



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

SPECIÁLNÍ ASYNCHRONNÍ MOTORY MALÉHO VÝKONU.

SPECIAL LOW-POWER INDUCTION MOTORS.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Andrej Belica

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc.

BRNO 2016



VYSOKÉ UČENÍ FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
TECHNICKÉ A KOMUNIKAČNÍCH
V BRNĚ TECHNOLOGIÍ

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Andrej Belica

ID: 146784

Ročník: 2

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Speciální asynchronní motory malého výkonu.

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Nastudujte provedení asynchronních motorů se zvláštním zaměřením na motory malého výkonu.
2. Na základě literární rešerše analyzujte parametry a možnosti použití motorů s plným rotorem, hysterezních motorů a motorů se stíněným pólem.
3. Podle poznatků z literatury vypracujte předběžný návrh funkčního vzorku zvoleného motoru.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] PETROV, G. N. Elektrické stroje 2: Asynchronní stroje - synchronní stroje. 1. vyd. Praha: Academia Praha, 1982. ISBN 509-21-857.
- [2] CIGÁNEK, Ladislav. Stavba elektrických strojů. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1958. ISBN 36 174-57.
- [3] ŠTĚPINA Jaroslav. Jednofázové indukční motory. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1957.

Termín zadání: 21.9.2015

Termín odevzdání: 24.5.2016

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

Konzultant diplomové práce:

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

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Diplomová práca sa zaoberá návrhom a konštrukciou najpoužívanejších motorov v súčasnosti. Celkovo je rozdelená do piatich kapitol, pričom prvá kapitola sa zaoberá konštrukčným prevedením rôznych trojfázových asynchrónnych motorov, v druhej kapitole je v krátkosti venovaná pozornosť aj jednofázovým motorom. Nasledujúca kapitola sa zameriava na zvláštne typy motorov, ktoré sa líšia od bežných asynchrónnych motorov svojou konštrukčnou realizáciou. Jedná sa o motory s plným rotorom, hysterézne, lineárne a s tieneným pólom. Aj keď sú asynchrónne motory považované za najspoľahlivejšie stroje, práca v neideálnych podmienkach vedie k častým poruchám. Tomu sa venuje štvrtá kapitola. Na základe poznatkov z predošlých kapitol je v piatej kapitole predbežný návrh asynchrónneho motora s plným rotorom. Posledná kapitola sa venuje meraniu na funkčnom vzorku.

Abstract

Master thesis deals with design and construction of the most widely used engines currently. Overall, it is divided into five chapters, the first chapter deals with constructional features of various three-phase asynchronous motors, the second chapter briefly paid attention to single-phase motors. The next chapter focuses on the specific engine types, which differ from standard induction motors in its design implementation. This is an engine with full rotor, hysteresis, linear and with shaded field. Although asynchronous motors are considered the most reliable machines work in imperfect conditions, it leads to frequent breakdowns. This is covered in chapter four. Based on the findings from previous chapters the fifth chapter includes a preliminary draft of the asynchronous motor with a full rotor. The last chapter is devoted to the measurement on functional models.

Klíčová slova

Trojfázový asynchronní motor; jednofázový asynchronní motor; vinutie; hysterézny motor; motor s plným rotorom; lineárny motor; motor s tieneným pólom; numerický výpočet; meranie.

Keywords

Three-phase asynchronous motor; single-phase induction motor; winding; hysteresis motor; motor with full rotor; linear motor; shaded pole motor; numerical computation; measurement.

Bibliografická citace

BELICA, A. *Speciální asynchronní motory malého výkonu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 58 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc..

Prohlášení

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

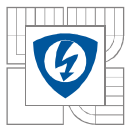
Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne Podpis autora

Poděkování

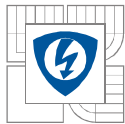
Děkuji vedoucímu diplomové práce **prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc.** za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne Podpis autora

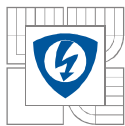


Obsah

ZOZNAM OBRÁZKOV.....	9
ZOZNAM TABULIEK.....	11
ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK.....	12
ÚVOD.....	14
1 TROJFÁZOVÉ ASYNCHRÓNNE STROJE.....	15
1.1 KONŠTRUKCIA 3 FÁZOVÝCH ASYNCHRÓNNYCH STROJOV.....	15
1.2 NÁHRADNÁ SCHÉMA ASYNCHRÓNNEHO MOTORA.....	16
1.3 MOMENTOVÁ CHARAKTERISTIKA.....	17
1.3.1 INDUKČNÁ BRZDA.....	17
1.3.2 MOTORICKÁ OBLASŤ.....	17
1.3.3 GENERÁTORICKÁ OBLASŤ.....	18
1.4 SPÚŠŤANIE 3F ASYNCHRÓNNEHO MOTORA.....	19
1.4.1 SPÚŠŤANIE MOTORA S KOTVOU KRÚŽKOVOU.....	19
1.4.2 SPÚŠŤANIE MOTORA S KOTVOU NAKRÁTKO (KLIETKOVÉ).....	20
1.5 VINUTIE ROTORA 3F ASYNCHRÓNNEHO MOTORA.....	21
1.5.1 VÍRIVÉ KLIETKY.....	21
1.5.2 DVOJITÉ KLIETKY.....	22
1.5.3 ŠPECIÁLNE ROTORY.....	22
2 JEDNOFÁZOVÉ ASYNCHRÓNNE STROJE.....	23
3 ZVLÁŠTNE TYPY ASYNCHRÓNNYCH MOTOROV.....	24
3.1 ASYNCHRÓNNY MOTOR S TIENENÝM PÓLOM.....	24
3.2 MOTOR TYPU FERRARIS.....	25
3.3 LINEÁRNY ASYNCHRÓNNY MOTOR.....	26
3.4 ASYNCHRÓNNY MOTOR S PLNÝM ROTOROM.....	26
3.4.1 ROZBOR POUŽITIA PLNÝCH ROTOROV.....	31
4 PORUCHY NA ASYNCHRÓNNYCH MOTOROCH.....	33
5 NUMERICKÝ VÝPOČET ASYNCHRÓNNEHO MOTORA S PLNÝM ROTOROM.....	35
5.1 NÁVRH HLAVNÝCH ROZMEROV.....	35
5.2 NÁVRH ROZMEROV ZUBOV A DRÁŽOK STATORA TYPU L.....	39
5.3 NÁVRH ROTORA.....	41
5.4 VÝPOČET MAGNETICKÉHO OBVODU.....	43
5.5 VÝPOČET ODPORU JEDNEJ FÁZE STATORA.....	44
5.6 VÝPOČET ROZPTYLOVEJ REAKTANCIE FÁZE STATOROVÉHO VINUTIA.....	44
5.7 VÝPOČET HLAVNÝCH STRÁT V ŽELEZE STATORA.....	45
5.8 ELEKTRICKÉ STRATY VO VINUTÍ STATORA.....	46
5.9 MECHANICKÉ STRATY.....	46
5.10 PRÍDAVNÉ STRATY PRI ZAŤAŽENÍ MOTORA.....	46

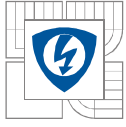


5.11 VÝPOČET STRÁT V ŽELEZE ROTORA	47
5.12 VÝPOČET CELKOVEJ IMPEDANCIE ROTORA	47
5.13 VÝPOČET HLAVNEJ INDUKČNOSTI A ODPORU PREDSTAVUJÚCEHO STRATY V ŽELEZE	48
5.14 CELKOVÉ STRATY A ÚČINNOSŤ.....	49
6 MERANIE NA NAVRHNUTOM MOTORE.....	51
6.1 MERANIE NAPRÁZDNO.....	52
6.2 MERANIE NAKRÁTKO	53
6.3 MERANIE MOMENTOVEJ CHARAKTERISTIKY	53
7 ZÁVER.....	55
LITERATÚRA	56
PRÍLOHY	58

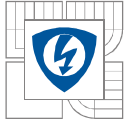


ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 1: Popis jednotlivých častí motora (prevzaté z [2], upravené).	15
Obrázok 2: Náhradná schéma asynchrónneho motora [3].....	16
Obrázok 3: Momentová charakteristika asynchrónneho motora v brzdnej ,motorickej a generátorickej oblasti (prevzaté z [1], upravené).	18
Obrázok 4: Schéma spúšťania AM s kotvou krúžkovou [5].	19
Obrázok 5: Spúšťanie AM s kotvou nakrátko [5].....	21
Obrázok 6: Tvar tyčí vírivej klietky [6].....	21
Obrázok 7: Úprava tyčí dvojitej klietky.	22
Obrázok 8: Jednofázový asynchrónny motor s tienovým pólom [8],(prevzaté z [9], upravené). ..	24
Obrázok 9: Usporiadanie a schéma Ferrarisova motorčeka [13].....	25
Obrázok 10: Princíp Lineárneho asynchrónneho motora [17].	26
Obrázok 11: Asynchrónny motor s masívnym oceľovým rotorom [11].	27
Obrázok 12: Momentová charakteristika asynchrónneho motora s plným rotorom [10].	28
Obrázok 13: Model asynchrónneho motora s tienidlom na rotore [12].....	28
Obrázok 14: Tvar indukcie pri harmonickom priebehu indukcie v medzere a tienidle[12].....	29
Obrázok 15: Maximálny stanovený výkon motora v závislosti na otáčkach pri použití masívneho rotora (prevzaté z [11], upravené).	31
Obrázok 16: Vytváraný tlak na rotor v podkritickej prevádzke [14].	32
Obrázok 17: Ložiskové prúdy [19].....	33
Obrázok 18: Lineárna hustota a indukcia vo vzduchovej medzere [15].....	36
Obrázok 19: Drážková rozteč [15].	37
Obrázok 20: Jednovrstvové vinutie s plným krokom navinuté ako pol párové cievky $m=3$, $q=4$, $Q=24$	37
Obrázok 21: Jednovrstvové vinutie s plným krokom navinuté ako pólové cievky $m=3$, $q=4$, $Q=24$	38
Obrázok 22: Hodnoty činiteľa k_E [15].....	38
Obrázok 23: Stredná hodnota súčinu AJ asynchrónneho motora [15].....	39
Obrázok 24: Rozmery drážky typu L a zubov statora pre vsypávané vinutie [15].	40
Obrázok 25: Pozdĺžny rez asynchrónneho motora s plným rotorom.	41
Obrázok 26: Priečny rez asynchrónneho motora s plným rotorom.	42
Obrázok 27: Tvar statorovej drážky [15].....	44
Obrázok 28: činiteľ k'_y v závislosti na pomere t_{d2}/t_{d1} a pomere natočenia drážok $\beta\gamma$ [15].	45

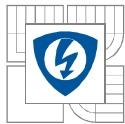


<i>Obrázok 29: Zjednodušený obvodový model asynchrónneho motora s vypočítanými parametrami na počet závitov statorového vinutia.</i>	<i>48</i>
<i>Obrázok 30: Rozloženie celkových strát v asynchrónnom motore.</i>	<i>49</i>
<i>Obrázok 31: Vzorka asynchrónneho motora s plným rotorom.</i>	<i>51</i>
<i>Obrázok 32: Schéma zapojenia meracieho obvodu-Áronové zapojenie.</i>	<i>51</i>
<i>Obrázok 33: Zapojenie meracie pracoviska pri meraní naprázdno.</i>	<i>52</i>
<i>Obrázok 34: Zapojenie meracieho pracoviska pri meraní momentovej charakteristiky.</i>	<i>53</i>

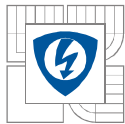


ZOZNAM TABULIEK

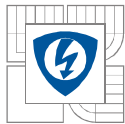
<i>Tabuľka 1: Predpokladané parametre asynchrónneho motora s plným rotorom.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabuľka 2: ES 1102002 pre určenie rozmerov statorového plechu.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabuľka 3: Dovoľené hodnoty magnetickej indukcie.....</i>	<i>58</i>

**ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK**

A	lineárna hustota prúdu	[A.m ⁻¹]
a	počet paralelných vetví vinutia	[-]
b ₀	otvorenie drážky	[m]
b ₁	šírka drážky	[m]
b ₁	šírka drážky	[m]
b _{z1}	šírka zubu statora	[m]
B _{j1}	indukcia v jhu statora	[T]
B _{j2}	indukcia v jhu rotora	[T]
B _x	magnetická indukcia v tienidle	[T]
B _δ	magnetická indukcia vo vzduchovej medzere	[T]
D _h	priemer hriadeľa	[m]
D _r	vonkajší priemer masívneho rotora	[m]
d _r	vnútorný priemer masívneho rotora	[m]
D _e	vonkajší priemer statorových plechov	[m]
D	vnútorný priemer statorových plechov	[m]
E _x	efektívna veľkosť elektromotorického napätia	[V]
f ₂	kmitočet indukovaného napätia rotora	[Hz]
h	výška osy otáčania hriadeľa	[m]
h _d	hlbka drážky	[m]
h _{j1}	výška jha statora	[m]
I ₀	prúd naprázdno	[A]
I _k	prúd nakrátko	[A]
I _z	záberný prúd	[A]
I _μ	magnetizačný prúd	[A]
J ₁	hustota prúdu	[A.m ⁻²]
k _b	činiteľ tvaru poľa	[-]
k _{dr}	činiteľ plnenia drážky	[-]
k _{Fe}	činiteľ plnenia železa	[-]
k _r	činiteľ rozlohy	[-]
k _{v1}	činiteľ vinutia	[-]
k _y	činiteľ kroku	[-]
li	dĺžka vzduchovej medzere	[m]
M	moment motora	[Nm]
M _{mech}	moment na hriadeli	[Nm]
M _z	záberný moment	[Nm]
m	počet fázy	[-]
m _{j1}	hmotnosť jha statora	[kg]
m _{j2}	hmotnosť jha rotora	[kg]
m _{z1}	hmotnosť statorových zubov	[kg]
N ₁	počet závitov statora	[-]
n _s	synchronne otáčky	[ot./min]
n	otáčky rotora	[ot./min]
P ₀	príkonný výkon v stave naprázdno	[W]
P ₁	príkonný výkon	[W]
P _k	príkonný výkon v stave nakrátko	[W]
P	mechanický výkon	[W]
P _i	elektromagnetický výkon	[VA]
p	počet pol párov	[-]
Q	počet drážok	[-]



Q	počet drážok na pól a fázu	[-]
R_1	odpor statorového vinutia	[Ω]
R_2	odpor rotorového vinutia	[Ω]
R_{Fe}	odpor železa	[Ω]
S_{ef1}	prierez efektívneho vodiča statora	[m^2]
s	sklz motora	[%]
U_1	napájacie napätie	[V]
U_{j1}	magnetické napätie v jhu statora	[A]
U_{j2}	magnetické napätie v jhu rotora	[A]
U_δ	magnetické napätie vzduchovej medzere	[A]
U_{z1}	magnetické napätie v zube statora	[A]
u	pomerný úbytok napätia	[-]
V_d	počet vodičov v drážke	[-]
X_m	hlavná indukčnosť	[Ω]
X_r	rozptylová reaktancia	[Ω]
ω_s	uhlová rýchlosť točivých polí statora	[$rad.s^{-1}$]
ω	uhlová rýchlosť rotora	[$rad.s^{-1}$]
β	skrátенý krok	[-]
τ_d	drážková rozteč rozteč	[m]
τ_p	pólová rozteč	[m]
\emptyset	magnetický tok	[Wb]
δ	veľkosť vzduchovej medzery	[mm]
η	účinnosť	[%]
ΔP	celkové straty	[W]
μ_e	relatívna permeabilita ocele	[-]
ΔP_{Fer}	straty v železe	[W]
ΔP_j	elektrické straty	[W]
ΔP_d	prídavné straty	[W]
ΔP_{mech}	mechanické straty	[W]
ξ	činiteľ polo uzatvorených drážok	[-]
λ_d	činiteľ magnetickej vodivosti v drážke	[-]
λ_{dif}	činiteľ magnetickej vodivosti diferenčného rozptylu	[-]
$\lambda_{\varepsilon 1}$	činiteľ čiel vinutia	[-]
γ	hustota ocele	[kg/m^3]



ÚVOD

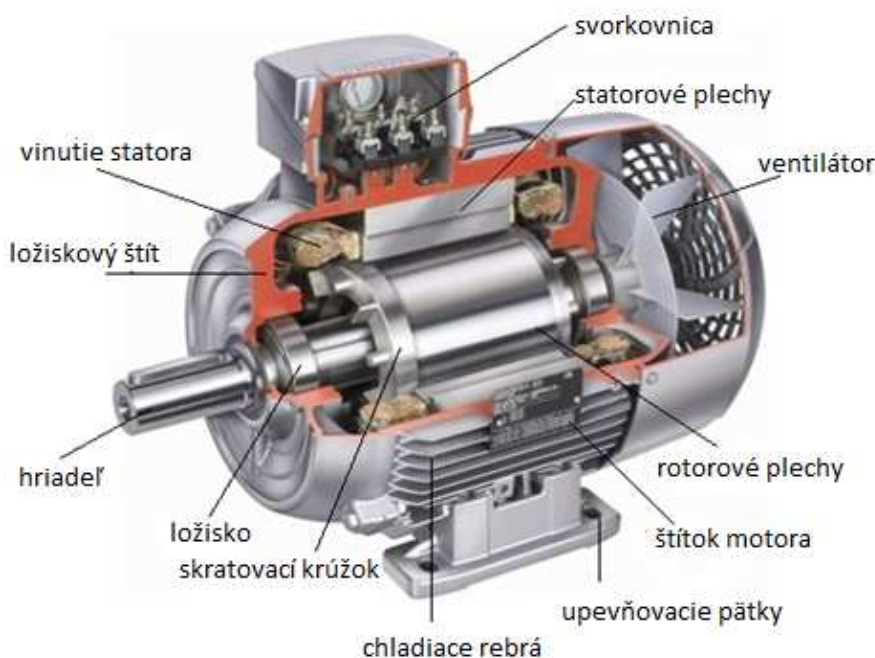
V súčasnosti môžeme považovať asynchrónne motory medzi najrozšírenejšie elektrické stroje. Predstavujú jednu z najvýznamnejších skupín spotrebičov elektrickej energie, ktoré do značnej miery ovplyvňujú charakter spotreby elektriny. V starších literatúrach ich môžeme taktiež nájsť pod pojmom indukčné motory. Asynchrónne motory sú spravidla napájané trojfázovým striedavým napätím v zapojení do hviezdy alebo do trojuholníka. Menovitý výkon týchto strojov dosahuje rádovo jednotky wattov až stovky kilowattov. U strojov vysokých výkonov dosahuje napájacie napätie desiatky až stovky kilovoltov. Pri jednofázovom napájaní sa využívajú rozbehové kondenzátory. Tento spôsob napájania je využívaný u motorov malých výkonov rádovo do 1000 W pri menovitom napätí 230 V. Otáčky stroja sa pohybujú v medziach cca 500 až cca 3000 min⁻¹. Napájací kmitočet trojfázových a jednofázových motorov je 50 Hz až 60 Hz. V zvláštnych prípadoch sa navrhujú aj na vyšší kmitočet až niekoľko tisíc Hz, pričom otáčky motora dosahujú desiatky tisíc za minútu. Otáčky stroja je možné riadiť skokovo, zmenou počtu pólových dvojíc alebo plynule zmenou frekvencie. Motory spolu s prídavnými zariadeniami ako sú napríklad prevodovky, nachádzajú uplatnenie predovšetkým v technologickom priemysle, stavebníctve a v ojedinelých prípadoch automobiloch či v ručnom náradí.

Motory sa stali obľúbenými vďaka jednoduchej konštrukcii s nízkymi výrobnými nákladmi vysokej životnosti, ktorá je obmedzená životnosťou ložísk, prevádzkovou, spoľahlivosťou a bezpečnosťou, pomerne dobrým záberným momentom a veľkou preťažiteľnosťou. Nevýhodou týchto motorov je, že pri spustení spôsobujú veľký prúdový náraz 6 až 8 násobok menovitého prúdu a tým aj pokles napätia v sieti.

