

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Kružnicový diagram asynchronního stroje s vírovou  
kotvou**

ZÁPAĎOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2015/2016

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Dominik HUTÝRA**  
Osobní číslo: **E13B0031P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Kružnicový diagram asynchronního stroje s vírovou kotvou**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište základní funkční principy asynchronního stroje.
2. Popište vliv konstrukce rotorového vinutí na charakteristiky asynchronního stroje.
3. Sestrojte na základě daných parametrů kružnicový diagram asynchronního stroje s vírovou kotvou a odečtěte charakteristiky daného stroje.
4. Zhodnoňte získané výsledky vzhledem k předpokladům uvedeným v bodu 2.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. CIGÁNEK, L.: Stavba elektrických strojů. SNTL, Praha, 1958.
2. PETROV, G. N.: Elektrické stroje 2. ACADEMIA, Praha, 1982.
3. BARTOŠ, V.: Teorie elektrických strojů. ZČU, Plzeň, 2006. ISBN 80-7043-509-7.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Karel Hruška, Ph.D.

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2015

Termín odevzdání bakalářské práce: 2. června 2016

  
Dec. Ing. Jiří Hamrlejšek, Ph.D.  
děkan



  
Prof. Ing. Václav Kříž, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

## **Abstrakt**

Předmětem této bakalářské práce je popsat základní funkční principy asynchronního stroje, vliv rotorového vinutí na charakteristiky stroje a konstrukci kružnicového diagramu asynchronního stroje s vírovou klecí.

Cílem práce je zkonstruovat kružnicový diagram pro stroj SIEMENS 1LA7 163 – 4AA10 a sestavit charakteristiky daného stroje z hodnot vypočtených a odečtených z diagramu, zejména se jedná o momentovou a proudovou charakteristiku.

## **Klíčová slova**

Asynchronní stroj, rotor, vinutí, proud, skluz, vírová kotva, kružnicový diagram, moment, charakteristika



## **Abstract**

The subject of this thesis is to describe the basic operating principles of induction machines, effect of rotor winding on the characteristics of the machine and to construct a circle diagram of an induction machine with eddy current rotor winding.

The goal of thesis is construct a circle diagram for an induction machine SIEMENS 1LA7 163 – 4AA10 and construct characteristics of the machine from calculated and deducted values from diagram, especially the torque and current characteristic.

## **Key words**

induction machine, rotor, winding, current, slip, eddy current rotor winding, circular diagram, torque characteristic

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....  
podpis

V Plzni dne 1.6.2016

Dominik Hutýra

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Karlovi Hruškovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

# Obsah

<b>OBSAH</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b>	<b>9</b>
<b>ÚVOD</b>	<b>14</b>
<b>1 ASYNCHRONNÍ STROJ</b>	<b>15</b>
1.1 OBECNÉ PRINCIPY FUNKCE ASYNCHRONNÍCH STROJŮ	16
1.1.1 Točivé magnetické pole	16
1.1.2 Synchronní otáčky	18
1.1.3 Vznik točivého momentu, skluz	19
1.2 MOŽNOSTI PROVEDENÍ ROTORU ASYNCHRONNÍCH STROJŮ	21
1.2.1 Stroje s klecí nakrátko	21
1.2.2 Stroj s vinutým rotorem (kroužkový)	22
1.3 POUŽÍVANÉ TYPY KLECÍ NAKRÁTKO	23
1.3.1 Jednoduchá klec nakrátko	23
1.3.2 Odporová klec	24
1.3.3 Dvojitá klec	24
1.3.4 Vírová klec	26
1.4 POPIS ASYNCHRONNÍHO STROJE FORMOU NÁHRADNÍHO SCHÉMATU	27
1.4.1 Náhradní schéma ve tvaru „T“ článku	27
1.4.2 Modifikace náhradního schématu T – tvaru na $\Gamma$ – tvar	30
1.5 KRUŽNICOVÝ DIAGRAM ASYNCHRONNÍHO STROJE	33
1.5.1 Kružnicový diagram pomocí kruhové inverze	33
1.5.2 Čtení hodnot z kružnicového diagramu	38
<b>2 VLIV KONSTRUKCE ROTOROVÉHO VINUTÍ NA CHARAKTERISTIKY STROJE</b>	<b>40</b>
2.1 MAGNETICKÝ OBVOD	40
2.2 SPECIÁLNÍ VINUTÍ ROTORU	45
2.2.1 Obecné poznatky	45
2.2.2 Vírová klec	45
2.2.3 Dvojitá klec	50
<b>3 KONSTRUKCE KRUŽNICOVÉHO DIAGRAMU S VÍROVOU KOTVOU</b>	<b>57</b>
3.1 PARAMETRY STROJE	57
3.2 KRUŽNICOVÝ DIAGRAM	58
3.3 CHARAKTERISTIKY STROJE	59
3.4 TABULKOVÉ ZPRACOVÁNÍ VYPOČTENÝCH HODNOT STROJE	63
<b>ZÁVĚR</b>	<b>65</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b>	<b>67</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b>	<b>68</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b>	<b>69</b>
<b>PŘÍLOHY</b>	<b>70</b>

## Seznam symbolů a zkratek

### Symbols

$a$	$[m]$	šířka drážky
$A$	$[-]$	komplexní činitel
$B$	$[m]$	šířka vodiče
$B$	$[-]$	komplexní činitel
$B_0$	$[T]$	magnetická indukce vlnky
$b_0, b_3$	$[m]$	otevření drážky
$b_1$	$[m]$	šířka vodiče
$B_{max}$	$[T]$	maximální indukce
$B_s$	$[T]$	střední magnetická indukce deformovaného pole
$B_v$	$[T]$	magnetická indukce v-té harmonické
$C$	$[-]$	komplexní činitel
$c_1$	$[-]$	komplexní činitel
$\cos\varphi_N$	$[-]$	jmenovitý účinník
$d$	$[m]$	průměr kruhového vodiče
$D$	$[-]$	komplexní činitel
$E$	$[-]$	komplexní činitel
$f$	$[Hz]$	frekvence
$F_1, F_2$	$[N]$	síla
$F$	$[-]$	komplexní činitel
$f_1$	$[Hz]$	frekvence sítě
$f_2$	$[Hz]$	frekvence rotoru
$h$	$[m]$	výška vodiče
$I$	$[A]$	proud
$I_0$	$[A]$	proud naprázdno
$I_1$	$[A]$	proud statoru
$I_{1N}$	$[A]$	jmenovitý proud statoru
$I_2$	$[A]$	proud rotoru
$I_2'$	$[A]$	proud rotoru přepočtený na stator
$I_3$	$[A]$	proud v části dvojité klece

$I_N$	[A]	jmenovitý proud
$i_v, i_w$	[A]	proud fáze
$J$	[A·m <sup>-2</sup> ]	proudová hustota
$k_{\sim}$	[-]	činitel zvětšení odporu
$k_c, k_{cs}, k_{cr}$	[-]	Carterův činitel, statoru, rotoru
$k_i$	[-]	poměrný záběrný proud
$k_m$	[-]	poměrný záběrný moment
$k_{v1}$	[-]	činitel vinutí statoru
$k_{v2}$	[-]	činitel vinutí rotoru
$k_{vv}$	[-]	činitel vinutí příslušné harmonické
$k_{\xi}$	[-]	činitel zmenšení reaktance
$L_{11}$	[H]	vlastní indukčnost
$L_{12}, L_{13}$	[H]	vzájemná indukčnost
$L_{2\sigma}$	[H]	rozptylová indukčnost vinutí rotoru
$M$	[Nm]	moment
$m$	[-]	počet vrstev vodičů v drážce
$m, m_1, m_2$	[-]	počet fází, statoru, rotoru
$m_i$	[A·mm <sup>-1</sup> ]	měřítka proudu
$m_m$	[Nm/mm <sup>-1</sup> ]	měřítka momentu
$M_{max}$	[Nm]	moment zvratu (maximální)
$M_N$	[Nm]	jmenovitý moment
$M_P$	[Nm]	moment pracovní tyče
$m_p$	[W·mm <sup>-1</sup> ]	měřítka výkonu
$M_R$	[Nm]	moment rozběhové tyče
$m_y$	[S/mm <sup>-1</sup> ]	měřítka admitance
$M_z$	[Nm]	záběrný moment
$n$	[min <sup>-1</sup> ]	otáčky
$n$	[-]	počet vodičů, které jsou vedle sebe v jedné řadě
$N_1$	[-]	počet závitů statorového vinutí
$N_2$	[-]	počet závitů rotorového vinutí
$n_N$	[min <sup>-1</sup> ]	jmenovité otáčky
$n_S$	[min <sup>-1</sup> ]	synchronní otáčky
$p$	[-]	počet pólových dvojic

$P$	$[W]$	výkon na hřídeli
$P_1$	$[W]$	mechanický příkon
$P_N$	$[W]$	jmenovitý výkon
$p_v$	$[-]$	převod
$P_\delta$	$[W]$	výkon ve vzduchové mezeře
$Q$	$[-]$	počet drážek
$Q_2$	$[-]$	počet drážek rotoru
$R_1$	$[\Omega]$	odpor vinutí statoru
$R_2$	$[\Omega]$	odpor vinutí rotoru
$R_2'$	$[\Omega]$	odpor vinutí rotoru přepočtený na stator
$R_2'(s)$	$[\Omega]$	odpor rotoru přepočtený na stator při skluzu $s$
$R_3$	$[\Omega]$	odpor vinutí části dvojité klece
$R_{fe}$	$[\Omega]$	odpor respektující ztráty v železe
$s$	$[-]$	skluz
$s_N$	$[-]$	jmenovitý skluz
$s_{zv}$	$[-]$	skluz zvratu
$t_3$	$[m]$	rozteč
$u$	$[-]$	pomocná hodnota
$U_1$	$[V]$	napájecí napětí
$U_2$	$[V]$	napětí rotoru
$U_2'$	$[V]$	napětí rotoru přepočtené na stator
$U_3$	$[V]$	napětí v části dvojité klece
$U_{i1}$	$[V]$	indukované napětí statoru
$U_{i2}'$	$[V]$	indukované napětí rotoru přepočtené na stator
$U_{i2}$	$[V]$	indukované napětí rotoru
$U_{i20}$	$[V]$	indukované napětí rozpojeného rotoru
$U_N$	$[V]$	jmenovité napájecí napětí
$v$	$[-]$	stupeň harmonického pole
$X_{1h}, X_{2h}, X_h$	$[\Omega]$	hlavní reaktance
$X_{1k}, X_{2k}$	$[\Omega]$	reaktance nakrátko statoru, rotoru
$X_{1\sigma}$	$[\Omega]$	rozptylová reaktance statoru
$X_{2\sigma}$	$[\Omega]$	rozptylová reaktance rotoru
$X_{2\sigma}'$	$[\Omega]$	rozptylová reaktance rotoru přepočtený na stator

$X_{2\sigma}'(s)$	$[\Omega]$	rozptylová reaktance rotoru přepočtený na stator při skluzu $s$
$X_{3\sigma}$	$[\Omega]$	reaktance části dvojité klece
$Y$	$[S]$	admitance
$Z$	$[\Omega]$	impedance
$Z_1$	$[\Omega]$	impedance statoru
$Z_{1h}$	$[\Omega]$	impedance magnetického obvodu
$Z_{1k}$	$[\Omega]$	impedance nakrátko ze strany statoru
$Z_{2e}$	$[\Omega]$	impedance části dvojité klece při skluzu $s$
$Z_{2k}$	$[\Omega]$	impedance nakrátko ze strany rotoru
$Z_3$	$[\Omega]$	impedance části dvojité klece
$Z_{3e}$	$[\Omega]$	impedance části dvojité klece při skluzu $s$
$\alpha$	$[-]$	činitel plnění pole
$\alpha$	$[m^{-1}]$	činitel
$\beta$	$[-]$	poměr indukcí
$\beta$	$[-]$	poměr šířky vodiče u otevření a dna drážky
$\gamma$	$[-]$	pomocný činitel
$\delta$	$[^\circ]$	úhel
$\delta$	$[m]$	velikost vzduchové mezery
$\delta'$	$[m]$	velikost prodloužené (náhradní) vzduchové mezery
$\eta$	$[\%]$	účinnost
$\mu_0$	$[H \cdot m^{-1}]$	permeabilita vakua
$\zeta$	$[-]$	redukováná výška vodiče
$\rho$	$[\Omega \cdot m]$	měrný odpor vodiče
$\Phi$	$[Wb]$	magnetický tok
$\varphi$	$[-]$	funkce
$\varphi_1$	$[^\circ]$	úhel
$\varphi_{1h}$	$[^\circ]$	úhel impedance statoru
$\Phi_m$	$[Wb]$	maximální magnetický tok
$\Phi_{mU}$	$[Wb]$	maximální magnetický tok fáze U
$\Phi_P$	$[Wb]$	částečný rozptylový magnetický tok (rozběhový)
$\Phi_R$	$[Wb]$	plný rozptylový magnetický tok (pracovní)
$\Phi_v, \Phi_w$	$[Wb]$	magnetický tok fáze
$\psi$	$[-]$	funkce



$\omega$	$[\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}]$	úhlová rychlost
$\omega_1$	$[\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}]$	úhlová rychlost statoru
$\omega_s$	$[\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}]$	synchronní úhlová rychlost

### Značky

$ OX $	vzdálenost bodu od počátku
$J$	jižní pól cívky
$S$	severní pól cívky
$S$	střed kružnice
$U, V, W$	označení fáze
$U1, V1, W1$	označení začátku vinutí fáze
$U2, V2, W2$	označení konce vinutí fáze
$X, X'$	označení bodu

## Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na kružnicový diagram asynchronního stroje s vírovou kotvou. Cílem práce je vypracovat kružnicový diagram stroje SIEMENS 1LA7 163-4AA10 a vytvořit jeho charakteristiky, zejména proudovou a momentovou. Ke konstrukci kružnicového diagramu byly použity hodnoty dodané školitelem Ing. Karlem Hruškou Ph. D.

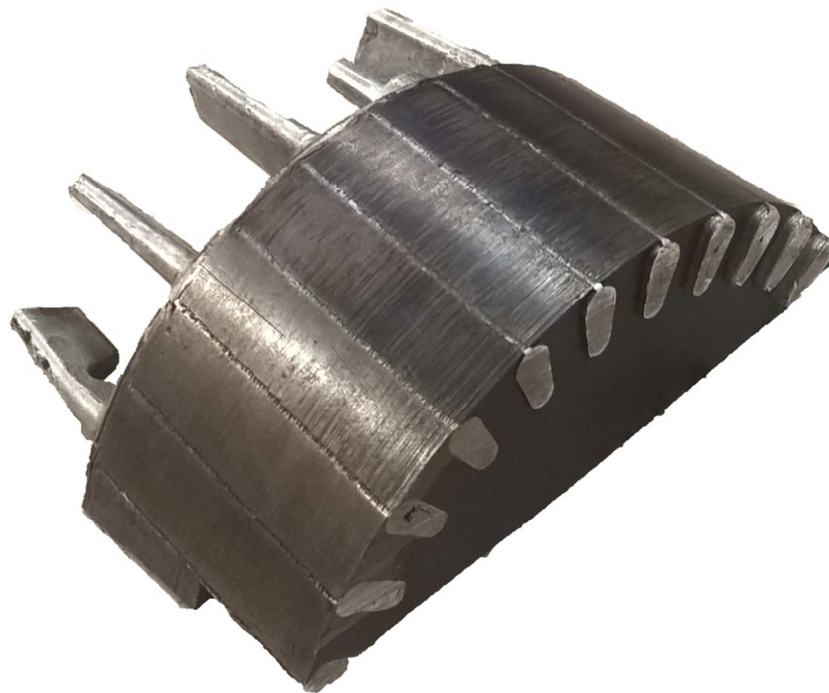
Text je rozdělen do tří částí. První se zabývá základními funkčními principy a informacemi o asynchronním stroji, modifikací náhradního schématu a princip kruhové inverze potřebné ke konstrukci kružnicového diagramu.

V druhé části je popsána problematika vlivu konstrukce rotorového vinutí na charakteristiky asynchronního stroje pro jednotlivé druhy klecí nakrátko.

Třetí část popisuje vytvořený kružnicový diagram a hodnoty získané z něj. Z těchto hodnot jsou vytvořeny charakteristiky stroje.

# 1 Asynchronní stroj

Asynchronní stroje jsou dnes nejrozšířenější a zároveň nejjednodušší a nejlevnější točivé elektrické stroje a vyrábějí se, pokud jde o malé a střední výkony, ve velkých sériích. Asynchronní stroje se nejčastěji používají k pohonům, které nevyžadují změnu, neboť otáčivá rychlost asynchronního stroje úzce souvisí s rychlostí točivého pole. Asynchronní stroje nemají budiče, jsou magnetovány (buzeny) ze statoru připojeného k síti, proto mají pokud možno co nejmenší vzduchové mezery. Dnes se vyrábějí hlavně tzv. motory klecové, jejichž rotory, v tomto případě též nazývané kotvy, mají vinutí uzavřené do tvaru klece (viz obr. 1). Klecové vinutí je robustní, nevyžaduje komutátor ani kroužky či kartáče jako kotva kroužková (obr. 2). Mezní výkony dvoupólových strojů jsou 6 MW u kotvy kroužkové a u kotvy nakrátko (=klecové) 20MW; u prvních narážíme na problém spojený s oteplováním kroužků a opotřebením kartáčů, u druhého na jiskření mezi tyčemi klece a plechy rotoru v okamžiku záběru. [1]



Obr. 1 – Řez kotvou nakrátko [5]



Obr. 2 – Pohled na kroužky u kotvy navinuté trojfázově [10]

## 1.1 Obecné principy funkce asynchronních strojů

### 1.1.1 Točivé magnetické pole

Točivé magnetické pole je reprezentováno fázorem magnetického toku  $\Phi$ .

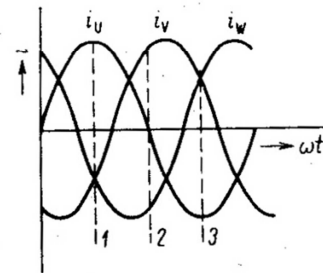
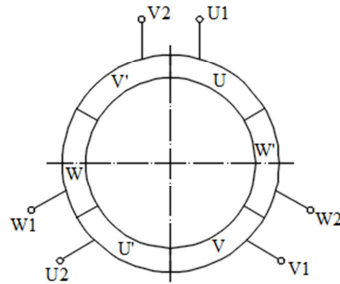
Může vzniknout těmito způsoby:

1. Otáčením permanentního magnetu nebo elektromagnetu v dutině statoru (alternátory),
2. Působením dvou vinutí umístěných na statoru, navzájem proti sobě prostorově pootočených o  $90^\circ$  a napájených napětími se stejnou amplitudou, posunutých proti sobě o  $90^\circ$ .
3. Působením tří vinutí umístěných na statoru, navzájem proti sobě pootočených o  $120^\circ$ , napájených napětími se stejnou amplitudou, navzájem posunutými o  $120^\circ$ . Počet vinutí se může u některých strojů lišit. Existují i vícefázové stroje (pěti – fázové, sedmi – fázové, ...). Např. pěti - fázový stroj má vinutí navzájem proti sobě pootočeno o  $72^\circ$ )

Ve všech těchto případech vzniká kruhové točivé magnetické pole. Nejsou-li dodrženy uvedené předpoklady, vzniká eliptické točivé magnetické pole. (Pro trojfázové asynchronní

motory se používá způsob uvedený v bodě 3.)

Pro jednoduchost uvažujme stator, v jehož drážkách jsou rovnoměrně umístěna vinutí tří fází,  $U, V, W$  (obr. 3). Začátky vinutí, označené  $U1, V1, W1$ , jsou proti sobě posunuty o  $120^\circ$ . Stejně jsou posunuty konce vinutí, označené  $U2, V2, W2$ . Protože jsou jednotlivé fáze napájeny trojfázovou sestavou proudů (obr. 4), můžeme pro různé časové okamžiky 1, 2, 3 ... určit velikost i polohu fázoru výsledného magnetického toku (obr. 5).



Obr. 3 – Princip vinutí trojfázového motoru (vlastně zpracováno dle [2])

Obr. 4 – Trojfázová soustava proudů [2]

Pro okamžik označený na obr. 4 číslicí 1 je proud ve fázi  $U$  kladný a maximální, a vytváří tedy maximální magnetický tok  $\Phi_{mU}$  (obr. 5a). Proudů ve fázích  $V, W$  jsou poloviční, a vytvářejí tedy poloviční magnetické toky  $\Phi_V, \Phi_W$ , posunuté o  $60^\circ$ . Platí tedy

$$\Phi_V = \Phi_W = \frac{\Phi_{mU}}{2} = \frac{\Phi_m}{2}$$

Výsledný magnetický tok  $\Phi$  je

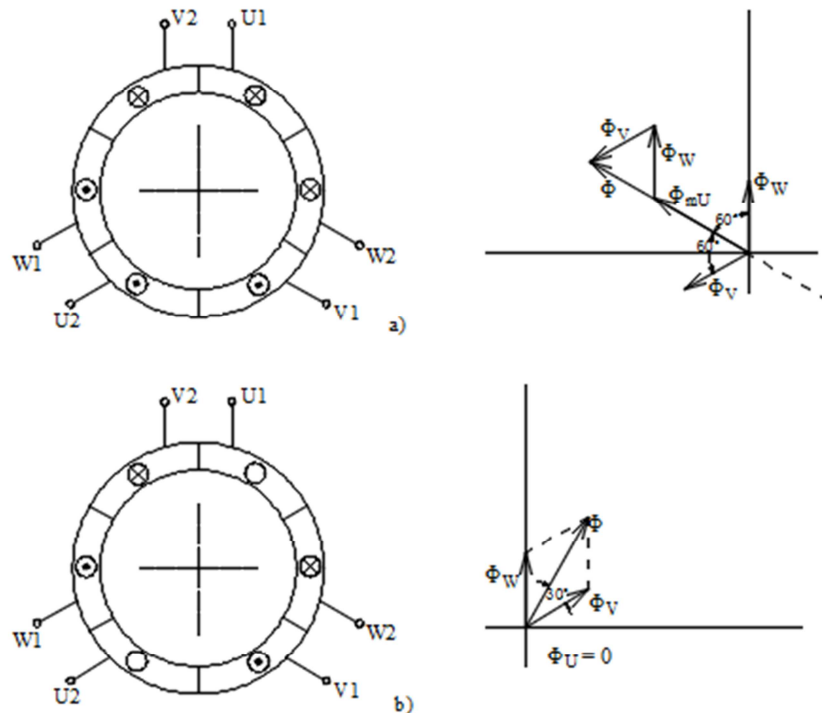
$$\Phi = \Phi_m + 2 \left( \frac{\Phi_m}{2} \right) \cos 60^\circ$$

$$\Phi = \Phi_m \cdot (1 + 0,5)$$

$$\Phi = 1,5 \Phi_m$$

Pro okamžik 2 (obr. 4) dostaneme stejným postupem výsledek znázorněný na obr. 5b. Proudům  $i_V$  a  $i_W$  odpovídají magnetické toky

$$\Phi_W = \Phi_V = \Phi_m \frac{\sqrt{3}}{2}$$



Obr. 5 – Určení výsledného magnetického toku

a) pro okamžik 1 z obr. 4, b) pro okamžik 2 z obr. 4 (vlastně zpracováno dle [2])

Fázorovým součtem magnetických toků  $\Phi_V$  a  $\Phi_W$  dostaneme výsledný magnetický tok  $\Phi$ , jehož velikost je opět

$$\Phi = 1,5 \Phi_m$$

Proti předcházejícímu okamžiku 1 je proud posunut o  $90^\circ$  ve směru pohybu hodinových ručiček. Pro okamžik 3 bychom dostali fázorový diagram souměrný s fázorovým diagramem pro okamžik 1 (obr. 5a). [2]

### 1.1.2 Synchronní otáčky

Z obrázku 4 a 5 je zřejmé, že pro okamžiky 1 a 2 je posunutí proudů a magnetických toků stejné ( $90^\circ$ ). Z toho plyne, že za jeden kmit proudu vykoná fázor výsledného magnetického toku  $\Phi$  také jednu otáčku.

