závitů pomocného vinutí je dán vztahem:

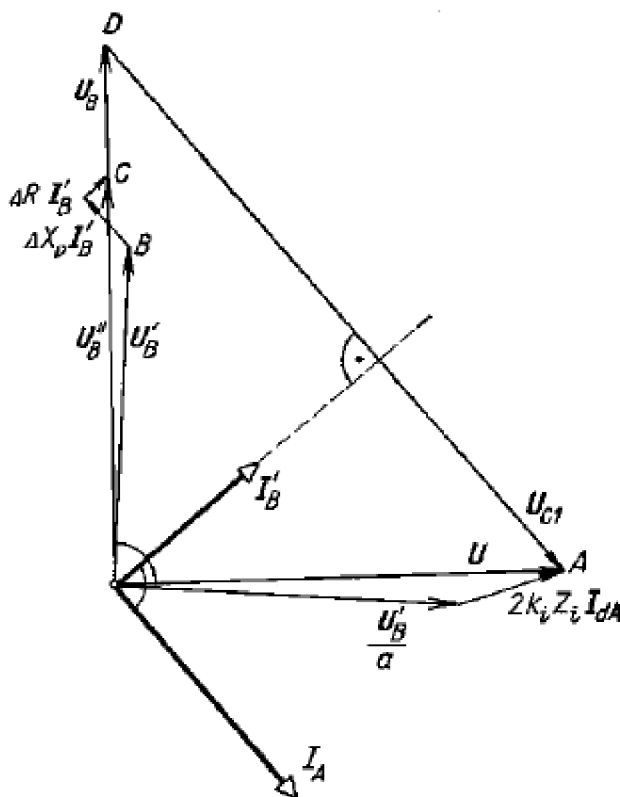
$$N_B = \frac{U_B}{U''_B} \cdot \frac{\chi_A \cdot N_A}{\chi_B} \quad (32) [3]$$

Změřením délky $|AD| = U_{C1}$ zjistíme velikost napětí trvale připojeného kondenzátoru, kdy:

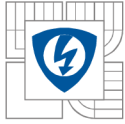
$$C_1 = \frac{3180 \cdot I_B}{U_{C1}} \quad [\mu\text{F}; f = 50 \text{ Hz}; A; V] \quad (33) [3]$$

Skutečný proud pomocným vinutím zjistíme výpočtem:

$$I_B = I'_B \cdot \frac{\chi_A \cdot N_A}{\chi_B \cdot N_B} \quad (34) [3]$$



Obr. 12: Určení počtu závitů pomocného vinutí a potřebné kapacity [3]



3 OBECNÝ POSTUP VÝPOČTU JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU S POMOCNOU FÁZÍ

V předchozích kapitolách byly teoreticky probrány běžná zapojení jednofázových asynchronních motorů. Dále byly teoreticky odvozeny vzorce pro obecný výpočet jednofázového asynchronního motoru s pomocnou fází a poté pro konkrétní případ zapojení s trvale připojeným kondenzátorem, které je v praxi využíváno nejvíce. Aby bylo možné tyto vzorce využít při návrhu motoru, je nutné znát vztahy, potřebné pro výpočet jednotlivých parametrů.

Také je nutno podotknout, že nejspolehlivějších výsledků dosáhneme v případě, že tyto výpočty ověříme praktickými zkušenostmi. Hlavním důvodem jsou aspekty, které mohou značně ovlivnit správnost výsledku. Jsou to zejména výrobní odchylky jednotlivých součástí, které ve výpočtech nelze spolehlivě uvažovat, a jejichž vliv se nejvíce projeví u malých strojů. [3]

3.1 Činné odpory

Odpor jednotlivých fázových vinutí statoru je dán vztahem:

$$R_1 = \frac{N \cdot l_z}{\gamma \cdot S} \quad [\Omega; \text{m}; \text{S} \cdot \text{m} \cdot \text{mm}^{-2}; \text{mm}^2] \quad (35) [3]$$

kde: N - počet závitů vinutí [-]
 l_z - střední délka závitů vinutí [m]
 γ - měrná vodivost vodiče vinutí [$\text{S} \cdot \text{m} \cdot \text{mm}^{-2}$]
S - průřez vodiče vinutí [mm^2]

Odpor rotorové tyče, při uvažování vlivu odporu spojovacích kruhů:

$$R'_t = R_t + \frac{R_{kr}}{2 \cdot \sin^2 \frac{p \cdot \pi}{Q_2}} \quad [\Omega] \quad (36) [3]$$

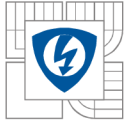
kde odpor samostatné rotorové tyče zjistíme výpočtem:

$$R_t = \frac{l_t}{\gamma \cdot S_t} \quad [\Omega; \text{m}; \text{S} \cdot \text{m} \cdot \text{mm}^{-2}; \text{mm}^2] \quad (37) [3]$$

a odpor spojovacího kruhu:

$$R_{kr} = \frac{\pi \cdot d_{kr}}{\gamma \cdot S_{kr} \cdot Q_2} \quad [\Omega; \text{m}; \text{S} \cdot \text{m} \cdot \text{mm}^{-2}; \text{mm}^2] \quad (38) [3]$$

Pro vztahy (36-38) značí: p - počet pólových dvojic [-]
 Q_2 - počet rotorových tyčí (drážek) [-]
 l_t - délka tyče [m]
 S_t - průřez tyče [mm^2]
 d_{kr} - střední průměr spojovacího kruhu [m]
 S_{kr} - plocha spojovacího kruhu [mm^2]



Tab. 2: Měrná vodivost γ v závislosti na materiálu vodiče a jeho teplotě [3]

Materiál	Teplota ϑ [°C]	Měrná vodivost γ [S·m·mm ⁻²]
Měď	20	56
	70	47
Hliník	20	34
	70	28
Mosaz	20	11
	70	12

Odpor rotorové klece přepočtený na stator udává vztah:

$$R_2 = \frac{4 \cdot m \cdot (N_1 \cdot \chi_1)^2}{Q_2 \cdot \chi_t^2} \left[R_t + \frac{R_{kr}}{2 \cdot \sin^2 \frac{p \cdot \pi}{Q_2}} \right] \quad [\Omega] \quad (39) [3]$$

kde: N_1 - počet závitů vinutí statoru [-]

χ_1 - činitel vinutí statoru [-]

χ_t - činitel natočení drážky rotoru [-]

m - počet fází statorového vinutí, na které rotorový odpor přepočítáváme [-]

3.2 Činitelé vinutí

Činitelé vinutí udávají poměr mezi geometrickým a algebraickým součtem indukovaných napětí cívek, tvořících fázové vinutí. Činitel vinutí se liší pro první a vyšší harmonické a lze jej rozložit na činitel rozlohy χ' a činitel zkrácení kroku χ'' : [3]

$$\chi = \chi' \cdot \chi'' \quad (40) [3]$$

Pro první harmonickou vypočítáme činitel rozlohy jako:

$$\chi' = \frac{\sin \left(q \cdot \frac{\alpha}{2} \right)}{q \cdot \sin \frac{\alpha}{2}} \quad (41) [3]$$

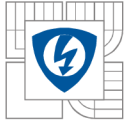
a činitel zkrácení kroku:

$$\chi'' = \sin \left(\frac{y}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2} \right) \quad (42) [3]$$

kde: q - počet drážek na pól a fázi

α - úhel mezi sousedními drážkami v elektrických stupních

$\frac{y}{\tau}$ - poměr kroku cívky k pólové rozteči



Činitel vinutí pro rotorovou klec, jejíž drážky bývají zešíkmeny pro získání lepšího průběhu momentové charakteristiky:

$$\chi_t = \frac{\sin \frac{\check{s} \cdot \pi}{2 \cdot \tau}}{\frac{\check{s} \cdot \pi}{2 \cdot \tau}} \quad (43) [3]$$

kde \check{s} značí délku zešíkmení drážek a τ je pólová rozteč.

3.3 Reaktance

Jako reaktanci označujeme imaginární část impedance, kterou je třeba vypočítat pro vzduchovou mezeru, stator a rotor.

