

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vliv odporu rotorového vinutí na parametry
asynchronního motoru

vedoucí práce: Ing. Roman Pechánek, Ph.D.

2012

autor: Bc. Daniel Kubeš

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Daniel KUBEŠ**
Osobní číslo: **E10N0073P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**
Název tématu: **Vliv odporu rotorového vinutí na parametry asynchronního motoru**
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. Seznamte se se zkouškami asynchronních strojů. Navrhněte měření k určení parametrů náhradního schématu vhodného asynchronního stroje.
2. Měření realizujte a na jeho základě sestavte matematický model daného stroje.
3. Provedte úpravu odporu rotorového vinutí.
Provedte simulace s respektováním změny odporu vinutí. Provedte měření na stroji s upraveným odporem vinutí.
4. Výsledky získané ze simulace a měření porovnejte. Dále porovnejte výsledky získané ze simulace s postupem dle [1].

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:


1. **Kubeš D,:** Výměna měděné klece nakrátko za klec mosaznou, Plzeň :
Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická, 2010.
2. **Boldea, I., Nasar, S,:** The Induction Machine Handbook, CRC Press, 2002,
ISBN 0-8493-0004-5
3. **IEEE**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Roman Pechánek**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2011**
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Tato práce se zabývá ukázkou vlivu rotorového odporu na momentovou charakteristiku asynchronního motoru. V první části je vysvětlena teorie matematického modelování. Dále je popisován způsob získání parametrů pro matematický model a kružnicový diagram. Pro získané parametry asynchronního motoru vytvořit matematický model v prostředí MATLAB Simulink a sestavit kružnicový diagram. Dále provést vhodnou úpravu odporu v obvodu rotoru, změřit potřebné parametry pro matematický model a sestavit kružnicový diagram respektující úpravu odporu v obvodu rotoru. Zjištěné momentové a provozní charakteristiky porovnat a ověřit správnost grafické konstrukce.

Klíčová slova

Asynchronní stroj, měření, matematický model, MATLAB Simulink, kružnicový diagram, momentová charakteristika.

Abstract

This diploma thesis is focused on an influence of rotor resistance to a torque characteristic of an asynchronous motor. In the first part is described a theory for mathematical modeling. Then there is given a way to acquire parameters for mathematical model and circular diagram. For acquired parameters of asynchronous motor is constructed a mathematical model in MATLAB Simulink environment and circular diagram. Next step is appropriate modification of rotor resistance, measurement of necessary parameters for mathematical model and construction of circular diagram respecting the change of rotor resistance. Discovered torque and operational characteristics are compared and the correctness of graphic constructions is verified.

Key words

Induction machine, measurement, mathematical model, MATLAB Simulink, circular diagram, torque characteristics.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

V Plzni dne 7.5.2012

.....

Podpis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Romanu Pechánkovi, Ph.D. za metodické vedení práce, cenné rady, ochotu a pomoc při měření.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ	10
1 MATEMATICKÝ MODEL ASYNCHRONNÍHO STROJE	12
1.1 ÚVOD.....	12
1.2 ZÁKLADNÍ ROVNICE ASYNCHRONNÍHO STROJE	12
1.3 PROSTOROVÝ VEKTOR	14
1.4 TRANSFORMACE SOUŘADNIC.....	16
2 MATLAB	19
2.1 O PROGRAMU.....	19
2.2 SYSTÉM MATLAB	19
2.3 OBLASTI POUŽITÍ	20
2.4 SIMULINK	20
3 URČENÍ PARAMETRŮ ASYNCHRONNÍHO STROJE	21
3.1 ÚVOD.....	21
3.2 ŠÍTKOVÉ HODNOTY	21
3.3 TEORIE MĚŘENÍ.....	22
3.3.1 <i>Měření odporu vinutí</i>	22
3.3.2 <i>Měření převodu</i>	23
3.3.3 <i>Měření naprázdno</i>	24
3.3.4 <i>Měření nakrátko</i>	26
3.4 MĚŘENÍ MOMENTU SETRVAČNOSTI METODOU PŘÍDAVNÉHO SETRVAČNÍKU	29
3.5 NAMĚŘENÉ HODNOTY.....	30
3.5.1 <i>Měření odporu vinutí</i>	30
3.5.2 <i>Měření převodu</i>	30
3.5.3 <i>Měření naprázdno</i>	32
3.5.4 <i>Měření nakrátko</i>	33
3.5.5 <i>Měření momentu setrvačnosti</i>	35
3.6 DOPOČTENÉ HODNOTY	36
4 KRUŽNICOVÝ DIAGRAM	38
4.1 ÚVOD.....	38
4.2 KONSTRUKCE KRUŽNICOVÉHO DIAGRAMU	39
4.3 ČTENÍ V KRUŽNICOVÉM DIAGRAMU	40
4.4 GRAFICKÁ KONSTRUKCE KRUŽNICOVÉHO DIAGRAMU RESPEKTUJÍCÍ ZMĚNU ODPORU ROTOROVÉHO OBVODU.....	41
5 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	42
5.1 MOMENT	42
5.2 PROUD	44
ZÁVĚR	47
POUŽITÁ LITERATURA	48
SEZNAM PŘÍLOH	1

Úvod

Cílem této diplomové práce je vytvořit matematický model asynchronního motoru ve vhodném simulačním prostředí, v našem případě v programu MATLAB Simulink a zjistit vliv rotorového odporu na jeho parametry, především na momentovou charakteristiku. Aby byla výpovědní schopnost co největší, vstupní parametry matematického modelu vychází ze skutečných naměřených hodnot. Z naměřených hodnot sestrojím kružnicový diagram a odečíst z něj provozní vlastnosti. Dále na měřeném stroji provést vhodnou úpravu odporu rotorového vinutí, změřit potřebné parametry do matematického modelu a kružnicového diagramu. Ze získaných hodnot z matematického modelu a kružnicového diagramu posoudit vliv odporu rotorového vinutí na parametry asynchronního motoru, porovnat výsledky z obou postupů a ověřit jejich výpovědní schopnost. Toto téma je řešeno proto, aby byla ověřena správnost grafické konstrukce respektující změnu odporu rotorového vinutí provedenou v literatuře [9].

Vytvoření matematického modelu může být vhodné ke studijním účelům, kde se může pozorovat chování motoru na vstupní parametry, nebo simulovat různé poruchové stavy, které mohou nastat. Simulování ve vhodném prostředí je vyhovující tam, kde se předpovídá chování reálného systému, především v období návrhu a projektování, nebo provádění experimentů je příliš finančně náročné.

Kružnicový diagram je grafické znázornění všech poloh fázoru statorového proudu ve fázovém diagramu (prakticky i teoreticky možných), kde množina všech poloh tohoto fázoru tvoří kružnici v Gaussově rovině. Pro každý bod na této kružnici, lze určit důležité provozní veličiny jako je moment, proud, účinník, skluz, výkon, příkon. Z kružnicového diagramu se můžou odečítat parametry pro všechny tři stavy: motor, generátor, brzda.

Seznam symbolů

Značka	Název	Jednotka
I	Proud	A
U	Napětí	V
R_1	Odpor statorového vinutí	Ω
R_2'	Odpor rotorového vinutí přepočtené na stranu vinutí statoru	Ω
ΔP	Ztráty	W
P	Výkon	W
X	Reaktance	Ω
Z	Impedance	Ω
φ	Fázový posuv	$^\circ$
n_s	Synchronní otáčky pole statoru	min^{-1}
n	Mechanické otáčky rotoru	min^{-1}
f	Frekvence	Hz
M	Moment	Nm
s	Skluž	-
k	Převod	-
$\cos \varphi$	Účinník	-
p	Počet pólových dvojic	-
J	Moment setrvačnosti	Kg.m.s^{-2}
L_a, L_b, L_c	Vlastní indukčnost jedné fáze statorového vinutí	H
L_A, L_B, L_C	Vlastní indukčnost jedné fáze rotorového vinutí	H
M_1	Vzájemná indukčnost dvou fází statorového vinutí	H
M_2	Vzájemná indukčnost dvou fází rotorového vinutí	H
M_{12}, M_{21}	Vzájemná indukčnost odpovídajících si fází statorového a rotorového vinutí	H
Ψ_a, Ψ_b, Ψ_c	Spřažený magnetický tok jedné fáze statorového vinutí	Wb
Ψ_A, Ψ_B, Ψ_C	Spřažený magnetický tok jedné fáze rotorového vinutí	Wb
i_a, i_b, i_c	Proudy fází statoru	A
i_A, i_B, i_C	Proudy fází rotoru	A
u_a, u_b, u_c	Napětí fází statoru	V
u_A, u_B, u_C	Napětí fází rotoru	V

L	Výsledná indukčnost jedné fáze	H
L_{1h}	Vzájemná indukčnost statoru a rotoru při uvažování vlivu všech fází	H
\hat{I}_1^1	Prostorový vektor proudu	A
\hat{U}_1^1	Prostorový vektor napětí statoru	V
ϑ	Úhel natočení rotoru vůči statoru	°
$\hat{\Phi}_1^1$	Prostorový vektor spřaženého magnetického toku statoru	Wb

Index	Význam
n	Jmenovitý
max	Maximální
z	Záběrný
0	Naprázdko
K	Nakrátko
μ	Magnetizační
σ	Rozptylový
i	Indukovaný
1	Stator
2	Rotor
α	Ve směru souřadnice α
β	Ve směru souřadnice β

1 Matematický model asynchronního stroje

1.1 Úvod

V této části bude odvozen simulační model asynchronního motoru pro následné namodelování v programu MATLAB Simulink. Model tvoří reprezentaci teorie získané obecným výčtem principů získaných pozorováním. Model musí co nejvíce odpovídat fyzikální realitě, aby měl co největší vypovídací schopnost. Kladen je požadavek na jednoduchost a srozumitelnost. Model uvažuje jisté zjednodušující předpoklady, ze kterých plynou možná zanedbání. Přílišná zjednodušení a zanedbání mohou vést ke ztrátě přesnosti. Důležitou částí modelu jsou vstupní parametry, které by měly být určitelné poččetně nebo experimentálně.

Modelování má výhody především tam, kde provádění experimentů je příliš finančně, časově náročné a někdy dokonce nemožné. Dále také tam, kde se předpovídá chování reálného systému, který je ve stavu návrhu či projektování. Velký význam má modelování i ve výuce, kde studenti se mohou podrobně seznámit se studovaným problémem. [10]

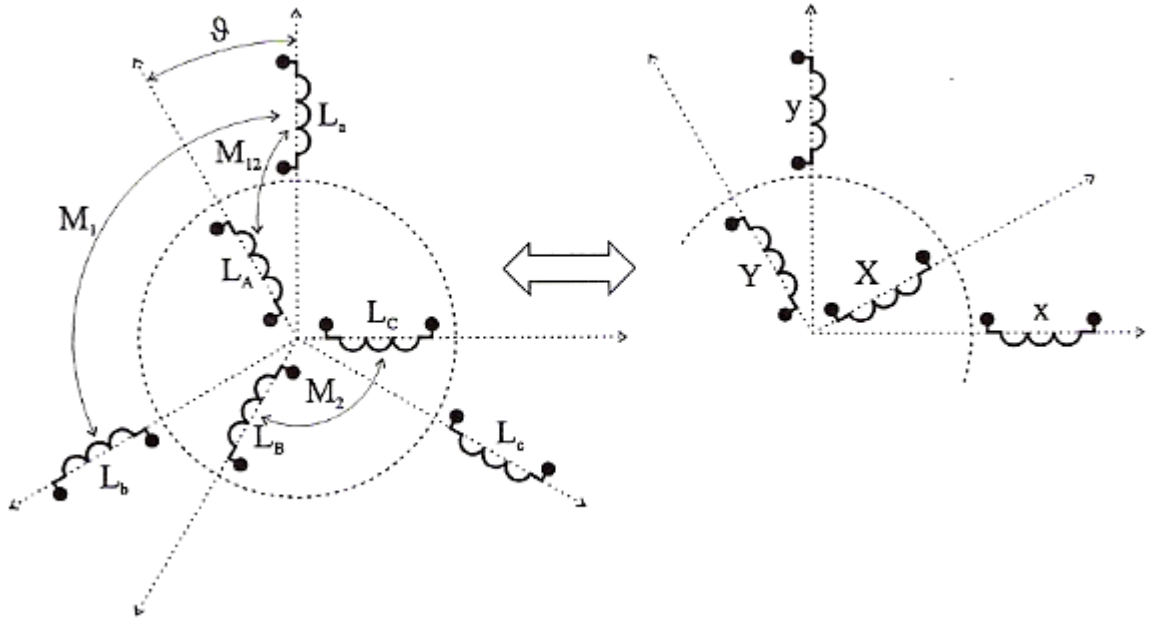
1.2 Základní rovnice asynchronního stroje

První úvaha je pro stojící souměrný trojfázový systém s vinutým rotorem. Pro další postup jsou brány v úvahu zjednodušující předpoklady:

- dvoupólový stroj
- neuvažuje se sycení magnetického obvodu
- sinusově rozložené vinutí
- zanedbání skin efektu