1 TROJFÁZOVÉ ASYNCHRÓNNE STROJE

1.1 Konštrukcia 3 fázových asynchrónnych strojov

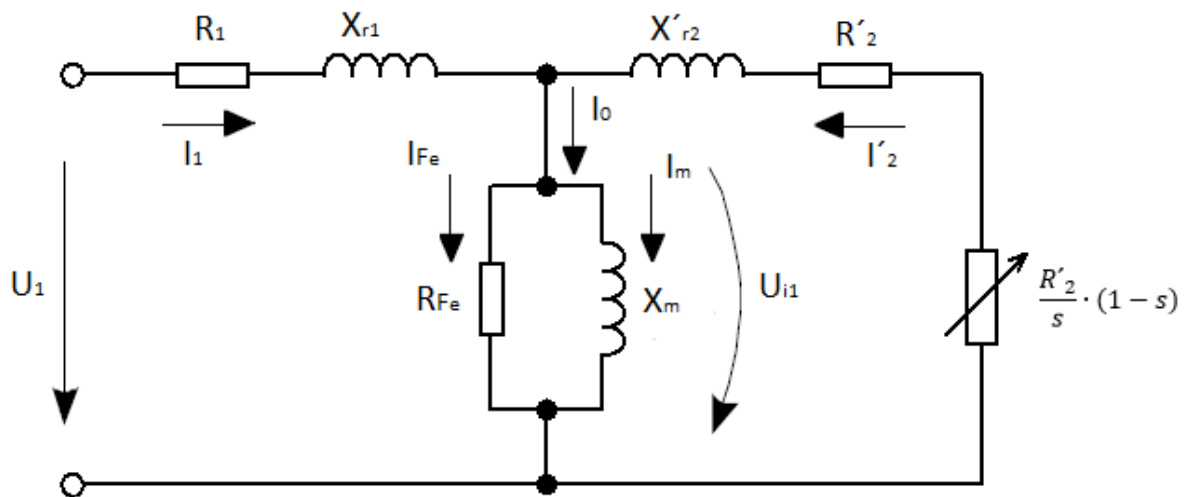
Ako všetky elektrické zariadenia slúžiace na premenu elektromechanickej energie, pozostáva asynchrónny stroj z dvoch hlavných častí. Pevná časť stator pozostáva z liatinovej, zváranej alebo hliníkovej konštrukcie. Obsahuje hlavné a pomocné trojfázové, medené vinutie. Vinutie je uložené v statorovom pakete z elektrotechnických plechov rôznej hrúbky (najčastejšie 0,3 mm a 0,5 mm), ktorý je nalisovaný do kostry motora. Lisované plechy sú navzájom izolované a tvoria časť magnetického obvodu. Vodiče v drážkach statoru sa smaltujú alebo lakujú pričom musia byť izolované od statorových plechov. Začiatky a konce vinutí sú vyvedené na svorkovnicu opatrené šiestimi mosadznými svorkami. Svorkovnica asynchrónnych strojov môže byť zapojená do hviezdy alebo trojuholníka čo určuje na aké napätie bude stroj pripojený a aký prúd bude odoberať zo siete. V prednej a zadnej časti stroja sa nachádzajú ložiskové štíty, v ktorých sú uložené ložiská. Kostra stroja má na povrchu rebrá slúžiace na chladenie motora počas prevádzky. Druhou časťou stroja je rotor. Rotorové plechy sú nalisované na hriadeľ rotoru, ktorý sa otáča v ložiskách upevnených v ložiskových štítoch. Tým sa dosiahne vymedzenie polohy rotora vnútri statora. V drážkach rotora je uložené vinutie, ktorému sa hovorí kotva. U motorov vyšších výkonov sa v rotore nachádza klieťkové vinutie. Výroba pozostáva vyliatím roztaveného hliníka do drážok. Po stuhnutí hliníka vznikne klieťka zo silných hliníkových tyčí, ktoré sú v čelách rotora spojené spojovacími kruhmi nakrátko. Motor s týmto typom vinutia nazývame asynchrónny motor s kotvou nakrátko. U motorov menších výkonov sa vinutie odlieva z poľa s vetracími lopatkami. U motorov s vinutým rotorom a krúžkami je v drážkach rotora uložené trojfázové vinutie z izolovaných vodičov. Začiatky vinutia sú spojené do uzla a konce pripojené k trom zberacím krúžkom, ku ktorým priliehajú kartáče. Medzi statorom a rotorom je tenká vzduchová medzera, ktorá umožňuje pohyb rotora [1].



Obrázok 1: Popis jednotlivých častí motora (prevzaté z [2], upravené).

1.2 Náhradná schéma asynchrónneho motora

Pre detailný rozbor práce asynchrónneho motora majú veľký význam náhradné schémy. Schémy umožňujú názorne určiť závislosť medzi veličinami charakterizujúcimi jednotlivé stavy daného stroja. Každé vinutie statorové či rotorové, má svoju rozptylovú indukčnosť X_r a činný odpor R . Statorové vinutie označujeme indexom 1 a rotorové indexom 2. Odporý asynchrónneho motora sú závislé na oteplení stroja a reaktancie na pretekajúcom prúde obodom. Ďalší vplyv na veľkosť zložiek X_r má zmena sklzu, čím dochádza k zmene kmitočtu prúdu. Rozložením prúdu I_0 na činnú a jalovú zložku, bude magnetizačná vetva rozdelená na dve paralelné. Index R_{Fe} reprezentuje straty v železe a X_m hlavnú indukčnosť. Na pravej strane náhradnej schémy máme premenný odpor $R'_2[(1-s)/s]$. Hodnota odporu je závislá na zmene sklzu s , ktorý sa teoreticky mení od $-\infty$ do $+\infty$. Prakticky sklz nadobúda hodnôt od $-0,2$ do $+2,2$ [3].



Obrázok 2: Náhradná schéma asynchrónneho motora [3].

Straty v premennom odpore náhradnej schémy sa podľa rovnice (1.1) rovnajú mechanickému výkonu stroja pri sklze s .

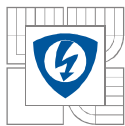
$$P' = m_2 \cdot I_2^2 \cdot R_2 \frac{1-s}{s} = m_1 \cdot I_2'^2 \cdot R_2' \frac{1-s}{s} \quad (1.1)$$

Výkon spotrebovaný vo vetve I_2' je :

$$m_1 \cdot I_2'^2 \cdot \frac{R_2'}{s} \quad (1.2)$$

a to sa rovná vnútornému (elektromagnetickému) výkonu P_i

$$P_i = M_i \cdot \omega_1 \quad (1.3)$$



1.3 Momentová charakteristika

Na obrázku 3 môžeme vidieť ideálnu charakteristiku trojfázového asynchrónneho motora vyjadrujúcu závislosť mechanických veličín. To znamená závislosť mechanického momentu stroja M od sklzu s , respektíve otáčok n . Pre rôzne typy motorov zodpovedá typický tvar charakteristiky. Charakteristika nám zobrazuje tri prevádzkové režimy stroja:

- Indukčná brzda
- Asynchrónny motor
- Asynchrónny generátor (alternátor)

V akom prevádzkovom režime sa stroj nachádza, závisí od jeho veličín teda otáčok a sklzu.

1.3.1 Indukčná brzda

Pre motor pracujúci ako indukčná brzda platí: $s > 1$

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (1.4)$$

$$s > 1 \rightarrow \frac{n_s - n}{n_s} > 1 \leftrightarrow n_s - n > n_s \leftrightarrow -n > 0 \leftrightarrow n < 0 \quad (1.5)$$

Z rovnice (1.5) vyplýva, že rotor sa otáča proti zmyslu otáčania magnetického poľa statora, čiže je brzdený.

1.3.2 Motorická oblasť

Pre motor pracujúci v tejto oblasti platí: $s = 1$ až $s < 0$

$$s = 1 \rightarrow \frac{n_s - n}{n_s} = 1 \leftrightarrow n_s - n = n_s \leftrightarrow n = 0 \quad (1.6)$$

Pri nulových otáčkach sa rotor nachádza v pokoji. Od okamžiku pripojenia na sieť dochádza k rozbehu motora. Pre rozbeh motora z pokojného stavu je potrebný určitý záberný moment M_z . Motor ďalej prechádza cez maximálny moment M_{max} , zodpovedajúci sklzu s až sa ustáli na menovitom momente M_n , zodpovedajúci sklzu s_n , kde rozbeh končí a motor pracuje v motorickej oblasti. Postupným znižovaním sklzu k nule dôjde k zastaveniu motora. Tento stav môžeme vyjadriť nasledovnou rovnicou:

$$s = 0 \rightarrow \frac{n_s - n}{n_s} = 0 \leftrightarrow n_s - n = 0 \leftrightarrow n_s = n \rightarrow M = 0 \quad (1.7)$$

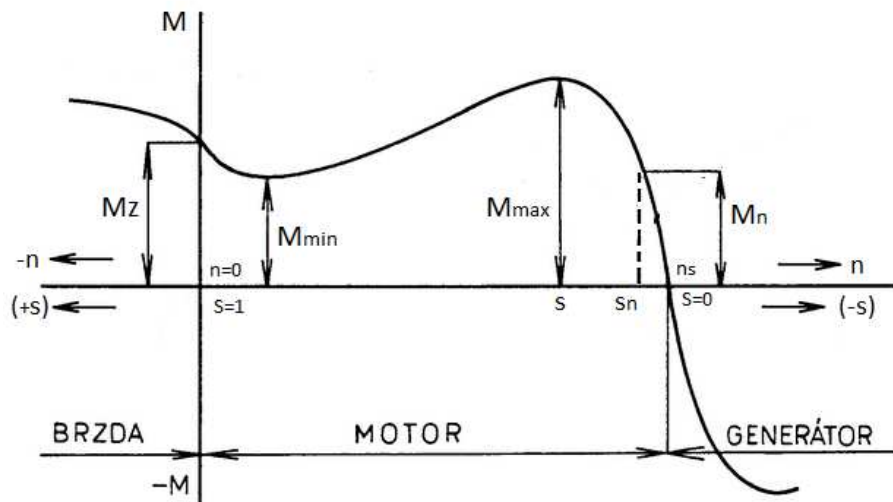
Z rovnice môžeme vidieť, že ak sa otáčky statorového poľa rovnajú otáčkam rotora, sklz je nulový čiže motor stojí.

1.3.3 Generátorická oblasť

Pre motor pracujúci v tejto oblasti platí: $s < 0$

$$s < 0 \rightarrow \frac{n_s - n}{n_s} < 0 \leftrightarrow n_s - n < 0 \leftrightarrow n_s < n \rightarrow M < 0 \quad (1.8)$$

Pokiaľ budeme stroj mechanicky poháňať, otáčky stroja stúpnu do nad synchronnej oblasti čomu odpovedá záporný sklz a stroj sa stáva generátorom. Moment M je záporný a motor začne dodávať elektrickú energiu do siete [4].



Obrázok 3: Momentová charakteristika asynchrónneho motora v brzdnej, motorickej a generátorickej oblasti (prevzaté z [1], upravené).

Vzorec pre výpočet mechanického momentu stroja M_{mech} :

(1.9)

$$M_{mech} = \frac{m_1 \cdot p \cdot U_1^2 \cdot \frac{R'_2}{s}}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_{r1} + X'_{r2})^2 \right]}$$

Kde: m_1počet fázy statorového vinutia

U_1veľkosť napájacieho napätia

I_1prúd

ppočet pol párov

X_rrozptylová indukčnosť

Rčinný odpor

1.4 Spúšťanie 3f asynchrónneho motora

Spúšťanie asynchrónneho motora je činnosť potrebná k rozbehu motora, behom ktorého sa mení rýchlosť, prúdy a moment. Pri častom spúšťaní majú plynulosť a rýchlosť týchto zmien značný vplyv na vlastnosti poháňaného zariadenia. V okamžiku pripojenia na elektrickú sieť preteká motorom záberný prúd obmedzený iba impedanciou motora nakrátko. Záberný prúd motorov spúšťaných priamym pripojením, býva približne 4 až 8 násobok menovitého prúdu v závislosti od konštrukčnej realizácie stroja.

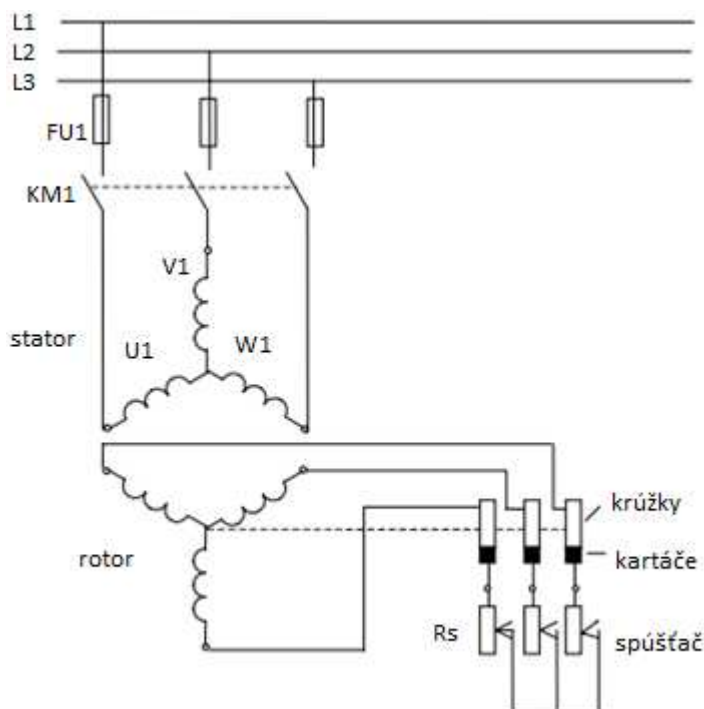
Aby sa motor uviedol do pohybu musia byť splnené nasledovné podmienky:

- Dostatočne veľký záberný moment M_z (prekonanie zaťaženia motora v kľude a pri rozbehu).
- Malý záberný prúd (čím sa zabráni veľkým prúdovým nárazom v sieti a úbytkom napätia ovplyvňujúcim rozbeh motora).

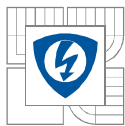
Vzhľadom na veľký rozbehový prúd norma povoľuje priame pripojenie asynchrónnych motorov na sieť do výkonu 3 kW. To ale neplatí v priemyselných závodoch a elektrárňach, kde sú napájacie prípojky veľkých výkonov.

1.4.1 Spúšťanie motora s kotvou krúžkovou

Motory s kotvou krúžkovou sa spúšťajú pomocou spúšťacieho odporu R_s , ktorý je zapojený do obvodu rotora. Odpor R_s je cez kartáče a krúžky pripojený k vinutiu rotora spojeného do hviezdy. Pri pripájaní motora na sieť je dôležité aby hodnota spúšťacieho odporu R_s bola maximálna. V priebehu spúšťania odpor postupne znižujeme až kým motor nedosiahne menovité otáčky. Po dosiahnutí menovitých otáčok je odpor následne vyradený.



Obrázok 4: Schéma spúšťania AM s kotvou krúžkovou [5].



1.4.2 Spúšťanie motora s kotvou nakrátko (kľietkové)

U motorov s kľietkovým vinutím nie je možné znižovať záberný prúd pri rozbehu motora zväčšovaním odporu rotorového obvodu. Ako sme už uviedli v predošlej kapitole, motory tohto druhu môžeme pripojiť priamo na sieť do výkonu 3 kW. U väčších výkonov je možné motory spúšťať znížením napätia na statore, čo má za následok zníženie prúdového nárazu. Znížením napätia na statore vedie aj k poklesu záberného momentu. Preto tento spôsob rozbehu sa využíva hlavne u motorov, kde sa nekladie dôraz na veľký záberný moment. Zníženie napätia na statore dosiahneme napríklad:

➤ Statorovým spúšťáčom

Spúšťáč je zapojený do série s trojfázovým statorovým vinutím. U motorov malých výkonov sa používa odpor u väčších spúšťacia tlmivka. Pri rozbehu dochádza k postupnému vyradovaniu prvkov.

➤ Auto transformátorom

Metóda je podobná ako pri spúšťaní statorovým spúšťáčom. Pri rozbehu motora na menovité otáčky sa auto transformátor vyradí. Túto metódu môžeme považovať za ekonomickejšiu.

➤ Prepínač hviezda – trojuholník

Prepínaním statorového vinutia Y-D dosiahneme zníženie záberného momentu až o tretinu. Motory sú navrhnuté pre normálny chod v zapojení do trojuholníka. Pri rozbehu je statorové vinutie pomocou prepínača zapojené do hviezdy. Ak si označíme impedanciu fáze Z a združené napätie U potečie v tomto prípade fázou prúd:

$$I_Y = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z} \quad (1.10)$$

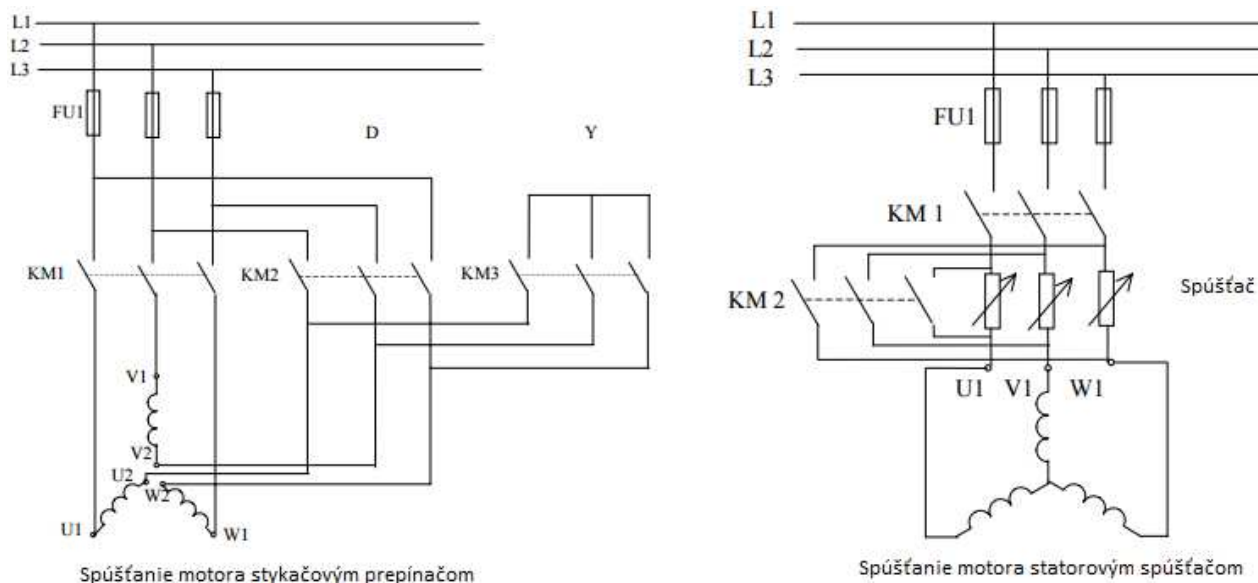
tento prúd je rovný prúdu združenému, ktorý motor odoberá z napájacej siete. Po dosiahnutí otáčok sa statorové vinutie prepne do trojuholníka. Jednotlivými fázami motora začne pretekať prúd:

$$I_{Df} = \frac{U}{Z} \quad (1.11)$$

V tej chvíli motor zapojený do trojuholníka odoberá zo siete prúd:

$$I_D = \sqrt{3} \cdot I_{Df} = \sqrt{3} \cdot \frac{U}{Z} \quad (1.12)$$

Pomer prúdov pri zapojení statorového vinutia Y/D je 1/3.

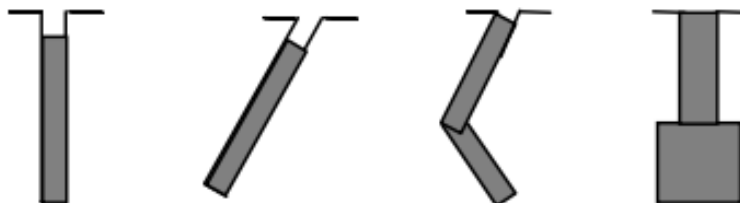


Obrázok 5: Spúšťanie AM s kotvou nakrátko [5].

1.5 Vinutie rotora 3f asynchrónneho motora

1.5.1 Vírivé kliečky

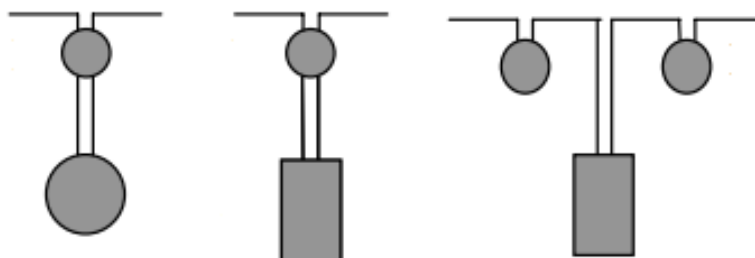
Ide o kliečkové vinutie s relatívne tenkými a dlhými vodičmi lichobežníkového alebo obdĺžnikového prierezu. Medzi vírivé kliečky radíme aj vodiče, ktoré majú zložitejší tvar a však plnia rovnakú funkciu. Myšlienka vírivých kliečkov spočíva v tom, že v prvej fáze rozbehu stroja kedy kmitočet rotora f_2 sa takmer rovná kmitočtu statora f_1 , vznikajú v tyčiach silné vírivé prúdy, vyvolané rozptylovým poľom prechádzajúcim cez drážky rotora. Vírivé prúdy sa spájajú s rotorovým prúdom, čím dochádza k zmene rozdelenia prúdovej hustoty v tyči. Prúd sa koncentruje predovšetkým v časti tyče, ktorá sa nachádza bližšie k vzduchovej medzere. Tým dochádza k nárastu elektrických strát, čomu odpovedá zaradenie dodatočných odporov rotora pri rozbehu. Zmenou rozdelenia prúdovej hustoty dochádza aj k poklesu reaktancie. Vírivé prúdy a nerovnomerné rozloženie prúdu v tyči sa postupným rozbiehaním motora znižuje. Pri menovitom zaťažení stroja je kmitočet malý a prúdová hustota je rozložená rovnomerne. Vírivé prúdy pôsobia predovšetkým v tých miestach tyčí, ktoré sú uložené v drážkach. Odpor tyče obdĺžnikového prierezu sa môže zvýšiť až 4 krát a reaktancia sa zmenší približne o 40 %. U lichobežníkových tyčí sú tieto hodnoty väčšie. V čelách a v radiálnych ventilačných kanáloch, kde tyče nie sú v železe, je zmena parametrov malá a s pravidla ju zanedbávame [3].