3.3.1 Hlavní reaktance

Hlavní reaktance je dána magnetickým tokem procházejícím vzduchovou mezerou do rotoru. Nejdříve je třeba zjistit magnetická napětí jednotlivých částí obvodu při jmenovitém sycení, jejichž součtem získáme celkové magnetické napětí obvodu na pólovou dvojici: [3]

$$U_m = U_{m\delta} + U_{mz1} + U_{mz2} + U_{mj1} + U_{mj2} \quad (44) [3]$$

kde: $U_{m\delta}$ - magnetické napětí ve vzduchové mezeře

U_{mz1} - magnetické napětí zubů statoru

U_{mz2} - magnetické napětí zubů rotoru

U_{mj1} - magnetické napětí jha statoru

U_{mj2} - magnetické napětí jha rotoru

Magnetické napětí ve vzduchové mezeře:

$$U_{m\delta} = 1,6 \cdot 10^4 \cdot \delta' \cdot B_\delta \quad [A; \text{cm}; T] \quad (45) [3]$$

kde δ' je efektivní vzduchová mezera a B_δ magnetická indukce ve vzduchové mezeře.

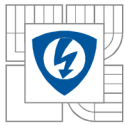
Efektivní vzduchová mezera:

$$\delta' = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2} \cdot \delta \quad (46) [3]$$

Carterovy činitele pro stator $k_{\delta 1}$ a rotor $k_{\delta 2}$ určíme ze vztahu:

$$k_\delta = \frac{\tau_d}{\tau_d + \delta - \frac{3}{4} \cdot b'} \quad (47) [3]$$

kde τ_d je rozteč drážky a b' otevření drážky rotoru/statoru.



Výpočet hlavní magnetizační reaktance je pak dán vztahem:

$$X_h = 1,6 \cdot m \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N \cdot \chi}{100} \right)^2 \cdot \frac{\tau}{100 \cdot \delta''} \cdot \frac{l}{p} \quad [\Omega; \text{Hz}; \text{cm}] \quad (48) [3]$$

kde: m - počet fázových vinutí [-]
 N - počet závitů uvažovaného vinutí [-]
 χ - činitel vinutí [-]
 τ - pólová rozteč [cm]
 p - počet pólových dvojic [-]
 l - ideální délka železa [cm]
 δ'' - ekvivalentní vzduchová mezera [-]

Ekvivalentní vzduchová mezera:

$$\delta'' = \delta' \frac{U_m}{U_{m\delta}} \quad (49) [3]$$

Zanedbáme-li vliv železa, pak $\delta'' = \delta'$.

Pro výpočet diferenčního rozptylu (viz. kapitola 3.3.2) je standardně využívána hlavní reaktance samotné vzduchové mezery:

$$X'_h = X_h \cdot \frac{\delta''}{\delta'} \quad (50) [3]$$

3.3.2 Rozptylová reaktance statoru

Rozptylová reaktance statoru v sobě zahrnuje všechny magnetické toky statorového vinutí kromě magnetického toku základní harmonické ve vzduchové mezeře, který je již zahrnut v reaktanci hlavní. Rozptylové reaktance mají největší vliv na přetížitelnost stroje, záběrný moment a proud nakrátko a jejich výpočet je shodný jak pro jednofázové tak i pro trojfázové stroje. U malých strojů je třeba uvažovat značnou nepřesnost výsledku výpočtu, jelikož zde mají podstatný vliv výrobní odchylky jednotlivých součástí a sycení železa. [3]

Rozptylovou reaktanci hlavního vinutí vypočítáme součtem dílčích rozptylů:

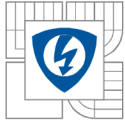
$$X_{rA} = X_{A0} + X_{Ad} + X_{A\check{c}} + X_{Aq} \quad (51) [3]$$

kde: X_{A0} - diferenční rozptyl statorového vinutí
 X_{Ad} - rozptyl v drážce statoru
 $X_{A\check{c}}$ - rozptyl přes čela vinutí statoru
 X_{Aq} - rozptyl statoru způsobený natočením drážek rotoru

Diferenční rozptyl statorového vinutí:

$$X_{A0} = \sigma_{A0} \cdot X'_h \quad (52) [3]$$

kde σ_{A0} je součinitel diferenčního rozptylu.



Tab. 3: Hodnoty součinitelů diferenčního rozptylu $\sigma_0 \cdot 100$ pro vinutí s plným krokem [3]

Q_p	2	3	4	6	8	9	10	12	15	∞
Jednofázová vinutí $q = \frac{2}{3} Q_p$		9,7		2,85		1,41		0,88	0,65	0,22
Jednofázová nebo dvojfázová vinutí $q = \frac{1}{2} Q_p$	23,4		8,45	4,68	3,3		2,65	2,29		1,64

Pro jednofázová vinutí, která mají z celkového počtu drážek na pól Q_p rovnoměrně ovinuto q drážek je dán vztah:

$$\sigma_{A0} = \frac{\pi^2 \cdot p}{\chi_A^2 \cdot Q_1} \cdot \left[-\frac{1}{6}q + \frac{1}{4}Q_p + \frac{1}{6q} \right] - 1 \quad (53) [3]$$

kde: χ_A - činitel uvažovaného vinutí A pro první harmonickou

p - počet pólových dvojic

Q_1 - celkový počet drážek statoru

$Q_p = \frac{Q_1}{2p}$ - počet drážek na pól

q - počet drážek obsazených uvažovaným vinutím A na pólu

Diferenční rozptyl rozkládáme na rozptyl přes hlavy zubů a rozptyl pro nekonečný počet drážek. Za předpokladu dokonalého útlumu vyšších harmonických rotorem bude přítomen pouze rozptyl přes hlavy zubů, který lze pro jednovrstvá vinutí určit vztahem:

$$X_{Az} = 0,158 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_A}{100} \right)^2 \cdot \frac{l}{p} \cdot \frac{\lambda_z}{q} \quad [\Omega; \text{Hz}; \text{cm}] \quad (54) [3]$$

$$\lambda_z \approx \frac{[\tau_{d2} - 0,75 \cdot (b'_1 + b'_2)]^2}{6 \cdot \tau_{d2} \cdot \delta} \quad (55) [3]$$

kde b'_1 a b'_2 značí otevření drážky statoru a rotoru ve vzduchové mezeře, λ_z vodivost zubu.

Drážkový rozptyl:

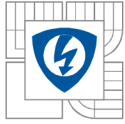
$$X_{Ad} = 0,158 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_A}{100} \right)^2 \cdot \frac{l}{p} \cdot \frac{\lambda_d}{q} \quad [\Omega; \text{Hz}; \text{cm}] \quad (56) [3]$$

kde q je počet drážek na pól obsazených uvažovaným vinutím, l délka železa, λ_d vodivost drážky, která je dána jejím tvarem.

Rozptyl přes čela vinutí je dán vztahem:

$$X_{A\check{c}} = 0,158 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_A}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_{\check{c}}}{p} \cdot \lambda_{\check{c}} \quad [\Omega; \text{Hz}; \text{cm}] \quad (57) [3]$$

kde $l_{\check{c}}$ je střední délka čela vinutí (na jedné straně statoru), $\lambda_{\check{c}}$ je vodivost čela (0,11 až 0,16). [3]



Rozptyl statoru způsobený natočením drážek rotoru je dán vztahem:

$$X_{Aq} = \sigma_q \cdot X'_h \quad (58) [3]$$

kde:

$$\sigma_q \cong 1,64 \cdot \left(\frac{p}{Q_2} \cdot \frac{\check{s}}{\tau_{d2}} \right)^2 \quad (59) [3]$$

kde: τ_{d2} - rozteč drážky rotoru
p - počet pólových dvojic
 Q_2 - počet rotorových tyčí (drážek)

3.3.3 Rozptylová reaktance rotoru přepočítaná na stator

Rozptylovou reaktanci rotoru přepočítanou na stator lze rozdělit na dílčí rozptylové reaktance:

$$X_{r2} = X_{20} + X_{2d} + X_{2q} \quad (60) [3]$$

kde: X_{20} - diferenční rozptyl klecového rotoru
 X_{2d} - drážkový rozptyl klecového rotoru
 X_{2q} - rozptyl způsobený natočením drážek rotoru

Diferenční rozptyl klecového rotoru:

$$X_{20} = \sigma_{20} \cdot X'_h \quad (61) [3]$$

kde:

$$\sigma_{20} \cong 3,3 \cdot \left(\frac{p}{Q_2} \right)^2 \quad (62) [3]$$

Drážkový rozptyl klecového rotoru přepočtený na statorové vinutí A:

$$X_{2d} = 0,316 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_A \cdot \chi_A}{100 \cdot \chi_t} \right)^2 \cdot l \cdot \frac{m \cdot \lambda_d}{Q_2} \quad (63) [3]$$

kde: χ_A - činitel statorového vinutí A, na které přepočítáváme rotorové konstanty
 χ_t - činitel zešikmení rotorové drážky
l - délka železa
m - počet fázových vinutí statoru
 λ_d - vodivost rotorové drážky, která je dána jejím tvarem a v případě uzavřené drážky navíc závisí na proudu tyče I_t .