Obecně tedy za  $f$  kmitů vykoná fázor  $n$  otáček. Má-li stroj více pólů (v našem případě jsme dosud uvažovali dvoupólový stroj), pootočí se během jednoho kmitu proudu fázor výsledného magnetického toku o úhel odpovídající jedné dvojici pólů. Pro otáčky fázoru magnetického toku tedy platí

$$n = \frac{f}{p} [s^{-1}; Hz, -]$$

kde  $f$  je kmitočet napájecího napětí (proudu),

$p$  počet pólových dvojic

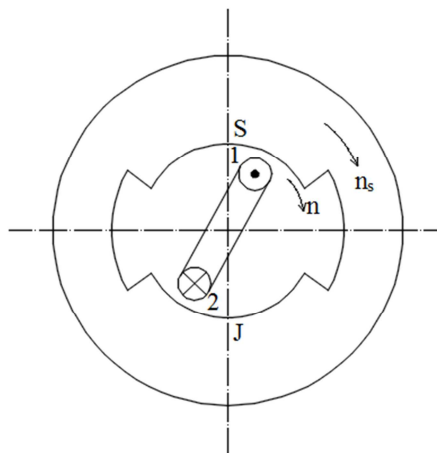
V praxi se tyto otáčky nazývají synchronní otáčky  $n_s$  a pro jejich výpočet se používá vztah

$$n_s = \frac{60f}{p} [min^{-1}; Hz, -][2]$$

### 1.1.3 Vznik točivého momentu, skluz

Vložíme-li do kruhového točivého magnetického pole vytvořeného trojfázovým statorovým vinutím závit spojený nakrátko (v praxi klec), otočný kolem své osy, bude se v něm indukovat napětí, jehož smysl je dán pravidlem pravé ruky (obr. 6). Točivé pole na obr. 6 je znázorněno dvou pólovým stálým magnetem otáčejícím se synchronními otáčkami  $n_s$ . Závit se vzhledem k točivému poli pohybuje proti směru hodinových ručiček.

Protože vodiče 1, 2 závitu jsou v magnetickém poli a prochází jimi proud, působí na ně síla, jejíž smysl je dán pravidlem levé ruky. Závit se otáčí ve stejném smyslu jako točivé magnetické pole (stálý magnet). Pole jako by strhávalo závit s sebou. [2]



Obr. 6. – Vznik točivého momentu a určení jeho smyslu

(vlastně zpracováno dle [1])

Otáčky  $n$  závitu jsou však vždy menší než synchronní otáčky  $n_s$  točivého pole. Kdyby totiž platilo, že  $n = n_s$ , neindukovalo by se v závitě nakrátko (rotoru) napětí a nevznikl by ani silový účinek.

Vzhledem k zatěžovacímu momentu na hřídeli, k mechanickým ztrátám v ložiskách a k tření rotoru o vzduch by však otáčky okamžitě klesly na takovou velikost, při níž se elektromagnetický moment motoru rovná celkovému brzdnému momentu.

Rozdíl otáček točivého magnetického pole  $n_s$  a otáček rotoru  $n$  vyjadřujeme poměrnou hodnotou, tzv. skluzem

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

častěji udávaným v procentech

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 \quad [\%]$$

Při jmenovitém zatížení bývá skluz u běžných strojů v rozsahu (2 až 5) %. (Stroje s větším výkonem mají menší skluz.) Při chodu naprázdno je skluz nepatrný a rotor má téměř synchronní otáčky. Při chodu nakrátko, kdy  $n = 0$ , je skluz  $s = 100\%$ .

Indukovaný proud v rotoru má také proměnlivý kmitočet ( $f_2$ ); rozdíl otáček statoru a rotoru je totiž  $(n_s - n)$ , takže s použitím vztahem pro synchronní otáčky můžeme psát

$$f_2 = \frac{p(n_s - n)}{60}$$

Po úpravě (rozšířením o  $n_s$ )

$$f_2 = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot \frac{n_s p}{60}$$

dostaneme vztah pro kmitočet indukovaného proudu

$$f_2 = s f_1$$

Při určování točivého momentu budeme uvažovat takto:

Pro otáčení statoru s permanentními magnety (obr. 6) je třeba dodat mechanický příkon  $P_1$ . Odečteme-li od něho ztráty v ložiskách a třením o vzduch, dostaneme tzv. výkon ve vzduchové mezeře  $P_\delta$ , který se přenáší působením točivého magnetického pole na rotor. Na obě části (stator i rotor) musí však působit stejný točivý moment daný vztahem

$$M = \frac{P_\delta}{\omega_s} \quad [N \cdot m; W, rad \cdot s^{-1}]$$

kde  $\omega_s$  je synchronní úhlová rychlost.

Moment rotoru je přímo úměrný výkonu  $P_\delta$ , a nezávisí na otáčkách rotoru.

Moment na hřídeli motoru je dán vztahem

$$M = \frac{P}{\omega} = 9,55 \frac{P}{n}$$

kde  $P$  je výkon motoru na hřídeli [W]

$\omega$  skutečná úhlová rychlost hřídele, pro kterou platí



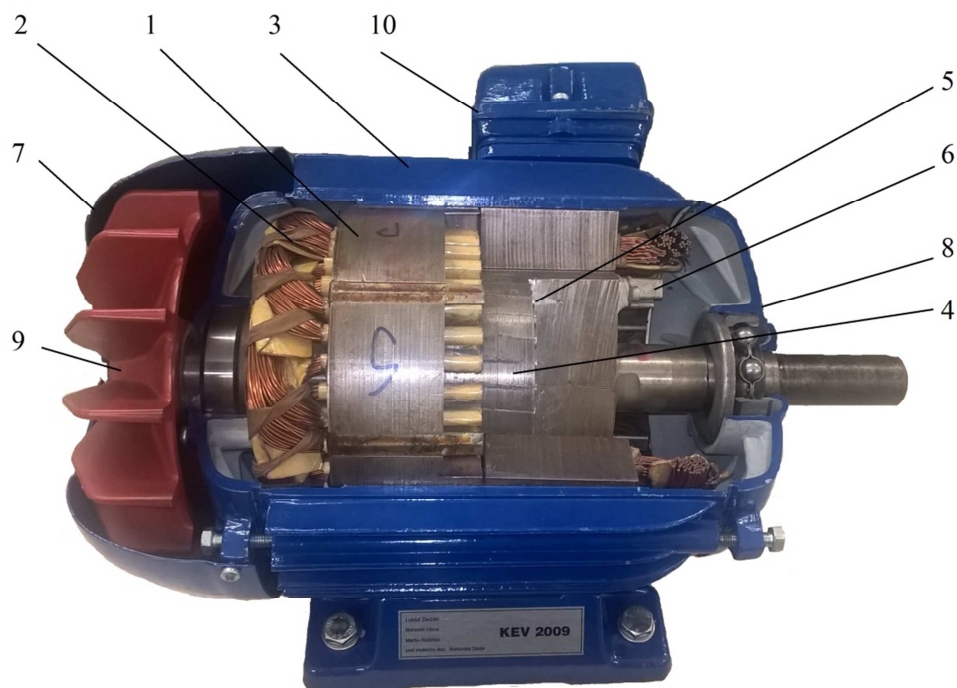
$$\omega = \frac{\pi n}{30} \quad [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}; \text{min}^{-1}][2]$$

## 1.2 Možnosti provedení rotoru asynchronních strojů

Podle konstrukce rotorového vinutí dělíme stroje na

- a) nakrátko
- b) kroužkové [2]

### 1.2.1 Stroje s klecí nakrátko



Obr. 7 - Řez trojfázovým asynchronním motorem s klecí nakrátko v laboratoři FEL ZČU

- 1 – statorový svazek, 2 – statorové vinutí, 3- žebrovaná kostra, 4 – rotor s klecí,  
5 – tyče klece, 6 – kruhy klece, 7 – přední ložiskový štít, 8 – zadní ložiskový štít, 9 –  
vnější ventilátor, 10 – statorová svorkovnice

Řez moderním uzavřeným motorem s vlastním chlazením je na obr. 7.

Hlavní části motoru s kotvou nakrátko jsou: statorový svazek 1 tvoří mezikruží, složené z elektrotechnických plechů tloušťky 0,35; 0,5 nebo 0,65 mm. Jeho vnitřní obvod má drážky, ve kterých je uloženo trojfázové statorové vinutí 2, které po připojení na trojfázovou síť vybudí tzv. točivé magnetické pole. Toto pole vytváří točivý moment motoru. Statorový svazek je zalisován v litinové kostře 3, která dává motoru vnější tvar a umožňuje jeho připevnění k základu. Popisovaný motor má nejčastěji vodorovný patkový tvar. Kromě patek

může mít motor i přírubu, která umožňuje jeho přímé spojení s poháněným strojem. Rotor 4 tvoří válec, složený také z elektrotechnických plechů. Ty jsou u menších motorů nalisovány přímo na hřídel, u větších strojů jsou upevněny na rotorové nosné hvězdě. Rotor má na vnějším obvodu drážky vyplněné vodivými tyčemi 5. Tyče jsou po obou stranách spojeny vodivými kruhy 6 a tvoří dohromady tzv. rotorovou klec. Tyče i kruhy se dříve vyráběly nejčastěji z hliníku, který se nastříká do drážek a do zvláštních přiložených forem, ve kterých se vytvoří kruhy. Dnes se kvůli požadavkům na ekodesign (nařízení komise ES č. 640/2009) vyrábějí nejčastěji z mědi.

Rotor je od statoru oddělen malou vzduchovou mezerou a otáčí se působením točivého magnetického pole. Točivý moment se na poháněný stroj přenáší pomocí hřídele, který vyčnívá ze zadního ložiskového štítu. Hřídel je upraven tak, že se na něj může nasadit řemenice nebo jeden kotouč spojky.

Zadní štít motoru se nazývá ten štít, ze kterého vyčnívá hřídel. Tato strana se nazývá strana pohonu motoru (též drive - end, označováno DE). Přední ložiskový štít je na opačné straně pohonu (též nondrive - end, označováno NDE).

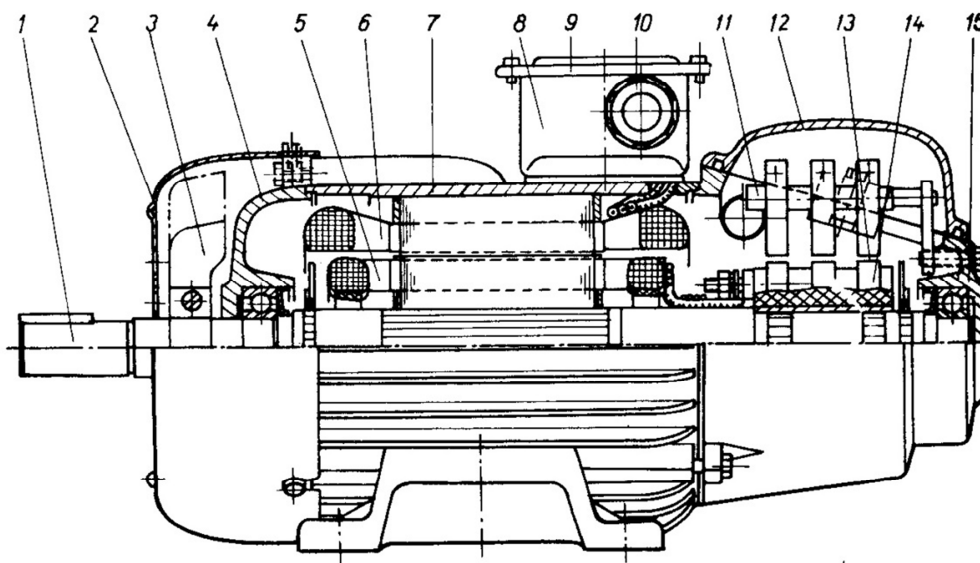
Hřídel je uložen ve dvou obvykle valivých ložiskách, která jsou upevněna v ložiskových štítech. Ložiskové štíty jsou svým tvarem přizpůsobeny tvaru statorové kostry a tvoří s ní jednotný celek.

Přívod proudu k vinutí umožňuje statorová svorkovnice 10,

Chlazení obstarává ventilátor 9, který je u uzavřených motorů nasazen zvenku a upraven tak, že ofukuje proudem vzduchu žebrovaný povrch kostry. [3]

### 1.2.2 Stroj s vinutým rotorem (kroužkový)

Kroužkový motor (obr. 8) má v rotorových drážkách uloženo trojfázové vinutí trvale spojené do hvězdy nebo méně často do trojúhelníka. Vývody jednotlivých fází jsou připojeny na tři vodivé kroužky, izolovaně upevněné na hřídeli. Na kroužky dosedají uhlíkové kartáče, umístěné v držácích kartáčů. Držáky jsou vodivě spojeny se třemi svorkami rotorové svorkovnice, která bývá upevněna na předním ložiskovém štítu, případně může být součástí hlavní svorkovnice stroje. [3]



Obr. 8 - Řez kroužkovým motorem

1 – hřídel, 2 – kryt ventilátoru, 3 – ventilátor, 4 – zadní ložiskový štít, 5 – rotorové vinutí, 6 – statorové vinutí, 7 – statorová kostra, 8 – svorkovnice, 9 – víčko svorkovnice, 10 – pancéřové ucpávky přívodních vodičů, 11 – držák kartáčů, 12 – kryt otvoru v ložiskovém štítu, 13 – kartáč, 14 – kroužek, 15 – přední ložiskový štít [3]

Prostřednictvím sběracího mechanismu můžeme do obvodu rotorového vinutí zařadit proměnný odpor, kterým se zmenší velikost záběrného proudu při spouštění nebo kterým můžeme zmenšit otáčky motoru.

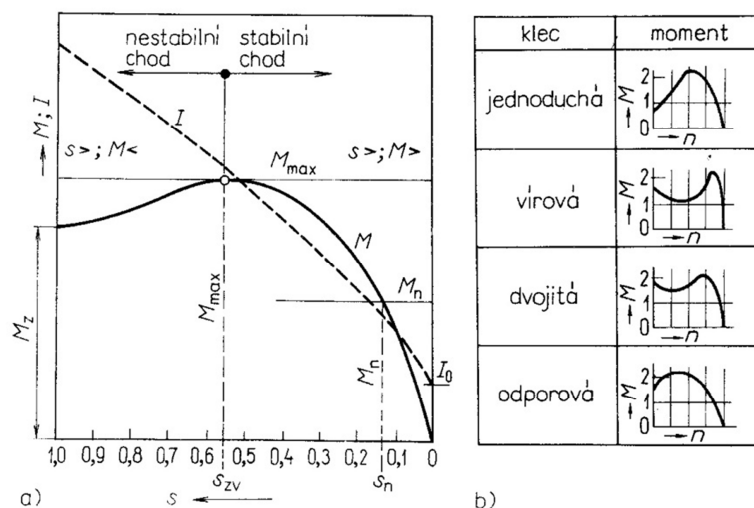
Stator je proveden stejně jako u motoru nakrátko. [3]

## 1.3 Používané typy klecí nakrátko

### 1.3.1 Jednoduchá klec nakrátko

Konstrukce motoru s jednoduchou klecí nakrátko je popsána v kapitole 1.2.1.

Nevýhodou motorů s jednoduchým rotorem nakrátko je velký záběrný proud při jejich spouštění a poměrně malý záběrný moment. Tyto nedostatky lze odstranit odporovou, dvojitou nebo vírovou klecí. [4]



Obr. 9 - a) normální průběh momentové charakteristiky

b) Typické průběhy momentových charakteristik v závislosti na druhu klece podle ČSN 35 0300 [3]

### 1.3.2 Odporová klec

Odporová klec má tyče i kruhy zhotovené z materiálu o větším měrném odporu např. z mosazi, siluminu apod. Většímu odporu rotorového obvodu odpovídá větší záběrný moment, ale současně i větší skluz a horší účinnost motoru.

Odporové klece se používali u jeřábových a výtahových motorů, kde je velký záběrný moment zvlášť důležitý, ale kde při přerušovaném chodu není zhoršená účinnost rozhodující. Dnes se ovšem běžněji používají kroužkové stroje s přídatnými odpory v rotorovém vinutí.

Vhodným odporem klece můžeme dosáhnout toho, že záběrný moment se může rovnat momentu maximálnímu.

Zvětšení odporu zmenšením samotného průřezu není vhodné, neboť menšímu průřezu odpovídá menší tepelná kapacita a tím i větší oteplení. [3]

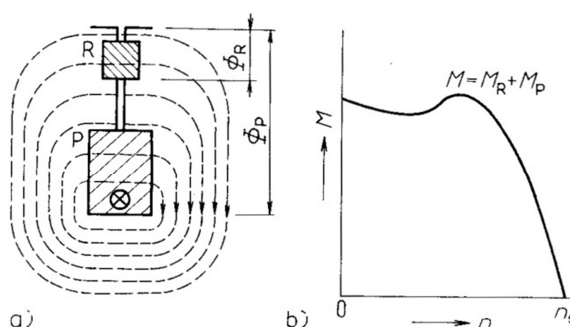
### 1.3.3 Dvojitá klec

Dvojitá klec (Boucherotova klec) má dvě soustavy tyčí nestejného průřezu nad sebou nebo vedle sebe. Tyto tyče jsou spolu spojeny vodivými kruhy (obr. 10a). Tato klec byla diktována snahou zhotovit motor, který by v sobě spojoval výhody jednoduché klece při normálním chodu s výhodami odporové klece při rozběhu.

Touto klecí dosáhneme zvětšení záběrného momentu a zmenšení záběrného proudu.

Na obr. 10a je vyznačena jedna tyč rozběhové klece  $R$  a pod ní, hluboko v železe rotoru, tyč pracovní klece  $P$ . Tyč pracovní klece je spřažena s plným rozptylovým magnetickým tokem  $\Phi_P$ , avšak tyč rozběhové klece je spřažena jen s jeho malou částí  $\Phi_R$ . Při rozběhu, kdy prochází tyčemi proud síťového kmitočtu, je reaktance spodní tyče mnohonásobně větší než reaktance horní tyče.

Rotorový záběrný proud se do obou tyčí rozdělí nepřímo úměrně impedancím. Jeho větší část prochází horní rozběhovou klecí, která má ale větší odpor (menší průřez, horší měrnou vodivost) a chová se jako odporová klec. Motor se rozbíhá s větším momentem a menším proudem.



Obr. 10 - Dvojitá klec

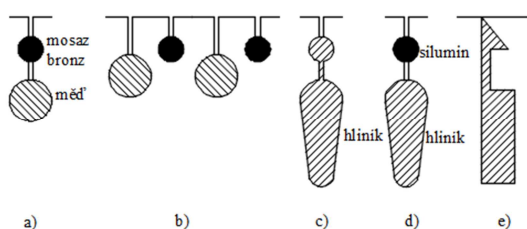
a) vysvětlení funkce, b) momentová charakteristika [3]

Za chodu je skluzový kmitočet malý, reaktance tyčí je nepatrná a proud se rozdělí paralelně do obou tyčí nepřímo úměrně jejich odporům. Motor se chová jako normální motor s jednoduchou klecí.

Momentová charakteristika se získá sečtením charakteristiky pracovní ( $M_P$ ) a rozběhové klece ( $M_R$ ) podle obr. 10b

Vhodnou úpravou obou klecí můžeme momentovou charakteristiku motoru v širokých mezích ovlivnit a přizpůsobit potřebám stroje.

Vlastnosti motoru s dvojitou klecí jsou za chodu trochu horší než vlastnosti motoru s jednoduchou klecí.



Obr. 11 - Úprava tyčí dvojitě klece (vlastně zpracováno dle [3])

Původní dvojitě klece měly kruhové měděné tyče, rozběhové tyče byly z bronzu nebo z mosazi (obr. 11). Hliníkové klece mají tyče podle obr. 11c. Motory nad 50kW mají

rozběhové tyče ze siluminu, který má větší měrný odpor a určuje tyčím větší průřez s větší tepelnou kapacitou (obr. 11d). Z výrobních důvodů mohou mít tyče tvar podle obr. 11e; drážky se mohou vyrobit pomocí silnějších a trvanlivějších přípravků.

Vzduchová mezera mezi oběma tyčemi musí být proto, aby se celý rozptylový magnetický tok neuzavíral jen kolem horní tyče.

Dnes se téměř všechny motory nad 4kW vyrábějí s dvojitou klecí. [3]

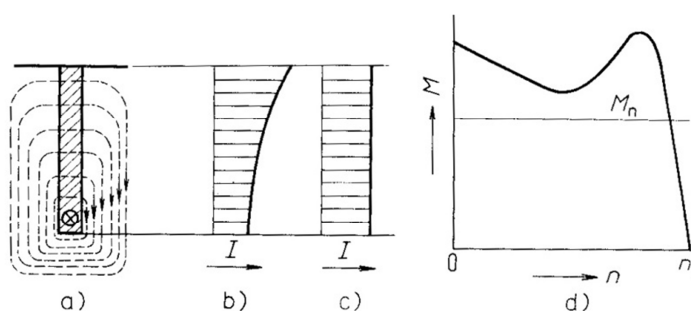
### 1.3.4 Vírová klec

Vírová klec má tyče uloženy v úzkých a hlubokých drážkách. Vírovou klecí lze dosáhnout zvětšení záběrného momentu a zmenšení záběrného proudu na podobném principu jako u klece dvojitě (obr. 12). Spodní vlákna vysoké tyče jsou spřažena s větším rozptylovým magnetickým tokem než horní vlákna tyče, takže při rozběhu mají větší reaktanci a proud se z nich vytlačuje do horních vrstev (obr. 12b). Proud tedy prochází menším průřezem a klec se chová jako odporová. Za chodu se proud rozdělí téměř rovnoměrně po celém průřezu podle obr. 12c

Vírovou klecí nelze dosáhnout takové kombinace momentových charakteristik a takového zvětšení záběrného momentu, jako dvojitou klecí. Naproti tomu je však výrobně jednodušší, a proto oblíbená.

Obvyklý průběh momentu je na obr. 12d

Motory s vírovou klecí se používají zejména pro větší výkony, vysoká napětí a poměrně menší požadované záběrné momenty.



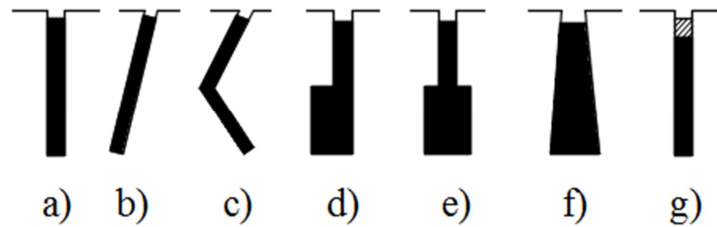
Obr. 12 - Vírová klec

- a) rozložení indukčních čar, b) rozložení proudu při rozběhu, c) rozložení proudu za chodu,  
d) momentová charakteristika vírové klece [3]

Tyče mají různé tvary znázorněné na obr. 13.

Zúžení profilu v horní části má zvětšit činný odpor za rozběhu. Stejného účinku lze

dosáhnout ještě výhodnější kombinací tyčí s nestejným měrným odporem (obr. 13g). Tyče mohou mít i různé mechanické vlastnosti. Klínový tvar podle obr. 13f se zvlášť hodí pro rychloběžné motory, neboť se odstředivou silou neuvolňuje. [3]

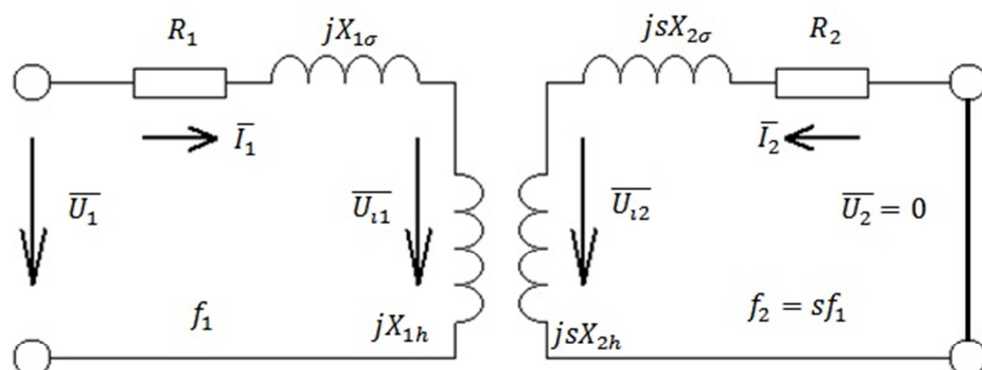


Obr. 13 - Tvary tyčí vírové klece (vlastně zpracováno dle [3])

## 1.4 Popis asynchronního stroje formou náhradního schématu

Náhradní schéma asynchronního stroje schématicky znázorňuje funkci asynchronního stroje z elektrického hlediska.

