

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

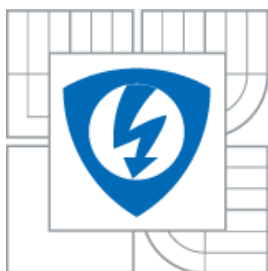
AUTHOR

Bc. PAVEL VÁCHA

BRNO 2011



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

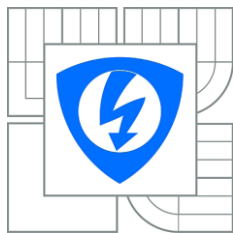
Bc. Pavel Vácha

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc.

BRNO, 2011



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Bc. Pavel Vácha

Ročník: 2

ID: 100293

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Výpočet jednofázového asynchronního motoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

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

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího.

Termín zadání: 23.9.2010

Termín odevzdání: 19.5.2011

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

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou dnes ve světě stále více využívaných jednofázových asynchronních motorů. Jejím cílem je shromáždit informace o tomto typu motoru a jeho výpočtu. Obsahem první části je teoretická analýza jednofázového asynchronního motoru a způsoby získání záběrného momentu. Dále pak práce obsahuje základní schéma návrhu jednofázového asynchronního motoru s pomocnou fází. Praktická část je věnována zpracování demonstračního příkladu výpočtu jednofázového asynchronního motoru konkrétních parametrů dle dříve navrženého postupu a provedení následného měření na motoru stejných parametrů vyráběného firmou EMP s.r.o. Slavkov u Brna. V závěru je celý postup s dosaženými výsledky vyhodnocen.

Abstract

The master's thesis deal with the thesis of a single-phase induction motor that is more and more used all over the world. Its aim is assembling the information about this type of motor and its calculation. The content of the first part is the theoretical analysis of a single-phase induction motor and acquirement ways of the stroke moment. Than the work contains a project of basic schema of the single-phase induction motor with an auxiliary phase. The practical part is devoted to an elaboration of demonstration example of the single-phase induction motor with concrete parameters calculation, its method was projected before. Than there is practising successived measuring on the motor of the same parameters made firm EMP s.r.o. Slavkov by Brno in this part. In the conclusion there is the evaluation of the whole process with reached results.

Klíčová slova

Jednofázový asynchronní motor; pomocná fáze; stator; statorový proud; vrtání statoru; statorové plechy; rotor; rotorová klec; rotorové jho; moment; fázorový diagram; magnetické pole; rozteč; vinutí; drážka; odpor; reaktance; kapacita; rozběh motoru; rozptylový magnetický tok; účinnost.

Keywords

Single-phase induction motor; auxiliary phase; stator; stator current; stator bore; stator laminations; rotor; rotor cage; rotor yoke; moment; phasor diagram; magnetic pole; pitch; winding; slot; resistance; reactance; capacity; start up motor; magnetic leakage; efficiency.

Bibliografická citace

VÁCHA, P. *Výpočet jednofázového asynchronního motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 74 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma 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 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

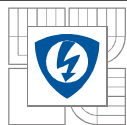
Podpis autora

Poděkování

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

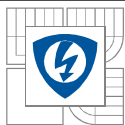
V Brně dne

Podpis autora

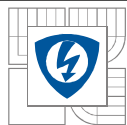


OBSAH

1 ÚVOD	16
2 ASYNCHRONNÍ STROJ	17
2.1 KONSTRUKCE	17
2.1.1 MOTOR S KOTVOU NAKRÁTKO	17
2.1.2 MOTOR S VINUTÝM ROTOREM	17
2.2 VZNIK TOČIVÉHO MAGNETICKÉHO POLE	20
2.3 VLASTNOSTI ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ	21
2.3.1 PRINCIP ČINNOSTI	21
2.3.2 SYNCHRONNÍ OTÁČKY	21
2.3.3 PROVOZNÍ VLASTNOSTI	21
3 JEDNOFÁZOVÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR	23
3.1 PRINCIP A VLASTNOSTI	23
3.2 VÝSLEDNÁ MOMENTOVÁ CHARAKTERISTIKA	24
4 ZPŮSOBY ZÍSKÁVÁNÍ ZÁBĚRNÉHO MOMENTU	26
4.1 JEDNOFÁZOVÝ VINUTÍ SE SOUSTŘEDĚNÝMI CÍVKAMI A POMOCNOU FÁZÍ	26
4.2 FÁZOROVÝ DIAGRAM	26
5 JEDNOFÁZOVÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR S POMOCNOU FÁZÍ A TRVALE PŘIPOJENÝM KONDENZÁTOREM	30
5.1 VLASTNOSTI A POUŽITÍ	32
6 STEINMETZOVO ZAPOJENÍ	33
6.1 PRINCIP ČINNOSTI	33
7 ZPŮSOBY URČENÍ VELIKOSTI KONDENZÁTORU	34
7.1 PŘÍKLADY RŮZNÝCH URČENÍ KAPACITY KONDENZÁTORU - EMPIRICKÉ VZORCE	34
7.2 DALŠÍ MOŽNOST URČENÍ KAPACITY KONDENZÁTORU - TABULKOVÁ METODA	35
7.3 PROVOZ SE DVĚMA KONDENZÁTORY U STEINMETZOVA ZAPOJENÍ	35
8 SHRUTÍ	36
9 ZÁKLADNÍ VÝPOČET JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU S POMOCNOU FÁZÍ	37
9.1 ÚVOD	37
9.2 POSTUP VÝPOČTU JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU S POMOCNOU FÁZÍ	37
9.3 VÝPOČET HLAVNÍCH ROZMĚRŮ ŽELEZNÝCH SOUČÁSTÍ	37
9.4 PŘEDBĚŽNÝ VÝPOČET ROZMĚRŮ DRÁŽEK A VINUTÍ	40
9.5 SHRUTÍ ZÁKLADNÍHO VÝPOČTU	43
9.6 VÝPOČET KONSTANT JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU	45
9.6.1 ČINNÉ ODPORY	45
9.6.2 ČINITELÉ VINUTÍ	46
9.6.3 REAKTANCE	47

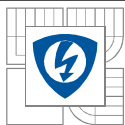


9.7 SHRUTÍ VÝPOČTU KONSTANT.....	53
10 PŘÍKLAD VÝPOČTU VYRÁBĚNÉHO MOTORU	54
10.1 VÝPOČET HLAVNÍCH ROZMĚRŮ ŽELEZA A ROZMĚRŮ DRÁŽEK A VINUTÍ	54
10.2 KONTROLA NÁVRHU STROJE (VÝPOČET KONSTANT PRO NÁHRADNÍ SCHÉMA).....	58
11 MĚŘENÍ NA JEDNOFÁZOVÉM ASYNCHRONNÍM MOTORU S TRVALE PŘIPOJENÝM KONDENZÁTOREM.....	63
11.1 MĚŘENÍ ČINNÉHO ODPORU STATOROVÉHO VINUTÍ	64
11.2 MĚŘENÍ NAPRAZDNO	64
11.3 MĚŘENÍ NAKRÁTKO.....	64
11.4 MĚŘENÍ PRO JMENOVITÝ BOD ZATÍŽENÍ.....	64
11.5 VÝPOČET KONSTANT FIKTIVNÍHO NÁHRADNÍHO SCHÉMA	65
12 SROVNÁVACÍ TABULKA VYPOČTENÝCH HODNOT Z NÁVRHU A HODNOT Z MĚŘENÍ	67
13 ZÁVĚR.....	68
LITERATURA	69
PŘÍLOHY	70

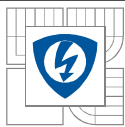


SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2-1 Ukázka asynchronního motoru s kotvou nakrátko.....	18
Obr. 2-2 Popis asynchronního motoru s kotvou nakrátko.....	18
Obr. 2-3 Zjednodušený řez asynchronním motorem	19
Obr. 2-4 Příklady klecí rotoru	19
Obr. 2-5 Stojaté magnetické pole	20
Obr. 2-6 Trojfázové točivé magnetické pole.....	20
Obr. 2-7 Vznik tažné síly asynchronního motoru	21
Obr. 2-8 Úplná momentová charakteristika.....	22
Obr. 3-1 Jednofázový asynchronní motor bez pomocné fáze – náhradní schéma.....	23
Obr. 3-2 Vznik momentové charakteristiky jednofázového asynchronního motoru.....	24
Obr. 3-3 Přibližná momentová charakteristika jednofázového asynchronního motoru, průběhy bez pomocné fáze, s odporovou pomocnou fází a rozběhovým kondenzátorem.....	25
Obr. 4-1 Zapojení jednofázového asynchronního motoru, a) s odporovým rozběhem pro běh doleva i doprava, b) s kapacitním rozběhem pro běh doleva i doprava.....	26
Obr. 4-2 Fázorový diagram jednofázového asynchronního motoru bez vytvořeného fázového posuvu v pomocné fázi.....	27
Obr. 4-3 Fázorový diagram jednofázového asynchronního motoru s odporovou pomocnou fází....	27
Obr. 4-4 Fázorový diagram jednofázového asynchronního motoru s indukčností v pomocné fázi...	28
Obr. 4-5 Fázorový diagram jednofázového asynchronního motoru s pomocnou fází pro kapacitní rozběh	28
Obr. 5-1 Jednofázový asynchronní motor s pomocnou fází a trvale zapojeným kondenzátorem...30	
Obr. 5-2 Zapojení jednofázového asynchronního motoru s pomocnou fází a kondenzátory jak pro trvalé zapojení, tak i pouze pro rozběh	31
Obr. 5-3 Momentová charakteristika Jednofázového asynchronního motoru	31
Obr. 6-1 Steinmetzovo zapojení pro běh doleva a doprava	33
Obr. 7-1 Steinmetzovo zapojení se dvěma kondenzátory.....	35
Obr. 9-1 Součin účinníku a účinnosti pro trojfázové motory	38
Obr. 9-2 Výkonová konstanta C podle Kuhlmannova	39
Obr. 9-3 Součin účinnosti a účinníku na svorkách sítě pro jednofázové asynchronní motory s trvale připojeným kondenzátorem v pomocné fázi	40
Obr. 9-4 Ukázka vypočteného a navrhnutého tvaru plechů a drážek statoru	43
Obr. 9-5 Ukázka vypočteného a navrhnutého tvaru plechů rotoru	44

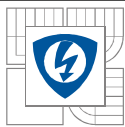


Obr. 9-6 Ukázka nejběžnějšího typu vinutí hlavní a pomocné fáze u jednofázového asynchronního motoru s pomocnou fází	44
Obr. 9-7 Ukázka nákresu sestavy jednofázového asynchronního motoru.....	44
Obr. 9-8 Zešíkmení drážek rotoru	47
Obr. 9-9 Rozměry různých druhů drážek (pro výpočet rozptylu)	51
Obr. 9-10 Diagram pro výpočet rozptylu v uzavřené drážce	52
Obr.10-1 Typ vinutí hlavní a pomocné fáze jednofázového asynchronního motoru s trvale připojeným kondenzátorem používaný firmou EMP s.r.o. Slavkov u Brna.....	55
Obr.11-1 Měřený jednofázový asynchronní motor s trvale připojeným kondenzátorem v pomocné fázi	63



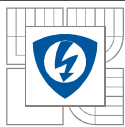
SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 7-1 Empirická tabulka pro určení kapacity kondenzátoru</i>	<i>35</i>
<i>Tab. 7-2 Velikost kapacity kondenzátoru u Steinmetzova zapojení</i>	<i>35</i>
<i>Tab. 9-1 Plnění drážek</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 9-2 Používané počty drážek.....</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 9-3 Měrná vodivost.....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 9-4 Hodnoty $\sigma_o \cdot 100$ pro vinutí s plným krokem</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 11-1 Naměřená hodnota činného odporu na statoru</i>	<i>64</i>
<i>Tab. 11-2 Naměřené hodnoty měření naprázdno</i>	<i>64</i>
<i>Tab. 11-3 Naměřené hodnoty měření nakrátko</i>	<i>64</i>
<i>Tab. 11-4 Naměřené a vypočtené hodnoty měření jmenovitého bodu.....</i>	<i>65</i>
<i>Tab. 11-5 Naměřené hodnoty momentu, otáček a mechanických ztrát</i>	<i>65</i>
<i>Tab. 12-1 Tabulka srovnání mezi hodnotami vypočtené z návrhu s hodnotami vypočtené z měření.</i>	<i>67</i>

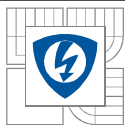


SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

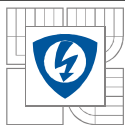
α	komplexní výraz
A	proudové zatížení obvodu statoru
b	šířka drážky
b'	otevření drážky
b_{z1}	šířka zubu
b_1	otevření drážky statoru
b_2	otevření drážky rotoru
B	magnetická indukce
B_δ	maximální indukce ve vzduchové mezeře
b_{z1}	šířka zubu
b_1	otevření drážky statoru
b_2	otevření drážky rotoru
C_A	kapacita rozběhového kondenzátoru
C_B	kapacita provozního kondenzátoru
C	kapacita kondenzátoru, výkonová konstanta
d	vrtání statoru
d_1	vnější průměr statorových plechů
d_2	průměr statoru na dně drážky
d_3	průměr
d_4	průměr
d_A	průměr holého vodiče vinutí A
d_A'	průměr vodiče s izolací vinutí A
d_{kr}	střední průměr spojovacího kruhu
f	frekvence
γ	měrná vodivost, využití stroje
i	okamžitý proud
$I_{\max}$	maximální proud
I_a	fázor proudu hlavní fáze
I_a	fázor proudu pomocné fáze
I_A	proud hlavní fáze
I_B	proud pomocné fáze
I_1	proud statoru



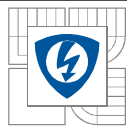
I_2	proud rotoru přepočtený na stator
I_{dkr}	sousledná složka proudu ve spojovacím
I_t	efektivní proud rotorové tyče
I_{tk}	efektivní proud nakrátko v rotorové tyči
I_{dt}	sousledná složka proudu v rotorové tyči
I_k	proud nakrátko
k_{cu}	poměr drážkového prostoru obou vinutí
k_d	plnění drážky
$k_{\delta 1}$	Carterův činitel pro drážkování statoru
$k_{\delta 2}$	Carterův činitel pro drážkování rotoru
l	délka statorového železa
l_t	délka tyče
l_z	délka závitu
l_ξ	délka čela vinutí statoru
m	počet fází statoru
M	točivý moment na hřídeli
n	otáčky
n_s	synchronní otáčky
N_A	počet závitů hlavního vinutí
p	počet pólových dvojic
P	činný výkon motoru
Q_{1A}	počet drážek připadajících na hlavní vinutí
Q_1	počet drážek na statoru
Q_2	počet drážek na rotoru
Q_p	počet drážek statoru na pól
q	počet drážek na pól a fázi
R_1	ohmický odpor statoru
R'_2	ohmický odpor rotoru přepočítaný na stator
R_{Fe}	ohmický odpor prezentující ztráty v železe
R_t'	odpor spojovacích kruhů
R_{kr}	odpor kruhu
s	skluz
S	plocha, zdánlivý výkon motoru



S_A	průřez hlavního vinutí bez izolace
S_A'	průřez hlavního vinutí s izolací
S_d	plocha drážky bez izolace
S_d'	plocha drážky s izolací
S_t	průřez rotorové tyče
δ	zešíkmení
t	čas
U	napětí
U_m	magnetické napětí
U_{mz1}	magnetické napětí zubů statoru
U_{mz2}	magnetické napětí zubů rotoru
U_{mj1}	magnetické napětí jha statoru
U_{mj2}	magnetické napětí jha rotoru
x	činitel vinutí
x'	činitel rozlohy
x''	činitel zkrácení kroku
x_t	činitel vinutí pro rotorovou klec
X_m	magnetizační reaktance
X_{1A}	rozptylová reaktance
X_{10}	diferenciální rozptyl,
X_{1d}	rozptyl v drážce
$X_{1\delta}$	rozptyl přes čela vinutí
X_{1q}	rozptyl statoru přizpůsobený natočením drážek rotoru
X'_{r2}	rozptylová reaktance přepočtená na statoru
X_{2d}	drážkový rozptyl klecového rotoru přepočítaný na stator
X_{20}	diferenční rozptyl klecového rotoru
X_{2q}	rozptyl od natočení drážek
δ	vzduchová mezera
δ'	efektivní vzduchová mezera
δ''	ekvivalentní vzduchová mezera
ε_1	poměrný úbytek napětí na rozptylové reaktanci a činném odporu statoru
$\Phi_{\max}$	maximální magnetický tok
φ	fázový posuv mezi fázory napětí a proudu



η	účinnost
ω	úhlová rychlost
ψ	fázový posuv mezi fázory proudu pomocné a hlavní fáze
λ	poměr délky železa k pólové rozteči
λ_d	drážková vodivost
λ_c	vodivost přes čela vinutí
ν	teplota
τ	pólová rozteč
τ_{d1}	drážková rozteč statoru
τ_{d2}	drážková rozteč rotoru



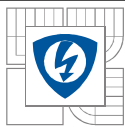
1 ÚVOD

Jako hlavní cíl v této práci jsem si vytkl porovnání hodnot náhradního schématu jednofázového asynchronního motoru, získaných jednak z měření a jednak z následného teoretického výpočtu řešeného motoru daných parametrů.

Elektromotor jako takový patří mezi elektromechanické měniče, které pracují na elektromagnetickém principu. Z názvu je patrné, že vstupní energie je elektrická a je převáděna na výstup v energii mechanickou, z principu rotační. Elektromotory, dnes zejména asynchronní motory, jsou velmi hojně využívány v průmyslu, dopravě, domácnostech apod. Nejběžnější provedení asynchronního motoru je motor třífázový. Z důvodu špatné dostupnosti připojení spotřebiče na třífázovou síť je zejména v domácnostech kladen důraz na stroje jednofázové. Nejběžnější spotřebič, u něhož je využit stroj jednofázový, je chladnička, kterou najdeme v každé domácnosti.

Tato práce se zabývá právě především jednofázovým asynchronním motorem. V úvodu je nastíněna obecná problematika asynchronního stroje a vzniku točivého magnetického pole. Následně je podrobněji rozebrán již motor jednofázový. V druhé části je uvedeno schéma výpočtu tohoto jednofázového motoru a vypracován příklad návrhu motoru daných parametrů, vyráběný firmou EMP s.r.o. Slavkov u Brna. V poslední části je provedeno měření na tomto motoru, vypočteny potřebné hodnoty, výsledky porovnány s návrhem a v závěru vše vyhodnoceno.

Tato diplomová práce může pomoci jako příručka všem výpočtářům a zájemcům, kteří se chtějí blíže seznámit s návrhem jednofázového asynchronního motoru a získat tak potřebné údaje pro výrobu aktivních částí motoru. Práce vznikla za podpory firmy EMP s.r.o. Slavkov u Brna, která má zájem o vytvoření programového prostředí pro jednodušší a rychlejší výpočet tohoto stroje. Nejdříve je ale potřeba ověřit, zda je výpočet vhodný a výsledky z návrhu odpovídají realitě.



2 ASYNCHRONNÍ STROJ

Asynchronní motor je točivý stroj, který může pracovat jako

- a) motor,
- b) generátor,
- c) asynchronní brzda,
- d) měnič kmitočtu.

Asynchronní motor může být podle statorového vinutí:

- a) trojfázový (resp. vícefázový),
- b) jednofázový (pro menší výkony).

Asynchronní motor může být podle rotoru:

- a) s kotvou nakrátko,
- b) s vinutým rotorem.

2.1 Konstrukce

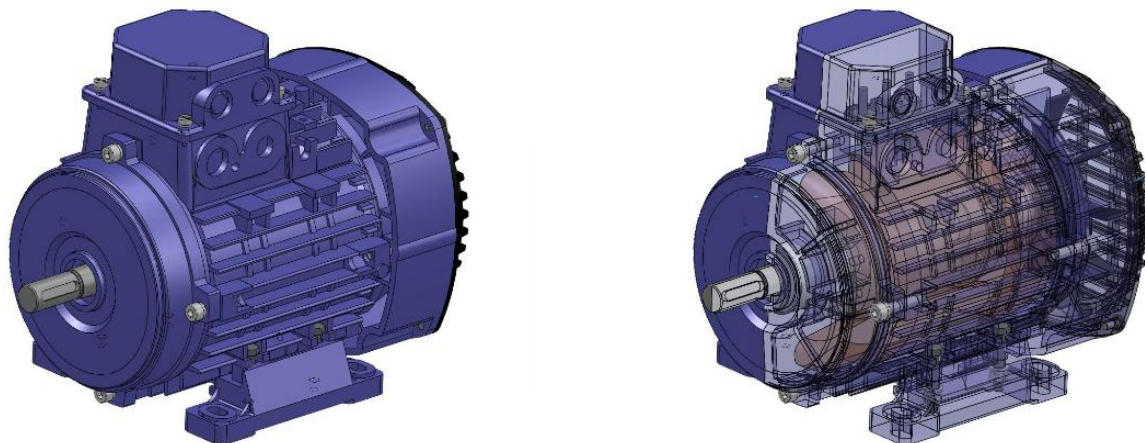
Asynchronní motory jsou rozděleny malou vzduchovou mezerou na dvě hlavní části, stator a rotor. Stator se skládá z nosného tělesa (krytu), svazku statorových plechů a statorového vinutí, jehož začátky a konce jsou vyvedeny na svorkovnici. Rotor je sestaven z rotorových plechů, nasazených ve svazku na hřídeli. V drážkách rotoru jsou uloženy vodiče, které jsou tvořeny buď tyčemi na čelních stranách spojenými zkratovacími kroužky (kotva nakrátko), nebo obdobným vinutím jako na statoru, spojeným do hvězdy a vyvedeným na sběrací kroužky (vinutý rotor). Tato kotva se užívá převážně pro motory velkých výkonů, ale dnes se již moc nepoužívá. Zjednodušený řez asynchronním motorem je na obrázku 2-3, příklady rotorové klece pak na obrázku 2-4.

