

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

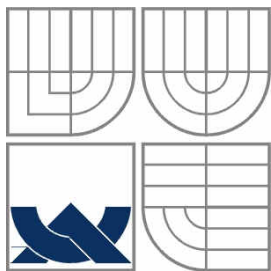
VÝPOČET JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

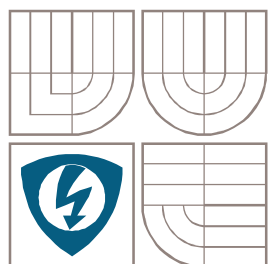
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PAVEL ŠEVČÍK

BRNO 2010



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 Ševčík

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. VÍTEZSLAV HÁJEK, CSc.

BRNO 2010



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: Ševčík Pavel

Ročník: 2

ID: 77770

Akademický rok: 2009/10

NÁZEV TÉMATU:

Výpočet jednofázového asynchronního motoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Analyzujte teoreticky jednofázový asynchronní motor a možnosti získání záběrového momentu.
2. Navrhnete základní schéma postupu výpočtu jednofázového asynchronního motoru s pomocnou fází.
3. Vypracujte demonstrační příklad výpočtu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucích

Termín zadání: 1.10.2009

Termín odevzdání: 20.5.2010

Vedoucí projektu: prof. Ing. VÍTEZSLAV HÁJEK, CSc.

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

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá jednofázovým asynchronním motorem. První část pojednává o konstrukci, principu činnosti a základních parametrech tohoto motoru. Je probrán také vznik točivého momentu a momentové charakteristiky jednotlivých typů motorů.

Druhá část objasňuje základní způsoby získávání záběrového momentu včetně nastínění principů funkce jednotlivých konstrukčních provedení, které se v praxi vyrábějí.

Ve třetí části je podrobně rozebrán jednofázový asynchronní motor s pomocnou fází a trvale připojeným kondenzátorem včetně způsobu určení velikosti kondenzátoru.

Čtvrtá část pojednává o zásadách postupu pro výpočet základních parametrů jednofázového asynchronního motoru s pomocnou fází.

V poslední části je proveden výpočet jednofázového asynchronního motoru s kondenzátorem v pomocné fázi včetně se srovnáním navrhnutého motoru s již vyráběným motorem.

Abstract

This master's thesis considers by single-phase asynchronous motor. The first part discuss about construction, principle of operation and basic parameters of this motor type. It also discussed the emergence of torque and torque characteristics of the different types of engines.

The second part explains the basic ways of obtaining grip moment including outline the principles of functions particulars constructions types, which is produce in practice.

In the third part is minutely analyse single-phase asynchronous motor with auxiliary phase and permanently conect capacitor, including method of assign size of a capacitor.

Fourth part section provides the principles of the procedure for calculating basic parameters of the single asynchronous motor with auxiliary phase.

At the last part is accomplished a calculation of single-phase asynchronous motor with permanently conect capacitor at auxiliary phase including comparison with already manufacturing motor.

Klíčová slova

drážka; elektromotor; fáze; kondenzátor; magnet; pól; rotor; stator; vinutí

Keywords

groove; electric motor; phase; capacitor; magnet; pole; rotor; stator; winding

Bibliografická citace

ŠEVČÍK, P. *Výpočet jednofázového asynchronního motoru* . Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 80 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji 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 20. 5. 2010

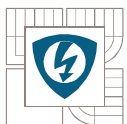
.....
Ševčík Pavel

Poděkování

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

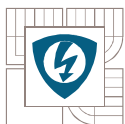
V Brně dne

Podpis autora

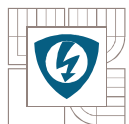


OBSAH

1 ÚVOD	13
2 JEDNOFÁZOVÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR.....	14
2.1 KONSTRUKCE JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU	14
2.2 PRINCIP ČINNOSTI JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU	15
2.2.1 VZNIK TOČIVÉHO MOMENTU	15
2.2.2 PULSUJÍCÍ MAGNETICKÉ POLE	18
2.3 MOMENT JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU	19
2.4 SKLUZ JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU	20
2.5 OTÁČKY JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU	20
3 ZPŮSOBY ZÍSKÁVÁNÍ ZÁBĚROVÉHO MOMENTU	22
3.1 JEDNOFÁZOVÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR S TLUMIVKOU V POMOCNÉ FÁZI	23
3.2 JEDNOFÁZOVÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR SE STÍNĚNÝM PÓLEM.....	23
3.2.1 KONSTRUKCE JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU SE STÍNĚNÝM PÓLEM	24
3.2.2 PRINCIP FUNKCE JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU SE STÍNĚNÝM PÓLEM	25
3.3 TŘÍFÁZOVÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR ZAPOJENÝ JAKO JEDNOFÁZOVÝ	25
3.3.1 SROVNÁNÍ 3F AM ZAPOJENÉHO NA 1 FÁZI S JEDNOFÁZOVÝM AM S POMOCNÝM VINUTÍM	26
4 JEDNOFÁZOVÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR S KONDENZÁTOREM V POMOCNÉ FÁZI	27
4.1 ZPŮSOB URČENÍ VELIKOSTI KONDENZÁTORU.....	28
4.2 NÁVRH VELIKOSTI KONDENZÁTORU URČENÍM PROVOZNÍHO OPTIMA.....	29
4.2.1 ZÁKLADNÍ ROVNICE MOTORU S POMOCNÝM VINUTÍM	29
4.2.2 KONDENZÁTOROVÝ MOTOR.....	31
4.2.3 URČENÍ PROVOZNÍHO OPTIMA KONDENZÁTOROVÉHO MOTORU	33
4.2.4 VÝPOČET KONDENZÁTORU A POMOCNÉHO VINUTÍ.....	34
5 HLAVNÍ ZÁSADY PRO VÝPOČET JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU S POMOCNOU FÁZÍ.....	36
5.1 POSTUP PŘI VÝPOČTU JEDNOFÁZOVÉHO MOTORU S POMOCNÝM VINUTÍM	36
5.2 HLAVNÍ ROZMĚRY ŽELEZA	36
5.3 PŘEDBĚŽNÝ VÝPOČET ROZMĚRŮ DRÁŽEK A VINUTÍ	38
5.4 VÝPOČET ČINNÝCH ODPORŮ	42
5.5 VÝPOČET ČINITELŮ VINUTÍ	43
5.6 VÝPOČET HLAVNÍ REAKTANCE	44
5.7 VÝPOČET ROZPTYLOVÉ REAKTANCE STATORU	45
5.8 VÝPOČET ROZPTYLOVÉ REAKTANCE ROTORU PŘEPOČÍTANÉ NA STATOR.....	48
6 VÝPOČET JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU S POMOCNOU FÁZÍ	50
6.1 VÝPOČET HLAVNÍCH ROZMĚRŮ ŽELEZA.....	50

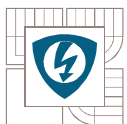


6.2 PŘEDBĚŽNÝ VÝPOČET ROZMĚRŮ DRÁŽEK A VINUTÍ	51
6.2.1 DRÁŽKY A VINUTÍ STATORU.....	51
6.2.2 DRÁŽKY A VINUTÍ ROTORU	55
6.3 URČENÍ PARAMETRŮ POMOCNÉHO VINUTÍ.....	57
6.4 VÝPOČET KAPACITY ROZBĚHOVÉHO KONDENZÁTORU	58
6.5 KONTROLA NÁVRHU MOTORU	59
6.5.1 VÝPOČET ČINNÉHO ODPORU HLAVNÍHO VINUTÍ	59
6.5.2 VÝPOČET HLAVNÍ REAKTANCE STATORU	60
6.5.3 VÝPOČET ROZPTYLOVÉ REAKTANCE STATORU.....	61
6.5.4 VÝPOČET ROZPTYLOVÉ REAKTANCE ROTORU PŘEPOČTENÉ NA STATOR.....	62
6.6 KRUHOVÝ DIAGRAM	63
6.7 POROVNÁNÍ NAVRHNUTÉHO MOTORU S VYRÁBĚNÝM	65
7 ZÁVĚR.....	67
LITERATURA	68
PŘÍLOHA A	69
PŘÍLOHA B.....	70
PŘÍLOHA C	75
PŘÍLOHA D	79



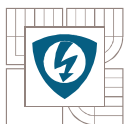
SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr.1: Zjednodušený řez asynchronním motorem	14
Obr.2: Příklady klecového vinutí rotoru.....	15
Obr. 3: Síly působící v magnetickém poli	16
Obr. 4: Magnetický obvod se vzduchovou mezerou	17
Obr. 5: Elektromagnet s otočnou kotvou	18
Obr. 6: Rozklad pulsujícího pole ve vzduchové mezeře jednofázového asynchronního motoru ..	18
Obr. 7: Průběh mag. pole ve vzduchové mezeře jednofázového asynchronního motoru	19
Obr. 8: Momentová charakteristika jednofázového asynchronního motoru	19
Obr. 9: Momentová charakteristika jednofázového asynchronního motoru s odporovou pomocnou fází a s rozběhovým kondenzátorem	20
Obr. 10: Zapojení jednofázového motoru s odporovým rozběhem	22
Obr. 11: Momentová charakteristika jednofázového motoru s odporovým rozběhem	23
Obr. 12: Charakteristiky jednofázového asynchronního motoru se stíněným pólem	24
Obr. 13: Konstrukční uspořádání 1f asynchronního motoru se stíněným pólem	24
Obr. 14: Zapojení třífázového asynchronního motoru na jednofázovou síť	25
Obr. 15: Zapojení jednofázového motoru s kapacitním rozběhem	27
Obr. 16: Momentová charakteristika jednofázového asynchronního motoru s kondenzátorem v pomocném vinutí	28
Obr. 17: a, Schéma motoru s pomocným vinutím; b, Přepočtené schéma na stejné závitů	29
Obr. 18: Určení počtu závitů pomocného vinutí a potřebné kapacity	35
Obr. 19: Součin účinníku a účinnosti trojfázových motorů	37
Obr. 20: Součin $\cos\phi$ a η pro jednofázové motory bez trvale připojeného pomocného vinutí	38
Obr. 21: a, rozměry oválné drážky; b, rozměry čtyřhranné drážky; c, rozměry kruhové drážky ..	47
Obr. 22: Diagram pro výpočet rozptylu v uzavřené drážce	49
Obr. 24: Schematické uspořádání vinutí ve statoru. Vychází z návrhů v	53
Obr. 25: Tvar navrhnutých plechů statoru.....	55
Obr. 26: Tvar navrhnutých plechů rotoru.....	57
Obr. 27: Zjednodušené náhradní schéma pro souslednou složku	59
Obr. 28: Kruhový diagram pro souslednou složku.....	65



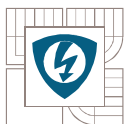
SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Velikosti používaných provozních a rozběhových kondenzátorů	26
Tab. 2: Plnění drážek	40
Tab. 3: Používané počty drážek	40
Tab. 4: Sousledná složka proudové hustoty v rotoru	42
Tab. 5: Měrná vodivost γ	43
Tab. 6: Hodnoty $\sigma_o \cdot 100$ pro vinutí s plným krokem	46

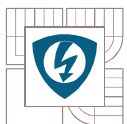


SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

α	komplexní výraz
A	proudové zatížení obvodu statoru
b	šířka drážky
b'	otevření drážky
b _{z1}	šířka zubu
b _{z2}	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
C _A	kapacita rozběhového kondenzátoru
C	kapacita kondenzátoru, Essonská 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}	průměr spojovacího kruhu rotoru
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 _{B'}	proud vinutí B přepočtený na vinutí A
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 _k	proud nakrátko
k _{cu}	poměr drážkového prostoru obou vinutí
k _d	plnění drážky
k _{δ1}	Carterův činitel pro drážkování statoru
k _{δ2}	Carterův činitel pro drážkování rotoru
l	délka statorového železa
l _t	délka tyče
l _z	délka závitu
l _č	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_{IA}	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
$\bar{s}$	zešíkmení
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
χ	činitel vinutí
χ'	činitel rozlohy
χ''	činitel zkrácení kroku
χ_t	činitel vinutí pro rotorovou klec
X_h	magnetizační reaktance
X_{rA}	rozptylová reaktance
X_{A0}	diferenciální rozptyl,
X_{Ad}	rozptyl v drážce
$X_{A\check{c}}$	rozptyl přes čela vinutí
X_{Aq}	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	ekvivalentní vzduchová mezera
ε_1	poměrný úbytek napětí na rozptylové reaktanci a činném odporu statoru
Φ_{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
τ	pólová rozteč



1 ÚVOD

Elektromotory patří mezi elektromechanické měniče, pracující na elektromagnetickém principu, které využíváme například v dopravě, domácnostech, lehkém průmyslu a pod. Jak již je z názvu patrné, jejich vstupní energií je energie elektrická, která se vhodným způsobem převádí na energii mechanickou. V naprosté většině případů je mechanická energie na výstupu motoru tvořena rotující hřídelí. Význam elektromotorů si můžeme uvědomit na faktu, že elektrické pohony spotřebovávají více než polovinu veškeré vyrobené elektrické energie. Setkat se můžeme s celou řadou motorů, jejichž provedení závisí na konkrétních potřebách daného pohonu. Podle mnoha aspektů rozlišujeme velké množství elektromotorů, například stejnosměrné nebo střídavé motory, synchronní nebo asynchronní, krokové, lineární, trojfázové nebo jednofázové, komutátorové a další. V dané oblasti patří mezi nejrozšířenější třífázové asynchronní motory a u nižších výkonů se setkáváme právě s jednofázovými asynchronními motory.

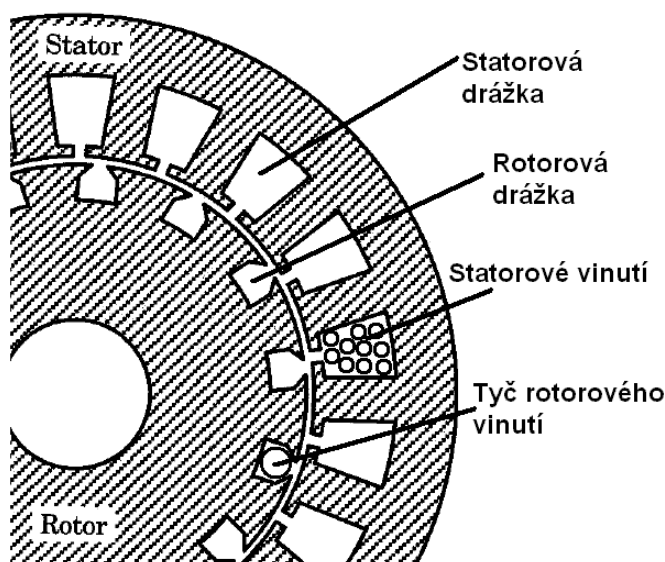
2 JEDNOFÁZOVÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR

Jednofázové asynchronní motory (někdy nazývané také jednofázové indukční motory) využíváme k pohodu průmyslových a jiných zařízení, u kterých výkon zpravidla nepřesahuje 1000W. Mohou to být například čerpadla, ventilátory, pračky, ledničky a pod. U těchto zařízení vystačíme s jednofázovým napájecím napětím. U vyšších výkonů by docházelo k nevhodnému zatížení pouze jedné fáze, což by mělo negativní vliv na rozvodnou síť. Jednofázové asynchronní motory se zpravidla používají tam, kde není nutné regulovat otáčky během provozu zařízení.

2.1 Konstrukce jednofázového asynchronního motoru

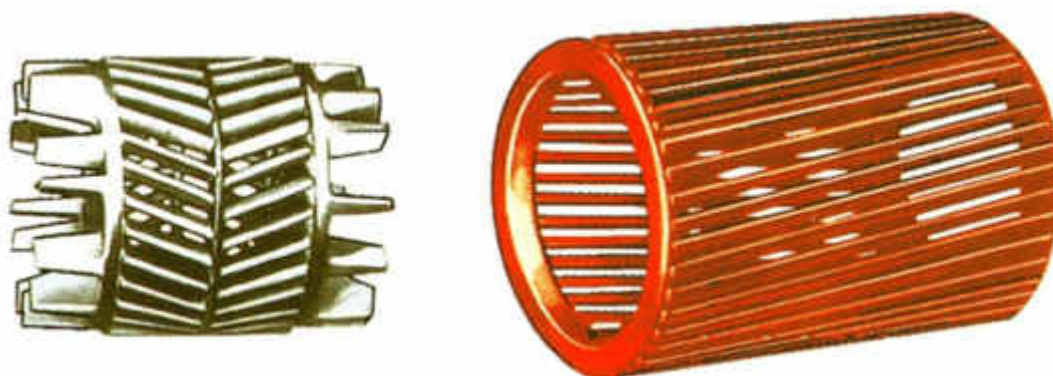
Jednofázový asynchronní motor s kotvou nakrátko se liší od trojfázového asynchronního motoru především v konstrukci statorového vinutí.

Stator je tvořen elektrotechnickými plechy naskládanými na sebe do tvaru dutého válce. Na vnitřním obvodu jsou drážky. Dvě třetiny drážek statoru jsou obsazeny pracovním vinutím (hlavní fáze) a v jedné třetině je uloženo vinutí rozběhové (pomocná fáze). Rozběhové vinutí je obvykle připojeno paralelně k pracovnímu a má k němu magnetickou osu posunutou o 90° elektrických.



Obr.1: Zjednodušený řez asynchronním motorem

Rotor je tvořen svazkem elektrotechnických plechů připevněných na rotující hřídel. Plechy naskládané k sobě tvoří válec, který je podélně drážkovaný. V drážkách jsou uloženy navzájem spojené vodiče - vinutí na rotoru je vždy v podobě klece. Vodiče jsou tvořeny hliníkovými, nebo měďnými tyčemi spojenými na svých koncích zkratovacími kroužky.



Obr.2: Příklady klecového vinutí rotoru

Mezi statorem a rotorem je vzduchová mezera cca 0,3 – 1 mm

2.2 Princip činnosti jednofázového asynchronního motoru

Prochází-li hlavním vinutím střídavý proud, vzniká na statoru pulzující magnetické pole. Toto pole je rozloženo po povrchu statoru a jeho velikost v určitém bodě závisí na poloze bodu vzhledem k ose cívky a na okamžité hodnotě proudu ve statorovém vinutí. Pulzující magnetické pole statoru indukuje díky elektromagnetické indukci ve vodičích rotorového vinutí napětí a prochází jím tedy i proud. Tento indukovaný proud vytvoří opět magnetické pole, avšak působící v každém okamžiku proti poli statoru. Jelikož působí magnetická pole na jediné společné ose, nevytváří tak žádný výsledný moment a motor se nerozběhne ani naprázdno. V tomto stavu, kdy je motor se zabrzděným rotorem, se chová jako transformátor se sekundárním vinutím nakrátko. Jednofázový asynchronní motor lze roztočit pouze vnějším impulsem. Tento impuls může být buď mechanický, a nebo vytvořením točivého magnetického pole na statoru. Pro jeho vytvoření je nutný systém alespoň dvou fází neboli vinutí vzájemně posunutých o 90° , kterými musí procházet vzájemně časově posunuté proudy. [4]

2.2.1 Vznik točivého momentu

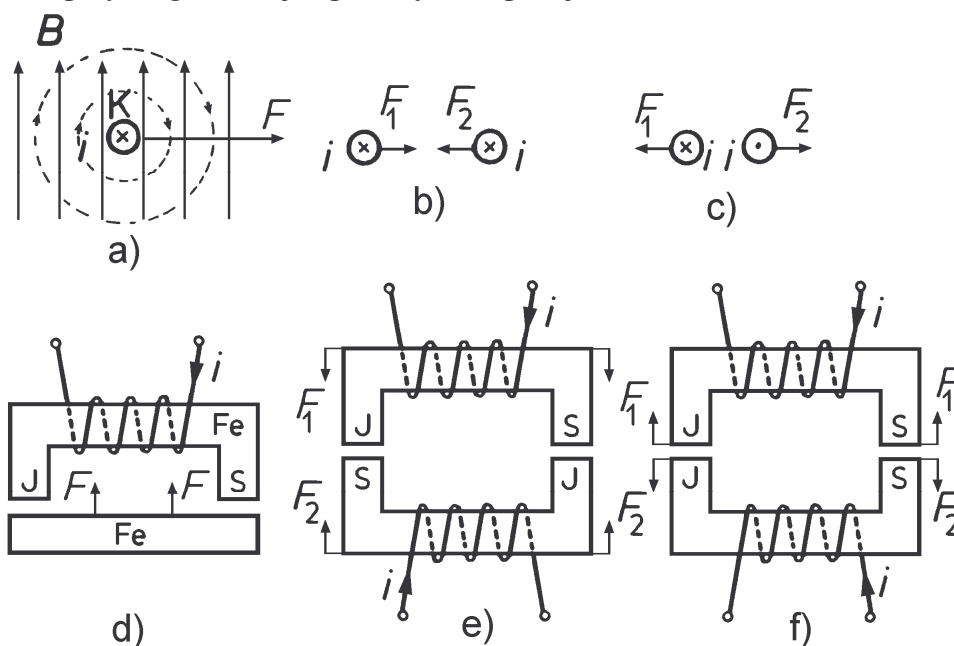
Pro lepší pochopení principu činnosti motorů probereme zásady vzniku točivého momentu. Mechanický točivý pohyb je podmínkou přeměny mechanické energie na elektrickou a obráceně. Pro tento točivý pohyb je zapotřebí točivého momentu. Tento moment je v elektrickém stroji složen z řady sil působících na rotor v tangenciálním směru. Stejný moment jako na rotor působí v opačném směru také na stator.

Jako vodič magnetického toku je u motorů použita magneticky měkká ocel, která tvoří magneticky vodivou cestu pro užitečný tok.

2.2.1.1 Síly v magnetickém poli

V úvahách vycházíme ze základních poznatků o magnetickém poli. Magnetická pole jsou vyvolávána pomocí účinků magnetických proudů. Protéká-li budícími cívkami elektromagnetu proud, stává se elektromagnet magnetickým.[7]

- Platí:
- na vodič K v magnetickém poli B působí síla F - viz obrázek 3a,
 - vodiče vedoucí proud ve stejném směru se přitahují - viz obrázek 3b,
 - vodiče vedoucí proud v opačném směru se odpuzují - viz obrázek 3c,
 - elektromagnet přitahuje kotvu - viz obrázek 3d,
 - póly magnetu různé polarity se přitahují - viz obrázek 3e,
 - póly magnetu stejné polarity se odpuzují - viz obrázek 3f.



Obr. 3: Síly působící v magnetickém poli [7]

2.2.1.2 Magnetický obvod

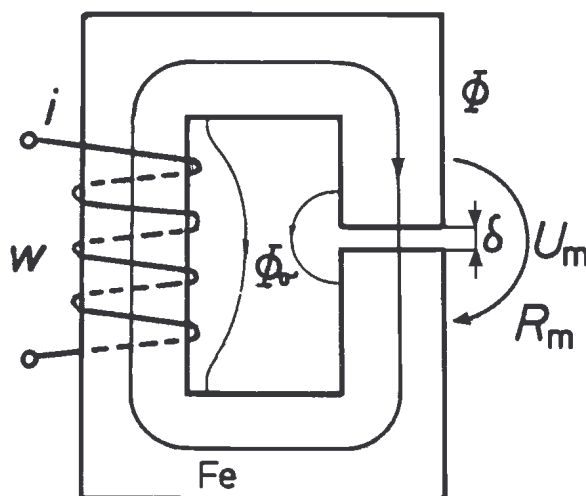
Při sycení magnetického obvodu vystupuje část magnetického toku ze železa a uzavírá se vzduchem - rozptylové toky Φ_δ . Pro základní úvahu zanedbáme magnetický odpor železa ($\mu_{Fe}=\infty$) a za magnetický odpor R_m budeme pokládat pouze vzduchovou mezeru. Poté pro magnetický obvod na obrázku 4 platí: [7]

$$U_m = w \cdot i \quad \text{kde: } w - \text{počet závitů} \quad (1)$$

$$i - \text{proud tekoucí cívkou} \quad (2)$$

$$U_m = R_m \cdot \Phi$$

Rovnice (2) je obdobou Ohmova zákona. U_m je magnetické napětí, Φ magnetický tok (obdobu proudu) a R_m magnetický odpor.