Základní obvodové znázornění asynchronního stroje (obr. 14) reprezentuje rozdílné kmitočty na statoru a rotoru. V tomto tvaru však není vhodné pro další zpracování. [4]



Obr. 14 - Základní obvodové znázornění asynchronního stroje (zpracováno dle [4])

### 1.4.1 Náhradní schéma ve tvaru „T“ článku

Náhradní schéma asynchronního stroje je podobné náhradnímu schématu transformátoru, neboť v obou případech jde o dvě vinutí, která mají společný magnetický obvod. Rozdíl je v magnetických polích (v transformátoru je stojaté a pulsující magnetické pole, v asynchronním motoru je točivé magnetické pole s konstantní hodnotou magnetického toku) a v přenosu energie vzduchovou mezerou.

Připojíme-li statorové vinutí k síti, indukuje se v jedné fázi napětí dané vztahem

$$U_{i1} = 4,44\Phi f_1 N_1 k_{v1}$$

Ponecháme-li rotorové vinutí rozpojené (rotor stojí), je na jeho svorkách napětí

$$U_{i20} = 4,44\Phi f_1 N_2 k_{v2}$$

Spojíme-li vinutí rotoru nakrátko, rotor se roztočí a ve vinutí se bude indukovat napětí s kmitočtem daným rovnicí

$$f_2 = sf_1$$

Indukované napětí je

$$U_{i2} = 4,44\Phi f_2 N_2 k_{v2}$$

Po dosazení a úpravě dostaneme

$$U_{i2} = 4,44\Phi s f_1 N_2 k_{v2}$$

$$U_{i2} = s U_{i20}$$

Z tohoto vztahu je zřejmé, že indukované napětí je největší, jestliže rotor stojí, tj. při  $s = 1$ . Naopak při chodu naprázdno (kdy  $s \cong 0$ ) se v rotorovém vinutí neindukuje téměř žádné napětí.

Při tvorbě náhradního schématu asynchronního motoru uvažujeme (podobně jako u transformátoru) také činný odpor a rozptylovou reaktanci statorového vinutí. V náhradním schématu rovněž zůstává magnetizační reaktance  $X_h$  a činný odpor  $R_{Fe}$ , jímž je respektujeme ztráty v železe a mechanické ztráty.

Odlíšná situace (vzhledem k transformátoru) nastává v rotorovém vinutí, neboť rozptylová reaktance  $X_{2\sigma}$  není konstantní, ale závisí na rotorovém kmitočtu  $f_2$ . Pro rozptylovou reaktanci rotoru při určitém skluzu  $s$  platí vztah

$$X_{2\sigma s} = 2\pi f_2 L_{2\sigma} = 2\pi s f_1 L_{2\sigma}$$

který upravíme na

$$X_{2\sigma s} = s X_{2\sigma}$$

Proud procházející vinutím jedné fáze rotoru je dán vztahem

$$I_2 = \frac{U_{i2}}{Z}$$

Po úpravě dostaneme

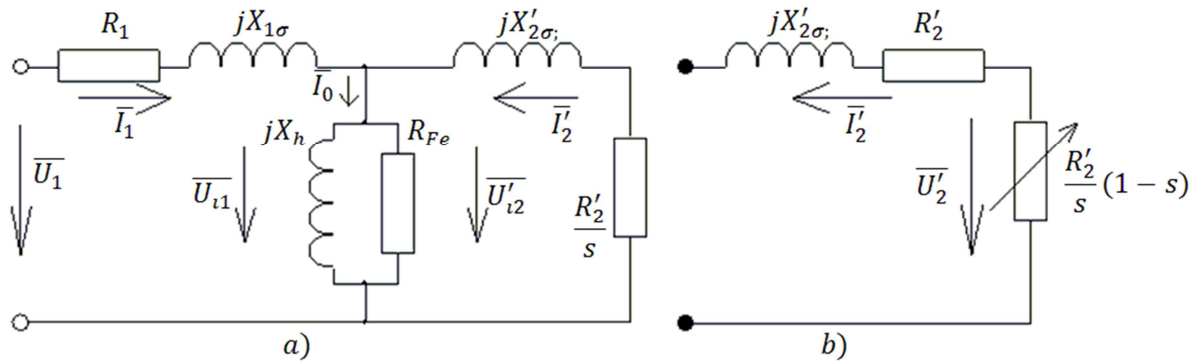
$$I_2 = \frac{s U_{i20}}{\sqrt{R_2^2 + (s X_{2\sigma})^2}}$$

Dělíme-li čitatele i jmenovatele zlomku skluzem  $s$ , dostaneme

$$I_2 = \frac{U_{i20}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{2\sigma}^2}}$$



Z tohoto vztahu je vidět, že kroužkový motor působí jako transformátor, jehož sekundární obvod má rozptylovou reaktanci  $X_{2\sigma}$  zapojenou do série s proměnným činným odporem  $R_2/s$ . V náhradním schématu tohoto motoru (obr. 15a) jsou již uvedeny veličiny přepočtené na stator (viz dále). [2]



Obr. 15 - Náhradní schéma asynchronního motoru ve tvaru „T“

a) úplné náhradní schéma s vyznačením všech veličin, b) náhradní schéma sekundární strany s rozdělením činného odporu (zpracováno dle [2])

Musíme si však uvědomit, že v členu  $R_2/s$  je obsažen jednak činný odpor  $R_2$  rotorového vinutí jedné fáze a jednak zátěž sekundárního obvodu náhradního schématu. Tento zbytek je tedy dán vztahem

$$\frac{R_2}{s} - R_2 = \frac{R_2 - sR_2}{s} = \frac{R_2}{s}(1 - s)$$

Sekundární obvod lze tedy nakreslit také podle obr. 15b

V náhradním schématu (obr. 15) jsou stejně jako u transformátoru vyznačeny přepočítané veličiny. Pro stanovení přepočítacího činitele (resp. převodu) musíme vzít v úvahu ještě činitele vinutí, takže pro převod  $p_v$  platí vztah

$$p_v = \frac{N_1 k_{v1}}{N_2 k_{v2}}$$

za předpokladu, že statorové i rotorové vinutí mají stejný počet fází ( $m_1 = m_2$ ). Tento předpoklad je splněn právě u kroužkového motoru. Pro motor nakrátko představuje klec vinutí, jehož počet fází  $m_2$  je dán vztahem

$$m_2 = \frac{Q}{p}$$

kde  $Q$  je počet drážek

$p$  počet pólových dvojic

Pro motor nakrátko je převod

$$p_v = \frac{m_1 N_1 k_{v1}}{m_2 N_2 k_{v2}}$$

kde počet závitů  $N_2$  spojených do série je vždy

$$N_2 = \frac{1}{2}$$

a činitel vinutí  $k_{v2}=1$ .

Po dosazení dostaneme vztah pro převod

$$p_v = \frac{m_1 N_1 k_{v1}}{\frac{Q_2}{p} \cdot \frac{1}{2} \cdot 1}$$

$$p_v = \frac{2p}{Q_2} m_1 N_1 k_{v1} \quad [2]$$

#### 1.4.2 Modifikace náhradního schématu T – tvaru na $\Gamma$ – tvar

K modifikaci využijeme obr. 14, ale nejdříve musíme formulovat rovnice pro napětí. Pro toto znázornění platí následující rovnice

$$\overline{U}_1 = (R_1 + jX_{1\sigma})\overline{I}_1 + \overline{U}_{i1}$$

$$\overline{U}_2 = (R_2 + jsX_{2\sigma})\overline{I}_2 + \overline{U}_{i2}$$

Dále použijeme rovnici pro  $U_{i2}$  vyjádřené pomocí skluzu  $s$  a indukovaného napětí naprázdno  $U_{i20}$ .

$$\overline{U}_{i2} = s\overline{U}_{i20}$$

Úpravou těchto rovnic dostaneme

$$\overline{U}_1 = (R_1 + jX_{1\sigma})\overline{I}_1 + \overline{U}_{i1}$$

$$\frac{\overline{U}_2}{s} = \left( \frac{R_2}{s} + jX_{2\sigma} \right) \overline{I}_2 + \overline{U}_{i20}$$

dále zavedeme převody a převedeme rotorovou část na statorovou. První rovnice zůstane beze změny. Pro druhou lze psát

$$\frac{\overline{U}'_2}{s} = \left( \frac{R'_2}{s} + jX'_{2\sigma} \right) \overline{I}'_2 + \overline{U}_{i1}$$

Dále budeme uvažovat  $U_2 = 0$  a dostaneme soustavu rovnic, která vyhovuje náhradnímu schématu ve tvaru dvojbranu T – typu. Ještě zavedeme veličinu  $Z_{1h}$  pro paralelní spojení  $X_{1h}$  a  $R_{Fe}$ .

$$\overline{Z}_{1h} = \frac{jX_{1h}R_{Fe}}{R_{Fe} + jX_{1h}}$$

Potom platí

$$\overline{U}_{i1} = \overline{Z}_{1h}\overline{I}_0 = \overline{Z}_{1h}(\overline{I}_1 + \overline{I}'_2)$$

Náhradní schéma má tvar znázorněný na obr. 15. Výsledné rovnice náhradního schématu jsou

$$\begin{aligned}\bar{U}_1 &= (R_1 + jX_{1\sigma})\bar{I}_1 + \bar{U}_{11} \\ \frac{\bar{U}'_2}{s} &= \left( \frac{R'_2}{s} + jX'_{2\sigma} \right) \bar{I}'_2 + \bar{U}_{11}\end{aligned}$$

Rovnice upravíme pomocí  $Z_{1h}$ , rovnice budou

$$\begin{aligned}\bar{U}_1 &= (R_1 + jX_{1\sigma} + \bar{Z}_{1h})\bar{I}_1 + \bar{Z}_{1h}\bar{I}'_2 \\ 0 &= \bar{Z}_{1h}\bar{I}_1 \left( \frac{R'_2}{s} + jX'_{2\sigma} + \bar{Z}_{1h} \right) \bar{I}'_2\end{aligned}$$

po zkrácení zápisu zavedeme značení

$$\begin{aligned}\bar{Z}_1 &= R_1 + jX_{1\sigma} + \bar{Z}_{1h} \\ \bar{Z}'_2 &= \frac{R'_2}{s} + jX'_{2\sigma} + \bar{Z}_{1h}\end{aligned}$$

úpravou předchozí soustavy rovnic dostaneme

$$\begin{aligned}\bar{U}_1 &= \bar{Z}_1\bar{I}_1 + \bar{Z}_{1h}\bar{I}'_2 \\ 0 &= \bar{Z}_{1h}\bar{I}_1 + \bar{Z}'_2\bar{I}'_2\end{aligned}$$

Z první rovnice vyjádříme proud  $I_1$

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{U}_1}{\bar{Z}_1} - \frac{\bar{Z}_{1h}}{\bar{Z}_1} \bar{I}'_2$$

Dosadíme do druhé a vyjádříme proud  $I'_2$

$$\bar{I}'_2 = \frac{-\bar{U}_1 \bar{Z}_{1h}}{\bar{Z}_1 \bar{Z}'_2 - \bar{Z}_{1h}^2}$$

V dalším kroku zavedeme komplexní činitel  $c_1$  ve tvaru

$$\bar{c}_1 = \frac{\bar{Z}_1}{\bar{Z}_{1h}} = \frac{R_1 + jX_{1\sigma} + \bar{Z}_{1h}}{\bar{Z}_{1h}} = 1 + \frac{R_1 + jX_{1\sigma}}{\bar{Z}_{1h}}$$

dosazením tohoto vztahu do vztahu pro  $I_1$  dostaneme nový tvar relace pro primární proud  $I_1$

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{U}_1}{\bar{Z}_1} - \frac{\bar{I}'_2}{\bar{c}_1}$$

Proud naprázdno  $I_0$  dostaneme tak, že  $\dot{I}'_2 = 0$

$$\bar{I}_0 = \frac{\bar{U}_1}{\bar{Z}_1}$$

Po úpravě dostaneme

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_0 - \frac{\bar{I}'_2}{\bar{c}_1}$$

Výraz pro  $\dot{I}'_2$  dělíme činitelem  $c_1$  a postupnými úpravami dostaneme

$$\frac{\bar{I}'_2}{\bar{c}_1} = \frac{-\bar{U}_1 \bar{Z}_{1h}}{\bar{c}_1 (\bar{Z}_1 \bar{Z}'_2 - \bar{Z}_{1h}^2)} = \frac{-\bar{U}_1}{\bar{c}_1 \left( \frac{\bar{Z}_1}{\bar{Z}_{1h}} \bar{Z}'_2 - \bar{Z}_{1h} \right)} = \frac{-\bar{U}_1}{\bar{c}_1 (\bar{c}_1 \bar{Z}'_2 - \bar{Z}_{1h})}$$

Nyní se jmenovatel výrazu rozepíše do tvaru, který dostaneme dosazením rovnice pro  $Z'_2$

$$\begin{aligned} \bar{c}_1 (\bar{c}_1 \bar{Z}'_2 - \bar{Z}_{1h}) &= \bar{c}_1 \left[ \bar{c}_1 \left( \frac{R'_2}{s} + jX'_{2\sigma} \right) + \frac{\bar{Z}_1}{\bar{Z}_{1h}} \bar{Z}_{1h} - \bar{Z}_{1h} \right] \\ &= \bar{c}_1^2 \left( \frac{R'_2}{s} + jX'_{2\sigma} \right) + \bar{c}_1 (R_1 + jX_{1\sigma}) \end{aligned}$$

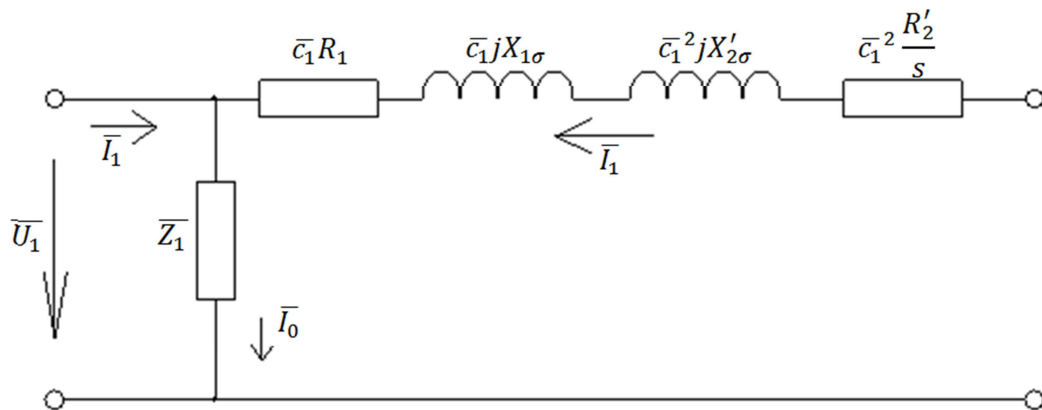
Použitím posledního tvaru předchozího výrazu dostáváme proud rotoru

$$\frac{\bar{I}'_2}{\bar{c}_1} = \frac{-\bar{U}_1}{\bar{c}_1 (R_1 + jX_{1\sigma}) + \bar{c}_1^2 \left( \frac{R'_2}{s} + jX'_{2\sigma} \right)}$$

Proud statoru bude

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{U}_1}{\bar{Z}_1} + \frac{\bar{U}_1}{\bar{c}_1 (R_1 + jX_{1\sigma}) + \bar{c}_1^2 \left( \frac{R'_2}{s} + jX'_{2\sigma} \right)}$$

S tímto tvarem koresponduje  $\Gamma$  – tvar náhradního schématu, obr. 16 [5]



Obr. 16 - Náhradní schéma asynchronního motoru ve tvaru „ $\Gamma$ “ (zpracováno dle [5])

Povšimněme si, že sekundární proud má změněné měřítko a také jiný fázový posuv. Podobně se s činitelem  $c_1$  změnily i parametry náhradního schématu. To znamená, původně reálné odpory budou mít imaginární složku a reaktance reálnou.

Nyní k rozboru činitele  $c_1$ , Můžeme jej vyjádřit ve tvaru

$$\bar{c}_1 = |\bar{c}_1| e^{j\delta}$$

kde  $\delta$  je malý záporný úhel

Podobně je možno také napsat

$$\bar{Z}_{1h} = |\bar{Z}_{1h}| e^{j\varphi_{1h}}$$

Obvykle je  $R_{Fe} \gg X_{1h}$ , z toho plyne, že úhel  $\varphi_{1h}$  bude platit  $\varphi_{1h} \rightarrow \pi/2$

Dle definice  $c_1$  lze psát

$$\bar{c}_1 = 1 + \frac{R_1 + jX_{1\sigma}}{Z_{1h}} = 1 + \frac{R_1}{Z_{1h}} e^{-j\varphi_{1h}} + \frac{X_{1\sigma}}{Z_{1h}} e^{j(\frac{\pi}{2} - \varphi_{1h})} \quad [5]$$

Impedanci podélné větve lze vyjádřit jako funkci skluzu

$$\bar{Z}(s) = \bar{c}_1 R_1 + \bar{c}_1 jX_{1\sigma} + \bar{c}_1^2 jX_{2\sigma}' + \bar{c}_1^2 \frac{R_2'}{s}$$

kde  $\bar{c}_1^2 \frac{R_2'}{s}$  je komplexní proměnná, která je závislá na skluzu a zbytek vzorce je nezávislý na skluzu a nazýváme ho komplexní konstanta. Výsledkem bude přímka v komplexní rovině.

## 1.5 Kružnicový diagram asynchronního stroje

Kružnicový diagram asynchronního stroje je zobrazením polohy koncového vektoru proudu do vektoru proudu do komplexní roviny při různé velikosti skluzu stroje.

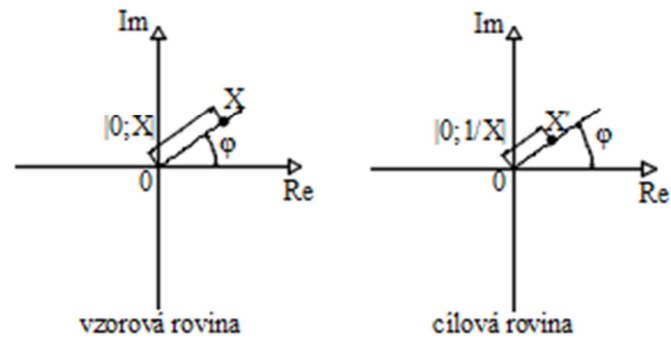
Existuje mnoho variant konstrukce kružnicového diagramu, přičemž nejpřesnější je provedení kruhové inverze impedanční přímky v komplexní rovině. Z jednodušších konstrukcí je nejznámější Heylandova kružnice (zanedbává odpor statoru a ztráty v železe, platná pro stroje výkonů od 10kW), respektive její zpřesněná forma zvaná jako Ossanova korekce (uvažuje odpor statoru, zanedbává ztráty v železe), používá se pro výkony do 10kW. Dále se uvádí způsob konstrukce, který nezanedbá odpor statoru ani ztráty v železe. Pak je ovlivněna poloha středu kružnice diagramu. [6]

### 1.5.1 Kružnicový diagram pomocí kruhové inverze

Kruhová inverze je lineární lomené zobrazení v komplexním oboru. Toto zobrazení vyjadřuje vztah mezi vzorovou komplexní rovinou a cílovou komplexní rovinou. Pro zobrazení bodu  $X$  ze vzorové roviny na bod  $X'$  do cílové roviny platí následující podmínky

Úhlová poloha bodu  $X$  se nemění

Vzdálenost bodu  $X$  od počátku je ve vzorové rovině  $|OX|$  a v cílové  $1/|OX|$  [7]



Obr. 17 - Vzorová a cílová rovina (zpracováno dle [7])

Zobrazení různých typů křivek vede k jejich deformaci

Přímka procházející počátkem se zobrazí jako přímka o opačné orientaci

Přímka neprocházející počátkem se zobrazí jako kružnice

Kružnicový diagram asynchronního stroje je zobrazením impedanční přímky za pomoci kruhové inverze. Převedením impedanční přímky přes kruhovou inverzi získáme admitanční kružnici

$$\bar{Z}(s) \Rightarrow \frac{1}{\bar{Z}(s)} = \bar{Y}(s)$$

Proud rotorem asynchronního stroje je přitom podle náhradního schématu v  $\Gamma$  – tvaru roven

$$\bar{I}_2 = \frac{\bar{U}_1}{\bar{Z}} = \bar{U}_1 \bar{Y}$$

Admitance podélné větve je stejně jako impedance podélné větve závislá na skluzu, tvar předchozí rovnice změní svůj tvar

$$\bar{I}_2(s) = \frac{\bar{U}_1}{\bar{Z}(s)} = \bar{U}_1 \bar{Y}(s)$$

Předpokládáme-li čistě reálnou složku napětí  $U_1$ , vychází

$$\bar{I}_2(s) = \frac{U_1}{\bar{Z}(s)} = U_1 \bar{Y}(s)$$

Nyní musíme zavést měřítko proudu

$$m_i = U_1 m_y \quad [A/mm]$$

kde  $m_y$  je základní měřítko admitancí [S/mm]

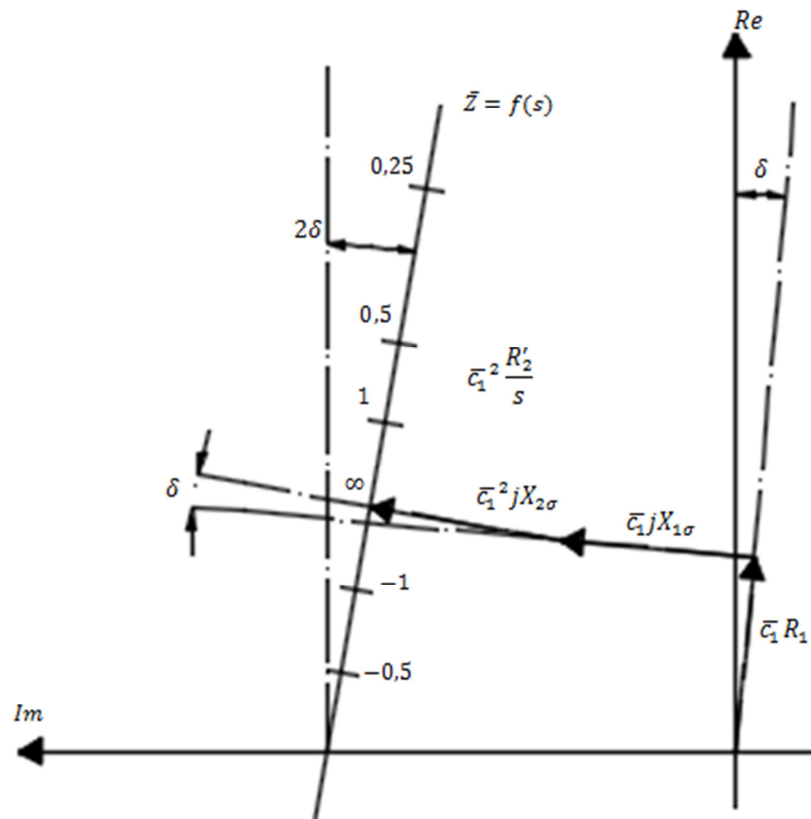
$U_1$  reálná konstanta napětí

Výsledkem kruhové inverze impedanční přímky je, po přenásobení napětím, kružnice rotorových proudů. Kružnice statorových proudů lze získat přičtením proudu  $I_0$  k výsledné kružnici. Tím dojde k posuvu souřadné soustavy o velikost a směr vektoru  $I_0$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + \bar{I}_2'$$