Rozptyl způsobený natočením drážek rotoru je v rotorové rozptylové reaktanci přepočtené na stator stejný jako v reaktanci statorové, platí tedy stejný výpočet: [3]

$$X_{2q} = \sigma_q \cdot X'_h \quad (64) [3]$$



3.4 Hlavní rozměry železa

Pro výpočet hlavních rozměrů železa jednofázového asynchronního motoru s pomocnou fází budeme vycházet z hlavních rozměrů železa motorů trojfázových. V závislosti na využití stroje γ_s je pak nutno tyto rozměry zvětšit. Hodnotu využití stroje γ_s zjistíme z tabulky pro daný způsob zapojení. [3]

Zdánlivý příkon trojfázového motoru stejných rozměrů zjistíme ze vztahu:

$$S_3 = \frac{P_n}{\gamma_s \cdot \cos \varphi_3 \cdot \eta_3} \quad [\text{VA}; \text{W}] \quad (65) [3]$$

kde: P - výkon stroje

γ_s - využití stroje

$\cos \varphi_3$ - účinník trojfázového motoru o výkonu P_n/γ_s

η_3 - účinnost trojfázového motoru o výkonu P_n/γ_s

Součin η_3 a $\cos \varphi_3$ lze určit z diagramu (viz. Obr. 13).

Výpočet hlavních rozměrů trojfázového stroje:

$$d^2 l = \frac{8,6 \cdot (1 - \varepsilon_1) \cdot S_3 \cdot 10^4}{B_\delta \cdot A \cdot \chi_1 \cdot n_s} \quad [\text{cm}; \text{VA}; \text{T}; \text{A/cm}; \text{min}^{-1}] \quad (66) [3]$$

kde: d - vrtání statoru (vnitřní průměr)

l - délka statorového železa

ε_1 - poměrný úbytek napětí na rozptylové reaktanci a činném odporu statoru pro trojfázový stroj

S_3 - zdánlivý výkon trojfázového stroje

B_δ - maximální indukce ve vzduchové mezeře

χ_1 - činitel vinutí statoru pro trojfázový stroj

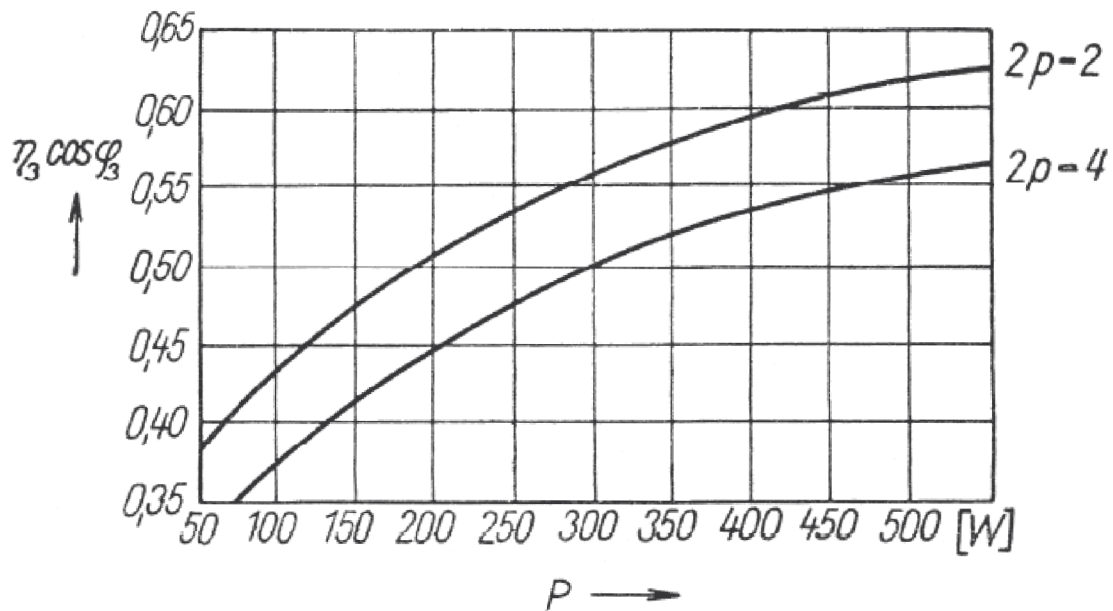
n_s - synchronní otáčky

A - proudové zatížení obvodu statoru

Pro dvojpólové a čtyřpólové motorky, které jsou používány nejčastěji, je možné uvažovat $(1 - \varepsilon_1) = \chi_1$ a vztah zjednodušit na:

$$d^2 l = \frac{8,6 \cdot S_3 \cdot 10^4}{B_\delta \cdot A \cdot n_s} \quad [\text{cm}; \text{VA}; \text{T}; \text{A/cm}; \text{min}^{-1}] \quad (67) [3]$$

U jednofázových motorů bývá sycení ve vzduchové mezeře $B_\delta = 0,5$ až $0,6$ T a proudové zatížení $A = 120$ až 200 A/cm.



Obr. 13: Diagram pro určení součinu účinnosti a účinniku trojfázového stroje [3]

Poměr vrtání statoru d k vnějšímu průměru statorových plechů d_1 bývá u dvojpólových strojů přibližně:

$$\frac{d}{d_1} = k_s \cong 0,5 \quad (68) [3]$$

U strojů čtyřpólových pak:

$$\frac{d}{d_1} = k_s \cong 0,6 \quad (69) [3]$$

Poměr délky železa l k pólové rozteči τ značíme:

$$\lambda = \frac{l}{\tau} \quad (70) [3]$$

kde:

$$\tau = \frac{\pi \cdot d}{2 \cdot p} \quad (71) [3]$$

U dvoupólových strojů bývá $\lambda = 0,6$ až 1 , u čtyřpólových strojů $\lambda = 1,0$ až $1,4$. [3]

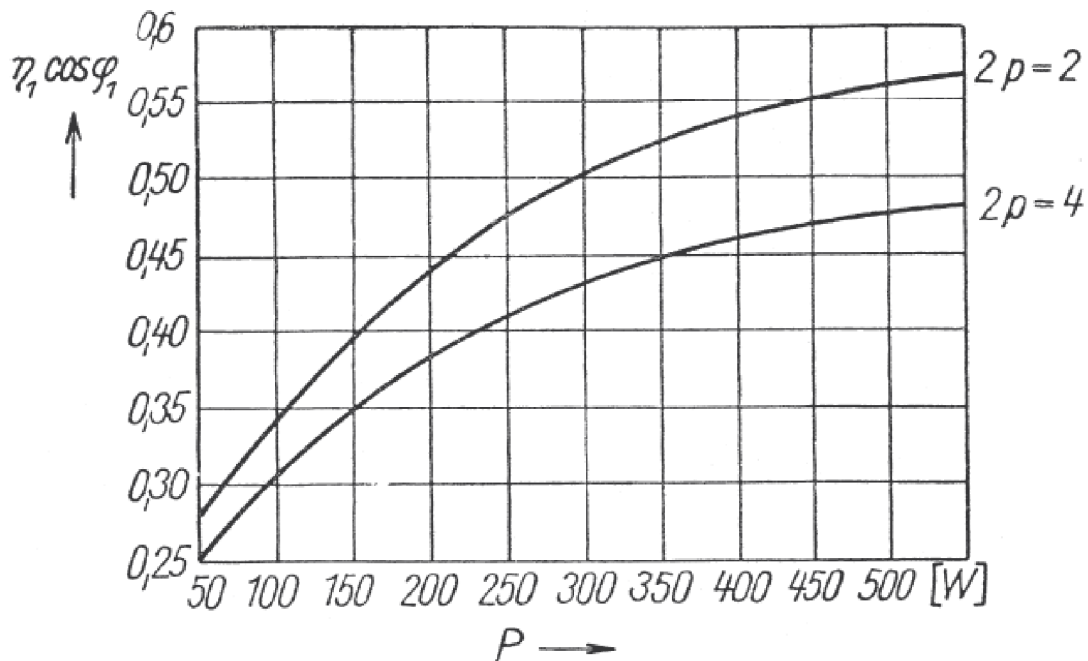
3.5 Předběžný výpočet rozměrů drážek a vinutí

Výpočet proudu hlavního vinutí pro stroj s rozběhovým pomocným vinutím:

$$I_A = \frac{P_n}{\eta_1 \cdot \cos \varphi_1 \cdot U} \quad (72) [3]$$

kde: P_n - jmenovitý mechanický výkon na hřídeli
 U - svorkové napětí
 η_1 - účinnost jednofázového motoru
 $\cos \varphi_1$ - účinník jednofázového motoru

Součin η_1 a $\cos \varphi_1$ lze určit z diagramu (viz. Obr. 14).