Obrázok 6: Tvar tyčí vírivých kliečkov [6].

1.5.2 Dvojité kliečky

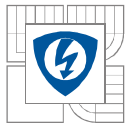
Kliečkové vinutie s dvomi sústavami sa nazýva dvojitá kliečka. Vonkajšia kliečka má tvar tyče kruhového prierezu. Tyče sú zhotovené z normálnej alebo legovanej mosadze, čím sa dosiahne zvýšenie merného odporu. Vnútorňa kliečka pozostáva z obdĺžnikových alebo kruhových tyčí. Kruhy a vnútorné tyče kliečky sú z medeného materiálu. Niekedy sa môžu obe kliečky odlievať z hliníku a majú spoločné kruhy nakrátko. Tyče oboch kliečok sú vodivo spojené v úzkej medzere medzi drážkami. V prvej fáze rozbehu motora je reaktancia vnútornej kliečky značne väčšia ako v prípade vonkajšej kliečky. Preto rotorový prúd preteká zväčša vonkajšou kliečkou s veľkým odporom, čím dosiahneme zníženie záberného prúdu motora a zvýšenie záberného momentu. Postupným rozbehom kmitočet rotoru klesá a prúd rotoru viac preteká vnútornou kliečkou. Pri malých sklzoch je reaktancia kliečok pomerne malá a prúdy v nich sa rozkladajú nepriamo úmerne odporom kliečok. Prúd preteká vo väčšej miere vnútornou kliečkou, ktorá má tyče väčšieho prierezu a materiál týchto tyčí má menší merný odpor [3].



Obrázok 7: Úprava tyčí dvojitej kliečky.

1.5.3 Špeciálne rotory

V niektorých situáciách je dôležité použiť motory so špeciálnymi rotormi. Tieto rotory sa využívajú napríklad pre zvláštne rýchlobežné stroje, ktoré sú napájané kmitočtom väčším než 50 Hz a otáčajú sa rýchlosťou nad 3000 ot/min. Pre takéto prípady sa používajú oceľové rotory, ktoré sa vyznačujú vysokou mechanickou pevnosťou. Niekedy povrch rotorov je zo strany vzduchovej medzery pomedený. Asynchrónne motory s masívnymi rotormi majú podobnú momentovú charakteristiku ako motory s veľkým odporom rotora. Moment dosahuje svoje maximum pri sklze $s > 1$. Podrobnejší opis tohto typu stroja si uvedieme v kapitole 2.1. U motorov s čo najmenším zotrvačným momentom sa rotor vyrába z medi, mosadze alebo hliníku v tvare dutého valca. Rotor sa otáča medzi statorom a ďalšou stojacou časťou magnetického obvodu. Vzájomným pôsobením magnetického poľa a vírivých prúdov pretekajúcich dutým valcom vzniká moment. Momentová charakteristika je obdobná momentovej charakteristike motora s masívnym rotorom [6].



2 JEDNOFÁZOVÉ ASYNCHRÓNNE STROJE

Ide o motory malého výkonu (do 1,5 kW), ktoré sa väčšinou pripájajú na jednofázovú sieť 230 V. Motory nachádzajú uplatnenie predovšetkým v domácnostiach ako sú ventilátory, pračky, odstredivky, kosačky na trávu a predovšetkým tam, kde nie je k dispozícii trojfázová sieť. Jednofázové motory nevytvárajú točivé elektromagnetické pole, ale pole pulzujúce, a preto u týchto motorov je hlavným problémom rozbeh v správnom smere. Majú vždy klietkový rotor. Existujú rôzne spôsoby ako dosiahneme rozbeh motora. Niektoré z týchto spôsobov si popíšeme v nasledujúcich odstavcoch.

1) Asynchrónny motor s pomocným odporovým vinutím.

U tohto typu motora je okrem hlavného vinutia na statore ešte prídavné vinutie so zvýšeným odporom, ktorého magnetická os sa zvierá s osou hlavného vinutia 90° elektrických. Pri dosiahnutí menovitých otáčok sa prídavné vinutie odpojí odstredivým, časovým alebo prúdovým vypínačom. Motory sa vyznačujú horším záberným momentom ako trojfázové motory. Pretože vinutie nie je dimenzované na ťažkú prevádzku, nachádzajú motory uplatnenie hlavne v oblasti, kde sa nevyžaduje veľký moment v celom rozsahu otáčok inak by došlo k prehriatiu a následne k poruche stroja.

2) Asynchrónny motor s kondenzátorom v rozbehovom vinutí.

Na rozdiel od predošlého typu motory s kondenzátorom vo vinutí, sa vyznačujú veľkým záberným momentom napr. pohon kompresorov. Obsahujú zotrvačnik na hriadelí, vďaka ktorému prekonávajú rozdiely zaťaženia v celom rozsahu otáčok. Tak isto ako aj predošlý typ je pomocná fáza s kondenzátorom pripojená pomocou vypínača. Ako rozbehový kondenzátor v jednofázovej sieti (230 V, 50 Hz) sa používa špeciálny elektrolytický kondenzátor s kapacitou najmenej 70 nF a viac (záleží od výkonu a požadovaného momentu). Tieto kondenzátory sa využívajú iba pre krátkodobú prevádzku.

3) Asynchrónny motor s trvalo pripojeným kondenzátorom.

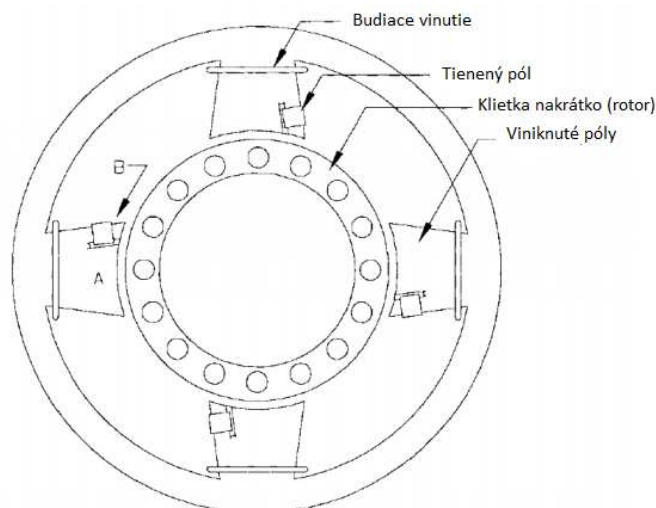
Motory tohto typu sa vyznačujú malým záberným momentom, ale celková momentová charakteristika a účinnosť je zo všetkých typov najlepšia. Uplatňujú sa v zariadeniach, kde je rozbeh motora bez zaťaženia. Motory nie je vhodné prevádzkovať úplne bez zaťaženia, lebo na kondenzátore dochádza k zvýšeniu napätia ako je sieťové. Čím dochádza k vyššiemu namáhaniu izolácie vinutia prípadne hrozí nebezpečie prerazu kondenzátora. Kondenzátory spravidla volíme na vyššie napätia ako je napájacie napätie stroja a omnoho menšou kapacitou, ako bolo v predchádzajúcom prípade. Rozsah otáčok motora regulujeme pomocou regulačných auto transformátorov, premennými odpormi, prípadne regulátorom napätia pri takmer konštantnom momente [7].

3 ZVLÁŠTNE TYPY ASYNCHRÓNNYCH MOTOROV

Podľa účelu, pracovných podmienok a vykonávanej funkcie, požadujeme od strojov rôzne otáčky, druhy napájania či veľkosť krútiaceho momentu. V kapitole sa budeme zaoberať zvláštnymi druhmi asynchrónnych motorov, ako sú napríklad motory s tienеным pólom, hysterézne motory, motory s plným rotorom či lineárne motory, ktorých teória v mnohom súhlasí s bežnými asynchrónnymi strojmi. Preto sa budeme zaoberať najmä odlišnou pracovnou činnosťou a konštrukčným prevedením jednotlivých typov.

3.1 Asynchrónny motor s tienеным pólom

Ide o motory najmenších výkonov približne do 20 W. Tieto motory neobsahujú pomocné vinutie. Vďaka malému zábernému momentu nachádzajú uplatnenie v spotrebičoch s ľahkým rozbehom, ako sú napríklad ventilátory a gramofóny. Stator je zložený z plechov, obsahuje vyniknuté póly a vnútri pólových drážkach je uložené budiace vinutie. Vinutie je tvorené holými vodičmi spojenými na krátko. Rozbehové vinutie je nahradené závitmi nakrátko umiestnenými na pólových nastavcoch (obr.8 Tienený pól). Rotor je realizovaný ako kotva nakrátko. Tak ako aj u predchádzajúcich typoch uvedených v predošlých odstavcoch, je potrebné pre vznik krútiaceho momentu, vytvoriť točivé elektromagnetické pole kruhového alebo eliptického tvaru. Pre vznik kruhového poľa musí byť celá sústava súmerná, to je rovnaké vinutie a prúdy fáz. Následne priestorové natočenie fáz sa musí zhodovať fázovému posunu medzi prúdy, to jest 90° elektrických. Priestorového a časového posunu dvoch pólí dosiahneme závitom nakrátko uloženým v každom budiacom póle a magnetickým bočníkom meniacim reluktanciu po obvodu vzduchovej medzery.



Obrázok 8: Jednofázový asynchrónny motor s tienеным pólom [8],(prevzaté z [9], upravené).

Motor pracuje vo veľkom sklze. Pracovné otáčky takýchto strojov sa nachádzajú v rozmedzí 1200 až 2400 ot/min. Účinnosť motorov η je veľmi malá a pohybuje sa od 0,1 do 0,25, účinník $\cos \varphi = 0,6$. Výhodou motorov s tienеным pólom je predovšetkým jeho jednoduchá konštrukcia a lacná výroba. Smer otáčok je určený tieniacim závitom nakrátko k budiacemu pólu. V prípade zaistenie zmeny smeru otáčania sú motory opatrené dvoma závitmi na každom póle, pričom zapojený je vždy len jeden. Pre dosiahnutie požadovanej zmeny chodu motora sa rozpojí závit, ktorým pretekal prúd a spojí sa druhý závit nakrátko, ktorým prúd neprechádzal [10].

3.2 Motor typu Ferraris

Hysterézne motory môžeme považovať za synchronné motory bez vyniknutých pólov a jednosmerného budenia, ktorý začína v dôsledku hysteréznych strát indukovaných na sekundárnej strane kalenej ocele otáčajúcej sa v primárnej oblasti. Motor pracuje v synchronných otáčkach a vytvára konštantný hysterézny moment vďaka remanencii v sekundárnom jadre. Z toho vyplýva, že veľkosť hysterézneho momentu, nie je závislý od rýchlostí otáčania rotora, ale od veľkosti remanencie.

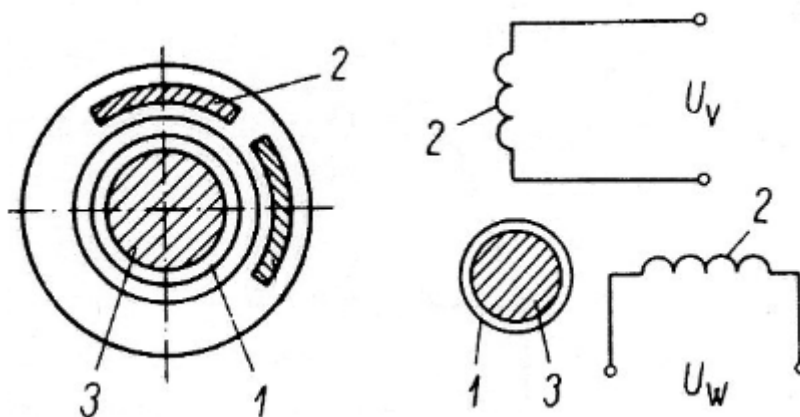
Obrázok 9 znázorňuje konštrukciu motora typu Ferraris, kde na statore je uložené dvojfázové vinutie 2 s magnetickými osami kolmými na seba, čím je zaistená podmienka pre vytvorenie točivého magnetického poľa. Rotor označený na obrázku číslom 1 je tvorený nemagnetickým bubienkom o malej hrúbke umiestnený na hriadieli. Medzi statorom a nepohyblivou časťou 3 je vzduchová medzera, ktorá umožňuje otáčanie bubienka. Rotor sa začne otáčať v dôsledku vírivých prúdov a hysterézneho krútiaceho momentu vyvinutého na rotor. Akonáhle je rýchlosť otáčania v blízkosti synchronných otáčok, stator vtiahne rotor do synchronizmu. Motory tohto typu sa vyrábajú s výkonom niekoľko desiatok wattov a majú obdobnú momentovú charakteristiku ako motory s plným rotorom. Pre svoju malú zotrvačnosť a tichý chod, nachádzajú uplatnenie predovšetkým v rôznych regulačných obvodoch napr. servopohony, vysoko kvalitné gramofóny, ďalekopisy, elektrické hodiny či zvukové záznamníky [13].

Výhody hysterézneho motora:

- Rotor motora neobsahuje zuby, žiadne vinutie a nevznikajú mechanické vibrácie.
- Vzhľadom k neexistencii vibrácií chod motora je tichý a nehlučný.
- Krútiaci moment nezáleží na rýchlosti.
- Dlhý bez údržbový život.

Nevýhody hysterézneho motora:

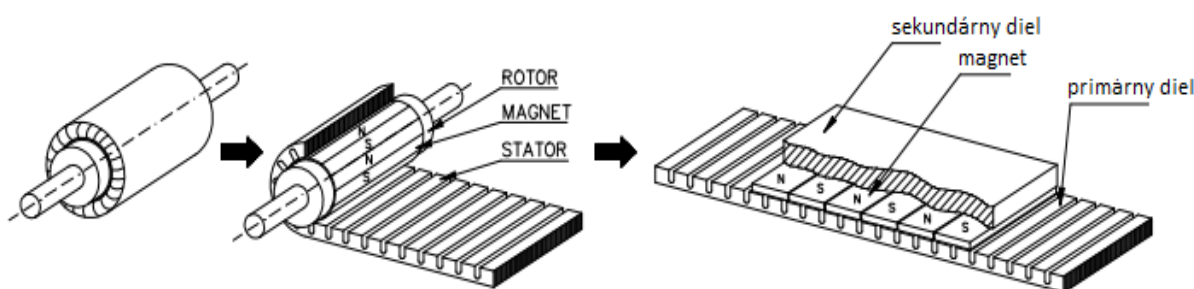
- Výstupný výkon motora oproti ostatným typom indukčných motorov je asi jedna štvrtina.
- Nízka účinnosť
- Nízky účinník
- Nízky krútiaci moment
- Dostupný vo veľmi malých konštrukčných veľkostiach.



Obrázok 9: Usporiadanie a schéma Ferrarisova motorčeka [13].

3.3 Lineárny asynchrónny motor

Motory tohto typu pracujú na rovnakom princípe ako asynchrónne stroje. Lineárny motor si môžeme predstaviť ako asynchrónny motor s kotvou nakrátko rozvinutý do roviny podľa obr.10. Potom dostaneme motor, ktorého magnetické pole nie je točivé, ale postupné. Rýchlosť postupného poľa závisí od kmitočtu prúdu, usporiadaní a vzájomnej vzdialenosti pólov indikátorov. K indukčnému pôsobeniu postupného poľa na kotvu je potrebný sklz. Pri zaťažení motora môže v niektorých prípadoch dosahovať až 50 %. To spôsobuje veľká vzduchová medzera a veľký odpor kotvy.



Obrázok 10: Princíp Lineárneho asynchrónneho motora [17].

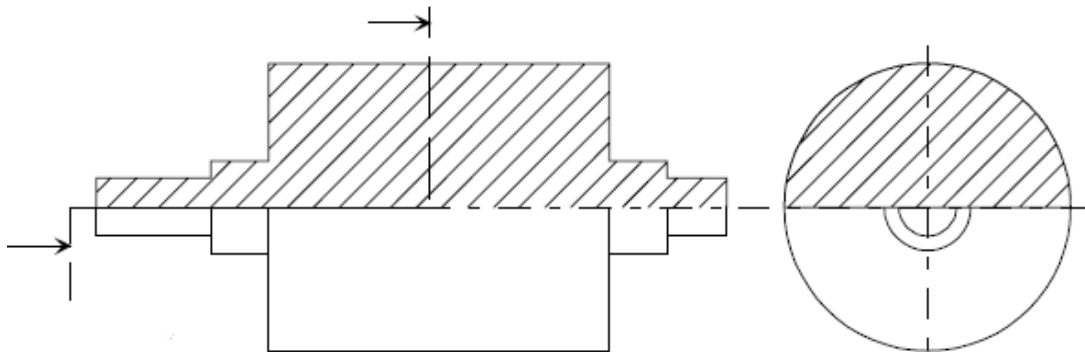
Primárnou časťou u týchto strojov spravidla označujeme stator a sekundárnu časť rotor (kotva). Stator pozostáva z feromagnetického zväzku zloženého z elektronických plechov a trojfázového vinutia uloženého v statorových drážkach. Vinutie rotoru je klieťkové, uložené buď do drážok feromagnetického zväzku alebo v podobe hliníkového (medeného) pásu pripevneného na ocelovú podložku poháňaného zariadenia. Či sa bude pohybovať primárna alebo sekundárna časť stroja rozhoduje konštrukcia stroja. Vo väčšine prípadov sa pohybuje stator po dráhe tvorenou ľubovoľným počtom sekundárnych dielov. Toto zapojenie samozrejme vyžaduje pohyblivý napájací kábel, snímač polohy a pohyblivý prívod a odvod chladiacej kvapaliny. Vďaka svojej nenáročnej konštrukcii a malej hmotnosti nachádzajú uplatnenie v oblasti trakcie, dopravy, pohony výťahov. Ďalšou výhodou je pripojenie k napájacej sieti 3 x 400 V / 50 Hz bez použitia meničov kmitočtu [17].

3.4 Asynchrónny motor s plným rotorom

Zvláštnosť tohto motora spočíva v jednoduchosti prevedenia samotného rotora. Pri bežnej konštrukcii asynchrónnych motorov bola kotva vinutá alebo klieťková. V tomto prípade rotor pozostáva z plného hladkého, ocelového valca, ktorý má veľkú permeabilitu. Masívny ocelový valec z mäkkej ocele predstavuje feromagnetický obvod, ktorým sa uzatvára magnetický tok vytvorený statorom a nekonečný počet paralelných zapojených vodičov, ktorým prechádzajú prúdy, vplyvom indukovaného napätia rotora. Prúdy týchto rotorov sú prúdmi vírivými a sústreďujú sa na povrchu. Hĺbka ich vniknutia do rotora závisí na sklze [10]. Plný ocelový valec je teda z konštrukčného hľadiska najjednoduchšia a najlacnejšia alternatíva výroby rotora. Z jednotlivých typov rotorov sa vyznačuje taktiež najlepšimi mechanickými a dynamickými vlastnosťami na úkor horších elektrických vlastností. A však v praxi je motor nahradený niekoľkými modifikáciami, ako je vyfrézovanie axiálnych drážok do rotora, či rotor vybavený medenými kruhmi alebo pevnou medenou klieťkou. To umožňuje získať značne vyšší výkon, väčší krútiaci moment (3 až 4 krát), o niečo lepší účinník $\cos \varphi$ a vyššiu účinnosť η . Je to spôsobené predovšetkým stratami v rotore, ktoré sú značné oproti rotorom z medenej klieťky.

Samotná konštrukcia rotora ponúka niekoľko výhod:

- Vysoká mechanická integrita, tuhosť a odolnosť. Rotor je zo všetkých typov oveľa stabilnejší a udržuje najlepšiu rovnováhu,
- Vyznačuje sa vysokou tepelnou odolnosťou,
- Odolný proti agresívnym chemikáliám,
- Vysoká spoľahlivosť,
- Jednoduchá konštrukcia a lacná výroba,
- Využitie predovšetkým vo vysokootáčkových motoroch,
- Nízka úroveň hluku a vibrácií.