2.1.1 Motor s kotvou nakrátko

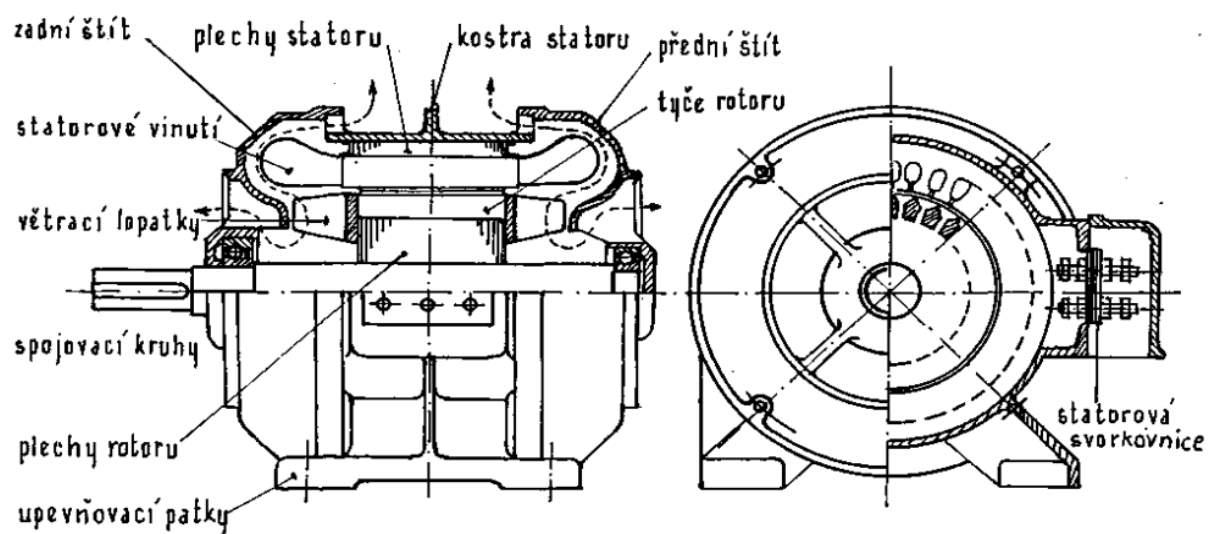
Motor s kotvou nakrátko má rotorové vinutí spojené trvale nakrátko. Vinutí je zhotoveno z masivních tyčí, spojených po obou stranách vodivými kruhy. Ukázka takového motoru je na obrázku 2-1, popis pak na obrázku 2-2.

2.1.2 Motor s vinutým rotorem

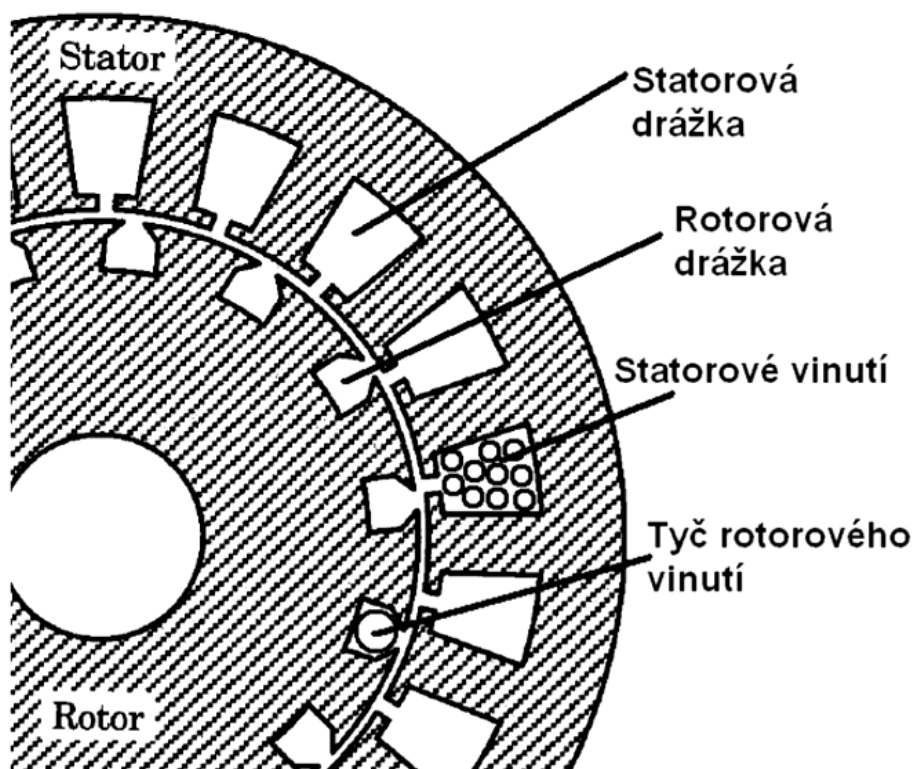
Motor s vinutým rotorem má na rotoru trojfázové vinutí. Začátky vinutí jsou vyvedeny na tři kroužky umístěné na hřídeli. Na kroužky dosedají uhlíkové sběrací kartáče, kterými můžeme do rotorového vinutí zařadit vhodný odpor pomocí rotorového spouštěče, a tím zmenšit záběrný proud motoru nebo jeho otáčky a zvětšit záběrný moment. Dnes se již moc nepoužívá.



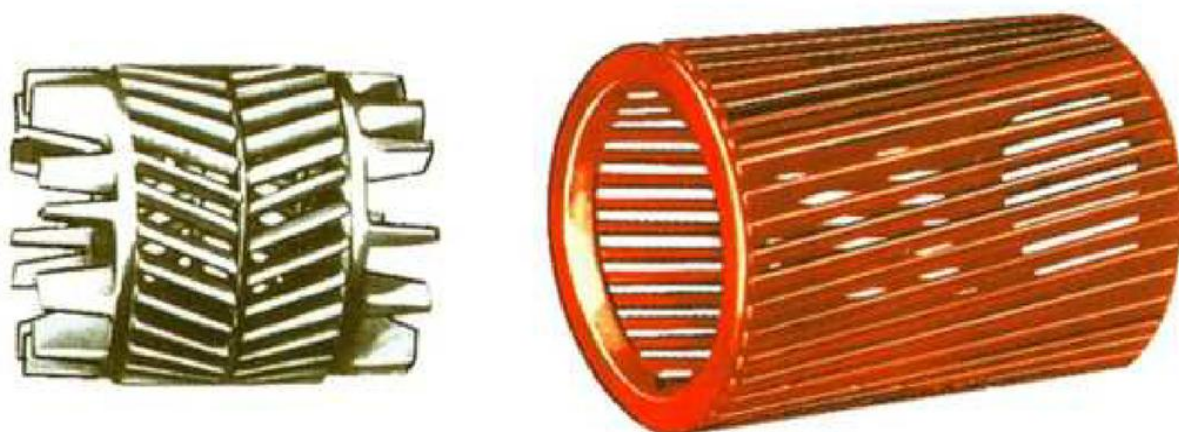
Obr. 2-1 Ukázka asynchronního motoru s kotvou nakrátko [15]



Obr. 2-2 Popis asynchronního motoru s kotvou nakrátko [12]



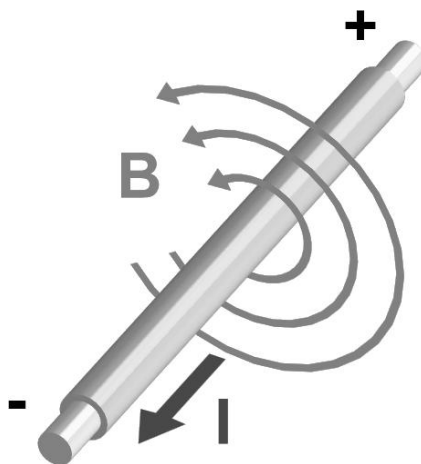
Obr. 2-3 Zjednodušený řez asynchronním motorem [14]



Obr. 2-4 Příklady klecí rotoru [14]

2.2 Vznik točivého magnetického pole

Při napájení cívky střídavým jednofázovým proudem vznikne okolo cívky stojaté magnetické pole. Toto pole nedokáže vytvořit točivé magnetické pole.

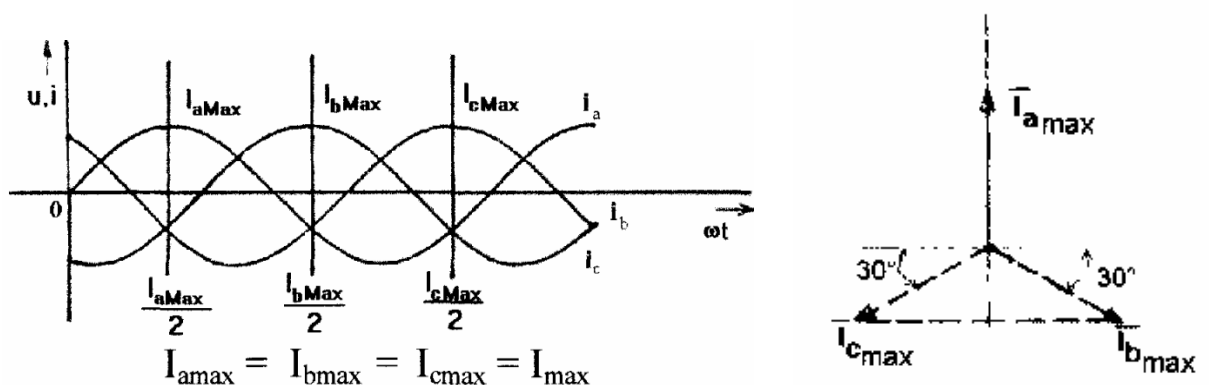


Obr. 2-5 Stojaté magnetické pole [16]

Pro proud poté platí

$$i = I_{\max} \cdot \sin \omega t \Rightarrow \Phi_{\max} \cdot \sin \omega t \quad (1)$$

Točivé magnetické pole můžeme například vytvořit pomocí tří cívek navzájem pootočených o 120° , jestliže jsou napájeny trojfázovým proudem též posunutým o 120° elektrických.



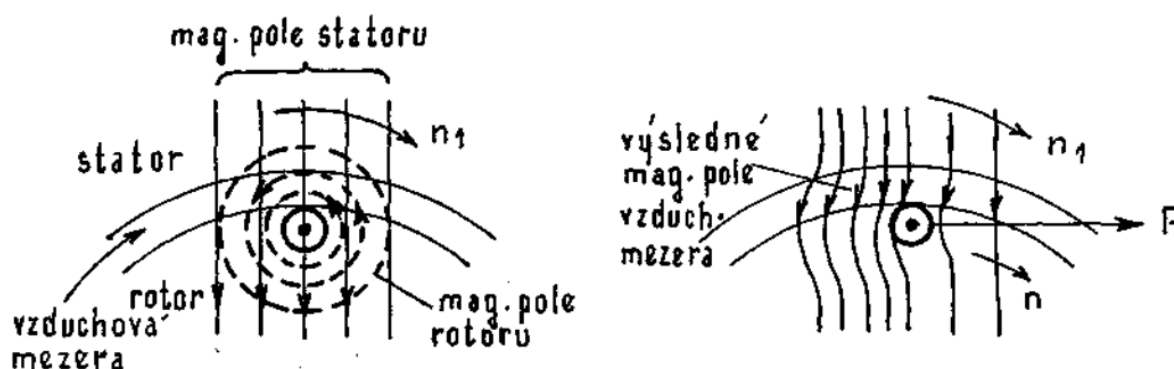
Obr. 2-6 Trojfázové točivé magnetické pole [4]

Pro vytvoření kruhového magnetického pole potřebujeme nejméně dvě cívky pootočené proti sobě o 90° , jestliže je napájíme dvěma proudy posunutými proti sobě také o 90° elektrických. Tři cívky vybudí pole dvojpolové. Několika vhodně zapojenými cívkami můžeme vybudit točivé pole několikapólové. Například šest cívek, ze kterých jsou vždy dvě zapojeny do série, vybudí pole čtyřpólové. Z hlediska funkčnosti, použití a ekonomičnosti se nejčastěji setkáváme s asynchronními motory třífázovými. Výsledný směr magnetického toku pole je dán vždy součtem okamžitých hodnot toků ϕ_a , ϕ_b a ϕ_c . Jeho koncový bod opisuje kružnici, a proto mluvíme o kruhovém točivém magnetickém poli. Výsledný fázor nemění s časem svou velikost a otáčí se ve směru postupu fází rychlostí ω . Můžeme si představit, že statorové vinutí uložené v drážkách je možno nahradit permanentním magnetem, který by se otáčel rychlostí ω .

2.3 Vlastnosti asynchronních motorů

2.3.1 Princip činnosti

Vzniklé točivé magnetické pole statoru protíná vodiče rotoru, indukuje v nich napětí a v případě, že rotorové vinutí je uzavřeno, protéká jím proud, který vytvoří magnetické pole rotoru, které v každém bodě působí proti poli statoru. Vzájemným působením magnetických polí vzniká síla, působící na vodiče rotoru ve směru pohybu magnetického pole statoru. Vznik tažné síly je znázorněn na obrázku 1-6. [12]



Obr. 2-7 Vznik tažné síly asynchronního motoru [12]

2.3.2 Synchronní otáčky

Otáčky, kterými se otáčí točivé pole statoru, jsou tzv. synchronní otáčky. Pokud se rotor motoru otáčí těmito otáčkami, v rotoru se neindukuje žádný proud, tudíž nevzniká žádný moment. Proto se motor za provozu otáčí otáčkami nižšími. Rozdíl synchronních otáček a otáček rotoru říkáme skluz (s).

Synchronní otáčky vypočteme ze vztahu

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (2)$$

kde f je kmitočet napájecí sítě a p je počet pólových dvojic motoru.

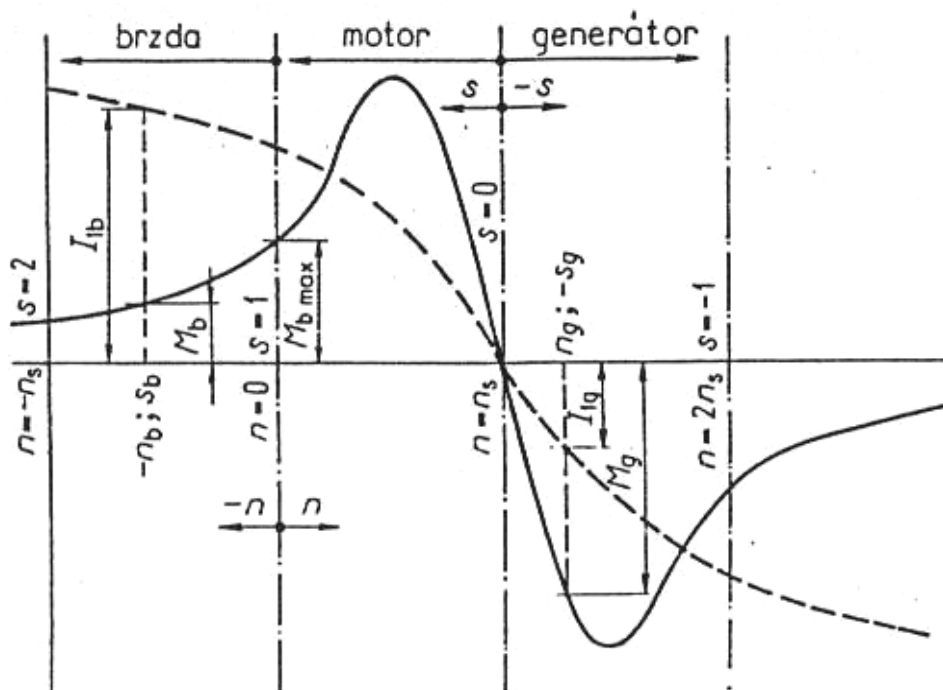
2.3.3 Provozní vlastnosti

Provozní vlastnosti jsou dány momentovou charakteristikou, kterou lze získat různými způsoby. Jedním z nich je například kruhový diagram. Úplná momentová charakteristika je na obrázku 1-8.

Zvětšíme-li vnějším momentem otáčky motoru nad synchronní otáčky, je $n > n_s$ a skluz vychází záporný.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} < 0 \quad (3)$$

Určitým nad-synchronním otáčkám (skluz s_g) odpovídá na kružnici zatěžovací bod A_g a satorový proud I_{lg} . Jeho činná složka, úměrná výkonu $I_{lg} \cdot \cos \phi_l$, je záporná, proto se asynchronní stroj stal generátorem a dodává do sítě činný výkon. Jalová složka proudu zůstává kladná, indukční generátor jalový výkon sám nevyrábí, ale odebírá ho ze sítě, do které pracuje. Velikost proudu, který dodává asynchronní generátor do sítě a jeho účinník jsou určeny otáčkami (skluzem).



Obr. 2-8 Úplná momentová charakteristika [12]

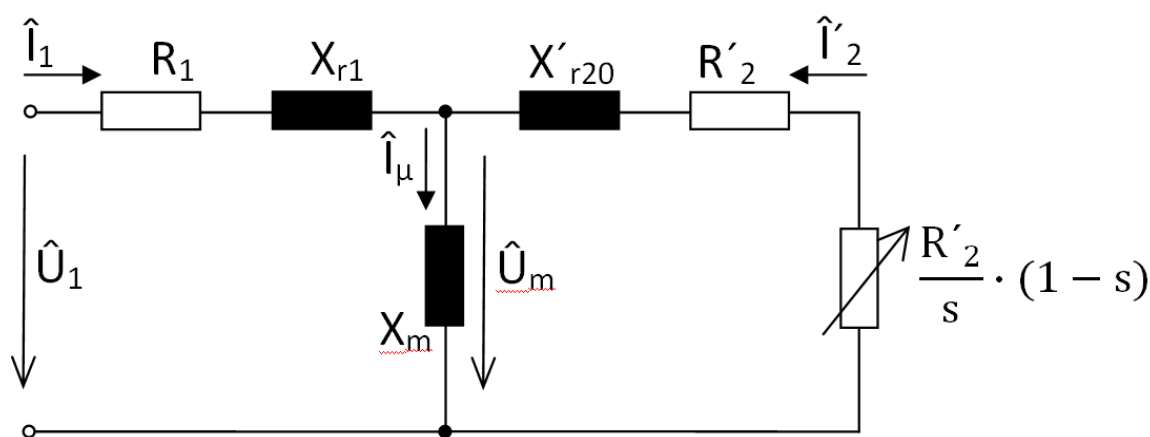
Pozn. Z třífázových asynchronních motorů je odvozen asynchronní motor jednofázový

3 JEDNOFÁZOVÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR

Jednofázový asynchronní motor se používá pro pohon malých výkonů a tam, kde není možnost se připojit na třífázovou síť. Používá se pro pohon malých spotřebičů, které umožňují mechanizovat mnoho různých prací v domácnosti, zejména pak chladničky, kuchyňské roboty, ventilátory, odstředivky apod. Stator jednofázového motoru je drážkovaný a má jednofázové vinutí. Rotor má výhradně klecové vinutí.

3.1 Princip a vlastnosti

Jednofázový asynchronní motor se po připojení k síti nerozběhne, neboť jeho jednofázové vinutí, napájené jednofázovým napětím, vyvolá pouze pulsující střídavé magnetické pole, které nedokáže vyvolat točivý moment. V tomto stavu se motor chová stejně jako transformátor se sekundárním vinutím nakrátko. Náhradní schéma je znázorněno na obrázku 3-1. Aby se jednofázový asynchronní motor začal otáčet, je třeba ho nějakým způsobem roztočit alespoň na 20% synchronních otáček.



Obr. 3-1 Jednofázový asynchronní motor bez pomocné fáze – náhradní schéma

Toto náhradní schéma platí za daných podmínek:

- lineární magnetizační charakteristika motoru,
- vlastní mechanické ztráty v motoru se zanedbávají,
- zanedbává se také ohmický odpor R_{FE} prezentující ztráty v železe,
- rotorové veličiny jsou přepočítané na stator,
- vinutí statoru a rotoru jsou symetrická.