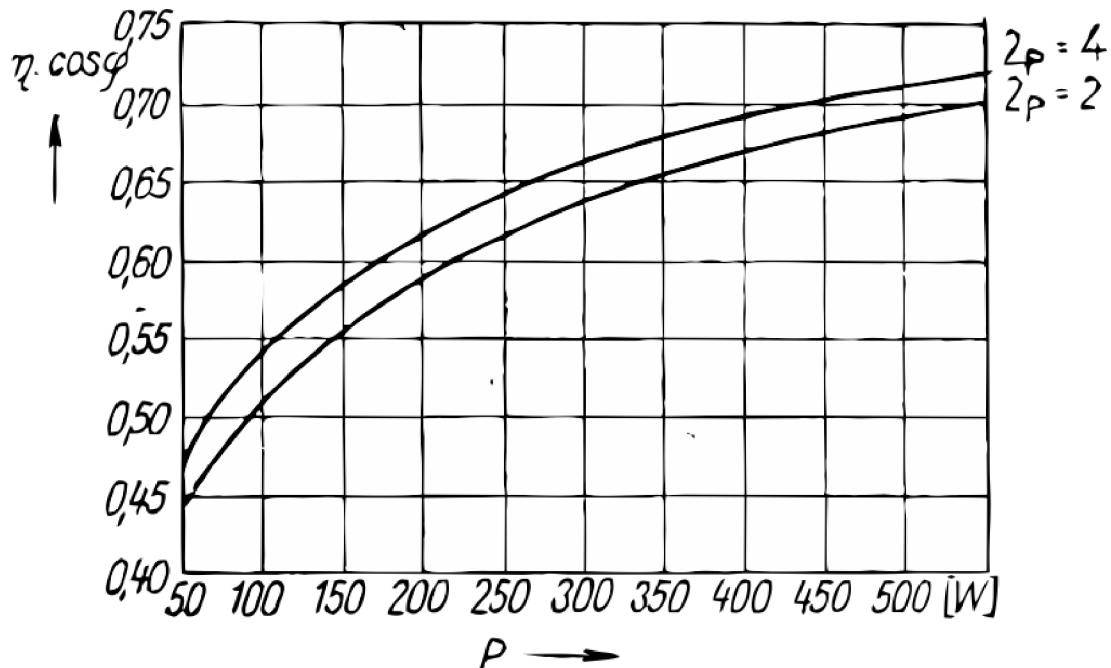
Obr. 14: Diagram pro určení součinu účinnosti a účinníku jednofázového stroje s rozběhovým vinutím [3]

Vztah pro výpočet proudu hlavního vinutí stroje s trvale připojeným kondenzátorem v pomocném vinutí, pokud je toto vinutí za chodu plně využito:

$$I_A = \frac{P_n}{\eta_1 \cdot \cos \varphi_1 \cdot U_n \cdot (1 + k_{cu})} \quad (73) [3]$$

kde: k_{cu} - poměr drážkového prostoru obou vinutí

Součin η_1 a $\cos \varphi_1$ lze určit z diagramu (viz. Obr. 15).



Obr. 15: Diagram pro určení součinnu účinnosti a účinniku jednofázového stroje s trvale připojeným kondenzátorem v pomocném vinutí [3]

Plocha jednoho pólu ve vzduchové mezeře:

$$S_{\delta} = \frac{\pi \cdot d \cdot l}{2 \cdot p} \quad (74) [3]$$

Indukční tok:

$$\phi = \frac{l \cdot d \cdot B_{\delta} \cdot 10^{-4}}{p} \quad [\text{Wb}; \text{cm}; \text{T}] \quad (75) [3]$$

Závity hlavního vinutí:

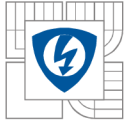
$$N_A = \frac{U_n \cdot (1 - \varepsilon_1)}{4,44 \cdot f \cdot \chi_A \cdot \phi} \quad [\text{V}; \text{Hz}; \text{Wb}] \quad (76) [3]$$

kde ε_1 je poměrný úbytek napětí na rozptylové impedanci statoru.

Šířku zubů volíme pro stator a rotor tak, aby sycení B_z v zubech statoru bylo 1,5 až 1,7 T a v zubech rotoru 1,5 až 1,8 T:

$$b_z = \frac{B_{\delta}}{B_z} \cdot \frac{\pi \cdot d}{0,9 \cdot Q} \quad (77) [3]$$

kdy předpokládáme plnění železa 0,9 při dobrém stažení plechů.



Průřez statorového vodiče hlavního vinutí A:

$$S_A = \frac{I_A}{\sigma_A} \quad [\text{mm}^2; \text{A}; \text{A}/\text{mm}^2] \quad (78) [3]$$

a volíme jej tak, aby proudová hustota σ_A byla přibližně 6 až 8,5 A/mm² (dobře větrané stroje).

Plocha drážky bez izolace:

$$S_d = \frac{2 \cdot N_A \cdot S'_A}{Q_{1A} \cdot k_d} \quad [\text{mm}^2] \quad (79) [3]$$

kde: S'_A - průřez statorového vodiče hlavního vinutí A s izolací

Q_{1A} - počet drážek připadajících na hlavní vinutí (volíme podle zkušenosti)

k_d - činitel využití plochy drážky bez drážkové izolace

Šířka statorového jha:

$$d_1 - d_2 = \frac{\phi \cdot 10^4}{B_{j1} \cdot l \cdot 0,9} = \frac{B_\delta}{B_{j1}} \cdot \frac{d}{p \cdot 0,9} \quad [\text{cm}; \text{Wb}; \text{T}] \quad (80) [3]$$

kde sycení statorového jha $B_{j1} = 1,3$ až $1,5$ T.

Po dosazení parametrů rotoru vypočítáme šířku rotorového jha, kdy jeho sycení B_{j2} závisí na průměru hřídele a bývá nižší než sycení jha statorového B_{j1} .

Průřez rotorové tyče:

$$S_t = \frac{I_{dt}}{\sigma_{dt}} \quad (81) [3]$$

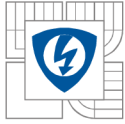
kde σ_{dt} je sousledná složka proudové hustoty v rotoru, která musí být menší nebo rovna hodnotě z tabulky (viz. Tab. 4). I_{dt} je sousledná složka proudu v rotorové tyči, kterou lze přibližně zjistit výpočtem:

$$I_{dt} = \frac{s \cdot U_n \cdot (1 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{2 \cdot \chi_A \cdot N_A \cdot R'_t} \quad (82) [3]$$

kde skluz s můžeme odhadnout, nebo přibližně vypočítat a $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$ zvolíme ze zkušenosti. [3]

Tab. 4: *Sousledná složka proudové hustoty v rotoru [3]*

Rotor	Druh stroje	Sousledná složka proudové hustoty σ_{dt} [A/mm ²]
Měděná klec	Kondenzátorový motor	6 až 7
	Jednofázový motor s rozběhovým pomocným vinutím	3,5 až 5
Hliníková klec	Kondenzátorový motor	4 až 4,5
	Jednofázový motor s rozběhovým pomocným vinutím	2 až 3



4 VÝPOČET JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU S TRVALE PŘIPOJENÝM KONDENZÁTOREM

V předchozí kapitole byl popsán obecný postup výpočtu jednofázového asynchronního motoru s pomocnou fází. V této kapitole bude postup ověřen na kontrolním příkladu. Motor, na kterém bude ověřena správnost postupu je typ J22VV499, který je vyráběn firmou ATAS elektromotory Náchod a.s. Parametry motoru získané výpočtem budou porovnány s hodnotami udávanými výrobcem, a dále ověřeny měřeními na daném stroji.