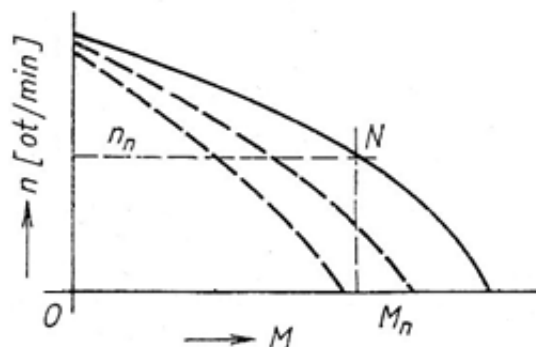
Obrázok 11: Asynchronný motor s masívnym ocelovým rotorom [11].

Motory s plným rotorom majú veľkú impedanciu, preto má oproti iným typom pri rovnakých rozmeroch relatívne malý výkon, veľký sklz a už spomínané straty v rotore. Indukčná zložka u týchto motorov môže byť znížená nasledujúcimi spôsobmi:

- Hladký rotor je vyrobený z feromagnetického materiálu z čo najmenším pomerom permeability k elektrickej vodivosti.
- Vytvorením drážok v rotore, čím sa zlepší prienik magnetického toku.
- Vrstvená štruktúra vysoko vodivého povlaku nanosená na povrch rotora.
- Použitím kliebok nakrátko uložených v drážkach masívneho rotora.
- Motor napájaný na vyššiu frekvenciu ako je 50 Hz, čím dochádza k menšiemu sklzu.

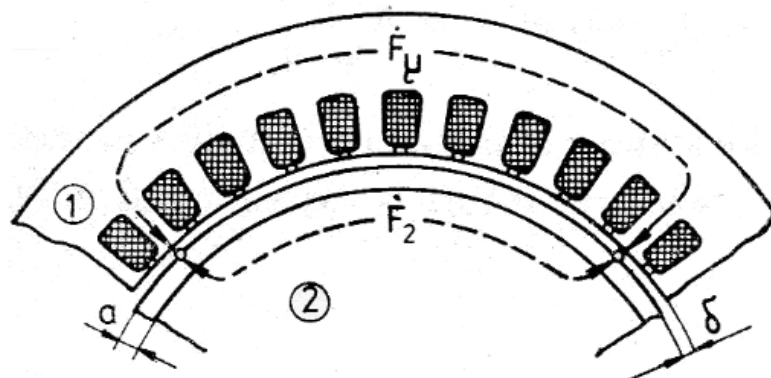
Rotory nachádzajú uplatnenie predovšetkým vo vysokorýchlostných motoroch a generátoroch, v pomocných motoroch pre spustenie turbo alternátorov, v motoroch pracujúcich v prostredí s vysokou teplotou, pri vysokých zrýchleniach, kde pôsobia chemické látky a pohony výťahov [11].

Na obr. 12 môžeme vidieť momentovú charakteristiku motora bez úpravy rotora. Charakteristiky tohto druhu motora sa výrazne líšia od charakteristík normálnych strojov. Zo závislosti $n = f(M)$ je vidieť, že charakteristika je takmer lineárna vo všetkých bodoch. Môžeme teda povedať, že motor vykazuje dokonalú stabilitu vo všetkých prevádzkových stavoch. Niekedy sa motor používa pre trvalý chod nakrátko. Otáčky stroja sú počas prevádzky takmer nulové a na hriadeli vzniká iba záberný moment. Vďaka tomu motor odoberá v stave nakrátko malú energiu a elektromagnetický moment je nezávislý na okamžitej polohe rotora voči statorovému vinutiu [10].



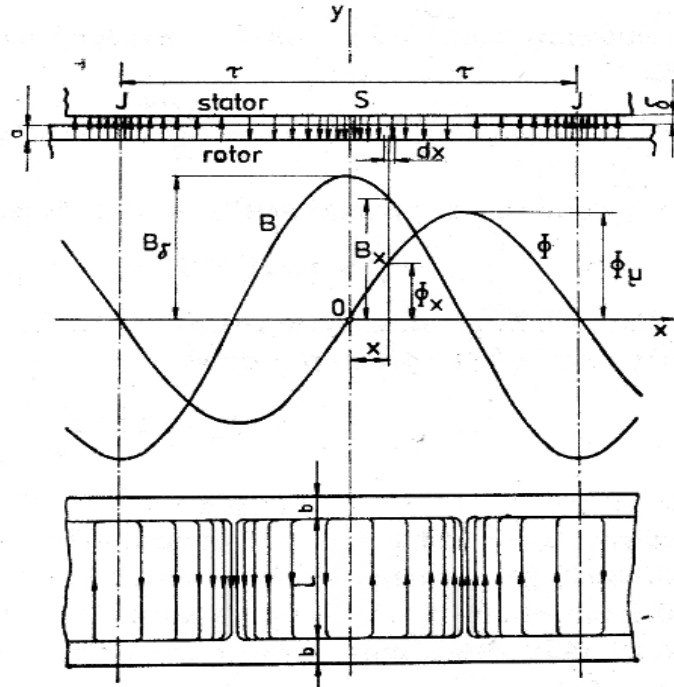
Obrázok 12: Momentová charakteristika asynchrónneho motora s plným rotorom [10].

Pri zábere asynchrónneho stroja, kedy sa v plnom rotore indukuje napätie sieťového kmitočtu, zapríčiňuje povrchový jav výrazné narastanie celkového odporu prúdu nakrátko. Povrchový jav (skinefekt) u motora s plným rotorom má veľa spoločného s dejom, ktorý prebieha v plnom vodiči napájaného striedavým prúdom alebo v plnom magnetickom obvode pri striedavom magnetickom toku Φ_x . Detailnejšie môžeme vystihnúť tieto pomery na modeli asynchrónneho motora s tienidlom (Obr. 13). Tienidlo je ochranný obal na povrchu rotora (2) o hrúbke a .



Obrázok 13: Model asynchrónneho motora s tienidlom na rotore [12].

Teraz si vyjadríme straty vírivými prúdmi v obale, ktoré vznikajú premagnetovaním pulzujúcim magnetickým pólom. Na obr. 14 je tvar poľa za predpokladu harmonického priebehu magnetickej indukcie B v medzere aj v tienidle [12].



Obrázok 14: Tvar indukcie pri harmonickom priebehu indukcie v medzere a tienidle [12].

$$B_x = B_\delta \cdot \cos\left(\frac{\pi}{\tau} \cdot x\right) \quad (3.1)$$

Pri uvážení obvodu v tvare obdĺžnika so stranami L a $2x$, ktorý je obmedzený elementárnymi vodičmi o priereze $a \cdot dx$ bude obvodom pretekať magnetický tok Φ_x podľa vzorca:

$$\Phi_x = 2 \cdot B_\delta \cdot L \cdot \tau \cdot \sin\left(\frac{\pi}{\tau}\right) / \pi \quad (3.2)$$

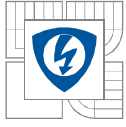
Vzorec (3.3) nám definuje efektívnu veľkosť elektromotorického napätia, ktorý je indukovaný vo vymedzenom obvode pri harmonickej zmene toku Φ_x .

$$E_x = \pi \cdot \sqrt{2} \cdot f_2 \cdot \Phi_x = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot B_\delta \cdot L \cdot \tau \cdot f_2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{\tau}\right) / \pi \quad (3.3)$$

Pri zanedbaní odporu čiel, bude odpor elementárneho úseku:

$$R_x = \frac{2L}{\gamma a dx} \quad (3.4)$$

Kde γ je úmerná vodivosť obalu v aktívnej časti. Odpor čiel je možné zanedbať iba v prípade, kedy dĺžka rotoru L je oveľa väčšia ako pólová rozteč τ , alebo keď vodivosť tienidla za hranicami aktívnej dĺžky L značne prevyšuje vodivosť tienidla v medziach dĺžky L . To je možné dosiahnuť len v prípade, kedy aktívne a čelné časti obalu sa vyrobia z vhodných materiálov [12].



Straty v vo vymedzenom elementárnom odpore učíme zo vzorca (3.3) a (3.4).

$$dP_x = E_x^2 \cdot R_x = 4B_\delta^2 \cdot L \cdot \tau^2 \cdot f_2^2 \cdot \gamma \cdot a \cdot \sin^2\left(\frac{\pi}{\tau}x\right) dx \quad (3.5)$$

Po integrácii výrazu (3.5) v rozmedzí 0 až $\tau/2$ a vynásobením počtom pólov $2p$ dostaneme straty v celom obale.

$$P = 2p \int_0^{\tau/2} 4B_\delta^2 \cdot L \cdot \tau^2 \cdot f_2^2 \cdot \gamma \cdot a \cdot \sin^2\left(\frac{\pi}{\tau}x\right) dx = 2p \cdot B_\delta^2 \cdot L \cdot \tau^3 f_2^2 \cdot \gamma \cdot a \quad (3.6)$$

Pri uvážení vznikajúcich strát pri premagnetovávaní v točivom magnetickom poli, ktoré sú dvakrát väčšie ako v poli pulzujúcom o rovnakej amplitúde, upravíme výraz (3.6):

$$P_t = 2P = 4p \cdot B_\delta^2 \cdot L \cdot \tau^3 f_2^2 \cdot \gamma \cdot a \quad (3.7)$$

Rovnocenný činný odpor obalu prepočítaný na odpor fáze statoru R'_2 určíme z rovnosti strát:

$$P_t = \frac{m \cdot E_2'^2}{R'_2} = 4p \cdot B_\delta^2 \cdot L \cdot \tau^3 f_2^2 \cdot \gamma \cdot a \quad (3.8)$$

kde sekundárne elektromotorické napätie prepočítané na fázu statoru je:

$$E_2' = \pi \cdot \sqrt{2} \cdot f_2 \cdot N_1 \cdot k_{v1} \cdot \Phi_\mu = \sqrt{2} \cdot f_2 \cdot N_1 \cdot k_{v1} \cdot B_\delta \cdot \alpha_\delta \cdot \tau \cdot L \quad (3.9)$$

Pri sínusovom rozložení indukcie pozdĺž pólovej rozteče τ , kedy platí $\alpha_\delta = 2/\pi$, môžeme napísať výraz pre odpor fáze statoru:

$$R'_2 = \frac{2m \cdot \Lambda \cdot (N_1 \cdot k_{v1})^2}{p \cdot \gamma \cdot a} \quad (3.10)$$

kde $\Lambda = L/\tau$. Následne si prevedieme ekvivalentný činný odpor prúdovej vrstvy z valcového povrchu rotora asynchrónneho motora na fázu statora. S ohľadom na skinefekt je hrúbka vrstvy rovná hĺbke vniku a , keďže odpovedá vodivému obalu či tienidlu na rotore. Pri definovaní vzťahu

$$a(\mu \neq konst) = \frac{1}{\sqrt{\omega \cdot \gamma \cdot \mu_e}} \quad (3.11)$$

vloženým do výrazu (3.11), dostaneme rovnocenný činný odpor plného rotora prepočítaný na fázu statoru:

$$R'_2 = \frac{2m \cdot \Lambda \cdot (N_1 \cdot k_{v1})^2}{p \cdot \gamma} \cdot \sqrt{\omega_2 \cdot \mu_e \cdot \gamma} = \frac{5m \cdot \Lambda \cdot (N_1 \cdot k_{v1})^2}{p} \cdot \sqrt{\frac{\mu_e \cdot f_1 \cdot s}{\gamma}} \quad (3.12)$$

kde $X'_2 = 0,6 \cdot R'_2$ následkom toho je ekvivalentná impedancia asynchrónneho stroja s plným rotorom:

$$Z'_2 = (5 + 3j) \cdot \frac{m \cdot \Lambda \cdot (N_1 \cdot k_{v1})^2}{p} \cdot \sqrt{\frac{\mu_e \cdot \mu_0 \cdot f_1 \cdot s}{\gamma}} = 5,82 \cdot \frac{m \cdot \Lambda \cdot (N_1 \cdot k_{v1})^2}{p} \cdot \sqrt{\frac{\mu_e \cdot \mu_0 \cdot f_1 \cdot s}{\gamma}} \angle 31^\circ \quad (3.13)$$

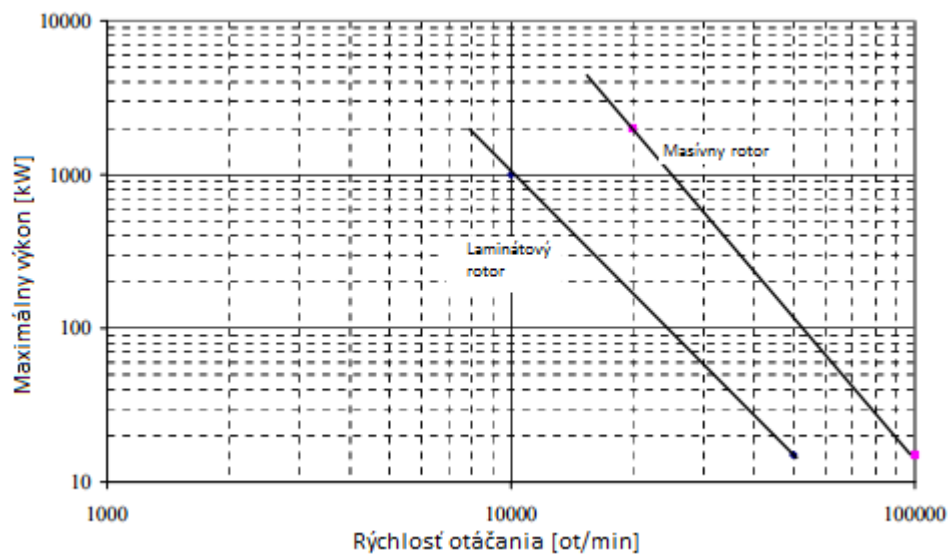
Hodnota koeficientov: $\mu_e = 100$, $\gamma = 5 \times 10^{-6}$ S/m

Zo vzorca (3.13) vyplýva nasledovné:

- Pri zmene sklzu dochádza k zmene Z'_2 úmerne \sqrt{s} .
- Impedancia stroja je ovplyvňovaná magnetickým nasýtením rotora.
- Platí pomer $X'_2/R'_2 \cong 0,6 = konst.$

3.4.1 Rozbor použitia plných rotorov

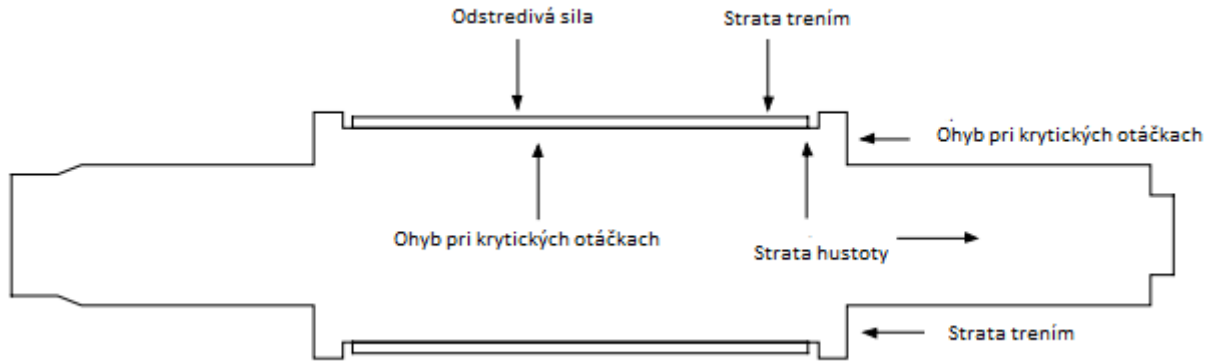
V tejto kapitole si priblížime využitie plných rotorov vo vysokorýchlostných motoroch. Hlavné výhody, vďaka ktorým nachádzajú uplatnenia vysokorýchlostné motory sú napríklad: zmenšenie konštrukčnej veľkosti stroja pri zachovaní výkonu, absencia mechanickej prevodovky či mechanických spojok. Stroje sa využívajú predovšetkým pre pohon ventilátorov, čerpadiel, turbín a kompresorov pričom najlepšia účinnosť týchto strojov je dosiahnutá pri vysokých rýchlostiach bez použitia prevodoviek. Krivka v Obr. 15 znázorňuje medznú hranicu výkonu masívneho rotora v závislosti na otáčkach pri tlaku 700 MPa. Maximálne prevádzkové otáčky rotora sú nastavené o 20 % pod hodnotu kritických otáčok. Z obrázka je ďalej možné vidieť, že masívne rotory je možné využívať do výkonov nad hranicu 10 MW pri konštrukčnej rýchlosti 20 000 ot/min.



Obrázok 15: Maximálny stanovený výkon motora v závislosti na otáčkach pri použití masívneho rotora (prevzaté z [11], upravené).

Pri návrhu satorového vinutia vysokorýchlostných motoroch je najdôležitejšie dbať na vytvorenie sínusového priebehu magnetického poľa vo vzduchovej medzere. V opačnom prípade vyššie harmonické zložky indukujú značné množstvo strát na rotore. Jedným zo spôsobov ako zlepšiť magnetomotorické napätie vo vzduchovej medzere je využitie dvojvrstvého vinutia alebo zvýšením počtu satorových drážok. U dvojvrstvého vinutia pootočením cievok v drážkach o vhodný uhol dochádza zániku niektorých harmonických.

Samotná konštrukcia masívneho rotora definuje výkonové parametre stroja. Obmedzenia, ktoré ovplyvňujú prevedenie vysokorýchlostného rotora môžu byť rozdelené do dvoch skupín: mechanické a tepelné. Mechanické limity obmedzujú výber materiálov použitých pri konštrukcii ako aj celkovú dĺžku či priemer rotora. Tepelné obmedzenia sa vzťahujú na zložky strát vo vnútri rotora a vo vzduchovej medzere. Rovnako sa týkajú výberu chladiacej sústavy. Obr. 16 ukazuje aké rôzne obmedzenia vyvíjajú tlak na geometriu rotora.



Obrázok 16: Vyvíjaný tlak na rotor v podkritickej prevádzke [14].

Odstredivé sily vznikajú otáčaním rotora okolo vlastnej osy, čím dochádza k namáhaniu materiálu rotora. Pri určitých otáčkach dosahuje tlak úroveň, kedy sa materiál trvalo deformuje. Aby sa zabránilo trvalej deštrukcii stanovil Reichert a Pasquarella vzťah pre výpočet maximálneho priemeru masívneho rotora D_r :

$$D_r \leq \sqrt{\frac{8 \cdot \sigma_{max}}{\rho \cdot \pi^2 \cdot n^2 \cdot (3 + \nu_p)}} \quad (3.14)$$

Mechanická nevyváženosť masívneho rotora môže zapríčiniť vznik vibrácií. Nadmerným vibráciám dochádza pri kritických otáčkach, kedy frekvencia otáčok pri nevyváženosti rotora sú v rezonancii s vlastnou frekvenciou rotora. Prvé dva kritické vibračné režimy majú nízku hodnotu frekvencie a na týchto frekvenciách rotor vibruje takmer ako tuhé teleso (bez výrazného ohybu). Frekvencie sú označované často ako kritické otáčky tuhého telesa. Vibrácie sa dajú tmiť pomocou magnetických ložísk. Na vyšších kmitočtoch dochádza k ohýbaniu rotora. Predbežný odhad, kedy nastane pri kritických otáčkach ohýbanie rotora stanovili vo vzorci Viggiano a Schweitzer [14]:

$$\omega_c = \sqrt{\left(\frac{d_r}{D_r}\right) \cdot \frac{3 \cdot E \cdot D_r^2}{\rho \cdot l_r^4}} \quad (3.15)$$

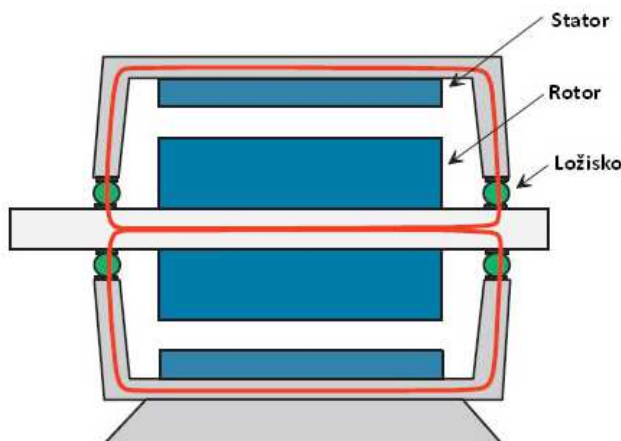
4 PORUCHY NA ASYNCHRÓNNYCH MOTOROCH

Asynchrónne motory pokiaľ pracujú v ideálnych podmienkach, patria medzi najspoľahlivejšie zariadenia v súčasnosti. Často krát sa stáva, že motory sa vyskytujú v neideálnych podmienkach, ktoré vedú k ich nečakaným poruchám. Táto kapitola sa bude zaoberať stručným prehľadom poruchových častí asynchrónnych motorov.