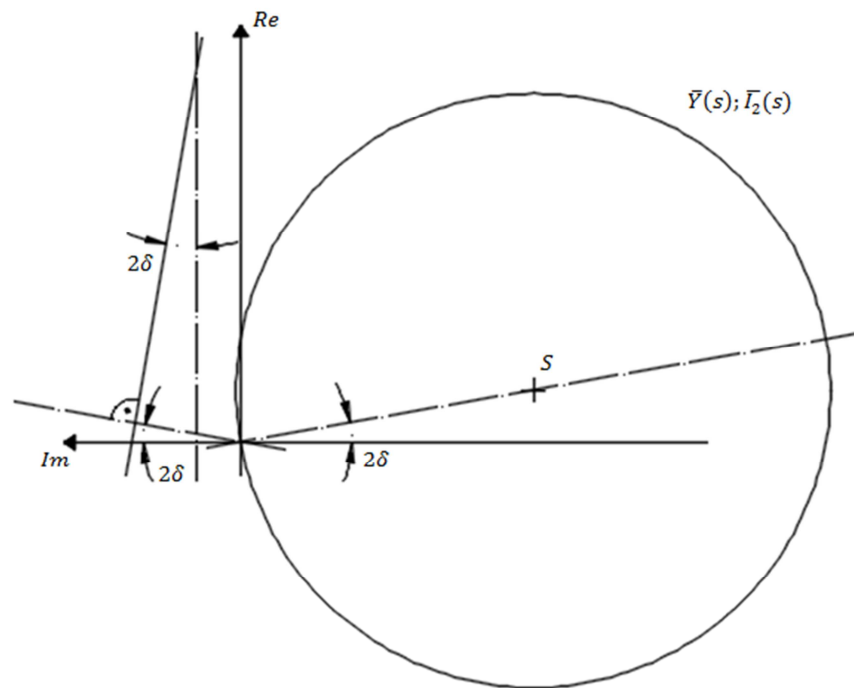
Nyní vytvoříme impedanční přímku použitím impedance podélné větve jako funkce skluzu [7]

$$\bar{Z}(s) = \bar{c}_1 R_1 + \bar{c}_1 j X_{1\sigma} + \bar{c}_1^2 j X_{2\sigma}' + \bar{c}_1^2 \frac{R_2'}{s}$$



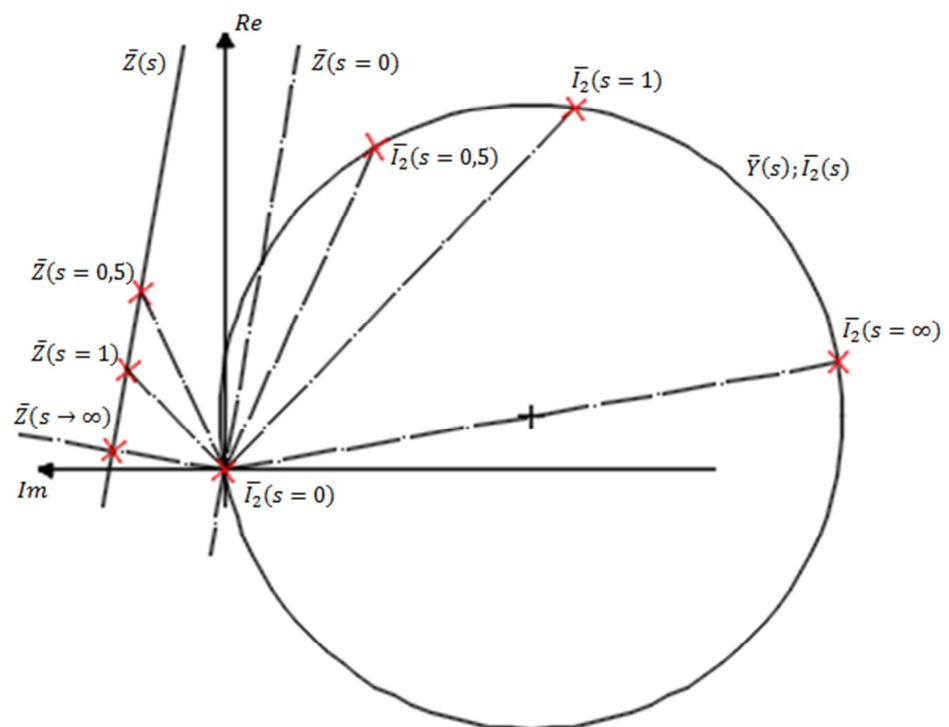
Obr. 18 – Impedanční přímka jako funkce skluzu (zpracováno dle [7])

Nyní pomocí kruhové inverze vytvoříme z impedanční křivky kružnicový diagram. Vytvoříme kružnici, která bude procházet počátkem souřadného systému. Střed leží na přímce, která prochází počátkem a svírá s imaginární osou úhel  $2\delta$ .



Obr. 19 – krok 1 – vytvoření kružnice (zpracováno dle [7])

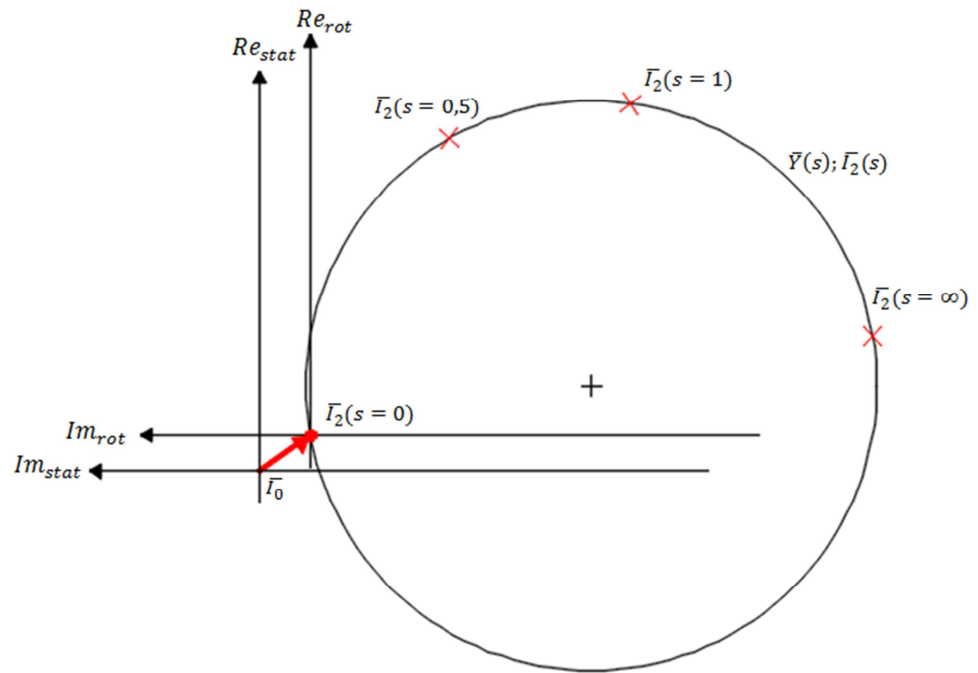
Nyní postupně budeme vynášet kruhovou inverzí hodnoty admitancí, respektive proudů, díky přepočtu na kružnici z impedanční přímky.



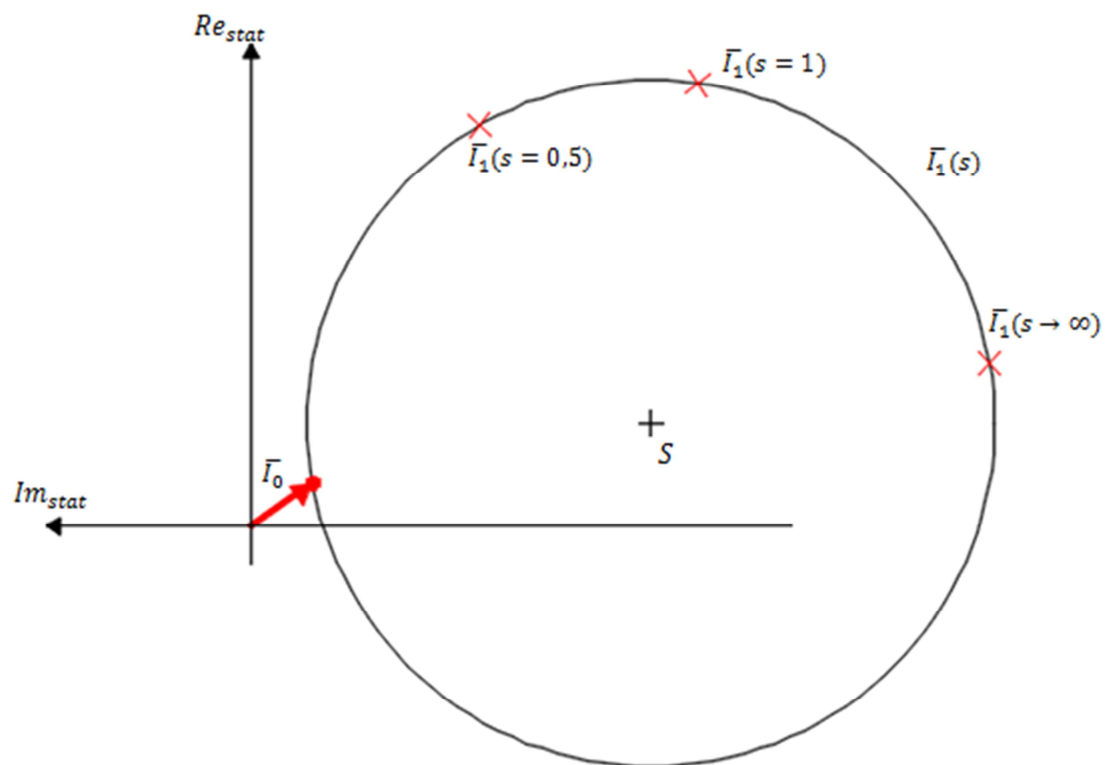
Obr. 20 – krok 2 – znázornění hodnot rotorového proudu jako funkce skluzu na kružnici (zpracováno dle [7])

Dalším krokem je posunutí souřadného systému o proud  $I_0$ , dostaneme kružnici statorových proudů.



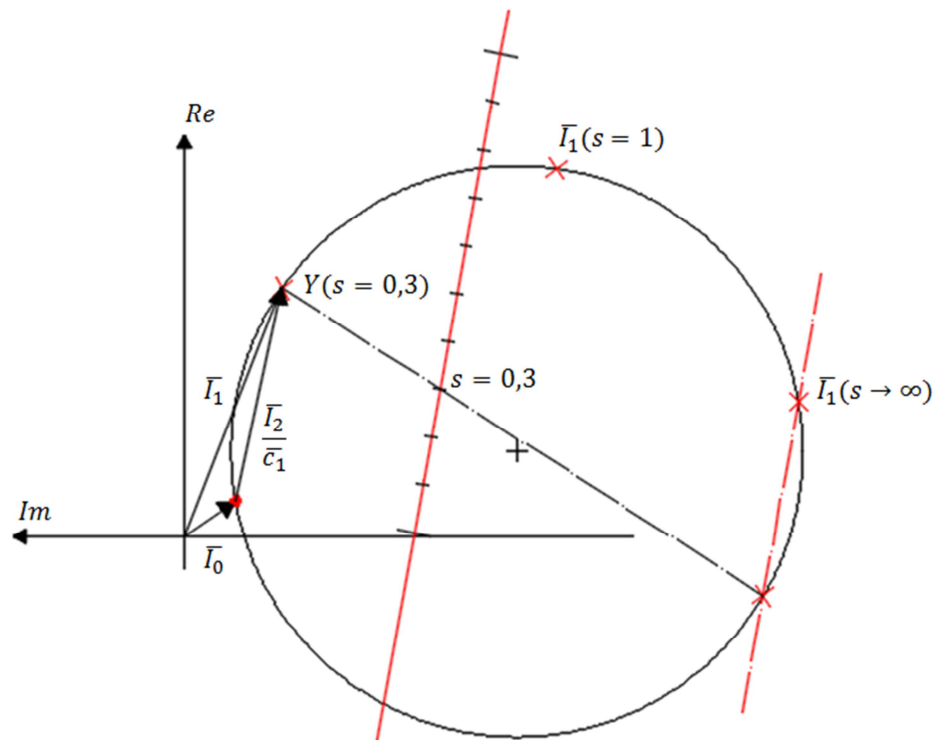


Obr. 21 – krok 3 – posunutí souřadného systému o proud  $I_0$  (zpracováno dle [7])



Obr. 22 – kružnice satorových proudů (zpracováno dle [7])





Obr. 24 – příklad proudů pro skluz 0,3 (zpracováno dle [7])

Výkony je třeba odečítat jako součiny reálné části proudů a relevantního úseku kružnicového diagramu. Proud rotoru je pootočen o  $2\delta$ , stejně je pootočena i jeho reálná část. Měřítko bude vypadat

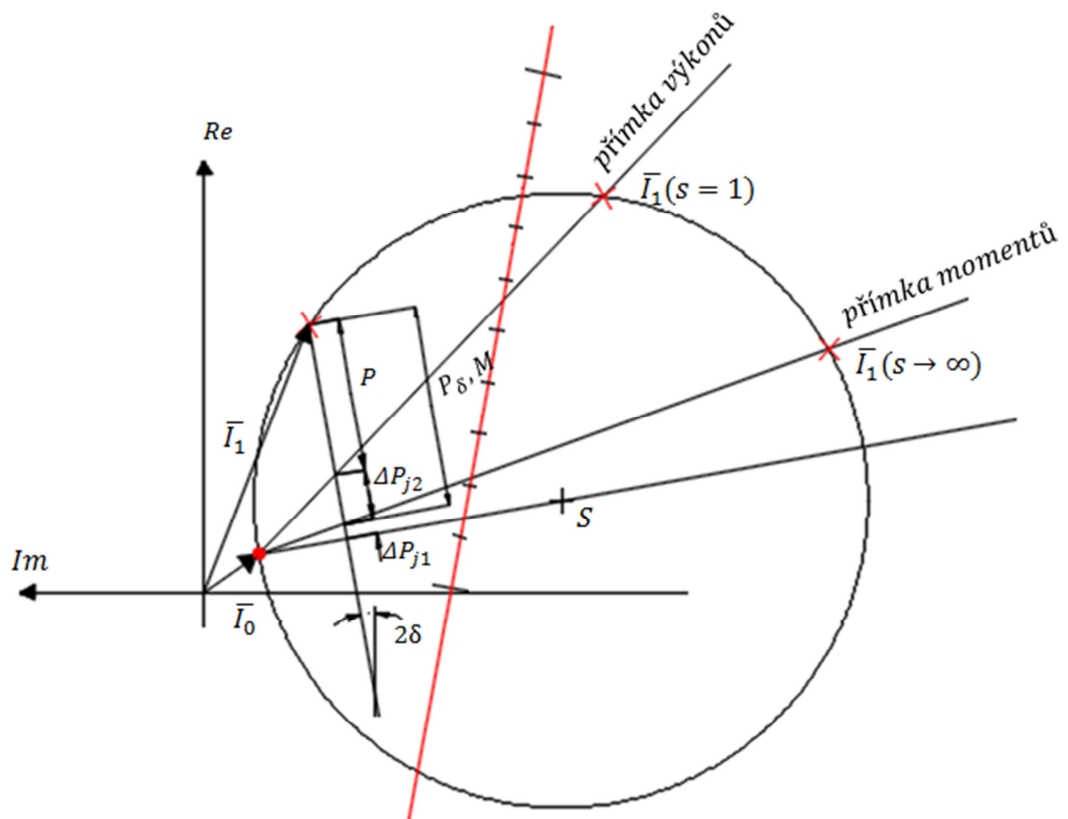
$$m_p = m_1 m_i$$

Moment stroje je úměrný výkonu přenesenému přes vzduchovou mezeru

$$M = \frac{P_\delta}{\omega_s}$$

měřítko bude vypadat

$$m_m = \frac{m_p}{\omega_s} [7]$$

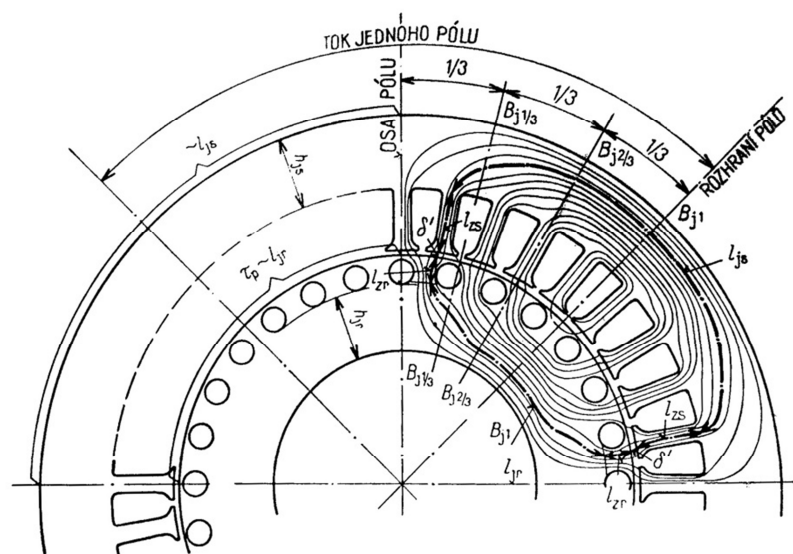


Obr. 25 – Odečítání hodnot výkonů a momentů z kružnicového diagramu (zpracováno dle [7])

## 2 Vliv konstrukce rotorového vinutí na charakteristiky stroje

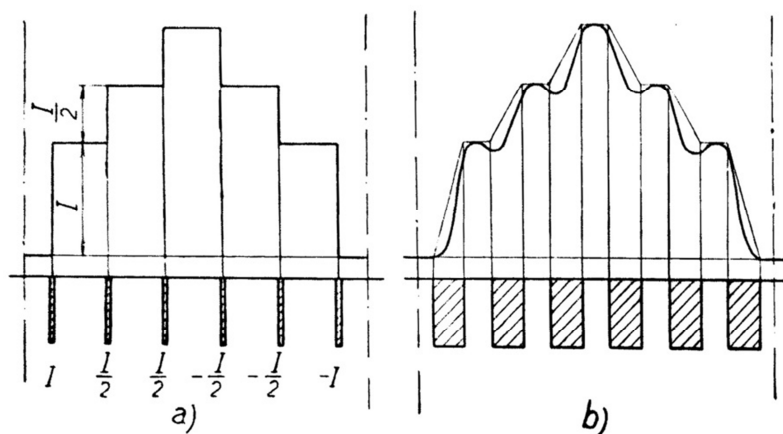
### 2.1 Magnetický obvod

Typický magnetický obvod asynchronního motoru s klecí nakrátko je na obr. 26. Stator je prsteneц z plechů s drážkami na vnitřním obvodu. Rotor je prsteneц s drážkami na vnějším obvodu. Magnetický tok vychází ze statorových zubů, projde vzduchovou mezerou do rotorových zubů a obrátí se rotorovým jhem a zuby zpět do vzduchové mezery. Nakonec se uzavře přes statorové zuby a jho.



Obr. 26 – Magnetický obvod asynchronního motoru [8]

Tvar magnetického pole ve vzduchové mezeře se vyšetřuje s předpokladem, že celý proudový obsah drážky je podle obr. 27a soustředěn v ose drážky. Magnetické pole má pak tvar zubové čáry, jejíž stupně jsou úměrné proudu drážky. Ve skutečnosti má otevření drážky určitou šířku, takže v rozsahu otevření drážky přibývá proudu, a tedy také magnetického toku rovnoměrně podle tenké čáry na obr. 27b. Vlivem nasycení železa se ještě ostré rohy čáry pole zhladí.



Obr. 27 – Tvar magnetického pole asynchronního motoru [8]

Otevřením drážek je pole zeslabeno, takže vzniknou vlnky, které ovšem nepostupují s točivým polem, nýbrž stojí na místě a posouvají se po čáře pole. Za předpokladu, že je jedna strana vzduchové mezery hladká a druhá drážkovaná, vznikne pole, jehož tvar se vyšetří např. kreslením podle Lehmana. Podle Lehmana se kreslí indukční a hladinové čáry v rovině kolmé na zvolený směr. Obě soustavy čar se musí protínat v pravých úhlech a poměr středních příček se stále musí rovnat 1. Magnetická vodivost feromagnetických pólů se přitom považuje

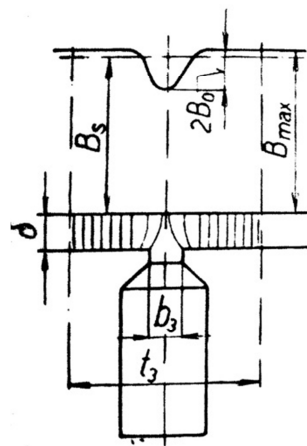
za nekonečně velkou, takže stopy těchto pólů jsou hladinovými čarami. Dalšími známými hladinovými čarami a indukčními čarami jsou osy souměrnosti prostoru. Na obr. 28 je zakreslen průběh magnetického pole proti drážce, v níž není žádný proud. Přibližně lze tvar vlnky považovat za sinusovku. S předpokladem nekonečně hluboké drážky je poměr indukcí

$$\beta = \frac{B_0}{B_{max}} = \frac{1 + u^2 - 2u}{2(1 + u^2)}$$

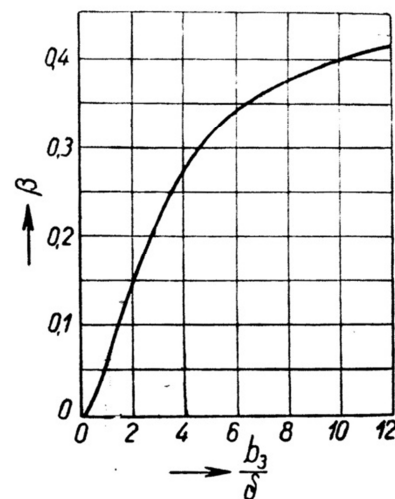
kde pomocná hodnota

$$u = \frac{b_3}{2\delta} + \sqrt{1 + \left(\frac{b_3}{2\delta}\right)^2}$$

Hodnoty  $\beta$  jsou na obr. 29



Obr. 28 – Vliv drážky na tvar pole [8]



Obr. 29 – Činitel deformace pole drážkováním [8]

Konečná hloubka drážky má na výsledek jen malý vliv.

Vlivem deformace pole drážkováním vzroste indukce na příslušném místě vzduchové mezery z  $B_s$  na  $B_{max}$ . Toto zvětšení je rovnocenné prodloužení vzduchové mezery činitelem  $k_c$ , který se nazývá Carterovým činitelem. Prodloužená vzduchová mezera

$$\delta' = k_c \delta$$

Carterův činitel se vypočítá podle hodnot na obr. 29 ze vzorce

$$k_c = \frac{t_3}{t_3 - \gamma \delta}$$

kde činitel

$$\gamma = \frac{4}{\pi} \left[ \frac{b_3}{2\delta} \operatorname{arctg} \frac{b_3}{2\delta} - \ln \sqrt{1 + \left(\frac{b_3}{2\delta}\right)^2} \right]$$

Velmi přibližně je pro  $b_3/\delta$  v mezích 2 až 12 Carterův činitel

$$k_c = \frac{t_3}{t_3 - \delta - 0,75b_3}$$

Je-li stator i rotor drážkován, vznikají v čáře pole vlnky otevřením obojích drážek. Vliv obou otevření lze superponovat, takže náhradní vzduchová mezera

$$\delta' = k_{cs}k_{cr}\delta$$

kde  $k_{cs}$  a  $k_{cr}$  jsou Carterovy činitele pro stator a rotor

Magnetické pole obíhá synchronní rychlostí vzduchovou mezerou. Vlnky od statorových drážek stojí a pohybují se tedy synchronní rychlostí proti poli. Vlny rotorových drážek se pohybují proti poli skluzovou rychlostí.

Při vyšetřování magnetického pole ve vzduchové mezeře indukčního motoru se obvykle vychází ze stupňové čáry podle obr. 27a. Výjimečně se také přihlíží k otevření drážky, které však má na výsledek malý vliv.

Amplituda  $v$ -té harmonické stupňovitého pole je podle Fourierova rozkladu

$$B_v = B_{max} \frac{3k_{vv}}{\pi v}$$

kde  $k_{vv}$  je činitel vinutí příslušné harmonické.