Vysvětlení použitých symbolů:

R_1 - ohmický odpor statoru

s - skluz

R'_2 - ohmický odpor rotoru přepočítaný na stator

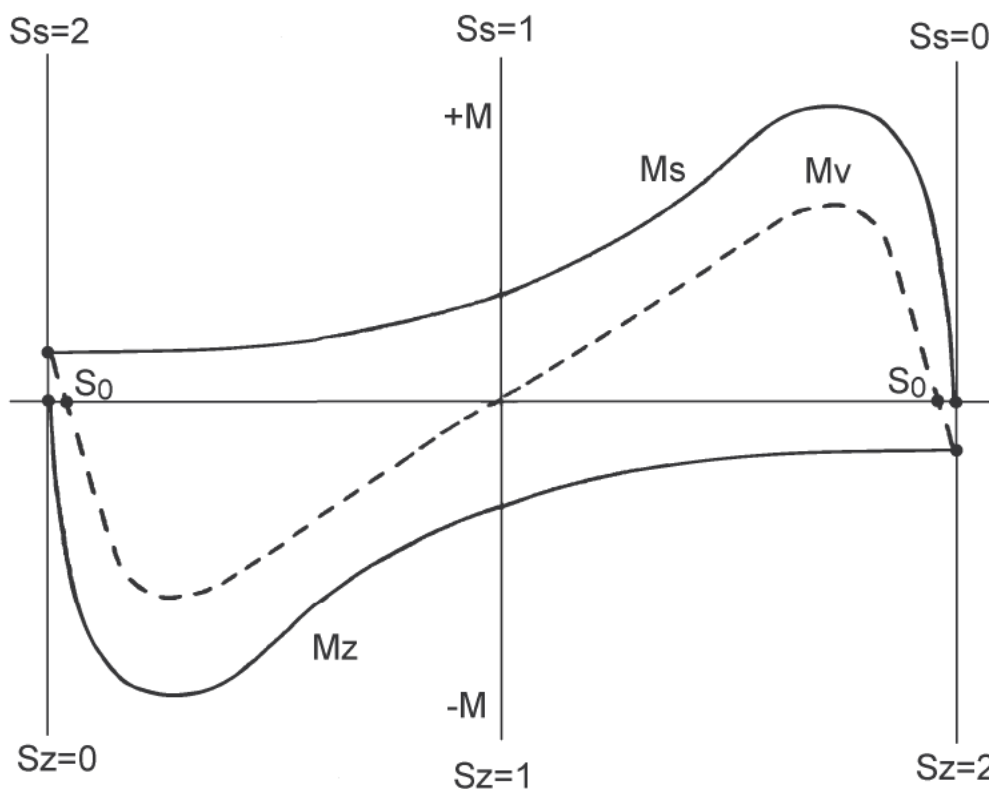
X_{r1} - reaktance na statoru

X_m - magnetizační reaktance

X'_{r20} - reaktance na rotoru přepočítaná na stator

Otáčky těchto motorů jsou dány stejně jako u trojfázových motorů kmitočtem napájecí sítě a počtem pólů stroje (rovnice 2).

Statorové vinutí je uloženo do dvou třetin celkového počtu drážek, ve zbývajících drážkách je uloženo vinutí rozběhové (pomocné) fáze. Motor by se bez ní sám nerozběhl, protože má pulsující, stojaté magnetické pole a ne točivé jako třífázový motor. Vinutí hlavní a pomocné fáze jsou vzájemně pootočená o 90° elektrických. Stojaté magnetické pole můžeme nahradit dvěma stejnými točivými poli, obíhajícími proti sobě. Toto vidíme na obrázku 3-2.



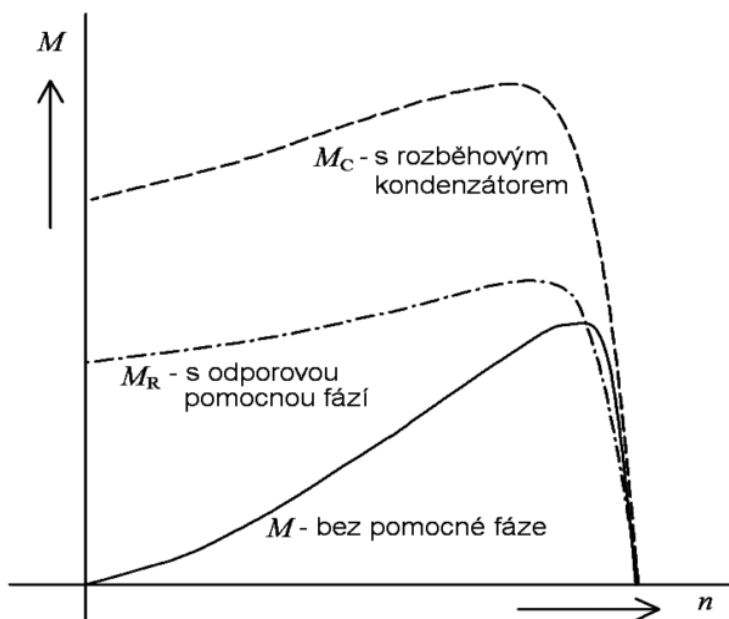
Obr. 3-2 Vznik momentové charakteristiky jednofázového asynchronního motoru [14]

Jestliže se rotor jakýmkoliv způsobem roztočí, např. na otáčky n , moment M_s je větší než moment M_z a rotor se začne otáčet působením rozdílu obou momentů. Po roztočení opačným směrem ($-n$) je výsledný moment stejně velký, ale opačný, a rotor se bude otáčet opačně.

3.2 Výsledná momentová charakteristika

Výsledná momentová charakteristika je dána součtem obou charakteristik M_s a M_z . Pro oba směry je tato charakteristika stejná, takže jednofázový indukční motor pracuje stejně v obou směrech podle toho, na kterou stranu se roztočí. Z průběhu na grafu charakteristiky je vidět, že rotor nemůže dosáhnout nikdy synchronních otáček, protože by byl jeho moment záporný. Pro roztočení jednofázového indukčního motoru můžeme použít jakýkoli způsob, třeba i roztočení rukou, zatažení za řemen, kliku apod.

V případě použití pomocné fáze (kapitola 4) u jednofázového asynchronního motoru získává motor určitý záběrný (nenulový) moment potřebný k rozběhnutí stroje. Výsledná momentová charakteristika pro různé charakteristiky pomocné fáze je uvedena na obrázku 3-3.



Obr. 3-3 Přibližná momentová charakteristika jednofázového asynchronního motoru, průběhy bez pomocné fáze, s odporovou pomocnou fází a rozběhovým kondenzátorem [14]

Všechny jednofázové asynchronní motory se vyrábí pouze s kotvou nakrátko. Provedení s vinutou kotvou je teoreticky možné, ale v praxi nemá význam. Jednofázové motory se vyrábějí o výkonech do 1 kW, a tudíž není nutné se starat o snížení záběrného proudu, což je hlavní účel kroužkové kotvy.

Pozn.

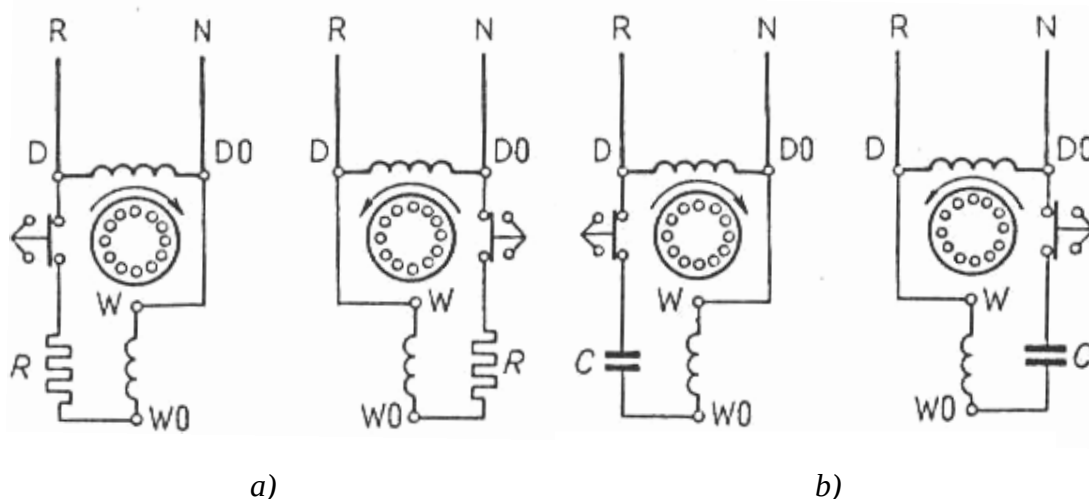
Nevýhodou jednofázového asynchronního motoru jsou nižší otáčky a limitace jednofázové zásuvky na proud (16 A). Proto můžeme ve většině případů připojovat motory pouze do cca 2 kW.

4 ZPŮSOBY ZÍSKÁVÁNÍ ZÁBĚRNÉHO MOMENTU

Dnes se jednofázové motory vyrábí výhradně s pomocným rozběhovým vinutím a rozbíhají se jako dvoufázové. Pomocná fáze má kapacitní, odporový, nebo induktivní charakter, aby vznikl potřebný fázový posun mezi pólem hlavní a pomocné fáze. Po rozběhu se pomocná fáze zpravidla odpojí (nejčastěji odstředivým vypínačem). Na síť je možno připojit motor do výkonu asi 500 W. Reverzací provádíme záměnou přívodu u pomocné fáze.

4.1 Jednofázový vinutí se soustředěnými cívkami a pomocnou fází

Pomocná fáze ($W - W_0$) se připojí paralelně k hlavní fázi, jak vidíme na obrázku 4-1. Potřebný fázový posun ψ bývá dán rozdílnými elektrickými vlastnostmi obou paralelních větví. Obvykle bývá menší než 90° , tudíž vzniklé točivé pole není kruhové, ale jen eliptické. K rozběhu motoru však stačí. Aby vznikl fázový posun, tak se do série s pomocným vinutím zapojuje činný odpor (odporový rozběh) nebo kondenzátor (kapacitní rozběh).



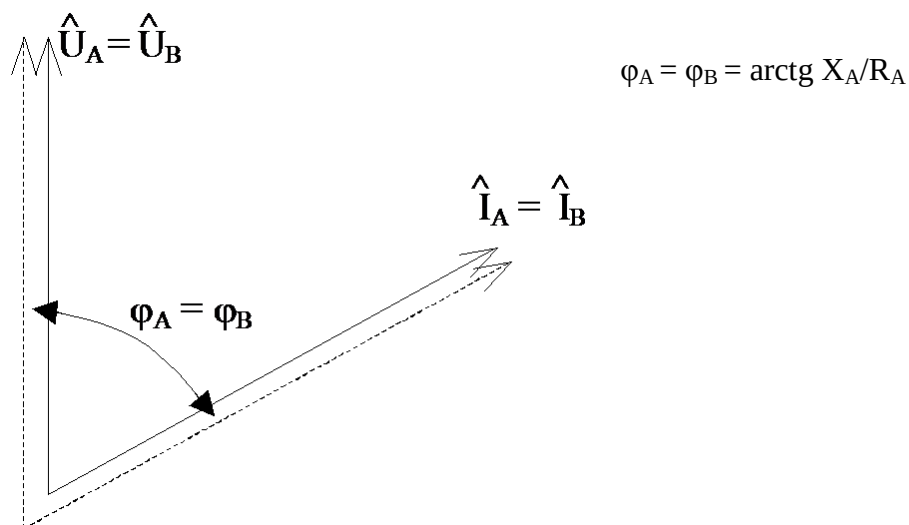
Obr. 4-1 Zapojení jednofázového asynchronního motoru, a) s odporovým rozběhem pro běh doleva i doprava, b) s kapacitním rozběhem pro běh doleva i doprava [7]

Předřadný odpor R se obvykle nahrazuje přímo zvětšením odporu pomocného vinutí (odporová fáze). Zvětšení odporu dosáhneme použitím mosazného vodiče, nebo větším počtem závitů, z nichž poslední jsou navinuty v opačném směru, aby buzení cívky zůstalo nezměněno. Samotné zmenšení průměru není vhodné, neboť znamená zmenšení tepelné kapacity vinutí.

Taktéž je možné použít tzv. bifilární vinutí, které potom má výrazně nižší indukčnost nežli vinutí hlavní. Bifilární vinutí je takové, které je navinuto smyčkou z vodiče - má stejný počet závitů navinutých v jednom i ve druhém směru.

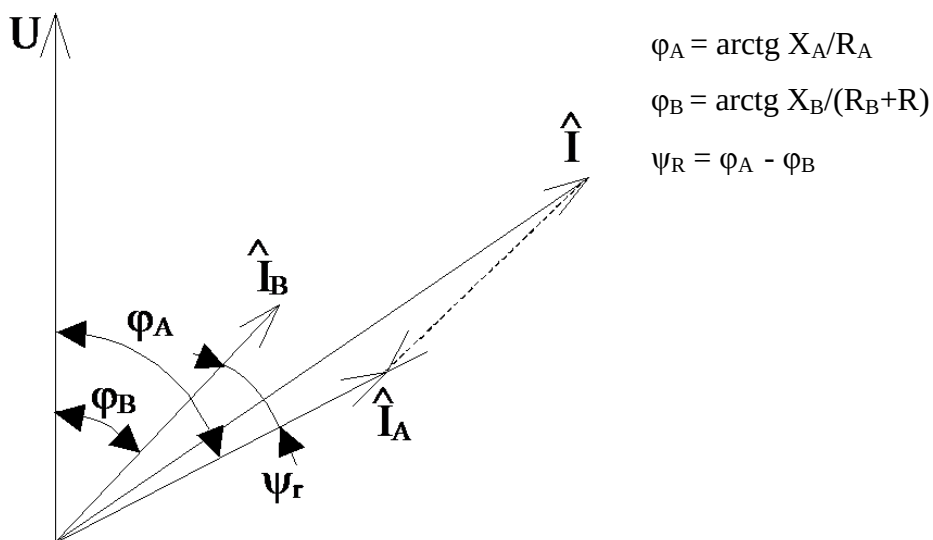
4.2 Fázorový diagram

Bez použití jakýchkoli spouštěcích elementů v pomocné fázi nevzniká mezi fázorem hlavní a pomocné fáze žádný fázový posuv a motor se tedy nemůže sám rozběhnout. (obrázek 4-2).



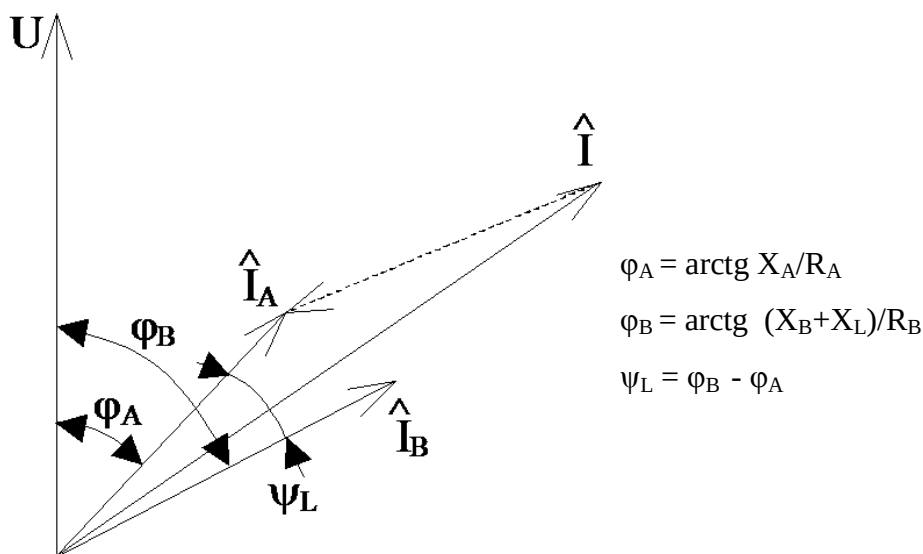
Obr. 4-2 Fázorový diagram jednofázového asynchronního motoru
bez vytvořeného fázového posuvu v pomocné fázi [13]

Fázorový diagram jednofázového asynchronního motoru s odporovým spouštěním je na obrázku 4-3.



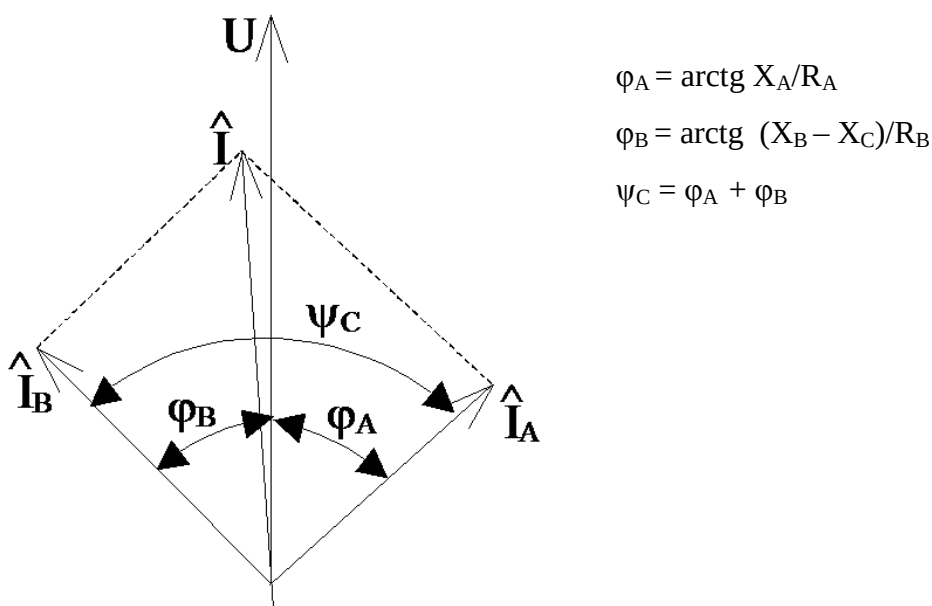
Obr. 4-3 Fázorový diagram jednofázového asynchronního motoru
s odporovou pomocnou fází [13]

Fázorový diagram jednofázového asynchronního motoru s indukčností v pomocné fázi je na obrázku 4-4.



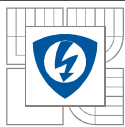
Obr. 4-4 Fázorový diagram jednofázového asynchronního motoru
s indukčností v pomocné fázi [13]

Fázorový diagram jednofázového asynchronního motoru se spouštěcím kondenzátorem v pomocné fázi je na obrázku 4-5.



Obr. 4-5 Fázorový diagram jednofázového asynchronního motoru s pomocnou fází
pro kapacitní rozběh [13]

Rozběhové vinutí je dimenzováno jen na krátkodobé zatížení a musí se po skončeném rozběhu odpojit. Vinutí můžeme odpojit trojpólovým přepínačem. Výhodnější je použití odstředivého vypínače, namontovaného přímo na hřídel motoru. Tam, kde není možné umístit odstředivý vypínač, používají se různá relé, nejčastěji relé časová, či se rozběhové vinutí odpojuje elektronicky.

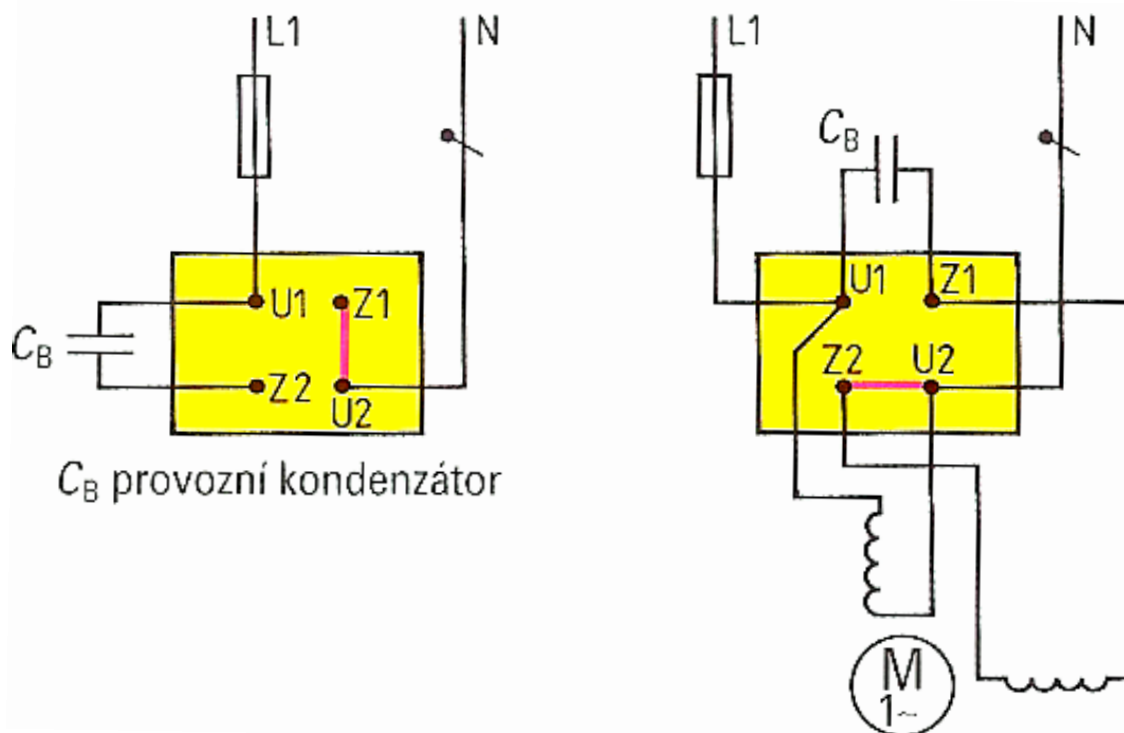


K dosažení lepšího a tiššího rozběhu (jednofázový motor při eliptickém magnetickém poli hlučí během rozběhu) a tam, kde pro dosažení potřebného záběrného momentu odporový způsob rozběhu nestačí, zapojujeme do obvodu rozběhového vinutí kondenzátor. Bývá to zpravidla lehký a malý bipolární elektrolytický kondenzátor, dimenzovaný na krátkodobé zatížení. Na něm bývá i údaj o hustotě spouštění, kterou je schopen vydržet. Rozběhovým kondenzátorem můžeme dosáhnout až čtyřnásobného záběrného momentu při zmenšeném záběrném proudu. Proto je zvlášť vhodný pro pohon kompresorových chladniček, které při rozběhu vyžadují velký záběrný moment.