Dále uvažujeme pět charakteristických indukčností, které jsou pro všechny kombinace fází shodné:

$L_a = L_b = L_c$	Vlastní indukčnost jedné fáze statorového vinutí	
M_1	Vzájemná indukčnost dvou fází statorového vinutí	
$L_A = L_B = L_C$	Vlastní indukčnost jedné fáze rotorového vinutí	(1.1)
M_2	Vzájemná indukčnost dvou fází rotorového vinutí	
M_{12}, M_{21}	Vzájemná indukčnost odpovídajících si fází statorového a rotorového vinutí	



Obr. 1 - Struktura asynchronního stroje [7]

Výsledný spřažený magnetický tok statorového vinutí jedné fáze a pro základní polohu rotoru je dán:

$$\Psi_a = L_a i_a + M_1 i_b \cos 120^\circ + M_1 i_c \cos(-120^\circ) + M_{12} i_A + M_{12} i_B \cos 120^\circ + M_{12} i_C \cos(-120^\circ) \quad (1.2)$$

Pro stator, kdy vinutí nemá vyvedený uzel, platí:

$$i_b + i_c = -i_a \quad (1.3)$$

podobně pro rotor:

$$i_B + i_C = -i_A \quad (1.4)$$

Dosazením vztahů (1.3) a (1.4) do vztahu (1.2) dostaneme:

$$\Psi_a = L_a i_a + M_1 (-i_a) \cos 120^\circ + M_{12} (-i_A) \cos 120^\circ \quad (1.5)$$

Pro $\cos 120^\circ = -1/2$ dostane vztah:

$$\Psi_a = \left(L_a + \frac{1}{2} M_1 \right) i_a + \frac{3}{2} M_{12} i_A \quad (1.6)$$

Získali jsme výslednou indukčnost jedné fáze statorového vinutí:

$$L_1 = L_a + \frac{1}{2} M_1 \quad (1.7)$$

a vzájemnou indukčnost statoru a rotoru při uvažování všech fází:

$$L_{1h} = \frac{3}{2} M_{12} \quad (1.8)$$

Obdobně můžeme uvažovat i pro rotorové vinutí, získáme tedy vztahy pro všechny spřažené toky:

$$\begin{aligned}
\Psi_a &= L_1 i_a + L_{1h} i_A & \Psi_A &= L_2 i_A + L_{1h} i_a \\
\Psi_b &= L_1 i_b + L_{1h} i_B & \Psi_B &= L_2 i_B + L_{1h} i_b \\
\Psi_c &= L_1 i_c + L_{1h} i_C & \Psi_C &= L_2 i_C + L_{1h} i_c
\end{aligned} \tag{1.9}$$

Na základě těchto vztahů můžeme psát napěťové rovnice okamžitých hodnot statorového a rotorového vinutí:

$$\begin{aligned}
u_a &= R_1 i_a + \frac{d\Psi_a}{dt} & u_A &= R_2 i_A + \frac{d\Psi_A}{dt} \\
u_b &= R_1 i_b + \frac{d\Psi_b}{dt} & u_B &= R_2 i_B + \frac{d\Psi_B}{dt} \\
u_c &= R_1 i_c + \frac{d\Psi_c}{dt} & u_C &= R_2 i_C + \frac{d\Psi_C}{dt}
\end{aligned} \tag{1.10}$$

1.3 Prostorový vektor

Pro analýzu časových závislostí, daných napájením statorového vinutí střídavým proudem a otáčením rotoru využijeme prostorové vektory. Jediným prostorovým vektorem můžeme nahradit působení okamžitých hodnot proudů jednotlivých fází. Prostorový vektor je definován:

$$\hat{I}_1^1 = K(i_a + i_b \hat{a} + i_c \hat{a}^2) \tag{1.11}$$

kde jednotkový vektor je:

$$\hat{a} = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \tag{1.12}$$

$$\hat{a}^2 = e^{-j120^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

Horní index 1 znamená, že souřadný systém je pevně spojený se statorem.

Okamžité hodnoty proudů statoru můžeme psát:

$$\begin{aligned}
i_a &= I_{1m} \cos \omega t \\
i_b &= I_{1m} \cos(\omega t - 120^\circ) \\
i_c &= I_{1m} \cos(\omega t + 120^\circ)
\end{aligned} \tag{1.13}$$

Jelikož platí:

$$\cos \omega t = \frac{1}{2}(e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}) \tag{1.14}$$

lze okamžité hodnoty proudů upravit na:

$$\begin{aligned}
i_a &= I_{1m} \cos \omega t = \frac{1}{2} I_{1m} (e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}) \\
i_b &= I_{1m} \cos(\omega t - 120^\circ) = \frac{1}{2} I_{1m} (e^{j\omega t} \cdot \hat{a}^2 + e^{-j\omega t} \cdot \hat{a})
\end{aligned} \tag{1.15}$$

$$i_c = I_{1m} \cos(\omega t + 120^\circ) = \frac{1}{2} I_{1m} (e^{j\omega t} \cdot \hat{a} + e^{-j\omega t} \cdot \hat{a}^2)$$

Za platnosti $\hat{a} \cdot \hat{a} = \hat{a}^2$, $\hat{a} \cdot \hat{a}^2 = 1$, $\hat{a}^2 \cdot \hat{a}^2 = \hat{a}$, $1 + \hat{a} + \hat{a}^2 = 0$ a dosazením pravé části rovnic (1.15) do vztahu (1.11) dostaneme pro prostorový vektor:

$$\hat{I}_1^1 = \frac{3}{2} \cdot K \cdot I_{1m} \cdot e^{j\omega t} \quad (1.16)$$

Ze vztahu (1.11) můžeme získat prostým rozdělením na reálnou a imaginární složku vztahu pro složky statorového proudu v pravoúhlých souřadnicích pevně spojených se statorovým vinutím:

$$i_\alpha = \text{Re}\{\hat{I}_1^1\} = K \cdot \left(i_a - \frac{1}{2} \cdot i_b - \frac{1}{2} \cdot i_c \right) = \frac{3}{2} \cdot K \cdot i_a \quad (1.17)$$

$$i_\beta = \text{Im}\{\hat{I}_1^1\} = K \cdot (i_b - i_c)$$

Pro koeficient $K=1$ má transformovaný prostorový vektor velikost danou fyzikální skutečností. Pro druhý případ $K=2/3$ neplatí invariantnost výkonů, ale není nutný přepočítací koeficient mezi fázovým proudem i_a a transformovaným proudem i_α .

Pokud známe prostorový vektor, lze zpětně vypočítat fázové hodnoty trojfázového proudu průmětem prostorového vektoru do směru jednotlivých fází:

$$i_a = \text{Re}\{\hat{I}_1^1\} = i_\alpha$$

$$i_b = \text{Re}\{\hat{I}_1^1 \cdot \hat{a}^2\} = -\frac{1}{2} \cdot i_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_\beta \quad (1.18)$$

$$i_c = \text{Re}\{\hat{I}_1^1 \cdot \hat{a}\} = -\frac{1}{2} \cdot i_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_\beta$$

Dále zavedeme prostorové vektory do odvozených napěťových rovnic (1.10) tak, že rovnice fáze b násobíme jednotkovým vektorem a a rovnice fáze c násobíme jednotkovým vektorem a^2 a rovnice sečteme. Tím dostaneme vztahy pro prostorové vektory napětí statoru a rotoru:

$$\begin{aligned} \hat{U}_1^1 &= R_1 \hat{I}_1^1 + \frac{d\hat{\Psi}_1^1}{dt} \\ \hat{U}_2^2 &= R_2 \hat{I}_2^2 + \frac{d\hat{\Psi}_2^2}{dt} \end{aligned} \quad (1.19)$$

Otáčí-li se rotor úhlovou rychlostí ω ($\vartheta = \omega t$), mění se tudíž vzájemná indukčnost vinutí statoru a rotoru M_{12} . Pro sprážené magnetické toky fází statorového vinutí můžeme psát:

$$\begin{aligned} \Psi_a &= L_1 i_a + M_{12} i_A \cos \vartheta + M_{12} i_B \cos(\vartheta + 120^\circ) + M_{12} i_C \cos(\vartheta - 120^\circ) \\ \Psi_b &= L_1 i_b + M_{12} i_A \cos(\vartheta - 120^\circ) + M_{12} i_B \cos \vartheta + M_{12} i_C \cos(\vartheta + 120^\circ) \\ \Psi_c &= L_1 i_c + M_{12} i_A \cos(\vartheta + 120^\circ) + M_{12} i_B \cos(\vartheta - 120^\circ) + M_{12} i_C \cos \vartheta \end{aligned} \quad (1.20)$$

Pokud je součet okamžitých hodnot rotorových proudů roven nule a zavedením prostorových vektorů platí:

$$\begin{aligned}\hat{\Psi}_1^1 &= L_1 \hat{i}_1^1 + L_{1h} \hat{i}_2^2 \cdot e^{j\vartheta} \\ \hat{\Psi}_2^2 &= L_2 \hat{i}_2^2 + L_{1h} \hat{i}_1^1 \cdot e^{-j\vartheta}\end{aligned}\quad (1.21)$$

1.4 Transformace souřadnic

Trojfázové rovnice stroje je možné převést do určitého souřadného systému. V této části bude uveden popis převodu rovnic stroje. I když možností je mnoho, ve střídavých pohonech přicházejí v úvahu tři možné transformace do polárních souřadnic:

kl	Souřadný systém je pevně svázaný s rotorem	$\omega_k = \omega$
dq	Souřadný systém rotuje synchronní rychlostí	$\omega_k = \omega_s$
$\alpha\beta$	Souřadný systém je pevně svázaný se státorem	$\omega_k = 0$

kde ω_k je rychlost otáčení souřadného systému

V této práci je model řešen v souřadném systému pevně svázaným se státorem stroje, tedy v souřadnicích $\alpha\beta$. Tato transformace je vhodná pro sledování statorových veličin. Také pokud je nesymetrické či nespojitě napětí na statoru a symetrické nebo nulové napětí na rotoru.

Vztahy (1.19) se nejprve převedou pro prostorové vektory napětí statoru a rotoru do jednoho souřadného systému. Napětí statoru není potřeba převádět, protože model je řešen v souřadném systému, který je pevně svázán se státorem.

Napětí rotoru pro převedení na stranu statoru vynásobíme $e^{-j\vartheta}$. Vychází to z prostorového vektoru proudu, kde pro převod rotujícího systému k do stojících systému l platí:

$$\hat{i}^1 = \hat{i}^k \cdot e^{-j\vartheta} \quad (1.22)$$

Z tohoto pro převod z rotoru na stator platí:

$$\hat{i}^1 = \hat{i}^2 \cdot e^{-j\vartheta} \quad (1.23)$$

Poté napětí rotoru převedené do statorového systému je:

$$\hat{U}_2^2 = R_2 \hat{i}_2^2 + \frac{d\hat{\Psi}_2^2}{dt} \quad (1.24)$$

a vynásobením celé rovnice $e^{-j\vartheta}$ dostaneme:

$$\hat{U}_2^2 \cdot e^{-j\vartheta} = R_2 \hat{i}_2^2 \cdot e^{-j\vartheta} + \frac{d}{dt} (\hat{\Psi}_2^2 \cdot e^{-j\vartheta}) \quad (1.25)$$

Napětí rotoru po derivaci a následné úpravě je:

$$\hat{U}_2^1 = R_2 \hat{i}_2^1 + \frac{d\hat{\Psi}_2^1}{dt} - j \frac{d\vartheta}{dt} \hat{\Psi}_2^1 \quad (1.26)$$

a dále platí:

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \omega \quad (1.27)$$

Nyní se provede rozklad obou napětí na složky $\alpha\beta$ dle vztahů (1.28), protože jsou napětí již převedena do stejného souřadného systému, vynechá se značení příslušné strany horními indexy:

$$\begin{aligned} u_{1\alpha} &= \operatorname{Re}\{\hat{U}_1^1\} \\ u_{1\beta} &= \operatorname{Im}\{\hat{U}_1^1\} \\ u_{2\alpha} &= \operatorname{Re}\{\hat{U}_2^1\} \\ u_{2\beta} &= \operatorname{Im}\{\hat{U}_2^1\} \end{aligned} \quad (1.28)$$

$$u_{1\alpha} = R_1 i_{1\alpha} + \frac{d\Psi_{1\alpha}}{dt} \quad (1.29)$$

$$u_{1\beta} = R_1 i_{1\beta} + \frac{d\Psi_{1\beta}}{dt} \quad (1.30)$$

$$u_{2\alpha} = R_2 i_{2\alpha} + \frac{d\Psi_{2\alpha}}{dt} + \omega\Psi_{2\beta} \quad (1.31)$$

$$u_{2\beta} = R_2 i_{2\beta} + \frac{d\Psi_{2\beta}}{dt} - \omega\Psi_{2\alpha} \quad (1.32)$$