Např. pro pole podle obr. 30 je pro první harmonickou činitel vinutí

$$k_{v1} = 0,96$$

a amplituda indukce

$$B_1 = B_{max} \frac{3 \cdot 0,96}{\pi \cdot 1} = 0,916B_{max}$$

Pro pátou harmonickou je činitel vinutí

$$k_{v5} = \frac{\sin 5 \frac{\pi}{6}}{3 \sin 5 \frac{\pi}{18}} = 0,218$$

a amplituda indukce je

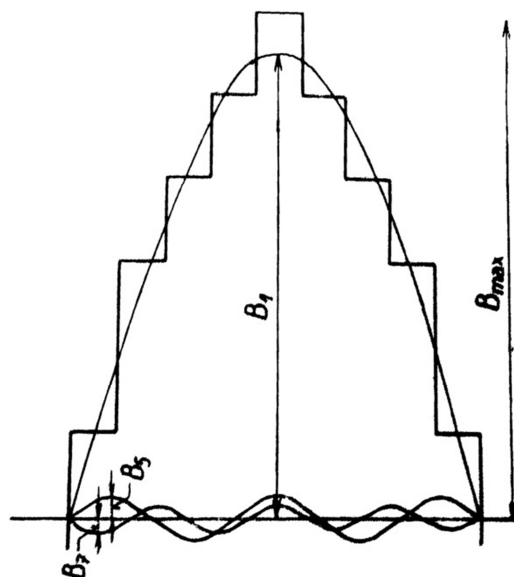
$$B_5 = B_{max} \frac{3 \cdot 0,218}{\pi \cdot 5} = 0,0417B_{max}$$

pro sedmou harmonickou je činitel vinutí

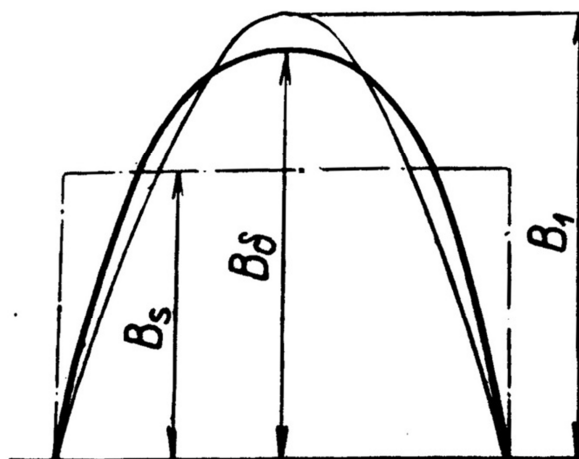
$$k_{v7} = \frac{\sin 7 \frac{\pi}{6}}{3 \sin 7 \frac{\pi}{18}} = -0,177$$

a amplituda indukce

$$B_7 = -B_{max} \frac{3 \cdot 0,177}{\pi \cdot 7} = -0,0241B_{max}$$



Obr. 30 – Rozklad zubového pole na harmonické [8]



Obr. 31 – Zploštění pole vlivem nasycení železa [8]

Vlivem nasycení zubů se pole zploští, neboť se ze středních přesycených zubů vytlačí do krajních méně nasycených zubů podle obr. 31. Zploštění je tím menší, čím větší je motor, protože u větších motorů se na cestu železem spotřebuje menší část magnetomotorické síly a nasycení železa má menší vliv na tvar pole. Zploštění čáry pole lze vyjádřit empirickým činitelem tvaru

$$\alpha = \frac{B_s}{B_\delta}$$

pro čistou sinusovku je

$$\alpha = \frac{2}{\pi}$$

Magnetický obvod asynchronních motorů se skládá z plechových částí prostřížených z dynamových plechů tloušťky např. 0,5 mm, izolovaných navzájem papírem, lakem,



fosfátem, apod. Užívá se plechů se ztrátovým číslem 2 až 3 W/kg. Jen u velkých rychloběžných strojů a u strojů na vysoký kmitočet se užívá plechů s menším ztrátovým číslem, po případě i tenčích plechů, aby byly ztráty v železe přiměřené. [8]

## 2.2 Speciální vinutí rotoru

### 2.2.1 Obecné poznatky

Jedním ze způsobů zlepšení rozběhových charakteristik je zvětšování odporu vinutí rotoru po dobu rozběhu.

Dosáhnout tohoto zvětšení je možné zapojením spouštěcího odporníku do rotorového obvodu. Je to způsob efektivní, docílí se jím potřebného průběhu rozběhového momentu i proudu, má však své nevýhody. Spouštěcí odporník, spojovač nakrátko a odklápěč kartáčů zvyšují cenu motoru, zmenšují spolehlivost, komplikují celý proces spouštění a znesnadňují tak jeho automatizaci. Kromě toho vinutí rotoru z cívek je technologicky obtížnější než vinutí klecové a pro rychloběžné motory největších výkonů je bez mimořádných, ekonomicky velmi nákladných opatření neproveditelné.

Tyto nevýhody nemají asynchronní motory nakrátko, jejichž klecová vinutí jsou konstruována tak, aby v závislosti na skluzu měnila během rozběhu svůj odpor a reaktanci. Tato změna se docílí využitím elektrického povrchového jevu (skinefektu) Tyto stroje spojují do značné míry výhody motorů nakrátko a kroužkových motorů.

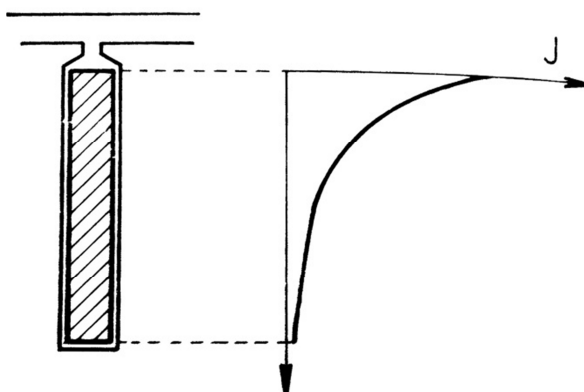
Svého času byly vyvíjeny kroužkové motory (E. Arnold, H. Görges, K. Šenfer a další) s přepínatelným vinutím, jehož větve se přepojovaly za rozběhu pomocí odstředivého přepínače a měnil se tak odpor i reaktance rotoru. Tyto stroje se již nevyrábějí. [9]

### 2.2.2 Vírová klec

Vírová klec je vinutí s relativně úzkými a vysokými vodiči obdélníkového či lichoběžníkového průřezu. K těmto klecím přiřazujeme i ty, jejichž vodiče mají složitější tvar, v principu však plní stejnou funkci.

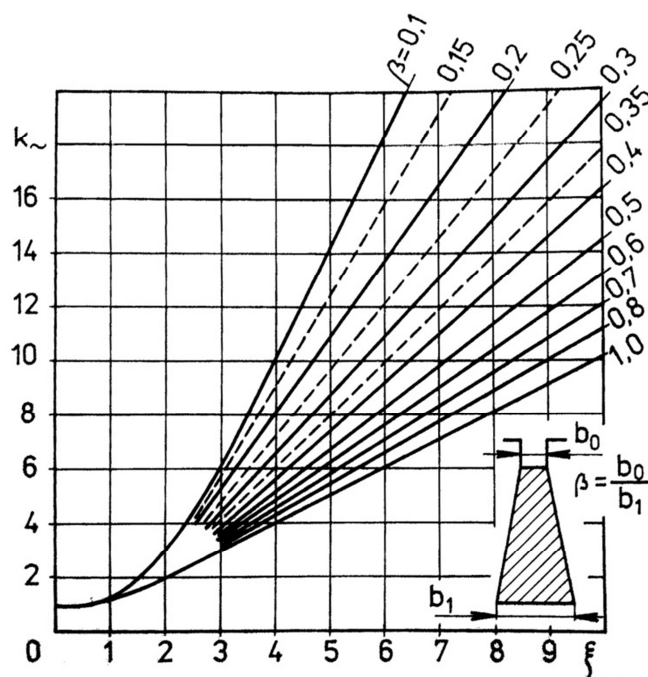
Základní myšlenka této konstrukce spočívá v tom, že v první fázi rozběhu, kdy kmitočet rotoru  $f_2$  se přibližně rovná kmitočtu statoru  $f_1$ . Vznikají v tyčích značné vířivé proudy, vyvolané rozptylovým polem, procházejícím drážkami rotoru. Tyto vířivé proudy se skládají s rotorovým proudem, čímž se mění rozdělení proudové hustoty s tyčí. Proud se soustřeďuje

hlavně v té části tyče, která je blíže ke vzduchové mezeře (obr. 32). Elektrické ztráty podstatně vzrostou, což odpovídá zařazení dodatečných odporů do rotoru. Změna rozdělení proudové hustoty má vliv i na reaktanci, která se zmenší.



Obr. 32 – Rozdělení proudové hustoty v průřezu obdélníkové tyče při  $f_2 \approx f_1$  [9]

Při rozběhu se kmitočet v rotoru postupně zmenšuje,  $f_2 = sf_1$ , zmenšují se i vířivé proudy a nerovnoměrné rozložení proudu v tyči. Při jmenovitém zatížení je kmitočet malý a proudová hustota je rozložena prakticky rovnoměrně.



Obr. 33 – Závislost činitele zvětšení odporu  $k_{\sim}$  na  $\xi$  pro lichoběžníkovou tyč [9]

Vířivé proudy působí hlavně v těch částech tyčí, které jsou založeny v drážkách. Odpor obdélníkové tyče se zde může zvětšit 3 – 4krát, reaktance se zmenší o 30 – 40 %. U lichoběžníkových tyčí je zvětšení odporu a zmenšení reaktance ještě výraznější. V částech, kde tyče nejsou v železe, tj. v čelech a v radiálních ventilačních kanálech, je změna parametrů malá a obvykle ji zanedbáváme. Neuvažujeme zpravidla také změny odporů a reaktancí

kruhů nakrátko, výjimkou tvoří dvupólové a čtyřpólové motory velkých výkonů, jsou-li jejich kruhy nakrátko zajištěny proti působení odstředivých sil bandážovými kruhy z nemagnetické oceli.

Činitel zvětšení odporu  $k_{\sim}$  pro tyč obdélníkového průřezu, uloženou do rotorové drážky, je pro  $m = 1$

$$k_{\sim} = \varphi(\xi)$$

podle rovnice

$$k_{\sim} = \varphi(\xi) + \frac{m^2 - 1}{3} \psi(\xi)$$

V těchto rovnicích je  $\xi$  bezrozměrnou veličinou, která představuje tzv. „redukovanou výšku vodiče“

$$\xi = \alpha h$$

$$\alpha = \sqrt{\left(\frac{nb}{a} \cdot \frac{\mu_0 \pi f}{\rho}\right)} \quad [m^{-1}]$$

kde  $h$  je výška vodiče [m]

$b$  šířka vodiče [m]

$n$  počet vodičů, které jsou vedle sebe v jedné řadě

$f$  kmitočet [ $s^{-1}$ ]

$\rho$  měrný odpor vodiče [ $\Omega \cdot m$ ]

$a$  šířka drážky

$\mu_0$  permeabilita vakua [ $H \cdot m^{-1}$ ]

$$\varphi(\xi) = \xi \frac{\sinh 2\xi + \sin 2\xi}{\cosh 2\xi + \cos 2\xi}$$

Při  $\xi > 2$  je  $\varphi(\xi) \approx \xi$ , proto

$$k_{\sim} \approx \xi$$

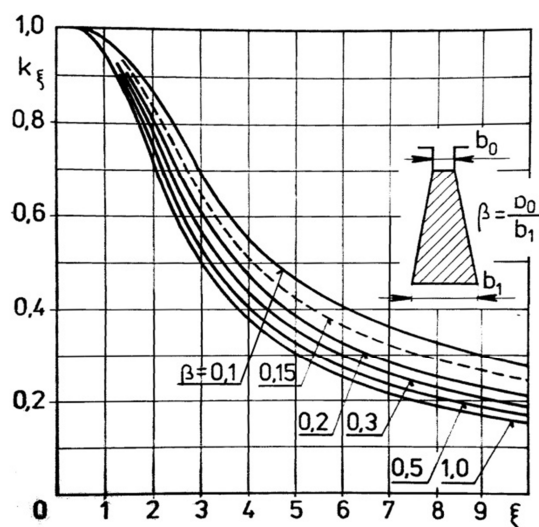
Pro teplotu tyče  $75 \text{ }^\circ\text{C}$  a kmitočet  $f_l = 50 \text{ Hz}$  dostaneme

Měděná tyč  $k_{\sim} = \xi \approx h\sqrt{s}$

Hliníková tyč  $k_{\sim} = \xi \approx 0,8h\sqrt{s}$

kde  $h$  je výška tyče [cm]

$s$  je skluz [-]



Obr. 34 – Závislost činitele zmenšení reaktance  $k_\xi$  na  $\xi$  pro lichoběžníkovou tyč [9]

Na obr. 33 je závislost činitele zvětšení odporu  $k_\sim$  na  $\xi$  pro lichoběžníkové tyče

Činitel zmenšení reaktance  $k_\xi$  působením vířivých proudů je na obr. 34. Pro obdélníkové tyče je  $\beta = 1$ , pro lichoběžníkové  $\beta > 1$ , kde  $\beta$  je poměr šířky vodiče u otevření a u dna drážky.

Pro obdélníkové tyče při  $\xi > 2$  je

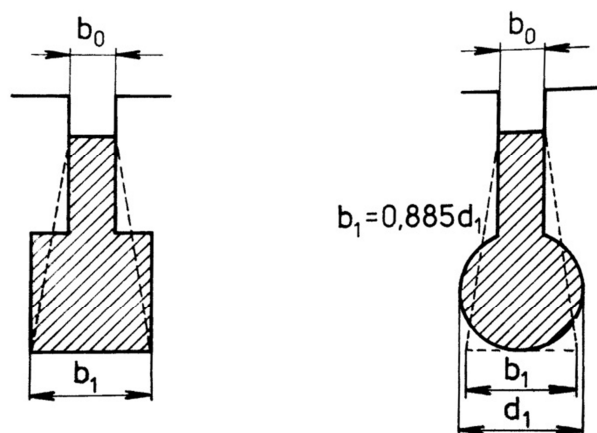
$$k_\xi \approx \frac{1,5}{\xi} = \frac{1,5}{k_\sim}$$

Vezmeme-li v úvahu předchozí rovnice pro měděné a hliníkové tyče, dostaneme

Měděná tyč  $k_\xi \approx \frac{1,5}{h\sqrt{s}}$

Hliníková tyč  $k_\xi \approx \frac{1,9}{h\sqrt{s}}$

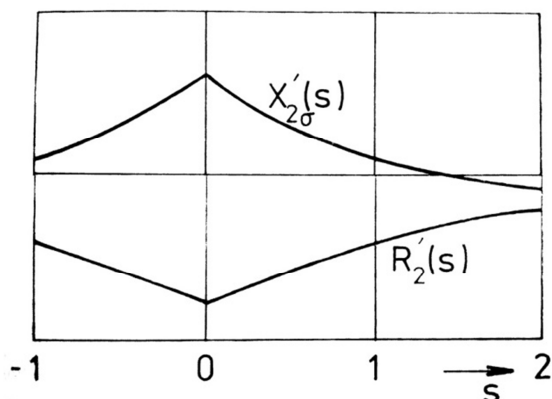
Výpočet činitelů  $k_\sim$  a  $k_\xi$  pro tyče složitějších tvarů, např. pro tyč, jejíž průřez tvoří dva obdélníky nebo kruh a obdélník, provádíme tak, že složitější tvar převádíme na lichoběžníkový podle obr. 35.



Obr. 35 – Určení rozměrů náhradní tyče pro stanovení činitelů  $k_\sim$  a  $k_\xi$  [9]

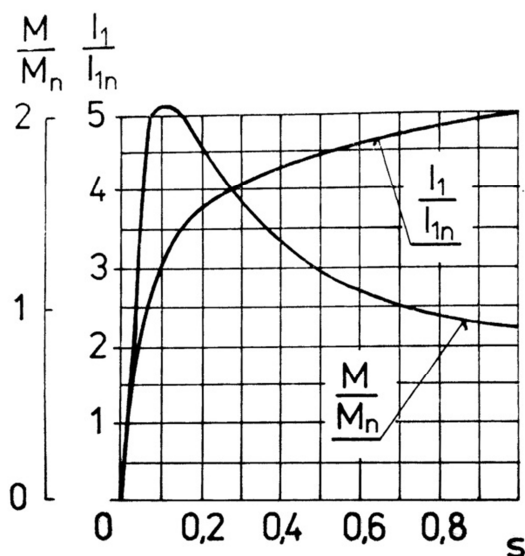
Při rozboru práce motorů s vírovým rotorem používáme normální náhradní schéma (obr.

15), musíme však vzít úvahu, že odpory  $R'_2$  a reaktance  $X'_{2\sigma}$  se mění v závislosti na kmitočtu rotoru  $f_2$ , tj. v závislosti na skluzu  $s$ . Abychom mohli použít náhradní schéma, musíme tedy nejprve sestavit frekvenční charakteristiky odporu  $R'_2(s)$  a reaktance  $X'_{2\sigma}(s)$ . Tyto charakteristiky jsou na obr. 36.



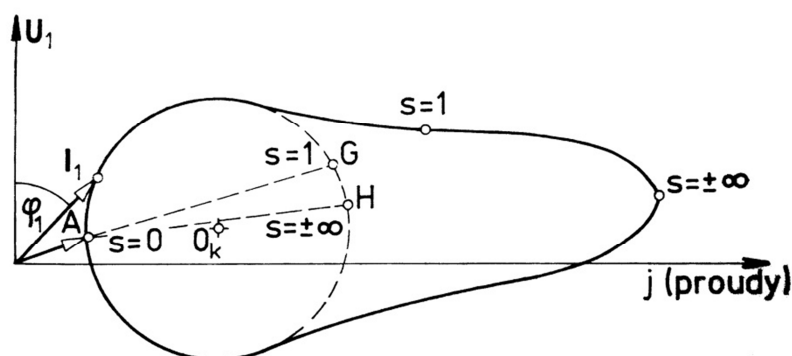
Obr. 36 – Frekvenční charakteristiky odporu  $R'_2(s)$  a reaktance  $X'_{2\sigma}(s)$  rotoru s vírovou klecí [9]

Na obr. 37 jsou závislosti rozběhového proudu a momentu na skluzu (v poměrných jednotkách).



Obr. 37 – Rozběhový moment a proud asynchronního motoru s vírovou klecí [9]

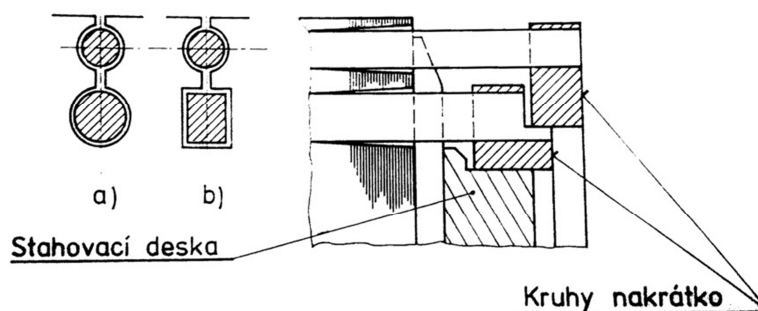
Na obr. 38 je kružnicový diagram asynchronního motoru s vírovou klecí. Tento proudový diagram je kružnicový jen pro malé (kladné i záporné) skluzu, neboť parametry  $R'_2(s)$  a  $X'_{2\sigma}(s)$  se při malých skluzech příliš nemění, pro větší skluzu se diagram od kružnice podstatně liší. Známe-li frekvenční charakteristiky, sestojíme diagram způsobem kruhové inverze, který je popsán v kapitole 1. 5. 1., a z něj pak určíme zatěžovací (pracovní) i další potřebné charakteristiky. [9]



Obr. 38 – Kružnicový diagram asynchronního motoru s vírovou klecí [9]

### 2.2.3 Dvojitá klec

Dvojitá klec je klecové vinutí s dvěma soustavami tyčí, jedna z možných konstrukcí je na obr. 39.



Obr. 39 – Rotor s dvojitou klecí [9]

Vnější klec má tyče kruhového průřezu z normální nebo legované mosazi, tj. z materiálu, který má zvýšený měrný odpor, vnitřní klec je z měděných kruhových (obr. 39a) nebo obdélníkových (obr. 39b) tyčí. Kruhy nakrátko jsou měděné. V některých případech se obě klece odlévají z hliníku, mají společný kruh nakrátko a i tyče obou klecí jsou vodivě spojeny v úzké mezeře mezi drážkami.

V první fázi rozběhu při  $f_1 \approx f_2$  je reaktance vnitřní klece podstatně větší než klece vnější, rotorový proud protéká proto převážně vnější klecí s velkým odporem, což zajišťuje snížení záběrného proudu a zvýšení záběrného momentu. Při rozběhu se kmitočt rotoru zmenšuje a proud rotoru ve větší míře přebírá vnitřní klec. Při malých skluzech je reaktance klecí relativně velice malá a proudy v nich se rozdělují nepřímo úměrně odporům klecí. Proud proto protéká převážně vnitřní klecí, jejíž tyče mají větší průřez a jsou z materiálu s menším měrným odporem.

Při rozboru práce asynchronního stroje se posuzuje otáčející se motor jako dvouvinutý transformátor. Je tedy přirozené, že na asynchronní motor s dvěma vinutími na rotoru

aplikujeme teorii transformátoru s třemi vinutími.

Následující vztahy jsou pro transformátor s třemi vinutími

$$\overline{U}_1 + \overline{U}_2 = \overline{Z}_1 \overline{I}_1 - \overline{Z}_2 \overline{I}_2$$

$$\overline{U}_1 + \overline{U}_3 = \overline{Z}_1 \overline{I}_1 - \overline{Z}_3 \overline{I}_3$$

Jelikož

$$\overline{I}_1 = -\overline{I}_2 - \overline{I}_3$$

pak

$$-(\overline{U}_1 + \overline{U}_2) = \overline{Z}_{k12} \overline{I}_2 - \overline{Z}_1 \overline{I}_3$$

$$-(\overline{U}_1 + \overline{U}_3) = \overline{Z}_1 \overline{I}_2 - \overline{Z}_{k13} \overline{I}_3$$

kde

$$\overline{Z}_{k12} = \overline{Z}_1 + \overline{Z}_2, \overline{Z}_{k13} = \overline{Z}_1 + \overline{Z}_3$$

Předchozí rovnice byly odvozeny za předpokladu, že všechna vinutí jsou přepočtena na jeden počet závitů (při přepočtu vinutí asynchronního stroje musíme vzít v úvahu nejen počet závitů vinutí, ale též jejich prostorové uspořádání, vyjádřené činiteli vinutí, a také počet fází jednotlivých vinutí) a též součet magnetomotorických sil všech vinutí se rovná nule. Druhý předpoklad by v asynchronních strojích vedl k nepřesnostem (Magnetizační proud asynchronního motoru je vlivem vzduchové mezery relativně větší než u transformátoru), a proto platí, že

$$\overline{I}_0 = \overline{I}_1 + \overline{I}_2 + \overline{I}_3$$

Je tedy nutné upravit rovnice pro napětí, uvedeme členy respektující úbytek napětí ve vstupním vinutí způsobený proudem  $I_0$

$$-(\overline{U}_1 + \overline{U}_2) = \overline{Z}_{k12} \overline{I}_2 - \overline{Z}_3 \overline{I}_3 - \overline{Z}_{1(2)} \overline{I}_0$$

$$-(\overline{U}_1 + \overline{U}_3) = \overline{Z}_1 \overline{I}_2 - \overline{Z}_{k13} \overline{I}_3 - \overline{Z}_{1(3)} \overline{I}_0$$

kde

$$\overline{Z}_{1(2)} = R_1 + j\omega_1(L_{11} - L_{12})$$

$$\overline{Z}_{1(3)} = R_1 + j\omega_1(L_{11} - L_{13})$$

tj. impedance vinutí  $1$  za předpokladu, že proud protéká pouze vinutím  $1$  a  $2$ , popř.  $1$  a  $3$ .