Jak je zřejmé z fázorového diagramu na obrázku 3-5, pouze u kapacitního rozběhu je možno docílit pravého úhlu mezi proudy v jednotlivých vinutích. To má za následek vznik kruhového magnetického pole, kdy má motor nejtišší chod a největší záběrný moment. Při jakémkoliv jiném úhlu vzniká pole eliptické, které se projeví zvýšenou hlučností motoru, menším záběrným momentem a mnoha dalšími nežádoucími vlastnostmi.

5 JEDNOFÁZOVÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR S POMOCNOU FÁZÍ A TRVALE PŘIPOJENÝM KONDENZÁTOREM

Jedná se o jednofázový asynchronní motor s kondenzátorem v pomocné fázi. Kondenzátor vytváří potřebné fázové posunutí v pomocné fázi, potřebné pro vznik točivého pole. Při neděleném pomocném vinutí je kondenzátor sériově předřazen a při děleném pomocném vinutí je kondenzátor sériově zapojen mezi jeho dílčí části. Pro změnu směru otáčení motoru je třeba přepólovat směr proudu v pomocném vinutí. Toho lze dosáhnout například změnou připojení kondenzátoru na svorkovnici.

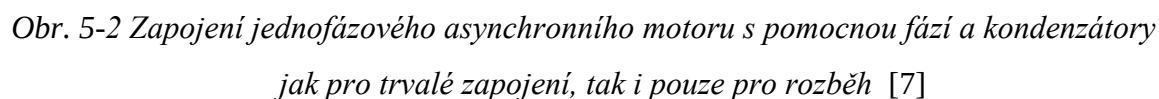


zapojení pro běh doleva

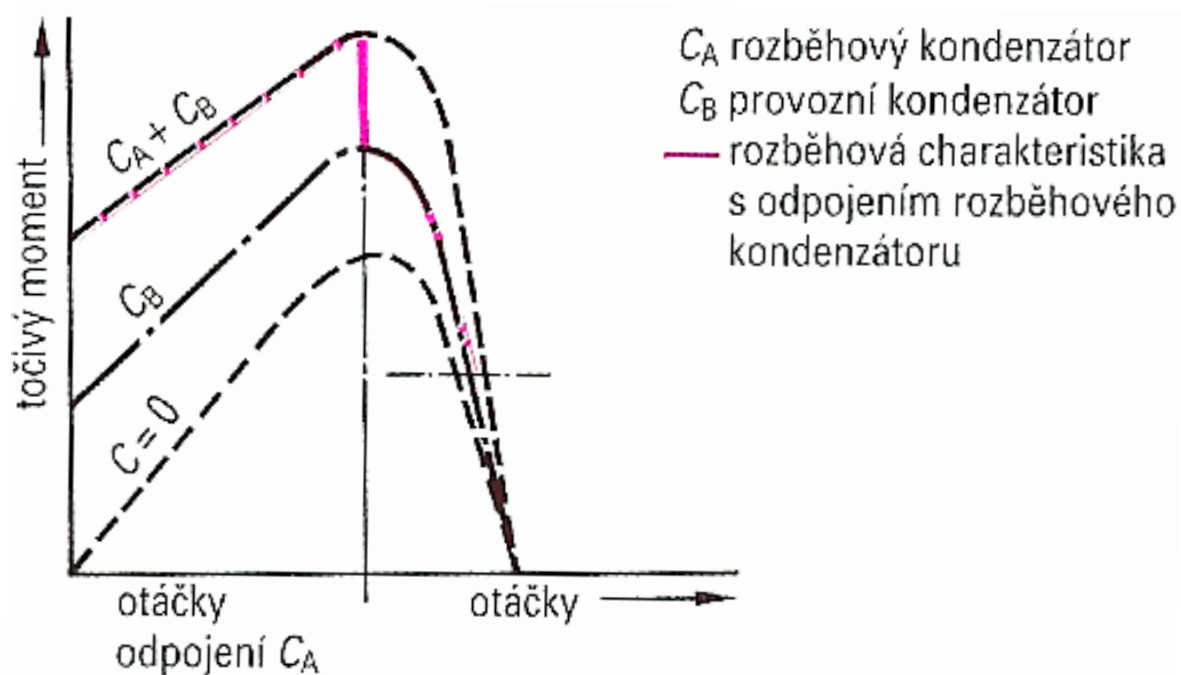
zapojení pro běh doprava

Obr. 5-1 Jednofázový asynchronní motor s pomocnou fází
a trvale zapojeným kondenzátorem [7]

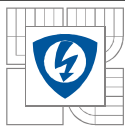
Pro dosažení velkého záběrného momentu je výhodné použití rozběhového kondenzátoru C_A a provozního kondenzátoru C_B . Záběrný moment může být díky kapacitě obou kondenzátorů zvýšen na dvojnásobek až trojnásobek jmenovitého momentu, jak můžeme vidět na obrázku 5-3. Motor se pak může rozbíhat i se zátěží. Po rozběhu se rozběhový kondenzátor C_A odpojuje a v činnosti zůstává pouze provozní kondenzátor C_B . Odpojení C_A je nutné, protože jinak by pomocným vinutím protékal příliš velký proud, který by ho přehřál. Odpojení se uskutečňuje tepelným nebo nadproudovým relé, případně odstředivým vypínačem, jak je naznačeno na obrázku 5-2. Dnes se ale již odpojení zajišťuje elektronicky. Momentová charakteristika takto zapojeného stroje je na obrázku 5-3, kde je vidět záběrný moment v jistých režimech zapojení, bez kondenzátoru v pomocné fázi, s rozběhovým kondenzátorem a s kondenzátorem, který je trvale připojen.



Provozní kondenzátor by měl mít přibližně 1,3 kVAr jalového výkonu na 1 kW výkonu motoru. Rozběhový kondenzátor by měl mít asi trojnásobnou kapacitu nežli provozní kondenzátor.



Obr. 5-3 Momentová charakteristika Jednofázového asynchronního motoru [7]



5.1 Vlastnosti a použití

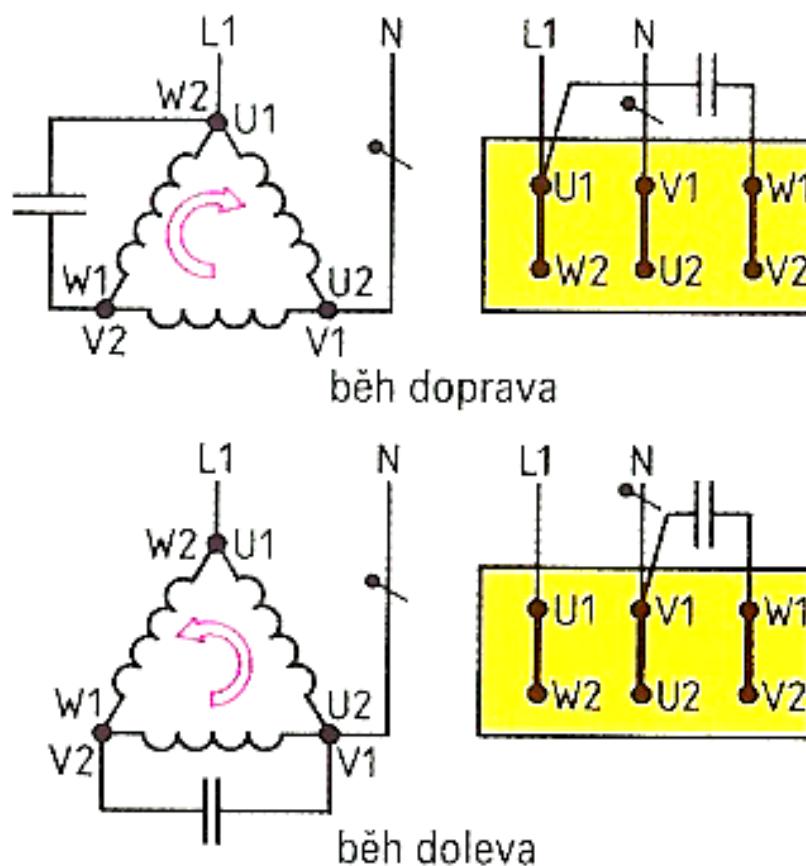
Kondenzátor tvoří spolu s indukčností pomocného vinutí sériový kmitavý obvod. Proto je na kondenzátoru napětí vyšší, než je napětí síťové. Toto napětí je největší při chodu motoru naprázdno. Motory s trvale připojeným kondenzátorem se používají o výkonech do 2 kW a můžeme se s nimi setkat v domácích spotřebičích a menších pracovních strojích.

Pozn.

K těmto motorům můžeme zařadit také trojfázový motor zapojený na jednofázovou síť
- například ve Steinmetzově zapojení.

6 STEINMETZOVO ZAPOJENÍ

Jedná se o klasický trojfázový asynchronní motor, který je ovšem připojen na jednofázovou síť.



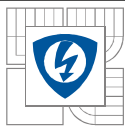
Obr. 6-1 Steinmetzovo zapojení pro běh doleva a doprava [7]

6.1 Princip činnosti

Při provozu na jednofázové střídavé napětí je proud přivedený přes kondenzátor oproti síťovému proudu fázově posunut. Při tomto posunutí opět vznikne točivé magnetické pole. Vlivem kondenzátoru jsou proudy v jednotlivých vinutích různé velké. Tím se mění indukční tok periodicky s každou periodou střídavého napětí.

Při trojfázovém provozu lze směr otáčení motoru změnit přehozením dvou libovolných fází, při jednofázovém provozu lze reverzaci provést změnou připojení kondenzátoru (obrázek 6-1). Trojfázové motory mohou být provozovány na jednofázové střídavé napětí, jsou-li pomoci zapojení do trojúhelníku nebo do hvězdy přizpůsobena napětí na vinutích na napětí sítě.

Při eliptickém točivém poli je oproti kruhovému poli při trojfázovém provozu menší výkon motoru a to maximálně 70 % jmenovitého výkonu. Záběrný moment se zmenší při tomto jednofázovém provozu většinou na polovinu.



7 ZPŮSOBY URČENÍ VELIKOSTI KONDENZÁTORU

Vlastnosti a použití motoru částečně závisí na velikosti kondenzátoru pro pomocnou fázi. Vždy se snažíme o snížení záběrného proudu a maximalizaci záběrného momentu, rychlý, tichý a ekonomický rozběh, potažmo běh motoru.

Pro určení minimální hodnoty kapacity rozběhového kondenzátoru se udává hodnota 68 μF na 1 kW výkonu motoru, při daných parametrech sítě (230 V, 50 Hz).

V elektrotechnické literatuře jsou uváděny různé vzorce, podle kterých je možné určit kapacitu kondenzátoru.

7.1 Příklady různých určení kapacity kondenzátoru - empirické vzorce

$$C = 0,29.k.P \quad (3)$$

kde:

pro k platí:

C - kapacita kondenzátoru (μF)

k = 25 pro napětí 400V

k - konstanta závislá na napětí sítě

k = 68 pro napětí 230V

P - výkon trojfázového motoru (kW)

k = 200 pro napětí 110V

$$C = \frac{P}{U.f^2} \quad (4)$$

kde:

C - kapacita kondenzátoru (F)

U - napětí sítě (V)

P - výkon motoru (kW)

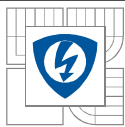
f - kmitočet sítě (Hz)

$$C = 68.P \quad (5)$$

kde:

C - kapacita kondenzátoru (μF)

P - výkon trojfázového motoru (kW)



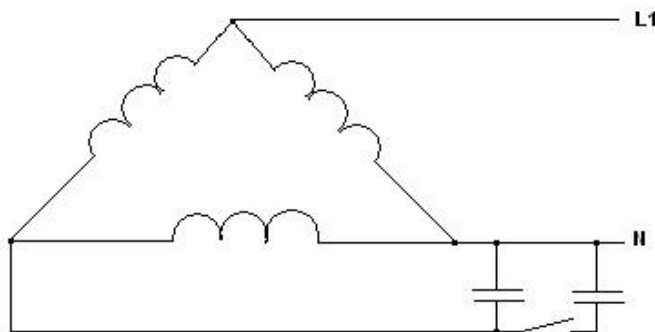
7.2 Další možnost určení kapacity kondenzátoru - tabulková metoda

Tab. 7-1 Empirická tabulka pro určení kapacity kondenzátoru

Výkon motoru	Trvale připojený kondenzátor	Odpojovaný kondenzátor
[W]	[μF]	[μF]
100 - 200	5 - 8	8 - 10
200 - 300	8 - 12	10 - 16
300 - 500	10 - 16	16 - 24
500 - 750	16 - 25	25 - 40
750 - 1000	25 - 35	40 - 51

7.3 Provoz se dvěma kondenzátory u Steinmetzova zapojení

Pro Steinmetzovo zapojení je možné asynchronní motor provozovat v zapojení se dvěma kondenzátory, kdy jeden je vždy připojen trvale a druhý pouze při rozběhu a po rozběhnutí motoru je odpojen.



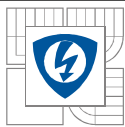
Obr. 7-1 Steinmetzovo zapojení se dvěma kondenzátory [7]

Kapacity jednotlivých kondenzátorů můžeme určit z následující empirické tabulky

Tab. 7-2 Velikost kapacity kondenzátoru u Steinmetzova zapojení

Výkon trojfázového motoru [kW]		0,6	0,8	1,1	1,5	2,2	3
C [μF]	lehký rozběh	30	40	60	80	110	150
	těžký rozběh	60	80	110	150	220	300

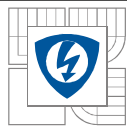
Ve Steinmetzově zapojení jsou provozovány motory do výkonu maximálně 2 kW, pokud není možnost jejich připojení na trojfázovou síť. Toto zapojení bývá užíváno například u oběhových čerpadel ústředního topení.



8 SHRnutí

Jednofázový asynchronní motor je jednoduchý točivý elektrický stroj. Nejběžnější provedení asynchronního motoru je provedení trojfázové. Jednofázový asynchronní motor nabývá na významu v případě, že nemáme v blízkosti možnost připojení na síť trojfázovou, což je velmi časté.

U jednofázového asynchronního motoru je z hlediska provozu problém s rozběhem. Z hlediska analýzy rozběhu jednofázového motoru a vzniku záběrného momentu je nejvýhodnější zapojení s pomocným vinutím při kapacitním rozběhu. Jedině tak lze dosáhnout uhlu 90° mezi fázory proudu hlavní a pomocné fáze, tím kruhového magnetického pole, šetrnějšího rozběhu a tiššího chodu. Toto znázorňuje obrázek 4-5. Velikost kapacity kondenzátoru platí vždy pouze pro jedno zatížení (jmenovité zatížení).



9 ZÁKLADNÍ VÝPOČET JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU S POMOCNOU FÁZÍ

9.1 Úvod

Úvodem do této kapitoly je třeba říci, že předpokládaný výpočet bude orientační, neboť až po určitých zkušenostech s výpočtem ověřeným zároveň praxí lze dosáhnout spolehlivých výsledků. V žádném výpočtu totiž nelze uvažovat výrobní odchylky, které právě u malých strojů mají značný vliv.

Základní výpočet návrhu uvedený v této kapitole je převzat z knihy Jednofázové indukční motory od Ing. Jaroslava Štěpiny (1957, s.113-141).

9.2 Postup výpočtu jednofázového asynchronního motoru s pomocnou fází

Při postupu návrhu jednofázového asynchronního motoru, ať už s trvale zapojeným kondenzátorem či bez něj, se určí nejdříve **hlavní rozměry železných součástí**. Dále pak vypočteme předběžně veškeré údaje pro **rozměry drážek a údajů o vinutí**.

9.3 Výpočet hlavních rozměrů železných součástí

Při předběžném určení hlavních rozměrů železa vyjdeme z rozměrů železa pro stroj trojfázový. Takto určené hodnoty je třeba zvětšit podle využití stroje γ , které je dané podle použitého zapojení. V praxi se často používá stejných statorů a rotorů jak pro motory trojfázové, tak i jednofázové. Nejjednodušší je tedy určit hlavní rozměry jednofázového asynchronního motoru s výkonem P jako rozměry motoru trojfázového s výkonem αP krát větším.

Zdánlivý příkon trojfázového asynchronního motoru stejných rozměrů je

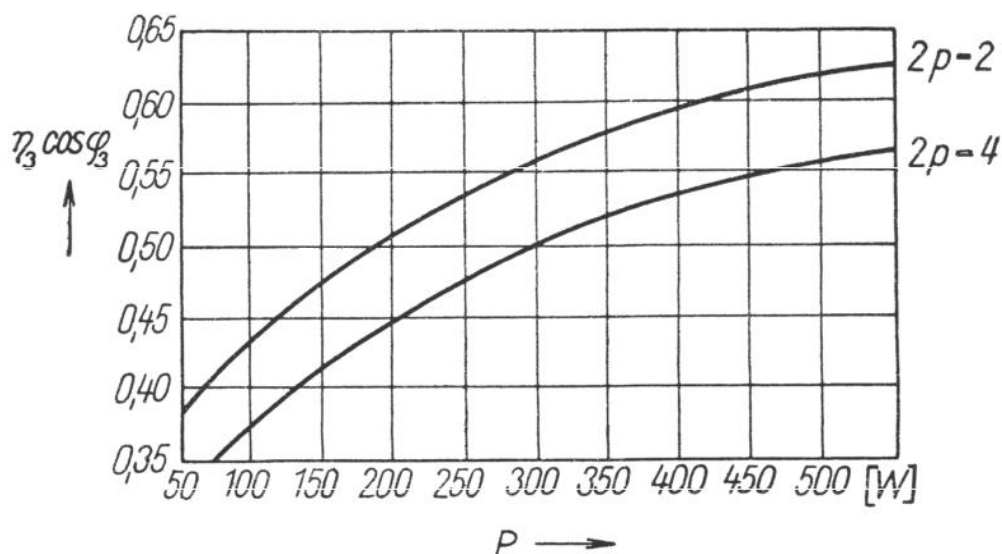
$$S_3 = \frac{\alpha P}{\cos \varphi_3 \eta_3} \quad [\text{VA}; \text{W}] \quad (6)$$

kde α je převrácená hodnota využití stroje γ , jehož velikost závisí na tom, zda pomocné vinutí je zapojeno či nikoliv a na druhu zapojení a platí tedy

$$\alpha = \frac{1}{\gamma} \quad (7)$$

Pozn.

Využití γ u základního zapojení s pomocným vinutím bývá v rozmezí 0,45 až 65. U motorů s trvale připojeným kondenzátorem pak v rozmezí 0,85 až 1. Veličiny $\cos \varphi_3$ a η_3 se vztahují na trojfázový asynchronní motor výkonu αP , a proto je označíme indexem 3. Jejich velikost lze předběžně odhadnout podle provedení strojů nebo například podle diagramu na obrázku 9-1.