V souřadném systému $\alpha\beta$ jsou spřažené magnetické toky:

$$\Psi_{1\alpha} = L_1 i_{1\alpha} + L_h i_{2\alpha} \quad (1.33)$$

$$\Psi_{1\beta} = L_1 i_{1\beta} + L_h i_{2\beta} \quad (1.34)$$

$$\Psi_{2\alpha} = L_2 i_{2\alpha} + L_h i_{1\alpha} \quad (1.35)$$

$$\Psi_{2\beta} = L_2 i_{2\beta} + L_h i_{1\beta} \quad (1.36)$$

Do napěťových rovnic (1.29) – (1.32) následuje dosazení vztahů (1.33) – (1.36) pro magnetické toky. Poté se rovnice upraví a vyjádří se z nich derivace jednotlivých proudů statoru a rotoru. Následně tyto čtyři diferenciální rovnice budou modelovány v programu MATLAB Simulink. I když modelovaný asynchronní stroj má vinutou kotvu, při měření bylo rotorové vinutí spojeno nakrátko, proto se položí rotorová napětí rovna nule.

$$u_{1\alpha} = R_1 i_{1\alpha} + \frac{d(L_1 i_{1\alpha} + L_h i_{2\alpha})}{dt} \quad (1.37)$$

$$u_{1\beta} = R_1 i_{1\beta} + \frac{d(L_1 i_{1\beta} + L_h i_{2\beta})}{dt} \quad (1.38)$$

$$0 = R_2 i_{2\alpha} + \frac{d(L_2 i_{2\alpha} + L_h i_{1\alpha})}{dt} + \omega(L_2 i_{2\beta} + L_h i_{1\beta}) \quad (1.39)$$

$$0 = R_2 i_{2\beta} + \frac{d(L_2 i_{2\beta} + L_h i_{1\beta})}{dt} - \omega(L_2 i_{2\alpha} + L_h i_{1\alpha}) \quad (1.40)$$

Vyjádří se derivace jednotlivých proudů statoru a rotoru:

$$\frac{di_{1\alpha}}{dt} = \frac{u_{1\alpha} - R_1 i_{1\alpha} - L_h \frac{di_{2\alpha}}{dt}}{L_1} \quad (1.41)$$

$$\frac{di_{1\beta}}{dt} = \frac{u_{1\beta} - R_1 i_{1\beta} - L_h \frac{di_{2\beta}}{dt}}{L_1} \quad (1.42)$$

$$\frac{di_{2\alpha}}{dt} = \frac{-R_2 i_{2\alpha} - L_h \frac{di_{1\alpha}}{dt} - \omega(L_2 i_{2\beta} + L_h i_{1\beta})}{L_2} \quad (1.43)$$

$$\frac{di_{2\beta}}{dt} = \frac{-R_2 i_{2\beta} - L_h \frac{di_{1\beta}}{dt} + \omega(L_2 i_{2\alpha} + L_h i_{1\alpha})}{L_2} \quad (1.44)$$

Nyní známe rovnice popisující vztahy mezi parametry, proudy a napětími asynchronního stroje. V rovnicích (1.43) a (1.44) navíc figuruje proměnná úhlová rychlost otáčení rotoru ω . Tu je možno vyjádřit z pohybové rovnice:

$$M - M_{zat} = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1.45)$$

kde M_{zat} je zátěžný moment,

M je elektromagnetický moment.

Úhlová rychlost se vydělí počtem pólů, aby otáčky odpovídaly skutečným:

$$M - M_{zat} = \frac{J}{p} \frac{d\omega}{dt} \quad (1.46)$$

Vyjádří se výsledná rovnice úhlové rychlosti:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} (M - M_{zat}) \quad (1.47)$$

Nyní ještě potřebujeme zjistit elektromagnetický moment M . Ten se vyjádří z činného výkonu stroje:

$$M = \frac{3}{2} p (\Psi_\alpha i_\beta - \Psi_\beta i_\alpha) \quad (1.48)$$

$$M = \frac{3}{2} p L_h (i_{1\beta} i_{2\alpha} - i_{1\alpha} i_{2\beta}) \quad (1.49)$$

Tato kapitola byla vypracována dle literatury [7], [8]

2 MATLAB

2.1 O programu

Název MATLAB vznikl ze slov *MATrix LABoratory* = *maticová laboratoř*. Matlab je vysoce výkonné interaktivní prostředí pro technické výpočty. Spojuje technické výpočty, vizualizaci dat a programováním v jednoduchém uživatelském prostředí, kde řešení jsou vyjádřené běžnými matematickými zápisy. Vytváří ideální prostředek pro matematiky, vědce, techniky pro řešení problémů z mnoha oblastí pomocí rozšiřujících modulů – aplikačních knihoven (toolboxů). [5], [6]

2.2 Systém MATLAB

Programovací systém se skládá z pěti hlavních částí:

1. Syntaxe jazyka Matlab

Tato část popisuje syntaxi jazyka pro řídicí příkazy, funkce, struktury dat, vstupy a výstupy, objekty připravené na další programování. Syntaxe jazyka je orientovaná do adresářů v Matlab Toolboxech.

2. Uživatelské prostředí Matlabu

Tato část umožňuje práci s M-soubory, proměnnými, daty a celým uživatelským prostředím. Většina z nich má grafické uživatelské prostředí.

3. Grafika Matlabu

Tato část popisuje celý grafický systém Matlabu. Zahrnuje v sobě příkazy pro dvojrozměrné a trojrozměrné zobrazení, práci s obrázky, animace a různé grafické prezentace. Též poskytuje kompletní grafické propojení pro všechny aplikace Matlabu.

4. Knihovna matematických funkcí Matlabu

Tato část obsahuje kompletní sbírku matematických funkcí. Zahrnuje v sobě základní matematické funkce, komplexní aritmetiku a maticové funkce. Nevynechá ani matematické oblasti jako jsou polynomy, interpolace, analýza dat, Fourierova transformace a Besselovy funkce.

5. Propojení Matlabu s aplikačními programovacími jazyky

Tato knihovna umožňuje přeložení programu z Matlabu do zdrojového textu programových prostředí jazyka C a Fortran. Knihovna zahrnuje programové prostředky pro výpočtový mechanismus Matlabu, čtení a zápis MAT-souborů. [5], [6]

2.3 Oblasti použití

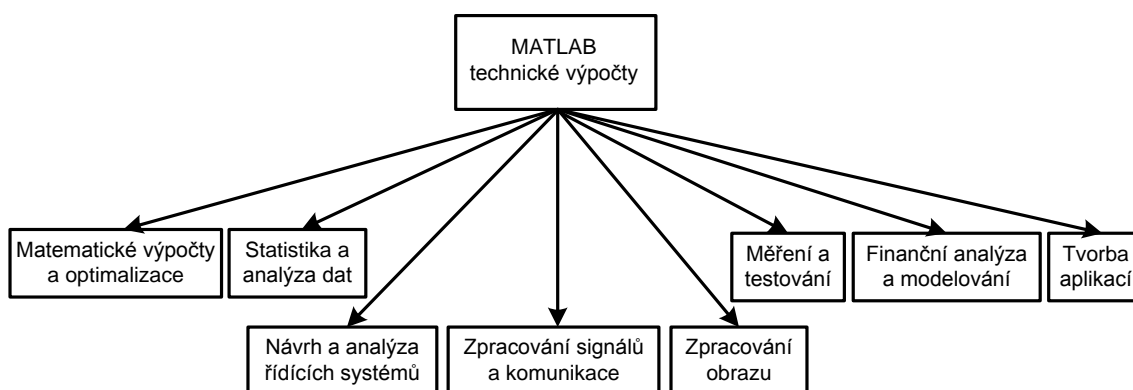
V prostředí Matlab je řešení technických problémů mnohem jednodušší než v jiných programovacích jazycích nebo vývojových prostředích, neboť obsahuje velké množství vestavěných funkcí. Integruje programování, výpočty a vizualizaci do jednoho uživatelského prostředí.

Mezi klíčové vlastnosti patří:

- vysokoúrovňový jazyk pro potřebné výpočty
- rozšiřitelnost systému, velké množství aplikačních knihoven
- modelování, simulace a prototypy
- vizualizace a analýza dat
- vysoce výkonná 2D a 3D grafika
- podpora datových struktur a vícerozměrných polí
- aplikační prostředky pro vytváření grafického uživatelského prostředí
- import a export dat do mnoha formátů
- komunikace s externími monitorovacími a měřicími přístroji v reálném čase
- rozšiřitelnost modulů o jazyky C, C++, Java, Fortan [5], [6]

2.4 Simulink

Prostředí Matlabu je možné doplnit rozšiřujícími aplikačními knihovnami – toolboxy. Největší a nejznámější z nich je Simulink. Využívá se pro simulaci a modelování dynamických systémů, které pro řešení nelineárních diferenciálních rovnic využívá algoritmy z Matlabu. Modely dynamických soustav se vytvářejí interaktivně pomocí bloků a propojení mezi nimi, což je jednodušší a intuitivnější pro uživatele.



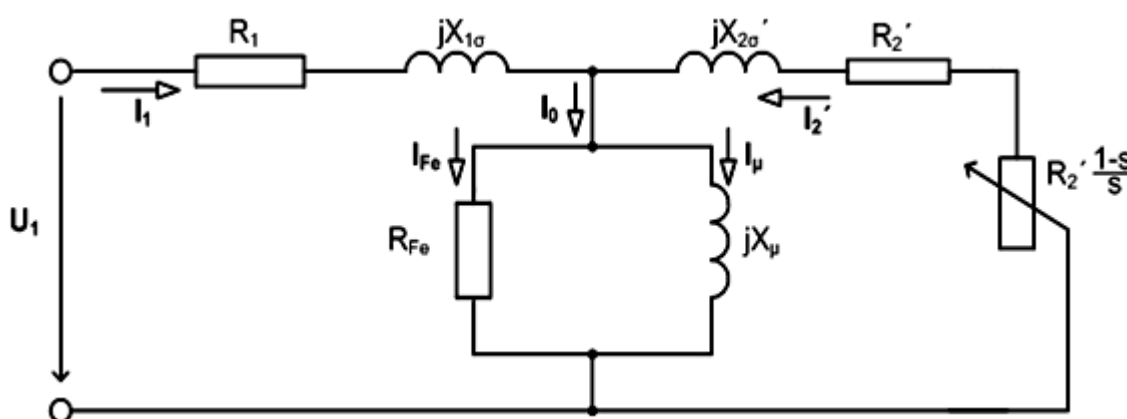
Obr. 2 - Dostupná rozšíření Matlabu

Na Obr. 12 jsou vidět nejrozšířenější toolboxy. Tyto toolboxy je nutné si dokoupit zvlášť, protože nejsou součástí standardního balíku Matlabu. [5], [6]

3 Určení parametrů asynchronního stroje

3.1 Úvod

Matematický model asynchronního stroje je sestaven z šesti diferenciálních rovnic popsaných v kapitole 1. Tyto diferenciální rovnice vycházejí ze skutečných parametrů modelovaného stroje. Základními parametry matematického modelu jsou odpor statorového a rotorového vinutí, hlavní indukčnost, rozptylová indukčnost statoru a rotoru, moment setrvačnosti, počet pólů, zátěžný moment, napájecí napětí a frekvence. Hlavní a rozptylové indukčnosti, odpor statorového a rotorového vinutí vycházejí z náhradního schématu ve tvaru T. Základní parametry je možno získat ze štítku a katalogových listů, nebo pomocí měření na modelovaném motoru.