V asynchronním stroji platí (obr. 15), že

$$\overline{U}_2 = \overline{I}_2 R_2 \frac{1-s}{s}$$

$$\overline{U}_3 = \overline{I}_3 R_3 \frac{1-s}{s}$$

Řešíme-li společně poslední 4 rovnice a předpokládáme-li, že

$$\overline{Z}_{1(2)} \overline{I}_0 \approx \overline{Z}_{1(3)} \overline{I}_0$$

pak

$$\frac{\bar{I}_2}{\bar{I}_3} = \frac{\bar{Z}_{k13} - \bar{Z}_1 + R_3 \frac{1-s}{s}}{\bar{Z}_{k12} - \bar{Z}_1 + R_2 \frac{1-s}{s}} = \frac{\frac{R_3}{s} + jX_{3\sigma}}{\frac{R_2}{s} + jX_{2\sigma}}$$

Neboť

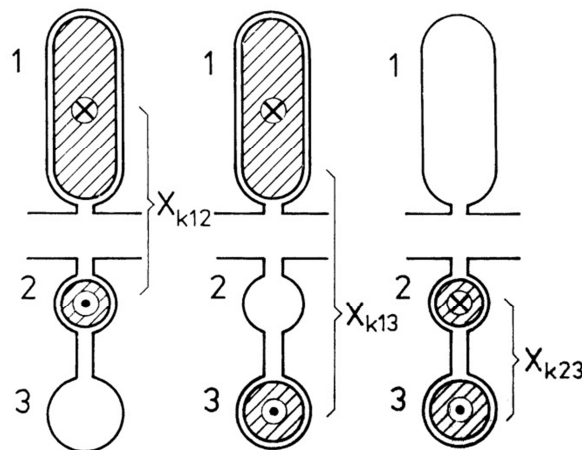
$$\bar{Z}_2 = \bar{Z}_{k12} - \bar{Z}_1, \quad \bar{Z}_3 = \bar{Z}_{k13} - \bar{Z}_1$$

Předchozí rovnice určuje vztah přepočtených proudů v klecích rotoru a platí pro libovolné umístění tyčí, a to i tehdy, jsou-li tyče klecí v oddělených drážkách.

Nyní probereme výpočet rozptylových reaktancí  $X_{2\sigma}$  a  $X_{3\sigma}$ .

$$X_{2\sigma} = \frac{1}{2}(X_{k12} + X_{k23} - X_{k13})$$

$$X_{3\sigma} = \frac{1}{2}(X_{k13} + X_{k23} - X_{k12})$$



Obr. 40 – Určení reaktancí  $X_{k12}$ ,  $X_{k13}$ ,  $X_{k23}$  asynchronního motoru s dvojitou klecí [9]

Vycházíme z předpokladu, že jsou v rovnováze magnetomotorické síly vždy těch dvou vinutí, jejichž reaktanci nakrátko určujeme. Např. při určování reaktance  $X_{k12}$  předpokládáme, že  $\bar{F}_1 = \bar{F}_2$ . Při výpočtu je nutno určit nejen rozptyl v drážkách, přes hlavy zubů a v čelech, ale také činitel zmenšení reaktance (činitel tlumení  $k_\xi$ ), který se určuje z rovnice

$$k_\xi = \frac{\varphi'(\xi) + (m^2 - 1)\psi'(\xi)}{m^2}$$

kde  $m$  je počet vrstev vodičů v drážce

$\xi$  bezrozměrná veličina, představující redukovanou výšku vodiče

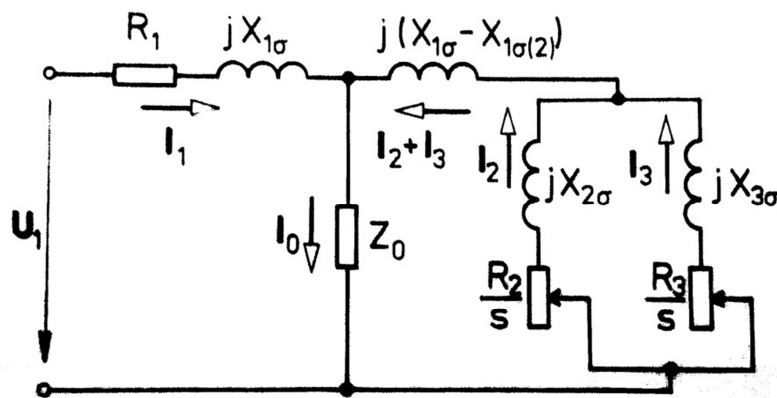
pro  $m = 1$  je  $k_\xi = \varphi'(\xi)$ . Pro tyče kruhového průřezu

$$\xi = \alpha h \approx \alpha d$$

kde  $d$  je průměr tyče

$\alpha$  viz kap. 2.2.2.





Obr. 41 – Náhradní schéma asynchronního motoru s dvojitou klecí [9]

Pro náhradní schéma asynchronního motoru s dvěma elektricky nespojenými klecemi rotoru (obr. 41) odpovídají rovnice pro napětí

$$-(\overline{U_1} + \overline{U_2}) = \overline{Z_{k12}}\overline{I_2} - \overline{Z_3}\overline{I_3} - \overline{Z_{1(2)}}\overline{I_0}$$

$$-(\overline{U_1} + \overline{U_3}) = \overline{Z_1}\overline{I_2} - \overline{Z_{k13}}\overline{I_3} - \overline{Z_{1(3)}}\overline{I_0}$$

V tomto schématu platí, že

$$\overline{Z_{1(3)}} \approx \overline{Z_{1(2)}} \approx R_1 + j0,5(X_{1\sigma(2)} + X_{1\sigma(3)})$$

Při synchronních otáčkách ( $s = 0$ ) jsou obě rotorové větve rozpojeny ( $I_2 = I_3 = 0$ ) a proud

$$\overline{I_{1(0)}} = \frac{\overline{U_1}}{\overline{Z_{1(2)}} + \overline{Z_0}}$$

Točivé momenty, vyvolané klecemi 2 a 3, jsou

$$M_2 = m_1 I_2^2 R_2 \frac{1}{s\omega_s}$$

$$M_3 = m_1 I_3^2 R_3 \frac{1}{s\omega_s}$$

Poměr točivých momentů  $M_2$  a  $M_3$  určíme s přihlédnutím na poměr proudů jako

$$\frac{M_2}{M_3} = \frac{I_2^2 R_2}{I_3^2 R_3} = \frac{R_2 \left( \frac{R_3^2}{s^2} + X_{3\sigma}^2 \right)}{R_3 \left( \frac{R_2^2}{s^2} + X_{2\sigma}^2 \right)}$$

Celkový moment rotoru

$$M = M_2 + M_3 = m_1 (R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2) \frac{1}{s\omega_s}$$

Na obr. 42 je závislost poměru proudů a momentů dvou klecí na skluzu při velkém odporu  $R_2$ .

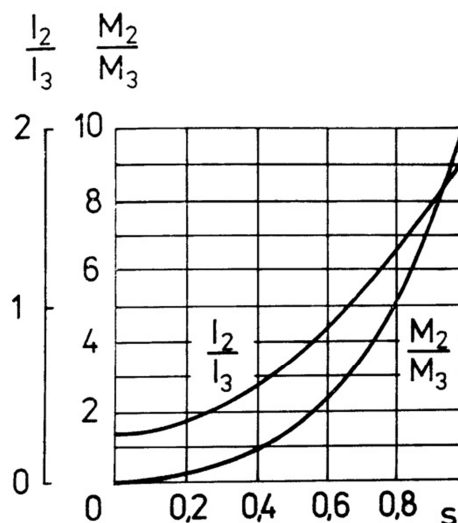
Náhradní schéma uvedené na obr. 41, nám umožňuje určit všechny zatěžovací charakteristiky motoru s dvojitou klecí. Toto schéma však můžeme upravit tak, že má tvar

schématu stroje s vírovým rotorem (obr. 15), tj. že dvě rotorové větve (obr. 41) nahradíme jednou ekvivalentní.

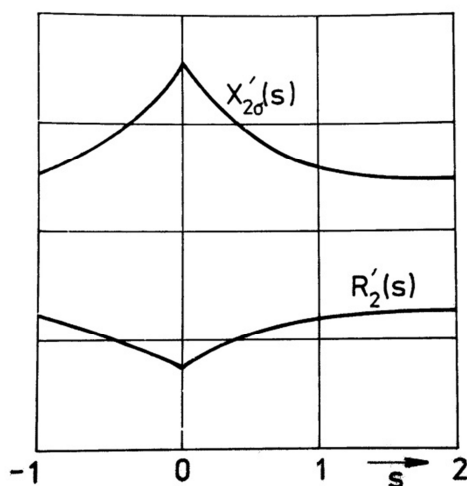
Frekvenční charakteristiky ekvivalentního rotorového obvodu nalezneme z obr. 38

$$R'_2(s) = \frac{R_2 R_3 (R_2 + R_3) + (R_2 X_{3\sigma}^2 + R_3 X_{2\sigma}^2) s^2}{(R_2 + R_3)^2 + (X_{2\sigma} + X_{3\sigma})^2 s^2}$$

$$X'_{2\sigma}(s) = \frac{R_2^2 X_{3\sigma} + R_3^2 X_{2\sigma} + X_{2\sigma} X_{3\sigma} (X_{2\sigma} + X_{3\sigma}) s^2}{(R_2 + R_3)^2 + (X_{2\sigma} + X_{3\sigma})^2 s^2} + X_{1\sigma} - X_{1\sigma(2)}$$



Obr. 42 – Závislost poměru proudů a momentů dvou klecí v závislosti na skluzu [9]



Obr. 43 – Frekvenční charakteristiky ekvivalentního rotorového obvodu asynchronního motoru s dvojitou klecí [9]

Na obr. 43 jsou jako příklad uvedeny frekvenční charakteristiky ekvivalentního rotorového obvodu motoru s dvojitou klecí při velkém odporu  $R_2$ . Jsou podobné frekvenčním charakteristikám motoru s vírovým rotorem (obr. 36).

Proud statoru může být z náhradního schématu (obr. 41) vyjádřen rovnicí

$$\bar{I}_1 = \bar{U}_1 \frac{\overline{Z_{2e} Z_{3e}} + (jX_{23} + \bar{Z}_0)(\overline{Z_{2e}} + \overline{Z_{3e}})}{\overline{Z_{2e} Z_{3e}}(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_0) + (\overline{Z_{2e}} + \overline{Z_{3e}})\overline{Z_{2e}} + (j\bar{Z}_0 X_{23} + j\bar{Z}_1 X_{23} + \bar{Z}_1 \bar{Z}_0)}$$

kde

$$\overline{Z_{2e}} = \frac{R_2}{s} + jX_{2\sigma}, \quad \overline{Z_{3e}} = \frac{R_3}{s} + jX_{3\sigma}$$

$$X_{23} = X_{1\sigma} - X_{1\sigma(2)}, \quad \bar{Z}_1 = R_1 + jX_{1\sigma}$$

Z rovnice proudu po jednoduchých úpravách dostaneme

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{D} + \bar{E}s + \bar{F}s^2}{\bar{A} + \bar{B}s + \bar{C}s^2}$$

kde  $A, B, C, D, E, F$  jsou komplexní činitele, které jsou funkcemi parametrů náhradního schématu

Konec fázoru proudu statoru  $\bar{I}_1$  se tedy pohybuje po křivce čtvrtého řádu – bicirkulární kvartice.

Na obr. 41 je kružnicový diagram stroje s dvojitou klecí. Diagram má složitý tvar, avšak pro malé skluzy  $|s| \ll 1$ , kdy můžeme zanedbat členy  $Fs^2$  a  $Cs^2$ , a pro velké skluzy  $|s| \gg 1$ , kdy lze zanedbat členy  $A$  a  $D$ , je diagram blízky kružnici

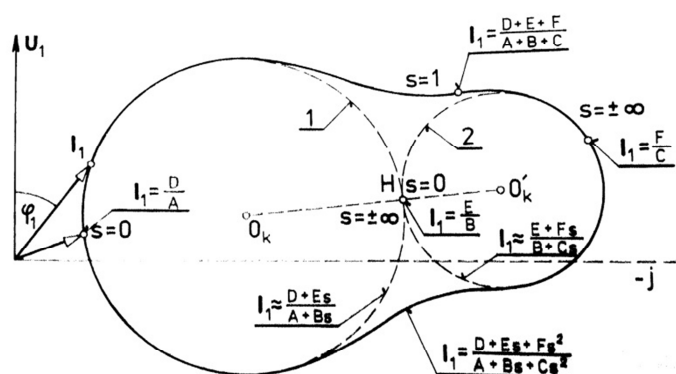
$$\overline{I_{1(s \ll 1)}} \approx \frac{\bar{D} + \bar{E}s}{\bar{A} + \bar{B}s}$$

$$\overline{I_{1(s \gg 1)}} \approx \frac{\bar{E} + \bar{F}s}{\bar{B} + \bar{C}s}$$

To nám umožňuje použít v určitých intervalech skluzu  $s$  pro rozbor práce motoru s dvojitou klecí běžnou teorii kružnicových diagramů.

V bodě  $H$  se kružnice 1 a 2 dotýkají. Pro kružnici 1 odpovídá bod  $H$  skluzu  $s = \pm \infty$  a proud  $\bar{I}_1 = E/B$ . Pro kružnici 2 odpovídá bod  $H$  skluzu  $s = 0$ , neboť proud je  $\bar{I}_1 = E/B$ .

Diagram na obr. 44 může být sestrojen též s pomocí náhradního schématu na obr. 15, jestliže ekvivalentní parametry rotoru určíme z rovnic  $R'_2$  a  $X'_{2\sigma}$ . Z tohoto schématu můžeme též snadno sestrojít charakteristiky stroje.



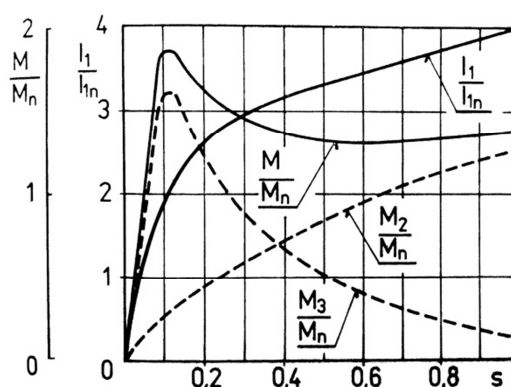
Obr. 44 – Kružnicový diagram asynchronního motoru s dvojitou klecí [9]

Na obr. 45 jsou jako příklad uvedeny v poměrných jednotkách závislosti momentů klecí i celkového momentu a proudu statoru na skluzu, typické pro motor s dvojitou klecí.

Při návrhu stroje získáme potřebné charakteristiky při rozběhu změnou indukčnosti spodní klece volbou výšky a šířky mezery mezi drážkami obou klecí a také volbou odporů tyčí klecí.

Nutno však upozornit na to, že zlepšení charakteristik při rozběhu se zpravidla docílí za cenu zhoršení charakteristik zatěžovacích.

Motory s dvojitou klecí jsou konstrukčně i výrobně složitější než motory s vírovým rotorem, používají se proto převážně tam, kde jsou zvláště velké nároky na rozběh, např. pro pohon mechanismů s velkými hodnotami zatěžovacího momentu při záběru i při rozběhu (pro transportéry, kulové mlýny, apod.).



Obr. 45 – Rozběhový proud  $I_1$  a rozběhové momenty  $M$  asynchronního motoru s dvojitou klecí [9]

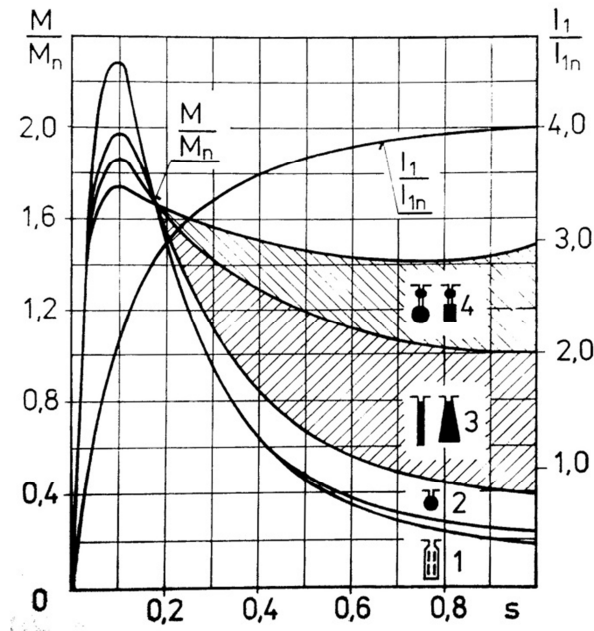
Motory s dvojitou klecí mají zpravidla poměrný záběrný moment

$$k_M \approx 2 \div 3$$

a poměrný záběrný proud

$$k_i \approx 3,5 \div 5$$

Rozdíly mezi momentovými charakteristikami asynchronních motorů s různými rotorovými vinutími jsou patrné z obr. 46. [9]



Obr. 46 – Momentové charakteristiky asynchronních motorů; 1 – kružkový motor, 2 – klec s tyčemi kruhového průřezu, 3- vírová klec, 4- dvojitá klec [9]

### 3 Konstrukce kružnicového diagramu s vírovou kotvou

#### 3.1 Parametry stroje

Kružnicový diagram je konstruován pro motor SIEMENS 1LA7 163-4AA10

Jmenovité parametry motoru:

$$P_N = 11 \text{ kW}$$

$$U_N = Y \ 400/\Delta \ 230 \text{ V}$$

$$I_N = 21,5 \text{ A}$$

$$M_N = 72 \text{ Nm}$$

$$n_N = 1460 \text{ ot}/\text{min}^{-1}$$

$$\cos\varphi_N = 0,84$$

$$\eta = 88,5\%$$

Parametry náhradního schématu motoru:

$$R_1 = 0,395 \ \Omega$$

$$X_{1\sigma} = 1,018 \Omega$$

$$R'_2(s = 1) = 0,467 \Omega$$

$$R'_2(s = 0) = 0,242 \Omega$$

$$X'_{2\sigma}(s = 1) = 0,788 \Omega$$

$$X'_{2\sigma}(s = 0) = 1,459 \Omega$$

$$X_h = 25,41 \Omega$$

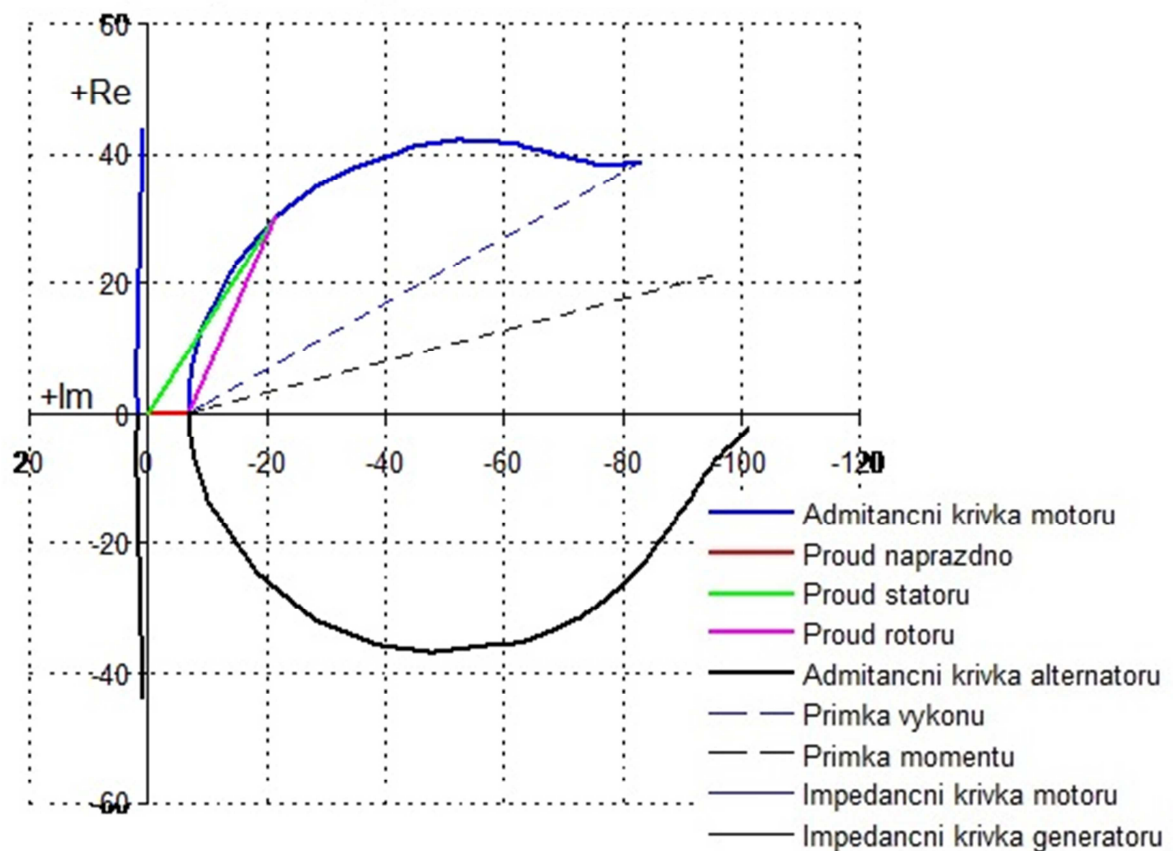
Parametry byly dodány školitelem Ing. Karel Hruška Ph. D.

### 3.2 Kružnicový diagram

Pomocí programu MATLAB vytvoříme skript, který vytvoří impedanční křivku. Z impedanční křivky, pomocí kruhové inverze vytvoříme „kružnicový“ diagram motoru. Principiální postup tvorby diagramu je popsán v kapitole 1. 5. Konkrétní postup řešení diagramu, proudů a jejich úprav je popsán v příloze č. 2.

Impedanční křivka a kružnicový diagram stroje SIEMENS 1LA7 163 – 4AA10 jsou na obr. 47.

#### Kružnicový diagram stroje SIEMENS 1LA7 163-4AA10



Obr. 47 – Impedanční křivka a kružnicový diagram stroje

Impedanční a admitanční křivka je pro skluz  $s = 0$  nedokreslená. Nastává zde problém dělení nulou (viz. výpočet impedanční křivky jako funkce skluzu v kapitole 1. 4.). Tento problém byl vyřešen extrapolací hodnot pro  $s \rightarrow 0$ , dle teoretických předpokladů.

Na obr. 47 můžeme vidět, že kružnicový diagram není úplný. Hodnoty dodané školitelem, byly změřeny pouze do skluzu  $s = 1$ . Hodnoty by se dali dopočítat pomocí extrapolace, ale pro znázornění charakteristik stroje je tento diagram postačující. Část diagramu pro generátorický chod byl vypočten teoreticky. Pro výpočet byly použity stejné hodnoty, jen skluz byl použit záporný.

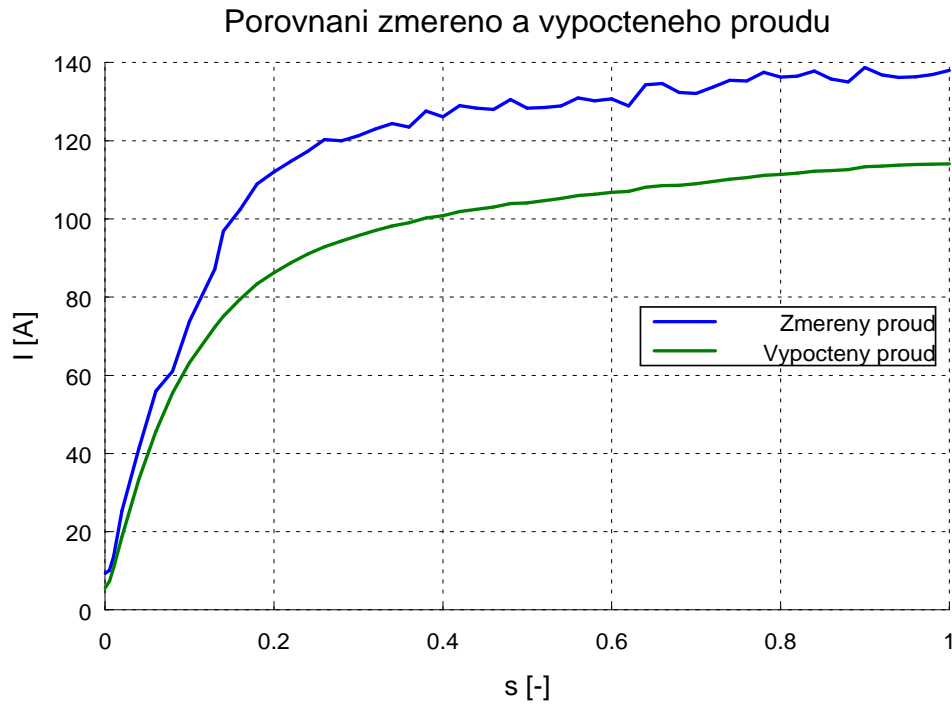
Kružnicový diagram je znázornění stavů stroje pro konstantní napětí, ve většině případů se jedná o jmenovitou hodnotu.