Za najporuchovejšiu časť môžeme považovať ložiská. Používajú sa najčastejšie valivé ložiská s rôznymi tvarmi valivých teliesok (gulčkové, súdkové, valčekové, ihlové...). K poškodeniu na týchto častiach dochádza najmä v dôsledku nesprávnej údržby. Správnym mazaním ložísk dosiahneme zníženie trenia, zabránime opotrebeniu či korózii a chránime ložisko pred vniknutím nečistôt, prípadne odviest' z ložiska vzniknuté teplo. Elektricky spôsobené poškodenie v ložiskách, zapríčinené ložiskovými prúdmi (Obr.17), vedie k výbojom medzi vnútornou a vonkajšou dráhou ložiska. Teplo, ktoré vzniká pri výbojoch zapríčiňuje lokálne roztavenie malých bodov v povrchu ložiskovej dráhy. Tým dochádza k mechanickému oslabeniu ložiska, zhoršeniu mazania a vibráciám. Na ložisku sa to prejavuje matným zafarbením guľčiek [19]. Ako ďalšiu príčinu poškodenia môžeme považovať nevyváženosť záťaže, nesúosovosť medzi hriadeľom a záťažou, čo následne vedie k vibráciám na elektrickom stroji.

Druhou skupinou porúch reprezentujú poruchy spôsobené na statoru. Príčina tohto poškodenia je spôsobená najmä dlhodobým preťažovaním motora alebo dôsledkom nesymetrie vstupného napätia čo vedie k prehrievaniu izolácií a následným skratom. Ide o medzizávitové skraty jednej fáze, dvoch fáz či vinutím a zemou.

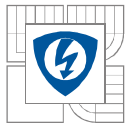
Poslednou skupinou porúch na asynchrónnych motoroch je závada rotora. Ide o menej vyskytujúcu sa poruchu zapríčinenú preťažovaním rotora častým spúšťaním či nesymetriou napájacieho napätia.



Obrázok 17: Ložiskové prúdy [19].

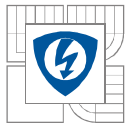
Príčiny a spôsob opráv jednotlivých porúch na asynchrónnom motore:

- a. Veľké zahrievanie ložiska
 - hnacie remene sú príliš napnuté (zníženie napnutí remeňov);
 - pokazené ložisko (výmena ložiska);
 - málo alebo príliš maziva (primazanie alebo zníženie maziva);
 - nepresné spojenie motora s poháňaným strojom (osovo vyrovnať obe časti a upevniť);



- zlé upevnenie motora na podložke (vyrovnanie motora na podklade);
- b. motor sa nerozbieha
 - prerušenie prívodu (odstrániť prerušenie);
 - prerušenie tavnou poistkou (poistku preskúšať a vymeniť);
 - vypnutie ochranou motora (kontrola nastavenia ochrany, merať odoberaný prúd);
 - prerušenie vinutia statora (skontrolovať vinutie, odstrániť prerušenie, previniť);
- c. motor sa rozbieha ťažko, pri zaťažení kolísajú otáčky
 - príliš veľká záťaž (skontrolovať výkon, zmenšiť záťaž, požiť motor s väčším výkonom);
 - motor je zapojený do Y, vinutie statora je dimenzované do Δ (skontrolovať zapojenie motora a prípadne prepojiť zo zapojenia Y na Δ);
 - prerušenie vinutia rotora alebo krúžky kotvy (odstrániť prerušenie, vymeniť rotor);
- d. motor sa príliš zahrieva
 - motor je preťažený (odstrániť príčinu preťaženia);
 - napätie je príliš nízke alebo vysoké (vyrozumieť prevádzkovateľa siete);
 - stator je zapojený do Δ miesto do Y (správne zapojiť vinutie);
 - porucha v chladení (odstrániť poruchu prívodu vzduchu);
 - prevádzka motora na dve fázy (zmerať napätie, odstrániť prerušenie);
- e. motor odoberá veľký prúd a hučí
 - zlé valivé ložiská (ložiská skontrolovať, poprípade vymeniť);
 - skrat vo vinutí (skontrolovať vinutie, stator previniť);
 - rotor sa trie o zväzok plechov (skontrolovať vzduchovú medzeru, vymeniť ložiska);
- f. pri zapnutí motora spustí prúdová ochrana
 - vinutie je skratované, popr. skrat na kostru (zmerať izolačný odpor, previniť stator);
 - skrat vo vodiči medzi spínačom a svorkovnicou (vodiče odpojiť, odstrániť izolačnú poruchu, prípadne vymeniť vodiče);
 - skrat medzi vodičmi v spúšťáči (spúšťáč oddeliť, zdvihnúť kartáče, skontrolovať, poprípade vymeniť vodiče);

Včasným odhalením jednotlivých porúch môžeme zabrániť trvalému poškodeniu elektrických strojov. V súčasnej dobe existujú na trhu tzv. inteligentné motory, ktoré obsahujú integrované senzory a elektroniku čo nám umožňuje snímať diagnostické dáta a okamžite vyhodnotiť aktuálny stav motora. Toto riešenie umožňuje použitie snímačov vibrácií či teploty priamo do motorov v optimálnych pozíciách z hľadiska včasného zistenia porúch. Avšak tento ideálny spôsob riešenia diagnostiky je nevýhodný z hľadiska veľkej predajnej ceny [20].



5 NUMERICKÝ VÝPOČET ASYNCHRÓNNEHO MOTORA S PLNÝM ROTOROM

Stanovené parametre boli určené približne na základe katalógového listu, ktorý ponúka firma ATAS spol. s.r.o. Firma ponúka asynchrónne motory malého výkonu s označením FT2B52D a NT4C. Jedná sa o trojfázový asynchrónny motor s výkonom 15 W a 180W, s menovitými otáčkami 2700 1/min a 2650 1/min.

Menovitý výkon:	100 W
Napájacie napätie:	400 V
Frekvencia napájania:	50 Hz
Menovité synchronné otáčky:	3000 min ⁻¹
Účinník:	cos φ = 0,7
Účinnosť stroja:	η = 60 %
Počet pólov:	2p = 2

5.1 Návrh hlavných rozmerov

Vnútorňý výkon:

$$P_i = \frac{P_2 \cdot k_{FE}}{\eta \cdot \cos \varphi} = \frac{100 \cdot (1 - 0,032)}{0,6 \cdot 0,7} = 230,5 \text{ VA} \quad (5.1)$$

Pomerný úbytok napätia je pre 2p = 2, u = 0,032

Vonkajší priemer statorových plechov:

$$D'_e = (1,95 \text{ až } 1,85) \cdot D = (1,85 \text{ až } 1,95) \cdot 0,045 = 0,0832 \text{ až } 0,0876 \text{ m} \quad (5.2)$$

Vnútorňý priemer D bol zadaný od firmy ATAS (D = 0,045 m)

Na základe predbežného stanovenia vonkajších rozmer bol vybraný priemer statorového plechu $D_e = 0,085 \text{ m}$.

Určenie pólovej rozteče:

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot D}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,045}{2} = 0,0707 \text{ m} = 70,7 \text{ mm} \quad (5.3)$$

Za predpokladu sínusového poľa a vplyvu sploštenia uvažujeme pri výpočte magnetického napätia jednotlivých úsekov obvodu

Činiteľ póloveho krytia:

$$\alpha_\delta = \frac{2}{\pi} = 0,64 \quad (5.4)$$

Činiteľ tvaru poľa:

$$k_B = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11 \quad (5.5)$$

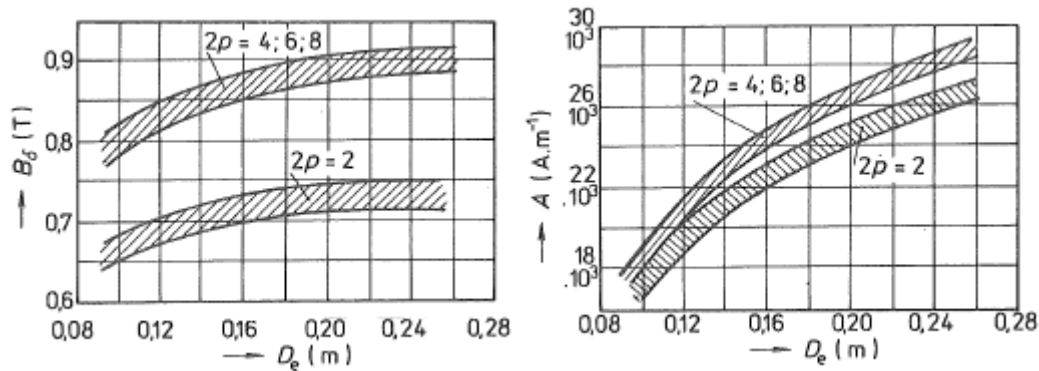
Synchronná rýchlosť hriadeľa:

$$\omega_s = 2\pi \cdot \frac{n}{60} = 2\pi \cdot \frac{3000}{60} = 314,16 \text{ rad/s} \quad (5.6)$$

Ideálna dĺžka vzduchovej medzere:

$$l_i = \frac{P_i}{D^2 \cdot \omega_s \cdot k_B \cdot k_{v1} \cdot A \cdot B_\delta} = \frac{230,5}{0,045^2 \cdot 314,16 \cdot 1,11 \cdot 0,96 \cdot 10000 \cdot 0,6} = 0,057 \text{ m} \quad (5.7)$$

Pre jednovrstvové vinutie uvažujeme činiteľ statorového vinutia $k_{v1}=0,96$. Lineárna hustota prúdu A a magnetická indukcia vo vzduchovej medzere B_δ boli určené na základe predbežného uváženia s ohľadom na skutočnosť, že hodnoty pre návrh motorov takto malých výkonov nie sú stanovené vid' z Obr. 18.



Obrázok 18: Lineárna hustota a indukcia vo vzduchovej medzere [15].

$$\lambda = \frac{l_i}{\tau_p} = \frac{0,057}{0,0707} = 0,806 \quad (5.8)$$

Kritériom správnosti hlavných rozmerov je pomer štiřlosti, ktorý určuje správnosť návrhu veľkosti aktívnej dĺžky zväzku l_{Fe} . V prípade, že by nebol štiřlostný pomer v dovolených medziach je potrebné výpočet opakovať pre inú normalizovanú výšku osy h . V tomto prípade je štiřlostný pomer v dovolených medziach. Na základe vyššie uvedeného upravujem hodnotu aktívnej dĺžky železa po zaokrúhlení na $l_{Fe} = 0,06\text{m}$.

Počet drážok:

$$Q_{1min} \text{ až } Q_{1max} = \frac{\pi \cdot D}{t_{dmin}} \text{ až } \frac{\pi \cdot D}{t_{dmax}} = \frac{\pi \cdot 0,048}{0,0062} \text{ až } \frac{\pi \cdot 0,048}{0,0095} = 24,32 \text{ až } 15,87 \quad (5.9)$$

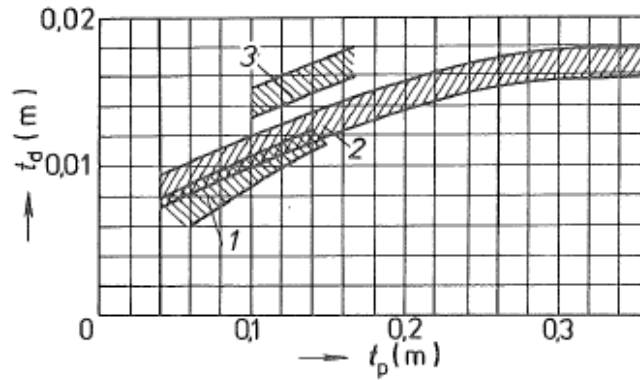
Rozmery t_{dmin} a t_{dmax} boli odčítané z Obr. 19. Na základe vypočítaných hodnôt volím počet drážok $Q_1=24$ aby počet drážok na pól a fázú q bolo celé číslo. Z kapitoly 3.4.1 vieme, že je dôležité dbať na vytvorenie sínusového priebehu vo vzduchovej medzere. Vzhľadom na to, že pri návrhu uvažujeme jednovrstvové vinutie volíme maximálny počet statorových drážok.

Počet drážok na pól a fázú:

$$q = \frac{Q_1}{2p \cdot m} = \frac{24}{2 \cdot 3} = 4 \quad (5.10)$$

Skutočná drážková rozteč:

$$\tau_{d1} = \frac{\pi \cdot D}{2p \cdot m \cdot q} = \frac{\pi \cdot 0,045}{2 \cdot 3 \cdot 4} = 5,89 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 5,89 \text{ mm} \quad (5.11)$$



Obrázok 19: Drážková rozteč [15].

Výpočet prúdu pretekajúcim v statorovom vinutí zapojeným do hviezdy:

$$I_{1n} = \frac{P_2}{m \cdot U_n \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,6 \cdot 0,7} = 0,344 \text{ A} \quad (5.12)$$

Počet vodičov v drážke pri podmienke, že vinutie má paralelné vetvy ($a=1$):

$$V_d' = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_{1N} \cdot Q_1} = \frac{\pi \cdot 0,045 \cdot 10000}{0,344 \cdot 24} = 171,24 \quad (5.13)$$

Počet drážok upravujeme na $V_d=175$.

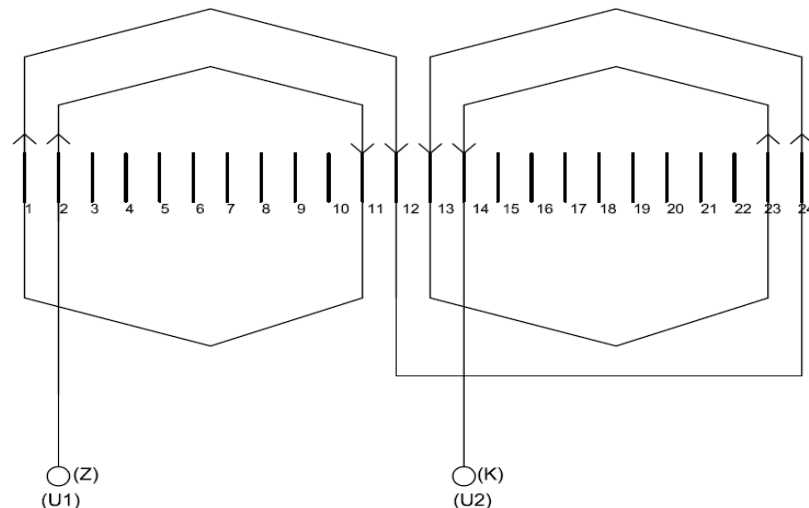
Počet závitov vo fáze:

$$N_1' = \frac{V_d' \cdot Q_1}{2 \cdot a \cdot m} = \frac{175 \cdot 24}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 700 \quad (5.14)$$

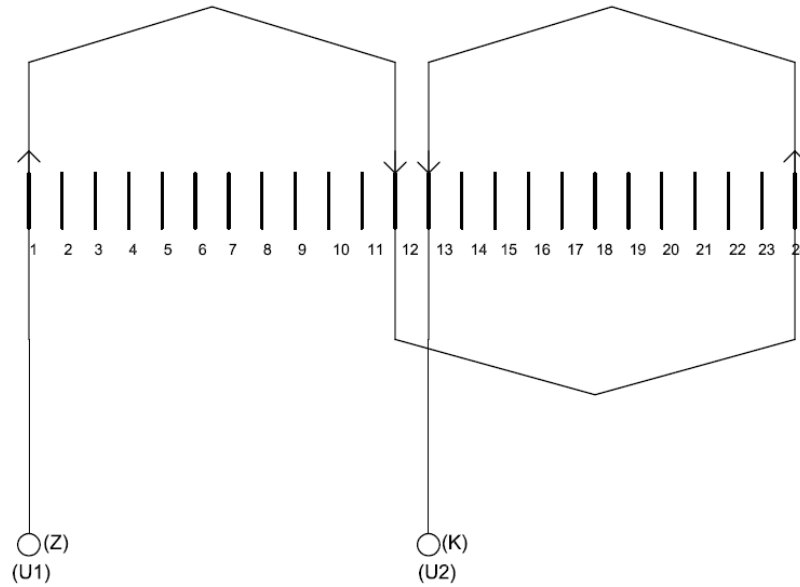
Skutočná lineárna hustota prúdu:

$$A = \frac{2 \cdot m \cdot N_1' \cdot I_{n1}}{\pi \cdot D} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 700 \cdot 0,344}{\pi \cdot 0,045} = 10219,9 \text{ A/m} \quad (5.15)$$

Statorové vinutie ako už bolo spomenuté navrhujeme jednovrstvové s plným krokom. Tieto vinutia môžu byť navinuté buď ako pól párové cievky, kde počet cievok je rovný počtu pólových dvojíc alebo pólové cievky, kde počet cievok je rovný počtu pólov.



Obrázok 20: Jednovrstvové vinutie s plným krokom navinuté ako pol párové cievky $m=3$, $q=4$, $Q=24$.



Obrázok 21: Jednovrstvové vinutie s plným krokom navinuté ako pólové cievky $m=3$, $q=4$, $Q=24$.

Činiteľ kroku:

$$k_y = \sin\left(\frac{y_d}{Q_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right) = 1 \quad (5.16)$$

Činiteľ rozlohy:

$$k_r = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m \cdot q}\right)} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot 3}\right)}{4 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot 3 \cdot 4}\right)} = 0,96 \quad (5.17)$$

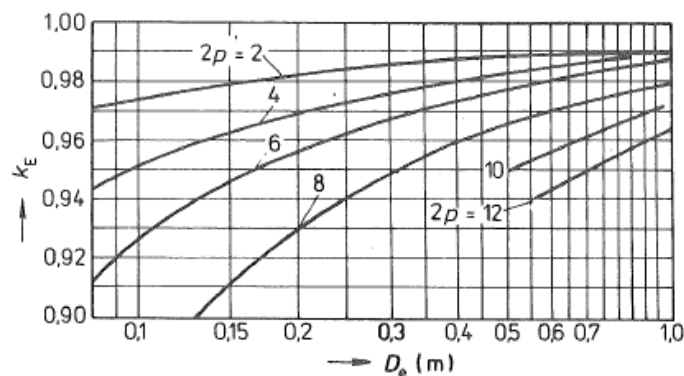
Činiteľ vinutia:

$$k_{v1} = k_y \cdot k_r = 1 \cdot 0,96 = 0,96 \quad (5.18)$$

Na základe skutočnej hodnoty činiteľa vinutia vypočítame hodnotu magnetického toku:

$$\Phi = \frac{k_E \cdot U_{1N}}{4 \cdot k_B \cdot N_1 \cdot f_1 \cdot k_{v1}} = \frac{0,972 \cdot 230}{4 \cdot 1,11 \cdot 700 \cdot 50 \cdot 0,96} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} \quad (5.19)$$

Pomer indukovaného napätia vinutia statora k menovitému napätiu $k_E=0,972$ bol odčítaný z Obr.22.



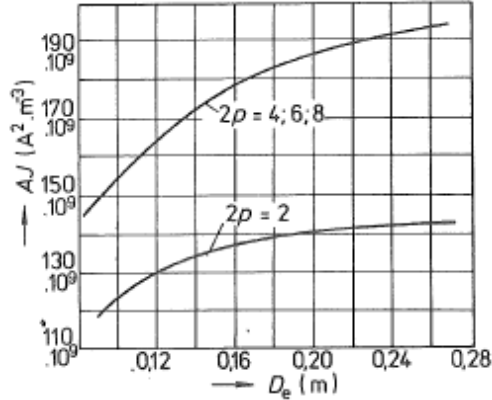
Obrázok 22: Hodnoty činiteľa k_E [15].

a z toho sa určí skutočná magnetická indukcia vo vzduchovej medzere:

$$B_{\delta} = \frac{p \cdot \phi}{D \cdot l_i} = \frac{1 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}}{0,045 \cdot 0,06} = 0,55 \text{ T} \quad (5.20)$$

Dovolená hustota prúdu:

$$J_1 = \frac{(AJ)}{A} = \frac{118 \cdot 10^9}{10219,9} = 11,5 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2 \quad (5.21)$$



Obrázok 23: Stredná hodnota súčinu AJ asynchrónneho motora [15].

Prierez efektívneho vodiča statorového vinutia:

$$S'_{ef1} = \frac{I_{N1}}{a \cdot J_1} = \frac{0,344}{1 \cdot 11,5 \cdot 10^6} = 0,0299 \text{ mm}^2 \quad (5.22)$$

z toho priemer vodiča:

$$d_s = \sqrt{\frac{S'_{ef1}}{\pi}} \cdot 2 = \sqrt{\frac{0,0299}{\pi}} \cdot 2 = 0,195 \text{ mm} \quad (5.23)$$

So zreteľom na jednoduchosť konštrukcie asynchrónneho motora s masívnym rotorom a zamedzeniu prehrievania vinutia statora volíme normalizovaný priemer vodiča vyšší ako je vypočítaný. Vodič je zvolený z normalizovanej rady podľa IEC 317-13 GR1. Priemer vodiča statora s jednoduchou izoláciou polyamidovým smaltom $d_{si}=0,280 \text{ mm}$ a k tomu odpovedajúci prierez $S_{di}=0,0616 \text{ mm}^2$.