Obr. 9-1 Součin účinníku a účinnosti pro trojfázové motory [1]

Známe-li zdánlivý příkon S_3 náhradního trojfázového asynchronního motoru, můžeme určit rozměry podle daných rovnic. Pro hlavní rozměry stroje platí

$$d^2 l = \frac{8,6 (1 - \varepsilon_3) S_3 10^4}{B_\delta A x_1 n_s} \quad [\text{cm; VA, T, A/cm, ot/min}] \quad (8)$$

kde d značí vrtání statoru

l délka statorového železa

ε_1 poměrný úbytek napětí na rozptylové reaktanci a činném odporu statoru

S_3 zdánlivý výkon stroje

B_δ maximální indukce ve vzduchové mezeře

x_1 činitel vinutí statoru

n_s synchronní otáčky

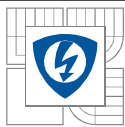
A proudové zatížení obvodu statoru

U nejběžnějších dvupólových a čtyřpólových motorů můžeme položit veličiny $(1 - \varepsilon_1)$ a x_1 sobě rovné a vztah upravit na tvar

$$d^2 l = \frac{8,6 \cdot 10^4}{B_\delta A} \frac{S_3}{n_s} \quad [\text{cm; VA, T, A/cm, ot/min}] \quad (9)$$

a stručně můžeme psát

$$d^2 l = C \frac{S_3}{n_s} \quad [\text{cm; VA, ot/min}] \quad (10)$$



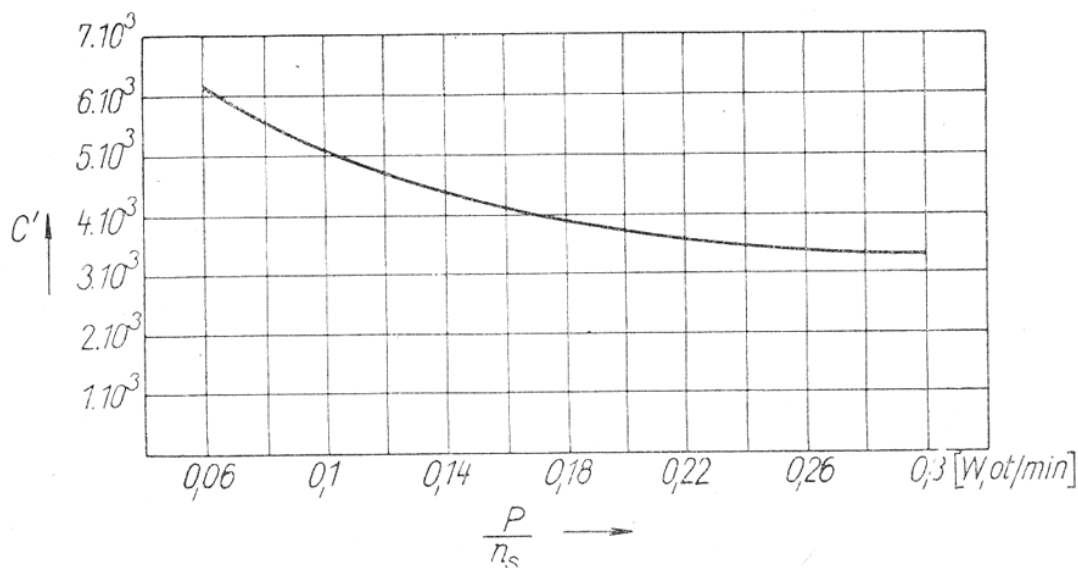
, kde výraz C představuje Essonskou konstantu pro kterou platí

$$C = \frac{8,6 \cdot 10^4}{B_\delta A} \quad [T, A/cm] \quad (11)$$

Pozn.

Je třeba upozornit, že tyto vztahy platí pro uvažování účinnosti a účinníku pro stroj trojfázový a pro takto zvolené využití stroje γ . V jiné literatuře se můžeme setkat se stejným vztahem, který ovšem počítá s účinností a účinníkem stroje jednofázového, což se projevuje použitím jiné konstanty α a je třeba dbát na volbu způsobu návrhu. Jde-li o návrh hlavních rozměrů motoru s trvale zapojeným kondenzátorem a jestliže je pomocné vinutí plně využito, dosadíme za $\alpha = 1,1$.

Essonskou konstantu C můžeme určit buď výpočtem ze zvoleného sycení B_δ ve vzduchové mezeře a proudového zatížení obvodu statoru A , nebo odečteme z diagramu sestrojeného podle již provedených a vyhovujících strojů jako na obrázku 9-2, sestrojeného podle Kuhlmannna. Sycení bývá u jednofázových motorů $B_\delta = 0,5$ až $0,6$ T. Proudové zatížení statorového obvodu bývá v mezích $A = 120$ až 200 A/cm.



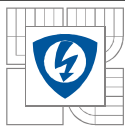
Obr. 9-2 Výkonová konstanta C podle Kuhlmannna [1]

Poměr vnějšího průměru d_1 statorových plechů k vrtání statoru závisí na počtu pólů a platí přibližně u dvoupólových strojů

$$\frac{d}{d_1} = k_s \sim 0,5 \quad (12)$$

a u čtyřpólových

$$\frac{d}{d_1} = k_s \sim 0,6 \quad (13)$$



Podobně také poměr délky železa l k pólové rozteči τ , který značíme λ a platí

$$\lambda = \frac{l}{\tau} \quad ; \quad \tau = \frac{\pi d}{2p} \quad (14); (15)$$

λ bývá u dvoupólových strojů $\lambda = 0,6$ až $1,0$

u čtyřpólových $\lambda = 1,0$ až $1,4$

9.4 Předběžný výpočet rozměrů drážek a vinutí

Máme-li předběžně určeny hlavní rozměry železa, vypočteme přibližně **proud hlavního vinutí**. Jde-li o motor s pomocným vinutím a trvale zapojeným kondenzátorem je proud hlavního vinutí dán rozšířeným vztahem

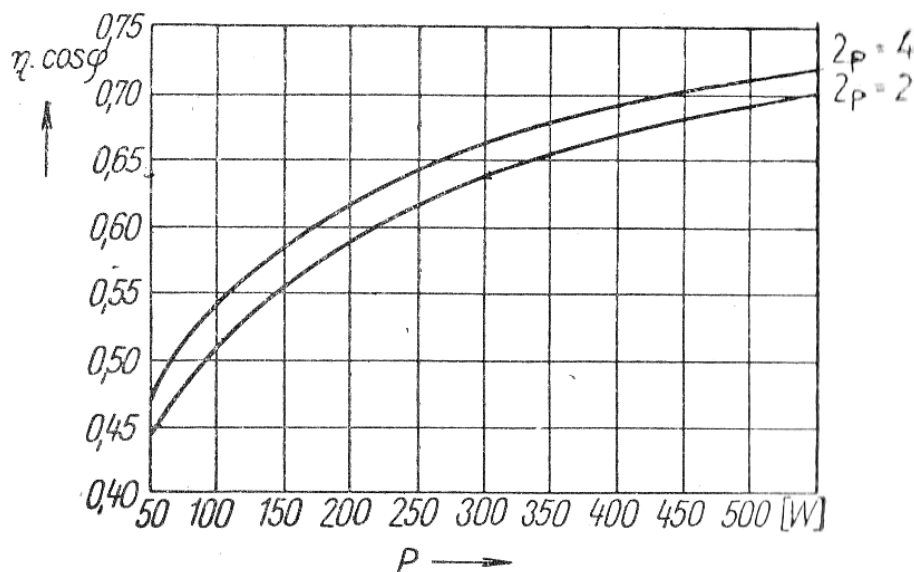
$$I_A = \frac{P_n}{\eta'_1 \cos \varphi'_1 U (1+k_{cu})} \quad [A; W, V] \quad (16)$$

kde P_n značí jmenovitý mechanický výkon na hřídeli

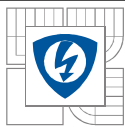
U svorkové napětí

k_{cu} značí poměr drážkového prostoru obou vinutí

Součin $\eta'_1 \cos \varphi'_1$ bude co do velikosti někde mezi hodnotami pro trojfázový asynchronní motor a jednofázový, což závisí na váze mědi a využití pomocného vinutí. Daný vztah platí ale pouze pro plně využitá pomocná vinutí. Proto u motorů s trvale připojeným kondenzátorem je daný součin dokonce vyšší než u motorů třífázových. Vyšší hodnoty jsou způsobeny vlivem účinníku kompenzace kondenzátorem. Součin $\eta'_1 \cos \varphi'_1$ pro motor s trvale připojeným kondenzátorem odečteme z diagramu na obrázku 9-3.



Obr. 9-3 Součin účinnosti a účinníku na svorkách sítě pro jednofázové asynchronní motory s trvale připojeným kondenzátorem v pomocné fázi [1]



Ze dříve zvolené indukce ve vzduchové mezeře určíme magnetický tok

$$\Phi = \frac{ldB_{\delta}10^4}{p} \quad [\text{Wb; T, cm}] \quad (17)$$

Plocha jednoho pólu ve vzduchové mezeře je

$$S = \frac{\pi dl}{2p} \quad [\text{cm}^2; \text{cm}] \quad (18)$$

Závity hlavního vinutí vypočteme dle vztahu

$$N_A = \frac{U(1-\varepsilon_1)}{4,44fx_4\Phi} \quad [\text{V; c/s, Wb}] \quad (19)$$

kde ε_1 je poměrný úbytek napětí na rozptylové impedanci statoru. Úbytek ε_1 předběžně odhadneme podle provedených strojů. Šířku zubu zvolíme takovou, aby sycení v zubech vycházelo $B_z = 1,5$ až $1,7$ T.

Šířka zubu je dána vztahem

$$B_{z1} = \frac{B_{\delta}}{B_z} \frac{\pi d}{0,9 Q_1} \quad (20)$$

kde předpokládáme při dobrém stažení plechů plnění železa 0,9. Průřez statorového vodiče hlavního vinutí A volíme podle proudu I_A tak, aby proudová hustota byla v mezích $\sigma = 6$ až $8,5$ A/mm².

Průřez vinutí hlavního vinutí A bude

$$S_A = \frac{I_A}{\sigma_A} \quad [\text{mm}^2; \text{A, A/mm}^2] \quad (21)$$

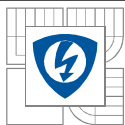
Potřebná plocha drážky bez izolace

$$S_d = \frac{2N_A S'_A}{Q_{1A} k_d} \quad [\text{mm}^2] \quad (22)$$

kde S_A je průřez vodiče vinutí A s izolací

Q_{1A} je počet drážek připadajících na hlavní vinutí.

k_d je poměr součtu kruhových průřezů všech izolovaných vodičů v drážce k ploše neizolované drážky. U malých strojů bývá podle tabulky 9-1.



Tab. 9-1. Plnění drážek

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

V některých firmách vztahují využití drážky na plochu drážky po odečtení průřezu drážkové izolace. Pak činitel plnění bývá až 70 % a je dán vztahem

$$k'_d = \frac{2N_A d_A^2}{Q_{1A} S'_d} \quad (23)$$

kde N_A značí počet závitů hlavního vinutí

d'_A průměr vodiče s izolací

S'_d plocha drážky po odečtení drážkové izolace

Pomocí předchozích vztahů určíme tedy rozměry statorových drážek. Počty drážek se ale většinou volí dle zkušenosti. Nejčastěji se počty drážek statoru a rotoru určí zároveň, neboť musejí být navzájem přizpůsobeny. Často se také používají stejné plechy jak pro stroj trojfázový, tak i pro jednofázový. V tabulce 9-2 jsou uvedeny často používané počty drážek.

Tab. 9-2. Používané počty drážek

2p	Q_1	Q_2
2; 4	24	30
2	18	30
4; 6; 8	36	48
2; 4; 8	24	36
4	32	26
2	24	18

Počet drážek na pól Q_p bývá obvykle větší nebo roven šesti vzhledem k velkému diferenčnímu rozptylu při malém počtu drážek. Malého počtu drážek se snažíme vyvarovat. Drážky rotoru provádíme obvykle natočené nejvýše o jednu rozteč drážek statorových. Potřebná šířka statorového jha je dána vztahem

$$d_1 - d_2 = \frac{\Phi 10^4}{B_{j1} l_{0,9}} = \frac{B_\delta}{B_{j1}} \frac{d}{p_{0,9}} \quad [\text{cm, T, Wb}] \quad (24)$$

kde $B_{j1} = 1,3$ až $1,5$ T

Pro šířku zubu rotorů b_{z2} platí stejně jako pro stator vztah (20), přičemž dosadíme místo počtu drážek statoru počet drážek rotoru Q_2 . Sycení železa zubů rotoru volíme v mezích $B_{z2} = 1,5$ až $1,8$ T.

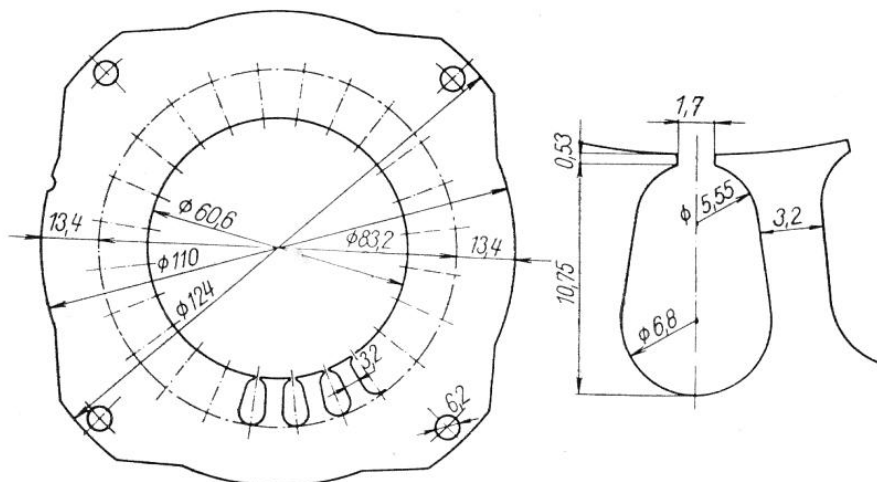
Obdobně pro šířku rotorového jha platí vztah (24), do něhož se zahrnou dané parametry rotoru. Sycení rotoru může být i vyšší nežli statorové, ale často o sycení rozhoduje mechanické provedení (průměr hřídele), takže rotor bývá sycen většinou méně nežli stator.

Poměrně závažná otázka při návrhu je odpor rotoru. Při volbě průřezu vodivého materiálu rotoru je nutné uvědomit si, že odpor rotoru je ovlivňován nejen jmenovitým skluzem a záběrným momentem jako u motorů třífázových, ale také momentem zvratu a přídatnými momenty vyššími harmonickými. U stroje s trvale připojeným kondenzátorem tento vliv není až tak velký, ale přesto se snažíme volit průřez vodivého materiálu rotoru větší. Se vzrůstajícím odporem rotoru se zmenšuje moment zvratu a vzrůstá jmenovitý skluz. U motoru s trvale připojeným kondenzátorem roste jmenovitý skluz jen do určité míry. Jestliže máme daný jmenovitý skluz, který chceme dodržet, určíme odpor rotorové tyče R_t , který v sobě již zahrnuje odpor spojovacích kruhů, podle vztahu (25), kde ε_1 , ε_2 , ΔP a ΔP_{cui} odhadneme.

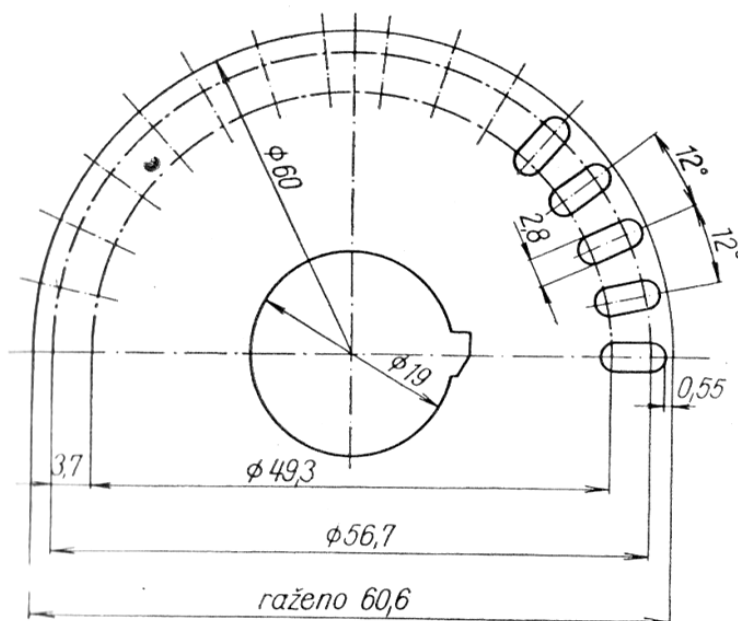
$$R'_t = \frac{(1-s) s U^2 (1-\varepsilon_1-\varepsilon_2)^2 Q_2 x_t}{4 N_A^2 x_A^2 (P + \Delta P_{cui} + \Delta P)} \quad [\Omega; V, W] \quad (25)$$

9.5 Shrnutí základního výpočtu

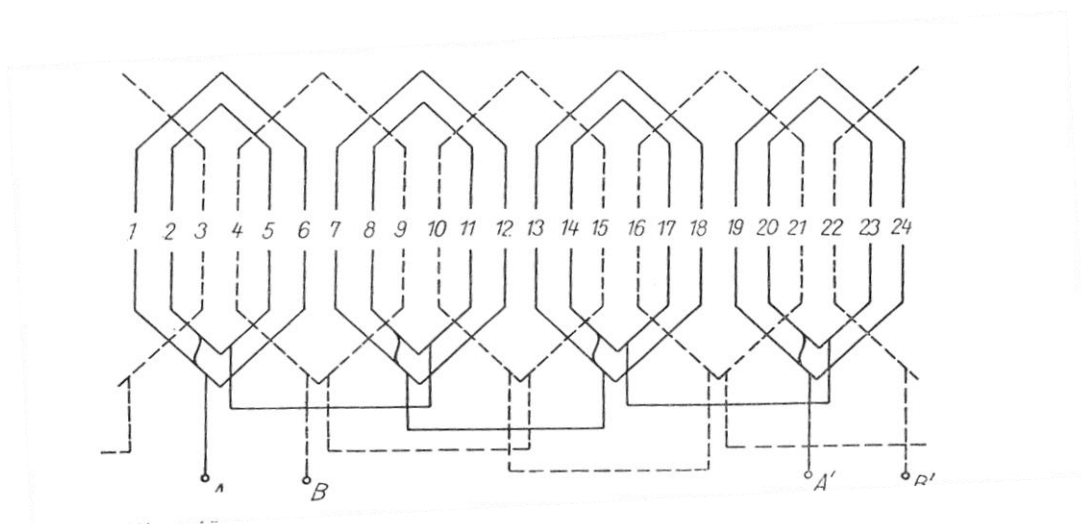
V kapitole 9 se zabýváme výpočtem jednofázového asynchronního motoru. Při postupu výpočtu nejdříve vypočteme předběžně hlavní rozměry železa a poté veškeré údaje o vinutí, drážkách a dalších potřebných veličin a rozměrů. Při návrhu využíváme tvarů a rozměrů součástí strojů trojfázových, neboť se používá velmi často stejných rozměrů a tvarů jednotlivých součástí jak pro stroje trojfázové, tak i pro motory jednofázové. Pro zjednodušení výpočtu můžeme různé konstanty či jiné veličiny vyčíst z diagramů, který je vytvořen podle již dříve vyrobených motorů, a diagramy jsou tedy podloženy praxí. Na obrázku 9-4 je uvedena ukázka základního tvaru plechů a drážek statoru pro asynchronní motor, který se běžně vyrábí. Obdobně na obrázku 9-5 je znázorněn tvar plechů a drážek rotoru asynchronního motoru. Obrázek 9-6 znázorňuje nejběžnější a nejzákladnější typ vinutí hlavní a pomocné fáze, kdy hlavní fáze je navinuta do 2/3 drážek. Na obrázku 9-7 je celá sestava jednofázového asynchronního motoru. Pro velikost kapacity kondenzátoru je třeba zhodnotit využití kondenzátoru, zda bude trvale připojen nebo jen krátkodobě zatížen při rozběhu. Výpočet provedeme dle kapitoly 6. Obdobně jako hlavní vinutí postupujeme při návrhu vinutí pomocného, kde ovšem zohledňujeme jeho využití apod..



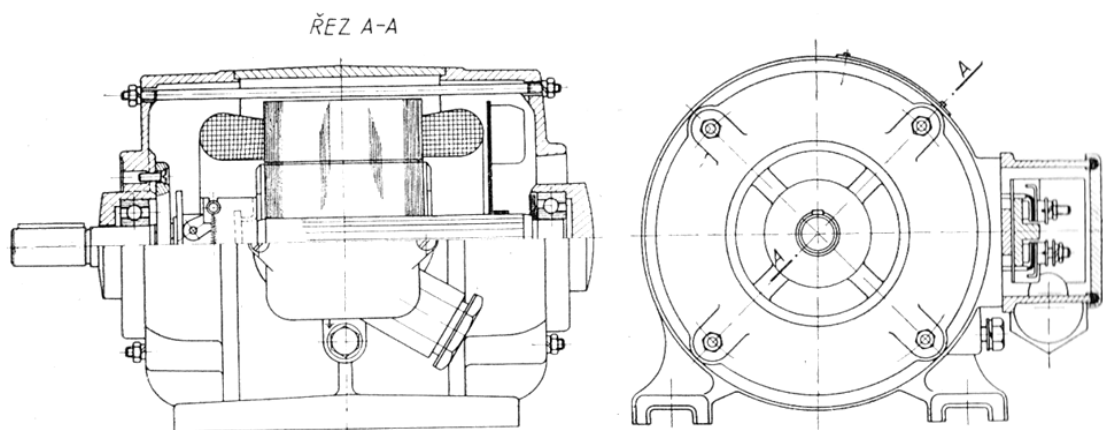
Obr. 9-4 Ukázka vypočteného a navrhnutého tvaru plechů a drážek statoru [1]



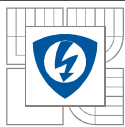
Obr. 9-5 Ukázka vypočteného a navrhnutého tvaru plechů rotoru [1]



Obr. 9-6 Ukázka nejběžnějšího typu vinutí hlavní a pomocné fáze u jednofázového asynchronního motoru s pomocnou fází [1]



Obr. 9-7 Ukázka nákresu sestavy jednofázového asynchronního motoru [1]



9.6 Výpočet konstant jednofázového asynchronního motoru

Jestliže jsme navrhli předběžně hlavní rozměry železa a rozměry drážek a vinutí, můžeme vypočítat konstanty náhradního schématu jednofázového asynchronního motoru. Musíme si uvědomit, že pro takto malé stroje menších výkonů mohou být tyto hodnoty určeny pouze orientačně a mnohdy ne zcela přesně. Přesnějších hodnot dosáhneme až dlouhodobými zkušenostmi ověřenými praxí.