Obr. 4: Magnetický obvod se vzduchovou mezerou [7]

2.2.1.3 Energie magnetického pole

Pokud budeme uvažovat magnetický obvod viz obrázek 4, lze pro energii magnetického pole odvodit další vztahy. [7]

Hustota energie obsažené v magnetickém poli:

$$e = \frac{1}{2} \cdot B \cdot H \quad \text{kde: } B - \text{magnetická indukce} \quad (3)$$

H - intenzita pole (pro vzduch $B = \mu_0 H$)

Uvnitř vzduchové mezery platí:

$$H = \frac{U_m}{\delta} \quad (4)$$

a při zanedbání toku na okrajích:

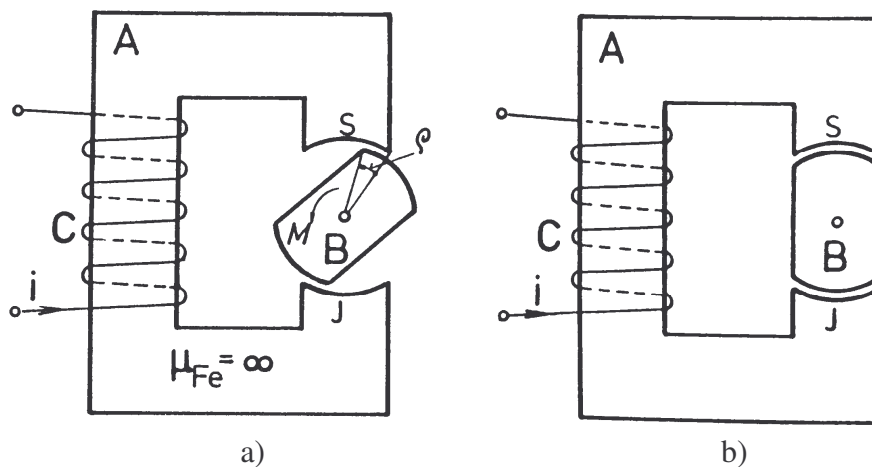
$$B = \frac{\Phi}{A} \quad \text{kde: } A - \text{průřez vzduchové mezery} \quad (5)$$

Celková energie pole ve vzduchové mezeře je tedy:

$$E = e \cdot V = \frac{1}{2} \cdot B \cdot H \cdot A \cdot \delta = \frac{1}{2} \cdot \Phi \cdot U_m \quad (6)$$

2.2.1.4 Elektromagnet s otočnou kotvou

Magnetický obvod z měkkého železa na obrázku 5 stejně jako asynchronní motor sestává z pevné části A (statoru) a otočné B (rotoru). Protéká-li cívkou C proud i , působí tedy na otočnou kotvu točivý moment, který se snaží přivést otočnou kotvu do polohy na obrázku 5b. Vznik tohoto momentu lze podle předchozích úvah vysvětlit tím, že se účinkem proudu i stane část magnetického obvodu A elektromagnetem se severním (S) a jižním (J) pólem, které přitahují konce otočné kotvy B pokud možno do své blízkosti. [7]



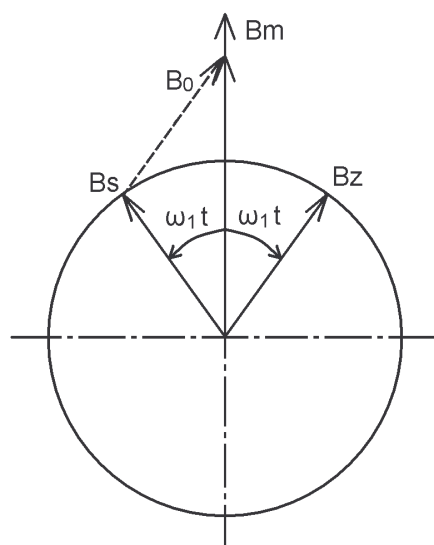
Obr. 5: Elektromagnet s otočnou kotvou [7]

Při využití tohoto principu a prostorově souměrného cylindrického uspořádání závitů jak na statoru tak na rotoru, dostáváme tedy model, který může být zdrojem točivého momentu v závislosti na velikosti protékajícího proudu.

Všechny tyto poznatky o vzniku točivého momentu jsou uvedeny pro lepší nastínění principu činnosti asynchronního motoru.

2.2.2 Pulsující magnetické pole

Pulsující magnetické pole si lze také představit jako výsledek superpozice dvou točivých kruhových magnetických polí, které se otáčejí proti sobě stejnou úhlovou rychlostí ω_1 .



Obr. 6: Rozklad pulsujícího pole ve vzduchové mezeře
jednofázového asynchronního motoru

Pro okamžitou hodnotu první harmonické magnetické indukce ve vzduchové mezeře platí:

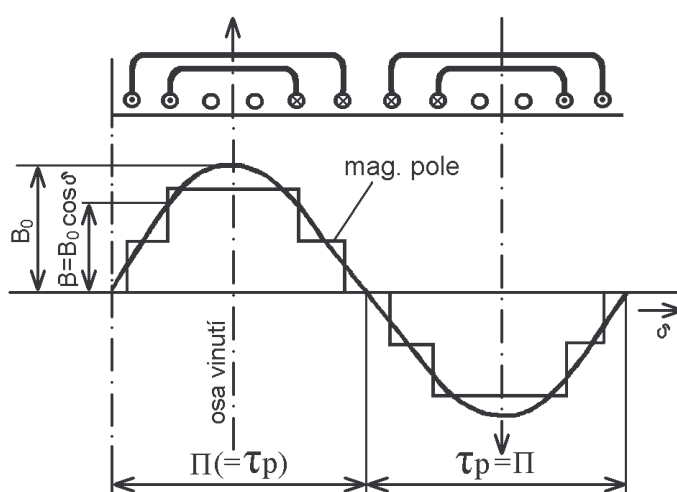
$$B = B_m \cdot \cos \nu \cdot \cos \omega_1 t \quad (7)$$

lze upravit na tvar:

$$B = B_s \cdot \cos(\nu - \omega_1 t) + B_z \cdot \cos(\nu + \omega_1 t) \quad (8)$$

kde: $B_s = 0,5 B_m$ - sousledná složka mag. pole

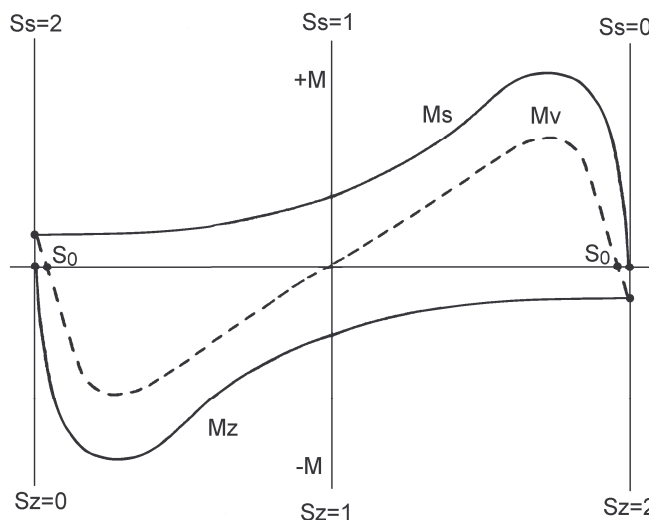
$B_z = 0,5 B_m$ - zpětná složka mag. pole



Obr. 7: Průběh mag. pole ve vzduchové mezeře jednofázového asynchronního motoru [6]

2.3 Moment jednofázového asynchronního motoru

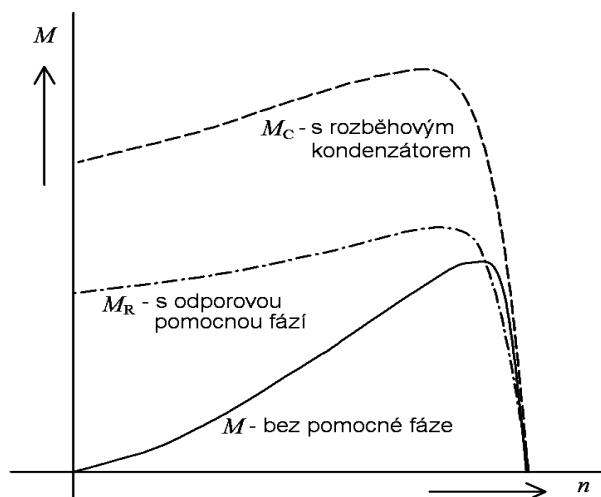
Obě magnetická pole udaná na obrázku 6 (sousledné a zpětné) indukují ve vinutí rotoru proudy. Vzájemným působením magnetického pole statoru a proudů rotoru se pak vytvářejí momenty M_s a M_z působící proti sobě. Výsledný moment motoru je dán součtem momentových charakteristik obou složek



Obr. 8: Momentová charakteristika jednofázového asynchronního motoru

Z momentových charakteristik je patrné, že motor nevytváří žádný záběrný moment. To opět potvrzuje tvrzení, že jednofázový asynchronní motor lze roztočit pouze vnějším impulsem jak bylo řečeno v kapitole 2.2. Roztočíme-li motor v jednom nebo druhém směru, jsou momenty od zpětné složky menší než od sousledné.

V případě asynchronního motoru s odporovou pomocnou fází, nebo s rozběhovým kondenzátorem (tyto typy jsou probrány v kapitole 3.1 a 4), má momentová charakteristika počáteční záběrový moment nenulový.



Obr. 9: Momentová charakteristika jednofázového asynchronního motoru s odporovou pomocnou fází a s rozběhovým kondenzátorem

2.4 Skluz jednofázového asynchronního motoru

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

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 \quad (9)$$

kde: n_s - otáčky pole statoru (sítě),
 n - otáčky rotoru.

2.5 Otáčky jednofázového asynchronního motoru

Otáčky motoru nezávisí jen na síťovém kmitočtu, ale také na počtu pólových dvojic statorového magnetického obvodu. Otáčky pole uvnitř motoru souvisejí s kmitočtem sítě.

$$n_s = \frac{60 \cdot f_s}{p} \quad (10)$$

kde: f_s - kmitočet sítě,
 p - počet pólových dvojic.



Otáčky asynchronního motoru leží o něco níže než otáčky synchronní právě vlivem skluzu. Skluz motoru závisí také na mechanickém zatížení motoru. Se vzrůstajícím zatěžovacím momentem roste. Při překročení určité hranice zatěžovacího momentu naroste skluz natolik, že se motor značně zahřívá a jeho účinnost klesá. V tomto režimu není vhodné motor provozovat.

Otáčky samotného rotoru jsou tedy definovány:

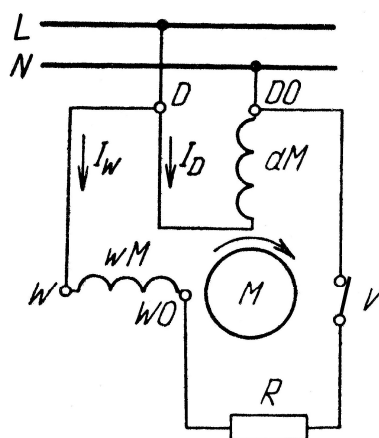
$$n = (1 - s) \cdot n_s \quad (11)$$

3 ZPŮSOBY ZÍSKÁVÁNÍ ZÁBĚROVÉHO MOMENTU

Jak již bylo řečeno v kapitole 2.2, je u jednofázového asynchronního motoru pro vznik počátečního momentu nutné zajistit vytvoření točivého magnetického pole statoru. Nejjednodušším způsobem je využití dvoufázově navinutého statoru, přičemž fázový posun ve druhém vinutí je zajištěn vřazením kondenzátoru, tlumivky, nebo samotným odporem vinutí. Dále také můžeme využít konstrukci jednofázového asynchronního motoru se stíněným pólem, nebo zapojit třífázový asynchronní motor jako jednofázový.

Jednofázový asynchronní motor s odporem v pomocné fázi

Abychom se vyhnuli roztáčení jednofázového motoru za pomoci mechanického momentu působícího na hřídel rotoru, existuje řada způsobů jak jej roztočit za pomoci kladného momentu i při nulových otáčkách. U motorů, kde nám stačí počáteční záběrný moment o velikosti 1 až 1,3 násobku jmenovitého momentu vystačíme s odporovým rozběhem. Ve statoru je jak již bylo řečeno v kapitole 2.1 dvoje vinutí. Podle obrázku 10 je hlavní vinutí dM vyvedeno na svorky D a D0. Toto vinutí je pod napětím při rozběhu i za chodu. Je tedy dimenzováno na jmenovitý výkon motoru. Hlavní vinutí je uloženo ve dvou třetinách drážek statoru. [4]



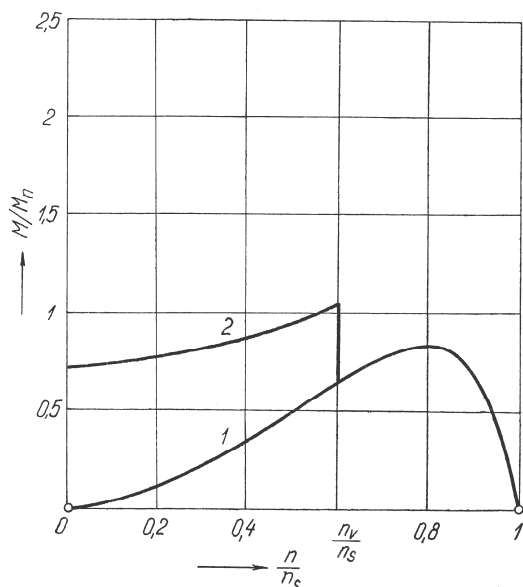
Obr. 10: Zapojení jednofázového motoru s odporovým rozběhem [4]

Ve zbývajících jedné třetině drážek statoru je navinuto pomocné vinutí - na obrázku 10 označeno wM. Pomocí tohoto vinutí se při záběru vytvoří točivé magnetické pole. Aby k tomu došlo, je zapotřebí, aby proud I_W procházející pomocným vinutím měl proti napětí jiný fázový posun než proud I_D v hlavní fázi. Proto se do obvodu pomocné fáze vřazuje odpor R. Tento odpor je navržen tak, aby na něm byla větší část napětí. Potom se však při vzrůstající rychlosti otáčení proud I_W zmenšuje jen málo, a proto je nutné pomocnou fázi zavčas odpojit. Aby vznikl dostatečný záběrný moment, je totiž nutný poměrně velký proud I_W .

V praxi se většinou nepoužívá přímo samostatný odpor R, ale pomocné vinutí se navine přímo z odporového drátu. V tomto vinutí se při záběru proměňuje veškerá energie pomocné fáze

na teplo, a proto je potřeba ji co nejdříve po rozběhu motoru odpojit, aby nedošlo k jejímu zničení. Pomocné vinutí se odpojuje při dosažení přibližně dvou třetin jmenovitých otáček.

Na obrázku 11 je naznačen příklad momentové charakteristiky. Úsek (2) platí v případě, že je pomocná fáze připojena do obvodu. V čase n_v dojde k rozpojení vypínače V a tím je pomocná fáze odpojena. Momentová charakteristika pak pokračuje podle křivky (1). [4]



1 - průběh momentové charakteristiky bez pomocné fáze

2 - průběh momentové charakteristiky s odporem v pomocné fázi

n/n_s - čas rozpojení

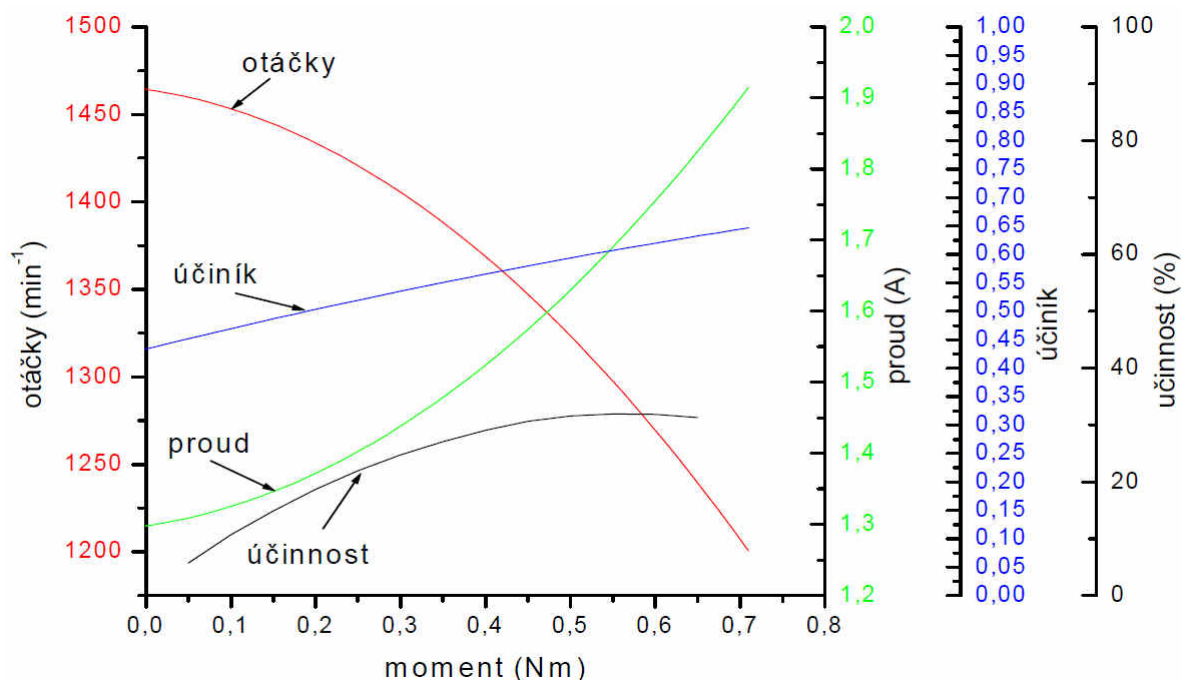
Obr. 11: Momentová charakteristika jednofázového motoru s odporovým rozběhem [4]

3.1 Jednofázový asynchronní motor s tlumivkou v pomocné fázi

Mnohem lepšího výsledku než vřazením odporu do pomocné fáze lze dosáhnout vřazením tlumivky. Proud v pomocném vinutí je pak posunut mnohem více od proudu ve vinutí hlavním. V praxi se ale tohoto zapojení využívá jen zřídka, protože je konstrukčně méně vhodné a navíc zhoršuje účinnost motoru. Mnohem lepších provozních vlastností lze dosáhnout vřazením kondenzátoru viz. kapitola 4.

3.2 Jednofázový asynchronní motor se stíněným pólem

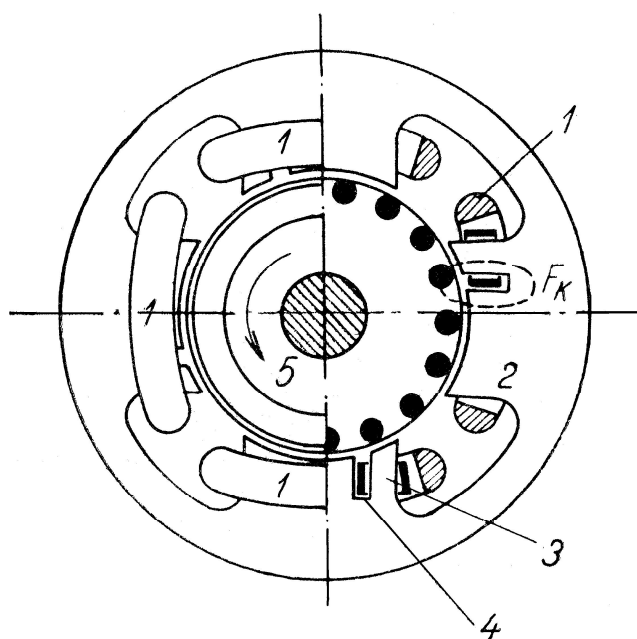
Jednofázový synchronní motor se stíněným pólem nachází velmi časté uplatnění v aplikacích, kdy potřebujeme jednoduchý, malý jednofázový motor malého výkonu cca do 20 W. Typické je použití těchto motorků v nenáročných pohonech například u ventilátorů. Účinnost těchto motorů je malá ($\eta = 0,1$ až $0,4$) a počáteční záběrný moment je také malý, stejně jako účinnost ($\cos\phi = 0,6$). Výhodou je velmi tichý chod, jednoduchost a nízká výrobní cena.



Obr. 12: Charakteristiky jednofázového asynchronního motoru se stíněným pólem [3]

3.2.1 Konstrukce jednofázového asynchronního motoru se stíněným pólem

Vinutí statoru není tvořeno pravidelným drážkováním po celém jeho obvodu, ale je tvořeno tzv. stíněnými póly. V pólu se nachází nesouměrný zářez, v němž je uložen závit z měděného pásku spojený nakrátko. Rotor má obvykle vinutí klecového typu.



- 1 - cívky připojené na síť
- 2 - vyniklé póly
- 3 - rozštěpená část pólu
- 4 - závit spojený nakrátko
- 5 - rotor

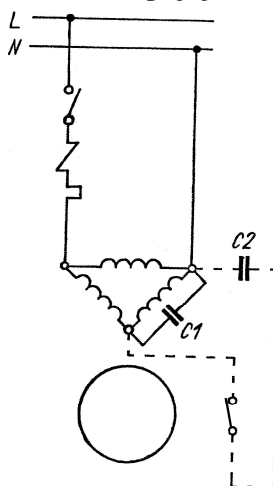
Obr. 13: Konstruktivní uspořádání 1f asynchronního motoru se stíněným pólem [4]

3.2.2 Princip funkce jednofázového asynchronního motoru se stíněným pólem

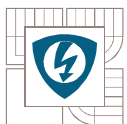
V závitu nakrátko se v důsledku působení magnetického pole vytvořeného hlavním vinutím indukuje elektrický proud. Tento proud vytváří tok opačným směrem než je tok hlavní, a tím zeslabuje magnetické pole pod částí hlavního pólu. Tok vytvořený závitem nakrátko je vůči hlavnímu vinutí posunut prostorově i fázově. Tím vzniká ve vzduchové mezeře eliptické točivé pole, které umožňuje rozběh motorku, aniž by bylo nutné použít dalšího rozběhového vinutí. [4]

3.3 Třífázový asynchronní motor zapojený jako jednofázový

V některých případech, kdy máme k dispozici pouze jednofázovou síť, můžeme využít specifické zapojení třífázového asynchronního motoru. Jedná se o zapojení, ve kterém je motor připojen do trojúhelníku s třetí volnou svorkou. Tato třetí svorka je připojena přes kondenzátor. Tento kondenzátor bývá připojen trvale-provozní kondenzátor, nebo jej lze po rozběhu motoru odpojit. V případě odpojení kondenzátoru běží motor jako jednofázový, t.j. s odpojeným jedním fázovým vinutím. Výkon motoru je v tomto případě přibližně 50 % jeho výkonu při trojfázovém napájení. Při trvalém připojení kondenzátoru má motor větší výkon než při odpojení kondenzátoru a tento výkon pak dosahuje i více než 80 % plného výkonu při trojfázovém napájení. V případě potřeby záběrného momentu většího než 66 % jmenovitého, lze k provoznímu kondenzátoru připojit paralelně druhý, pomocný rozběhový kondenzátor. Tento rozběhový kondenzátor se po rozběhu motoru odpojuje. [5]



Obr. 14 Zapojení třífázového asynchronního motoru na jednofázovou síť [5]



Velikosti používaných provozních a rozběhových kondenzátorů lze vypočítat několika způsoby, nebo se empiricky volí podle následující tabulky.