Obr. 3 - Náhradní schéma asynchronního stroje T – tvaru [9]

3.2 Štítkové hodnoty

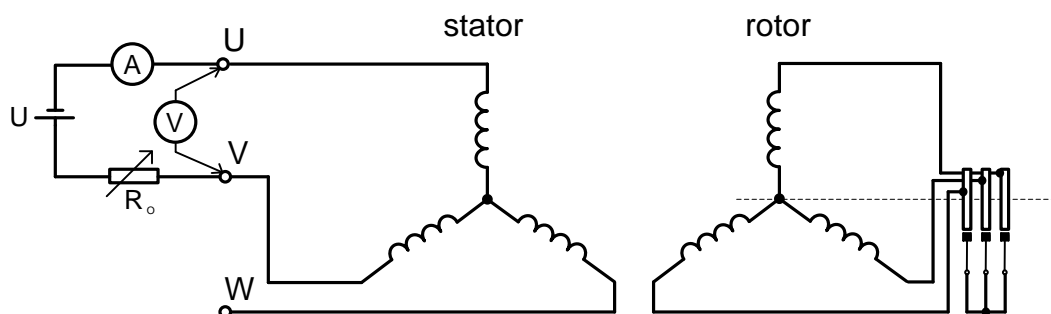
Výrobce:	MEZ Broumov	Jmenovité napětí:	$U_n = 220/380 \text{ V}$
Typ:	H112 L06	Napětí statoru:	$U_1 = 380 \text{ V}$
Rok výroby:	1980	Napětí rotoru:	$U_2 = 120 \text{ V}$
Provedení:	IP 44	Výkon:	$P_2 = 3 \text{ kW}$
Počet pólů:	$2p = 6$	Frekvence:	$f = 50 \text{ Hz}$
Jmenovité otáčky:	$n = 910 \text{ ot/min}$	Proud statoru:	$I_1 = 10,8 \text{ A}$
Synchronní otáčky:	$n_s = 1000 \text{ ot/min}$	Proud rotoru:	$I_2 = 18 \text{ A}$

3.3 Teorie měření

3.3.1 Měření odporu vinutí

3.3.1.1 Měření odporu statoru

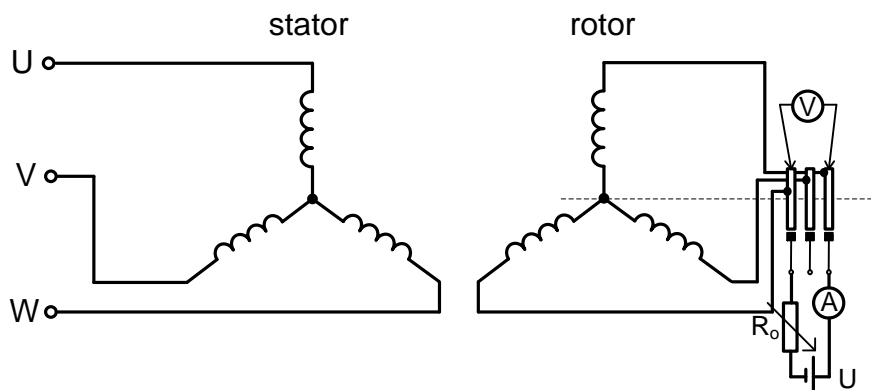
Pro měření odporu vinutí statoru se použije Ohmova metoda. Měřit bychom měli proudem asi do 20% I_n , protože vyšší hodnota proudu by mohla zvýšit teplotu vinutí a s teplotou by se také zvýšil odpor. Měříme odpor všech kombinací statorového vinutí a měříme při více různých hodnotách proudů. [1]



Obr. 4 - Měření odporu stator

3.3.1.2 Měření odporu vinutého rotoru

Měření odporu vinutého rotoru se provádí při odpojeném spouštěcím odporu a stejnosměrném napájení přes kartáče. Měří se úbytek přímo na kroužcích pro vyloučení přechodového odporu na kluzném kontaktu. Odpor také závisí nejen na přechodovém odporu kartáčů, ale i na přívodech ke spouštěči a stavu kontaktů, proto může být co do velikosti neurčitý. Nežádoucí vliv odporu přívodů a přechod oddělenými přívody proudu a napětí se může omezit na speciálních čelistových svorkách s navzájem izolovanými čelistmi. Měříme opět všechny kombinace a pro výpočet odporu použijeme maximální naměřenou hodnotu. [1]

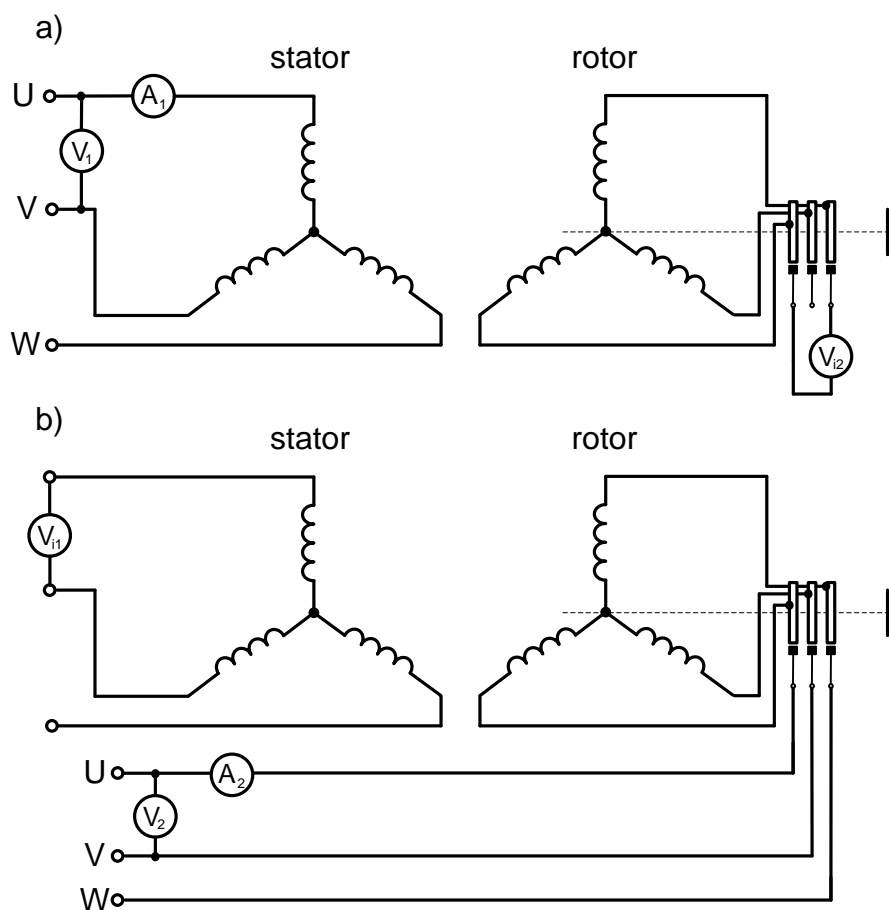


Obr. 5 - Měření odporů vinutého rotoru

3.3.2 Měření převodu

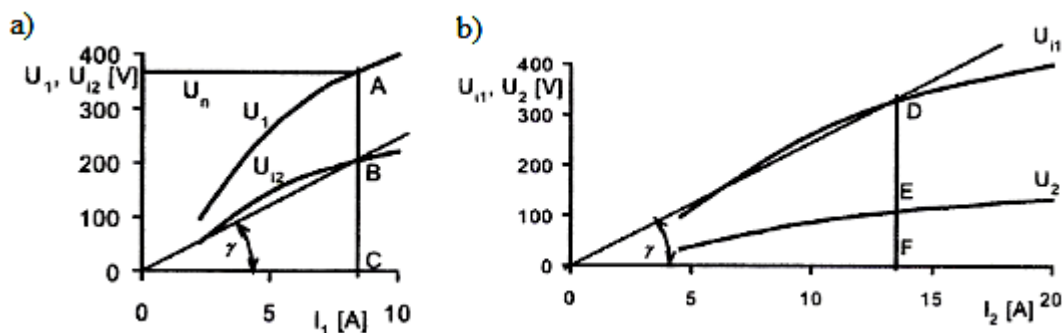
Převodem se rozumí poměr indukovaných napětí statoru a rotoru. Indukované napětí se může od svorkového napětí, které můžeme měřit podstatně lišit. Musí se uvažovat úbytek na rozptylové reaktanci, která je nezanedbatelná vlivem vzduchové mezery. Hlavní reaktance X_h je relativně malá a musíme uvažovat vliv sycení železa. Pro jmenovité napájecí napětí, tj. pro jmenovité sycení se určí převod stroje k . Převod u strojů s kroužkovou kotvou lze stanovit dle postupu:

Nejdříve se napájí stator a měří se indukované napětí do rotoru. Poté se naopak napájí rotor a měří se indukované napětí indukované do statoru. Rotor musí být zabrzděn jako při měření nakrátko, protože stroj by se mohl začít otáčet při vyšších hodnotách napětí. To by mohlo způsobit pokles indukovaného napětí a frekvence.



Obr. 6 - Měření převodu: a) napájení statoru, b) napájení rotoru

Výsledkem měření jsou křivky:



Obr. 7 - Průběhy napětí a indukovaných napětí v závislosti na proudu pro:
a) napájený stator, b) napájený rotor [1]

Pro jmenovité napětí při napájení statoru se určí vnitřní indukované napětí rotoru (představuje jej bod B na obrázku). Směrnice přímky, spojující počátek a tento bod B, můžeme vyjádřit vztahem:

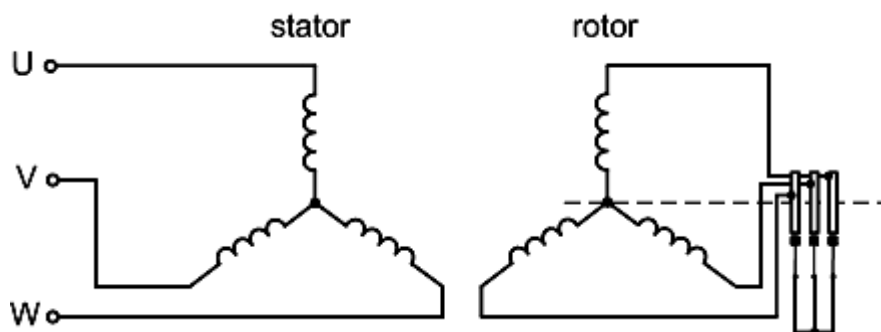
$$\operatorname{tg} \gamma \approx \frac{U_{i2}}{I_1} = X_{12} \quad (3.1)$$

Při měření z opačné strany musí být stejná vzájemná reaktance, lze dále postupovat následujícím způsobem. Ve stejném měřítku nakreslíme druhý graf a zakreslíme do něj přímku procházející počátkem a svírající shodný úhel γ s proudovou osou. Průsečík s indukovaným napětím do statoru U_{i1} je označen bodem D. V tomto bodě je shodné sycení, jako když je napájen stator. Tímto jsme získali indukovaná napětí příslušná stejnému sycení. Převod stroje dostaneme ze vztahu:

$$k = \frac{U_{i1}}{U_{i2}} = \frac{DF}{BC} \quad (3.2)$$

Tato kapitola byla vypracována dle literatury [1].

3.3.3 Měření naprázdno



Obr. 8 - Asynchronní stroj při měření naprázdno

Měření naprázdno se zpravidla dělá v motorickém chodu samostatného stroje, který nemá hřídel spojenou mechanicky s jiným zařízením. Stroj před měřením by se měl nechat běžet 30 až 60 minut při jmenovitých otáčkách, aby se ustálila teplota kluzných ložisek. Statorové vinutí napájíme U_{1n} a f_{1n} , rotor je spojen nakrátko (motor s vinutou kotvou musí mít rotorové vinutí spojeno nakrátko krátkospojovačem). Motor se tedy točí bez zatížení téměř synchronní rychlostí, tzn. skluz je velmi malý. Po skončení rozběhu odebírá ze sítě malý příkon, který kryje ztráty naprázdno ΔP_0 , které jsou dány vztahem:

$$\Delta P_0 = \Delta P_{Fe} + \Delta P_m + \Delta P_{j0} \quad (3.3)$$

kde ΔP_{Fe} jsou ztráty v železe magnetického obvodu,

ΔP_m jsou ztráty mechanické,

ΔP_{j0} jsou Jouleovy ztráty způsobené proudem naprázdno.

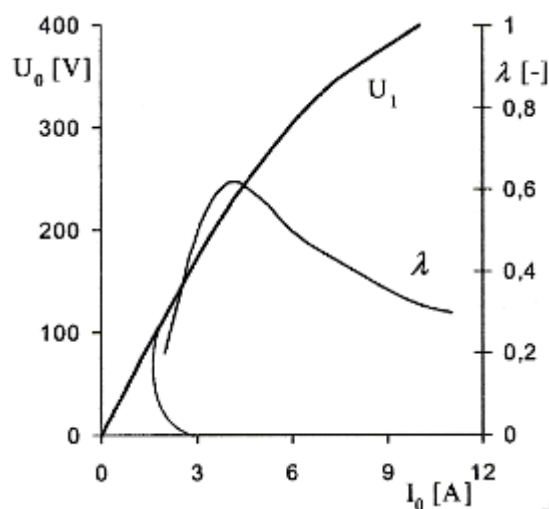
ΔP_{j0} jsou dány součtem Jouleových ztrát vinutí statoru a rotoru, tedy:

$$\Delta P_{j0} = \Delta P_{j10} + \Delta P_{j20} \quad (3.4)$$

Účinník při naprázdno bývá dosti malý $\cos \varphi_0 = 0,1$ až $0,25$, protože magnetizační (jalová) složka bývá 5 krát až 10 krát větší než činná.

Charakteristika naprázdno

Účelem měření naprázdno je změřit závislosti $U = f(I_0)$, $\Delta P_0 = f(U)$, $\cos \varphi_0 = f(I_0)$. Dále je možno určit I_0 a ΔP_0 při U_{1n} a f_{1n} pro kružnicový diagram.