Jmenovité hodnoty pro návrh motoru jsou:

$$U_n = 230 \text{ V}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$P_n = 550 \text{ W}$$

$$n_n = 2650 \text{ min}^{-1}$$

4.1 Výpočet hlavních rozměrů železa

Hodnotu využití stroje γ_s pro jednofázový asynchronní motor s trvale připojeným kondenzátorem zvolíme 0,9 (viz. tabulka I, příloha A). Rozměry budou tedy navrženy jako pro trojfázový asynchronní motor s výkonem:

$$P_3 = \frac{P_n}{\gamma_s} = \frac{550}{0,9} = 611,11 \text{ W}$$

Součin účinníku a účinnosti tohoto stroje určíme přibližně z diagramu (viz. Obr. 13):

$$\cos \varphi_3 \cdot \eta_3 = 0,635$$

Zdánlivý příkon trojfázového motoru stejných rozměrů:

$$S_3 = \frac{P_n}{\gamma_s \cdot \cos \varphi_3 \cdot \eta_3} = \frac{P_3}{\cos \varphi_3 \cdot \eta_3} = \frac{611,11}{0,635} = 962,38 \text{ VA}$$

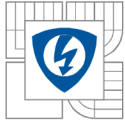
Počet pólových dvojic motoru:

$$2p = 2 \cdot \frac{60 \cdot f}{n_s} = 2 \cdot \frac{60 \cdot 50}{3000} = 2$$

Výpočet hlavních rozměrů trojfázového stroje pro dvojpólové a čtyřpólové motorky:

$$d^2 l = \frac{8,6 \cdot S_3 \cdot 10^4}{B_\delta \cdot A \cdot n_s} = \frac{8,6 \cdot 948,93 \cdot 10^4}{0,6 \cdot 170 \cdot 3000} = 266,69 \text{ cm}^3$$

,kde sycení ve vzduchové mezeře volíme $B_\delta = 0,6 \text{ T}$ a proudové zatížení $A = 170 \text{ A/cm}$.



Jestliže vnitřní průměr statoru bude mít stejné rozměry, jako délka železa ($d = l$), pak platí:

$$d = \sqrt[3]{d^2 \cdot l} = \sqrt[3]{2666,9} = 64,37 \text{ mm} \cong 64 \text{ mm}$$

Poměr vrtání statoru d k vnějšímu průměru statorových plechů d_1 pro dvojpólové stroje:

$$\frac{d}{d_1} = k_s \cong 0,5 \text{ pak přibližný vnější průměr statoru} \rightarrow d_1 = \frac{d}{k_s} = \frac{64}{0,5} = 128 \text{ mm}$$

Pólová rozteč τ :

$$\tau = \frac{\pi \cdot d}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot 64}{2 \cdot 1} = 100,53 \text{ mm}$$

Poměr délky železa l k pólové rozteči τ :

$$\lambda = \frac{l}{\tau} = \frac{64}{100,53} = 0,637$$

kde tato hodnota bývá u dvoupólových strojů v rozmezí 0,6 až 1. [3]

4.2 Předběžný výpočet rozměrů drážek a vinutí

4.2.1 Výpočet rozměrů drážek a vinutí statoru

Součin účinníku a účinnosti jednofázového asynchronního motoru s trvale připojeným kondenzátorem určíme přibližně z diagramu (viz. Obr. 15):

$$\cos \varphi_1 \cdot \eta_1 = 0,7$$

Celkový počet statorových drážek Q_1 stanovuje výrobce na 24, z nichž 16 je vyčleněno pro hlavní vinutí (Q_{1A}) a zbylých 8 pro vinutí pomocné (Q_{1B}). Poměr drážkového prostoru obou vinutí je tedy:

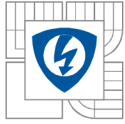
$$k_{cu} = \frac{Q_{1p}}{Q_{1h}} = \frac{8}{16} = 0,5$$

Úhel mezi drážkami:

$$\alpha = \frac{360^\circ}{Q_1} = \frac{360^\circ}{24} = 15^\circ$$

Počet drážek na pól a fázi pro hlavní vinutí:

$$q_h = \frac{Q_{1A}}{2p} = \frac{16}{2 \cdot 1} = 8$$



Počet drážek na pól a fázi pro pomocné vinutí:

$$q_p = \frac{Q_{1B}}{2p} = \frac{8}{2 \cdot 1} = 4$$

Výpočet proudu hlavního vinutí stroje s trvale připojeným kondenzátorem, pokud je toto vinutí za chodu plně využito:

$$I_A = \frac{P_n}{\eta_1 \cdot \cos \varphi_1 \cdot U_n \cdot (1 + k_{Cu})} = \frac{550}{0,7 \cdot 230 \cdot (1 + 0,5)} = 2,277 \text{ A}$$

Plocha jednoho pólu ve vzduchové mezeře:

$$S_\delta = \frac{\pi \cdot d \cdot l}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot 64 \cdot 64}{2 \cdot 1} = 6433,98 \text{ mm}^2$$

Magnetický tok ve vzduchové mezeře:

$$\phi = \frac{l \cdot d \cdot B_\delta \cdot 10^{-4}}{p} = \frac{6,4 \cdot 6,4 \cdot 0,6 \cdot 10^{-4}}{1} = 2,458 \text{ mWb}$$

Činitel hlavního vinutí:

$$\chi_A = \chi' = \frac{\sin\left(q_h \cdot \frac{\alpha}{2}\right)}{q_h \cdot \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin\left(8 \cdot \frac{15}{2}\right)}{8 \cdot \sin \frac{15}{2}} = 0,8294$$

Činitel pomocného vinutí:

$$\chi_B = \frac{\sin\left(q_p \cdot \frac{\alpha}{2}\right)}{q_p \cdot \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin\left(4 \cdot \frac{15}{2}\right)}{4 \cdot \sin \frac{15}{2}} = 0,9577$$

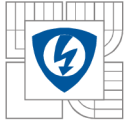
Počet závitů hlavního vinutí, jestliže poměrný úbytek napětí na rozptylové impedanci statoru odhadneme $\varepsilon_1 = 0,15$:

$$N_A = \frac{U_n \cdot (1 - \varepsilon_1)}{4,44 \cdot f \cdot \chi_A \cdot \phi} = \frac{230 \cdot (1 - 0,15)}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,8294 \cdot 2,458 \cdot 10^{-3}} \cong 432$$

kde vypočtený počet závitů zaokrouhlíme tak, aby se do každé drážky hlavního vinutí vešel celý počet závitů, do každé drážky vinutí tedy umístíme 54 vodičů.

Šířka zubu statoru při zvoleném sycení $B_{z1} = 1,6 \text{ T}$ a plnění železa $k_{pFe} = 0,9$:

$$b_{z1} = \frac{B_\delta}{B_{z1}} \cdot \frac{\pi \cdot d}{k_{pFe} \cdot Q_1} = \frac{0,6}{1,6} \cdot \frac{\pi \cdot 64}{0,9 \cdot 24} = 3,49 \text{ mm}$$



Průřez vodiče hlavního vinutí A, při zvolené proudové hustotě $\sigma_A = 8 \text{ A/mm}^2$:

$$S_A = \frac{I_A}{\sigma_A} = \frac{2,277}{8} = 0,2846 \text{ mm}^2$$

Průměr vodiče hlavního vinutí A, bez izolace:

$$d_A = \sqrt{\frac{4 \cdot S_A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,2846}{\pi}} = 0,602 \text{ mm} \approx 0,6 \text{ mm}$$

kde pro d_A vybereme průměr z vyráběných vodičů (viz. tabulka II, příloha B, tedy $d_A = 0,6 \text{ mm}$, který spolu s izolací má průměr $d'_A = 0,64 \text{ mm}$).