Proudy znázorněny v kružnicovém diagramu jsou pro skluz  $s = 0,06$ . Proud statoru  $I_1$  opisuje diagram. Proud naprázdno  $I_0$  je konstantní. Rozdílem těchto proudů je proud rotoru  $I_2'$ .

Dále jsou vyneseny přímkou výkonů a momentů pro odečítání hodnot výkonů, ztrát a momentu. Přímkou výkonů protíná bod proudu naprázdno  $I_0$  a bod kružnice pro  $s = 1$ . Přímkou momentů prochází též bodem proudu naprázdno  $I_0$  a bodem teoretickým pro  $s \rightarrow \infty$ .

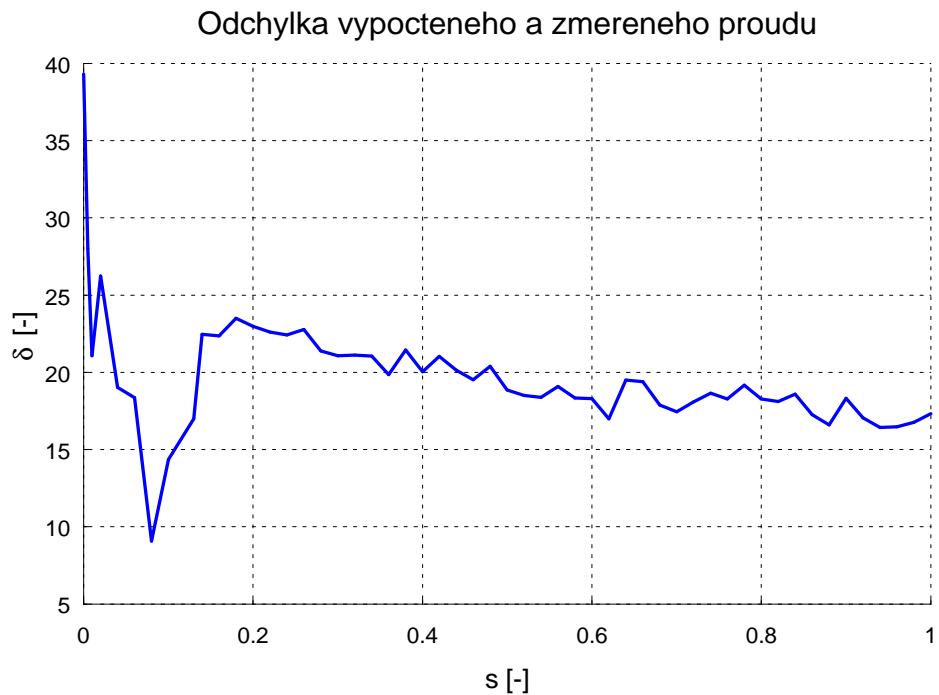
### 3.3 Charakteristiky stroje

Díky kružnicovému diagramu jsme schopni odečíst hodnoty proudů, výkonu, výkonu přenášeného vzduchovou mezerou, ztrát a momentu stroje. Tyto hodnoty jsou jednotlivě zaznamenány v příloze č. 3. Tabulkové uspořádání hodnot stroje jsou zaznamenány v kap. 3.4.



Obr. 48 – Charakteristiky změřených a výpočtech proudů rotoru

Charakteristika (obr. 48) znázorňuje proud statoru, změřený a vypočtený. Na první pohled je vidět rozdíl mezi vypočteným a změřeným proudem. Měření proudu neprobíhalo při konstantním napětí, jak je tomu při početní metodě. Odchylka dvou způsobů vyjádření proudů je znázorněna na obr. 49.

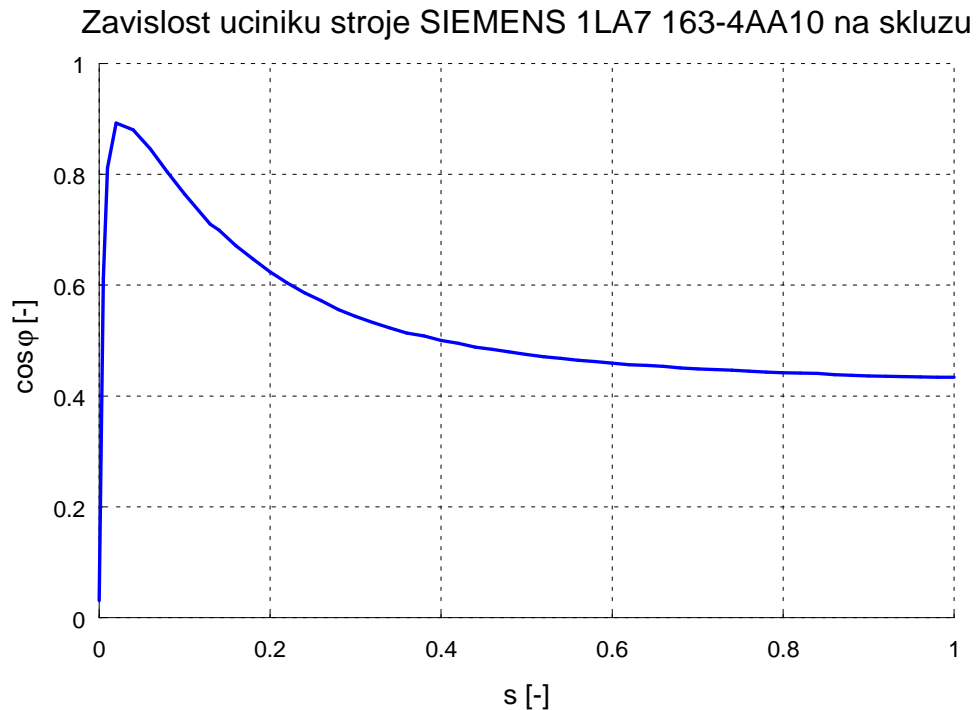


Obr. 49 – Odchylka proudu změřeného od vypočteného  $\delta$



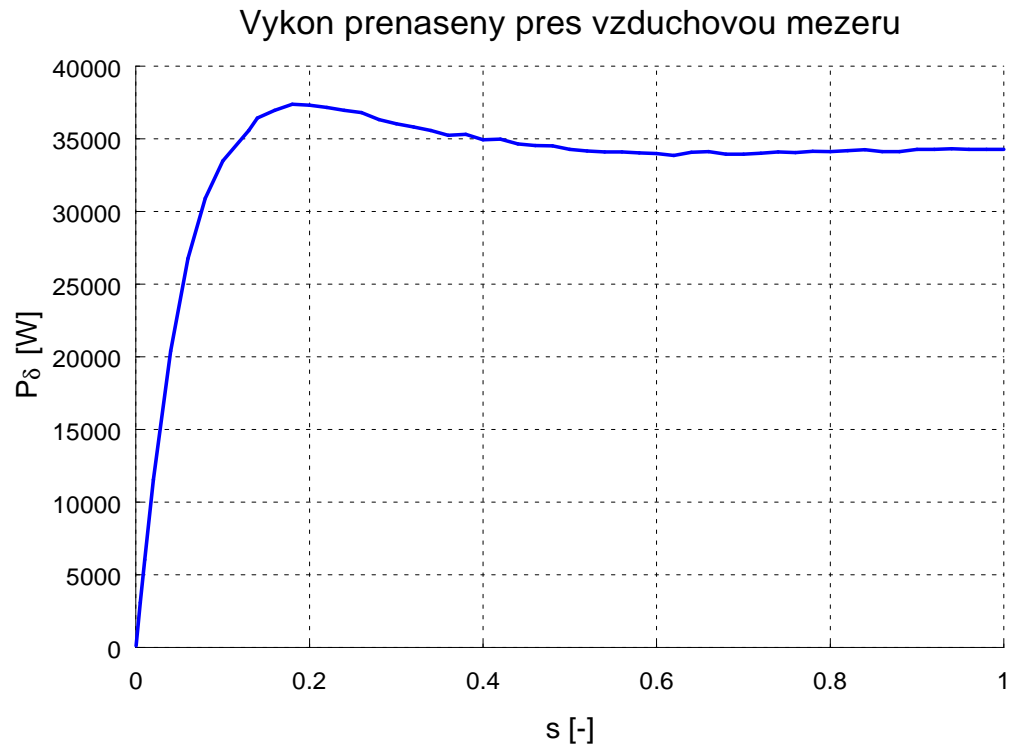
Pro další charakteristiky byl použit proud vypočtený, kvůli již zmiňované podmínce, konstantního napájecího napětí. Proud změřený by neopisoval křivku diagramu a další operace diagramu by nebylo možné provést.

Obr. 50 znázorňuje účinek stroje pro skluz v intervalu  $s=(0;1>$ .

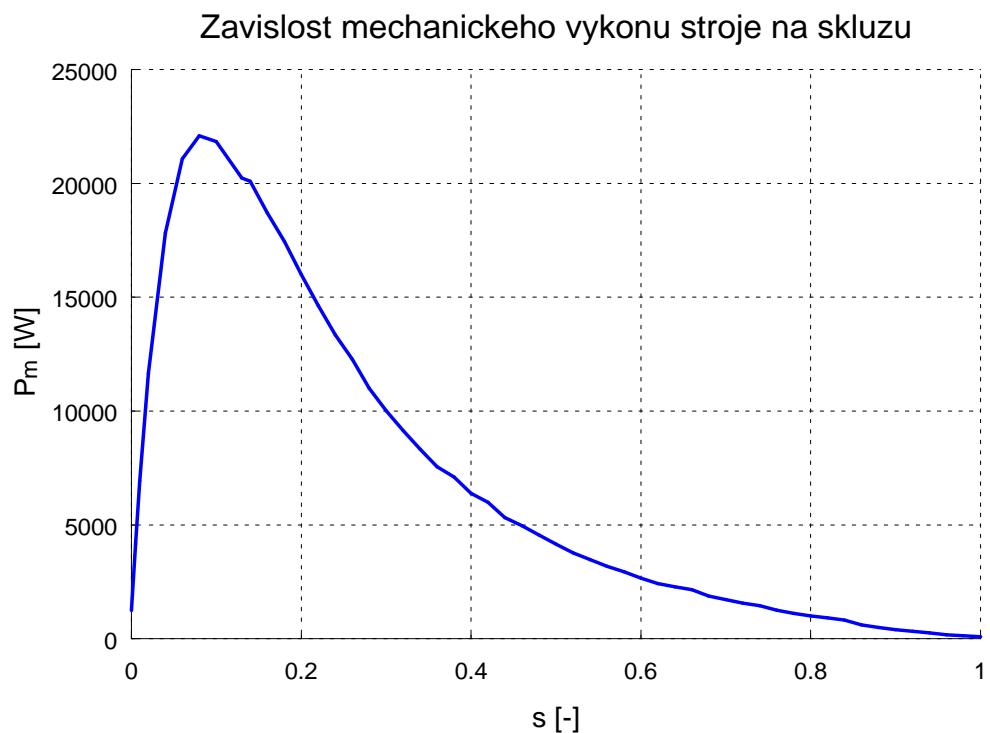


Obr. 50 – Účinek stroje  $\cos\varphi$

Nyní se dostáváme k charakteristikám odvozeným z diagramu. První z těchto charakteristik (obr. 51) nám představuje výkon přenášený vzduchovou mezerou stroje v rozmezí skluzů  $s=(0;1>$ . Z charakteristiky lze vidět, že při přiblížení se jmenovitým hodnotám stroje, mechanický výkon začne klesat. Na tomto výkonu závisí velikost momentu motoru. Moment stroje je znázorněn na obr. 52.



Obr. 51 – Výkon přenášený vzduchovou mezerou  $P_{\delta}$



Obr. 52 – Proudová a momentová charakteristika stroje

Tyto charakteristiky znázorňují proud statoru a moment stroje v závislosti na skluzu v intervalu  $s=(0;1>$ . Stabilní chod motoru je v rozmezí  $s=(0;0,1>$ . Chod motoru v rozmezí skluzu  $s=<0,1;1>$  je nežádoucí, kvůli vysokým proudům protékajícími statorovým vinutím.

### 3.4 Tabulkové zpracování vypočtených hodnot stroje

s [-]	$R_2$ [ $\Omega$ ]	$X_{2\sigma}$ [ $\Omega$ ]	Z [ $\Omega$ ]	$I_1$ [A]	$P_m$ [W]	$P_\delta$ [W]	$\cos\varphi$ [-]	M [Nm]
0,02	0,242	1,459	13,75	10,73	8832,01	20496,71	0,893	74,07
0,04	0,242	1,459	7,43	18,66	15211,92	26846,41	0,881	130,49
0,06	0,243	1,324	5,39	33,45	18728,33	30989,48	0,850	170,91
0,08	0,244	1,257	4,42	45,66	19994,19	33571,39	0,804	197,29
0,10	0,246	1,207	3,87	55,47	19976,41	35667,70	0,764	213,72
0,13	0,248	1,151	3,38	63,23	18681,38	36507,53	0,710	227,07
0,14	0,250	1,107	3,25	72,34	18622,98	37048,05	0,700	232,41
0,16	0,252	1,079	3,07	75,11	17404,88	37455,93	0,671	235,86
0,18	0,254	1,047	2,92	79,48	16272,63	37390,80	0,647	238,45
0,20	0,257	1,033	2,82	83,35	14925,84	37248,68	0,624	238,03
0,22	0,260	1,019	2,74	86,26	13664,15	37047,31	0,604	237,13
0,24	0,263	1,006	2,67	88,78	12478,71	36888,17	0,586	235,85
0,26	0,267	0,992	2,62	90,97	11485,88	36411,83	0,572	234,84
0,28	0,270	0,990	2,58	92,89	10270,28	36122,18	0,556	231,80
0,30	0,274	0,982	2,54	94,33	9339,05	35900,85	0,543	229,96
0,32	0,278	0,972	2,50	95,71	8528,74	35650,23	0,533	228,55
0,34	0,282	0,964	2,47	97,03	7752,08	35327,93	0,523	226,96
0,36	0,287	0,961	2,45	98,17	7014,16	35390,87	0,514	224,90
0,38	0,292	0,944	2,42	99,00	6609,21	35031,54	0,508	225,31
0,40	0,297	0,944	2,41	100,25	5922,39	35061,48	0,500	223,02
0,42	0,302	0,930	2,38	100,84	5555,86	34730,24	0,495	223,21
0,44	0,306	0,929	2,37	101,89	4914,49	34627,96	0,488	221,10
0,46	0,313	0,924	2,36	102,47	4581,06	34599,75	0,484	220,45
0,48	0,317	0,913	2,33	103,00	4207,23	34365,21	0,479	220,27
0,50	0,324	0,914	2,33	103,89	3818,89	34238,69	0,475	218,78
0,52	0,329	0,909	2,32	104,15	3451,43	34185,94	0,471	217,97
0,54	0,335	0,903	2,31	104,69	3186,44	34190,39	0,468	217,63
0,56	0,339	0,893	2,29	105,21	2906,00	34111,40	0,464	217,66

Tab. 1 – Souhrn vypočtených hodnot (část 1)

$s$ [-]	$R_2'$ ( $\Omega$ )	$X_{2\sigma}'$ ( $\Omega$ )	$Z$ ( $\Omega$ )	$I_1$ [A]	$P_m$ [W]	$P_\delta$ [W]	$\cos\varphi$ [-]	$M$ [Nm]
0,58	0,346	0,890	2,28	105,97	2683,45	34061,51	0,462	217,16
0,60	0,351	0,884	2,27	106,30	2425,44	33945,01	0,459	216,84
0,62	0,358	0,883	2,26	106,82	2198,40	34162,43	0,457	216,10
0,64	0,361	0,866	2,24	107,04	2076,83	34204,28	0,455	217,48
0,66	0,368	0,860	2,23	108,09	1973,01	34027,08	0,454	217,75
0,68	0,374	0,861	2,23	108,50	1698,85	34021,38	0,451	216,60
0,70	0,380	0,856	2,22	108,64	1549,56	34082,92	0,449	216,59
0,72	0,385	0,848	2,21	109,03	1419,82	34181,88	0,448	216,98
0,74	0,390	0,839	2,20	109,58	1321,35	34143,50	0,447	217,61
0,76	0,395	0,835	2,19	110,17	1140,26	34230,15	0,445	217,36
0,78	0,399	0,826	2,18	110,53	1018,42	34200,99	0,443	217,92
0,80	0,406	0,824	2,17	111,15	911,21	34266,83	0,442	217,93
0,82	0,412	0,818	2,17	111,34	841,81	34341,20	0,441	218,15
0,84	0,417	0,811	2,16	111,74	755,51	34212,54	0,441	218,62
0,86	0,422	0,811	2,15	112,23	544,74	34203,79	0,438	217,80
0,88	0,428	0,808	2,15	112,37	441,15	34362,60	0,437	217,75
0,90	0,431	0,797	2,13	113,34	370,72	34358,12	0,437	218,76
0,92	0,438	0,795	2,13	113,5	303,22	34391,98	0,436	218,73
0,94	0,444	0,791	2,13	113,79	237,59	34362,58	0,435	218,94
0,96	0,451	0,790	2,12	113,90	159,66	34359,44	0,434	218,76
0,98	0,459	0,789	2,12	113,99	124,37	34357,59	0,434	218,74
1,00	0,467	0,788	2,12	114,07	91,15	34358,25	0,433	218,73

Tab. 2 – Souhrn vypočtených hodnot (část 2)

## Závěr

Diplomová práce se zabývala problematikou asynchronního stroje, kružnicového diagramu a jeho konstrukce za pomoci programu MATLAB.

Hodnoty použité v práci byly dodány školitelem. Jedná se o měřené hodnoty skluzu, proudu statoru, reaktance a odporu vinutí rotoru přepočtené na stator v motorickém režimu. Impedanční křivka, odvozená v kap. 1. 4, je závislá na hodnotách skluzu a reaktance a odporu rotoru. Z této impedanční křivky se pomocí kruhové inverze, popsané v kap. 1.5, vznikne admitanční křivka neboli kružnicový diagram stroje. Výpočetní skript kruhové inverze a proudů opisující diagram je v příloze č. 2. Průběh impedanční křivky a kružnicového diagramu je vidět na obr. 47. Impedance motoru se pohybuje od  $Z(s = 1) = 1,63 \Omega$  do  $Z(s \rightarrow 0) = 11,41 \Omega$ . Impedanční křivka generátoru byla spočítána teoreticky. Hodnoty byly použity stejné jako u diagramu motoru jen se zápornými skluzu. Admitanční diagram generátoru byl vytvořen stejným způsobem jako pro motor.

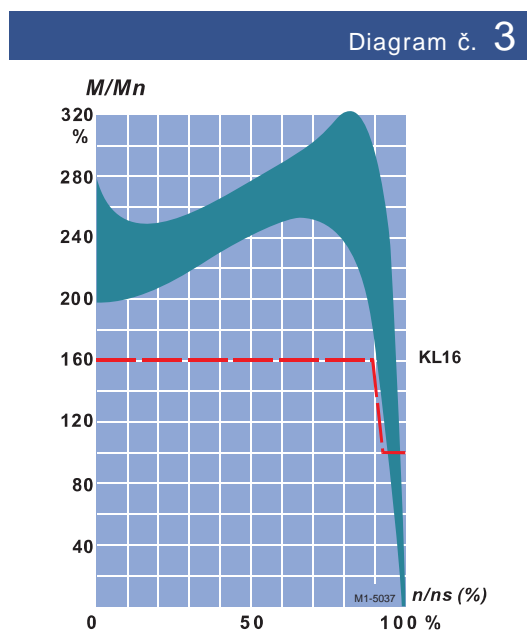
Proud naprázdno  $I_0$  je konstantní, tedy závislý pouze impedanci  $Z_1$ , respektive na hodnotách odporu statoru, reaktance statoru a magnetického obvodu. Tyto hodnoty a napájecí napětí jsou konstantní. Proud statoru  $I_1$  opisuje diagram. Tento proud je závislý na impedanci celého stroje. Součást naměřených hodnot byly i hodnoty proudu statoru. Toto měření probíhalo se sníženým napětím. Proud byl přepočten na jmenovité napětí pomocí lineární extrapolace. Odchylna změřeného a vypočteného proudu statoru je graficky znázorněna na obr. 49 a pohybuje se v rozsahu 0,5 – 60 %, průměrná odchylna je 20%. Proud rotoru  $I_2'$  je rozdíl proudu statoru a proudu naprázdno. Tyto hodnoty jsou zpracovány v tab. 1 a 2.

Z kružnicového diagramu, pomocí měřítek, byly odečteny další hodnoty. Jedná se o hodnoty výkonu přenášeného přes vzduchovou mezeru, mechanického výkonu a momentu stroje. Skript popisující odečet a výpočet hodnot veličin motoru pomocí měřítek je popsán v příloze č. 4. Všechny hodnoty těchto veličin jsou zpracovány v tab. 1 a 2. Grafické znázornění těchto veličin jako funkce skluzu jsou na obr. 48 – 52.

Pro jmenovitý stav motoru,  $n_N = 1460 \text{ ot/min}^{-1}$ , vychází skluz  $s=2,67 \%$  a proud statoru  $I_1 \cong 23,6\text{A}$ . Moment stroje  $M \cong 92,9\text{Nm}$ . Jmenovitý účinník stroje  $\cos \varphi \cong 0,889$ . Výkon přenášený přes vzduchovou mezeru  $P_\delta = 14604\text{W}$ . Mechanický výkon stroje pro jmenovité otáčky  $P_m = 10969\text{W}$ . Tyto hodnoty byly odečteny z grafu. Hodnoty odečtené a vypočtené se liší od hodnot štítkových. Příčina tohoto rozdílu může být kvůli rozběhu se sníženým

napájecím napětím, extrapolací proudu na jmenovitou hodnotu napětí a možná chyba v určení skluzu stroje při měření.

Momentová charakteristika byla porovnána s diagramem možné odchylky momentové charakteristiky udávané výrobcem v katalogu (obr. 53). Jmenovitý moment udávaný v katalogu je  $M_N = 72 \text{ Nm}$ . Změřený byl  $M \cong 92,9 \text{ Nm}$ . V katalogu jsou uvedeny hodnoty poměrných hodnot momentů. Poměrný záběrný moment  $M_Z/M_N = 2,2$  a poměrný momentu zvratu  $M_{\max}/M_N = 2,7$ . Změřený moment záběrný moment  $M_Z = 218,7 \text{ Nm}$  a moment zvratu  $M_{\max} = 238,5 \text{ Nm}$ . Poměry z vypočtených hodnot vyšli  $M_Z/M_N = 2,35$  a  $M_{\max}/M_N = 2,57$ . Přehlednější porovnání je v tab. 3.