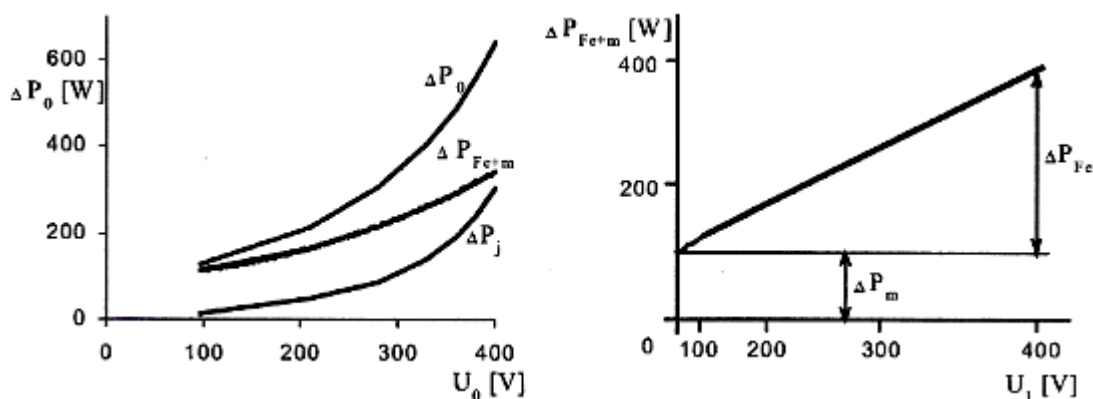


Obr. 9 - Charakteristika naprázdno - závislost indukovaného napětí a účinníku na budícím proudu [1]

Ztráty ΔP_0 je možno rozdělit na ΔP_m a ΔP_{Fe} . Když od změřených ztrát naprázdno ΔP_0 odečteme vypočtené Jouleovy ztráty ΔP_{j0} obdržíme společně ztráty mechanické a ztráty v železe magnetického obvodu:

$$\Delta P_0 - \Delta P_{j0} = \Delta P_m + \Delta P_{Fe} \quad (3.5)$$

Když pro znázornění součtu $\Delta P_m + \Delta P_{Fe}$ použijeme kvadratickou stupnici napětí závislost $\Delta P_m + \Delta P_{Fe} = f(U^2)$ se zobrazí jako přímka. Průsečík s osou ztrát získáme extrapolací do nulového napětí a tato hodnota odpovídá ztrátám mechanickým.

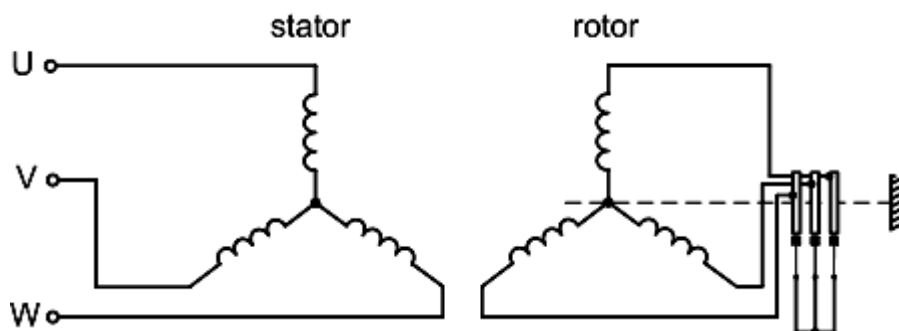


Obr. 10 - Průběh jednotlivých složek ztrát naprázdno a určení mechanických ztrát [1]

Zkoušence připojíme ke zdroji proměnného napětí a obvykle měříme v rozsahu napájecího napětí 1,3 až 0,3 U_n . Měření nutno provádět při konstantní rychlosti stroje. Měly by se měřit otáčky stroje a při skluzu kolem 1% se doporučuje měření ukončit.

Každá fáze se doporučuje osadit shodnými měřicími přístroji, protože je důležitá symetrie napájecího zdroje. Nedoporučuje se používat měřicích transformátorů napětí (MTN) díky jejich fázové chybě při malém $\cos \varphi_0$. [1], [2], [3], [4]

3.3.4 Měření nakrátko



Obr. 11 - Asynchronní stroj při měření nakrátko, kde rotor je mechanicky zablokován

Chod nakrátko asynchronního stroje je ustálený stav poměrů ve statorovém vinutí, při rotoru spojeném nakrátko ($U_2 = 0$) a mechanicky zabrzděném ($n = 0$, $s = 1$), kdy stator je nepájen ze sítě.

Přechodný stav nastane při připojení rotoru nakrátko k síti. Pokud se asynchronní motory s kotvou nakrátko rozbíhají, jsou hodnoty proudu nakrátko I_K a momentu nakrátko M_K totožné s hodnotami záběrnými I_z a M_z . U kroužkových asynchronních motorů jsou hodnoty nakrátko rozdílné od záběrných ($I_z < I_K$, $M_K < M_z$) vlivem přídavného odporu spouštěče v rotoru.

Pro proud v chodu nakrátko ($U_2 = 0$, $s = 1$) dostaneme:

$$I_{1K} \cong \frac{U_1}{R_{1K} + jX_{1K}} \quad (3.6)$$

kde:

$$R_{1K} = R_1 + R_2', \quad X_{1K} = X_{1\sigma} + X_{2\sigma}' \quad (3.7)$$

Záběrný proud při jmenovitém napětí se určí z rovnice:

$$I_{1z} = \frac{U_{1n}}{Z_{1K}} \quad (3.8)$$

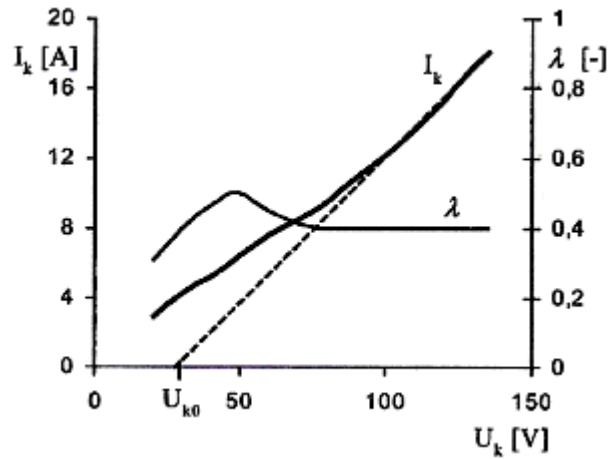
Záběrný proud I_{1z} může být i $8I_{1n}$. Měření při vyšších proudech než jsou jmenovité je vždy nebezpečné pro zkoušený stroj. Jouleovy ztráty v obou vinutích jsou ve stavu nakrátko až padesátkrát větší než při jmenovitém zatížení, tudíž teplota vinutí velmi rychle stoupá. Měřit se musí velmi rychle, aby nedošlo ke zničení vinutí stroje a naměřené výsledky nebyly zkresleny ohřevem vinutí.

Charakteristika nakrátko

Z měření nakrátko se určuje charakteristika nakrátko $I_K = f(U_K)$, průběh ztrát nakrátko $\Delta P_K = f(U_K)$ a účinníku nakrátko $\cos \varphi_K = f(U_K)$.

Měření nakrátko je podobné s měřením naprázdno, akorát s tím rozdílem, že rotor se mechanicky zabrzdí. Mechanická energie není dodávána ani odebírána při zkoušce nakrátko, tudíž se veškerý příkon odebíraný ze sítě spotřebuje na krytí ztrát, které se promění v teplo.

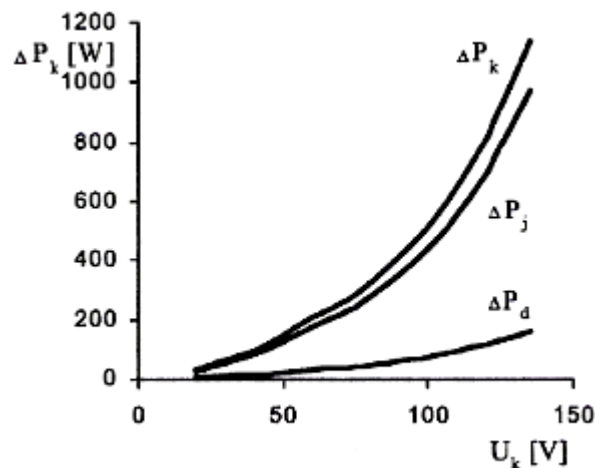
Charakteristika nakrátko by teoreticky měla být přímková, protože železo není syceno a hlavní tok neexistuje. Ve skutečnosti se o přímku nejedná, charakteristika se několikrát ohýbá vlivem nasycování jednotlivých částí železa a derivace charakteristiky nakrátko se neustále zvětšuje.

Obr. 12 - Charakteristika nakrátko a způsob určení napětí U_{K0} [1]

Proud nakrátko pro jmenovité napětí dostaneme, když použijeme lineární extrapolaci:

$$I_{Kn} = \frac{U_n - U_{K0}}{U_K - U_{K0}} \cdot I_K \quad (3.9)$$

O účinníku nakrátko $\cos \varphi_k$ se předpokládá, že se mění jen nepatrně a pro přepočet na jmenovité napětí uvažujeme, že je konstantní, obvykle menší než 0,5. Ve skutečnosti je účinník značně závislý na teplotách vinutí.



Obr. 13 - Průběh ztrát nakrátko [1]

Ztráty nakrátko jsou dány vztahem

$$\Delta P_K = \Delta P_{jK} + \Delta P_d \quad (3.10)$$

kde ΔP_{jK} jsou ztráty Jouleovy ve vinutí nakrátko,

ΔP_d jsou ztráty deformační.

Uvažujeme jen ztráty v železe v zubové vrstvě, které je syceno rozptylovými toky. Ostatní ztráty v železe se zanedbávají. Jouleovy ztráty ve vinutí nakrátko se určí z převodu k a ze známých odporů vinutí:

$$\Delta P_{jK} = \frac{3}{2} (R_1 + k^2 R_2) I_1^2 \quad (3.11)$$

Když od celkových ztrát odečteme ztráty Jouleovy, dostaneme ztráty přídavné:

$$\Delta P_d = \Delta P_K - \Delta P_{jK} - \Delta P_{FeUk} \quad (3.12)$$

kde ΔP_{FeUk} jsou ztráty v železe v zubové vrstvě odpovídající napětí U_K . [1], [2], [3], [4]

3.4 Měření momentu setrvačnosti metodou přídavného setrvačnicku

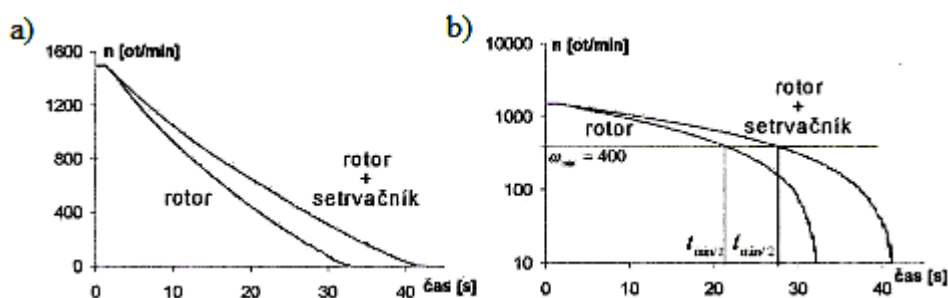
Určení momentu setrvačnosti metodou přídavného setrvačnicku spočívá v tom, že změří doběh nezatíženého motoru, poté se nasadí na hřídel setrvačnick se známým momentem setrvačnosti a změří se znovu doběh motoru. Z doběhových charakteristik a známého momentu setrvačnosti se dá dopočíst moment setrvačnosti zkoušenice.

Vztah pro výpočet neznámého momentu setrvačnosti:

$$J = J_S \frac{t_{min/1}}{t_{min/2} - t_{min/1}} \quad (3.13)$$

kde J_S je moment setrvačnosti přídavného setrvačnicku.

Index 1 je pro doběh bez setrvačnicku, 2 pro doběh se setrvačnickem. Z doběhových charakteristik stačí odečíst časy minimálních otáček pro stejnou ω_{min} . Tření o vzduch setrvačnicku se zanedbává. [1]



Obr. 14 - Doběhové charakteristiky bez setrvačnicku a se setrvačnickem:
a) v normálních, b) v semilogaritmických souřadnicích [1]

3.5 Naměřené hodnoty

3.5.1 Měření odporu vinutí

Slouží k určení odporu statorového a rotorového vinutí. Měřeno bylo Ohmovo metodou dle kapitoly 3.3.1.