Výkon motoru [W]	Provozní kondenzátor [μF]	Rozběhový kondenzátor [μF]
100 až 200	5 až 8	8 až 10
200 až 300	8 až 10	10 až 15
300 až 500	10 až 15	15 až 25
500 až 700	15 až 20	30 až 50
700 až 1000	20 až 28	40 až 100

Tab. 1: Velikosti používaných provozních a rozběhových kondenzátorů [5]

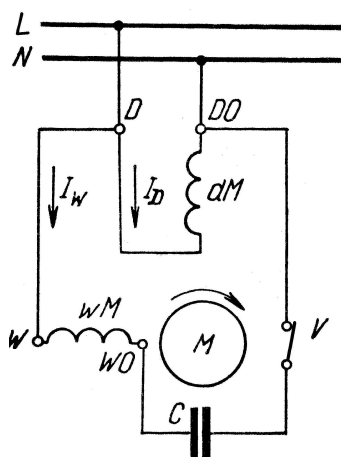
3.3.1 Srovnání 3f AM zapojeného na 1 fázi s jednofázovým AM s pomocným vinutím

Trojfázový asynchronní motor zapojený na 1 fázi má s jednofázovým asynchronním motorem mnoho společného. U obou zapojení lze však najít výhody i nevýhody, které vzhledem k použité aplikaci rozhodnou o správné volbě mezi těmito dvěma variantami.

- Obrovskou výhodou je u trojfázového motoru možnost připojit jej na jednofázovou síť.
- Kapacita je u trojfázového stroje přibližně dvakrát větší než u stejně velkého stroje s pomocným vinutím. Větší kapacita je zapotřebí vlivem menšího napětí na kondenzátoru a většího průřezu vinutí napájeného přes tuto kapacitu, než má trvale zapojené pomocné vinutí u jednofázových motorů.
- Momenty zvratu trojfázového motoru s kondenzátorem bývají o něco menší než u téhož stroje navinutého jednofázově s pomocným, trvale zapojeným vinutím.

4 JEDNOFÁZOVÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR S KONDENZÁTOREM V POMOCNÉ FÁZI

Pokud do obvodu pomocné fáze na obrázku 10 vřadíme místo odporu R kondenzátor C , může být fázový posun mezi proudy I_D a I_W takový, že vznikne točivé magnetické pole podobné jako mají trojfázové motory. Lze tedy dosáhnout až čtyřnásobného momentu, a přitom je záběrný proud menší, než u motoru stejného výkonu s odporovým rozběhem. Jakmile motor běží dostatečnou rychlostí je opět nutné zajistit rozpojení obvodu pomocné fáze. [4]



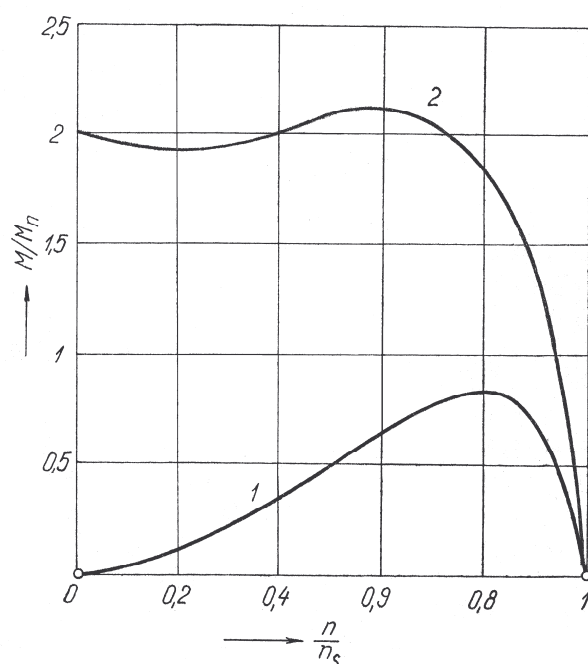
Obr. 15: Zapojení jednofázového motoru s kapacitním rozběhem

V situaci, kdy by stačil jen malý záběrný moment (např. 30 % jmenovitého momentu M_n), lze pomocnou fázi navrhnout tak, že může být připojená stále přes malý kondenzátor. V tomto případě se používá kondenzátor s papírovým dielektrikem a tento kondenzátor také zlepšuje účinnost motoru.

Většinou slouží kondenzátor jen pro rozběh. Používá se silnoproudý elektrolytický kondenzátor u něhož jsou oba polepy pokryty vrstvou kysličníku. Používané silnoproudé elektrolytické kondenzátory vydrží střídavé napětí jen po krátkou dobu, proto je nutné pomocnou fázi po rozběhu odpojit. Jeho dielektrikum je tvořeno jen velmi tenkou vrstvičkou kysličníku. Toto dielektrikum musí snést plné napětí, takže intenzita elektrického pole je v něm velká. Dielektrické ztráty jsou v tomto kondenzátoru velké, a kdyby byl do obvodu připojen po dlouhou dobu, došlo by k jeho tepelnému zničení.

Jednofázový asynchronní motor s kondenzátorem v pomocné fázi se používá v aplikacích, kde je nutný velký záběrný moment například u kompresorové chladničky nebo u pračky.

Pokud zaměníme přívody k hlavní nebo pomocné fázi, dojde ke změně smyslu točivého magnetického pole a motor se začne otáčet opačným směrem. Této vlastnosti lze využít všude tam, kde potřebujeme měnit směr otáčení jednofázového motoru. V praxi je toto realizováno křížovým přepínačem vřazeným do obvodu hlavního, nebo pomocného vinutí. [4]



1 - průběh momentové charakteristiky bez pomocné fáze

2 - průběh momentové charakteristiky motoru s kondenzátorem v pomocném vinutí

Obr. 16: Momentová charakteristika jednofázového asynchronního motoru s kondenzátorem v pomocném vinutí [4]

4.1 Způsob určení velikosti kondenzátoru

Pro určení velikosti kondenzátoru existuje mnoho způsobů. Nejčastější postupy vycházejí ze zkušeností při návrhu a konstrukci. V literatuře se objevuje mnoho empirických vzorců, podle kterých je volba kondenzátoru velmi snadná. Na druhé straně, pokud chceme určit velikost kondenzátoru velmi přesně, lze použít poměrně složitou metodu provozního optima, podle které lze dosáhnout velmi kvalitního návrhu rozběhového kondenzátoru s patřičnými požadavky na výsledné charakteristiky pohonu.

Empirické vzorce pro určení velikosti rozběhového kondenzátoru:

$$C = 68 \cdot P \quad [\mu\text{F}; \text{kW}] \quad (12) [10]$$

kde: C - kapacita kondenzátoru (μF),
P - výkon jednofázového motoru (kW).

$$C = 0,29 \cdot k \cdot P \quad [\mu\text{F}; -, \text{kW}] \quad (13) [9]$$

kde: C - kapacita kondenzátoru (μF),
k - konstanta závislá na napětí sítě ($k = 25$ pro $U=400\text{V}$;
 $k = 68$ pro $2 U=230\text{V}$; $k = 200$ pro $U=110\text{V}$),
P - výkon trojfázového motoru (kW).

$$C = \frac{P}{U \cdot f^2} \quad [F; W; V; Hz] \quad (14)$$

kde: C - kapacita kondenzátoru (F),
P - výkon motoru (W),
U - napětí sítě (V),
f - kmitočet sítě (Hz).

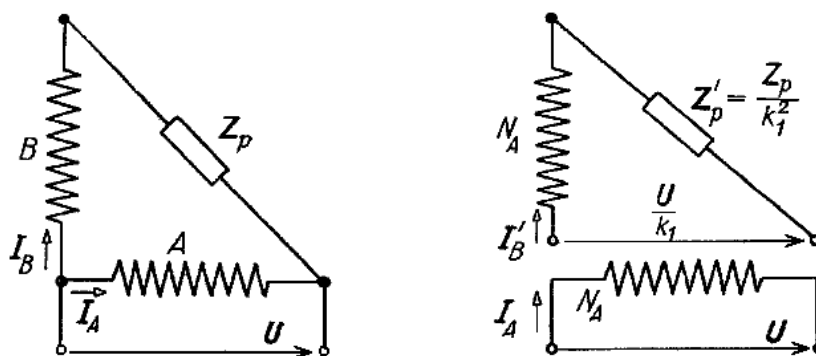
4.2 Návrh velikosti kondenzátoru určením provozního optima

Určení velikosti kondenzátoru úzce souvisí právě s určením správného provozního optima kondenzátorového motoru. I na základě tohoto optima volíme správný poměr mezi velikostí kondenzátoru a s ním souvisejícím záběrným momentem a počtem závitů pomocného vinutí. U pohonů, kde nepotřebujeme velký záběrný moment (ventilátory), můžeme použít kondenzátor o malé kapacitě, který je levnější. V případě požadavku velkého záběrného momentu (pračky, ledničky) musíme použít dražší kondenzátor o větší kapacitě. [1]

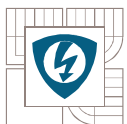
Metoda provozního optima a následný výpočet kondenzátoru a pomocného vinutí bude popsán v kapitolách 4.2.3 a 4.2.4. Pro tuto metodu a výpočet je nutné znát základní rovnice motoru s pomocným vinutím společně s impedancemi. Tyto parametry jsou popsány v kapitole 4.2.1 a 4.2.2.

4.2.1 Základní rovnice motoru s pomocným vinutím

U všech tří možností zapojení pomocné fáze (připojení odporu, tlumivky, kondenzátoru) lze stanovit a vypočítat základní rovnice motoru s pomocným vinutím, které u všech těchto zapojení platí. Předpokládají se různé počty efektivních závitů vinutí A a B. A stejně tak shodné rozložení mědi v drážkách a tím i stejná velikost rozptylové impedance. U vinutí B lze rozdíl mezi skutečnou a předpokládanou rozptylovou impedancí označit jako pomocnou impedanci Z_p . [1]



Obr. 17: a, Schéma motoru s pomocným vinutím; b, Přepočtené schéma na stejné závitů



Jelikož je možné přepočítat různé počty závitů obou vinutí na schéma na obrázku 17b, kde jsou počty závitů stejné, můžeme stanovit poměr efektivních závitů obou vinutí k_1 .

$$k_1 = \frac{\chi_B \cdot N_B}{\chi_A \cdot N_A} \quad (15)$$

kde: χ_A - činitel vinutí A
 χ_B - činitel vinutí B
 $N_{A,B}$ – počty závitů vinutí A a B

Pomocí tohoto poměru můžeme vyjádřit veličiny přepočteného schématu a označit je čárkou.
Pro zapojení na obrázku 17b tedy platí:

$$U_{dA} = Z_d \cdot I_{dA} \quad U'_{dB} = (Z'_p + Z_d) \cdot I'_{dB} \quad (16)$$

$$U_{iA} = Z_i \cdot I_{iA} \quad U'_{iB} = (Z'_p + Z_i) \cdot I'_{iB} \quad (17)$$

$$U_{dA} + U_{iA} = U_A = U \quad U'_{dB} + U'_{iB} = \frac{U_A}{k_1} = \frac{U}{k_1} \quad (18)$$

Vyjádřením z (16) a (18) dostaneme:

$$U = Z_d \cdot I_{dA} + Z_i \cdot I_{iA} \quad (19)$$

$$\frac{U}{k_1} = (Z'_p + Z_d) \cdot I'_{dB} + (Z'_p + Z_i) \cdot I'_{iB} \quad (20)$$

Z čehož lze pro vinutí B vyjádřit proudy:

$$I'_{dB} = k_1 \cdot I_{dB} = jI_{dA} \quad (21)$$

$$I'_{iB} = k_1 \cdot I_{iB} = -jI_{iA} \quad (22)$$

kde: I_{dB}, I_{iB} – souměrné složky skutečného proudu vinutí,
 I'_{dB}, I'_{iB} – souměrné složky přepočteného proudu I'_B .

Řešením (20), (21) a (22) dostaneme:

$$I_{dA} = \frac{Z'_p + Z_i - \frac{j}{k_1} \cdot Z_i}{Z_d (Z'_p + 2 \cdot Z_i) + Z_i \cdot Z'_p} \cdot U \quad (23)$$

$$I_{iA} = \frac{Z'_p + Z_d + \frac{j}{k_1} \cdot Z_d}{Z_d (Z'_p + 2 \cdot Z_i) + Z_i \cdot Z'_p} \cdot U \quad (24)$$



4.2.2 Kondenzátorový motor

V případě, kdy je za impedanci zvolen kondenzátor, dostáváme zapojení popsané v kapitole 4. V technické praxi se můžeme setkat se dvěma variantami zapojení kondenzátoru v pomocné fázi. V první variantě je kondenzátor připojen trvale i za běhu motoru a ve druhém případě jsou v pomocné fázi připojeny dva kondenzátory paralelně, přičemž jeden se po rozběhu motoru odpojí. Použitím dvou kondenzátorů jsme schopni dosáhnout většího záběrného momentu, avšak druhý kondenzátor musí být po rozběhu odpojen. Velikost sousledné a zpětné složky proudu I_A (I_{dA} a I_{iA}) platí stejně jako u motoru s obecnou impedancí Z_p . Přepočtená impedance Z'_p je při tomto zapojení dána: [1]

$$Z'_p = \frac{1}{jk_1^2 \cdot \omega \cdot C_1} + \Delta R + \Delta X_v \quad (25)$$

Kde rozdíl mezi přepočtenými rozptylovými hodnotami vinutí B a hodnotami vinutí A jsou dány:

$$\Delta R = R'_B - R_A \quad ; \quad \Delta X_v = X'_{vB} - X_{vA} \quad (26); (27)$$

Pro zjednodušení lze uvažovat stejnou hodnotu aktivní mědi a stejné rozložení v drážkách obou vinutí, z čehož plyne:

$$\Delta R = \Delta X_v = 0 \quad (28)$$

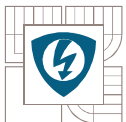
Kondenzátorový motor má tu vlastnost, že dojde-li k mechanickému odlehčení, zvýší se proud pomocným vinutím. Při chodu naprázdno tedy může být toto pomocné vinutí přetíženo. Další vlastností je, že připojený kondenzátor zlepšuje účinník, který může dosáhnout i $\cos\varphi = 1$. Tato situace může nastat, protože jalový příkon kondenzátoru a motoru se v prostých hodnotách odčítají. Kondenzátorový motor lze svými vlastnostmi vřadit někam mezi motor bez pomocného vinutí a motor souměrný dvoufázový.

Vztah (23) lze pro lepší orientaci v jednotlivých složkách napsat jako:

$$I_{dA} = \frac{1}{Z_d + Z_i \cdot \frac{Z'_p}{Z'_p + 2Z_i}} \cdot \frac{Z'_p + \left(1 - \frac{j}{k_1}\right) \cdot Z_i}{Z'_p + 2Z_i} \cdot U \quad (29)$$

a rozepsat na:

$$I_{dA} = \frac{1}{Z_d + \alpha \cdot Z_i} \cdot \beta U \quad (30)$$



$$\text{kde: } \alpha = \frac{Z'_p}{Z'_p + 2Z_i} \quad ; \quad \beta = \frac{Z'_p + \left(1 - \frac{j}{k_1}\right)Z_i}{Z'_p + 2Z_i} \quad (31);(32)$$

V případě odpojeného kondenzátoru je $Z'_p = \infty$ a platí $\alpha = \beta = 1$.

Dále zavedeme zobecnění rozptylové impedance Z_{v1} :

$$Z_{v1} = (1 + \alpha)R_A + \alpha \frac{R_2}{1,8} + j(1 + \alpha)X_{v1} + j\alpha X_{v2} \quad (33)$$

a komplexní činitel rozptylu:

$$\nu_1 = |\nu_1| \angle -\gamma_1 = \frac{Z_{v1} + jX_h}{jX_h} \quad (34)$$

Brzdňý moment zpětné složky vyplývající z (23) a (24) je dán:

$$I_{iA} = \frac{Z'_p + Z_d \left(1 + \frac{j}{k_1}\right)}{Z'_p + Z_i \left(1 - \frac{j}{k_1}\right)} I_{dA} = \zeta \cdot I_{dA} \quad (35)$$

Při malých skluzech lze brzdicí moment zpětné složky určit podle:

$$M_i \cong \frac{R_2}{n_s} I_{dA}^2 \cdot |\zeta|^2 \quad [\text{kg}\cdot\text{m}; \Omega; \text{ot/min}; \text{A}] \quad (36)$$

a odbrzděný výkon:

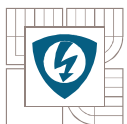
$$\Delta'' P_{Cui} \cong R_2 \cdot I_{dA}^2 \cdot |\zeta|^2 \quad [\text{W}; \Omega; \text{A}] \quad (37)$$

Celkový proud hlavního vinutí dostaneme sečtením souměrných složek proudů ze vztahů (23) a (24). Obdobně celkový proud pomocného vinutí dostaneme sečtením souměrných složek proudů ze vztahů (21) a (22).

Položíme-li výraz $Z'_p + Z_d \left(1 + \frac{j}{k_1}\right)$ z rovnice (35) roven nule, platící pro Z'_p čistě kapacitní

a $k_1=1$, pak platí:

$$Z_d = \frac{|Z'_p| \angle -90^\circ}{\sqrt{2} \angle 45^\circ} = \frac{|Z_p|}{\sqrt{2}} \angle 45^\circ \quad (38)$$



4.2.3 Určení provozního optima kondenzátorového motoru

Určení velikosti kondenzátoru spolu s počtem závitů pomocného vinutí závisí na správném určení provozního optima kondenzátorového motoru. Počet závitů pomocného vinutí má přímou návaznost na záběrný moment motoru. Chceme-li zvýšit záběrný moment, musíme snížit počet závitů pomocného vinutí. Se zmenšováním počtu závitů pomocného vinutí musíme zvyšovat kapacitu kondenzátoru. Kondenzátor se proto volí tak, aby využití průřezu pomocného a hlavního vinutí bylo přibližně stejné.

Kapacitu můžeme volit také experimentálně tak, že máme daný počet závitů, nebo jej volíme a motor zatížíme jmenovitým výkonem a sledujeme příkon. Ve chvíli, kdy je příkon nejnižší, jsou ztráty ve stroji nejnižší a připojený kondenzátor je neoptimálnější. [1]

Poměr hmoty aktivní mědi obou vinutí volíme:

$$k_{Cu} = \frac{G_B}{G_A} \quad (39)$$

kde: G_A, G_B – hmoty vinutí A, B.

Optimálním návrhem kondenzátoru a počtu závitů pomocného vinutí se snažíme dosáhnout co nejmenších ztrát. Nejmenších ztrát dosáhneme tehdy, jsou-li proudy obou vinutí na sebe kolmé, protože v této chvíli je sousledná složka největší a zpětná složka nejmenší. Dále při této metodě respektujeme shodnou hodnotu proudové hustoty hlavního i pomocného vinutí. Při výpočtu se nejprve uvažuje stejný počet závitů obou vinutí a stroj považujeme za souměrný dvoufázový. Využijeme tedy souměrných složek proudů dvoufázové soustavy.

V případě, že jsou proudy na sebe kolmé a mají stejnou velikost, platí:

$$I'_B = k_{Cu} \cdot a \cdot I_A \quad (40)$$

kde: $a = \angle 90^\circ$

Souměrné složky budou dány:

$$I_{dA} = \frac{1 + k_{Cu}}{2} I_A = \frac{I_A}{k_{i1}} \quad (41)$$

$$I_{iA} = \frac{1 - k_{Cu}}{2} I_A \quad (42)$$

Na vinutí A je napětí sítě, které je dáno:

$$\begin{aligned} U = U_A = U_{dA} + U_{iA} &= Z_d I_{dA} + Z_i I_{iA} = Z_d \frac{1 + k_{Cu}}{2} I_A + \\ &+ Z_i \frac{1 - k_{Cu}}{2} I_A = I_{dA} \left(Z_d + \frac{1 - k_{Cu}}{1 + k_{Cu}} Z_i \right) = I_{dA} (Z_d + k_i Z_i) \end{aligned} \quad (43)$$

Přepočtená hodnota napětí pomocného vinutí:

$$U'_B = Z_d I'_{dB} + Z_i I'_{iB} = Z_d I_{dA} a + Z_i I_{iA} a^{-1} \quad (44)$$



$$\begin{aligned}\frac{U'_B}{2} &= Z_d I_{dA} - Z_i I'_{iA} = \left(Z_d \frac{1+k_{Cu}}{2} - Z_i \frac{1-k_{Cu}}{2} \right) I_A = \\ &= \left(Z_d - \frac{1-k_{Cu}}{1+k_{Cu}} Z_i \right) I_{dA} = (Z_d - k_i Z_i) I_{dA}\end{aligned}\quad (45)$$

Fiktivní rozptylová impedance statoru:

$$Z_{v1} = k_{i1} R_A + \frac{k_i}{1,8} R_2 + j(k_{i1} X_{vA} + k_i X_{v2}) \quad (46)$$

Komplexní činitel rozptylu v_1 je dán:

$$v_1 = |v_1| \angle -\gamma_1 = \frac{Z_{v1} + jX_h}{jX_h} \quad (47)$$

Výkon odbrzděný zpětnou složkou, který se ztrácí v mědi rotoru:

$$\Delta'' P_{Cui} \cong R_2 I_{dA}^2 \left(\frac{1-k_{Cu}}{1+k_{Cu}} \right)^2 = R_2 \cdot I_{dA}^2 \cdot k_i^2 \quad [\text{W}; \Omega; \text{A}] \quad (48)$$

Pro moment zpětné složky platí:

$$M_i \cong \frac{R_2}{n_s} I_{dA}^2 k_i^2 \quad [\text{kg}\cdot\text{m}; \Omega; \text{ot/min}; \text{A}] \quad (49)$$

Efektivní hodnota přepočteného proudu:

$$I_2 = \sqrt{I_{d2}^2 + I_{i2}^2} \cong \sqrt{I_{d2}^2 + k_i^2 I_{dA}^2} \quad (50)$$

Efektivní hodnota proudu v tyči rotoru:

$$I_t = \frac{2mN_A \chi_A}{Q_2 \chi_t} I_2 \quad (51)$$

4.2.4 Výpočet kondenzátoru a pomocného vinutí

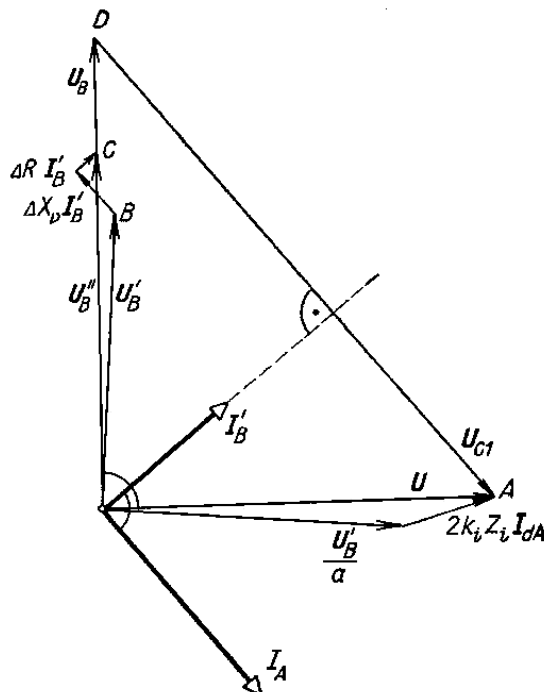
V kapitole 4.4 byly udány vztahy pro výpočet optimálního provozního stavu za předpokladu vztahu (40). Tento výpočet tedy nebyl příliš přesný. Proto ze vztahu (45) vypočítáme napětí U'_B , které by bylo na pomocném vinutí, kdyby toto pomocné vinutí bylo stejné jako hlavní:

$$\frac{U'_B}{a} = I_{dA} (Z_d - k_i Z_i) = I_{dA} (Z_d + k_i Z_i) - 2I_{dA} k_i Z_i = U_A - 2I_{dA} k_i Z_i \quad (52)$$

Proud I'_B vypočítáme z proudu I_A podle vztahu (40).