Skutočná prúdová hustota pri použití normalizovaného prierezu vodiča s izoláciou:

$$J = \frac{I_{N1}}{a \cdot S_{ef}} = \frac{0,344}{1 \cdot 0,0616 \cdot 10^{-6}} = 5,58 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2 \quad (5.24)$$

5.2 Návrh rozmerov zubov a drážok statora typu L

Stanovenie šírky zubu statora:

$$b'_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_d}{B_z \cdot k_{Fe}} = \frac{0,55 \cdot 5,89}{1,4 \cdot 0,97} = 2,4 \text{ mm} \quad (5.25)$$

Činiteľ plnenia železa $k_{Fe} = 0,97$ pre $h=50$ až 250 mm , magnetickú indukciu v zube statora $B_z=1,4 \text{ T}$ volím menšiu ako je doporučená hodnota a $B_j=1,4 \text{ T}$ (pre zuby statora so vsypávaným vinutím, typ drážky L z Tab. 3)

Výpočet výšky jha statora:

$$h_{j1} = \frac{\varnothing}{2 \cdot B_{j1} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe}} = \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,4 \cdot 0,06 \cdot 0,97} = 9,2 \cdot 10^{-3} m = 9,2 mm \quad (5.26)$$

Hĺbka drážky:

$$h_{d1} = \frac{D_e - D}{2} - h_{j1} = \frac{0,085 - 0,045}{2} - 9,2 \cdot 10^{-3} = 10,8 \cdot 10^{-3} m = 10,8 mm \quad (5.27)$$

Predbežná šírka drážky:

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D + 2h_d)}{Q_1} - b'_{z1} = \frac{\pi \cdot (45 + 2 \cdot 10,8)}{24} - 2,4 = 6,3 mm \quad (5.28)$$

Otvorenie drážky b_0 býva volené na základe priemeru izolovaného vodiča:

$$b_0 = d_{si} + (1,5 \text{ až } 2) = 0,227 + 1,773 = 2 mm \quad (5.29)$$

Rozmer drážky b_2 pri $\beta=45^\circ$ a výšky otvorenia drážky $h_0=0,7 mm$:

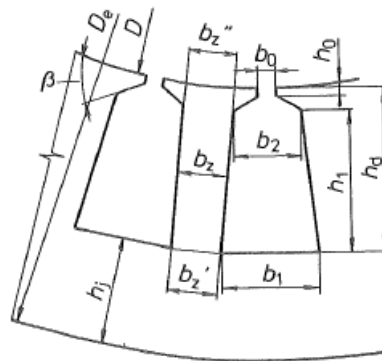
$$b_2 = \frac{\pi \cdot (D + 2h_0 - b_0) - Q_1 \cdot b_{z1}}{Q_1 - \pi} = \frac{\pi \cdot (45 + 2 \cdot 0,7 - 2) - 24 \cdot 2,4}{24 - \pi} = 3,9 mm \quad (5.30)$$

Rozmer drážky h_1 :

$$h_1 = h_{d1} - (h_0 + h_k) = 10,8 - (0,7 + 0,95) = 9,2 mm \quad (5.31)$$

kde výška klinovej časti h_k je :

$$h_k = \frac{b_2 - b_0}{2} = \frac{3,9 - 2}{2} = 0,95 mm \quad (5.32)$$



Obrázok 24: Rozmery drážky typu L a zubov statora pre vsypávané vinutie [15].

Drážku upravíme podľa normalizovaných rozmerov na: $b_1=6,2 mm$, $h_{d1}=11 mm$, $b_2=3,9 mm$, $h_1=9,1 mm$ a tomu odpovedajúca výška jha statora $9,1 mm$.

Svetlá plocha drážky pri uvažovaní vôle na zloženie plechov $\Delta b_d=0,1$ $\Delta h_d=0,1$ pre výšky osí $h=50$ až $132 mm$:

$$b'_1 = b_1 - \Delta b_d = 6,2 - 0,1 = 6,1 mm \quad (5.33)$$

$$b'_2 = b_2 - \Delta b_d = 3,9 - 0,1 = 3,8 mm \quad (5.34)$$

$$h'_1 = h_1 - \Delta h_d = 9,1 - 0,1 = 9 mm \quad (5.35)$$

Plocha drážky pre vinutie:

$$S_d = \frac{b'_1 + b'_2}{2} \cdot h'_1 = \frac{6,1 + 3,8}{2} \cdot 9 = 44,55 mm^2 \quad (5.36)$$

Činitel plnění drážky:

$$k_{dr} = \frac{s_{dr} \cdot v_d}{s_d} = \frac{0,0616 \cdot 175}{44,55} = 0,24 \quad (5.37)$$

Pre výpočet správnosti návrhu drážkových rozmerov slúži činitel plnenia drážky. Jeho hodnota by sa mala pohybovať okolo $k_{dr}=0,3$ pre vinutie do 660 V.

Veľkosť vzduchovej medzery:

$$\delta = (0,3 + 1,5 \cdot D) \cdot 10^{-3} = (0,3 + 1,5 \cdot 0,048) \cdot 10^{-3} = 0,37 \text{ mm} \quad (5.38)$$

Výpočet veľkosti vzduchovej medzere z empirického vzťahu pre motory $2p=2$ o výkonoch do 20kW volím po úprave na $\delta=0,25 \text{ mm}$.

5.3 Návrh rotora

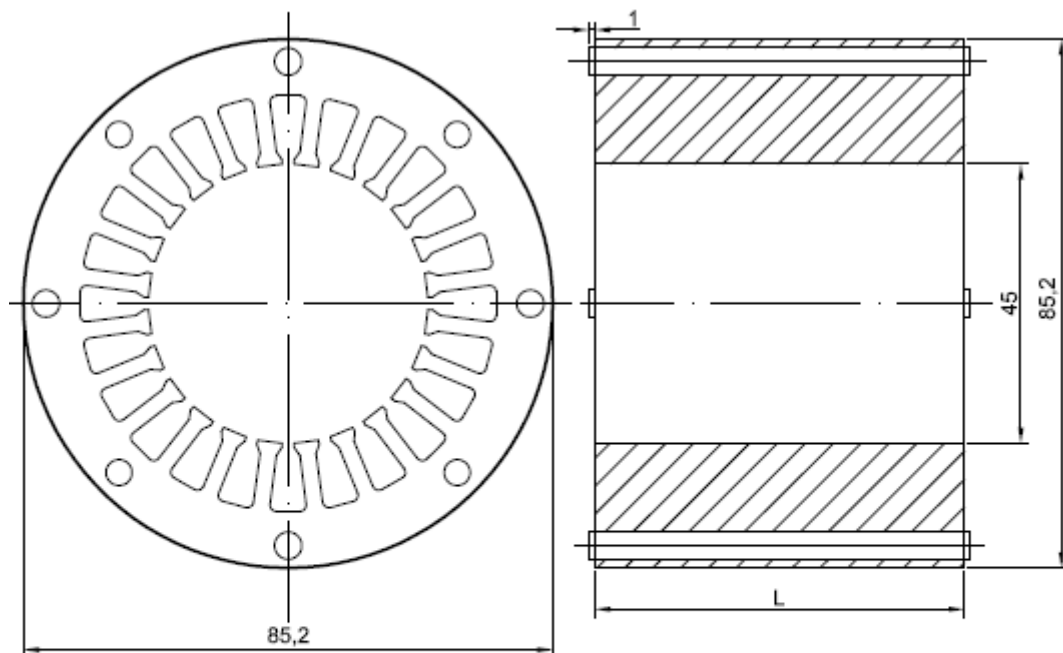
Dĺžku rotora uvažuje rovnakú ako bola zvolená pre stator $l_i=l_{Fe1} = l_{Fe2}=0,06 \text{ m}$

Výpočet vonkajšieho priemeru rotora čomu odpovedá aj výška jha rotora:

$$D_2 = D - 2\delta = 45 - 2 \cdot 0,25 = 44,5 \text{ mm} \quad (5.39)$$

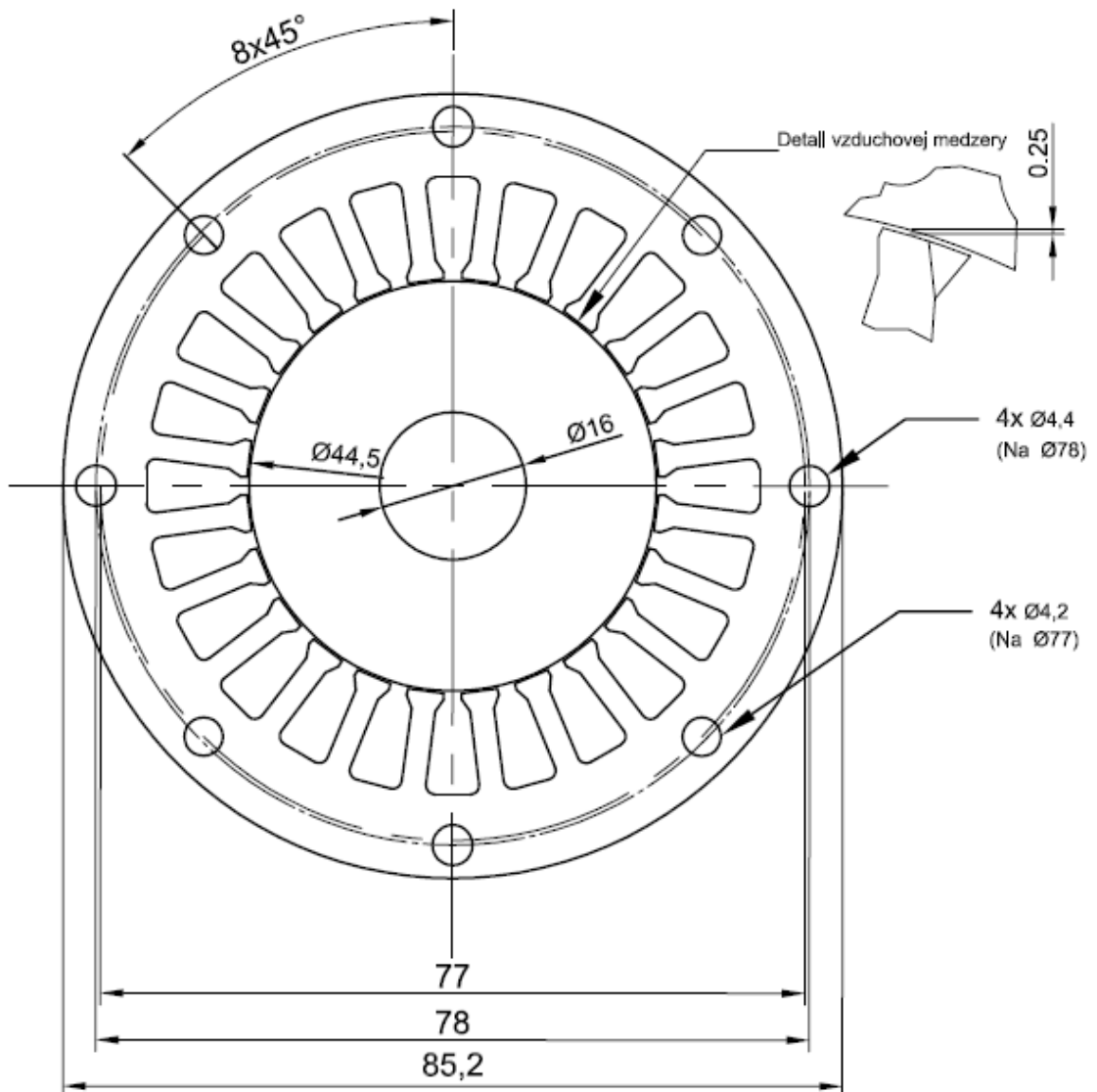
Priemer hriadeľa sa stanoví podľa činiteľa $k_h=0,19$ určeného pre motory s osovou výškou $h=50$ až 63 mm.

$$D_h = D_e \cdot k_h = 0,085 \cdot 0,19 = 0,016 \text{ m} = 16 \text{ mm} \quad (5.40)$$

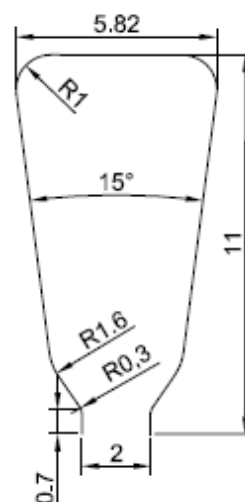


Typ plechu	L	Počet plechov
M700-50A	60	170

Obrázok 25: Pozdĺžny rez asynchrónneho motora s plným rotorom.



DETAIL D
5 : 1



Obrázok 26: Priechny rez asynchrónneho motora s plným rotorom.

5.4 Výpočet magnetického obvodu

Veľkosti indukcie v zuboch statora a v jhu statora boli zvolené pri vzorcoch (5.25 a 5.26).

Indukcia v jhu rotora:

$$B_{j2} = \frac{\emptyset}{h_{j2} \cdot l_{Fe}} = \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{0,0445 \cdot 0,06} = 0,55 \text{ T} \quad (5.41)$$

Bol zvolený statorový plech M700-50A, $H=363 \text{ A/m}$ pre $B_{z1}=1,4 \text{ T}$, $B_j=1,4 \text{ T}$, $\Delta p=4,83 \text{ W/kg}$ pri 50 Hz [16].

Magnetické napätie na zube statora:

$$U_{z1} = 2 \cdot h_{d1} \cdot H_{z1} = 2 \cdot 11 \cdot 10^{-3} \cdot 363 = 8 \text{ A} \quad (5.42)$$

Stredná dĺžka magnetickej indukčnej čiary jha statora:

$$l_{j1} = \frac{\pi \cdot (D_e - h_{j1})}{2p} = \frac{\pi \cdot (85 - 9,1)}{2} = 119,2 \text{ mm} \quad (5.43)$$

Magnetické napätia v jhu statora:

$$U_{j1} = l_{j1} \cdot H_{j1} = 119,2 \cdot 10^{-3} \cdot 363 = 43,3 \text{ A} \quad (5.44)$$

Materiál pre rotor asynchrónneho motora bola použitá oceľ triedy 11373. Ide o neušľachtilú oceľ obvyklej akosti vhodná na zvarovanie. Súčasťou konštrukcií a strojov menších hrúbok namáhaných staticky aj mierne dynamicky. V elektrotechnickom priemysle sa využíva najmä pre zuby jha elektrických komutovaných (EC) motorov. Magnetizačná charakteristika pre danú oceľ je zmeraná v literatúre [15], kde pre $B_{j2}=0,55 \text{ T}$ odpovedá $H=320 \text{ A/m}$.

Magnetické napätie jha rotora:

$$U_{j2} = h_{j2} \cdot H_{j2} = 44,5 \cdot 10^{-3} \cdot 320 = 14,24 \text{ A} \quad (5.45)$$

Určenie Carterova činiteľa:

$$k_c = \frac{t_d}{t_d - \gamma \cdot \delta} = \frac{5,89}{5,89 - 4,92 \cdot 0,25} = 1,26 \quad (5.46)$$

$$\text{kde } \gamma = \frac{(b_0/\delta)^2}{5 + b_0/\delta} = \frac{(2/0,25)^2}{5 + 2/0,25} = 4,92$$

Veľkosť napätia vo vzduchovej medzere:

$$U_\delta = \frac{2}{\mu_0} \cdot B_\delta \cdot \delta \cdot k_c = \frac{2}{4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0,55 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot 1,26 = 275,74 \text{ A} \quad (5.47)$$

Výsledné magnetické napätie celého magnetického obvodu na jednu pólovú dvojicu:

$$F_m = U_\delta + U_{z1} + U_{j1} + U_{j2} = 275,74 + 8 + 43,3 + 14,24 = 341,28 \text{ A} \quad (5.48)$$

Veľkosť magnetizačného prúdu:

$$I_\mu = \frac{p \cdot F_m}{0,9 \cdot m_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1}} = \frac{1 \cdot 341,28}{0,9 \cdot 3 \cdot 700 \cdot 0,96} = 0,188 \text{ A} \quad (5.49)$$

Magnetizačný prúd vyjadrený v percentách:

$$i_\mu = \frac{I_\mu}{I_{N1}} \cdot 100 = \frac{0,188}{0,344} \cdot 100 = 54,7 \% \quad (5.50)$$

5.5 Výpočet odporu jednej fáze statora

Odpor jednej fáze statorového vinutia

$$R_1 = \rho_{20^\circ\text{C}} \cdot \frac{L_1}{S_{Fe} \cdot a} = \frac{1}{57} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{259,84}{6,16 \cdot 10^{-8} \cdot 1} = 74 \, \Omega \quad (5.51)$$

$$R_1 = \rho_{75^\circ\text{C}} \cdot \frac{L_1}{S_{Fe} \cdot a} = \frac{1}{47} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{259,84}{6,16 \cdot 10^{-8} \cdot 1} = 89,7 \, \Omega$$

$$R_1 = \rho_{115^\circ\text{C}} \cdot \frac{L_1}{S_{Fe} \cdot a} = \frac{1}{41} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{259,84}{6,16 \cdot 10^{-8} \cdot 1} = 102,9 \, \Omega$$

Dĺžka vodičov jednej fáze statorového vinutia

$$L_1 = l_{av} \cdot N_1 = 371,2 \cdot 10^{-3} \cdot 700 = 259,84 \, \text{m} \quad (5.52)$$

Stredná dĺžka závitú vinutia

$$l_{av} = 2 \cdot (l_d + l_{\check{c}}) = 2 \cdot (60 + 125,6) = 371,2 \, \text{mm} \quad (5.53)$$

$$l_d = l_{Fe} = 60 \, \text{mm} \quad (5.54)$$

Dĺžka čela

$$l_{\check{c}} = K_{\check{c}} \cdot b_c + 2B = 1,2 \cdot 87,96 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 0,01 = 125,6 \, \text{mm} \quad (5.55)$$

Vyloženie čiel statorového vinutia

$$l_v = K_v \cdot b_c + B = 1,4 \cdot 87,96 + 0,01 = 123,15 \, \text{mm} \quad (5.56)$$

Kde činitele $K_v=0,26$, $K_{\check{c}}=1,2$ a $B=0,01$ m sú pre stroj s počtom pólov $2p=2$.

$$b_c = \beta_1 \cdot \frac{\pi(D+h_{d1})}{2p} = 1 \cdot \frac{\pi \cdot (45+11)}{2} = 87,96 \, \text{mm} \quad (5.57)$$

5.6 Výpočet rozptylovej reaktancie fáze statorového vinutia

(5.58)

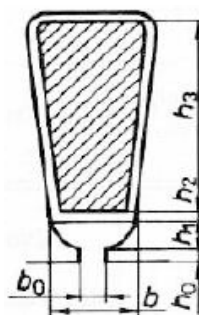
$$X_{1\sigma} = X_{r1} = 15,8 \cdot \frac{f_1}{100} \cdot \left(\frac{N_1}{100}\right)^2 \cdot \frac{l_{FE}}{p \cdot q} \cdot (\lambda_d + \lambda_{\check{c}1} + \lambda_{dif1}) = 15,8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{700}{100}\right)^2 \cdot \frac{0,06}{1 \cdot 4} \cdot (0,96 + 1,82 + 1,56) = 25,2 \, \Omega$$

Činiteľ magnetickej vodivosti v drážke

(5.59)

$$\lambda_d = \frac{h_3}{3 \cdot b} \cdot k_{\beta} + \left(0,785 - \frac{h_0}{b_0} - \frac{h_2}{b} - \frac{b_0}{2 \cdot b}\right) \cdot k'_{\beta} = \frac{9}{3 \cdot 3,8} \cdot 1 + \left(0,785 - \frac{0,7}{2} - \frac{2}{2 \cdot 3,8}\right) \cdot 1 = 0,96$$

Pre jednovrstvové vinutie uvažujeme činiteľ $k_{\beta}=k'_{\beta}=1$. V tomto prípade sa zanedbala výška klinu v statorovej drážke h_2/b v rovnici 5.59. Veľkosť uloženia vinutia h_3 uvažujeme z rovnice 5.35.



Obrázok 27: Tvar statorovej drážky [15].