Měření odporu vinutí statoru:

Tabulka 1 - Měření odporu vinutí statoru

U [V]	0,66	1,29	1,98	2,51
I [A]	0,2	0,4	0,6	0,8
R [Ω]	3,3	3,225	3,3	3,138
R₁ [Ω]	3,24			

Měření odporu vinutí rotoru:

Tabulka 2 - Měření odporu vinutí rotoru

U [V]	0,083	0,1648	0,2442	0,3248
I [A]	0,2	0,4	0,6	0,8
R [Ω]	0,415	0,412	0,407	0,406
R₂ [Ω]	0,41			

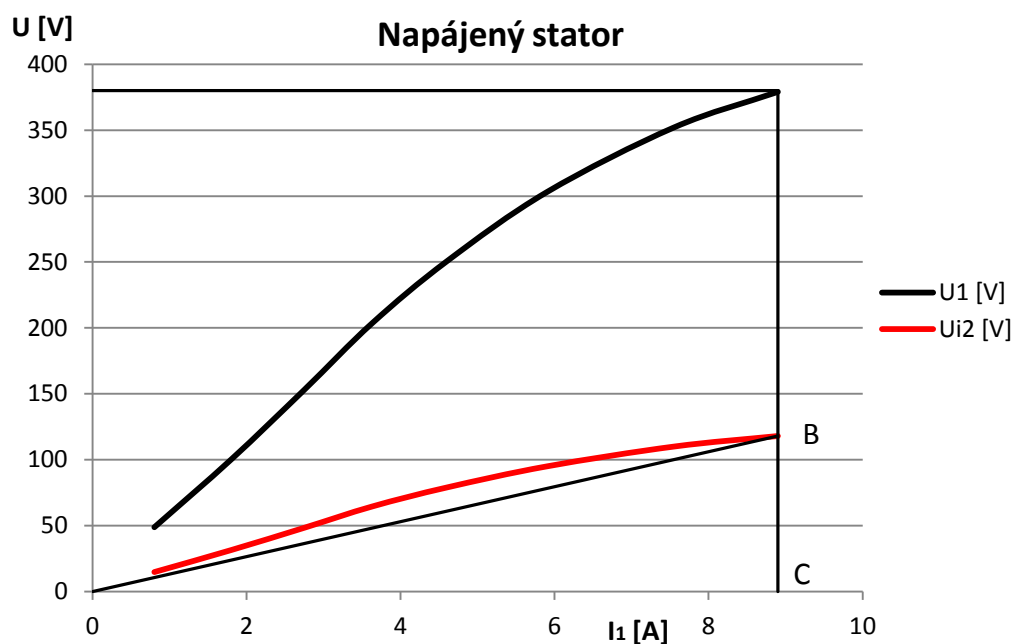
3.5.2 Měření převodu

Měření bylo provedeno dle kapitoly 3.3.2.

Napájený stator:

Tabulka 3 - Měření převodu - napájený stator

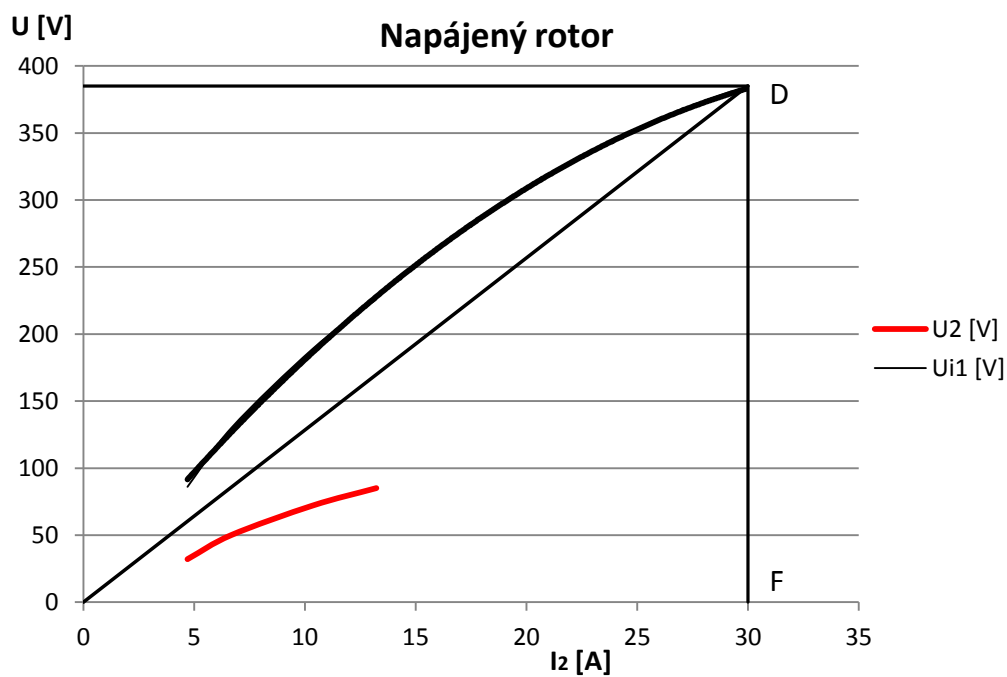
I₁ [A]	0,8	1,8	2,75	3,63	4,6	5,9	7,55	8,9
U₁ [V]	48,7	100	153	204	251	303	352	379
U_{i2} [V]	14,9	31,6	48,5	64,6	79	95	110	118



Napájený rotor:

Tabulka 4 - Měření převodu - napájený rotor

I_2 [A]	4,7	6,68	10,35	13,22
U_2 [V]	32	50	72	85
U_{i1} [V]	86	130	189	226



Z Grafů 1 a 2 dostaneme převod:

$$k = \frac{U_{i1}}{U_{i2}} = \frac{\overline{DF}}{\overline{BC}} = \frac{378,2}{118} = 3,2051 \quad (3.14)$$

jmenovitý převod je:

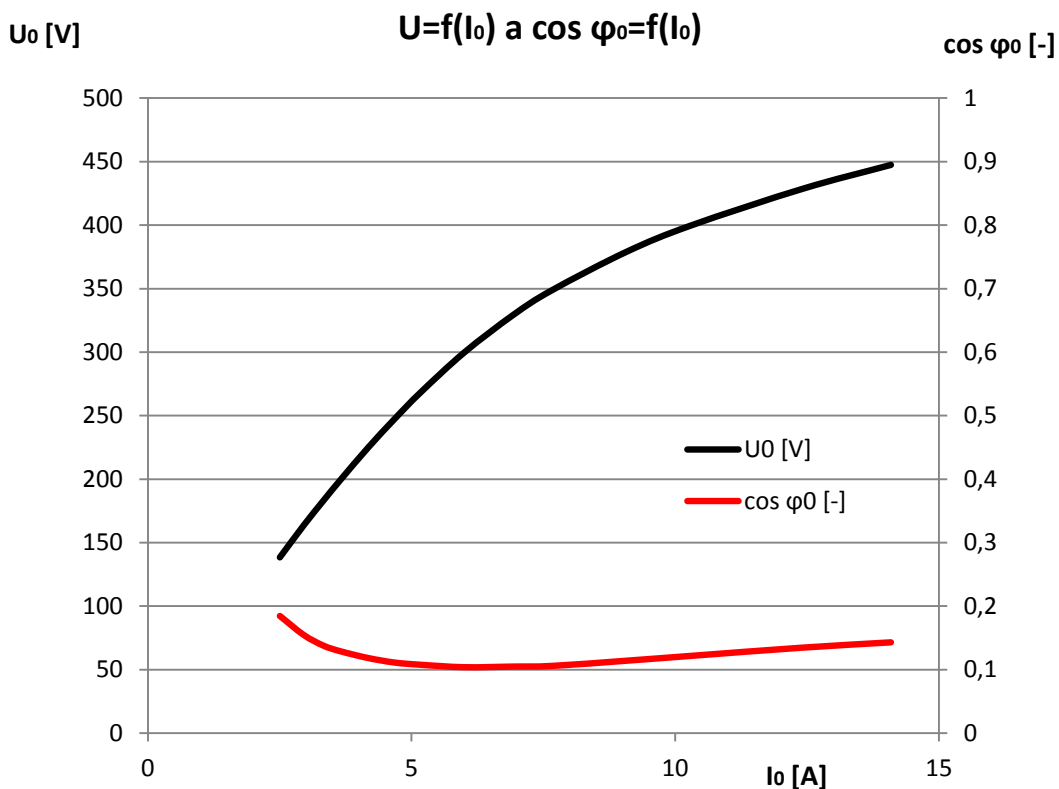
$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{380}{120} = 3,167 \quad (3.15)$$

3.5.3 Měření naprázdno

Slouží k určení hlavní indukčnosti. Měření bylo provedeno dle kapitoly 3.3.3. Měřilo se pomocí Třífázového analyzátoru výkonu, model DW-6092, který umožňuje zaznamenávat napětí, proudy, činné, jalové a zdánlivé výkony, účinník a to ve stejném časovém okamžiku. Naměřené hodnoty naprázdno jsou uvedeny v *Tabulce 5*.

Tabulka 5 - Naměřené hodnoty naprázdno

U_{UV} [V]	U_{VW} [V]	U_{UW} [V]	U_0 [V]	I_U [A]	I_V [A]	I_W [A]	I_0 [A]	P_0 [W]	S_0 [kVA]	$\cos \varphi_0$ [-]
443,2	455,3	443,7	447,4	14,28	13,95	14,04	14,09	1566	10,94	0,1431
424,7	436	425,3	428,7	12,61	12,27	12,39	12,42	1244	9,224	0,1349
397,2	405,6	396,6	399,8	10,47	10,18	10,27	10,31	870	7,137	0,1219
377,4	383,5	376,2	379,0	9,21	8,97	9,06	9,08	681	5,962	0,1142
348,4	352	345,3	348,6	7,76	7,57	7,64	7,66	490	4,622	0,1060
330,2	331,9	325,8	329,3	7,02	6,85	6,92	6,93	415	3,953	0,1049
302,1	300,9	296	299,7	6,07	5,95	5,98	6,00	324	3,115	0,1040
270,9	269	264,5	268,1	5,22	5,13	5,16	5,17	259	2,401	0,1079
249,8	248,4	243,5	247,2	4,72	4,65	4,66	4,68	223	2,003	0,1113
227,4	226	221,3	224,9	4,22	4,15	4,17	4,18	193	1,63	0,1184
201,5	200,7	196	199,4	3,68	3,63	3,65	3,65	163	1,263	0,1291
184,9	184,5	179,7	183,0	3,35	3,31	3,33	3,33	146	1,058	0,1380
165,6	164,9	160,3	163,6	2,97	2,94	2,96	2,96	130	0,84	0,1548
141	139,5	134,5	138,3	2,52	2,49	2,5	2,50	111	0,601	0,1847

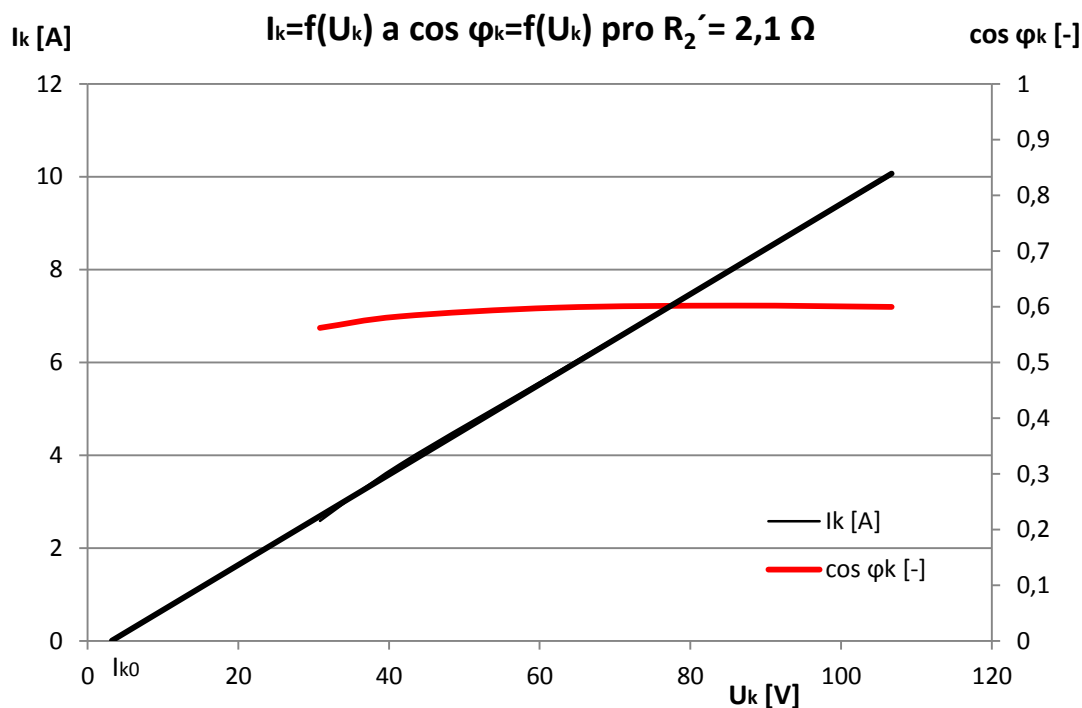


3.5.4 Měření nakrátko

Slouží k určení rozptylové indukčnosti statorového a rotorového vinutí. Měřilo se opět trojfázovým analyzátozem výkonu. Měření bylo provedeno dle postupu v kapitole 3.3.4. Naměřené hodnoty nakrátko jsou v *Tabulce 6*.