Průřez statorového vodiče hlavního vinutí A s izolací:

$$S'_A = \frac{\pi \cdot d'^2_A}{4} = \frac{\pi \cdot 0,64^2}{4} = 0,3217 \text{ mm}^2$$

Činitel využití plochy drážky bez drážkové izolace volíme pro dvupólové motory $k_d = 0,41$. Plocha drážky bez izolace je potom:

$$S_d = \frac{2 \cdot N_A \cdot S'_A}{Q_{1A} \cdot k_d} = \frac{2 \cdot 432 \cdot 0,3217}{16 \cdot 0,41} = 42,37 \text{ mm}^2$$

Šířka statorového jha, při zvoleném sycení statorového jha $B_{j1} = 1,4 \text{ T}$:

$$h_{js} = d_1 - d_2 = \frac{\phi \cdot 10^4}{B_{j1} \cdot l \cdot k_{pFe}} = \frac{B_\delta}{B_{j1}} \cdot \frac{d}{p \cdot k_{pFe}} = \frac{0,6}{1,4} \cdot \frac{64}{1 \cdot 0,9} = 30,48 \text{ mm}$$

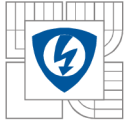
4.2.2 Výpočet rozměrů drážek a tyčí rotoru

Celkový počet rotorových drážek Q_2 stanovuje výrobce na 17. Šířka zubu rotoru při zvoleném sycení $B_{z2} = 1,65 \text{ T}$ a plnění železa 0,9 je:

$$b_{z2} = \frac{B_\delta}{B_{z1}} \cdot \frac{\pi \cdot d}{0,9 \cdot Q_2} = \frac{0,6}{1,65} \cdot \frac{\pi \cdot 64}{0,9 \cdot 17} = 4,779 \text{ mm}$$

Skluz motoru:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{3000 - 2650}{3000} = 0,117$$



Činitel vinutí pro rotorovou klec (délku zešíkmení drážek volíme $\check{s} = 10$ mm):

$$\chi_t = \frac{\sin \frac{\check{s} \cdot \pi}{2 \cdot \tau}}{\frac{\check{s} \cdot \pi}{2 \cdot \tau}} = \frac{\sin \frac{10 \cdot \pi}{2 \cdot 100,53}}{\frac{10 \cdot \pi}{2 \cdot 100,53}} = 0,996$$

Předběžné určení odporu rotorové tyče (ztráty odhadneme $\Delta'' P_{Cui} = 22$ W, $\Delta P = 22$ W, stejně tak i $\varepsilon_1 = 0,15$ a $\varepsilon_2 = 0,1$):

$$R'_t = \frac{(1-s) \cdot s \cdot U_n^2 \cdot (1-\varepsilon_1-\varepsilon_2)^2 \cdot Q_2 \cdot \chi_t}{4 \cdot N_A^2 \cdot \chi_A^2 \cdot (P + \Delta'' P_{Cui} + \Delta P)}$$
$$R'_t = \frac{(1-0,117) \cdot 0,117 \cdot 230^2 \cdot (1-0,15-0,1)^2 \cdot 17 \cdot 0,996}{4 \cdot 432^2 \cdot 0,8294^2 \cdot (550 + 22 + 22)}$$
$$R'_t = 0,1707 \text{ m}\Omega$$

Předběžný výpočet sousledné složky proudu v rotorové tyči:

$$I_{dt} = \frac{s \cdot U_n \cdot (1-\varepsilon_1-\varepsilon_2)}{2 \cdot \chi_A \cdot N_A \cdot R'_t} = \frac{0,117 \cdot 230 \cdot (1-0,15-0,1)}{2 \cdot 0,8294 \cdot 432 \cdot 0,1707 \cdot 10^{-3}} = 164,99 \text{ A}$$

Průřez rotorové tyče (souslednou složku proudové hustoty v rotoru odhadneme z Tab. 4, tzn. $\sigma_{dt} = 6$):

$$S_t = \frac{I_{dt}}{\sigma_{dt}} = \frac{164,99}{6} = 27,5 \text{ mm}^2$$

4.3 Výpočet velikosti kondenzátoru motoru

Přibližnou hodnotu kondenzátoru lze vypočítat pomocí již uvedeného vzorce:

$$C = \frac{P_n}{0,0063 \cdot U_n^2 \cdot f} = \frac{0,55}{0,0063 \cdot 230^2 \cdot 50} = 33 \text{ }\mu\text{F}$$

kde C je kapacita kondenzátoru, P_n je výkon motoru, U_n je síťové napětí a f je síťová frekvence.

5 MĚŘENÍ NA JEDNOFÁZOVÉM ASYNCHRONNÍM STROJI S TRVALE PŘIPOJENÝM KONDENZÁTOREM

Měření bylo provedeno na jednofázovém asynchronním motoru s trvale připojeným kondenzátorem J22VV499, který k měření poskytla firma ATAS elektrometry Náchod a.s. Měření proběhlo pod vedením Ing. Martina Macha, Ph.D. v laboratoři elektrických strojů na Ústavu výkonové elektrotechniky a elektroniky.

5.1 Měření činných odporů vinutí

Měření odporu hlavního a pomocného vinutí bylo provedeno před zahájením měření, tedy za studeného stavu motoru, a následně pak po skončení měření za teplého stavu. Naměřené hodnoty odporů obou vinutí jsou znázorněny v Tabulce 5.

Tab. 5: Naměřené hodnoty činného odporu hlavního a pomocného statorového vinutí motoru

Odpory	Za studena; t = 22,4 °C	Před měřením zatěžovací charakteristiky; t = 23,9 °C	Po měření ve stavu nakrátko
Hlavní vinutí R_A [Ω]	3,826	4,568	4,373
Pomocné vinutí R_B [Ω]	7,997	9,516	9,142

5.2 Měření motoru nakrátko

Tab. 6: Naměřené hodnoty motoru ve stavu nakrátko

U_n	I_A	P_k	Q_k	S_k	$\cos \varphi_k$	φ_h	I_B	φ_p	M
[V]	[A]	[W]	[VAR]	[VA]	[-]	[°]	[A]	[°]	[Nm]
139,96	6,1114	769,72	373,05	855,35	0,8999	25,86	0,7947	-79,66	0,466
119,99	5,0972	549,09	269,33	611,59	0,8978	26,13	0,6867	-79,38	0,352
99,99	4,1593	371,36	187,28	415,91	0,8929	26,76	0,5789	-79,21	0,247
80,01	3,2542	230,43	121,19	260,36	0,8851	27,74	0,4709	-79,02	0,162
60,01	2,3707	123,97	69,77	142,26	0,8715	29,37	0,3627	-78,73	0,095
40,01	1,5009	50,65	32,27	60,05	0,8434	32,50	0,2535	-78,13	0,051
20,01	0,6384	9,69	8,33	12,78	0,7582	-40,69	0,1395	-76,06	0,030

Pokud zanedbáme magnetizační reaktanci a ztráty v železe, odpovídá odpor rotoru přepočítaný na stator přibližně vztahu:

$$R_2 \cong R_k - R_A - R_B = \frac{P_k}{I_k^2} - R_A - R_B = \frac{371,36}{4,1593^2} - 4,568 - 9,516 = 7,382 \Omega \quad (83) [12]$$

5.3 Měření motoru naprázdno

Z hodnot naměřených ve stavu naprázdno je možné vypočítat Jouleovy ztráty ve vinutí statoru, mechanické ztráty a ztráty v železe. Z naměřených hodnot činného a jalového výkonu lze spočítat také účinník naprázdno $\cos \varphi_0$ a magnetizační proud I_μ . Měření naprázdno bylo provedeno s odpojeným kondenzátorem.

Tab. 7: Naměřené hodnoty motoru ve stavu naprázdno

U_n	I_0	P_0	Q_0	S_0	$\cos \varphi_0$	φ_h
[V]	[A]	[W]	[VAr]	[VA]	[-]	[°]
250,48	4,8824	332,91	1176,75	1222,93	0,2722	74,20
230,48	3,6980	224,77	822,13	852,30	0,2637	74,71
210,43	2,8917	159,67	587,17	608,49	0,2624	74,79
190,39	2,3636	117,62	434,35	449,99	0,2614	74,85
170,36	1,9587	88,67	321,69	333,69	0,2657	74,59
150,32	1,6355	68,39	236,15	245,85	0,2782	73,85
130,27	1,3574	53,94	168,39	176,82	0,3051	72,24
110,23	1,1245	43,31	116,14	123,95	0,3494	69,55
90,18	0,9240	34,38	75,90	83,33	0,4126	65,63
70,14	0,7732	28,46	46,17	54,24	0,5248	58,34
50,09	0,7202	24,36	26,61	36,07	0,6752	47,53
30,04	0,6820	14,82	14,15	20,48	0,7233	43,67

Jouleovy ztráty ve vinutí statoru určíme z Jouleova zákona:

$$\Delta P_{jA} = R_A \cdot I_0^2 = 4,373 \cdot 3,698^2 = 59,802 \text{ W} \quad (84) [12]$$

kde R_A značí činný odpor hlavního vinutí statoru a I_0 proud motorem (statorovým vinutím) naprázdno.