V praxi bývá pomocné vinutí rozloženo jinak než hlavní vinutí a také má jinou váhu mědi. Proto je nutné k napětí U'_B vektorově přičíst napětí vyvolané proudem I'_B na rozdílech odporu a reaktance ΔR a ΔX_v mezi jednotlivými vinutími. Výsledkem vektorového součtu je napětí U''_B . Napětí U''_B je napětí na pomocném vinutí v případě, že mají obě vinutí stejný počet závitů. Nyní máme všechny potřebné hodnoty k sestrojení vektorového diagramu. Vektorový diagram na

obrázku 18 nám pomocí prodloužení kolmice z bodu A na proud I'_B umožní odečíst skutečnou hodnotu napětí U_B v bodě D. [1]



Obr. 18: Určení počtu závitů pomocného vinutí a potřebné kapacity [1]

Z hodnoty U_B můžeme určit počet závitů pomocného vinutí:

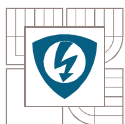
$$N_B = \frac{U_B}{U_B''} \cdot \frac{\chi_A N_A}{\chi_B} \quad (53)$$

Délka A-D = U_{C1} na obrázku 18 určuje velikost kondenzátoru:

$$C_1 = \frac{3180 I_B}{U_{C1}} \quad [\mu F; f=50; A; V] \quad (54)$$

Proud I_B pro vztah (54) získáme:

$$I_B = I_B' \frac{\chi_A N_A}{\chi_B N_B} \quad (53)$$



5 HLAVNÍ ZÁSADY PRO VÝPOČET JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU S POMOCNOU FÁZÍ.

Výpočet jednofázových asynchronních motorů je podstatně složitější než výpočet strojů trojfázových. Postup a jednotlivé výpočty nelze příliš zjednodušit, protože by došlo ke snížení správnosti výsledků. Při výpočtech jsou neocenitelným pomocníkem praktické zkušenosti, protože pouze s těmi lze navrhnout kvalitní motor s patřičnými vlastnostmi. [1]

5.1 Postup při výpočtu jednofázového motoru s pomocným vinutím

Prvním krokem při návrhu je určení hlavních rozměrů železných součástí. Následuje předběžný výpočet parametrů hlavního vinutí a rozměrů rotorové klece. V případě pouze hrubého návrhu, který bude ověřován experimentálně na vyrobených prototypch, vystačíme s těmito základními výpočty. Pokud potřebujeme návrh přesnější, využíváme kruhového diagramu. Další výpočty jsou závislé na tom, jestli bude mít motor pomocné vinutí trvale připojené, nebo nikoliv. V případě pomocného vinutí určeného pouze pro rozběh je situace jednodušší. [1]

5.2 Hlavní rozměry železa

Při výpočtu hlavních rozměrů železa je vhodné vyjít z hlavních rozměrů železa trojfázových motorů, a poté tyto rozměry zvětšit v závislosti na využití stroje γ . Využití stroje γ je dáno použitým zapojením a jeho hodnotu nalezneme v příslušných tabulkách viz příloha A.

Pro zdánlivý příkon trojfázového motoru stejných rozměrů platí:

$$S_3 = \frac{\alpha \cdot P}{\cos \varphi_3 \eta_3} \quad [\text{VA}; \text{W}] \quad (56)$$

a

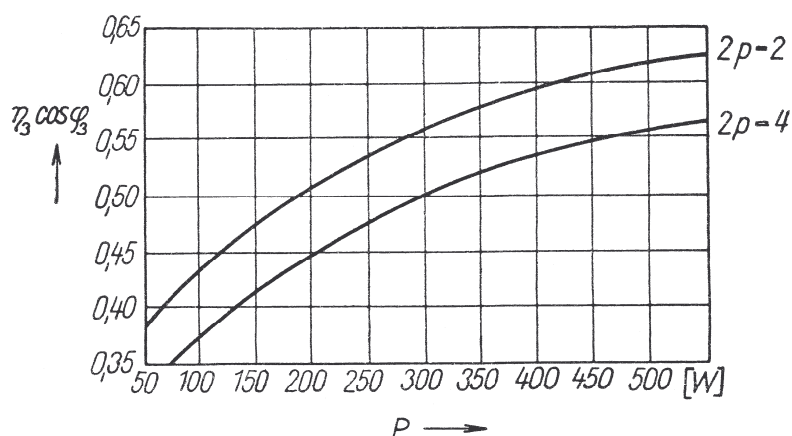
$$\alpha = \frac{1}{\gamma} \quad (57)$$

kde: γ - využití stroje,

$\cos \varphi_3$ - účinník trojfázového motoru o výkonu αP ,

η_3 - účinnost trojfázového motoru o výkonu αP .

Velikost $\cos \varphi_3$ a η_3 lze odhadnout nebo využít diagramu na obrázku 19.



Obr. 19: Součin účinníku a účinnosti trojfázových motorů [1]

Pro hlavní rozměry trojfázového stroje platí:

$$d^2 l = \frac{8,6 \cdot (1 - \varepsilon_1) \cdot S_3 \cdot 10^4}{B_\delta \cdot A \cdot \chi_1 \cdot n_s} \quad [\text{cm; VA; T; A/cm; ot/min}] \quad (58)$$

kde: d - vrtání statoru,
 l - délka statorového železa,
 ε_1 - poměrný úbytek napětí na rozptylové reaktanci a činném odporu statoru pro trojfázový motor,
 S_3 - zdánlivý výkon trojfázového motoru,
 B_δ - maximální indukce ve vzduchové mezeře,
 χ_1 - činitele vinutí statoru pro trojfázový stroj,
 n_s - synchronní otáčky,
 A - proudové zatížení obvodu statoru.

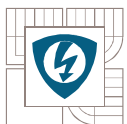
U nejpoužívanějších dvou a čtyřpólových motorů můžeme veličiny $(1 - \varepsilon_1)$ a χ_1 označit jako sobě rovné a zjednodušit vztah pro hlavní rozměry trojfázového stroje na:

$$d^2 l = \frac{8,6 \cdot 10^4}{B_\delta \cdot A} \cdot \frac{S_3}{n_s} \quad [\text{cm; VA; T; A/cm; ot/min}] \quad (59)$$

Část $\frac{8,6 \cdot 10^4}{B_\delta \cdot A}$ lze označit jako C - výkonová (Essonská) konstanta.

Jedná-li se o návrh hlavních rozměrů motoru s trvale připojeným pomocným kondenzátorem a je-li pomocné vinutí plně využito, lze do vztahu (56) dosadit za $\alpha \approx 1,1$.

Pro výpočet Essonské konstanty volíme sycení ve vzduchové mezeře $B_\delta = 0,5$ až $0,6$ T a proudové zatížení statorového obvodu $A = 120$ až 200 A/cm.



U dvoupólových motorů je poměr vnějšího průměru d_1 statorových plechů k vrtání statoru dán:

$$\frac{d}{d_1} = k_s \cong 0,5 \quad (60)$$

a u čtyřpólových:

$$\frac{d}{d_1} = k_s \cong 0,6 \quad (61)$$

Poměr délky železa l k pólové rozteči τ označíme:

$$\lambda = \frac{l}{\tau} \quad (62)$$

kde

$$\tau = \frac{\pi d}{2p} \quad (63)$$

Tento poměr bývá u dvoupólových strojů $\lambda = 0,6$ až $1,0$ a u čtyřpólových $\lambda = 1,0$ až $1,4$.

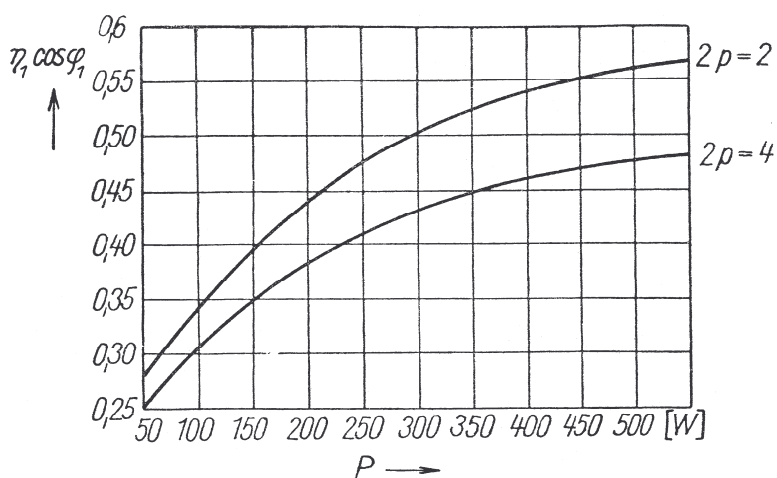
5.3 Předběžný výpočet rozměrů drážek a vinutí

Jedná-li se o motor bez trvale připojeného pomocného vinutí platí pro proud hlavního vinutí:

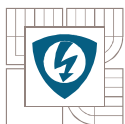
$$I_A = \frac{P_n}{\eta_1 \cdot \cos \varphi_1 \cdot U} \quad [A; W; V] \quad (64)$$

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

Součin η_1 a $\cos \varphi_1$ lze odečíst z následujícího diagramu:



Obr. 20: Součin $\cos \varphi$ a η pro jednofázové motory bez trvale připojeného pomocného vinutí [1]



Proud hlavním vinutím u motoru s trvale zapojeným pomocným vinutím:

$$I_A = \frac{P_n}{\eta_1' \cdot \cos \phi_1' \cdot U \cdot (1 + k_{Cu})} \quad (65)$$

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

Vztah (65) platí pouze pokud je pomocné vinutí za chodu plně využito - je-li kondenzátor vhodně přizpůsoben.

Pro plochu jednoho pólu ve vzduchové mezeře platí:

$$S = \frac{\pi \cdot d \cdot l}{2p} \quad (66)$$

Pro indukční tok platí:

$$\Phi = \frac{l \cdot d \cdot B_\delta \cdot 10^{-4}}{p} \quad [\text{Wb}; \text{T}; \text{cm}] \quad (67)$$

Pro závity hlavního vinutí platí:

$$N_A = \frac{U \cdot (1 - \varepsilon_1)}{4,44 \cdot f \cdot \chi_A \cdot \Phi} \quad [\text{V}; \text{c/s}; \text{Wb}] \quad (68)$$

kde: ε_1 - poměrný úbytek napětí na rozptylové impedanci statoru.

Šířku zubů volíme takovou, aby syčení v zubech bylo $B_z = 1,5$ až $1,7$ T.

Pro šířka zubu platí:

$$b_{z1} = \frac{B_\delta}{B_{z1}} \cdot \frac{\pi \cdot d}{0,9 \cdot Q_1} \quad (69)$$

Plnění železa je v tomto případě uvažováno 0,9 a průřez statorového vodiče hlavního vinutí A volíme v závislosti na proudu I_A tak, aby proudová hustota σ_A byla 6 až $8,5$ A/mm².

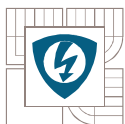
Průřez vodiče hlavního vinutí A pak bude:

$$S_A = \frac{I_A}{\sigma_A} \quad [\text{mm}^2; \text{A}; \text{A/mm}^2] \quad (70)$$

Potřebná plocha drážky bez izolace:

$$S_d = \frac{2 \cdot N_A \cdot S_A'}{Q_{1A} \cdot k_d} \quad [\text{mm}^2] \quad (71)$$

kde: S_A' - průřez vodiče vinutí A s izolací,
 Q_{1A} - počet drážek připadajících na hlavní vinutí,
 k_d - činitel využití plochy drážky bez drážkové izolace .



Činitel plnění k_d udává poměr součtu kruhových průřezů všech izolovaných vodičů k ploše neizolované drážky. Pro malé motory lze tento činitel odečíst z tabulky 2.

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

Tab. 2: Plnění drážek [1]

Někdy lze také činitel plnění vypočítat ze vztahu:

$$k_d' = \frac{2 \cdot N_A \cdot d_A^2}{Q_{1A} \cdot S_d'} \quad (72)$$

kde: N_A - počet závitů hlavního vinutí

d_A' - průměr vodiče s izolací

S_d' - plocha drážky po odečtení drážkové izolace

U malých strojů dosahuje činitel plnění podle (72) až 70 %.

Počet drážek statoru a rotoru musí být vzájemně přizpůsoben. Zpravidla volíme hodnoty viz tabulka 3. V případě špatné volby se nevhodný počet drážek projeví na hluku motoru, zvýšení negativního vlivu třetí harmonické a vlivu drážkové harmonické.

$2p$	Q1	Q2	Poznámka
2; 4	24	30	drážky natočeny
2	18	30	
4; 6; 8	36	48	
2; 4; 8	24	36	
4	32	26	
2	24	18	

Tab. 3: Používané počty drážek [1]

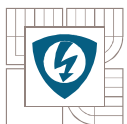
Drážky v rotoru jsou natočené nejvýše o jednu rozteč drážek statorových.

Potřebná šířka statorového jha:

$$d_{1s} - d_{2s} = \frac{\Phi \cdot 10^4}{B_{j1} \cdot l \cdot 0,9} = \frac{B_s}{B_{j1}} \cdot \frac{d}{p \cdot 0,9} \quad [\text{cm}, \text{T}, \text{Wb}] \quad (73)$$

kde:

$$B_{j1} = 1,3 \text{ až } 1,5 \text{ T}$$



Šířka zubu rotoru b_{z2} je dána obdobně jako (69):

$$b_{z2} = \frac{B_{\delta}}{B_{z1}} \cdot \frac{\pi \cdot d}{0,9 \cdot Q_2} \quad (74)$$

kde: B_{z2} - sycení železa zubů rotoru - volíme 1,5 až 1,8 T

Šířka rotorového jha je dána obdobně jako (73):

$$d_{1r} - d_{2r} = \frac{\Phi \cdot 10^4}{B_{j2} \cdot l \cdot 0,9} = \frac{B_{\delta}}{B_{j2}} \cdot \frac{d}{p \cdot 0,9} \quad (75)$$

kde:

$$B_{j2} = 1,3 \text{ až } 1,5 T$$

Volba, nebo výpočet odporu rotoru (průřezu vodivého materiálu rotoru) je téměř samostatnou kapitolou při návrhu základních parametrů drážek a vinutí. Parametry této části rotoru mají vliv na jmenovitý skluz, záběrný moment, moment zvratu a přídatné momenty vyšších harmonických. S rostoucím odporem rotoru se snižuje moment zvratu a roste jmenovitý skluz. Záběrný moment roste s odporem (jen do jisté míry). Požadujeme-li vyšší moment zvratu, volíme větší průřez vodivého materiálu. Návrh může být řízený například požadavkem na jmenovitý skluz, nebo proudovou hustotou. V některých případech postupujeme opačně, přičemž volíme průřez vodivého materiálu rotoru a kontrolujeme souslednou složku proudové hustoty podle:

$$I_{dt} = \frac{s \cdot U \cdot (1 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{2 \cdot \chi_A \cdot N_A \cdot R_t'} \quad [A; V; \Omega] \quad (76)$$

kde: $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$ volíme

Skluz s lze odhadnout, nebo vypočítat z:

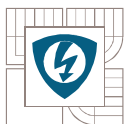
$$R_t' = \frac{(1-s)s \cdot U^2 \cdot (1 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 \cdot Q_2 \cdot \chi_t}{4 \cdot N_A^2 \cdot \chi_A^2 \cdot (P + \Delta'' \cdot P_{Cui} + \Delta P)} \quad [\Omega; V; W] \quad (77)$$

kde: R_t' - odpor jedné tyče klece s přírážkou na spojovací kruh, přepočtený na dvoufázový stator; s - jmenovitý skluz; U - napětí jednofázové sítě; Q_2 - počet tyčí (drážek) rotoru; χ_t - činitel natočené rotorových drážek; $N_A \cdot \chi_A$ - počet efektivních závitů hlavního vinutí; P - mechanický výkon; ΔP - mechanické ztráty; $\Delta'' \cdot P$ - výkon odbrzděný zpětným polem

Proudová hustota sousledné složky je dána:

$$\sigma_{dt} = \frac{I_{dt}}{S_t} \quad (78)$$

a musí být rovna, nebo menší než je uvedeno v tabulce 4.



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

Tab. 4: Sousedná složka proudové hustoty v rotoru [1]

5.4 Výpočet činných odporů

Odpor hlavního i pomocného fázového vinutí na statoru lze vypočítat:

$$R_1 = \frac{N \cdot l_z}{\gamma \cdot S} \quad [\Omega; \text{m}, \text{S m/mm}^2, \text{mm}^2] \quad (79)$$

kde: N – Počet závitů vinutí,
l_z - střední délka závitů [m],
γ - měrná vodivost [S m/mm²],
S – průřez vodiče [mm²].

Odpor jedné tyče rotoru (se zahrnutím odporu spojovacích kruhů):

$$R'_t = R_t + \frac{R_{kr}}{2 \cdot \sin^2 \frac{p \cdot \pi}{Q_2}} \quad [\Omega] \quad (80)$$

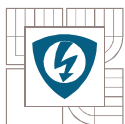
kde odpor samostatné rotorové tyče je dán:

$$R_t = \frac{l_t}{\gamma \cdot S_t} \quad [\Omega; \text{m}, \text{S m/mm}^2, \text{mm}^2] \quad (81)$$

a odpor spojovacího kruhu je:

$$R_{kr} = \frac{\pi \cdot d_{kr}}{\gamma \cdot S_{kr} \cdot Q_2} \quad [\Omega; \text{m}, \text{S m/mm}^2, \text{mm}^2] \quad (82)$$

V (80-82) značí: Q₂ - počet tyčí/drážek v rotoru,
p - počet pólových dvojic,
l_t - délka tyče [m],
S_t - průřez tyče [mm²],
d_{kr} - střední průměr spojovacího kruhu [m].



Měrnou vodivost γ lze použít z následujícího přehledu.

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
		$1 + 0,0015\Delta\vartheta$

Tab. 5: Měrná vodivost γ [1]

Odpor rotorové klece přepočítaný na stator:

$$R_2 = \frac{4m \cdot (N_1 \chi_1)^2}{Q_2 \cdot \chi_t^2} \left[R_t + \frac{R_{kr}}{2 \cdot \sin^2 \frac{p \cdot \pi}{Q_2}} \right] \quad [\Omega] \quad (83)$$

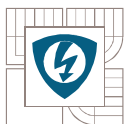
kde: χ_1 - činitel vinutí statoru,
 χ_t - činitel natočení drážky rotoru,
 m - počet fází statorového vinutí, ne které rotový odpor přepočítáváme.

5.5 výpočet činitelů vinutí

Poměr mezi geometrickým a algebraickým součtem indukovaných napětí jednotlivých cívek, které tvoří fázové vinutí, udává činitel vinutí χ . Činitel vinutí χ lze rozložit na činitel rozlohy χ' a činitel zkrácení kroku χ'' .

Činitel rozlohy χ' vypočítáme:

$$\chi' = \frac{\sin q \frac{\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} \quad (84)$$



a činitel zkrácení kroku χ'' :

$$\chi'' = \sin \frac{y}{\tau} \frac{\pi}{2} \quad (85)$$

kde: q – počet drážek na pól a fázi,
 α – úhel mezi sousedními drážkami
v elektrických stupních,
 $\frac{y}{\tau}$ - poměr kroku cívky k pólové rozteči.

Ve většině případů jsou drážky rotorové klece zešíkmeny pro dosažení lepšího průběhu momentové charakteristiky. V případě zešíkmení platí pro činitel vinutí označovaný χ_t :

$$\chi_t = \frac{\sin \frac{\check{s} \cdot \pi}{2 \cdot \tau}}{\frac{\check{s} \cdot \pi}{2 \cdot \tau}} \quad (86)$$

kde: $\check{s}$ – délka zešíkmení,
 τ – pólová rozteč.

5.6 výpočet hlavní reaktance

Tato reaktance je dána magnetickým tokem procházejícím vzduchovou mezerou do rotoru. Celkové magnetické napětí obvodu no pólovou dvojici, které je nutné určit k výpočtu hlavní reaktance, stanovíme z:

$$U_m = U_{m\delta} + U_{mz1} + U_{mz2} + U_{mj1} + U_{mj2} \quad (87)$$

kde: $U_{m\delta}$ - magnetické napětí ve vzduchové mezeře,
 U_{mz1} - magnetické napětí zubů statoru,
 U_{mz2} - magnetické napětí zubu rotoru,
 U_{mj1} - magnetické napětí jha statoru,
 U_{mj2} - magnetické napětí jha rotoru.

Magnetické napětí ve vzduchové mezeře:

$$U_{m\delta} = 1,6 \cdot 10^4 \cdot \delta' \cdot B_\delta \quad [\text{A; cm, T}] \quad (88)$$

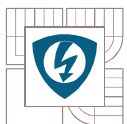
Efektivní vzduchová mezera:

$$\delta' = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2} \cdot \delta \quad (89)$$

kde Carterovy činitele pro stator $k_{\delta 1}$ a rotor $k_{\delta 2}$ stanovíme z

$$k_\delta = \frac{\tau_d}{\tau_d + \delta - \frac{3}{4}b'} \quad (90)$$

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



Magnetizační reaktanci X_h určíme:

$$X_h = 1,6 \cdot m \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N \cdot \chi}{100} \right)^2 \cdot \frac{\tau}{100 \cdot \delta''} \cdot \frac{l}{p} \quad [\Omega; \text{c/s}; \text{cm}] \quad (91)$$

kde: m – počet fázových vinutí,
 f – kmitočet sítě,
 N – počet závitů uvažovaného vinutí,
 χ – činitel vinutí,
 τ – pólová rozteč [cm],
 p – počet pólových dvojic,
 l – ideální délka železa [cm].

Ekvivalentní vzduchová mezera:

$$\delta'' = \delta' \frac{\text{celkové magnetické napěap}}{\text{magnetické napěapvzduchové mezery}} = \delta' \frac{Um}{U_{m\delta}} \quad (92)$$

Při zanedbání vlivu železa je $\delta'' = \delta'$

Hlavní reaktance pro samotnou vzduchovou mezeru:

$$X'_h = X_h \frac{\delta''}{\delta'} \quad (93)$$

5.7 výpočet rozptylové reaktance statoru

Tento výpočet zahrnuje všechny magnetické toky statorového vinutí výjma toku základní harmonické ve vzduchové mezeře. Výpočet rozptylové reaktance je velmi podstatný, protože její velikost určuje záběrný moment, proud nakrátko a přetížitelnost. Výpočet by byl stejný i pro stroje trojfázové.