9.6.1 Činné odpory

Odpor každého fázového vinutí statoru vypočítáme podle známého vztahu

$$R_1 = \frac{N l_z}{\gamma S} \quad [\Omega; \text{m}, \text{S m/mm}^2, \text{mm}^2] \quad (26)$$

kde N je počet závitů uvažovaného vinutí

l_z je střední délka závitů

γ měrná vodivost

S průřez vodiče

Pro odpor jedné tyče rotoru, do níž je započítán vliv odporu spojovacích kruhů, platí

$$R'_t = R_1 + \frac{R_{kr}}{2 \sin^2 \frac{p\pi}{Q_2}} \quad [\Omega] \quad (27)$$

kde R_t je odpor samostatné rotorové tyče

$$R_t = \frac{l_t}{\gamma S_t} \quad [\Omega; \text{m}, \text{S m/mm}^2, \text{mm}^2] \quad (28)$$

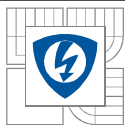
a R_{kr} odpor spojovacího kruhu

$$R_{kr} = \frac{\pi d_{kr}}{\gamma S_{kr} Q_2} \quad [\Omega; \text{m}, \text{S m/mm}^2, \text{mm}^2] \quad (29)$$

kde v předchozích vztazích značí

Q_2	počet drážek (tyčí) v rotoru
p	počet pólových dvojic
l_t	délka tyče
S_t	průřez tyče
d_{kr}	střední průměr spojovacího kruhu

Měrnou specifickou vodivost γ lze brát podle druhu materiálu z tabulky 9-3 .



Tab. 9-3 Měrná vodivost

Materiál	Teplota ϑ [°C]	γ [Sm/mm ²]
měď	20	56
	70	47
	$20 + \Delta\vartheta$	56
		$1 + 0,0039 \Delta\vartheta$
elektrolytický hliník	20	34
	70	28
	$20 + \Delta\vartheta$	34
		$1 + 0,0037 \Delta\vartheta$
mosaz	20	11
	70	12
	$20 + \Delta\vartheta$	11
		$1 + 0,00315 \Delta\vartheta$

Odpor rotorové klece přepočítaný na stator vypočteme dle vztahu

$$R'_2 = \frac{4m (N_1 x_1)^2}{Q_2 x_t^2} \left[R_t + \frac{R_{kr}}{2 \sin^2 \frac{p\pi}{Q_2}} \right] \quad [\Omega] \quad (30)$$

kde indexem 1 jsou označeny veličiny vztahující se na statoru, t.j. x_1 je činitel vinutí statoru a x_t činitel natočení drážky rotoru. Dále m je počet fází statorového vinutí, na který rotorový odpor přepočítáváme. Ten nemusí souhlasit se skutečným počtem fázových vinutí.

9.6.2 Činitelé vinutí

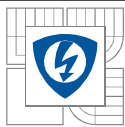
Činitel vinutí x udává poměr mezi geometrickým a algebraickým součtem indukovaných napětí jednotlivých cívek, které tvoří fázové vinutí. Výpočet těchto činitelů můžeme určit několika způsoby. Činitel vinutí je různý pro prvou a vyšší harmonické. Činitel vinutí se obvykle rozkládá na činitele rozlohy x' a činitele zkrácení kroku x''

$$x = x' x'' \quad (31)$$

Pro prvou harmonickou platí

$$x' = \frac{\sin q \frac{\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} \quad (32)$$

$$x'' = \sin \frac{y}{\tau} \frac{\pi}{2} \quad (33)$$



kde q je počet drážek na pól a fázi

α je úhel mezi sousedními drážkami v elektrických stupních

y/τ je poměr kroku cívky k pólové rozteči

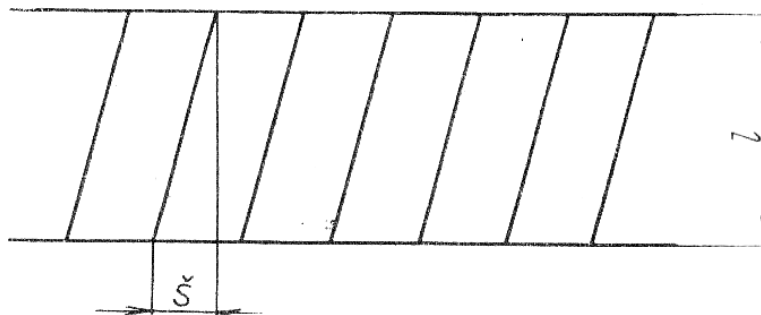
Vinutí jednofázových strojů je nejčastěji se soustřednými čely jako na obrázku 9-6. O takovém vinutí můžeme uvažovat jako o vinutí s plným krokem, neboť každé drážce na jednom pólu odpovídá stejně plněná drážka na pólu druhém, i když je toto vinutí složeno ze souosích cívek s krokem různě zkráceným. Pro tento typ vinutí můžeme položit $x'' = 1$. U vinutí sinusových podle výše uvedených vztahů nelze počítat, pro tento případ se činitel vinutí určuje graficky nebo vektorovým součtem napětí ve vodičích.

Činitel vinutí pomocné fáze určíme dle stejného vztahu jako pro vinutí hlavní, je zde změna pouze v počtu drážek a vodičů.

Činitel vinutí pro rotorovou klec, kde jsou drážky zešíkmeny, určíme podle

$$x_t = \frac{\sin \frac{\check{s}\pi}{2\tau}}{\frac{\check{s}\pi}{2\tau}} \quad (34)$$

$\check{s}$ je délka zešíkmení drážek podle obrázku 9-8. a τ je pólová rozteč.



Obr. 9-8 Zešíkmení drážek rotoru [1]

9.6.3 Reaktance

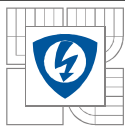
- a) **Hlavní reaktance** je určena magnetickým tokem procházejícím vzduchovou mezerou do rotoru. Je třeba nejprve zjistit magnetická napětí na jednotlivých částech při jmenovitých sycení magnetického obvodu. Součet U_m těchto dílčích napětí udává celkové magnetické napětí obvodu na pólovou dvojici.

Platí tedy

$$U_m = U_{m\delta} + U_{mz1} + U_{mz2} + U_{mj1} + U_{mj2} \quad (35)$$

kde

$$U_{m\delta} = 1,6 \cdot 10^4 \delta' B_{\delta}' \quad (36)$$



značí magnetické napětí ve vzduchové mezeře, při čemž efektivní vzduchová mezera δ je dána vztahem

$$\delta' = k_{\delta 1} k_{\delta 2} \delta \quad (37)$$

A $k_{\delta 1}$ a $k_{\delta 2}$ jsou Carterovy činitelé pro stator a rotor, které se určí podle

$$k_{\delta} = \frac{\tau_d}{\tau_d + \delta - \frac{3}{4}b'} \quad (38)$$

kde τ_d je rozteč drážky a b' je otevření drážky uvažované části (rotor či stator).

Pro železné části magnetického obvodu musíme použít magnetizační křivky pro dané plechy, určit podle sycení jednotlivých částí magnetická napětí na 1 cm délky obvodu a násobit indukční čáry v příslušné části pro pólovou dvojici.

Pozn. Ve vztahu (35) značí

U_{mz1} magnetické napětí zubů statoru

U_{mz2} magnetické napětí zubů rotoru

U_{mj1} magnetické napětí jha statoru

U_{mj2} magnetické napětí jha rotoru

Magnetizační reaktanci vypočteme dle upraveného vztahu

$$X_m = 1,6m \frac{f}{100} \left(\frac{Nx}{100} \right)^2 \frac{\tau}{100\delta'} \frac{l}{p} \quad [\Omega; \text{c/s}; \text{cm}] \quad (39)$$

kde m je počet fázových vinutí (pro který magnetizační reaktanci počítáme)

f je kmitočet sítě

N počet závitů uvažovaného vinutí

x činitel vinutí

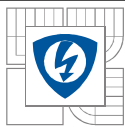
τ pólová rozteč [cm]

p počet pólových dvojic

l ideální délka železa (je rovna přibližně délce železa samotného)

δ je ekvivalentní vzduchová mezera, která zahrnuje vliv železa a je dána

$$\delta'' = \delta' \frac{\text{magnetizační napětí celkové}}{\text{magnetické napětí vzduchové mezery}} = \delta' \frac{U_m}{U_{m\delta}} \quad (40)$$



Zanedbáme-li vliv železa platí: $\delta' = \delta''$

Pro hlavní reaktanci samotné vzduchové mezery můžeme napsat vztah

$$X'_m = X_m \frac{\delta''}{\delta'} \quad (41)$$

- b) **Rozptylová reaktance** zahrnuje všechny magnetické toky uvažovaného statorového vinutí kromě toku základní harmonické ve vzduchové mezeře. Rozptylová reaktance má největší vliv na přetížitelnost, záběrný moment a proud nakrátko motoru. Určení se neliší od strojů třífázových. Rozptylová reaktance je dána součtem dílčích rozptylů

$$X_{r1} = X_{10} + X_{1d} + X_{1\zeta} + X_{1q} \quad (42)$$

kde X_{10} diferenciální rozptyl

X_{1d} rozptyl v drážce

$X_{1\zeta}$ rozptyl přes čela vinutí

X_{1q} rozptyl statoru přizpůsobený natočením drážek rotoru

Podmínkou pro správné určení těchto parametrů je zejména cit a zkušenosti výpočtáře, jelikož u takto malých strojů jsou hodnoty dosti nepřesné, závisí na mnoha parametrech, zejména na sycení železa.

Diferenční rozptyl statorového vinutí určíme z hlavní reaktance podle vztahu

$$X_{r1} = \sigma_{A0} X'_m \quad (43)$$

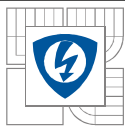
Součinitel diferenčního rozptylu σ_{A0} volíme podle počtu drážek z tabulky 9-4.

Tab. 9-4 Hodnoty $\sigma_o \cdot 100$ pro vinutí s plným krokem

Q_p	2	3	4	6	8	9	10	12	15	∞
Jednofázová vinutí $q = 2/3 Q_p$	---	9,7	---	2,85	---	1,41	---	0,88	0,65	0,22
Jednofázová nebo dvoufázová vinutí $q = 1/2 Q_p$	23,4	---	8,45	4,68	3,3	---	2,65	2,29	---	1,64

Diferenční rozptyl se často rozkládá na rozptyl přes hlavy zubů a diferenční rozptyl pro nekonečný počet drážek. Při zjednodušení můžeme předpokládat přibližně pouze rozptyl přes hlavy zubů. Tento rozptyl vypočítáme pro jednovrstvová vinutí podle vztahů

$$X_{1z} = 0,158 \frac{f}{100} \left(\frac{N_A}{100} \right)^2 \frac{l}{p} \frac{\lambda_z}{q} \quad [\Omega; \text{c/s, cm}] \quad (44)$$



$$\lambda_z \sim \frac{[\tau_{d2} - 0,75(b'_1 + b'_2)]^2}{6\tau_{d2}\delta} \quad (45)$$

kde b_1 a b_2 značí otevření drážky statoru a rotoru ve vzduchové mezeře (na obrázku 9-9 označeno b_4).

Drážkový rozptyl vypočítáme jako u motorů třífázových

$$X_{1d} = 0,158 \frac{f}{100} \left(\frac{N_A}{100} \right)^2 \frac{l}{p} \frac{\lambda_z}{q} \quad [\Omega; \text{c/s, cm}] \quad (46)$$

Kde q je počet drážek na pól obsazených uvažovaným vinutím a l je délka železa. Vodivost drážky λ_d vypočítáme pro tvar drážky podle obrázku 9-9-a podle vztahu

$$\lambda_d = \frac{h_1}{3b} + \frac{h_2}{b} + \frac{h_3}{b_3} + \frac{h_4}{b_4} \quad (47)$$

Pro tvar drážky na obrázku 9-9-b,c platí

$$\lambda_d = \frac{h_1}{3b} + 0,66 + \frac{h_4}{b_4} \quad (48)$$

Rozptyl přes čela vinutí určíme podle

$$X_{1\check{c}} = 0,158 \frac{f}{100} \left(\frac{N_A}{100} \right)^2 \frac{l_{\check{c}}}{p} \lambda_{\check{c}} \quad [\Omega; \text{c/s, cm}] \quad (49)$$

kde $l_{\check{c}}$ je střední délka čela vinutí [cm] (na jedné straně statoru). Vodivost přes čela vinutí bereme cca $\lambda = 0,11$ až $0,16$.

Rozptyl od zešíkmení drážek rotoru se stejnou měrou uplatňuje v rozptylové reaktanci i rotoru a platí tedy

$$X_{1q} = \sigma_q X'_m \quad (50)$$

kde

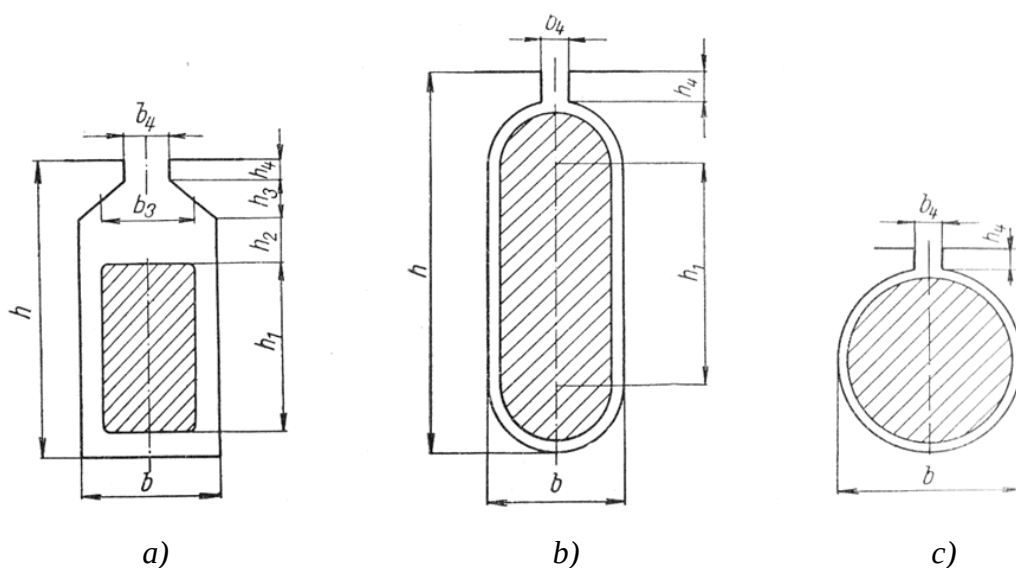
$$\sigma_q = 1,64 \left(\frac{p}{Q_2} \frac{\check{s}}{\tau_{d2}} \right)^2 \quad (51)$$

$\check{s}$ značí délku zešíkmení rotorových drážek

τ_{d2} je rozteč drážky rotoru

p je počet pólových dvojic

Q_2 je počet rotorových drážek (tyčí klece)



Obr. 9-9 Rozměry různých druhů drážek (pro výpočet rozptylu) [1]

- c) **Rozptylová reaktance rotoru přepočtená na stator.** Tato reaktance se skládá opět z dílčích rozptylových reaktancí: (nezahrnujeme do výpočtu zanedbatelný rozptyl přes čela vinutí)

$$X'_{r20} = X_{20} + X_{2d} + X_{2q} \quad (52)$$

Diferenční rozptyl klecového rotoru

$$X_{20} = \sigma_{20} X'_h \quad (53)$$

kde platí

$$\sigma_{20} = 3,3 \left(\frac{p}{Q_2} \right)^2 \quad (54)$$

Drážkový rozptyl klecového rotoru přepočítaný na statorové vinutí A je dán vztahem

$$X_{2d} = 0,316 \frac{f}{100} \left(\frac{N_A x_A}{100 x_t} \right)^2 l \frac{m \lambda_d}{Q_2} \quad (55)$$

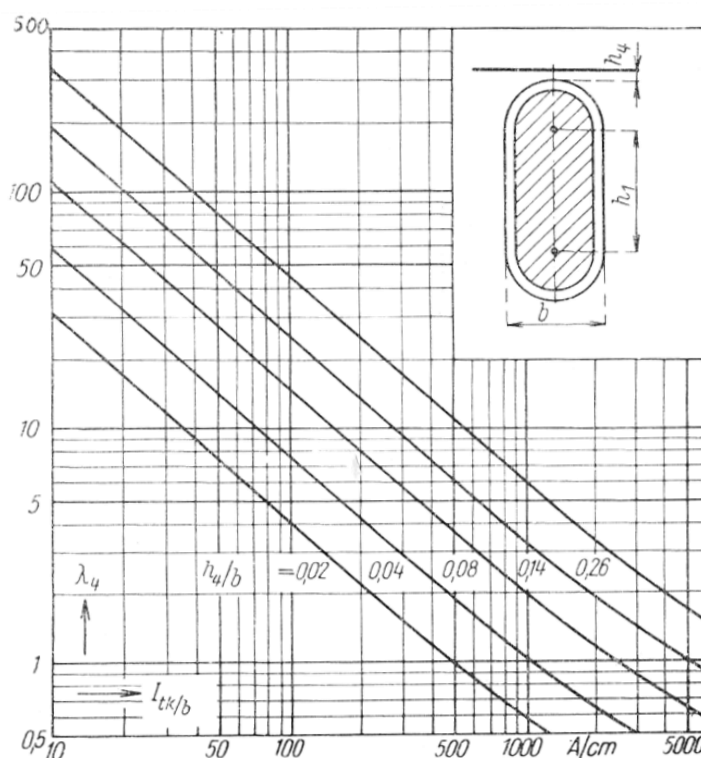
kde x_A je činitel statorového vinutí A, na něž rotorové konstanty přepočítáváme

x_t je činitel zešíkmení rotorové drážky

l je délka železa

m je počet fázových vinutí statoru

f je kmitočet



Obr. 9-10 Diagram pro výpočet rozptylu v uzavřené drážce [1]

Vodivost rotorové drážky pro tvar na obrázku 9-5 je dán podle vztahu (3). Pro drážku kruhovou na obrázku 9-5 dostáváme vztah

$$\lambda_d = 0,66 + \frac{h_4}{b_4} \quad (56)$$

Pozn. Máme-li rotorové drážky uzavřeny, ve vztahu (1) použijeme místo h_4/b_4 hodnotu λ_4 přečtenou z diagramu na obrázku 8-10. Pro drážku na obrázku 8-10 platí vztah

$$\lambda_d = \frac{h_1}{3b} + 0,66 + \lambda_4 \quad (57)$$

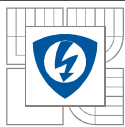
Vodivost λ_4 závisí na proudu tyče I_t a mění se ve velkých mezích. Protože rozptylová reaktance má největší vliv na moment zvratu a poměry nakrátko, určujeme λ_4 obvykle pro chod nakrátko. Diagram na obrázku 9-10 udává hodnoty λ_4 pro různé poměrné tloušťky můstku (h_4/b) jako funkci proudového zatížení drážky na 1cm její šířky, takže výraz I_{tk}/b značí poměr efektivního proudu rotorové tyče při chodu nakrátko k její šířce b . Proud tyče obvykle odhadujeme.

Rozptyl od natočení drážek rotoru se uplatňuje v rotorové rozptylové reaktanci přepočtené na stator stejně jako v reaktanci statorové.

$$X_{2q} = \sigma_q X'_m \quad (58)$$

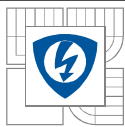
kde σ_q je dáno jako pro stator

$$X_{2q} = X_{1q} \quad (59)$$



9.7 Shrnutí výpočtu konstant

S použitím výše uvedených vzorců jsme vypočítali všechny konstanty pro náhradní schéma jednofázového motoru, které je na obrázku 3-1. Hodnoty jsou určeny orientačně, neboť uvedené vzorce pro takto malé stroje platí pouze přibližně. Při návrhu mnohdy s takovýmto výpočtem vystačíme. Chceme-li však podrobněji vypočtené hodnoty ověřit, můžeme z vypočtených hodnot konstant náhradního schématu sestrojit kruhový diagram a vypočítat tak charakteristické hodnoty pro motor (moment zvratu, moment záběrný, proud nakrátko atd.) .