Tabulka 6 - Naměřené hodnoty nakrátko

U_{UV} [V]	U_{VW} [V]	U_{UW} [V]	U_K [V]	I_U [A]	I_V [A]	I_W [A]	I_K [A]	P_K [W]	S_K [VA]	$\cos \varphi_k$ [-]	I_2 [A]
109,2	108,1	102,8	106,70	10,09	10,05	9,98	10,04	1121	1870	0,5995	26,4
89,2	86,3	82,1	85,87	8,07	8,06	7,99	8,04	733	1218	0,6018	21,2
66,1	62,3	58,4	62,27	5,81	5,81	5,75	5,79	384	642	0,5981	15,2
43,6	36,8	43,9	41,43	3,81	3,84	3,78	3,81	166	285	0,5825	9,98
28,5	27,9	36,1	30,83	2,6	2,62	2,55	2,59	77	137	0,5620	6,7

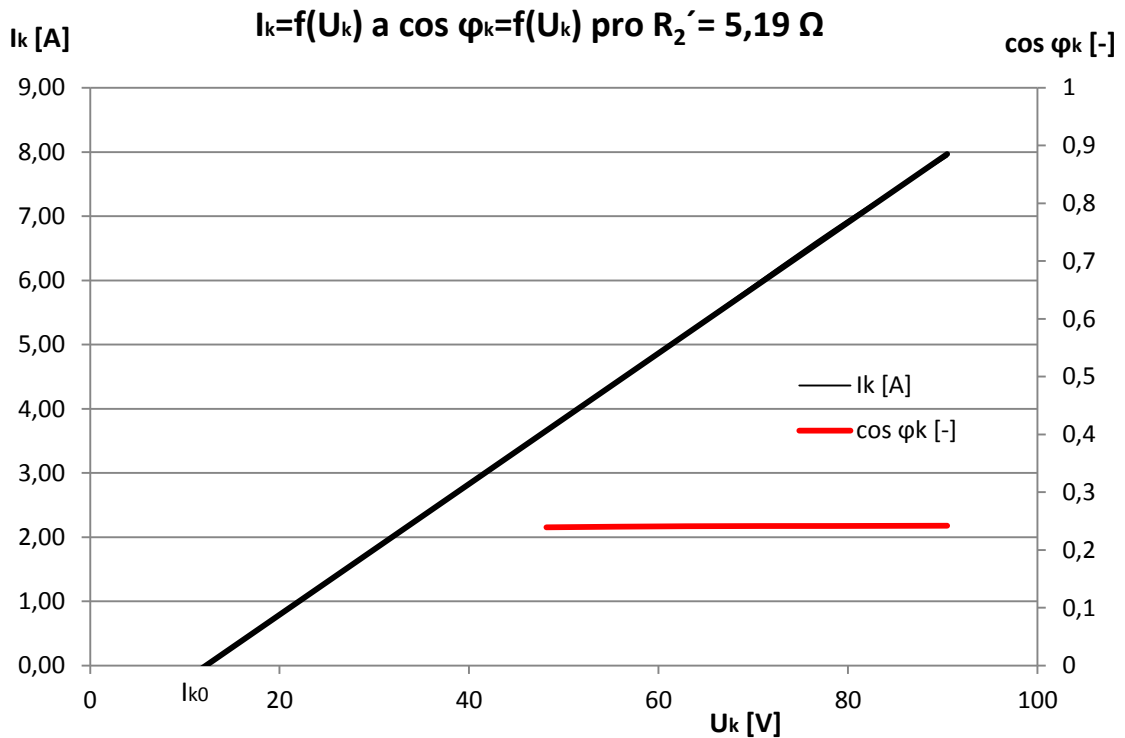


Graf 4 - Charakteristika a účinník nakrátko pro $R_2' = 2,1 \Omega$

Dále byla provedena úprava odporu v obvodu rotoru, kde byl do každé fáze přidán odpor o hodnotě $0,3 \Omega$ a znova provedeno měření nakrátko.

Tabulka 7 – Naměřené hodnoty nakrátko s úpravou odporu rotoru

U_{UV} [V]	U_{VW} [V]	U_{UW} [V]	U_k [V]	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	I_k [A]	P_k [W]	S_k [VA]	$\cos \varphi_k$ [-]	I_r [A]
90,49	90,42	90,47	90,46	7,97	7,9	7,94	7,93	521	2152	0,2421	19,6
77,66	77,59	77,64	77,63	6,86	6,81	6,85	6,84	385	1593	0,2417	16,9
62,49	62,42	62,44	62,45	5,27	5,19	5,2	5,22	236	978	0,2413	12,8
48,21	48,14	48,16	48,17	3,69	3,61	3,62	3,64	126	526	0,2395	8,7



Graf 5 – Charakteristika a účinník nakrátko pro $R_2' = 5,19 \Omega$

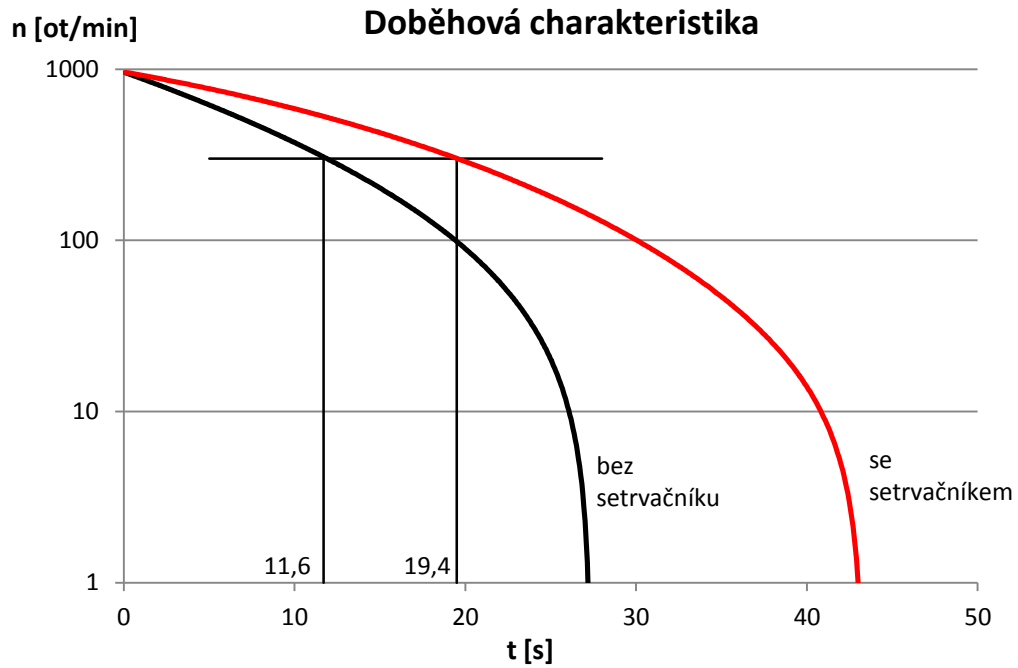
3.5.5 Měření momentu setrvačnosti

Měření bylo provedeno metodou přídavného setrvačnicku, kdy se změří doběh nezatíženého stroje a doběh stroje zatíženého známým momentem setrvačnosti. Měření otáčivé rychlosti bylo realizováno pomocí tachodynamu, které bylo připojeno na digitální osciloskop, kde byla zobrazena doběhová charakteristika a umožnilo se tabelárnímu záznamu dat pro přenos na externí záznamové zařízení.

Moment setrvačnosti přídavného setrvačnicku $J_R = 0,0695 \text{ Kg. m. s}^{-2}$.

Z toho dostaneme moment setrvačnosti uvažovaného stroje:

$$J = J_S \frac{t_{min/1}}{t_{min/2} - t_{min/1}} = 0,0695 \frac{11,6}{19,4 - 11,6} = 0,103 \text{ Kg. m. s}^{-2} \quad (3.16)$$



Graf 6 - Doběhová charakteristika bez setrvačnicku, se setrvačnickem

3.6 Dopočtené hodnoty

Cílem je získat všechny vstupní parametry do matematického modelu měřením a výpočtem, pracuje se tudíž s konkrétními hodnotami. V modelu se pracuje s fázovými, efektivními hodnotami. Je nutný přepočtení na tyto hodnoty.

Z měření naprázdno:

sružené efektivní napětí naprázdno:

$$U_{s0} = 379,03 \text{ V} \quad (3.17)$$

přepočtení na fázovou hodnotu:

$$U_0 = \frac{U_{s0}}{\sqrt{3}} = \frac{379,03}{\sqrt{3}} = 218,833 \text{ V} \quad (3.18)$$

fázový proud naprázdno:

$$I_0 = 9,08 \text{ A} \quad (3.19)$$

a účinník naprázdno:

$$\cos \varphi_0 = 0,11422 \quad (3.20)$$

Z měření nakrátko:

sružené efektivní napětí naprázdno:

$$U_{sK} = 378,2 \text{ V} \quad (3.21)$$

přepočet na fázovou hodnotu:

$$U_K = \frac{U_{sK}}{\sqrt{3}} = \frac{378,2}{\sqrt{3}} = 218,354 \text{ V} \quad (3.22)$$

fázový proud nakrátko:

$$I_K = 36,24 \text{ A} \quad (3.23)$$

a účinník nakrátko:

$$\cos \varphi_K = \frac{\Delta P_K \left(\frac{I_K}{I_{K_{nam}}} \right)^2}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_K} = \frac{1121 \left(\frac{36,24}{10,04} \right)^2}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 36,24} = 0,612 \quad (3.24)$$

Výpočet hlavní indukčnosti:

V tomto výpočtu se vyjde z měření naprázdno. Ve stavu naprázdno můžeme zanedbat úbytky napětí na statorovém, rotorovém vinutí a na rozptylových reaktancích. Počítá se s magnetizačním proudem:

$$I_\mu = I_0 \cdot \sin \varphi_0 = 9,08 \cdot \sin 83,44 = 9,02 \text{ A} \quad (3.25)$$

z toho magnetizační reaktance je:

$$X_\mu = \frac{U_0}{I_\mu} = \frac{218,833}{9,02} = 24,26 \ \Omega \quad (3.26)$$

pokud frekvence napájecího napětí je $f = 50 \text{ Hz}$, potom hlavní indukčnost je:

$$L_h = \frac{X_\mu}{2\pi f} = \frac{24,26}{2\pi 50} = 0,07722 \text{ H} \quad (3.27)$$

Výpočet rozptylových reaktancí:

Při výpočtu se vychází z měření nakrátko. Ve stavu nakrátko můžeme zanedbat příčnou větev náhradního schématu, tedy magnetizační reaktance a ztráty v železe. Uplatňují se především odpory vinutí statoru, rotoru a rozptylové reaktance.

Impedance nakrátko je:

$$Z_K = \frac{U_K}{I_K} = \frac{218,354}{36,24} = 6,025 \ \Omega \quad (3.28)$$

z toho rozptylová reaktance je:

$$X_\sigma = Z_K \cdot \sin \varphi_K = 6,025 \cdot \sin 52,26 = 4,765 \ \Omega \quad (3.29)$$

a pokud frekvence napájecího napětí je $f = 50 \text{ Hz}$, potom rozptylová indukčnost je:

$$L_\sigma = \frac{1}{2} \frac{X_\sigma}{2\pi f} = \frac{1}{2} \frac{4,765}{2\pi 50} = 0,007584 \text{ H} \quad (3.30)$$

Rozptylová reaktance statoru a rotoru je:

$$L_S = L_R = L_h + L_\sigma = 0,07722 + 0,007584 = 0,084804 \text{ H} \quad (3.31)$$

Výpočet odporů:

Pomocí Ohmovy metody byl změřen odpor dvou vinutí v sérii. Musí se přepočíst na odpor jedné fáze. Naměřený odpor vinutí rotoru R_2 se musí přepočíst na odpor jedné fáze a vinutí statoru R_2' , aby bylo dodrženo náhradní schéma T - tvaru, které je na *Obr. 3*.