Obr. 53 - Diagram možné odchylky momentové charakteristiky změřené od uvedené výrobcem [11]

	$M_N [Nm]$	$M_Z / M_N [-]$	$M_{\max} / M_N [-]$
Štítková hodnota	72	2,2	2,7
Změřená hodnota	92,9	2,35	2,57

Tab. 3 - Porovnání štítkových a vypočtených momentů stroje

## Seznam obrázků

- Obr. 1 Řez kotvou nakrátko
- Obr. 2 Pohled na kroužky u kotvy navinuté trojfázově
- Obr. 3 Princip vinutí trojfázového motoru
- Obr. 4 Trojfázová soustava proudů
- Obr. 5 Určení výsledného magnetického toku  $\Phi$
- Obr. 6 Vznik točivého momentu a určení jeho smyslu
- Obr. 7 Řez trojfázovým asynchronním motorem s klecí nakrátko v laboratoři FEL ZČU
- Obr. 8 Řez kroužkovým motorem
- Obr. 9 a) normální průběh momentové charakteristiky  
b) Typické průběhy momentových charakteristik v závislosti na druhu klece podle ČSN 35 0300
- Obr. 10 Dvojitá klec
- Obr. 11 Úprava tyčí dvojité klece
- Obr. 12 Vírová klec
- Obr. 13 Tvary tyčí vírové klece
- Obr. 14 Základní obvodové znázornění asynchronního stroje
- Obr. 15 Náhradní schéma asynchronního motoru ve tvaru „T“
- Obr. 16 Náhradní schéma asynchronního motoru ve tvaru „Γ“
- Obr. 17 Vzorová a cílová rovina
- Obr. 18 Impedanční přímka jako funkce skluzu
- Obr. 19 Krok 1 – vytvoření kružnice
- Obr. 20 Krok 2 – znázornění hodnot rotorového proudu jako funkce skluzu na kružnici
- Obr. 21 Krok 3 – posunutí souřadného systému o proud  $I_0$
- Obr. 22 Kružnice statorových proudů
- Obr. 23 Přímka skluzů
- Obr. 24 Příklad proudů pro skluz 0,3
- Obr. 25 Odečítání hodnot výkonů a momentů z kružnicového diagramu
- Obr. 26 Magnetický obvod asynchronního motoru
- Obr. 27 Tvar magnetického pole asynchronního motoru
- Obr. 28 Vliv drážky na tvar pole
- Obr. 29 Činitel deformace pole drážkováním

- Obr. 30 Rozklad zubového pole na harmonické
- Obr. 31 Zploštění pole vlivem nasycení železa
- Obr. 32 Rozdělení proudové hustoty v průřezu obdélníkové tyče při  $f_2 \approx f_1$
- Obr. 33 Závislost činitele zvětšení odporu  $k_{\sim}$  na  $\xi$  pro lichoběžníkovou tyč
- Obr. 34 Závislost činitele zmenšení reaktance  $k_{\xi}$  na  $\xi$  pro lichoběžníkovou tyč
- Obr. 35 Určení rozměrů náhradní tyče pro stanovení činitelů  $k_{\sim}$  a  $k_{\xi}$
- Obr. 36 Frekvenční charakteristiky odporu  $R'_2(s)$  a reaktance  $X'_{2\sigma}(s)$  rotoru s vírovou klecí
- Obr. 37 Rozběhový moment a proud asynchronního motoru s vírovou klecí
- Obr. 38 Kružnicový diagram asynchronního motoru s vírovou klecí
- Obr. 39 Rotor s dvojitou klecí
- Obr. 40 Určení reaktancí  $X_{k12}$ ,  $X_{k13}$ ,  $X_{k23}$  asynchronního motoru s dvojitou klecí
- Obr. 41 Náhradní schéma asynchronního motoru s dvojitou klecí
- Obr. 42 Závislost poměru proudů a momentů dvou klecí v závislosti na skluzu
- Obr. 43 Frekvenční charakteristiky ekvivalentního rotorového obvodu asynchronního motoru s dvojitou klecí
- Obr. 44 Kružnicový diagram asynchronního motoru s dvojitou klecí
- Obr. 45 Rozběhový proud  $I_1$  a rozběhové momenty  $M$  asynchronního motoru s dvojitou klecí
- Obr. 46 Momentové charakteristiky asynchronních motorů
- Obr. 47 Impedanční křivka a kružnicový diagram stroje
- Obr. 48 Charakteristiky změřených a vypočtených proudů statoru
- Obr. 49 Odchylka proudu změřeného od vypočteného  $\delta$
- Obr. 50 Účinník stroje  $\cos\varphi$
- Obr. 51 Výkon přenášený vzduchovou mezerou  $P_{\delta}$
- Obr. 52 Proudová a momentová charakteristika stroje
- Obr. 53 Diagram možné odchylky momentové charakteristiky změřené od uvedené výrobcem

## Seznam tabulek

- Tab. 1 Souhrn vypočtených hodnot (část 1)
- Tab. 2 Souhrn vypočtených hodnot (část 2)
- Tab. 3 Porovnání štítkových a vypočtených momentů stroje



## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] J. BAŠTA, J. CHLÁDEK, I. MAYER. *Teorie elektrických strojů*. Praha: SNTL/ALFA, 1968. 584s.
- [2] J. ŘÍHA. *Elektrické stroje a přístroje*, Praha, 2. vydání, SNTL, 1986, 287s.
- [3] RUDOLF MRAVEC, *Elektrické stroje a přístroje, I. Elektrické stroje*, Praha, 1. vydání, SNTL, 1979, 432s.
- [4] RUDOLF BALÁK, *Silnoproudá zařízení*, Praha, 1. vydání, SNTL, 1984, 196s
- [5] VÁCLAV BARTOŠ, *Teorie elektrických strojů*, Plzeň, 1. vydání, Západočeská univerzita v Plzni, 2009, 230s
- [6] KAREL HRUŠKA, *Kružnicový diagram asynchronního stroje*, [online], 2013, [cit. 10. 5. 2016], <http://home.zcu.cz/~khruska/cz/diagram.html>
- [7] KAREL HRUŠKA, *Teorie elektrických strojů 2: Kružnicový diagram asynchronního stroje*, [dodáno], 2015, [cit. 11. 5. 2016]
- [8] LADISLAV CIGÁNEK, *Stavba elektrických strojů*, Praha, 1. vydání, SNTL, 1958, 716s.
- [9] G. N. PETROV, *Elektrické stroje 2*, Praha, 1. vydání, Academia, 1982, 732s.
- [10] Kroužkový motor SIEMENS, [online], 2007, [cit. 26.5.2016] <http://elektrosbirka.blog.cz/0703/krouzkovy-motor-siemens>
- [11] Siemens s. r. o. CZ, katalog K02 – 0811 CZ [online], 2007, [cit. 26.5.2016] <http://www.elektromotory-gral.cz/kcfinder/upload/files/1LA7.pdf>

## **Přílohy**

- Příloha č. 1:** Technická data 4 – pólového motoru SIEMENS s typovým označením 1LA7 – řady
- Příloha č. 2:** Skript pro výpočet impedanční křivky, kružnicového diagramu a proudů
- Příloha č. 3:** Skript pro výpočet veličin stroje z hodnot získaných z kružnicového diagramu
- Příloha č. 4:** Motor SIEMENS 1LA7 163 – 4AA10

**Příloha č. 1:** Technická data 4 – pólového motoru SIEMENS s typovým označením 1LA7 – řady

Jmen. výkon	Velikost	Objednávací číslo	Otáčky min <sup>-1</sup>	Parametry při jmenovitém výkonu			Účinnost $\eta$ 100% 75%	Účinek $\cos \varphi$	Poměrný záběrný moment Mz/Mn při přímém spouštění	Poměrný záběrný proud Ik/In	Poměrný moment zvratu Mmax/Mn	Momen- tová třída	Momen- tová charak- teris- tika Diagram č.	Moment setvač- nosti J	Hmot- nost
				Účinnost $\eta$ 100% 75%	Účinek $\cos \varphi$	Poměrný záběrný moment Mz/Mn při přímém spouštění									
<b>4-pól, 1500 min<sup>-1</sup>, 50Hz</b>															
kW			min <sup>-1</sup>	%	A	N m									kg
<b>0,06</b>	56	<b>1LA7 050-4AB..</b>	1350	56	0,20	0,42	0,77	1,9	2,6	1,9	13	<b>12</b>	0,00027	3,0	
<b>0,09</b>	56	<b>1LA7 053-4AB..</b>	1350	58	0,29	0,63	0,77	1,9	2,6	1,9	13	<b>12</b>	0,00027	3,0	
<b>0,12</b>	63	<b>1LA7 060-4AB..</b>	1350	55	0,42	0,84	0,75	1,9	2,8	2,0	13	<b>12</b>	0,0003	3,5	
<b>0,18</b>	63	<b>1LA7 063-4AB..</b>	1350	60	0,56	1,3	0,77	1,9	3,0	1,9	13	<b>12</b>	0,0004	4,1	
<b>0,25</b>	71	<b>1LA7 070-4AB..</b>	1350	60	0,76	1,8	0,79	1,9	3,0	1,9	13	<b>12</b>	0,0006	4,8	
<b>0,37</b>	71	<b>1LA7 073-4AB..</b>	1370	65	1,03	2,5	0,80	1,9	3,3	2,1	13	<b>12</b>	0,0008	6,0	
<b>0,55</b>	80	<b>1LA7 080-4AA..</b>	1395	67	1,45	3,7	0,82	2,2	3,9	2,2	16	<b>3</b>	0,0015	8,0	
<b>0,75</b>	80	<b>1LA7 083-4AA..</b>	1395	72	1,86	5,1	0,81	2,3	4,2	2,3	16	<b>3</b>	0,0018	9,4	
<b>1,1</b>	90S	<b>1LA7 090-4AA..</b>	1415	77	2,55	7,4	0,81	2,3	4,6	2,4	16	<b>2</b>	0,0028	12,3	
<b>1,5</b>	90L	<b>1LA7 096-4AA..</b>	1420	79	3,4	10,1	0,81	2,4	5,3	2,6	16	<b>3</b>	0,0035	15,6	
<b>2,2</b>	100L	<b>1LA7 106-4AA..</b>	1420	82	4,7	14,8	0,82	2,5	5,6	2,8	16	<b>3</b>	0,0048	21,5	
<b>3</b>	100L	<b>1LA7 107-4AA..</b>	1420	83	6,4	20,2	0,82	2,7	5,6	3,0	16	<b>3</b>	0,0058	24,5	
<b>4</b>	112M	<b>1LA7 113-4AA..</b>	1440	85	8,2	26,5	0,83	2,7	6	3,0	16	<b>2</b>	0,011	31,0	
<b>5,5</b>	132S	<b>1LA7 130-4AA..</b>	1455	86	11,4	36,1	0,81	2,5	6,3	3,1	16	<b>3</b>	0,018	42,5	
<b>7,5</b>	132M	<b>1LA7 133-4AA..</b>	1455	87	15,2	49,2	0,82	2,7	6,7	3,2	16	<b>3</b>	0,024	49,0	
<b>11</b>	160M	<b>1LA7 163-4AA..</b>	1460	88,5	21,5	72	0,84	2,2	6,2	2,7	16	<b>3</b>	0,040	68,0	
<b>15</b>	160L	<b>1LA7 166-4AA..</b>	1460	90	28,5	98,1	0,84	2,6	6,5	3,0	16	<b>3</b>	0,052	93,5	

[11]

## Příloha č. 2: Skript pro výpočet impedanční křivky, kružnicového diagramu a proudů

```

function kruhova_inverze
%skript pro vytvoření kružnicového diagramu stroje
close all

%konstanty
e=exp(1); %nedefinované eulerovo číslo
m_Y=150; %měřítka admitance
m_U=400/sqrt(3); %Napětí pro výpočet měřítka

%.....
%výchozí parametry motoru
%vypočtené hodnoty rotorového odporu
R21=[0.467 0.467 0.459 0.451 0.444 0.438 0.431 0.428 0.422 0.417 0.412 0.406 0.399
0.395 0.390 0.385 0.380 0.374 0.368 0.361 0.358 0.351 0.346 0.339 0.335 0.329 0.324
0.317 0.313 0.306 0.302 0.297 0.292 0.287 0.282 0.278 0.274 0.270 0.267 0.263 0.260
0.257 0.254 0.252 0.250 0.248 0.246 0.244 0.243 0.242 0.242 0.242 0.242];
% vypočtené hodnoty rotorové reaktance
X21=[0.788 0.788 0.789 0.790 0.791 0.795 0.797 0.808 0.811 0.811 0.811 0.811 0.824 0.826
0.835 0.839 0.848 0.856 0.861 0.860 0.866 0.883 0.884 0.890 0.893 0.903 0.909 0.914
0.913 0.924 0.929 0.930 0.944 0.944 0.961 0.964 0.972 0.982 0.990 0.992 1.006 1.019
1.033 1.047 1.079 1.107 1.151 1.207 1.257 1.324 1.459 1.459 1.459 1.459 1.459];
% skluzu
s=[inf 1.0 0.98 0.96 0.94 0.92 0.90 0.88 0.86 0.84 0.82 0.80 0.78 0.76 0.74 0.72 0.70
0.68 0.66 0.64 0.62 0.60 0.58 0.56 0.54 0.52 0.50 0.48 0.46 0.44 0.42 0.40 0.38 0.36
0.34 0.32 0.30 0.28 0.26 0.24 0.22 0.20 0.18 0.16 0.14 0.13 0.10 0.08 0.06 0.04 0.02
0.01 0.005 0.0001];
% skluzu alternátoru
sa=-1.*s;
%změřený proud
I=[137.98 136.95 136.38 136.18 136.85 138.75 135.03 135.80 137.86 136.48 136.23
137.51 135.27 135.42 133.77 132.08 132.31 134.62 134.27 128.94 130.74 130.18 130.96
128.92 128.47 128.33 130.50 127.98 128.33 129.02 126.11 127.63 123.53 124.36 122.99
121.28 119.98 120.28 117.29 114.72 112.01 108.95 102.39 96.87 87.16 73.83 61.01 45.92
21.31 15.30 13.60 10.12 9.35];
length(s)

%.....
%určení počtu dostupných hodnot
pocet=length(R21);
%vypocet vektoru statorovych odporu
R1=ones(1, pocet)*0.398;
%vypocet vektoru rozptylovych reaktanci statoru v rozsahu 80%-100%
X1=ones(1, pocet)*1.018;
%vypocet vektoru magnetizacnich reaktanci
Xu=ones(1,pocet)*25.41;
U1=ones(1, pocet)*(400/sqrt(3));

%.....
%výpočet proudu naprázdno I0
Zlh=Xu.*i; %impedance magnetického obvodu
Zl=R1+X1.*i+Zlh;
I0=(U1/Zl).*(m_Y/(m_U)); %proud naprázdno zvětšený o měřítka
I0=conj(I0*e^(-i*pi/2)); %otočení
I0m=linspace(0, I0); %vektor proudu I0

```

```

%výpočet komplečního činitele a impedance, admittance jako funkce skluzu
c1=(1+((R1+(X1.*i))./Z1h));
Z=(c1.*R1+c1.*i.*X1+c1.*c1.*i.*X21+c1.*c1.*(R21./s)); %impedanční křivka
Y=(1./Z).*m_Y;
Y=conj((Y)*e^(-i*pi/2)); %admitanční kružnice pootočená
Ypos=I0+Y; %posunutí kružnice o proud I0
Ym=Ypos;
Ym(1)=[];
Zoto=conj(Z*e^(-i*pi/2)); %impedanční křivka otočená
Zalt=1*conj(Zoto); %impedanční křivka generátoru otočená
abs(Z)/10
%výpočet impedance a admittance generátoru
Za=(c1.*R1+c1.*i.*X1+c1.*c1.*i.*X21+c1.*c1.*(R21./sa)); %impedanční křivka
generátoru
Ya=(1./Za).*m_Y;
Ya=conj((Ya)*e^(-i*pi/2)); %otočení
Yposa=I0+Ya; %admitanční křivka generátoru
Yg=Yposa;
Yg(1)=[];

p_vykon=linspace(I0, Ypos(2)); %přímka výkonů, Y(s=0) a Y(s=1)
p_moment=linspace(I0, Ypos(1)); %přímka momentů Y(s=0) a Y(s=-inf)

%.....
%výpočet proudu statoru I1 a rotoru I21
I1=((U1./((c1.*(R1+X1.*i)+c1.*c1.*((R21./s)+X21.*i))))).*(m_Y./m_U);
cosfi=(real(I1)./abs(I1));
I1=I0+conj((I1)*e^(-i*pi/2)); %I0 přičítám až zde kvůli předchozímu otočení
I1m=linspace(0, I1(end-5)); %vektor proudu I1 (pro s=0.06)

I21=(((I1-I0).*c1));
I21m=linspace(I0, I1(end-5)); %vektor proudu I21 (pro s=0.06)

Zoto(end)=Zoto(end-1); %odstanění poslední hodnoty kvůli vysoké hodnotě (zvýraznění
zakřivení u s->0)
Zalt(end)=Zalt(end-1);

%.....
%grafy
figure(1)
plot(Ym, 'linewidth', 2) %Admitanční křivka motoru a brzda
ax = gca;
set(ax, 'xdir', 'reverse') %obrácení orientace os
ax.XAxisLocation = 'origin';
ax.YAxisLocation = 'origin';
title('Kružnicový diagram stroje SIEMENS 1LA7 163 - 4AA10')
xlabel('Im')
ylabel('Re')
axis('square')
grid on
hold on
box off
plot(I0m, 'r', 'linewidth', 2) %vektor proudu naprázdno I0
plot(I1m, 'g', 'linewidth', 2) %vektor proud statoru I1

```

```
plot(I2lm, 'm', 'linewidth', 2)%vektor proud rotoru I2
plot(Yg, 'k', 'linewidth', 2) %admitanční křivka generátoru
plot(p_vykon, '--b') %přímka výkonů
plot(p_moment, '--k') %přímka momentů
plot(Zoto, 'b') %impedanční křivka motoru
plot(Zalt, 'k'); %impedanční křivka generátoru
legend(-1, 'Admitanční křivka motoru', 'Proud naprázdno', 'Proud statoru', 'Proud
rotoru', 'Admitanční křivka alternátoru', 'Přímka výkonu', 'Přímka momentu',
'Impedanční křivka motoru', 'Impedanční křivka generátoru');

end
```



### Příloha č. 3: Skript pro výpočet veličin stroje z hodnot získaných z kružnicového diagramu

```

function Moment_proud_char
%skript pro vytvoření charakteristik stroje
close all

%konstanty
e=exp(1); %nedefinované eulerovo číslo
m_Y=150; %měřítka admitance
m_U=400/sqrt(3);

%.....
%vypočtené hodnoty rotorového odporu
R21=[0.467 0.467 0.459 0.451 0.444 0.438 0.431 0.428 0.422 0.417 0.412 0.406 0.399
0.395 0.390 0.385 0.380 0.374 0.368 0.361 0.358 0.351 0.346 0.339 0.335 0.329 0.324
0.317 0.313 0.306 0.302 0.297 0.292 0.287 0.282 0.278 0.274 0.270 0.267 0.263 0.260
0.257 0.254 0.252 0.250 0.248 0.246 0.244 0.243 0.242 0.242 0.242 0.242 0.242];
% vypočtené hodnoty rotorové reaktance
X21=[0.788 0.788 0.789 0.790 0.791 0.795 0.797 0.808 0.811 0.811 0.818 0.824 0.826
0.835 0.839 0.848 0.856 0.861 0.860 0.866 0.883 0.884 0.890 0.893 0.903 0.909 0.914
0.913 0.924 0.929 0.930 0.944 0.944 0.961 0.964 0.972 0.982 0.990 0.992 1.006 1.019
1.033 1.047 1.079 1.107 1.151 1.207 1.257 1.324 1.459 1.459 1.459 1.459 1.459];
% skluzu
s=[inf 1.0 0.98 0.96 0.94 0.92 0.90 0.88 0.86 0.84 0.82 0.80 0.78 0.76 0.74 0.72 0.70
0.68 0.66 0.64 0.62 0.60 0.58 0.56 0.54 0.52 0.50 0.48 0.46 0.44 0.42 0.40 0.38 0.36
0.34 0.32 0.30 0.28 0.26 0.24 0.22 0.20 0.18 0.16 0.14 0.13 0.10 0.08 0.06 0.04 0.02
0.01 0.005 0.0001];
%změřený proud
I=[137.98 136.95 136.38 136.18 136.85 138.75 135.03 135.80 137.86 136.48 136.23
137.51 135.27 135.42 133.77 132.08 132.31 134.62 134.27 128.94 130.74 130.18 130.96
128.92 128.47 128.33 130.50 127.98 128.33 129.02 126.11 127.63 123.53 124.36 122.99
121.28 119.98 120.28 117.29 114.72 112.01 108.95 102.39 96.87 87.16 73.83 61.01 45.92
21.31 15.30 13.60 10.12 9.35];

%.....
%určení počtu dostupných hodnot
pocet=length(R21);
%vypocet vektoru statorových odporu
R1=ones(1, pocet).*0.398;
%vypocet vektoru rozptylových reaktancí statoru v rozsahu 80%-100%
X1=ones(1, pocet).*1.018;
%vypocet vektoru magnetizačních reaktancí
Xu=ones(1,pocet).*25.41;
U1N=ones(1, pocet).*(400/sqrt(3));

%.....
%výpočet proudu I1, I0, I21
Z1h=Xu.*i;
Z1=R1+X1.*i+Z1h;
I0=(U1N./Z1).*(m_Y./m_U);

c1=(1+((R1+(X1.*i))./Z1h));
I1=(I0+(U1N./((c1.*(R1+X1.*i)+c1.*c1.*(R21./s)+X21.*i))))).*(m_Y./m_U);

%výpočet účinníku
cosfi=real(I1)./abs(I1);

```

```

I21=(((I1-I0).*c1));
I1skut=I1./(m_Y./m_U);
I0=conj(I0*e^(-i*pi/2));
I1=I0+conj((I1)*e^(-i*pi/2));

%výpočet otáček a úhlové rychlosti
ns=1500;
n=ns-s.*ns;
omega=(pi.*n)./30;
omegas=(pi.*ns)./30;

%výpočet momentu motoru
%pomocné proměnné
M1=I1;
M0=I0;
Um=U1N;
%přímka momentů k odečtení hodnot výkonu přenášeného vzduchovou mezerou a momentu
stroje
smernice = (imag(I1(1)) - imag(I1(pocet)))/(real(I1(1)) - real(I1(pocet)));
x1 = smernice.*(imag(I1)-imag(I1(pocet)));
real_I1=imag(I1)-imag(x1);
Pdelta=3.*Um.*real_I1./(m_Y./m_U); %výkon vzduchovou mezerou
M=Pdelta./omegas; %moment

%výpočet výkonu motoru
%pomocné proměnné
V1=I1;
V0=I0;
V0(1)=[];
I0(1)=[];
V1(1)=[];
U1=U1N;
U1(1)=[];
%přímka výkonů k odečtení výkonu motoru
v=((imag(V1(1)).*i-imag(V0).*i)/(real(V1(1))-real(V0))).*(real(V1)-real(I0));
x2=real(V1)+imag(v).*i;
real_I2=imag(V1)-imag(x2);
Pm=3.*U1.*real_I2./(m_Y./m_U);

%snížení matic o hodnotu s = inf
I1d=I1skut;
I1d(1)=[];
sm=s;
sm(1)=[];
%výpočet odchylky změřeného a vypočteného proudu
delta=abs((ones(1, length(U1))-abs(I1d))./I).*100;

%.....
figure(1)
plot(sm, I, sm, abs(I1d),'linewidth', 2)
title('Zmereny a vypocteny proud')
axis('square')
xlabel('s[-]')

```



```
ylabel('I[A]')
grid on
hold on
legend('Zmereny proud', 'Vypocteny proud', 0);
box off

figure(2)
plot(sm, abs(delta), 'linewidth', 2)
axis('square')
xlabel('s[-]')
ylabel('{\delta}[-]')
title('Odchylka proudu vypočteného od změřeného')
grid on
hold on
box off

figure(3)
plot(s, cosfi, 'linewidth', 2)
xlabel('s[-]')
axis('square')
ylabel('cos{\phi}[-] ')
title('Ucinik stroje')
grid on
hold on
box off

figure(4)
plot(s, Pdelta, 'linewidth', 2)
axis('square')
xlabel('s[-]')
ylabel('P{\delta} [W]')
title('Výkon přenášený vzduchovou mezerou')
ylim([0 40000])
grid on
hold on
box off

figure(5)
plot(sm, Pm, 'linewidth', 2)
axis('square')
xlabel('s[-]')
ylabel('Pm [W]')
title('Mechanický výkon')
ylim([0 30000])
grid on
hold on
box off

figure(6)
plot(s, abs(Ilskut), s, M, 'linewidth', 2)
hold on
grid on
set(gca, 'xdir', 'reverse')
axis('square')
ylim([0 250])
```

```
title('Proudová a momentová charakteristika stroje')
xlabel('s[-]')
ylabel('I1[A], M[Nm]')
legend('Proud statoru', 'Moment stroje', 3)
box off

end
```

#### Příloha č. 4: Motor SIEMENS 1LA7 163 – 4AA10