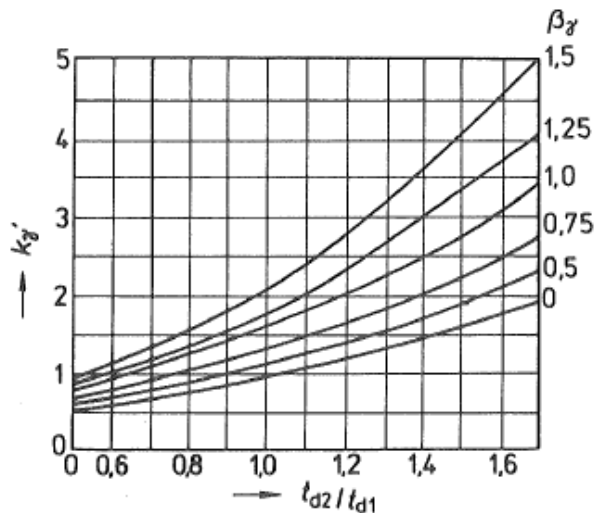
Činiteľ magnetickej vodivosti čiel vinutia

$$\lambda_{\xi 1} = 0,34 \cdot \frac{q}{l_{FE}} (l_{\xi} - 0,64 \cdot \beta \cdot t_p) = 0,34 \cdot \frac{4}{60} \cdot (125,6 - 0,64 \cdot 70,7) = 1,82 \quad (5.60)$$

Činiteľ polo uzatvorených drážok statoru

$$\xi = 2 \cdot k'_{\gamma} - k_{v1}^2 \cdot \left(\frac{t_{d2}}{t_{d1}}\right)^2 \cdot (1 + \beta_{\gamma}^2) = 2 \cdot 0,5 = 1 \quad (5.61)$$

Keďže sa jedná o plný rotor uvažujeme $t_{d2}/t_{d1}=0$ a pomeru natočenia drážok $\beta_{\gamma}=0$.



Obrázok 28: činiteľ k'_{γ} v závislosti na pomere t_{d2}/t_{d1} a pomere natočenia drážok β_{γ} [15].

Činiteľ magnetickej vodivosti diferenčného rozptylu statorového vinutia

$$\lambda_{dif1} = \frac{t_{d1}}{12 \cdot \delta \cdot k_c} \cdot \xi = \frac{5,89}{12 \cdot 0,25 \cdot 1,26} \cdot 1 = 1,56 \quad (5.62)$$

Pomerná hodnota rozptylovej reaktancie statorového vinutia

$$x_{1\sigma} = X_{1\sigma} \cdot \frac{I_{1N}}{U_{1N}} = 25,2 \cdot \frac{0,344}{230} = 0,038 \quad (5.63)$$

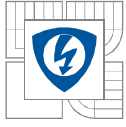
5.7 Výpočet hlavných strát v železe statora

Straty rozdeľujeme na hysterézne a straty vírivými prúdmi. Veľkosť hysteréznych strát závisí od druhu použitého magnetického materiálu, v našom prípade sme volili plechy M700-50A, od toho ako bol vyrobený a teploty materiálu. Straty vznikajú pri premagnetovaní železa. Vírivé straty vznikajú dôsledkom uzatvárania magnetických siločiar mimo magnetický obvod, čo vedie k nežiadúcemu ohrevu častí elektrického stroja.

(5.64)

$$\Delta P_{Fes} = p_{1,0} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^{\beta} \cdot (k_{dj} \cdot B_{j1}^2 \cdot m_{j1} + k_{dz} \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1}) = 4,83 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,5} \cdot (1,6 \cdot 1,4^2 \cdot 0,99 + 1,8 \cdot 1,4^2 \cdot 0,3) = 20,1 \text{ W}$$

Zníženie strát môžeme dosiahnuť voľbou kvalitnejších plechov na úkor vyššej ceny. Napríklad použitím statorových plechov M250-50A, čím by sa straty znížili takmer o polovicu. Činitele k_{dj} a k_{dz} sa pohybujú pre stroje do výkonu 250 kW približne v tomto rozmedzí 1,6 a 1,8. β je exponent závislý na druhu použitých statorových plechov. Pri výpočte hlavných strát zanedbávame



dodatočné straty v železe (povrchové a pulzné), ktoré sú v tomto prípade zanedbateľné. Tieto straty sa pohybujú o rád nižšie ako hlavné straty.

Hmotnosť jha statora (5.65)

$$m_{j1} = \pi \cdot (D_e - h_{j1}) \cdot h_{j1} \cdot l_{Fe} \cdot k_{Fe} \cdot \gamma_{Fe} = \pi \cdot (0,085 - 0,0091) \cdot 0,0091 \cdot 0,06 \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 0,99 \text{ kg}$$

Hmotnosť statorových zubov

$$m_{z1} = h_{z1} \cdot b_{z1} \cdot l_{Fe} \cdot Q_1 \cdot \gamma_{Fe} = 11 \cdot 2,4 \cdot 60 \cdot 10^{-9} \cdot 24 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 0,3 \text{ kg} \quad (5.66)$$

Hustota ocele sa uvažuje $\gamma_{Fe}=7800 \text{ kg/m}^3$

5.8 Elektrické straty vo vinutí statora

V našom prípade sa jedná o straty v medi – ohmický odpor vo vinutí statora

$$\Delta P_{j1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2 = 3 \cdot 89,7 \cdot 0,344^2 = 31,84 \text{ W} \quad (5.67)$$

Straty vo vinutí uvažujeme pri teplote vinutia 75 °C.

5.9 Mechanické straty

Straty sú spôsobené hlavne trením valivých ložísk, v ktorých je rotor uložený s ventilačnými stratami. Keďže sa jedná o vzorku motora malého výkonu, asynchrónny motor s plným rotorom, nebude mať ventilačné chladenie.

$$\Delta P_{mech} \approx K_T \cdot \left(\frac{n}{1000}\right)^2 \cdot (10 \cdot D)^3 \approx 5 \cdot \left(\frac{3000}{1000}\right)^2 \cdot (10 \cdot 0,045)^3 \approx 4,1 \text{ W} \quad (5.68)$$

Empirický vzťah platí pre dvojpólové motory do priemeru $D_e \leq 0,25 \text{ m}$, kde činiteľ $K_T=5$.

5.10 Prídavné straty pri zaťažení motora

Pri zaťažení motora vznikajú straty pôsobením rozptylových tokov, pulzácií indukcie vo vzduchovej medzere alebo stupňovitého priebehu magnetického napätia vo vinutí. Podľa typu motora, môžu takéto straty predstavovať až 2 % z menovitého výkonu. Norma stanovuje uvažovať veľkosť týchto strát približne 0,5 %.

$$\Delta P_d = 0,005 \cdot P_1 = 0,005 \cdot \frac{P_2}{\eta} = 0,005 \cdot \frac{100}{0,6} = 0,83 \text{ W} \quad (5.69)$$

Prúd naprázdno

$$I_0 = \sqrt{I_{0\check{c}}^2 + I_{\mu}^2} = \sqrt{0,0488^2 + 0,188^2} = 0,194 \text{ A} \quad (5.70)$$

Výpočet činnej aktívnej zložky

$$I_{0\check{c}} = \frac{\Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{j0}}{m_1 \cdot U_{N1}} = \frac{20,1 + 4,1 + 9,51}{3 \cdot 230} = 0,0488 \text{ A} \quad (5.71)$$

Elektrické straty v statorovom vinutí naprázdno

$$\Delta P_{j0} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_{\mu}^2 = 3 \cdot 89,7 \cdot 0,188^2 = 9,51 \text{ W} \quad (5.72)$$



Účinník naprázdno

$$\cos \varphi_0 = \frac{I_{0\check{c}}}{I_0} = \frac{0,0488}{0,194} = 0,25 \quad (5.73)$$

5.11 Výpočet strát v železe rotora

Hmotnosť rotorového jha vypočítame pomocou vzorca 4.65. Keďže sa jedná o motor s plným rotorom vo vzorci zanedbáme činiteľ plnenia železa k_{Fe} .

Hmotnosť jha rotora

$$m_{j2} = \pi \cdot \gamma_{Fe} \cdot \left(\frac{D_{jho}}{2}\right)^2 \cdot l_{Fe} = \pi \cdot 7800 \cdot \left(\frac{44,5 \cdot 10^{-3}}{2}\right)^2 \cdot 0,06 = 0,73 \text{ kg} \quad (5.74)$$

Výpočet strát v rotore

Pre použitú oceľ triedy 11 373 nie sú zmerané straty, keďže sa jedná o bežnú konštrukčnú oceľ. Pri výpočte budeme uvažovať straty z najhoršej elektrickej ocele M1000-100A z dostupného datasheetu [16]. Pri magnetickej indukcii v jhu $B_{j2}=0,55 \text{ T}$ odpovedajú straty približne $1,3 \text{ W/kg}$. Ako už bolo spomenuté v kapitole 3.4 motor neobsahuje žiadne modifikácie. Preto je pravdepodobné, že tieto straty budú podstatne vyššie. Presnejšie hodnoty dostaneme meraním motora naprázdno.

$$\Delta P_{Fer} = p_{1,0} \cdot m_{j2} = 1,3 \cdot 0,73 = 0,95 \text{ W} \quad (5.75)$$

5.12 Výpočet celkovej impedancie rotora

Pre výpočet celkovej impedancie rotora vychádzame z teórie v kapitole 3.4. V nej sa uvádza vzorec impedancie rotora prepočítaný na stranu statora:

$$Z'_2 = (5 + 3j) \cdot \frac{m \cdot \Lambda \cdot (N_1 \cdot k_{v1})^2}{p} \cdot \sqrt{\frac{\mu_e \cdot \mu_0 \cdot f_1 \cdot s}{\gamma}} = (5 + 3j) \cdot \frac{3 \cdot \frac{0,06}{0,0707} \cdot (700 \cdot 0,96)^2}{1} \cdot \sqrt{\frac{100 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 50 \cdot 0,01}{5 \cdot 10^6}} = 20,38 + 12,23j \Omega \quad (5.76)$$

Z toho odpor rotora prepočítaný na statorové vinutie

$$R'_2 = 20,38 \Omega$$

Reaktancia rotora prepočítaná na statorové vinutie

$$X'_{2\sigma} = X'_{r2} = 12,23 \Omega$$

Výpočet sklzu

$$s = 1 - \frac{n}{n_1} = 1 - \frac{2970}{3000} = 0,01 \quad (5.77)$$

Za predpokladu že:

Príkonn motora

$$P_1 = P_2 + \Delta P = 100 + 57,8 = 157,8 \text{ W} \quad (5.78)$$

Hlavná časť príkonu, ktorá prechádza vzduchovou medzerou do rotora

$$P_\delta = P_1 - \Delta P_{Fes} - \Delta P_{j1} = 157,8 - 20,1 - 31,84 = 105,86 \text{ W} \quad (5.79)$$

Mechanický výkon stroja

$$P_{mech} = P_\delta - \Delta P_{Fer} = 105,86 - 0,95 = 104,91 \text{ W} \quad (5.80)$$

Elektrický výkon spotrebovaný na všetkých činných odporoch

$$P_{el} = P_{\delta} - P_{mech} = 105,86 - 104,91 = 0,95 \text{ W} \quad (5.81)$$

$$s = \frac{P_{el}}{P_{\delta}} = \frac{0,95}{105,86} \cdot 100 = 0,9 \% \quad (5.82)$$

Veľkosť otáčok motora

$$n = n_1 \cdot (1 - s) = 3000 \cdot (1 - 0,01) = 2970 \text{ ot/min} \quad (5.83)$$

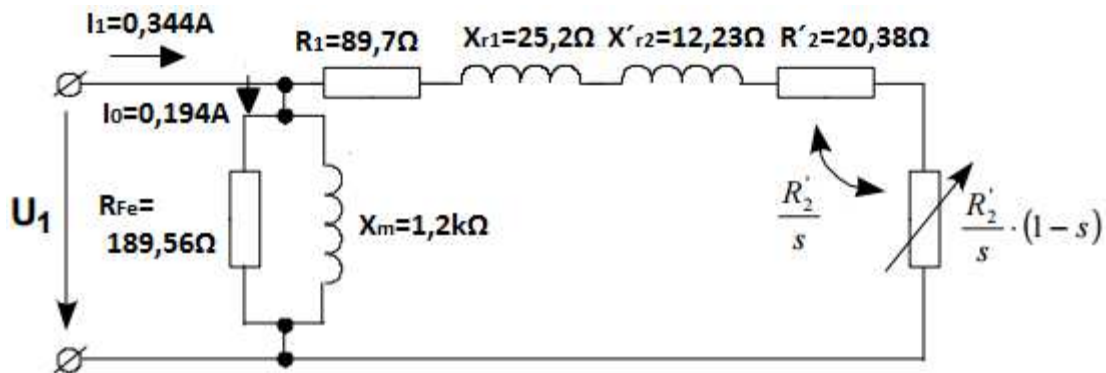
5.13 Výpočet hlavnej indukčnosti a odporu predstavujúceho straty v železe

Magnetizačná reaktancia

$$X_m = \frac{U_n}{\frac{\sqrt{3}}{I_{\mu}}} - X_{1\sigma} = \frac{400}{0,188} - 25,2 = 1,2 \text{ k}\Omega \quad (5.84)$$

Odpor predstavujúci straty v železe

$$R_{Fe} = \frac{\Delta P_{FeS}}{m \cdot I_{\mu}^2} = \frac{20,1}{3 \cdot 0,188^2} = 189,56 \Omega \quad (5.85)$$



Obrázok 29: Zjednodušený obvodový model asynchrónneho motora s vypočítanými parametrami na počet závitov statorového vinutia.

Na základe kompletného obvodového modelu, môžeme vypočítať moment asynchrónneho motora:

Moment motora

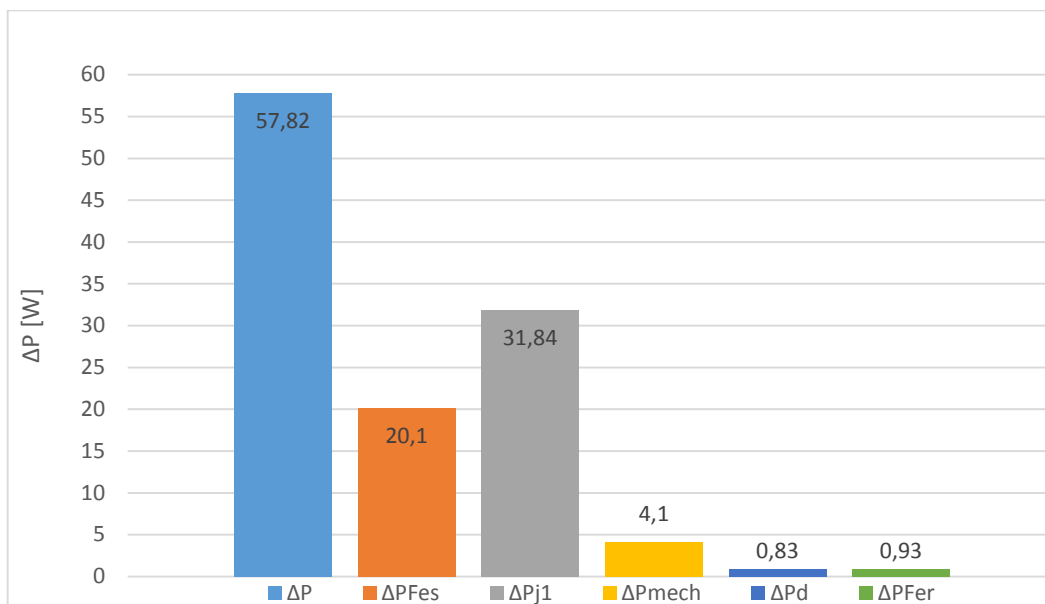
$$(5.86)$$

$$M = \frac{\frac{R'_2}{s} \cdot (1-s) \cdot \left(\frac{U_1}{\sqrt{3}}\right)^2}{\omega_1 \cdot (1-s) \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{r1} + X'_{r2})^2 \right]} = \frac{\frac{20,38}{0,01} \cdot (1-0,01) \cdot \left(\frac{400}{\sqrt{3}}\right)^2}{100\pi \cdot (1-0,01) \cdot \left[\left(89,7 + \frac{20,38}{0,01}\right)^2 + (25,2 + 12,23)^2 \right]} = 0,08 \text{ Nm}$$

5.14 Celkové straty a účinnost'

Celkové straty (5.87)

$$\Delta P = \Delta P_{Fes} + \Delta P_{j1} + \Delta P_{mech} + \Delta P_d + \Delta P_{Fer} = 20,1 + 31,84 + 4,1 + 0,83 + 0,95 = 57,82 \text{ W}$$



Obrázok 30: Rozloženie celkových strát v asynchrónnom motore.

Predpokladaná účinnosť asynchrónneho motora

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} \cdot 100 = \frac{100}{100 + 57,82} \cdot 100 = 63,36 \% \quad (5.88)$$

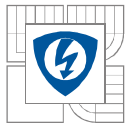
Podľa medzinárodnej normy EN 60034-30 pre energetické úsporné motory spĺňa motor triedu účinností IE1. Trieda IE1 zahŕňa motory so štandardnou účinnosťou. V našom prípade sa jedná o dvojpólové motory s menovitým napätím do 1000 V a s účinnosťou do 77,4 %. Avšak v súčasnosti musia motory spĺňať normu pre energetickú účinnosť aspoň IE2.

Nové triedy účinnosti IE (International Energy Efficiency - Medzinárodná účinnosť energie) [18]:

- IE1 = štandardná účinnosť
- IE2 = vysoká účinnosť
- IE3 = prémiová účinnosť (o 10 - 15 % vyššia účinnosť ako IE2)
- IE4 = Super Premium Efficiency

Pre jednorýchlostné trojfázové motory s nasledujúcimi parametrami [18]:

- Menovité napätie do 1 000 V
- Výkon medzi 0,75 kW až 375 kW
- Počet pólov 2, 4 alebo 6 (50 a 60 Hz)
- Prevádzkové režimy S1 alebo S3 s pracovným cyklom > 80 %



Tabuľka 1: Predpokladané parametre asynchrónneho motora s plným rotorom.

Stanovené parametre	
Mechanický výkon na hriadeľi P_2	100W
Napájacie napätie U_n	400V
Menovitý prúd I_n	0,344A
Synchrónne otáčky motora n_s	3000min^{-1}
Frekvencia napájania	50Hz
Účinník $\cos \varphi$	0,7
Účinnosť η	63%
počet pol párov	$p=1$
Jednovrstvové vinutie s plným krokom	
Parametre statora	
Vonkajší priemer D_e	85mm
Vnútorňý priemer D	45mm
Aktívna dĺžka zväzku l_{Fe}	60mm
Počet drážok Q_1	24
Počet vodičov v drážke V_d	175
Normalizovaný priemer vodiča d_s	0,28mm
Magnetického toku \emptyset	1,5mWb
Magnetická indukcia v zube B_z	1,4T
Magnetická indukcia v jhu B_j	1,4T
Magnetická indukcia v medzere B_δ	0,55T
Výška jha statora	9,1mm
Typ použitého plechu	M700-50A
Priemer hriadeľa D_h	16mm
Veľkosť vzduchovej medzere δ	0,25mm
Parametre rotora	
Vonkajší priemer D_2	44,5mm
Výška jha	44,5mm
Magnetická indukcia v jhu B_j	0,55T
Materiál rotora	oceľ 11373

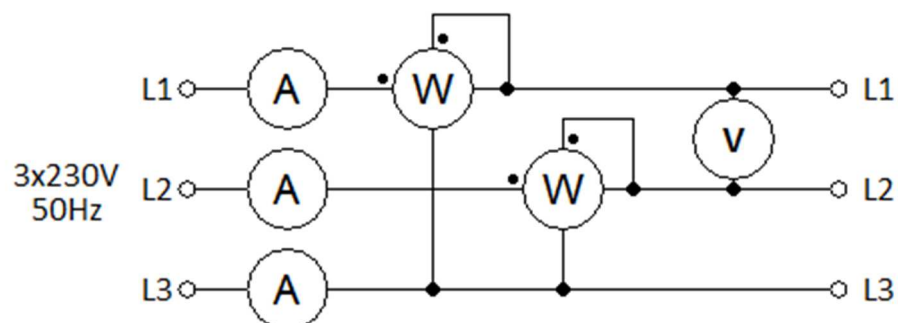


Obrázok 31: Vzorka asynchrónneho motora s plným rotorom.