Ztráty způsobené zpětnou složkou proudu v rotoru:

$$\Delta P_{ji0} \cong \frac{1}{2} \cdot R_2 \cdot I_0^2 = \frac{1}{2} \cdot 7,382 \cdot 3,698^2 = 50,476 \text{ W} \quad (85) [12]$$

kde R_2' značí odpor rotoru přepočtený na stator.

Součet ztrát v železe a ztrát mechanických:

$$\begin{aligned} \Delta P_k &= \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} = P_0 - \Delta P_{jA} - \Delta P_{ji0} = \\ &= 224,77 - 59,802 - 50,476 = 114,492 \text{ W} \end{aligned} \quad (86) [12]$$

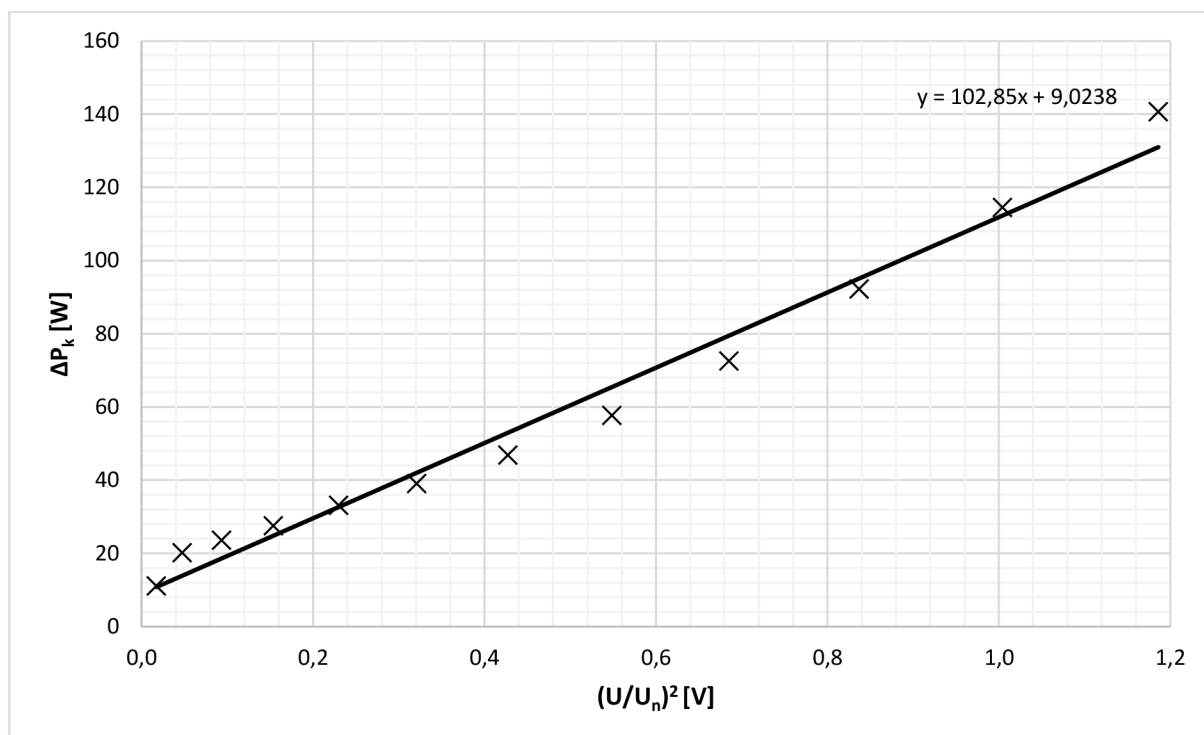
kde ΔP_{mech} značí mechanické ztráty motoru, zjistitelné extrapolací přímky $\Delta P_k = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} = f(U/U_n^2)$.

Magnetizační proud:

$$I_{\mu} = \sin \varphi_0 \cdot I_0 = 0,9646 \cdot 3,698 = 3,567 \text{ A} \quad (87) [12]$$

Tab. 8: Vyčíslení ztrát při měření motoru ve stavu naprázdno

U_n	I_0	P_0	ΔP_{jA}	ΔP_{jI0}	ΔP_k	U/U_n^2	ΔP_{Fe}	ΔP_{mech}
[V]	[A]	[W]	[W]	[W]	[W]	[-]	[W]	[W]
250,48	4,8824	332,91	104,243	87,987	140,680	1,186	131,656	9,024
230,48	3,6980	224,77	59,802	50,476	114,492	1,004	105,468	
210,43	2,8917	159,67	36,567	30,865	92,239	0,837	83,215	
190,39	2,3636	117,62	24,430	20,621	72,569	0,685	63,545	
170,36	1,9587	88,67	16,777	14,161	57,732	0,549	48,708	
150,32	1,6355	68,39	11,697	9,873	46,820	0,427	37,796	
130,27	1,3574	53,94	8,0574	6,801	39,082	0,321	30,058	
110,23	1,1245	43,31	5,530	4,667	33,113	0,230	24,089	
90,18	0,9240	34,38	3,734	3,151	27,495	0,154	18,471	
70,14	0,7732	28,46	2,614	2,207	23,639	0,093	14,615	
50,09	0,7202	24,36	2,268	1,915	20,177	0,047	11,153	
30,04	0,6820	14,82	2,034	1,717	11,069	0,017	2,045	



Obr. 16: Určení mechanických ztrát

5.4 Měření zatěžovací charakteristiky

Ztráty ve vinutí statoru a rotoru při jmenovitém chodu určíme z měření zatěžovací charakteristiky motoru.

Nejprve bylo potřeba provést výpočet jmenovitého momentu stroje, jako pracovního bodu měření:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{P_n}{2\pi \cdot \frac{n_n}{60}} = \frac{550}{2\pi \cdot \frac{2650}{60}} = 1,98 \text{ Nm} \quad (88)$$

Tab. 9: Měření zatěžovací charakteristiky motoru

U_n [V]	I_A [A]	P_1 [W]	Q_1 [VAR]	S_1 [VA]	$\cos \varphi$ [-]	φ_h [°]	I_B [A]	φ_p [°]	n [min ⁻¹]	M [Nm]
230,25	4,7775	1031,00	383,50	1100,02	0,9373	20,40	1,6381	-44,94	2510,8	2,5
230,33	3,9347	829,18	365,83	906,29	0,9149	23,81	1,7150	-44,12	2644,5	2,0
230,35	3,2786	656,66	373,00	755,21	0,8695	29,60	1,7758	-44,03	2747,5	1,5
230,40	2,7750	503,01	394,68	639,37	0,7867	38,12	1,8279	-44,47	2832,4	1,0
230,44	2,4783	363,84	440,20	571,10	0,6371	50,43	1,8800	-45,19	2908,0	0,5
230,46	2,4297	256,65	497,67	559,95	0,4583	62,72	1,9242	-45,91	2964,7	0,1

Jouleovy ztráty ve vinutí statoru při jmenovitém zatížení motoru:

$$\Delta P_{j1} = R_A \cdot I_A^2 + R_B \cdot I_B^2 = 4,568 \cdot 3,9347^2 + 9,516 \cdot 1,7150^2 = 98,71 \text{ W} \quad (89) [13]$$

Výkon přenášený přes vzduchovou mezeru zjistíme ze vztahu:

$$P_\delta = P_1 - \Delta P_{j1} - \Delta P_{Fe} = 829,18 - 98,71 - 105,468 = 625,002 \text{ W} \quad (90) [13]$$

Ztráty v rotoru určíme součinem výkonu přeneseném přes vzduchovou mezeru a skluzu motoru:

$$\Delta P_{j2} = P_\delta \cdot s = 625,002 \cdot 0,117 = 73,125 \text{ W} \quad (91) [13]$$

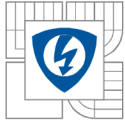
5.5 Vyčíslení celkových ztrát a výkon motoru při jmenovitém chodu

Celkové ztráty motoru při jmenovitém chodu určíme součtem všech ztrát:

$$\begin{aligned} \Delta P_{celk} &= \Delta P_{j1} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{j2} + \Delta P_{mech} = 98,71 + 105,468 + 73,125 + 9,024 = \\ &= 286,33 \text{ W} \end{aligned} \quad (92) [13]$$

Výkon motoru zjistíme odečtením celkových ztrát z příkonu motoru:

$$P_2 = P_1 - \Delta P_{celk} = 829,18 - 286,33 = 542,85 \text{ W} \quad (93) [13]$$



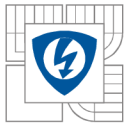
Účinnost motoru při jmenovitém chodu:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{542,85}{829,18} \cdot 100 = 65,47 \% \quad (94) [13]$$