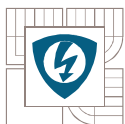
Rozptylovou reaktanci hlavního vinutí označenou indexem A lze vyjádřit součtem rozptylů:

$$X_{rA} = X_{A0} + X_{Ad} + X_{A\check{c}} + X_{Aq} \quad (94)$$

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

Diferenční rozptyl statorového vinutí lze určit podle:

$$X_{A0} = \sigma_{A0} \cdot X'_h \quad (95)$$



Součinitele diferenčního rozptylu jsou uvedeny v tabulce č 6:

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

Tab. 6: Hodnoty $\sigma_o \cdot 100$ pro vinutí s plným krokem [1]

Pro jednofázová vinutí mající z celkového počtu drážek na pól Q_p rovnoměrně ovinuto q drážek platí:

$$\sigma_{A0} = \frac{\pi^2 \cdot p}{\chi_A^2 \cdot Q_1} \cdot \left[-\frac{1}{6}q + \frac{1}{4}Q_p + \frac{1}{6q} \right] - 1 \quad (96)$$

kde: χ_A - činitel uvažovaného vinutí A pro první harmonickou,

p - počet pólových dvojic,

Q_1 - celkový počet drážek statoru,

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

q - počet drážek obsazených uvažovaným vinutím A na pólu.

Diferenční rozptyl lze rozložit na dvě složky. První je rozptyl přes hlavy zubů a druhý rozptyl diferenční pro nekonečný počet drážek. Diferenční rozptyl lze považovat za nulový v případě dokonalého útlumu vyšších harmonických rotoru.

Rozptyl přes hlavy zubů pro jednovrstvá vinutí:

$$X_{Az} = 0,158 \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_A}{100} \right)^2 \cdot \frac{l}{p} \cdot \frac{\lambda_z}{q} \quad [\Omega; \text{c/s, cm}] \quad (97)$$

Kde $\lambda_z = \frac{[\tau_{d_2} - 0,75(b'_1 + b'_2)]^2}{6 \cdot \tau_{d_2} \cdot \delta}$ a b'_1 je otevření drážky statoru ve vzduchové mezeře a b'_2 je

otevření drážky rotoru ve vzduchové mezeře. (98)

Drážkový rozptyl-rozptylovou reaktanci statorové drážky:

$$X_{Ad} = 0,158 \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_A}{100} \right)^2 \cdot \frac{l}{p} \cdot \frac{\lambda_d}{q} \quad [\Omega; \text{c/s, cm}] \quad (99)$$

kde: q - počet drážek na pól obsazených uvažovaným vinutím,

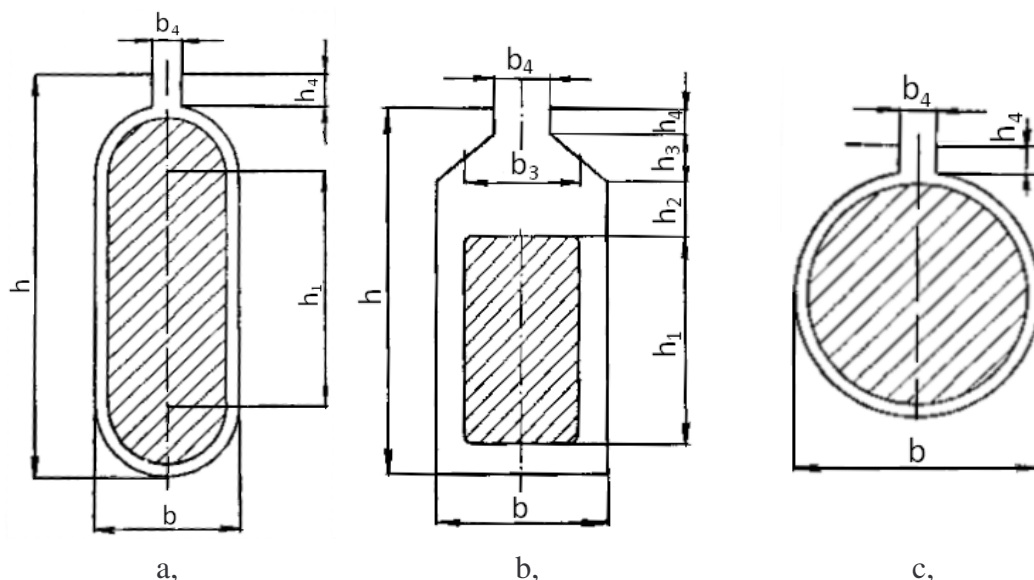
l - délka železa.

Vodivost drážky λ_d pro drážku na obrázku 21 b,:

$$\lambda_d = \frac{h_1}{3b} + \frac{h_2}{b} + \frac{h_3}{b_3} + \frac{h_4}{b_4} \quad (100)$$

a pro drážku na obrázku 21 a,:

$$\lambda_d = \frac{h_1}{3b} + 0,66 + \frac{h_4}{b_4} \quad (101)$$



Obr. 21: a, rozměry oválné drážky; b, rozměry čtyřhranné drážky; c, rozměry kruhové drážky [1]

Rozptyl přes čela vinutí $X_{A\epsilon}$ je dán:

$$X_{A\epsilon} = 0,158 \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_A}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_\epsilon}{p} \cdot \lambda_\epsilon \quad [\Omega; \text{c/s, cm}] \quad (102)$$

kde: l_ϵ - střední délka čela vinutí [cm],

Vodivost přes čela vinutí $\lambda_\epsilon \doteq 0,11$ až $0,16$.

Reaktance rozptylu od natočení rotorových drážek, vypočítaná pro statorové vinutí A:

$$X_{Aq} = \sigma_q \cdot X'_h \quad (103)$$

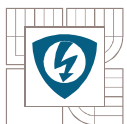
$$\text{kde: } \sigma_q \doteq 1,64 \left(\frac{p}{Q_2} \cdot \frac{\check{s}}{\tau_{d_2}} \right)^2 \quad (104)$$

přičemž: τ_{d_2} - rozteč drážky rotoru,

p - počet pólových dvojic,

Q_2 - počet rotorových drážek.

Činitele rozptylu od natočení drážek σ_q lze zahrnout do diferenčního rozptylu.



5.8 Výpočet rozptylové reaktance rotoru přepočítané na stator

Stejně jako rozptylovou reaktanci hlavního vinutí lze rozptylovou reaktanci rotoru složit z dílčích rozptylových reaktancí.

$$X_{r2} = X_{20} + X_{2d} + X_{2q} \quad (105)$$

kde: X_{20} - diferenční rozptyl klecového rotoru,
 X_{2d} - drážkový rozptyl klecového rotoru přepočtený na statorové vinutí A,
 X_{2q} - reaktance rozptylu od natočení drážek rotoru.

Diferenční rozptyl klecového rotoru:

$$X_{20} = \sigma_{20} \cdot X'_h \quad (106)$$

$$\text{kde pro klecový rotor: } \sigma_{20} \doteq 3,3 \cdot \left(\frac{p}{Q_2} \right)^2 \quad (107)$$

Drážkový rozptyl klecového rotoru přepočtený na statorové vinutí A:

$$X_{2d} = 0,316 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_A \cdot \chi_A}{100 \cdot \chi_t} \right)^2 \cdot l \cdot \frac{m \lambda_d}{Q_2} \quad (108)$$

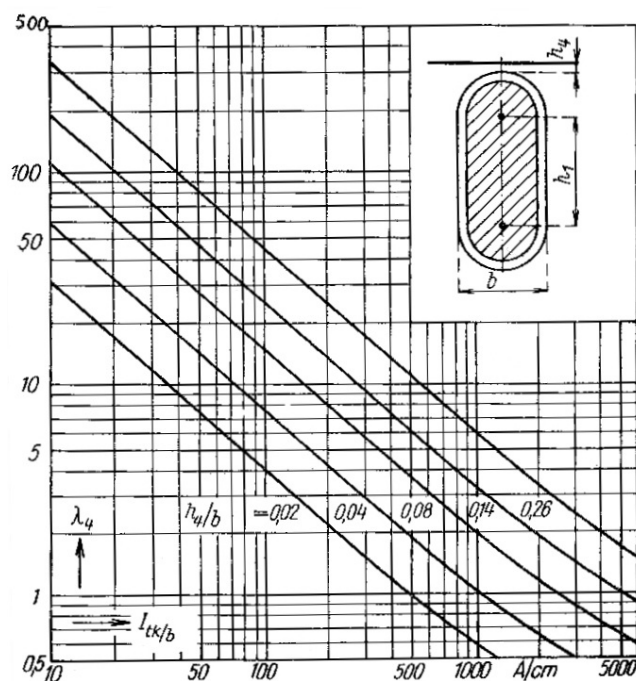
kde: χ_A - činitel statorového vinutí A, na něž přepočítáváme rotorové konstanty,
 χ_t - činitel zešíkmení rotorové drážky,
 l - délka železa,
 m - počet fázových vinutí statoru,
 f - kmitočet proudu ve statoru.

Pro kruhovou drážku na obrázku 21 c, platí vodivost drážky:

$$\lambda_d = 0,66 + \frac{h_4}{b_4} \quad (109)$$

V případě uzavřených drážek lze poměr $\frac{h_4}{b_4}$ nahradit hodnotou λ_4 z následujícího diagramu a doplnit na:

$$\lambda_d = \frac{h_1}{3 \cdot b} + 0,66 + \lambda_4 \quad (110)$$



Obr. 22: Diagram pro výpočet rozptylu v uzavřené drážce [1]

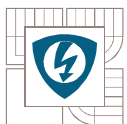
Vodivost λ_4 je velmi proměnlivá v závislosti na proudu I_t .

Reaktance rozptylu od natočení drážek rotoru je dána:

$$X_{2q} = \sigma_q \cdot X'_h \quad (111)$$

Kde činitel rozptylu od natočení drážek σ_q je stejný jako (103), takže je možné napsat:

$$X_{2q} = X_{Aq} \quad (112)$$



6 VÝPOČET JEDNOFÁZOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU S POMOCNOU FÁZÍ

V následující kapitole bude proveden demonstrační příklad výpočtu jednofázového asynchronního motoru s kondenzátorem v pomocné fázi. Bude se jednat o výpočet parametrů motoru, který se v současné době vyrábí ve firmě EMP s.r.o. Slavkov u Brna. Výpočet bude prováděn podle postupu popsáního v práci Dr. Jaroslava Štěpiny, Jednofázové indukční motory. Teoretický výpočet bude srovnán s prakticky vyráběným modelem.

Jmenovité hodnoty navrhovaného motoru:

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

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

$$n = 2850 \text{ n/min}^{-1}$$

$$P_n = 250 \text{ W}$$

6.1 Výpočet hlavních rozměrů železa

Jak je popsáno v [1] bude pro předběžné určení hlavních rozměrů železa výhodné vyjít z hlavních rozměrů železa trojfázového stroje a poté rozměry zvětšit podle využití stroje γ .

V mém případě volím využití stroje $\gamma = 0,5$ viz příloha A tabulka I.

Výpočet hlavních rozměrů železa bude pokračovat jako pro trojfázový motor následujícího výkonu:

$$P_3 = \frac{1}{\gamma} \cdot P_N = \frac{1}{0,5} \cdot 250 = 500 \text{ W}$$

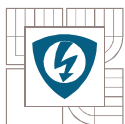
Při tomto způsobu výpočtu jsou určeny hlavní rozměry jednofázového motorku s výkonem P jako rozměry trojfázového s výkonem α -krát větším. α zde značí převrácenou hodnotu využití stroje γ . Hodnota využití stroje γ je závislá na tom, jestli je pomocné vinutí po rozběhu odpojeno nebo nikoliv.

α je tedy:

$$\alpha = \frac{1}{\gamma} = \frac{1}{0,5} = 2$$

Zdánlivý příkon trojfázového motoru se stejnými rozměry je dán:

$$S_3 = \frac{\alpha \cdot P}{\cos \varphi_3 \eta_3} = \frac{2 \cdot 250}{0,62} = 806 \text{ VA}$$



Hodnota $\cos \varphi_3 \eta_3$ se vztahuje k trojfázovému motoru o výkonu αP . Její velikost je odečtena z grafu na obr. č. 19 pro souměrné trojfázové motory, přičemž počet pólových dvojic vyplývá z:

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

Jak bylo popsáno v kapitole 5.2. lze pro hlavní rozměry trojfázového stroje napsat:

$$d^2 l = \frac{8,6 \cdot 10^4}{B_\delta \cdot A} \cdot \frac{S_3}{n_s} = \frac{8,6 \cdot 10^4}{0,57 \cdot 170} \cdot \frac{806}{3000} = 238,4 \text{ cm}^3$$

kde volím $B_\delta = 0,57 \text{ T}$ a $A = 170 \text{ A/cm}$

Essonská konstanta C bude mít tedy hodnotu:

$$C = \frac{8,6 \cdot 10^4}{B_\delta \cdot A} = \frac{8,6 \cdot 10^4}{0,57 \cdot 170} = 887,51$$

Pro dvoupólového motoru je poměr vnějšího průměru d_1 statorových plechů k vrtání statoru:

$$\frac{d}{d_1} = k_s \cong 0,5$$

Při volbě $d=l$ vyjde d :

$$d = \sqrt[3]{238,4} = 6,2 \text{ cm} \quad \text{zaokrouhlím na } 6 \text{ cm}$$

Poměr délky železa l k pólové rozteči τ :

$$\lambda = \frac{l}{\tau} = \frac{6}{9,42} = 0,637$$

$$\text{kde } \tau = \frac{\pi d}{2p} = \frac{\pi \cdot 6}{2 \cdot 1} = 9,42$$

Poměr délky železa l k pólové rozteči τ odpovídá běžným hodnotám 0,6 až 1,0 pro dvoupólový stroj.

6.2 Předběžný výpočet rozměrů drážek a vinutí

6.2.1 Drážky a vinutí statoru

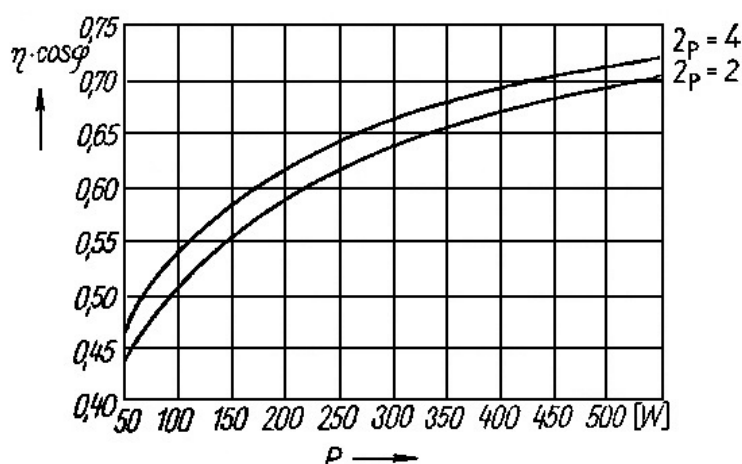
Proud hlavním vinutím u motoru s trvale zapojeným pomocným vinutím je dán,

$$I_A = \frac{P_n}{\eta_1' \cdot \cos \varphi_1' \cdot U \cdot (1 + k_{Cu})} = \frac{250}{0,62 \cdot 230 \cdot (1 + 0,5)} = 1,17 \text{ A}$$

kde: k_{Cu} - poměr drážkového prostoru obou vinutí,
 k_{Cu} volím 0,5.

Přičemž je uvažována kompenzace kondensátorem, který je trvale zapojen do pomocného vinutí. Hodnoty $\eta_1' \cdot \cos \phi_1'$ u tohoto zapojení dosahují i vyšších hodnot než u strojů třífázových. Toto je způsobeno vlivem velkého účinníku kompenzace kondenzátorem.

Součin účinnosti a účinníku $\eta_1' \cdot \cos \phi_1'$ nemůžeme odečíst z grafu na obr. 20, ale musíme použít následující pro kondenzátorové motory. Odečtena je hodnota 0,62, protože již uvažujeme výkon jednofázového motoru 250 W ($2p = 2$).



Obr. 23: Součin účinnosti a účinníku na svorkách sítě pro kondenzátorové motory [1]

Průřez vodiče hlavního vinutí:

$$S_A = \frac{I_A}{\sigma_A} = \frac{1,17}{7,5} = 0,156 \text{ mm}^2$$

Přičemž proudová hustota v hlavním vinutí byla volena $\sigma_A = 7,5 \text{ A/mm}^2$.

Průměr vodiče hlavního vinutí:

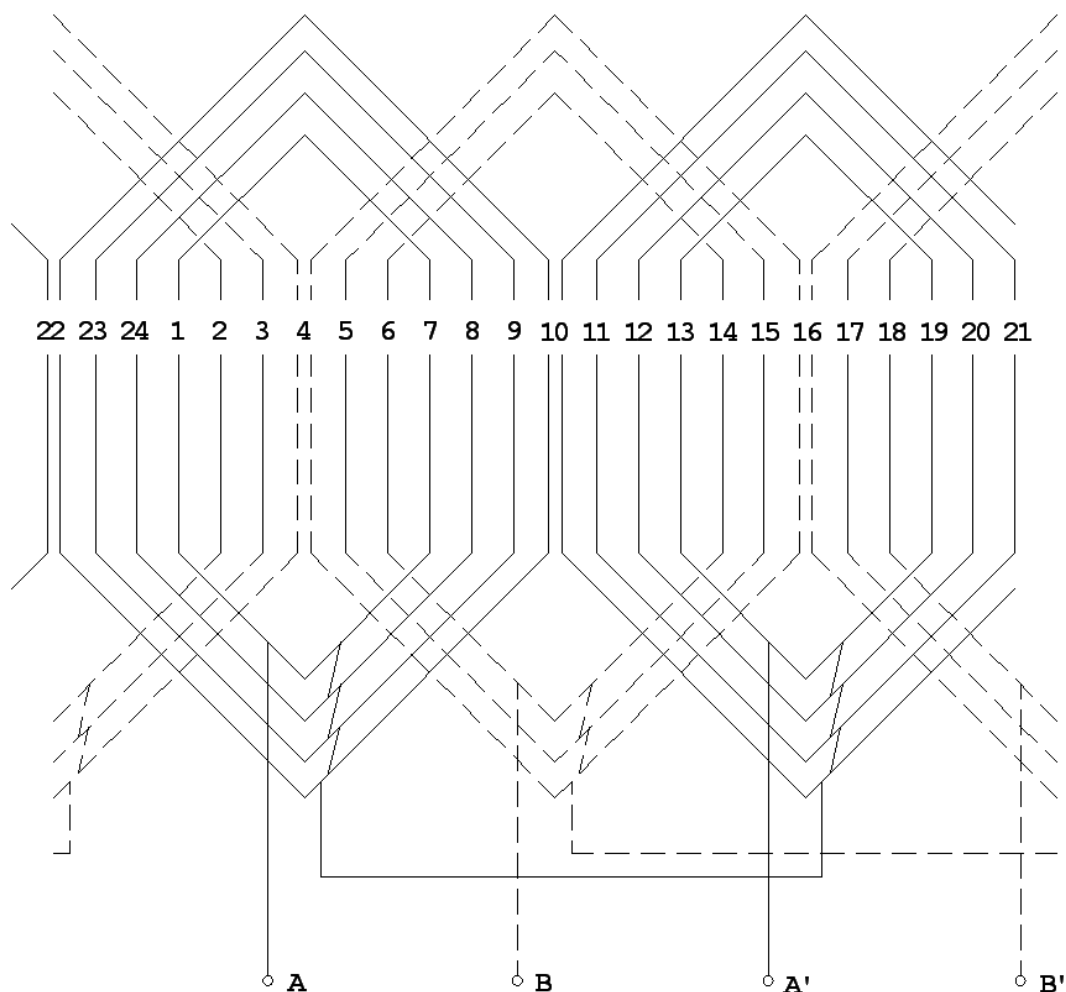
$$d_A = 2 \cdot \sqrt{\frac{S_A}{\pi}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0,156}{\pi}} = 0,446 \text{ mm}$$

Z vypočteného průměru volím vyráběný Cu vodič o průměru $d_A = 0,45 \text{ mm}$, který má s izolací průměr $d_A' = 0,48 \text{ mm}$.

Indukční tok vycházející ze zvolené indukce ve vzduchové mezeře:

$$\Phi = \frac{l \cdot d \cdot B_\delta \cdot 10^{-4}}{p} = \frac{6 \cdot 6 \cdot 0,57 \cdot 10^{-4}}{1} = 2,052 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$$

Počet drážek statoru volím podle tabulky 3 na $Q_1 = 24$ drážek. Z počtu drážek lze také navrhnout schematicky vinutí statoru. Návrh vychází z práce J. Štěpiny [1] ve které je pro pomocné vinutí ponecháno více místa než 1/3 drážek. Tvar pomocného pole bude příznivější (na úkor pole hlavního vinutí).



Obr. 24: Schematické uspořádání vinutí ve statoru. Vychází z návrhů v [1]

Činitel vinutí:

$$\chi_A = \chi'_A = \frac{\sin q \frac{\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin 7 \frac{15^\circ}{2}}{7 \sin \frac{15^\circ}{2}} = 0,87$$

Závity hlavního vinutí:

$$N_A = \frac{U \cdot (1 - \varepsilon_1)}{4,44 \cdot f \cdot \chi_A \cdot \Phi} = \frac{230 \cdot (1 - 0,15)}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,87 \cdot 2,052 \cdot 10^{-3}} = 493 \quad (\text{zvoleno } 497)$$

kde: ε_1 - poměrný úbytek napětí na rozptylové impedanci statoru - volím $\varepsilon_1 = 0,15$

Tento počet závitů hlavního vinutí zaokrouhlím na 497 tak, aby do každé drážky hlavního vinutí vešlo 71 vodičů.



Plocha drážky bez izolace je podle (71):

$$S_d = \frac{2 \cdot N_A \cdot S'_A}{Q_{1A} \cdot k_d} = \frac{2 \cdot 497 \cdot 0,181}{14 \cdot 0,41} = 31,34 \text{ mm}^2$$

Kde průřez vodiče hlavního vinutí s izolací S'_A odpovídá izolovanému vodiči $d'_A = 0,48 \text{ mm}$, tedy $S'_A = 0,181 \text{ mm}^2$. Počet drážek obsazených hlavním vinutím je podle schematického uspořádání na obrázku č. 24 roven $Q_{1A} = 14$. A činitel využití plochy drážky bez drážkové izolace je podle tabulky č. 2 volen $k_d = 0,41$.

Šířka zubu statoru bude podle (69):

$$b_{z1} = \frac{B_\delta}{B_{z1}} \cdot \frac{\pi \cdot d}{0,9 \cdot Q_1} = \frac{0,57}{1,55} \cdot \frac{\pi \cdot 6}{0,9 \cdot 24} = 0,321 \text{ cm}$$

Kde volím syčení v zubech $B_{z1} = 1,55 \text{ T}$.