10 PŘÍKLAD VÝPOČTU VYRÁBĚNÉHO MOTORU

Zadání:

Vypočítejte jednofázový asynchronní motor s pomocnou fází a trvale připojeným kondenzátorem, který má tyto údaje:

$$P_N = 370 \text{ W}; U = 230/110 \text{ V}; f = 50 \text{ Hz}; n = 2850 \text{ ot/min}; 2p = 2$$

Pozn.

Při výpočtu je využito schéma návrhu dle [1], se kterým jsme se seznámily v kapitole 9, avšak ve spolupráci s firmou EMP s.r.o. Slavkov u Brna je při výpočtu použito výrobní dokumentace této firmy. Veškerá dokumentace je uvedena v příloze.

10.1 Výpočet hlavních rozměrů železa a rozměrů drážek a vinutí

- A) Určení hlavních rozměrů. Volím využití $\gamma = 0,91$ (využití u tohoto typu motoru je v rozmezí 0,84 až 1) a rozměry železa navrhujeme tedy jako pro stroj trojfázový s výkonem

$$P_3 = \frac{1}{\gamma} \cdot P_N = \frac{1}{0,91} \cdot 370 = 407 \text{ W}$$

Účinnost a účinník tohoto trojfázového stroje určíme předběžně z diagramu na obrázku 9-1.

$$\cos \varphi_3 \eta_3 = 0,58$$

Zdánlivý výkon pro trojfázový motor

$$S_3 = \frac{\alpha P}{\cos \varphi \eta_3} = \frac{407}{0,58} \doteq 690 \text{ VA}$$

Dále volíme

$$B_\delta = 0,57 \text{ T a } A = 160 \text{ A/cm}$$

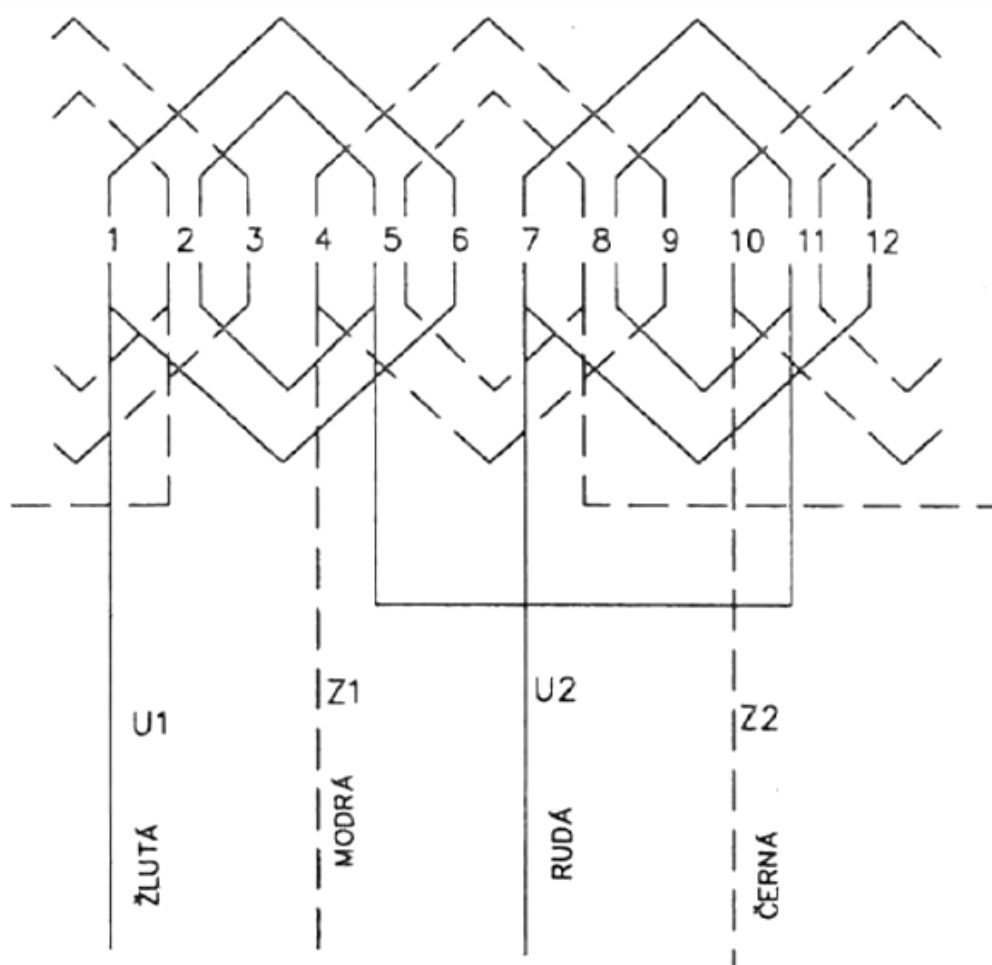
a podle (9) platí

$$d^2 l = \frac{8,6 \cdot 10^4}{B_\delta A} \frac{S_3}{n_s} = \frac{8,6 \cdot 10^4}{0,57 \cdot 160} \cdot \frac{690}{3000} = 216,9 \text{ cm}^3$$

Volíme-li $d = l$, což odpovídá poměru $\lambda = 1,2$, vychází $d = \sqrt[3]{216,9} = 6 \text{ cm}$
Provedeme tedy:

$$d = l = 6 \text{ cm}$$

- B) Předběžný výpočet rozměrů vinutí a drážek. Máme-li vypočteny hlavní rozměry železa, vypočteme proud hlavního vinutí A za chodu motoru. Součin účinnosti a účinníku pro tento typ motoru přečteme z diagramu na obrázku 9.3. Poměr drážkového prostoru obou vinutí volíme podle dříve zvoleného typu vinutí. Poměr drážkového prostoru podle vinutí na obrázku 10-1 je $k_{cu} = 0,5$.



Obr.10-1 Typ vinutí hlavní a pomocné fáze jednofázového asynchronního motoru s trvale připojeným kondenzátorem používaný firmou EMP s.r.o. Slavkov u Brna [16]

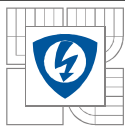
$$I_A = \frac{P_n}{\eta'_1 \cos \varphi'_1 U (1 + k_{cu})} = \frac{370}{0,66 \cdot 230 \cdot (1 + 0,5)} = 1,6 \text{ A}$$

Průřez vodiče hlavního vinutí je dán vztahem (21). Proudovou hustotu v hlavním vinutí volíme $\sigma_A = 6,5 \text{ A/mm}^2$, takže

$$S = \frac{I_A}{\sigma_A} = \frac{1,6}{8} = 0,2 \text{ mm}^2$$

Z toho vyplývá průměr holého vodiče 0,5 mm, vezmeme-li měděný drát průměru $d_A = 0,5 \text{ mm}$, tj. s izolací $d'_A = 0,54 \text{ mm}$. Ze zvolené magnetické indukce ve vzduchové mezeře vychází indukční tok

$$\Phi = \frac{l dB_\delta 10^4}{p} = \frac{0,57 \cdot 6 \cdot 6 \cdot 10^{-4}}{1} = 2,05 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$$



Dříve než určíme počet závitů, volíme úpravu vinutí. Stator provedeme o 12 drážkách podle firmy EMP s.r.o. Slavkov u Brna.

Činitel vinutí vypočteme podle vztahu (32)

$$x = x' = \frac{\sin q \frac{\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin 4 \frac{30}{2}}{4 \sin \frac{30}{2}} = 0,84$$

Odhadneme-li úbytek na rozptylové reaktanci statoru $\varepsilon_1 = 0,15$, vychází podle (19) počet závitů hlavního vinutí

$$N_A = \frac{U(1 - \varepsilon_1)}{4,44 f x_4 \Phi} = \frac{230(1 - 0,15)}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,84 \cdot 2,05 \cdot 10^{-3}} = 511$$

Tento počet zaokrouhlíme na 512, takže do každé drážky hlavního vinutí přijde 128 vodičů. Potřebná plocha drážky bude

$$S_d = \frac{2N_A S'_A}{Q_{1A} k_d} = \frac{2 \cdot 512 \cdot 0,229}{6 \cdot 0,41} = 95,3 \text{ mm}^2$$

Volíme syčení v zubech $B_{z1} = 1,6 \text{ T}$ a vypočítáme podle (20) šířku zubu statoru

$$b_{z1} = \frac{B_\delta}{B_z} \frac{\pi d}{0,9 Q_1} = \frac{0,57}{1,6} \frac{\pi \cdot 6}{0,9 \cdot 12} = 0,62 \text{ cm}$$

Volíme syčení statorového jha a určíme vnější průměr pomocí (24)

$$d_1 - d_2 = \frac{\Phi 10^4}{B_{j1} l 0,9} = \frac{B_\delta}{B_{j1}} \frac{d}{p 0,9} = \frac{0,57}{1,33} \frac{6}{1 \cdot 0,9} = 2,86 \text{ cm}$$

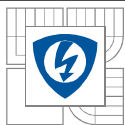
Takže

$$d_1 = d_2 + (d_1 - d_2) = 6,82 + 2,86 = 9,68 \text{ cm}$$

Vypočtené velikosti zaokrouhlíme tak, abychom mohli volit běžně vyráběný plech pro tento motor od firmy EMP s.r.o. Slavkov u Brna. Vzhledem k zachování celistvého rozměru rotoru, který bude obráběn, provedeme vrtání statoru 45 mm, takže volíme vzduchovou mezeru $\delta = 0,2 \text{ mm}$. Počet drážek rotoru volíme $Q_2 = 17$. Použitý plech statoru, rotoru a jejich rozměry jsou uvedeny v příloze. Drážky rotoru provedeme jako uzavřené a natočené o jednu rozteč drážek statorových, což je na obvodu rotoru 8 mm.

Šířka zubu rotoru v nejužším místě bude

$$b_{z2} = \frac{B_\delta}{B_z} \frac{\pi d}{0,9 Q_1} = \frac{0,57}{1,33} \frac{\pi \cdot 6}{0,9 \cdot 17} = 0,53 \text{ cm}$$



Odpor rotorové tyče vypočteme podle vztahu (25) pro zvolený skluz 5 %. Napřed odhadneme $\varepsilon_1 = 0,15$; $\varepsilon_2 = 0,1$; $\Delta P = 10 \text{ W}$; $\Delta P_{\text{cui}} = 10 \text{ W}$.

$$R'_t = \frac{(1-s) s U^2 (1-\varepsilon_1-\varepsilon_2)^2 Q_2 x_t}{4 N_A^2 x_A^2 (P + \Delta P_{\text{cui}} + \Delta P)} =$$
$$= \frac{(1 - 0,05) \cdot 0,05 \cdot 230^2 \cdot (1 - 0,15 - 0,1)^2 \cdot 17 \cdot 0,995}{4 \cdot 512^2 \cdot 0,84^2 \cdot (370 + 10 + 10)} = 8,3 \cdot 10^{-5} \Omega$$

Činitel vinutí x_t byl vypočten podle (34)

$$x_t = \frac{\sin \frac{\check{s}\pi}{2\tau}}{\frac{\check{s}\pi}{2\tau}} = \frac{\sin \frac{0,8 \cdot \pi}{2 \cdot 9,42}}{\frac{0,8 \cdot \pi}{2 \cdot 9,42}} = 0,995$$

Sousledná složka proudu rotoru

$$I_{dt} = \frac{sU \cdot (1-\varepsilon_1-\varepsilon_2) \cdot x_t}{2 N_A x_A R'_t} = \frac{0,05 \cdot 230 \cdot (1-0,15-0,1) \cdot 0,995}{2 \cdot 512 \cdot 0,84 \cdot 8,3 \cdot 10^{-5}} = 120,2 \text{ A}$$

Průřez rotorové tyče je dán vztahem, kdy proudová hustota v rotoru pro kondenzátorové motory a použitý měděný vodič je v rozmezí $\sigma_{dt} = 6 - 7 \text{ A/mm}^2$

$$S_t = \frac{I_{dt}}{\sigma_{dt}} = \frac{120,2}{6} = 20 \text{ mm}^2$$

Sousledná složka proudu v rotorovém kruhu bude

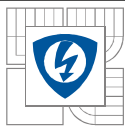
$$I_{dkr} = \frac{I_{dt}}{2 \cdot \sin \frac{p \cdot \pi}{Q_2}} = \frac{120,2}{2 \cdot \sin \frac{2 \cdot \pi}{17}} = 327 \text{ A}$$

U tohoto motoru je použito kroužků průřezu 35 mm^2 . Můžeme tedy vypočítat proudovou hustotu sousledné složky pomocí

$$\sigma_{dkr} = \frac{I_{dkr}}{35} = \frac{327}{35} = 9,34 \text{ A/mm}^2$$

- C) Určení parametrů pomocného vinutí. Volíme $k_1 = 1$ podle typu zapojení pomocného vinutí, které bývá u motorů s pomocným vinutím a kapacitní rozběh v rozmezí 0,8 - 1,2. Činitel pomocného vinutí vypočteme podle

$$x = x' = \frac{\sin q \frac{\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin 2 \frac{15}{2}}{2 \sin \frac{15}{2}} = 0,99$$



Pak vypočteme závity pomocného vinutí.

$$N_B = \frac{k_1 \cdot x_A \cdot N_A}{x_B} = \frac{1 \cdot 0,84 \cdot 512}{0,99} = 434,4$$

Výsledek zaokrouhlíme a v každé drážce bude tedy 109 závitů.

Pro průřez pomocného vinutí můžeme volit hmotu měděného pomocného vinutí zhruba poloviční nežli hmoty vinutí hlavního. Pro $k_d = 0,5$ bude průřez vodiče dle vztahu (22)

$$S'_B = \frac{k_d \cdot Q_{1B} \cdot S_d}{2N_B} = \frac{0,5 \cdot 6 \cdot 95,3}{2 \cdot 436} = 0,328 \text{ mm}^2$$

Průměr vypočteného vodiče pomocného vinutí s izolací je $d'_B = 0,64 \text{ mm}$, čili volíme holý vodič $d_B = 0,6 \text{ mm}$.

- D) Výpočet kapacity kondenzátoru. Kondenzátor bude určen pro trvalý rozběh. Jeho velikost navrhne dle kapitoly 7 pomocí základního empirického vzorce (5) a empirické tabulky 7-1.

Dle vzorce (5):

$$C = 68 \cdot P = 68 \cdot 0,370 = 25 \mu F$$

Dle empirické tabulky 7-1:

$$C = 10 \text{ až } 16 \mu F$$

Ze zkušeností určené empirickou tabulkou je patrné, že pro velikost postačí nižší hodnota nežli hodnota určená dle vzorce (5), proto velikost kondenzátoru volím:

$$C = 12 \mu F$$

Pozn.

Kapacita kondenzátoru pro rozběh jednofázového asynchronního motoru platí vždy pouze pro jedno zatížení. V našem případě pro jmenovité zatížení $P_N = 370 \text{ W}$.

10.2 Kontrola návrhu stroje (výpočet konstant pro náhradní schéma)

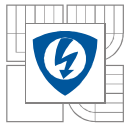
Činný odpor hlavního vinutí statoru podle (26)

$$R_1 = \frac{N_A l_z}{\gamma S_A} = \frac{512 \cdot 0,25}{56 \cdot 0,2} = 13,61 \Omega$$

kde délka závitu $l_z = 25 \text{ cm}$ byla odhadnuta. Měrnou vodivost volíme dle tabulky 10-3.

Pro kruh a tyč platí

$$R_t = \frac{l_t}{\gamma S_t} = \frac{0,06}{56 \cdot 20} = 5,36 \cdot 10^{-5} \Omega$$



$$R_{kr} = \frac{\pi d_{kr}}{\gamma S_{kr} Q_2} = \frac{\pi \cdot 0,033}{56 \cdot 51,8 \cdot 17} = 2,1 \cdot 10^{-6} \Omega$$

$$R'_t = R_t + \frac{R_{kr}}{2 \sin^2 \frac{p\pi}{Q_2}} = 5,36 \cdot 10^{-5} + \frac{2,1 \cdot 10^{-6}}{2 \sin^2 \frac{1\pi}{17}} = 8,4448 \cdot 10^{-5} \Omega$$

Odpor rotoru přepočtený na stator podle (30)

$$R'_{20} = \frac{4m (N_A x_1)^2}{Q_2 x_t^2} R'_t = \frac{4 \cdot 2 (512 \cdot 0,84)^2}{17 \cdot 0,998^2} \cdot 8,448 \cdot 10^{-5} = 7,5 \Omega$$

Hlavní reaktance statoru je dána vztahem (39), v němž neznáme ekvivalentní vzduchovou mezeru δ'' , kterou musíme předem vypočítat podle (38)

$$k_{\delta 1} = \frac{\tau_{d1}}{\tau_{d1} + \delta - \frac{3}{4} b'_{11}} = \frac{11,88}{11,88 + 0,2 - \frac{3}{4} \cdot 3,1} = 1,21$$

kde
$$\tau_{d1} = \frac{o_s}{Q_1} = \frac{142,56}{12} = 11,88 \text{ mm}$$

podle (37)

$$\delta' = 1,21 \cdot 1 \cdot 0,3 = 0,36 \text{ mm}$$

Magnetická indukce ve vzduchové mezeře byla volena $B_\delta = 0,57 \text{ T}$, takže magnetické napětí na vzduchové mezeře bude (pro pólovou dvojici) podle (36)

$$U_{m\delta} = 1,6 \cdot 10^4 \delta' B'_\delta = 1,6 \cdot 10^4 \cdot 0,36 \cdot 0,57 = 328 \text{ A}$$

Pro dříve zvolenou magnetickou indukci $B_{z1} = 1,6 \text{ T}$ přečteme magnetické pole $H_{z1} = 26 \text{ A/cm}$ a magnetické napětí na zubech statoru bude

$$U_{mz1} = H_{z1} l_z = 26 \cdot 1,2 = 31,2 \text{ A}$$

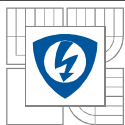
kde l_z je délka zubů statoru na pólovou dvojici. Magnetické napětí jha statoru určíme pro indukci $B_{j1} = 1,3 \text{ T}$ a pomocí magnetizační křivky dostaneme

$$U_{mj1} = H_{j1} l_{j1} = 9,2 \cdot 11 = 101 \text{ A}$$

kde délka indukční čáry je změřena ze zvoleného typu statorového plechu jako vidíme na obrázku 10-4. Stejným způsobem zjistíme napětí ostatních částí.