5.6 Srovnání výsledků výpočtů a měření s parametry udávanými výrobcem motoru

Tab. 10: Srovnávací tabulka

Parametr	Označení	Jednotka	Parametry udávané výrobcem	Parametry zjištěné výpočtem	Naměřené hodnoty
Vrtání statoru	d	[mm]	64	64	-
Délka železa	l	[mm]	70	64	-
Vnější průměr statorových plechů	d ₁	[mm]	120,6	128	-
Počet drážek hlavního statorového vinutí	Q _{1A}	[-]	16	16	-
Počet drážek pomocného statorového vinutí	Q _{1B}	[-]	8	8	-
Průměr vodiče hlavního vinutí A	d _A	[mm ²]	0,6	0,6	-
Šířka statorového jha	h _{js}	[mm]	31,6	30,48	-
Odpor hlavního vinutí	R _A	[Ω]	3,8	-	3,826
Odpor pomocného vinutí	R _B	[Ω]	8	-	7,997
Příkon motoru	P ₁	[W]	880	-	829,18
Výkon motoru	P ₂	[W]	550	-	542,85
Účinnost motoru	η	[%]	62,5	-	65,47



6 ZÁVĚR

Jedním z cílů této bakalářské práce bylo vypracování rešerše na téma Asynchronní motory malého výkonu, konkrétně pak jednofázového asynchronního motoru s trvale připojeným kondenzátorem. V první kapitole této práce jsou popsány teoretické poznatky o problematice získávání záběrných momentů jednofázových asynchronních motorů, kdy jsou analyzovány známé způsoby zapojení a jejich vliv na rozběh a chod motoru. Je zde, mimo jiné, provedeno porovnání s motorem trojfázovým z hlediska účinnosti, momentu a jiných provozních vlastností. Ve shrnutí první kapitoly jsou srovnány momentové charakteristiky jednotlivých zapojení a stručně popsány výhody zapojení s pomocnou fází a trvale připojeným kondenzátorem, které je v praxi využíváno nejvíce.

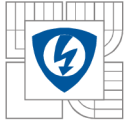
Tomuto zapojení je následně věnována samostatná kapitola, kde jsme se mj. seznámili se způsobem určení velikosti kondenzátoru. Odvodili jsme základní vztahy pro výpočet kondenzátorového motoru a uvedli podmínky pro zajištění jeho optimálního provozu.

Značná část práce se ve třetí kapitole věnuje hlavním zásadám pro návrh motoru s pomocnou fází, kdy jsou uvedeny obecné vztahy pro výpočet jednotlivých částí motoru tak, aby jej bylo možné pomocí těchto výpočtů správně navrhnout a zkonstruovat. Pro správný návrh motoru, je nutné pamatovat na výrobní odchylky, které by mohly, u tak malých strojů, značně ovlivnit správnost výsledků výpočtů. Na kvalitě návrhu a konečné realizaci motoru se tedy, mimo jiné, projeví i zkušenost a cit konstruktéra.

Na třetí kapitolu navazuje část práce, ve které je naznačený postup výpočtu ověřen na kontrolním příkladu, konkrétně na motoru J22VV499 vyráběným firmou ATAS elektromotory Náchod a.s. Odlišnosti výsledků od hodnot deklarovaných výrobcem mohly být způsobeny zaokrouhlováním výsledků, nebo rozdílným odhadem proudových hustot a magnetických indukcí u jednotlivých částí motoru.

V páté kapitole jsou zaznamenány číselné hodnoty z měření již zmíněného motoru a realizováno jejich zhodnocení. Provedena byla měření motoru naprázdno, nakrátko a měření zatěžovací charakteristiky v oblasti pracovního bodu. Po vyhodnocení měření, tedy vyčíslení ztrát, byla pro jmenovitou hodnotu momentu a otáček motoru zjištěna účinnost $\eta = 65,47 \%$, která je o trochu vyšší než hodnota udávaná výrobcem (62,5 %). Tato drobná odchylka může být způsobena zanedbáním doplňkových ztrát motoru, či nepřesností měřících přístrojů.

Hodnoty zjištěné měřením a výpočty s hodnotami uváděnými výrobcem, jsou srovnány v přehledné tabulce na konci této práce. Hodnoty jsou přibližně shodné, tzn., že správnost výpočtů a měření byla potvrzena.



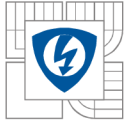
LITERATURA

- [1] ING. KOČMAN, Stanislav. *Asynchronní stroje. Katedra obecné elektrotechniky FEI VŠB-TU Ostrava*. 2002, s. 27.
- [2] BOLDEA, I a S NASAR. *The induction machine handbook*. Boca Raton: CRC Press, 2002, 950 p. ISBN 0849300045.
- [3] ŠTĚPINA, Jaroslav. *Jednofázové indukční motory: celostátní vysokoškolská příručka: určeno výpočtářům a konstruktérům v elektrotechnickém průmyslu*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1957, 198 s. Řada elektrotechnické literatury.
- [4] Single-phase induction motors. In: *All About Circuits* [online]. 2014 [cit. 2015-27-10]. Dostupné z: http://www.allaboutcircuits.com/vol_2/chpt_13/9.html
- [5] MyLMS. *Přehled a zapojení motorů* [online]. 2015 [cit. 2015-27-10]. Dostupné z: <http://mylms.cz/text-prehled-a-zapojeni-motoru/>
- [6] Direct Industry. *Leroy Somer single-phase induction motor*[online]. 2015 [cit. 2015-27-10]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/leroy-somer/product-8355-425275.html>
- [7] ŠEVČÍK, P. *Výpočet jednofázového asynchronního motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 80 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc.
- [8] electrical4u.com. *Types of Single Phase Induction Motor* [online]. 2015 [cit. 2015-23-11]. Dostupné z: <http://www.electrical4u.com/types-of-single-phase-induction-motor/>
- [9] BALU, Sriram. Learn about "Capacitor Start - Induction Run" Motors. In: *A/C-D/C Machines: A.K & B.L.Theraja* [online]. 12.8.2013 [cit. 2015-24-11]. Dostupné z: <http://www.brighthubengineering.com/diy-electronics-devices/44951-learn-about-capacitor-start-induction-run-motors/>
- [10] elektrika.cz, *Třífázový motor na jednofázové síti*. [online]. 2015 [cit. 2015-25-11]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/data/clanky/dvfm000805>
- [11] BAĐURA, J. *Návrh obvodů - motory*. [online]. 2015 [cit. 2015-08-12]. Dostupné z: http://www.badura.cz/vyp_kon/tec-moto.htm
- [12] 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.
- [13] ŠTAFFA, J. *Ztráty jednofázového asynchronního motoru s trvale připojeným kondenzátorem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 81 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Mach.
- [14] KNOTEK, J. *Navíjení a převíjení asynchronních elektromotorků*. 2., přeprac. a dopln. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1970. Praktické elektrotechnické příručky.

PŘÍLOHA A

Tab. I: Zapojení pro trvalý chod [3]

Číslo	Schéma zapojení	Bližší popis	Počty závitů	Poměr hmot mědi	Využití γ
1		Dvoufázový souměrný stroj	$k_1 = 1$	$k_{Cu} = 1$	0,85 - 1,0
2		Dvoufázový stroj se stejnou hmotou mědi (stejným počtem drážek) obou vinutí, avšak různým počtem závitů	$k_1 = 1 - 1,2$ $k_1 > 1$ $k_1 < 1$	$k_{Cu} = 1$	0,85 - 1,0
3		Jednofázový stroj s pomocným vinutím s menší hmotou mědi, než má vinutí hlavní	$k_1 = 0,8 - 1,2$ $k_1 > 1$ $k_1 < 1$	$k_{Cu} < 1$	0,75 - 0,9
4		Zapojení 1, 2, 3 s pomocným transformátorem pro zvýšení napětí na pomocném vinutí a kondenzátoru	Viz 1, 2, 3	Viz 1, 2, 3	0,75 - 1,0
5		Trojfázový motor na jednofázové síti s napětím rovným fázovému napětí motoru	-	-	0,75 - 1,0



PŘÍLOHA B

Tab. II: Průměry smaltovaných vodičů a vodičů bez izolace [14]

Průměr holého vodiče	Průměr smaltovaného vodiče	Průměr holého vodiče	Průměr smaltovaného vodiče
d_A	d_A'	d_A	d_A'
[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