6 MERANIE NA NAVRHNUTOM MOTORE

Na zhotovenom vzorku vykonáme merania pomocou Áronovej metódy, ktorými si overíme spočítané parametre pri návrhu asynchrónneho motora s plným rotorom v kapitole 5. Satorové vinutie motora je zapojené do hviezdy a bude sa jednať o nasledovné merania:

- Meranie AS motora v chode naprázdno
- Meranie AS motora v stave nakrátko
- Meranie momentovej charakteristiky
- Zmeranie odporu vinutí jednotlivých fáz

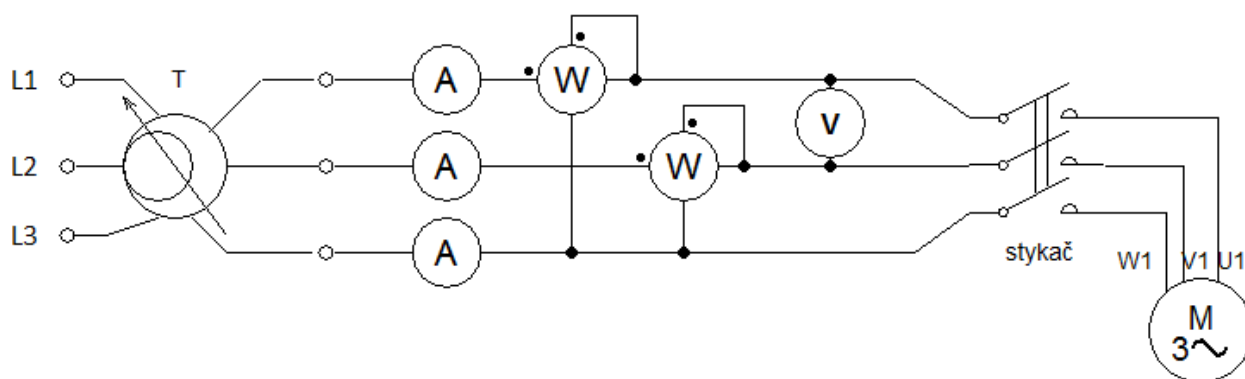


Obrázok 32: Schéma zapojenia meracieho obvodu-Áronové zapojenie

6.1 Meranie naprázdno

Meraním v chode naprázdno zisťujeme prúd naprázdno I_0 , účinník naprázdno $\cos\varphi_0$, straty vzniknuté v železe ΔP_{FE} , mechanické straty vzniknuté trením ΔP_{mech} v závislosti od zmeny napájacieho napätia U_n . Z nameraných hodnôt je možné dopočítať prvky priečnej vetvy. Jedná sa o hlavnú indukčnosť X_m a odpor R_{FE} predstavujúci straty v železe.

Nezaťažený motor začneme napájať zvýšeným napätím približne $1,2 U_n$ pomocou auto transformátora pripojeného na trojfázovú sieť vid' Obrázok 33 až do hodnoty $0,3 U_n$. Pre každú veľkosť napájacieho napätia odčítame z prístrojov prúdy naprázdno, združené napätia a príkon naprázdno.



Obrázok 33: Zapojenie meracie pracoviska pri meraní naprázdno.

Výsledkom merania je grafická závislosť svorkového napätia U_0 na budiacom prúde, ktorý sa rovná prúdu naprázdno I_0 , $U_0=f(I_0)$. Pre určenie strát v železe ΔP_{FE} a mechanických ΔP_{mech} použijeme grafickú závislosť príkonu motora v stave naprázdno P_0 na kvadráte pomeru napájacieho napätia k menovitej hodnote $(U_0/U_n)^2$, $P_0=f(U_0/U_n)^2$.

Výpočet hodnôt merania naprázdno

Prúd naprázdno

$$I_0 = \frac{I_{U1} + I_{V1} + I_{W1}}{3} \quad (6.1)$$

Príkon naprázdno

$$P_0 = P_1 + P_2 \quad (6.2)$$

Straty vo vinutí

$$\Delta P_{j0} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_0^2 \quad (6.3)$$

Straty naprázdno

$$\Delta P_0 = P_0 - \Delta P_{j0} \quad (6.4)$$

Účinník

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U_0 \cdot I_0} \quad (6.5)$$

6.2 Meranie nakrátko

Cieľom merania na krátko je určiť statorový prúd nakrátko I_k , účinník $\cos\varphi_k$ v stave nakrátko a príkon motora P_k . Schéma zapojenia pracoviska je totožná ako pri meraní motora naprázdno vid' Obrázok 33. Pri meraní musíme hriadeľ rotora mechanicky zablokovat'. Mechanické zabrzdzenie musí byť natoľko pevné, aby nedošlo ani k minimálnemu otáčaniu rotora.

Na regulačnom transformátore nastavíme hodnotu napájacieho napätia U_k tak, aby skratový prúd, ktorý prechádza vinutím statora I_k neprekročil 1,1 násobok menovitého prúdu I_n asynchrónneho motora. Pri meraní postupujeme od najvyššej k najnižšej nastavenej hodnote U_k . Je možné meranie realizovať aj pomocou jednej hodnoty, kedy napájacie napätie nastavíme na hodnotu okolo $U_k=100$ V.

Výsledkom merania je grafická závislosť skratového prúdu I_k na napätí U_k , $I_k=f(U_k)$ a strát nakrátko ΔP_k na pretekajúcom skratovom prúde I_k , $\Delta P_k=f(I_k)$. Pre výpočet jednotlivých veličín platia obdobné vzorce ako v stave naprázdno.

Výpočet hodnôt merania v stave nakrátko

Prúd naprázdno

$$I_k = \frac{I_{U1} + I_{V1} + I_{W1}}{3} \quad (6.6)$$

Príkon naprázdno

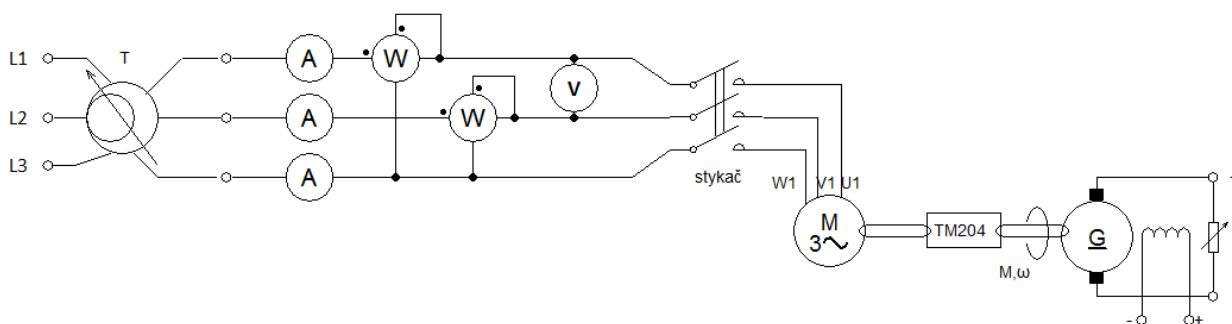
$$\Delta P_k = P_1 + P_2 \quad (6.7)$$

Účinník

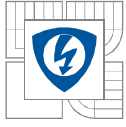
$$\cos\varphi_k = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U_k \cdot I_k} \quad (6.8)$$

6.3 Meranie momentovej charakteristiky

Pri meraní momentovej charakteristiky je motor zaťažovaný dynamometrom, brzdou alebo derivačným dynamom pracujúcim do odporovej záťaže. Pri uvážení, že asynchrónny motor s plným rotorom vykazuje malý moment, bol spojený pomocou meracej hriadele TM204 s jednosmerným strojom. Transformátorom nastavujeme napätie od menovitej hodnoty U_n smerom dole, pričom sledujeme prúdy jednotlivých fáz, aby neprekročili hodnotu väčšiu ako je 1,5 I_n . Meracia hriadeľ, ktorá mechanicky spája asynchrónny motor s jednosmerným strojom, zaznamenávame moment a otáčky motora pomocou vyhodnocovacej jednotky.



Obrázok 34: Zapojenie meracieho pracoviska pri meraní momentovej charakteristiky.



Výsledkom tohto merania je grafická závislosť momentu M na otáčkach n , $M=f(n)$, závislosť prúdu I_n na otáčkach n , $I_n=f(n)$ a závislosť účinnosti motora η na otáčkach n , $\eta=f(n)$.

Výpočet hodnôt pri meraní momentovej charakteristiky

Prúd

$$I = \frac{I_{U1} + I_{V1} + I_{W1}}{3} \quad (6.9)$$

Príkonnosť

$$P_1 = P_{1W} + P_{2W} \quad (6.10)$$

Uhlová rýchlosť

$$\omega_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad (6.11)$$

Výkon motora

$$P = \omega_m \cdot M \quad (6.12)$$

Účinník

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1} \quad (6.13)$$

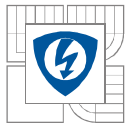
Skľz

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100\% \quad (6.14)$$

Účinnosť

$$\eta = \frac{P}{P_1} \cdot 100\% \quad (6.15)$$

Namerané a vypočítané hodnoty a následné grafické závislosti jednotlivých typov merania, ktoré sa uskutočnili na vzorku asynchrónneho motora s plným rotorom sú uvedené ako príloha v elektronickej forme práce.



7 ZÁVER

Cieľom diplomovej práce bolo zoznámiť sa s konštrukčným prevedením špeciálnych asynchrónnych motorov malého výkonu. Celkovo je práca rozdelená do šiestich kapitol zameraná na trojfázové, jednofázové a zvláštne typy asynchrónnych motorov. Na základe získaných poznatkov o konštrukčnom prevedení asynchrónnych strojov a využití plného rotora vo vysokootáčkových motoroch bol vytvorený predbežný návrh trojfázového motora s plným rotorom. Celkový návrh konštrukčných rozmerov a vypočítaných parametrov bol rozdelený do niekoľkých podkapitol, ktorými sa zaoberá 5 kapitola.

Vzhľadom na to, že ide o experimentálny výrobok, bol motor predbežne navrhovaný na výkon 100 W s predpokladanou účinnosťou okolo 60 % pri použití masívneho oceľového rotora. Pri takomto prevedení stroja majú za následok malú účinnosť straty vznikajúce vírivými prúdmi v železe na povrchu rotora. Tieto straty môžu tvoriť značnú časť celkových strát vznikajúcich v motore. Zamedzeniu strát je možné napríklad vytvorením drážok v rotore či povrchovou úpravou rotora (viď kapitola 3.4), to ale nebolo cieľom práce z hľadiska časovej náročnosti. Rotor bol zhotovený z ocele triedy 11373. Jedná sa o neušľachtilú oceľ využívanú v elektrotechnickom priemysle najmä pre zuby jha EC motorov.

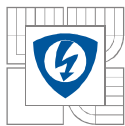
Pre zníženie celkových strát, ktoré vznikajú v asynchrónnom motore, bol plánovaný návrh statorového zväzku z plechov M235-35A, ktoré sa vyznačujú vysokou jakosťou čo má vplyv na menšie straty v železe. Kvôli technologickej náročnosti a veľkého vzniknutého odpadu pri strihaní plechov, boli nakoniec použité plechy M700-50A, ktoré majú výraznejšie straty v železe. Ďalej pri návrhu motora je potrebné dbať na vytvorenie sínusového priebehu vo vzduchovej medzere, aby nedošlo vplyvom vyšších harmonických k zvýšeniu strát v rotore. Na to sa využíva dvojvrstvové vinutie, ktoré využíva väčšina súčasných motorov. Avšak pre jednoduchosť návrhu bolo použité iba jednovrstvové vinutie, preto bol zvolený maximálny počet drážok.

V závere návrhu je kritériom správnosti výberu a výpočtov jednotlivých rozmerov pomerná hodnota i_m . U motorov stredných výkonov sa táto hodnota pohybuje v rozmedzí 0,2 až 0,3. Pre motory takto malých výkonov sa môže pomerná hodnota pohybovať v rozmedzí až 0,5-0,6 bez ohľadu či bol motor správne navrhnutý. V našom prípade sa hodnota pohybuje približne 0,55. Je to spôsobené predovšetkým vysokou hodnotou magnetického napätia vo vzduchovej medzere, čo je typické pre motory tak malých výkonov.

Návrh bol doplnený o teoretický výpočet obvodového modelu asynchrónneho motora s plným rotorom, jednotlivých vzniknutých strát a celkovú účinnosť stroja. Pri výpočte hodnôt mohli vzniknúť nepresnosti, najmä pri vzniknutých stratách v rotore. Ako už bolo spomenuté rotor tvorí oceľ 11373, ku ktorej nebolo možné získať krivku výkonnostných strát. Preto pre tento výpočet bola použitá obdobná metóda ako v prípade strát vzniknutých v statore. Údaje chýbajúce do vzorca pre výpočet boli získané z datasheetu pre elektrotechnické plechy M1000-100A. Straty v rotore by predstavovali 0,95 W čo reálne budú podstatne vyššie.

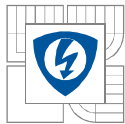
Celková vypočítaná účinnosť motora teda predstavuje približne 63 %. Na základe tejto účinnosti by motor splňoval energetickú triedu účinnosti IE1 čo v súčasnej dobe kedy motory musia spĺňať aspoň triedu IE2 je nevyhovujúce.

Výsledkom celkového návrhu je funkčná vzorka asynchrónneho motora s plným rotorom Obrázok 31, ktorý sme podrobili rozličnými typmi meraní popísaných v kapitole 6. Cieľom merania bolo zistiť reálne parametre motora a následne overiť s vypočítanými. Výsledky z meraní sú priložené v elektronickej forme.



LITERATÚRA

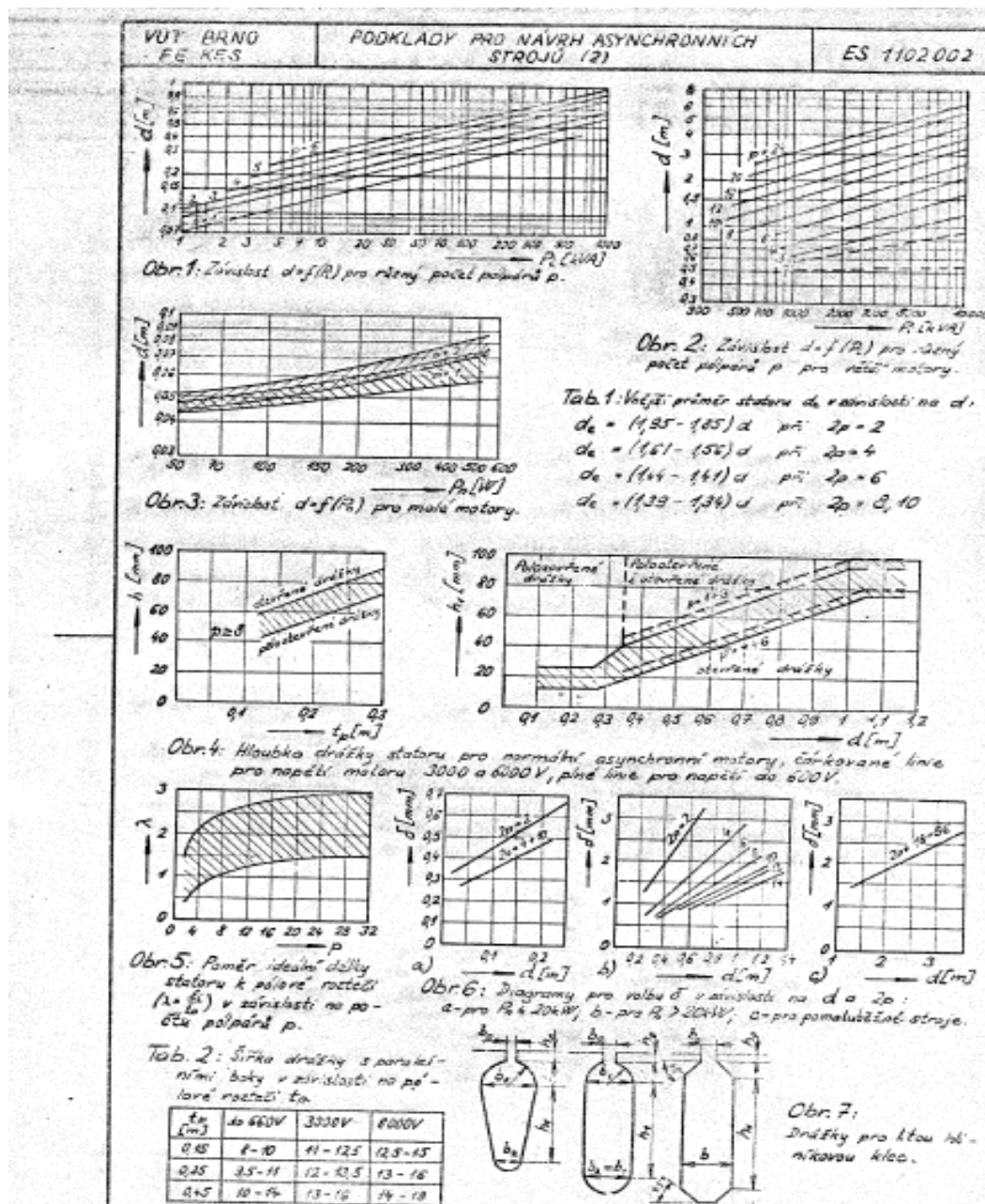
- [1] ONDRŮŠEK, Čestmír. *Skripta : elektricke_stroje*, [cit. 2015-10-13].
- [2] Nízkonapěťový standardní motor Simotics 1LE1. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2013 [cit. 2015-10-13].
Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/novinky-na-veletrhu-amper-2013.html>
- [3] PETROV, G. N. *Elektrické stroje 2 : Asynchronní stroje - synchronní stroje*. 1. vydání. Praha : Academia, 1982. 732 s.
- [4] Mechanická charakteristika asynchronních strojov. *Elektrické stroje* [online]. [cit. 2015-10-14]. Dostupné z: <http://siz.wz.cz/?f=0&s=1&k=es&pk=10>
- [5] Spouštění trojfázových asynchronních motorů. KOCMAN, Ing. Stanislav. *Asynchronní stroje* [online]. Katedra obecné elektrotechniky FEI VŠB - TB Ostrava, 2012 [cit. 2015-10-14]. Dostupné z: <http://p.kobrle.sweb.cz/stroje/as-skriptum.pdf>
- [6] KOCMAN, Karel, Jozef HOLBA, Alexander IHLÁR a Rudolf MRAVENEC. *Elektrické stroje a přístroje I*. 1. vyd. Josef ŘÍHA. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1990, 424 s. ISBN 80-03-00406-3.
- [7] ARENDÁŠ, Miroslav a Milan RUČKA. *Amatérské elektronické konstrukce a zapojení*. 1. vyd. České Budějovice: Kopp, 1995, 101 s. ISBN 80-901-3427-0.
- [8] YEADON, William H a Alan W YEADON. *Handbook of small electric motors*. New York: McGraw-Hill, c2001. ISBN 00-707-2332-X.
- [9] ŽENÍŠEK, Luboš. *Možnosti modelování asynchronního motoru se stíněným pólem*. Západočeská Univerzita v Plzni, 2012. Diplomová práce.
- [10] JACQUES, Henry-Baudot. *Elektrické stroje pro automatizaci*. Praha: SNTL, 1971.
- [11] HAPPUNEN, Jussi. *High-speed solid-rotor induction machine electromagnetic calculation and design*. 2004. vyd. Lappeenranta teknillinen yliopisto: Digipaino, 2004. ISBN 951-764-981-9.
- [12] BAŠTA, Jan a Vitalij Michajlovič KUCEVALOV. *Elektrické stroje s plnými rotory: teorie a výpočet*. 1. vyd. Praha: Academia, 1980, 135 s.
- [13] ŘÍHA, Josef. *Elektrické stroje a přístroje*. Třetí, nezměněné vydání. PRAHA: STNL, 1990.
- [14] Lähteenmäki J. *Design and Voltage Supply of High-Speed Induction Machines*. Acta Polytechnica Scandinavica, Electrical Engineering Series, No 108, Espoo 2002. 140 p. Published by the Finnish Academies of Technology. ISBN 951-666-607-8, ISSN 0001-6845
- [15] KOPYLOV, I.P. *Stavba elektrických strojů: celostátní vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických*. 1. vyd. Praha 1: Státní nakladatelství technické literatury, 1988, 685 s. ISBN 04-532-88



-
- [16] Typical data for M700-50A [online]. 1 s. [cit. 2015-11-25]. Dostupné z: http://cogent-power.com/cms-data/downloads/m270-35a_1.pdf
- [17] LINEÁRNÍ MOTORY [online]. In: Vues Brno a.s. [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: http://www.vues.cz/file/424/CZ_LIN-OBECNE_020909.PDF
- [18] Efektívne využitie energie. *Bauer Gear Motor* [online]. GERMANY: Altra Industrial Motion, c2011 [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://bauergears.com/SK/energy-intro.asp>
- [19] Pohonnatechnika.cz: Škola - Ložiskový proud [online]. 2016 [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/skola-loziskovy-proud>
- [20] AUTOMA: Diagnostika asynchronních motorů [online]. Rockwell Automation Praha, c2016 [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: http://automa.cz/index.php?id_document=32229

PRÍLOHY

Tabuľka 2: ES 1102002 pre určenie rozmerov satorového plechu.



Tabuľka 3: Dovolené hodnoty magnetickej indukcie [15].

časť magnetickeho obvodu	Označenie	IP 44					
		2p	2	4	6	8	10 a 12
Jho statora	Bj1		1,4 až 1,6		1,15 až 1,35		1,1 až 1,2
Zuby statora s rovnobežnými stenami (vospávané vinutie, drážky L, S)	Bz1			1,7 až 1,9			1,6 až 1,8