Zuby rotoru
$$U_{mz2} = 9 A U_{mj2} = 42 A$$

Jho rotoru
$$U_{mj2} = 42 \text{ A}$$



Celkové magnetické napětí na obvodu je dáno podle (35) součtem

$$U_m = U_{m\delta} + U_{mz1} + U_{mz2} + U_{mj1} + U_{mj2} = 365 + 31,2 + 9 + 101,2 + 42 = 548,2 \text{ A}$$

Ekvivalentní vzduchová mezera podle (40)

$$\delta'' = \delta' \frac{U_m}{U_{m\delta}} = 0,036 \cdot \frac{548,2}{365} = 0,54 \text{ mm}$$

Hlavní reaktance podle (39)

$$X_m = 1,6m \frac{f}{100} \left(\frac{Nx}{100} \right)^2 \frac{\tau}{100\delta'} \frac{l}{p} = 1,6 \cdot 2 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{512 \cdot 0,84}{100} \right)^2 \cdot \frac{9,73}{100 \cdot 0,036} \cdot \frac{8}{1} = 640 \Omega$$

Hlavní reaktance pro samotnou vzduchovou mezeru podle (41)

$$X'_m = X_m \frac{\delta''}{\delta'} = 640 \cdot \frac{0,54}{0,36} = 960 \Omega$$

Rozptylová reaktance satoru podle (43)

$$X_{10} = \sigma_{A0} X'_m = 0,009 \cdot 960 = 8,64 \Omega$$

$$\lambda_{z1} = \frac{[\tau_{d2} - 0,75(b'_1 + b'_2)]^2}{6\tau_{d2}\delta} = \frac{[0,831 - 0,75(0,31 + 0)]^2}{6 \cdot 0,831 \cdot 0,02} = 2,3$$

kde
$$\tau_{d2} = \frac{o_r}{Q_2} = \frac{141,3}{17} = 8,31 \text{ mm}$$

Pak rozptylová reaktance pro hlavy zubů je podle (44)

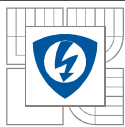
$$X_{1z} = 0,158 \frac{f}{100} \left(\frac{N_A}{100} \right)^2 \frac{l}{p} \frac{\lambda_z}{q} = 0,158 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{512}{100} \right)^2 \cdot \frac{6}{1} \cdot \frac{2,3}{4} = 7,14 \Omega$$

Rozptyl od natočení drážek rotoru je podle (50)

$$X_{1q} = \sigma_q X'_m = 0,0055 \cdot 960 = 5,28 \Omega$$

kam dosadíme za σ_q

$$\sigma_q = 1,64 \left(\frac{p}{Q_2} \frac{\xi}{\tau_{d2}} \right)^2 = 1,64 \left(\frac{1}{17} \cdot \frac{8}{8,12} \right)^2 = 0,01183$$



Vodivost satorové drážky podle (48)

$$\lambda_d = \frac{h_1}{3b} + 0,66 + \frac{h_4}{b_4} = \frac{9}{3 \cdot 0,77} + 0,66 + \frac{0,04}{0,31} = 4,68$$

Rozptylová reaktance satorové drážky bude podle (46)

$$X_{1d} = 0,158 \frac{f}{100} \left(\frac{N_A}{100} \right)^2 \frac{l}{p} \frac{\lambda_z}{q} = 0,158 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{512}{100} \right)^2 \cdot \frac{6}{1} \cdot \frac{4,68}{4} = 5,38 \, \Omega$$

Rozptyl přes čela vinutí podle (49), kde $\lambda_{\check{c}} = 0,16$

$$X_{1\check{c}} = 0,158 \frac{f}{100} \left(\frac{N_A}{100} \right)^2 \frac{l_{\check{c}}}{p} \lambda_{\check{c}} = 0,158 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{512}{100} \right)^2 \cdot \frac{6}{1} \cdot 0,16 = 3,8 \, \Omega$$

Rozptylová reaktance satoru (42)

$$X_{r1} = X_{10} + X_{1d} + X_{1\check{c}} + X_{1q} = 8,64 + 5,38 + 3,8 + 5,28 = 23,35 \, \Omega$$

Diferenční rozptyl rotoru podle (52)

$$X_{20} = \sigma_{20} X'_m = 0,011522 \cdot 960 = 11,06 \, \Omega$$

kde σ_{20} je podle (53)

$$\sigma_{20} = 3,33 \left(\frac{p}{Q_2} \right)^2 = 3,33 \left(\frac{1}{17} \right)^2 = 0,011522$$

Vodivost uzavřené drážky rotoru určíme podle diagramu na obrázku 9-10. Pro drážku na obrázku 9-5 platí

$$\frac{h_4}{b} = \frac{0,04}{0,31} = 0,129$$

Proud tyče pro efektivní proudovou hustotu v rotorové tyči $\sigma_{tk} = 25 \, \text{A/mm}^2$ bude

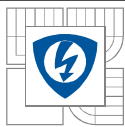
$$I_{tk} = S_t \cdot \sigma_{tk} = 20 \cdot 25 = 500 \, \text{A}$$

takže pro diagram na obrázku 9-10 platí

$$\frac{I_{tk}}{b} = \frac{500}{0,77} = 650 \, \text{A/cm}$$

pro tyto hodnoty odečteme z diagramu na obrázku 9-10.

$$\lambda_4 = 2,5$$



pak podle (57)

$$\lambda_d = \frac{h_1}{3b} + 0,66 + \lambda_4 = \frac{2,8}{3 \cdot 0,77} + 0,66 + 2,5 = 4,35$$

Drážková reaktance je dána vztahem (55)

$$X_{2d} = 0,316 \frac{f}{100} \left(\frac{N_A x_A}{100 x_t} \right)^2 l \frac{m \lambda_d}{Q_2} = 0,316 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{512 \cdot 0,84}{100 \cdot 0,998} \right)^2 \cdot 6 \cdot \frac{2 \cdot 4,35}{17} = 9 \, \Omega$$

Rozptylová reaktance rotoru od natočení drážek podle (59) je stejná jako pro stator

$$X_{2q} = X_{1q} = 5,28 \, \Omega$$

Rozptylová reaktance rotoru přepočtená na stator podle (52)

$$X'_{r20} = X_{20} + X_{2d} + X_{2q} = 11,06 + 9 + 5,28 = 25,34 \, \Omega$$

PŘEHLED KONSTANT STROJE: (pro obr. 3-1)

$$R_1 = 13,61 \, \Omega$$

$$R'_2 = 7,5 \, \Omega$$

$$X_m = 640 \, \Omega$$

$$X_{r1} = 23,35 \, \Omega$$

$$X'_{r20} = 25,34 \, \Omega$$

Pozn. Vodivosti statorové a rotorové drážky nejsou určeny přesně, neboť jsou použity zkrácené velikosti drážek jak pro stator, tak pro rotor. Výpočet rozptylových reaktancí je obecně problematické a hodnoty jsou tedy určeny orientačně.

11 MĚŘENÍ NA JEDNOFÁZOVÉM ASYNCHRONNÍM MOTORU S TRVALE PŘIPOJENÝM KONDENZÁTOREM

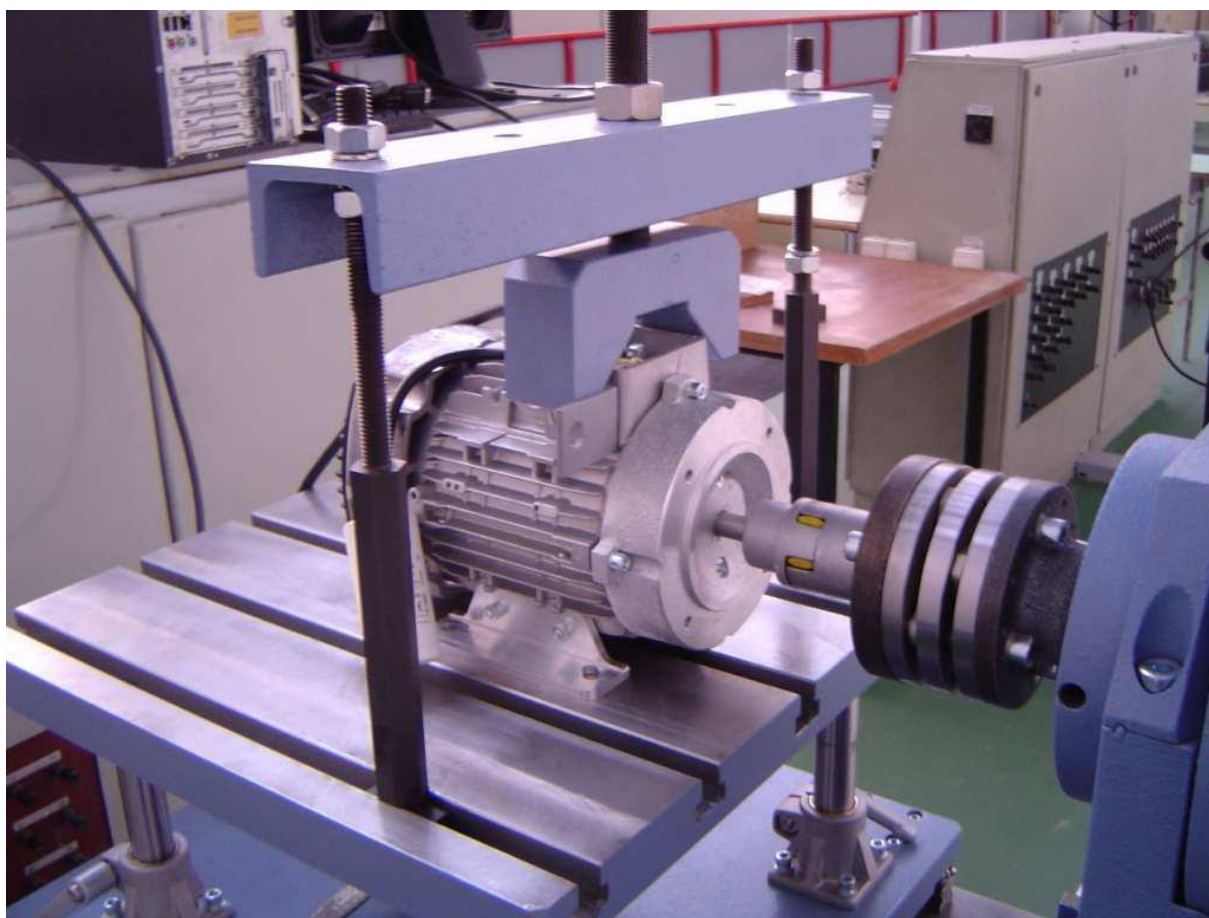
Zadání:

Změřte jednofázový asynchronní motor s trvale připojeným kondenzátorem v pomocné fázi. Proveďte měření a následně z naměřených hodnot vypočtete fiktivní náhradní schéma tohoto jednofázového stroje uvedeného na obrázku 3-1. Parametry motoru JMC71-2S dle [15]:

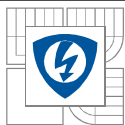
$P_N = 370 \text{ W}$; $U = 230/110 \text{ V}$; $f = 50 \text{ Hz}$; $n = 2850 \text{ ot/min}$; $2p = 2$

Pozn.

Měření proběhlo v laboratořích elektrických strojů na fakultě elektrotechnické a komunikačních technologií Vysokého učení technického v Brně. Na měřeném stroji provedeno měření naprázdno, nakrátko a také změřen jmenovitý bod pro jmenovité zatížení a zjištěné mechanické ztráty. Fotodokumentace z měření uvedena na obrázku 11-1.



*Obr.11-1 Měření jednofázový asynchronní motor s trvale připojeným
kondenzátorem v pomocné fázi*



11.1 Měření činného odporu statorového vinutí

Měření provedeno na svorkovnici měřeného stroje před započítáním měření při cca 20°C. Odpor změřen pomocí Ohmmetru. Naměřená hodnota uvedena v tabulce 11-1.

Tab. 11-1 Naměřená hodnota činného odporu na statoru

Odpor statoru R_1 [Ω]
13,46

11.2 Měření naprázdno

Chodem stroje naprázdno rozumíme ustálený chod při napájení statorového vinutí jmenovitou hodnotou napětí U_{1N} a rotoru spojeném nakrátko. Motor se otáčí bez zatížení, téměř synchronními otáčkami. Naměřené hodnoty uvedené v tabulce 11-2.

Tab. 11-2 Naměřené hodnoty měření naprázdno

U			I	P_0			n_0
α	k	[V]	[A]	α	k_w	[W]	[min ⁻¹]
114	240/120	228	0,6	57	2	114	2989

11.3 Měření nakrátko

Stav motoru nakrátko je ustálený stav poměrů statorového vinutí při rotoru spojeném nakrátko a zabrzděném. Takový stav nastává v případě, že rotor stojí, je zabrzděn. K tomuto faktu dochází vždy při rozběhu motoru či zastavení způsobené přetížením stroje. Při chodu nakrátko má asynchronní stroj záběrný moment.

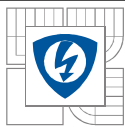
Při zkoušce nakrátko neodebíráme ani nedodáváme žádnou mechanickou energii, takže celý příkon stroje odebíraný ze sítě se spotřebuje na krytí ztrát, které se promění ve stroji na teplo. Naměřené hodnoty uvedené v tabulce 11-3.

Tab. 11-3 Naměřené hodnoty měření nakrátko

U			I	P_k		
α	k	[V]	[A]	α	k_w	[W]
117	120/120	117	2,3	44	2,5	110

11.4 Měření pro jmenovitý bod zatížení

Jedná se o měření jednofázového asynchronního motoru s trvale připojeným kondenzátorem v pomocné fázi pro určení skluzu a účinnosti motoru při jmenovitých hodnotách zatížení. Naměřené a vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 11-4. V tabulce 11-5 jsou naměřené hodnoty momentu, otáček a následně vypočtená hodnota mechanických ztrát.



Tab. 11-4 Naměřené a vypočtené hodnoty měření jmenovitého bodu

n [min ⁻¹]	M [Nm]	P ₂ [W]	U [V]	I [A]	α	P ₁ k _w	[W]	η [%]	s [-]
2888	1,335	403,8	230	2,3	106	5	530	76,2	0,037

Tab. 11-5 Naměřené hodnoty momentu, otáček a mechanických ztrát

n [min ⁻¹]	M [Nm]	P _m [W]
2800	0,051	15,3

11.5 Výpočet konstant fiktivního náhradního schéma

Odpor rotoru přepočtený na stranu statoru R'_2

$$R'_2 = \frac{\Delta P_k}{I_k^2} - R_1 = \frac{110}{2,3^2} - 13,46 = 7,3 \, \Omega$$

Účinník $\cos\varphi_{10}$ jednofázového asynchronního motoru $= > \sin\varphi_{10}$

$$\cos\varphi_{10} = \frac{P_{10}}{U_{10} \cdot I_{10}^*} = \frac{114}{228 \cdot 0,6} = 0,83 \Rightarrow \sin\varphi_{10} = 0,557$$

Magnetizační proud I_μ

$$I_\mu = I_{10} \cdot \sin\varphi_{10} = 0,6 \cdot 0,557 = 0,334 \, \text{A}$$

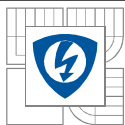
Pro další výpočet měření součástí náhradního schématu musíme vyjít z hodnot naměřených ve stavu nakrátko. Pro toto potřebujeme hodnoty odporu R_1 (zjištěné při měření odporu) a reaktance $X_{1\sigma}$ primárního vinutí. Pomocí znalosti těchto hodnot, znalosti napětí naprázdno U_{10} a znalosti proudu naprázdno I_{10} lze vypočítat velikost napětí U_m na magnetizační reaktanci X_m .

Napětí U_m na magnetizační reaktanci X_m

$$\begin{aligned} U_m &= 230 - \sqrt{(R_1 \cdot I_{10})^2 + (X_{1\sigma} \cdot I_{10})^2} = \\ &= 230 - \sqrt{(13,46 \cdot 0,6)^2 + (23,22 \cdot 0,6)^2} = 213,9 \, \text{V} \end{aligned}$$

Magnetizační reaktance X_m

$$X_m = \frac{U_m}{I_\mu} = \frac{213,9}{0,334} = 640,4 \, \Omega$$



Hodnota rozptylových reaktancí X_σ

$$X_\sigma = \sqrt{\left(\frac{U_{1k}}{I_{1k}}\right)^2 - (R_1 \cdot R'_2)^2} = \sqrt{\left(\frac{117}{2,3}\right)^2 - (13,46 \cdot 7,3)^2} = 46,44 \, \Omega$$

Rozptylová reaktance na satoru $X_{\sigma 1}$ a rozptylová reaktance rotoru $X'_{\sigma 2}$ přepočtené na stator

$$X_{1\sigma} = X'_{2\sigma} = \frac{X_\sigma}{2} = \frac{46,44}{2} = 23,22 \, \Omega$$

Výpočet účinnosti a skluzu motoru z měření jmenovitého bodu

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% = \frac{403,8}{530} \cdot 100\% = 76,2 \, \%$$

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{3000 - 2880}{3000} = 0,037 = 3,7 \, \%$$

PŘEHLED KONSTANT STROJE: (pro obr. 3-1)

$$R_1 = 13,61 \, \Omega$$

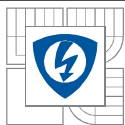
$$R'_2 = 7,3 \, \Omega$$

$$X_m = 640,4 \, \Omega$$

$$X_{r1} = 23,22 \, \Omega$$

$$X'_{r2} = 23,22 \, \Omega$$

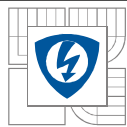
Pozn. Při výpočtu rozptylových reaktancí na satoru i na rotoru uvažujeme zjednodušení, že obě rozptylové reaktance jsou totožné, což v praxi možné není. I při výpočtu hodnot rozptylových reaktancí dochází stejně jako u výpočtu z návrhu k nepřesnostem a hodnoty jsou určeny také orientačně.



12 SROVNÁVACÍ TABULKA VYPOČTENÝCH HODNOT Z NÁVRHU A HODNOT Z MĚŘENÍ

Tab. 12-1 Tabulka srovnání mezi hodnotami vypočtené z návrhu s hodnotami vypočtené z měření

-----	hodnoty získané z návrhu	hodnoty získané z měření
R_1	13,61	13,46
R'_2	7,5	7,3
X_h	640	640,4
$X_{\sigma 1}$	23,35	23,22
$X'_{\sigma 2}$	25,34	23,22



13 ZÁVĚR

Hlavním cílem práce bylo porovnání hodnot náhradního schéma jednofázového asynchronního motoru, získaných z měření a z teoretického výpočtu řešeného motoru daných parametrů. V práci jsou shromážděny ucelené a základní informace o jednofázovém asynchronním motoru a jeho základním výpočtu. Dle pokynů jsem analyzoval tento typ motoru a získání záběrného momentu, navrhl základní schéma postupu výpočtu a následně provedl výpočet motoru daných parametrů. Je také provedeno měření na motoru stejných parametrů dodaném firmou EMP s.r.o. Slavkov u Brna. Náhradní schéma jednofázového asynchronního motoru je uvedeno na obrázku 3-1.

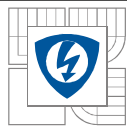
Z hlediska analýzy rozběhu jednofázového asynchronního motoru a vzniku záběrného momentu je nejvýhodnější zapojení s pomocným vinutím při kapacitním rozběhu. Velikost kapacity kondenzátoru platí vždy pouze pro jedno zatížení a volíme ji podle kapitoly 7. Kromě kapacitního rozběhu můžeme získat záběrný moment pomocí odporu (odporový rozběh) či indukčnosti (induktivní rozběh). Obě metody se dnes již moc nevyužívají. Velmi výhodné se občas jeví zapojení trojfázového asynchronního motoru na jednofázovou síť podle Steinmetzova zapojení, kde ovšem vzniká eliptické magnetické pole a přicházíme o značnou část možného výkonu motorů daných parametrů.

Při návrhu základního výpočtu jednofázového asynchronního motoru jsem čerpal zejména z knihy Jednofázové indukční motory od Ing. Jaroslava Štěpiny, kde pro zjednodušení je využito několika diagramů a tabulek vytvořených dle již vyrobených a odzkoušených motorů. Při výpočtu postupujeme tak, že nejdříve vypočítáme předběžně hlavní rozměry železa a poté veškeré údaje o vinutí, drážkách a dalších potřebných veličin a rozměrů. Dále je třeba vypočítat všechny konstanty pro náhradní schéma jednofázového asynchronního motoru a tím získat veškeré údaje potřebné pro výrobu aktivních částí jednofázového asynchronního motoru. Je třeba si ovšem uvědomit, že u takto malých strojů menších výkonů nemusí být návrh mnohdy zcela přesný. Přesnějších hodnot dosáhneme až dlouhodobými zkušenostmi ověřenými praxí.

Hlavní část práce je věnována výpočtu jednofázového asynchronního motoru o výkonu 370 W, napětí sítě 230/110 V, frekvenci sítě 50 Hz, otáčkách motoru 2850 ot/min od firmy EMP s.r.o. Slavkov u Brna. Získané hodnoty z návrhu fiktivního náhradního schématu tohoto motoru byly ověřeny měřeními na motoru stejných parametrů, který je firmou běžně vyráběn. Při samotném výpočtu je použito právě dokumentace měřeného motoru od této firmy. Rozměry aktivních částí statoru, rotoru a veškeré další údaje jsou uvedeny příloze.

V tabulce 12-1 v kapitole 12 je uvedena srovnávací tabulka vypočtených hodnot, získaných jak z návrhu, tak z měření. Z tabulky je patrné, že hodnoty se poměrně přesně shodují. Můžeme tedy říci, že schéma základního výpočtu tohoto stroje, uvedené v kapitole 9 a v knize Jednofázové indukční motory od Ing. Jaroslava Štěpiny [1], ze které je toto schéma použito, je použitelné pro výpočtáře a je možné vytvořit program pro jednodušší návrh.

Je třeba si ovšem uvědomit, že hodnoty určené měřeními mají mnohem větší váhu než samotný výpočet. Při výpočtu nemůžeme počítat s jakýmkoli nežádoucími vlastnostmi a zejména u strojů menších výkonů, jako je jednofázový asynchronní motor, může být návrh mnohdy nepřesný.



LITERATURA

- [1] ŠTĚPINA, J.: Jednofázové indukční motory, SNTL Praha, 1957
- [2] MORAVEC, R.: Elektrické stroje a přístroje, I. Elektrické stroje, SNTL Praha, 1979
- [3] ROŠKOTA, S.: Elektrotechnické tabulky, SNTL Praha, 1982
- [4] BALÁK, R.: Silnoproudá zařízení, SNTL Praha, 1984
- [5] BRÁZDA, M., STAŇA, R.: Výpočet asynchronního motoru, VÚES, TZ-1600, 1973
- [7] SCHLESINGER, P.: Jednofázový asynchronní motor, Semestrální projekt, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
- [8] SCHLESINGER, P.: Jednofázový asynchronní motor, Semestrální projekt 2, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
- [9] SCHLESINGER, P.: Výpočet jednofázového indukčního motoru, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
- [10] PROVAZNÍK, F.: Elektrické stroje II, Točivé stroje, 1963
- [11] TRÍSKA, J.: Zapojování asynchronních motorů, Praha 1966
- [12] ONDRŮŠEK, Č.: PDF soubor Elektrické stroje, část Asynchronní stroje jako pomůcka pro výuku předmětu Elektrické stroje, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
- [13] HÁJEK, V.: Prezentace jako pomůcka pro výuku k předmětu Mikrostroje, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
- [14] ŠEVČÍK, P.: Výpočet jednofázového indukčního motoru, Diplomová práce, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
- [15] DOSTUPNÝ 15.5.2011 z WWW: <http://www.emp-slavkov.cz/tm_jmc.html>
- [16] DOSTUPNÝ 15.5.2011 z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Magnetické_pole>