Potřebná šířka statorového jha je podle (73):

$$d_{1s} - d_{2s} = \frac{\Phi \cdot 10^4}{B_{j1} \cdot l \cdot 0,9} = \frac{B_\delta}{B_{j1}} \cdot \frac{d}{p \cdot 0,9} = \frac{0,57}{1,4} \cdot \frac{6}{1 \cdot 0,9} = 2,71 \text{ cm}$$

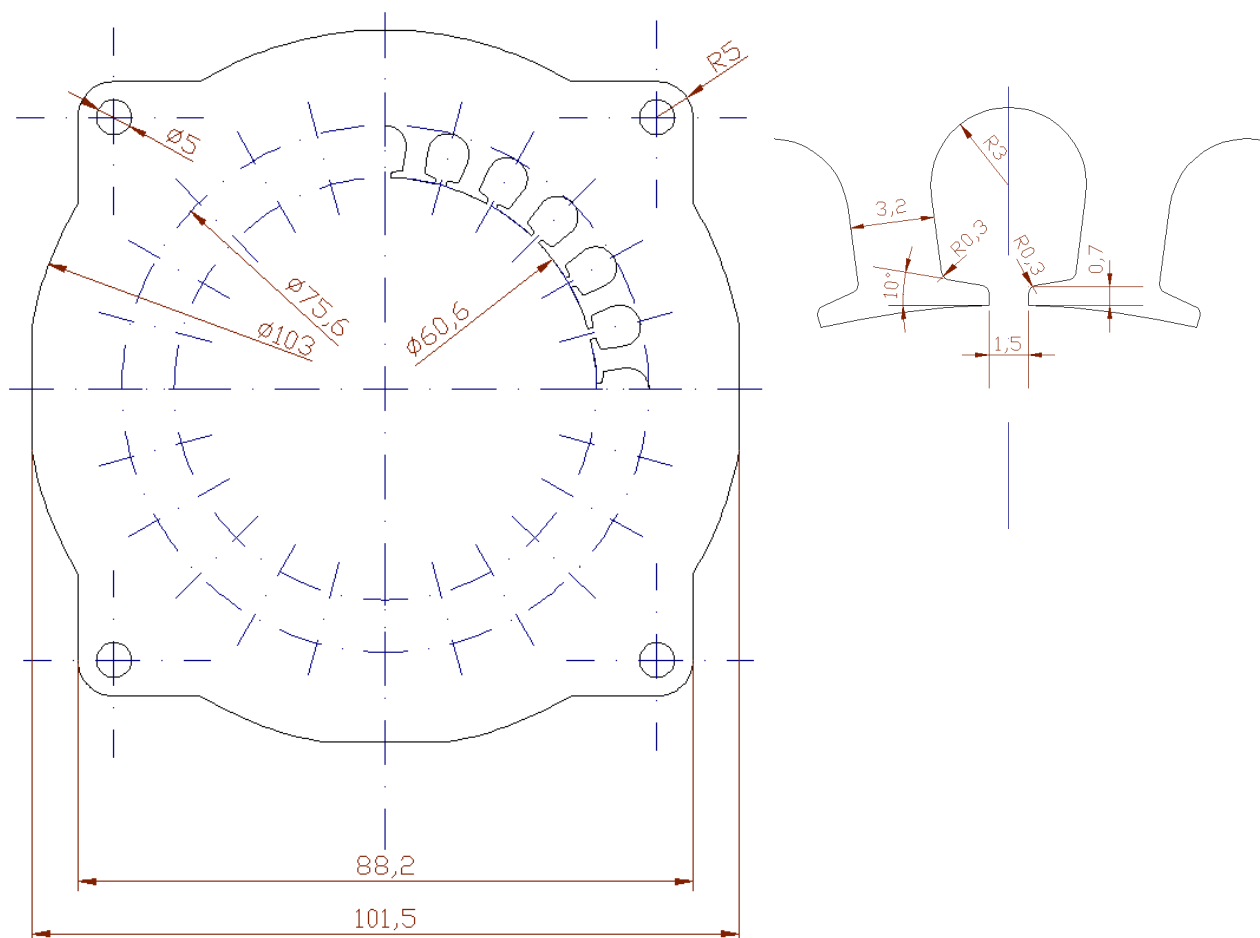
Ke volím hodnotu syčení statorového jha B_{j1} z rozmezí 1,3 až 1,5 T na $B_{j1} = 1,4$.

d_1 bude mít tedy hodnotu:

$$d_{1s} = d_{2s} + (d_{1s} - d_{2s}) = 7,56 + 2,71 = 10,27 \text{ cm} \rightarrow \text{upravím } d_{1s} = 10,3 \text{ cm}$$

Kde hodnota d_{2s} pochází z návrhu rozměrů drážky o ploše $S_d = 31,34 \text{ mm}^2$ a vychází $d_{2s} = 7,56 \text{ cm}$.

Celkové rozměry statorových plechů s návrhem drážek pro vypočítané statorové vinutí je naznačeno na následujícím obrázku.



Obr. 25: Tvar navrhnutých plechů statoru

6.2.2 Drážky a vinutí rotoru

Vzduchovou mezera byla zvolena $\delta = 0,3$ mm z čehož plyne průměr vrtání statoru 60,6 mm. Počet drážek statoru byl zvolen podle tabulky č. 3 na $Q_2 = 30$.

Drážky budou natočeny o jednu rozteč statorových drážek, což tvoří 7,9 mm na obvodu rotoru.

Šířka zubu rotoru v nejužším místě b_{z2} bude podle (74):

$$b_{z2} = \frac{B_{\delta}}{B_{z1}} \cdot \frac{\pi \cdot d}{0,9 \cdot Q_2} = \frac{0,57}{1,7} \cdot \frac{\pi \cdot 6}{0,9 \cdot 30} = 0,23 \text{ cm}$$

Kde nyní uvažuji vyšší sycení v zubech $B_{z1} = 1,7$ T.

Odpor jedné tyče klece s přírážkou na spojovací kruh, přepočtený na dvoufázový stator vychází z (77):



$$R'_t = \frac{(1-s) \cdot s \cdot U^2 \cdot (1-\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 \cdot Q_2 \cdot \chi_t}{4 \cdot N_A^2 \cdot \chi_A^2 \cdot (P + \Delta'' P_{Cui} + \Delta P)} =$$
$$\frac{(1-0,05) \cdot 0,05 \cdot 230^2 \cdot (1-0,15-0,1)^2 \cdot 30 \cdot 0,997}{4 \cdot 497^2 \cdot 0,87^2 \cdot (250+10+10)} = 209 \cdot 10^{-6} \Omega$$

Kde bylo zvoleno: skluz $s = 5 \%$,

poměrný úbytek na rozptylové impedanci statoru $\varepsilon_1 = 0,15$,

poměrný úbytek napětí statoru na zpětné vnitřní impedanci $\varepsilon_2 = 0,1$,

mechanické ztráty $\Delta P = 10 \text{ W}$,

výkon odbrzděný zpětným polem $\Delta'' P_{Cui} = 10 \text{ W}$,

a činitel vinutí byl vypočten podle (86):

$$\chi_t = \frac{\sin \frac{\check{s} \cdot \pi}{2 \cdot \tau}}{\frac{\check{s} \cdot \pi}{2 \cdot \tau}} = \frac{\sin \frac{0,79 \cdot \pi}{2 \cdot 9,63}}{\frac{0,79 \cdot \pi}{2 \cdot 9,63}} = 0,997$$

Sousledná složka proudu rotoru:

$$I_{dt} = \frac{s \cdot U \cdot (1-\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot \chi_t}{2 \cdot N_A \cdot \chi_A \cdot R'_t} = \frac{0,05 \cdot 230 \cdot (1-0,15-0,1) \cdot 0,997}{2 \cdot 497 \cdot 0,87 \cdot 209 \cdot 10^{-6}} = 47,58 \text{ A}$$

Průřez rotorové tyče

$$S_t = \frac{I_{dt}}{\sigma_{dt}} = \frac{47,58}{6} = 7,93 \text{ mm}^2 \rightarrow \text{volím } S_t = 9 \text{ mm}^2$$

Kde byla podle tabulky č. 4 volena proudová hustota pro měděný rotor $\sigma_{dt} = 6 \text{ A/mm}^2$.

Sousledná složka proudu v rotorovém kruhu:

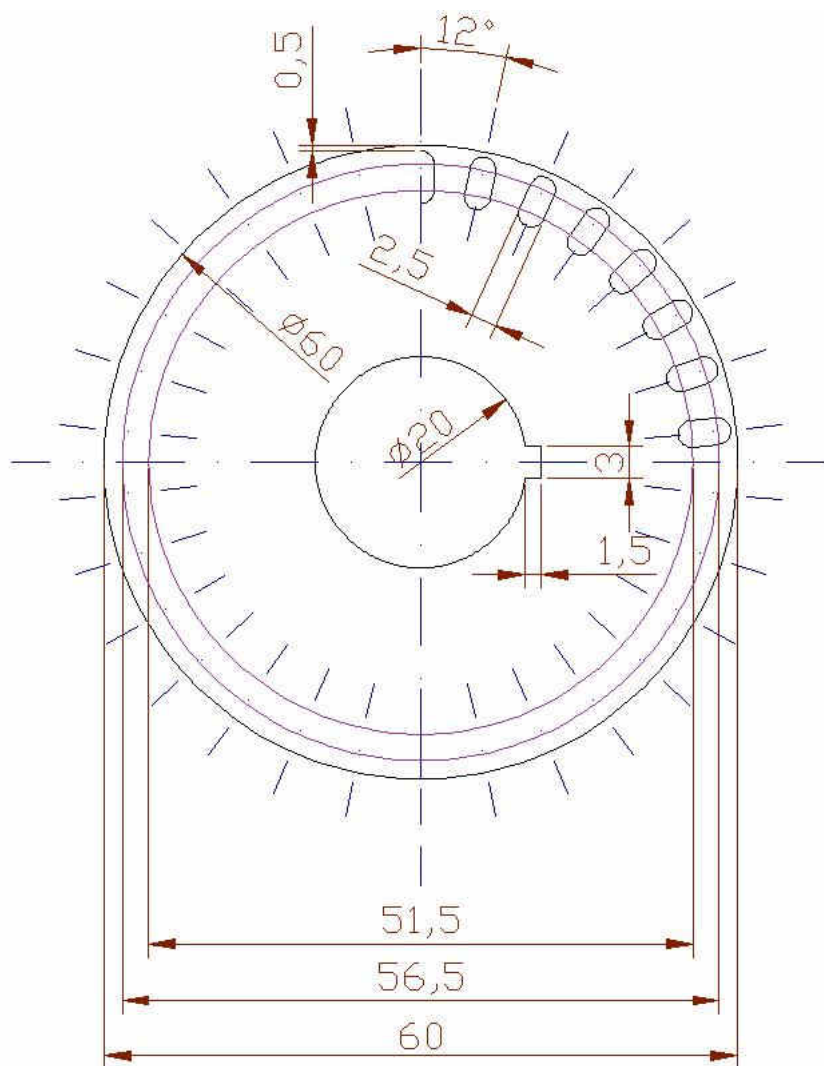
$$I_{dkr} = \frac{I_{dt}}{2 \cdot \sin \frac{p \cdot \pi}{Q_2}} = \frac{47,58}{2 \cdot \sin \frac{1 \cdot \pi}{30}} = 227,6 \text{ A}$$

Kroužky rotoru volím vyráběné o průřezu 35 mm^2 .

Proudová hustota sousledné složky:

$$\sigma_{dkr} = \frac{I_{dkr}}{S_{dkr}} = \frac{227,6}{35} = 6,5 \text{ A/mm}^2$$

Celkové rozměry rotorových plechů s návrhem drážek pro vypočítaný rotor jsou naznačeny na následujícím obrázku.



Obr. 26: Tvar navrhnutých plechů rotoru

6.3 Určení parametrů pomocného vinutí

Volím poměr efektivních závitů pomocného a hlavního vinutí k_1 z rozmezí 0,8 až 1,2, platné pro pomocné vinutí s kapacitním rozběhem, na hodnotu $k_1 = 0,9$.

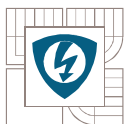
Činitel pomocného vinutí:

$$\chi_B = \chi'_B = \frac{\sin q \frac{\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin 5 \frac{15^\circ}{2}}{5 \sin \frac{15^\circ}{2}} = 0,933$$

Ze vztahu pro poměr efektivních závitů pomocného a hlavního vinutí $k_1 = \frac{\chi_B \cdot N_B}{\chi_A \cdot N_A}$ plyne

počet závitů pomocného vinutí:

$$N_B = \frac{k_1 \cdot \chi_A \cdot N_A}{\chi_B} = \frac{0,9 \cdot 0,87 \cdot 497}{0,933} = 417 \text{ (volím 425)}$$



Tento počet závitů pomocného vinutí zaokrouhlím na 725 tak, aby do každé drážky pomocného vinutí vešlo 85 vodičů.

Plnění drážky statoru volím podle tabulky č. 2 na hodnotu $k_d = 0,41$, z čehož lze dopočítat podle (71) průřez vodiče pomocného vinutí B s izolací:

$$S'_B = \frac{k_d \cdot Q_{1B} \cdot S_d}{2N_B} = \frac{0,41 \cdot 10 \cdot 31,34}{2 \cdot 425} = 0,151 \text{ mm}^2$$

Průměr izolovaného vodiče pomocného vinutí:

$$d'_B = 2 \cdot \sqrt{\frac{S'_B}{\pi}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0,151}{\pi}} = 0,438 \text{ mm}$$

Z vypočteného průměru izolovaného vodiče volím vyráběný Cu vodič o stejném průměru jako vodič hlavního vinutí $d_B = 0,45 \text{ mm}$, který má s izolací průměr $d'_B = 0,48 \text{ mm}$.

6.4 Výpočet kapacity rozběhového kondenzátoru

Výpočet kapacity rozběhového kondenzátoru bude proveden pomocí několika uvedených empirických vzorců z kapitoly 4.1. Výsledky budou porovnány a stanovena vhodná velikost kapacity.

Empirické vzorce pro určení velikosti rozběhového kondenzátoru:

$$C = 68 \cdot P = 68 \cdot 0,25 = 17 \mu\text{F}$$

kde: C - kapacita kondenzátoru (μF),
P - výkon jednofázového motoru (kW).

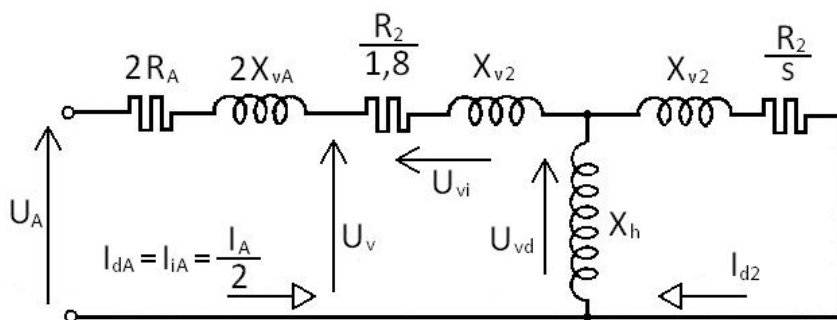
$$C = 0,29 \cdot k \cdot P = 0,29 \cdot 68 \cdot 0,5 = 10 \mu\text{F}$$

kde: C - kapacita kondenzátoru (μF),
k - konstanta závislá na napětí sítě,
P - výkon trojfázového motoru (kW).

Z výpočtů je patrné, že výsledky empirických vzorců se velmi nerozcházejí. Na základě přehledové tabulky č. 1 a výsledků používaných empirických vzorců volím z vyráběné řady rozběhový kondenzátor o kapacitě **15 μF** .

6.5 Kontrola návrhu motoru

Kapitola se bude zabývat výpočtem jednotlivých hodnot náhradního schématu. Z těchto hodnot je dále možné určit například moment zvratu, nebo záběrný moment.



Obr. 27: Zjednodušené náhradní schéma pro souslednou složku [1]

6.5.1 Výpočet činného odporu hlavního vinutí

Výpočet činného odporu hlavního vinutí:

$$R_A = \frac{N_A \cdot l_z}{\gamma \cdot S_A} = \frac{497 \cdot 0,3}{47 \cdot 0,156} = 20,34 \Omega$$

Příčemž měrná vodivost byla zvolena podle tabulky č. 5 na $\gamma = 47 \text{ Sm/mm}^2$.

Délka závitu l_z byla odhadnuta z rozměrů statoru na 30 cm.

Činný odpor rotoru (pro jednu tyč):

$$R_t = \frac{l_t}{\gamma \cdot S_t} = \frac{0,07}{47 \cdot 9} = 166 \cdot 10^{-6} \Omega$$

Příčemž délka tyče byla zvolena 7 cm.

Činný odpor rotoru (pro kruh):

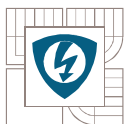
$$R_{kr} = \frac{\pi \cdot d_{kr}}{\gamma \cdot S_{kr} \cdot Q_2} = \frac{\pi \cdot 0,045}{47 \cdot 35 \cdot 30} = 2,86 \cdot 10^{-6} \Omega$$

Kde d_{kr} je střední průměr kroužku rotoru.

Odpor rotorové tyče s přírážkou na kruh je dán:

$$R'_t = R_t + \frac{R_{kr}}{2 \cdot \sin^2 \frac{p \cdot \pi}{Q_2}} = 166 \cdot 10^{-6} + \frac{2,86 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot \sin^2 \frac{1 \cdot \pi}{30}} = 296 \cdot 10^{-6} \Omega$$

Vypočtený odpor rotorové tyče s přírážkou na kruh vyšel $296 \cdot 10^{-6} \Omega$, což je lehce vyšší než bylo spočítaných $209 \cdot 10^{-6} \Omega$ při návrhu. Z tohoto výpočtu plyne, že skluz bude lehce vyšší než uvažovaných 5 %.



Odpor rotoru přepočtený na stator podle (83):

$$R_2 = \frac{4 \cdot m \cdot (N_A \chi_A)^2}{Q_2 \cdot \chi_t^2} \cdot R'_t = \frac{4 \cdot 2 \cdot (497 \cdot 0,87)^2}{30 \cdot 0,997^2} \cdot 296 \cdot 10^{-6} = 38,2 \Omega$$

6.5.2 Výpočet hlavní reaktance statoru

Pro výpočet hlavní reaktance statoru je nutné určit nejprve ekvivalentní vzduchovou mezeru δ'' .

Carterův činitel pro stator vypočítáme podle (91):

$$k_{\delta 1} = \frac{\tau_{d1}}{\tau_{d1} + \delta - \frac{3}{4} b'_1} = \frac{7,93}{7,93 + 0,3 - \frac{3}{4} 1,7} = 1,14$$

Kde drážková rozteč statoru τ_{d1} vychází pro stator o průměru 60,6 mm a počtem drážek 24 na $\tau_{d1} = 7,93$ a vzduchová mezera $\delta = 0,3$ mm. Otevření drážky statoru uvažují $b'_1 = 1,7$.

Podle (89) vychází efektivní vzduchová mezera:

$\delta' = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2} \cdot \delta = 1,14 \cdot 1 \cdot 0,3 = 0,342 \text{ mm}$, což odpovídá navrhnuté mezeře 0,3 mm.

Magnetické napětí na vzduchové mezeře pro pólovou dvojici bude podle (88):

$$U_{m\delta} = 1,6 \cdot 10^4 \cdot \delta' \cdot B_\delta = 1,6 \cdot 10^4 \cdot 0,0342 \cdot 0,57 = 312 \text{ A}$$

Přičemž indukce ve vzduchové mezeře byla zvolena $B_\delta = 0,57$ T.

Pro zvolenou indukci $B_{z1} = 1,55$ T odpovídá u zvoleného materiálu intenzita magnetického pole $H_{z1} = 25$ A/cm.

Magnetické napětí na zubech statoru:

$$U_{mz1} = H_{z1} \cdot l_z = 25 \cdot 1,2 = 30 \text{ A}$$

Kde l_z je nyní délka zubu statoru na pólovou dvojici.

Magnetické napětí jha statoru pro indukci $B_{j1} = 1,42$ T a odpovídající indukci magnetického pole $H_{j1} = 10,5$ A/cm:

$$U_{mj1} = H_{j1} \cdot l_{j1} = 10,5 \cdot 10 = 105 \text{ A}$$

Kde délka indukční čáry vychází z návrhu na obrázku č. 25.

Stejným způsobem bylo určeno magnetická napětí zubu rotoru $U_{mz2} = 9 \text{ A}$ a magnetické napětí jha rotoru $U_{mj2} = 42 \text{ A}$.

Celkové magnetické napětí na obvodu je podle (87):

$$U_m = U_{m\delta} + U_{mz1} + U_{mz2} + U_{mj1} + U_{mj2} = 312 + 30 + 9 + 105 + 42 = 498 \text{ A}$$

Ekvivalentní vzduchová mezera vychází podle (92):

$$\delta'' = \delta' \cdot \frac{U_m}{U_{m\delta}} = 0,0342 \cdot \frac{498}{312} = 0,0546 \text{ mm}$$



Hlavní reaktance bude podle (91):

$$X_h = 1,6 \cdot m \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_A \chi_A}{100} \right)^2 \cdot \frac{\tau}{100 \cdot \delta''} \cdot \frac{l}{p} = 1,6 \cdot 2 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{497 \cdot 0,87}{100} \right)^2 \cdot \frac{9,42}{100 \cdot 0,0546} \cdot \frac{7}{1} = 361,3 \Omega$$

Kde ideální délku železa l odpovídá zvolené délce tyče 7 cm.

Hlavní reaktance pro samotnou vzduchovou mezeru bude podle (93):

$$X'_h = X_h \frac{\delta''}{\delta'} = 361,3 \cdot \frac{0,0546}{0,0342} = 576,8 \Omega$$

6.5.3 Výpočet rozptylové reaktance statoru

Součinitel diferenčního rozptylu bude podle (96):

$$\sigma_{A0} = \frac{\pi^2 \cdot p}{\chi_A^2 \cdot Q_1} \cdot \left[-\frac{1}{6}q + \frac{1}{4}Q_p + \frac{1}{6q} \right] - 1 = \frac{\pi^2 \cdot 1}{0,87^2 \cdot 24} \cdot \left[-\frac{1}{6}7 + \frac{1}{4}12 + \frac{1}{6 \cdot 7} \right] - 1 = 0,009 \Rightarrow 0,9\%$$

Kde činitel uvažovaného vinutí A pro první harmonickou $\chi_A = 0,87$, počet pólových dvojic $p = 1$, celkový počet drážek statoru $Q_1 = 24$, počet drážek na pól $Q_p = \frac{Q_1}{2p} = 12$ a počet drážek obsazených uvažovaným vinutím A na pólu $q = 7$. Tato vypočtená hodnota $\sigma_{A0} = 0,9 \%$ odpovídá tabulkové hodnotě uvedené v tab. č. 6, udávající $\sigma_0 \cdot 100 = 0,88$.

Diferenční rozptyl statorového vinutí vypočteme podle (95):

$$X_{A0} = \sigma_{A0} \cdot X'_h = 0,009 \cdot 576,8 = 5,19 \Omega$$

Rozptylová reaktance přes hlavy zubů jako složku diferenčního rozptylu vychází z (97):

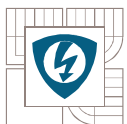
$$X_z = 0,158 \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_A}{100} \right)^2 \cdot \frac{l}{p} \cdot \frac{\lambda_z}{q} = 0,158 \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{497}{100} \right)^2 \cdot \frac{7}{1} \cdot \frac{2,35}{7} = 4,59 \Omega$$

$$\text{Kde vodivost } \lambda_{z1} = \frac{[\tau_{d2} - 0,75(b'_1 + b'_2)]^2}{6 \cdot \tau_{d2} \cdot \delta} = \frac{[0,628 - 0,75(0,15 + 0)]^2}{6 \cdot 0,628 \cdot 0,03} = 2,35 \text{ a otevření drážky}$$

statoru ve vzduchové mezeře je podle návrhu na obr. č. 25 $b'_1 = 0,15$ cm, otevření drážky rotoru ve vzduchové mezeře $b'_2 = 0$ cm, protože rotorové drážky jsou zvoleny uzavřené a rozteč drážky rotoru vychází při obvodu rotoru $o_r = 188,5$ mm na $\tau_{d2} = \frac{o_r}{30} = \frac{188,5}{30} = 6,28 \text{ mm}$.

Rozptyl od natočení drážek rotoru vychází z (103):

$$X_{Aq} = \sigma_q \cdot X'_h = 0,002264 \cdot 576,8 = 1,31 \Omega$$



Kde činitele rozptylu od natočení drážek

$$\sigma_q \doteq 1,64 \left(\frac{p}{Q_2} \cdot \frac{\check{s}}{\tau_{d_2}} \right)^2 = 1,64 \left(\frac{1}{30} \cdot \frac{7}{6,28} \right)^2 = 0,002264$$

Přičemž délku zešíkmení drážek volím $\check{s} = 7 \text{ mm}$ a rozteč drážky rotoru jak bylo řečeno dříve $\tau_{d_2} = 6,28 \text{ mm}$.

Vodivost statorové drážky vypočtu podle (101):

$$\lambda_d = \frac{h_1}{3b} + 0,66 + \frac{h_4}{b_4} = \frac{0,3}{3 \cdot 0,6} + 0,66 + \frac{0,07}{0,15} = 1,29$$

Kde rozměry h_1, h_4, b_4 vychází z návrhu statorové drážky na obrázku 25.

Rozptylovou reaktanci statorové drážky určím z (99):

$$X_{Ad} = 0,158 \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_A}{100} \right)^2 \cdot \frac{l}{p} \cdot \frac{\lambda_d}{q} = 0,158 \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{497}{100} \right)^2 \cdot \frac{7}{1} \cdot \frac{1,29}{7} = 2,52 \Omega$$

Rozptylová reaktance přes čela vinutí bude podle (102):

$$X_{Ac} = 0,158 \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_A}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_c}{p} \cdot \lambda_c = 0,158 \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{497}{100} \right)^2 \cdot \frac{10,9}{1} \cdot 0,15 = 3,19 \Omega$$

Kde střední délka čela vinutí $l_c = 10,9 \text{ cm}$ vychází z návrhu uspořádání statorového vinutí na obrázku č. 24 a návrhu statorového plechu na obrázku č. 25 a vodivost přes čela vinutí volím z intervalu 0,11 až 0,16 na hodnotu $\lambda_c = 0,15$.

Celková rozptylová reaktance statoru bude tedy podle (94) dána součtem dílčích rozptylových reaktancí:

$$X_{rA} = X_{A0} + X_{Ad} + X_{Ac} + X_{Aq} = 5,19 + 2,52 + 3,19 + 1,31 = 12,21 \Omega$$

6.5.4 Výpočet rozptylové reaktance rotoru přepočtené na stator

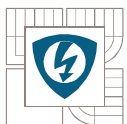
Diferenční rozptyl rotoru bude podle (106):

$$X_{20} = \sigma_{20} \cdot X'_h = 0,00367 \cdot 576,8 = 2,12 \Omega$$

$$\text{Kde pro klecový rotor } \sigma_{20} \doteq 3,3 \cdot \left(\frac{p}{Q_2} \right)^2 = 3,3 \cdot \left(\frac{1}{30} \right)^2 = 0,00367$$

Vodivost uzavřené drážky rotoru vychází z diagramu na obrázku č. 22 v závislosti na navržených rozměrech rotoru na obrázku č. 26:

$$\frac{h_4}{b} = \frac{0,05}{0,25} = 0,2$$



Při chodu nakrátko můžou být proudy v rotorové tyči velmi vysoké. Proto volím efektivní proudovou hustotu $\sigma_{tk} = 25 A/mm^2$. Proud tyče pak bude:

$$I_{tk} = S_t \sigma_{tk} = 9 \cdot 25 = 225 A$$

pro graf na obrázku č. 22 platí:

$$\frac{I_{tk}}{b} = \frac{225}{0,25} = 900 A/cm$$

Pro výsledné hodnoty $\frac{h_4}{b} = 0,2$ a $\frac{I_{tk}}{b} = 900 A/cm$ odpovídá podle grafu na obrázku č. 22:

$$\lambda_4 = 5$$

Vodivost rotorové drážky je pak dána pro uzavřenou drážku podle (110):

$$\lambda_d = \frac{h_1}{3 \cdot b} + 0,66 + \lambda_4 = \frac{0,25}{3 \cdot 0,25} + 0,66 + 5 = 5,99$$

Drážková rozptylová reaktance je podle (108):

$$X_{2d} = 0,316 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_A \cdot \chi_A}{100 \cdot \chi_t} \right)^2 \cdot l \cdot \frac{m \lambda_d}{Q_2} = 0,316 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{497 \cdot 0,87}{100 \cdot 0,997} \right)^2 \cdot 7 \cdot \frac{2 \cdot 5,99}{30} = 8,31 \Omega$$

Rozptylová reaktance rotoru od natočení drážek je stejná jako pro stator:

$$X_{2q} = X_{Aq} = 1,31 \Omega$$

Celková výsledná rozptylová reaktance rotoru přepočtená na stator je podle (105)

$$X_{r2} = X_{20} + X_{2d} + X_{2q} = 2,12 + 8,31 + 1,31 = 11,74 \Omega$$

Souhrn konstant stroje pro zjednodušené náhradní schéma pro souslednou složku na obrázku č. 27:

$$R_A = 20,34 \Omega$$

$$R_2 = 38,2 \Omega$$

$$X_h = 361,3 \Omega$$

$$X_{vA} = 12,36 \Omega$$

$$X_{v2} = 11,74 \Omega$$

6.6 Kruhový diagram

V této kapitole bude stručně uvedeno sestavení kruhového diagramu pro vypočítané hodnoty navrhnutého motoru. Postup je převzat z práce Dr. Jaroslava Štěpiny, Jednofázové indukční motory. Vzhledem k velmi rozsáhlé teorii konstrukce kruhových diagramů, která by předčila samotný návrh motoru, budou uvedeny výpočty jen pro základní hodnoty.



Komplexní činitel rozptylu:

$$\begin{aligned} v_1 &= \frac{2 \cdot R_A + \frac{R_2}{1,8} + j(2 \cdot X_{vA} + X_{v2}) + jX_h}{jX_h} = \\ &= \frac{2 \cdot 20,34 + \frac{38,2}{1,8} + j(2 \cdot 12,36 + 11,74) + j361,3}{j361,3} = 1,1 \angle -8,85^\circ \end{aligned}$$

Sousledná složka proudu naprázdno:

$$I_{dA0} = \frac{U}{v_1 \cdot jX_h} = \frac{230}{1,1 \angle -8,85^\circ \cdot j361,3} = 0,579 \angle -90^\circ + 8,85^\circ$$

kde $+8,85^\circ$ vyjadřuje odchýlení od vodorovné osy.

Pro polygon ABCD platí:

$$\begin{aligned} \overline{AB} &= |v_1| \left(2R_A + \frac{R_2}{1,8} \right) = 1,1 \left(2 \cdot 20,34 + \frac{38,2}{1,8} \right) = 68,1 \\ \overline{BC} &= |v_1| (2X_{vA} + X_{v2}) = 1,1 (2 \cdot 12,36 + 11,74) = 40,1 \\ \overline{CD} &= |v_1|^2 X_{v2} = 1,1^2 \cdot 11,74 = 14,2 \\ \overline{DE} &= |v_1|^2 R_2 = 1,1^2 \cdot 38,2 = 46,2 \end{aligned}$$

Provozní bod P najdeme pomocí:

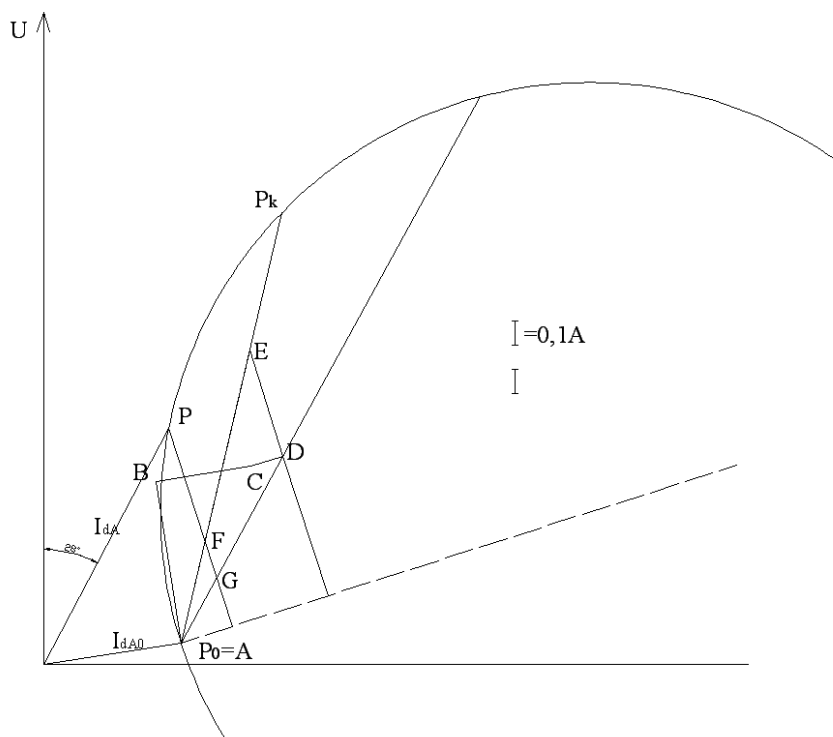
$$\overline{AP_k} = \frac{U}{AE} = \frac{230}{125,1} = 1,84 \quad (\text{v měřítku proudů odpovídá } 184)$$

Použitá přepočtová konstanta pro výkon podle [1] str 21:

$$\mu_p = m \cdot 0,1 \cdot U = 2 \cdot 0,1 \cdot 230 = 46$$

Použitá přepočtová konstanta pro moment podle [1] str 21:

$$\mu_M = \frac{30 \cdot 10^2}{\pi \cdot 9,81 \cdot n_s} \cdot m \cdot 0,1 \cdot U = \frac{30 \cdot 10^2}{\pi \cdot 9,81 \cdot 3000} \cdot 2 \cdot 0,1 \cdot 230 = 1,49$$



Obr. 28: Kruhový diagram pro souslednou složku

Hodnoty vyčtené z kruhového diagramu:

Jmenovitý proud: $I_A = 2 \cdot I_{dA} = 2 \cdot (\overline{OP}) = 2 \cdot 1,11 = 2,22 A$

Proud naprázdno (přesněji $s=0$): $I_{A0} = 2 \cdot I_{dA0} = 2 \cdot (\overline{OA}) = 2 \cdot 0,587 = 1,17 A$

Proud nakrátko hlavního vinutí: $I_{Ak} = 2 \cdot I_{dAk} = 2 \cdot (\overline{OP_k}) = 2 \cdot 2,1257 = 4,25 A$

Jmenovitý moment: $M = \overline{PG} - \Delta M - M_i = 9,17 - 0,35 - 0,35 = 8,47 kg \cdot cm \rightarrow 0,83 Nm$

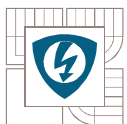
Účinník pro jmenovitý chod: $\cos \varphi = \cos 28^\circ = 0,88$

6.7 Porovnání navrhnutého motoru s vyráběným

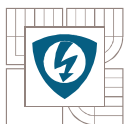
Výsledkem kapitoly 6 je ucelený návrh základních parametrů jednofázového asynchronního motoru s kondenzátorem v pomocné fázi. Podle provedeného návrhu by bylo možné motor zkonstruovat a následovalo by měření, jehož výsledkem by byly přesné parametry navrhnutého motoru. Odměření hlavních parametrů motoru je v praxi vždy cennější než samotný výpočet, protože u výpočtů je velmi složité zakomponovat všechny nežádoucí vlastnosti tak, aby byly numerické výpočty přesné.

Výpočet byl prováděn podle dostupných literárních zdrojů a nebyl ovlivněn konstrukčními parametry vyráběného jednofázového motoru. Kompletní technická dokumentace jednofázového asynchronního motoru o výkonu 250 W, vyráběného ve firmě EMP s.r.o. Slavkov u Brna, je uvedena v příloze B.

Při porovnání navrhnutého a již vyráběného motoru, je prvotním rozdílem počet rotorových a satorových drážek. Při výpočtu je uvažováno 24 satorových drážek a 30 rotorových oproti



vyráběnému motoru, který používá statorové plechy s 12 drážkami a rotorové se 17 drážkami. Tento podstatný rozdíl je dán tím, že firma EMP nevyrábí pro žádný jednofázový motor statorové a rotorové plechy, ale s výhodou používá plechy z motorů trojfázových. Výroba je tak mnohem ekonomičtější, než při výrobě několika jiných plechů pro jednofázové motory. Nevýhody plynoucí z používání stejných plechů pro několik různých motorů lze snadno kompenzovat jinými méně nákladnými změnami, jako například změnou natočení drážek rotoru, nebo změnou parametrů vinutí. S rozdílným počtem drážek úzce souvisí i navrhnuté průřezy drážek pro vinutí. Z návrhu a dokumentace v příloze B je patrné, že menší počet drážek je kompenzovaný větším průřezem a naopak. V návrhu vychází průřez drážek přibližně o třetinu až polovinu menší, což kompenzuje zvýšený počet drážek. Natočení drážek rotoru je v návrhu uvažováno podle literatury pouze 12° (což odpovídá 100 % drážkové rozteče). U vyráběného motoru je použito 261 % drážkové rozteče. Takto velké natočení drážek rotoru vychází z experimentálního měření, kdy je dosaženo lepšího momentu zvratu, proudu nakrátko, účinnosti a v neposlední řadě hlučnosti. Schéma rozložení hlavního a pomocného vinutí v drážkách rotoru je navrženo podle obrázku 24. Schéma vinutí používané ve výrobě najdeme opět v dokumentaci v příloze B. Navíc jsou v příloze C uvedena 4 schémata vinutí dvoupólových jednofázových motorů, které se ve firmě EMP používají. Základní parametry navrhnutého motoru, shrnuté na konci kapitoly 6.6, byly velmi blízké parametrům vyráběného motoru. Výsledky měření přímo vyráběného motoru firmou EMP s.r.o. Slavkov u Brna provedené na Fakultě strojního inženýrství dne 10.2.2010 jsou uvedeny v příloze D.

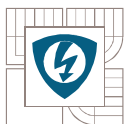


7 ZÁVĚR

Náplní této diplomové práce bylo pojednání o jednofázovém asynchronním motoru. Práce obsahuje souhrnné informace o konstrukci, principu činnosti a základních parametrech tohoto motoru. Byly objasněny základní způsoby získávání záběrového momentu včetně nastínění principů funkce jednotlivých konstrukčních provedení, které se v praxi vyrábějí. Blíže je rozebrán motor s pomocnou fází a trvale připojeným kondenzátorem a způsob určení velikosti kondenzátoru.

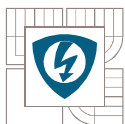
Jsou uvedeny základní zásady postupu pro výpočet jednofázového asynchronního motoru s kondenzátorem v pomocné fázi.

V práci je proveden kompletní výpočet jednofázového dvoupólového asynchronního motoru o výkonu 250 W, 230 V / 50 Hz, 2850 n/min^{-1} . Návrh obsahuje všechny základní prvky potřebné ke konstrukci motoru včetně návrhu rozměrů statorových a rotorových plechů, všech vinutí a rozběhového kondenzátoru. V poslední části je srovnání motoru navrhnutého podle uvedené literatury s motorem, který je v současné době vyráběn ve firmě EMP s.r.o. Slavkov u Brna. Z návrhu je sice použit výrazně rozdílný počet statorových a rotorových drážek, avšak toto je kompenzováno úměrnou změnou průřezu statorové a rotorové drážky pro vinutí, čímž se stává návrh z velké části ekvivalentním s vyráběným motorem. Vypočtené hodnoty navrhnutého motoru uvedené na konci kapitoly 6.6 se jen velmi málo liší od parametrů motoru měřeného-viz příloha D.



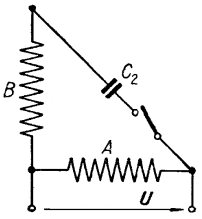
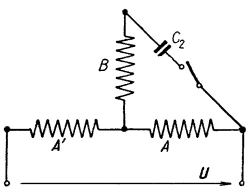
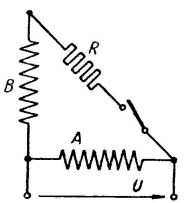
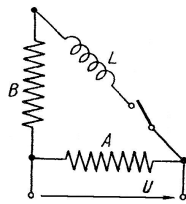
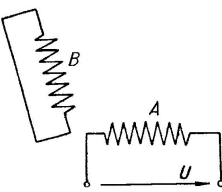
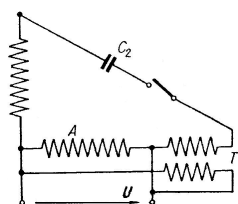
LITERATURA

- [1] JAROSLAV ŠTĚPINA *Jednofázové indukční motory*, Praha 1957
- [2] STANISLAV KOČMAN *Asynchronní stroje*, 2002, Katedra obecné elektrotechniky FEI VŠB-TU Ostrava
- [3] JOSEF LAPČÍK *Elektrické stroje - laboratorní cvičení*, 2003, Skriptum FEKT Vysokého učení technického v Brně
- [4] FRANTIŠEK FETTER *Asynchronní motory*, Praha 1966, Stručný přehled o působení a použití asynchronních motorů k opakování a úvodnímu školení
- [5] JIŘÍ TRÍSKA *Zapojování asynchronních motorů*, Praha 1966
- [6] LADISLAV HOMOLA *Elektrické stroje na střídavý proud*, díl II. Asynchronní stroje, IV. vydání, 1947
- [7] JAROSLAV ŠTĚPINA *Fyzikální úvod do teorie elektrických strojů, Vznik točivého momentu*, 1995
- [8] FRANTIŠEK PROVAZNÍK *Elektrické stroje II, Točivé stroje*, 1963
- [9] LADISLAV VOŽENÍLEK *Kurs elektrotechniky*, 1976
- [10] RUDOLF MRAVEC *Elektrické stroje a přístroje*, I. Elektrické stroje, 1979



PŘÍLOHA A

Tab. I. Rozběhová zapojen [1]

Číslo	Schéma zapojení	Bližší popis	Počty závitů	Poměr hmot mědi	Využití γ
1		Jednofázový motor s pomocným vinutím a kondensátorem, který slouží pro rozběh.	$k_1=0,6$ až 1,0	$k_{Cu}=1/2$	0,45 až 0,55
2		Jednofázový motor přepínatelný na dvoje napětí. Při zapojení na nižší napětí jsou větve A', A paralelně a schéma odpovídá zapojení 1. Pro vyšší napětí se používá tohoto zapojení beze změny kapacity kondenzátoru.	$k_1=0,6$ až 1,0	$G_A=G_{A'}=G_B$	0,45 až 0,55
3		Jednofázový motor s odporovým rozběhem	$k_1=0,35$ až 0,6	$k_{Cu}=0,5$	0,45 až 0,55
4		Jednofázový motor s pomocným vinutím a spouštěcí tlumivkou	$k_1=0,35$ až 0,6	$k_{Cu}=0,5$	0,45 až 0,55
5		Jednofázový motor se stíněnými póly. (Gramofonové motorky.)	$N_B=2p$ až 6p	k_{Cu} – malé	0,3 až 0,4
6		Jednofázový motor s pomocným vinutím a transformátorem pro zvýšení napětí na pomocném vinutí a rozběhovém kondenzátoru	$k_1=1$ až 2	$k_{Cu}=0,5$	0,45 až 0,55



PŘÍLOHA B

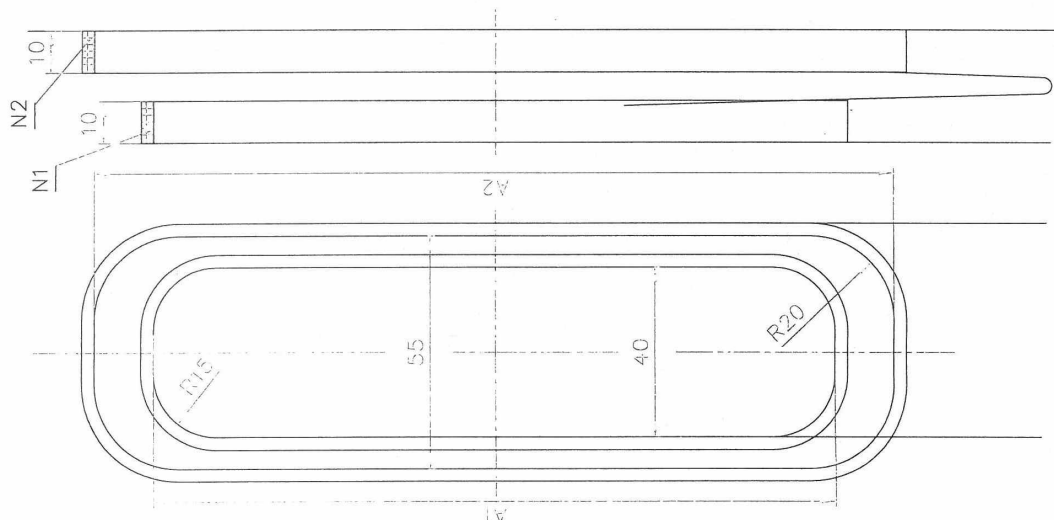
Výrobní dokumentace motoru JMC 63 - 2 DAE provedení EMP Slavkov u Brna

7.12.09	STRATIL	55	PF 99	112	116	232	1x0.400	W200-2L	4029	0400	0,10711	12,3-13,1	27
			HF 99	127	116	232	1x0.400	W200-2L	4029	0400	0,11512	13,2-14,1	26
7.12.09	STRATIL	55	PF 99	112	98	196	1x0.450	W200-2L	4029	0450	0,11487	8,20-8,73	25
			HF 99	127	91	182	1x0.475	W200-2L	4029	0475	0,12722	7,35-7,80	24
			PF 164	177	52	102	2x0.450	W200-2L	4029	0450	0,17873	6,38-6,79/2	23
7.12.09	STRATIL	120				89	1x0.500	W200-2L	4029	0500	0,09880	4,67-4,95	22
			HF 164	177	43	89	1x0.475	W200-2L	4029	0475	0,08942	5,17-5,49	21
7.12.09	STRATIL	55	PF 99	112	111	222	1x0.450	W200-2L	4029	0450	0,14593	10,4-11,1	20
			HF 99	127	97	194	1x0.500	W200-2L	4029	0500	0,16709	7,90-8,36	19
7.12.09	STRATIL	70	PF 114	127	87	174	1x0.475	W200-2L	4029	0400	0,1392	8,05-8,54	18
			HF 114	142	75	150	2x0.400	W200-2L	4029	0425	0,1828	5,23-5,59	17
7.12.09	STRATIL	100	PF 144	157	61	122	2x0.400	W200-1L	4023	0400	0,15054	8,61-9,21/2	16
			HF 144	172	53	106	2x0.425	W200-1L	4023	0425	0,15613	7,01-7,35/2	15
7.12.09	STRATIL	55	PF 99	112	51	102	2x0.425	W200-1L	4023	0425	0,10647	4,78-5,09/2	14
			PF 99	127	51	102	2x0.425	W200-1L	4023	0425	0,11443	5,13-5,47/2	13
7.12.09	STRATIL	55	PF 99	112	116	232	1x0.400	W200-1L	4023	0400	0,10711	12,3-13,1	12
			HF 99	127	116	232	1x0.400	W200-1L	4023	0400	0,11512	13,2-14,1	11
7.12.09	STRATIL	55	PF 99	112	98	196	1x0.450	W200-1L	4023	0450	0,11487	8,20-8,73	10
			HF 99	127	91	182	1x0.475	W200-1L	4023	0475	0,12722	7,35-7,80	09
7.12.09	STRATIL	120	PF 164	177	52	102	2x0.450	W200-1L	4023	0450	0,17873	6,38-6,79/2	08
			HF 164	177	43	89	1x0.500	W200-1L	4023	0500	0,09880	4,67-4,95	06
							1x0.475	W200-1L	4023	0475	0,08942	5,17-5,49	
15.09.03	STRATIL	120	PF 164	177	52	102	1x0.355	W200-1L	4023	0355	0,05564	10,2-10,9	04
							2x0.375	W200-1L	4023	0375	0,12364	9,14-9,82/2	
			HF 164	192	43	89	2x0.400	W200-1L	4023	0400	0,1269	7,26-7,77/2	02
							1x0.375	W200-1L	4023	0375	0,0557	8,25-8,85	
15.09.03	STRATIL	55	PF 99	112	97	194	1x0.475	W200-1L	4023	0475	0,12616	7,29-7,74	01
			HF 99	127	84	168	1x0.530	W200-1L	4023	0530	0,14643	5,44-5,79	00
DATUM	KRESLIL	LFE	A1	A2	N1	N2	Ø	VODIČ	SKL.	POL.	Č. HM.	ODPOR	

2 700 6929

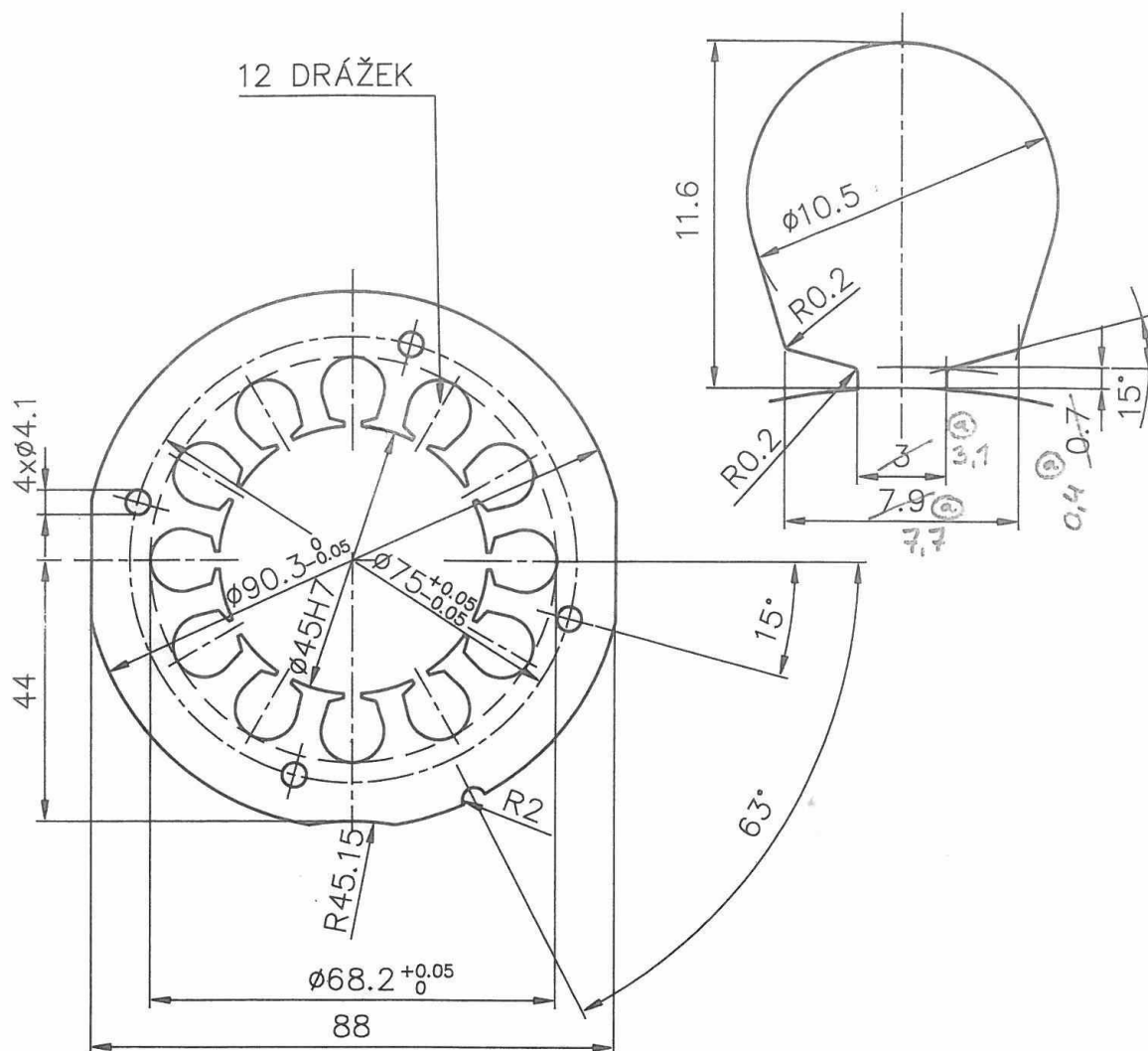
DVOJCÍVKA
JMC63-2

L



DÉLKA VÝVODŮ 150mm
CÍVKY NA DVOU MÍSTECH SVÁŽAT

[illegible]



DOVOLENÉ ÚCHYLKY ROZMĚRŮ DRÁŽEK
V TOLERANCI H9
MAX. VÝŠKA BŘITU 0.1mm

PAS Ei 70 0.5x88 TP 205 C28/72
SULFISOL

ČSN 42 0234
1749 0885

0.02

00

STRATIL

1:1

5:1, 2:1

10.6.1997

3COA 2,4,6

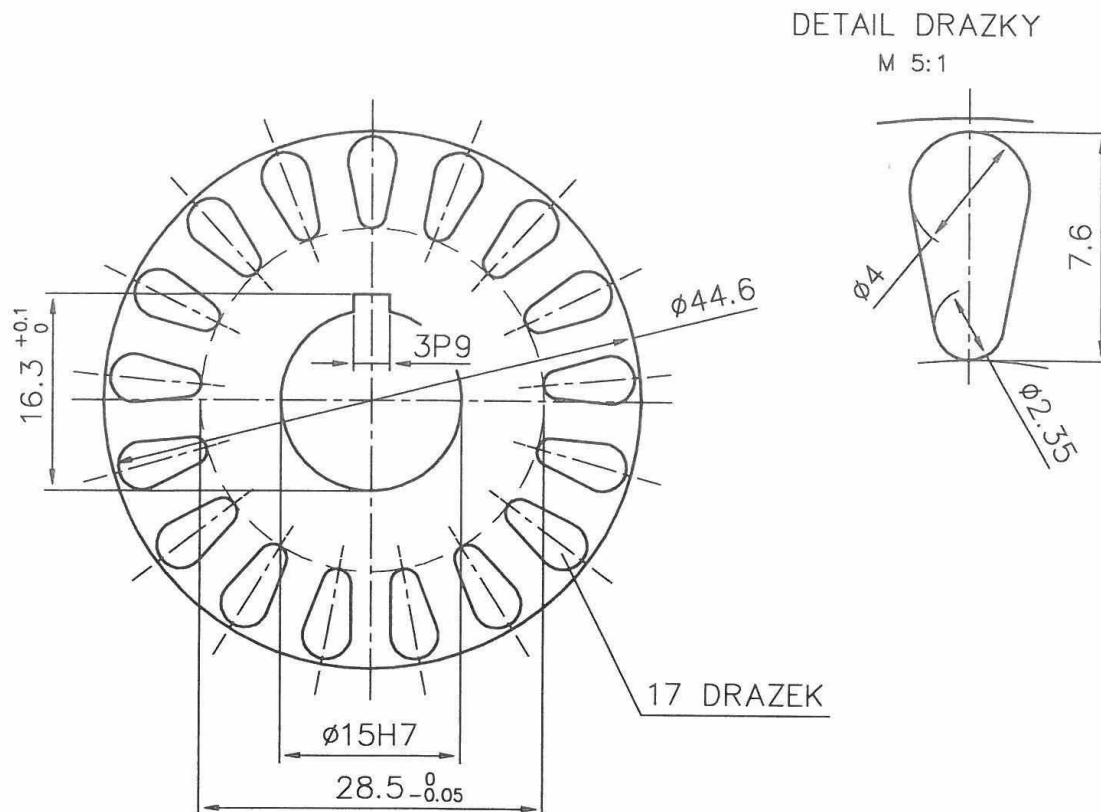
PLECH
STATORU

20/00 tvar drážky

23.6.00 R@3,

Z 84/00 PŘEKRESLENO SE ZMĚNAMI 13.7.00 Hrdánek

2 261 6407



POUZIT STRED Z PLECHU STATORU 2 261 6407 00
DOVOLENE UCHYLKY ROZMERU DRAZEK V TOLERANCI H9
MAX. VYSKA BRITU 0.06mm

PAS Ei 70 TL. 0.5
SULFISOL CSN 42 0234

9999 9999

00

STRATIL

2:1

5:1

9.6.1997

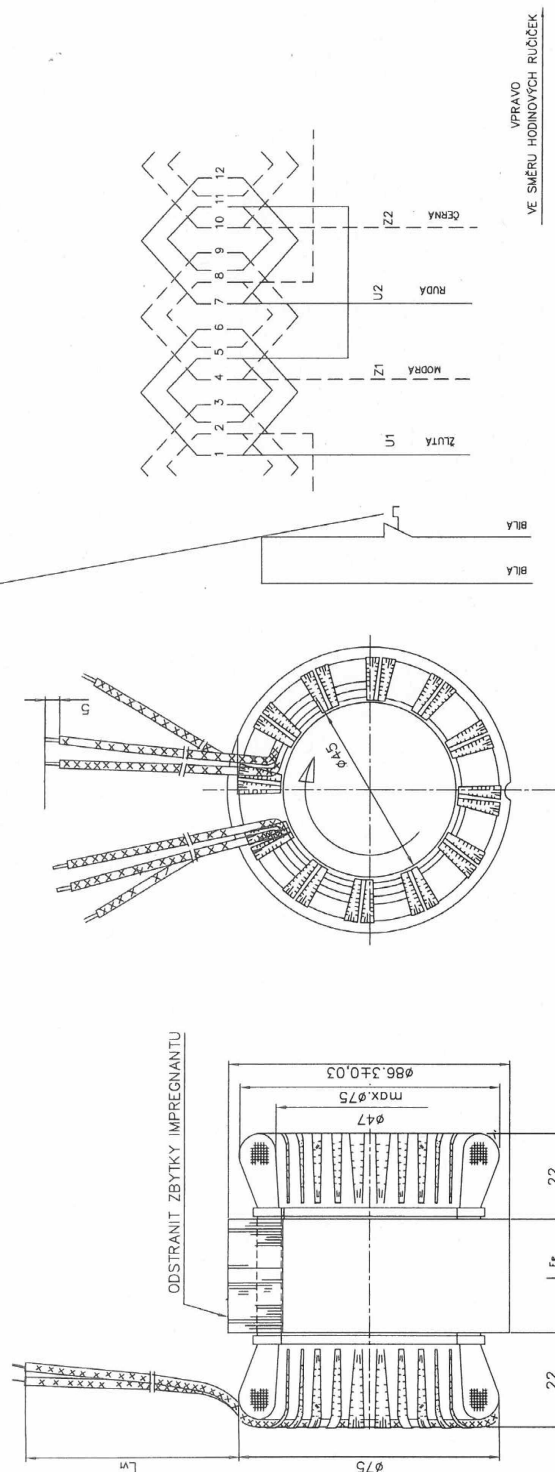
3COA 2,4,6

z06/07 PREKRESLENO SE ZMENAMI 14.5.07 *Ra*



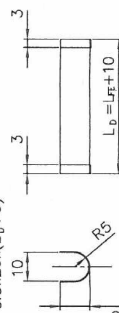
PLECH
ROTORU

2 285 6417

[illegible]

ZOLACE DRÁŽKY

NEN-F 300/190

 $0.3 \times 26 \times (L_D + 6)$ 

DRÁŽKOVÝ UZÁVĚR

NEN-F 300/190

 $0.3 \times 15.5 \times L_v$ 

$$8 + 347 = n$$



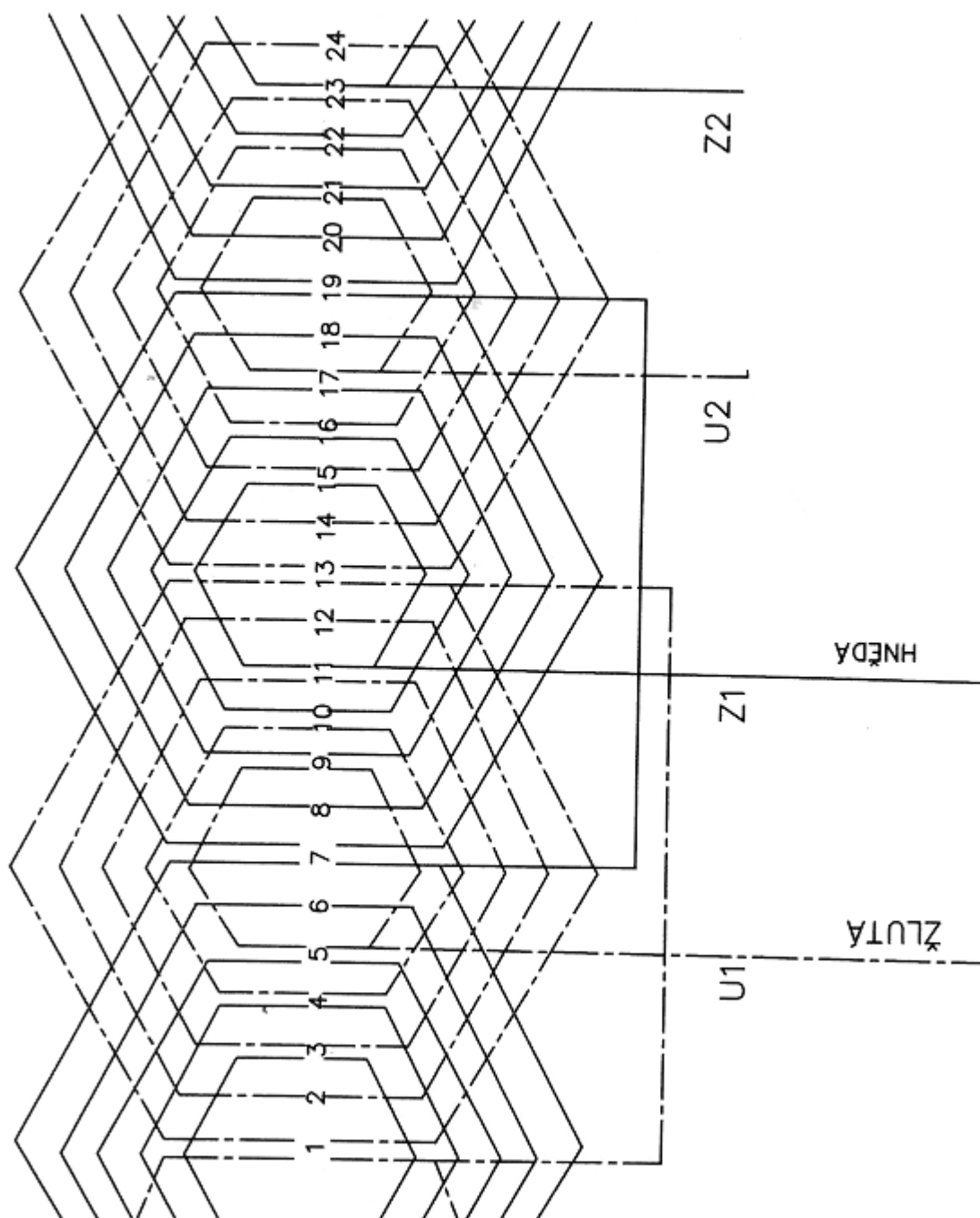
DAE
JMV63-2 P86,3
3 810 7957



PŘÍLOHA C

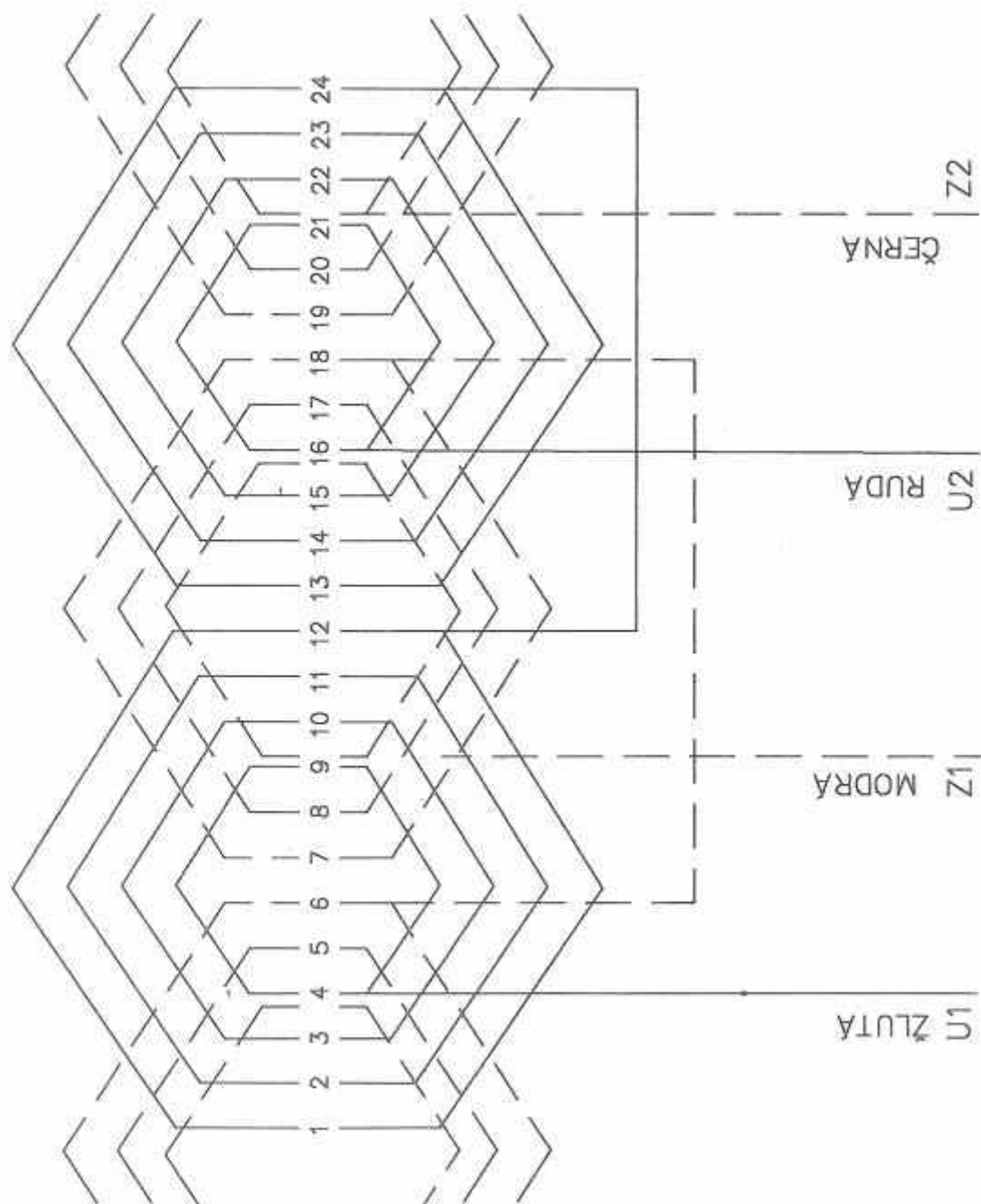
Dokumentace ke schémátům vinutí používaných ve firmě EMP s.r.o. Slavkov u Brna pro jednofázové dvoupólové asynchronní motory.

varianta 1



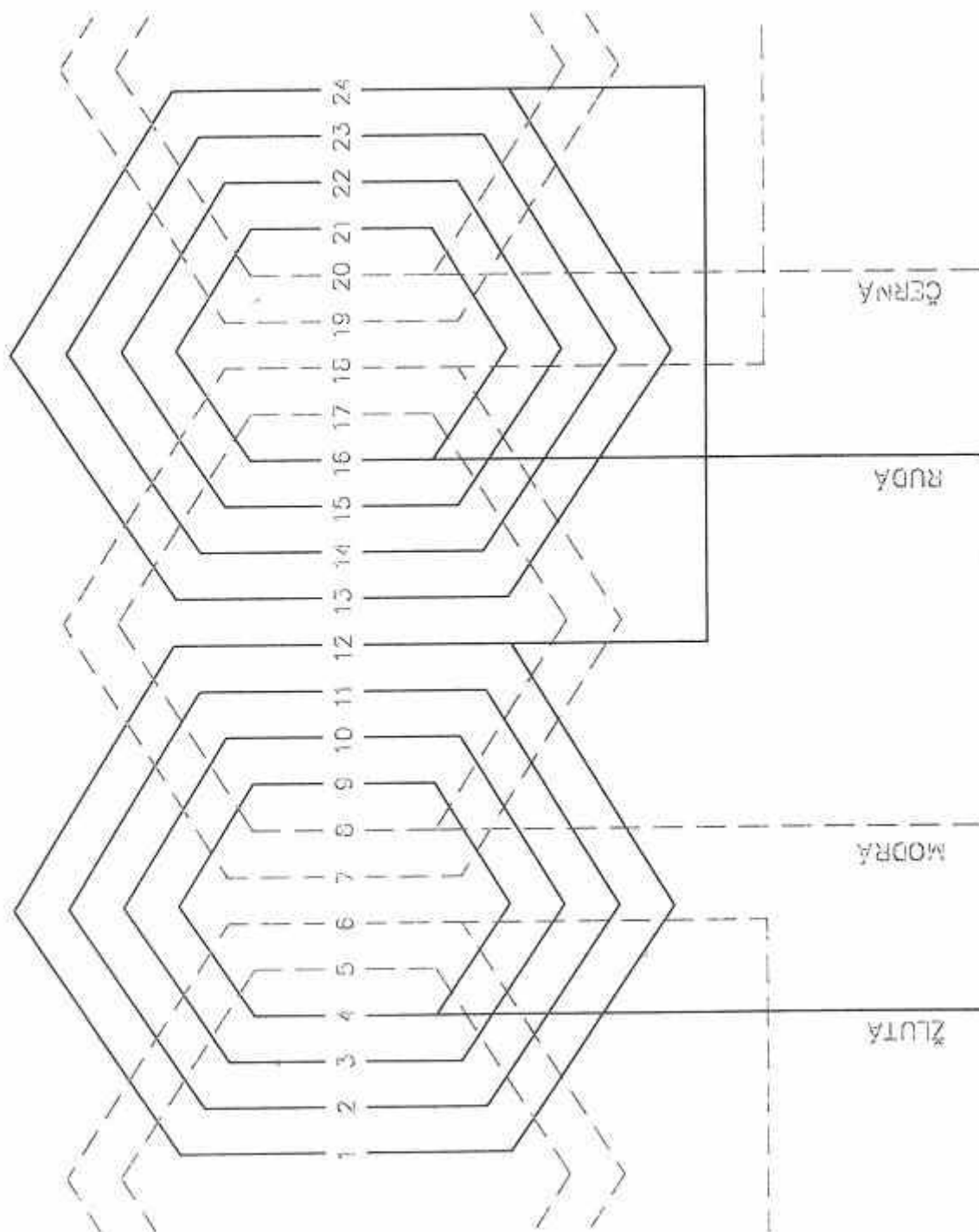


varianta 2





varianta 3





varianta 4