Výpočet odporu jedné fáze statorového vinutí:

$$R_1 = \frac{R_{1 \text{ nam}}}{2} = \frac{3,24}{2} = 1,62 \text{ } \Omega \quad (3.32)$$

Výpočet odporu jedné fáze rotorového vinutí přepočtený na stranu vinutí statoru:

$$R_2' = \frac{R_{2 \text{ nam}}}{2} k^2 = \frac{0,41}{2} 3,2051^2 = 2,106 \text{ } \Omega \quad (3.33)$$

Ověření R_2' výpočtem z měření nakrátko:

$$R_2' = \frac{\Delta P_K}{3I_K^2} - R_1 = \frac{1121}{3 \cdot 10,04^2} - 1,62 = 2,089 \text{ } \Omega \quad (3.34)$$

Odpor jedné fáze rotorového vinutí přepočtený na stranu vinutí statoru se změnou odporu v obvodu rotoru je:

$$R_2' = (R_2 + R_{\text{přidaný}}) \cdot k^2 = (0,205 + 0,3) \cdot 3,2051^2 = 5,19 \text{ } \Omega \quad (3.35)$$

4 Kružnicový diagram

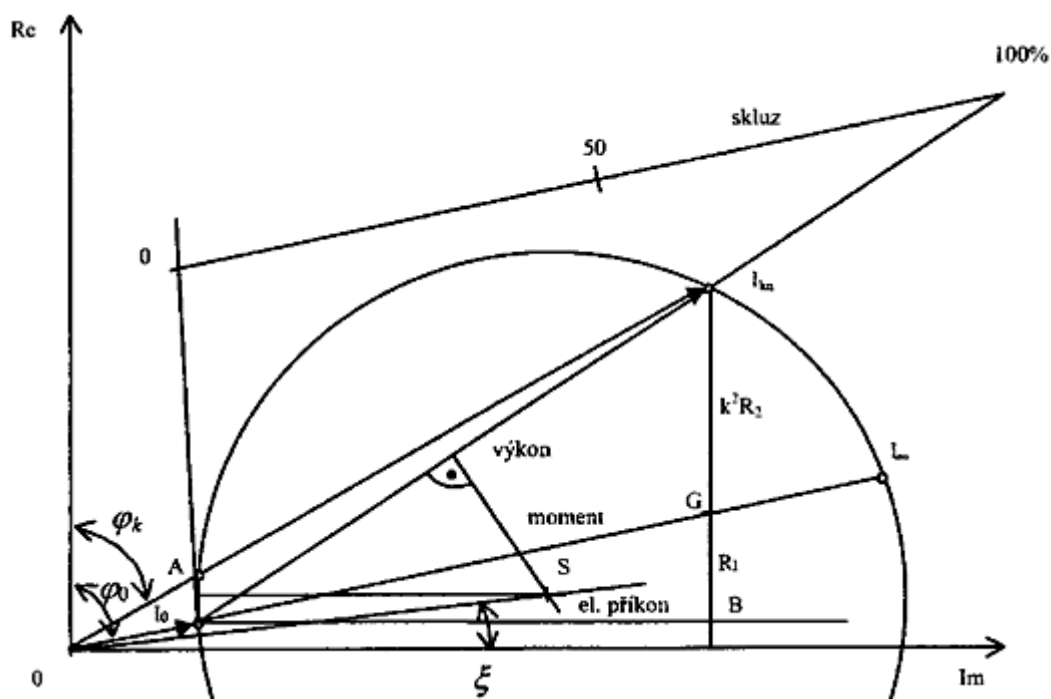
4.1 Úvod

Pro konstrukci kružnicového diagramu postačují výsledky ze dvou měření, naprázdno a nakrátko nebo také hodnoty z návrhu stroje. Tyto měření nejsou náročné, nevyžadují mnoho času a energie. Výsledky získané z kružnicového diagramu se jen málo liší od naměřených, přičemž platnost je zpravidla plně postačující. Platnost kružnicového diagramu je omezena předpokladem, že odpory a reaktance musí být pro všechny skluzy konstantní. Tato podmínka je přibližně spojena jen u asynchronních motorů s kotvou kroužkovou (vinutou) a u motorů s jednoduchou klecí nakrátko s tyčemi kruhového průřezu. U motorů nakrátko s vírovou nebo dvojitou klecí se o kružnici nejedná (jde o vyšší křivky). Kruhový je jen pro malé (kladné i záporné) skluzy, protože parametry $R_2'(s)$ a $X_{2\sigma}'(s)$ se při malých skluzech příliš nemění. Pro větší skluzy se diagram od kružnice podstatně liší. [1],[9]

4.2 Konstrukce kružnicového diagramu

Dle literatury [1] a [9] lze popsat konstrukci kružnicového diagramu:

1. Zvolíme měřítko proudu m_I [$A \cdot mm^{-1}$]
2. Zakreslíme reálnou (svislou) a imaginární (vodorovnou) osu.
3. V měřítku zakreslíme fázory proudů I_0 a I_{K_n} , které svírají s reálnou osou úhly φ_0 a φ_K .
4. Uděláme spojnicí koncových bodů fázorů proudu I_0 a I_{K_n} , v jejím středu zkonstruujeme kolmici, na které leží střed kružnice. Dále z koncového bodu fázoru proudu I_0 nakreslíme rovnoběžku s reálnou osou do bodu A, kterým označíme průsečík této rovnoběžky s fázorem proudu I_{K_n} . Sestrojíme osu I_0A . Tato osa je rovnoběžná s imaginární osou a na průsečíku této osy a již dříve zkonstruované kolmice leží střed kružnice.



Obr. 15 - Konstrukce kružnicového diagramu [1]

5. Spojnicí bodů fázorů proudu I_0 a I_{K_n} nazveme přímkou výkonů.
6. Z bodu I_0 vedeme rovnoběžku s imaginární osou a nazveme jí přímkou příkonů.
7. Koncovým bodem fázoru I_{K_n} vedeme rovnoběžku s reálnou osou. Průsečíkem této rovnoběžky s přímkou příkonů je bod B. Úsečku mezi koncovým bodem fázoru I_{K_n} a bodem B rozdělíme v poměru odporů R_1 a R_2' , kde R_2' je v horní části a R_1 v dolní části. Spojnice vedená z koncového bodu fázoru I_0 s dělicím bodem G protne kružnici a nacházíme bod I_∞ . Tuto přímkou nazveme přímkou momentů.
8. Sestrojení stupnice skluzů. V koncovém bodě fázoru I_0 vedeme tečnu ke kružnici. V libovolné vzdálenosti nakreslíme rovnoběžku s přímkou momentů. Průsečík s tečnou a

prodlouženou přímkou výkonů určují skluzu 0 až 1 (nebo 0 až 100%). Stupnice je lineární. Nutno podotknout, že tato metoda je méně přesná pro malé skluzu.

9. Dopočtení měřítka výkonů

$$m_p = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot m_I [W \cdot mm^{-1}] \quad (4.1)$$

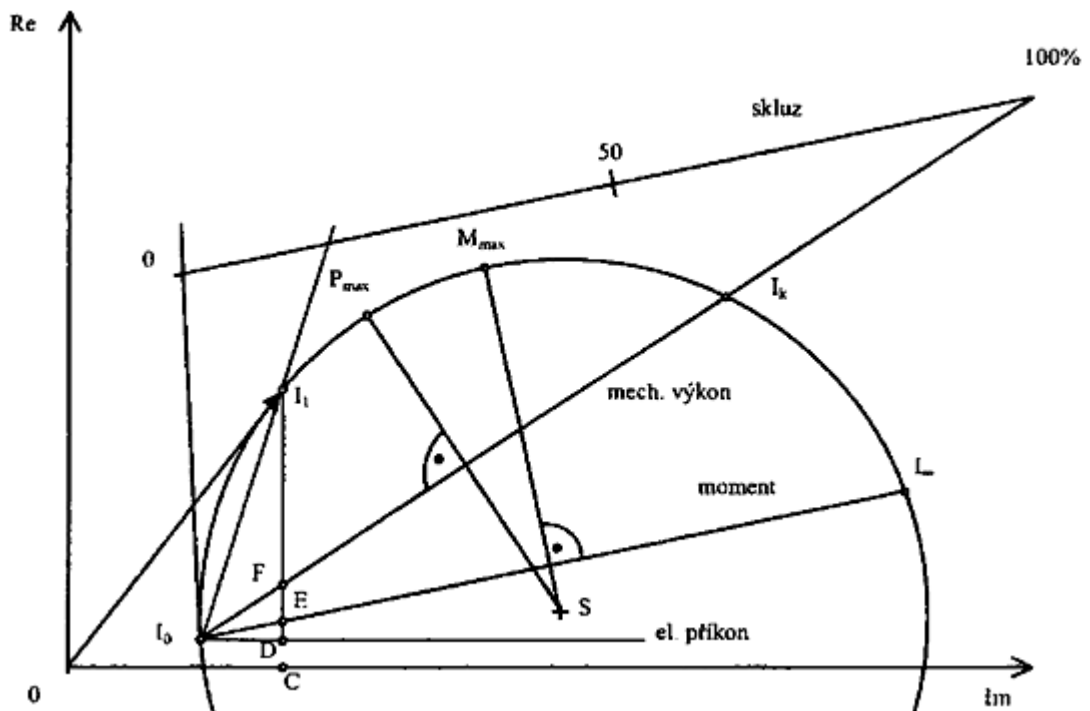
10. Dopočtení měřítka momentů

$$m_M = \frac{m_p}{\frac{\pi \cdot n_s}{30}} [Nm \cdot mm^{-1}] \quad (4.2)$$

4.3 Čtení v kružnicovém diagramu

Dle literatury [1] a [9] lze čtení hodnot v kruhovém diagramu popsat následovně: Pro zvolený pracovní bod s danou zátěží I_1 můžeme z kruhového diagramu odečíst:

1. Moment lze určit úsečkou $I_1 E \cdot m_M$.



Obr. 16 - Čtení hodnot v kružnicovém diagramu [1]

2. Proud je dán spojnicí $O I_1 \cdot m_I$.
3. Účinník $\cos \varphi$ je dán úhlem φ , který svírá fázor proudu I_1 s reálnou (svislou) osou.
4. Příkon lze určit úsečkou $I_1 C \cdot m_p$.
5. Výkon lze určit úsečkou $I_1 F \cdot m_p$.
6. Jouleovy ztráty statoru jsou dány úsečkou $D E \cdot m_p$.
7. Jouleovy ztráty rotoru jsou dány úsečkou $E F \cdot m_p$.
8. Ztráty naprázdno se určí jako $C D \cdot m_p$.

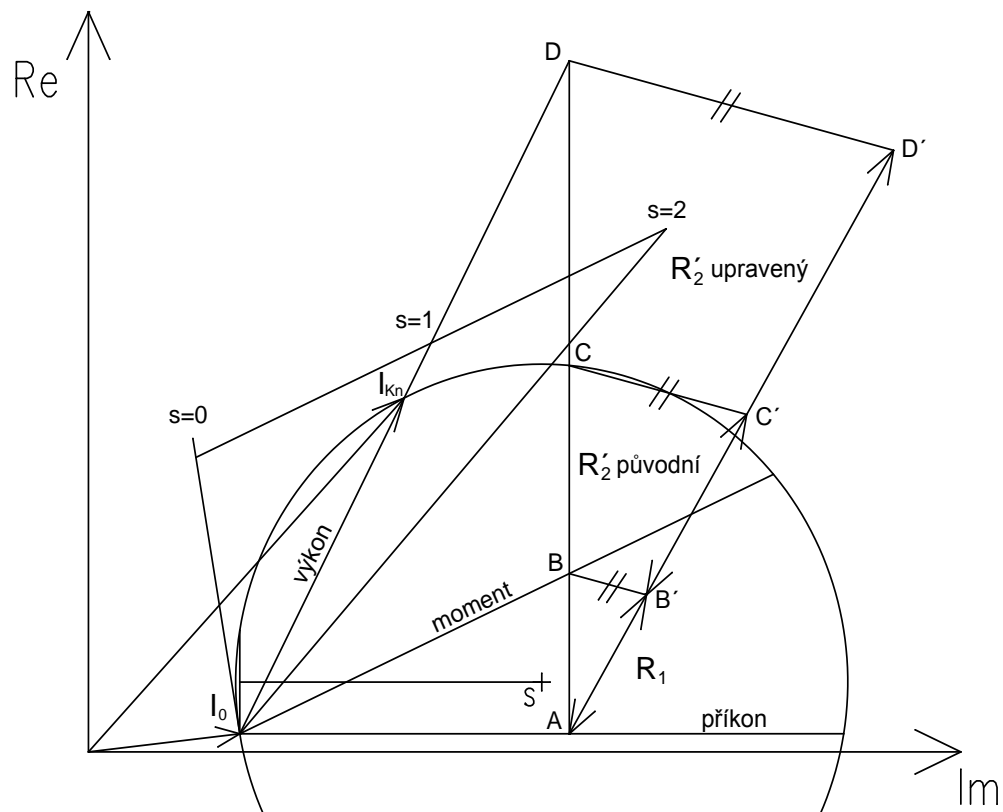
9. Skluz se určí prodloužením spojnice I_0I_1 , která protne přímkou skluzu.

Maximální moment M_{max} se určí z průsečíku kružnice a kolmice k přímce momentů. Maximální výkon P_{max} se určí z průsečíku kružnice a kolmice k přímce výkonů.

4.4 Grafická konstrukce kružnicového diagramu respektující změnu odporu rotorového obvodu

Pro stroj s vinutou kotvou lze popsat grafickou konstrukcí kružnicového diagramu s respektováním úpravy odporu v obvodu rotoru následovně:

1. Úsečku mezi body C a A rozdělíme v poměru odporů R_1 a R_2' *původní*.



Obr. 17 - Grafická konstrukce kružnicového diagramu respektující změnu odporu v obvodu rotoru

2. Z bodu A vedeme pod libovolným úhlem přímku, na kterou budeme vynášet původní a upravené hodnoty odporů. Na tuto přímku ve vhodném měřítku, například 1:1, vyneseme hodnotu odporu statorového vinutí R_1 , která odpovídá vzdálenosti AB' . Ve stejném měřítku z bodu B' vyneseme hodnotu odporu R_2' *původní*, která odpovídá vzdálenosti $B'C'$. Z bodu B' také vyneseme hodnotu odporu R_2' *upravený*, která je vzdáleností mezi body $B'D'$.

3. Spojíme body BB' , CC' a dostaneme dvě rovnoběžky. Z bodu D' vedeme třetí rovnoběžku. Bod D získáme průsečíkem třetí rovnoběžky a prodloužené přímky AC .
4. Úsečka BD odpovídá změněnému odporu v obvodu rotoru R_2' upravený.
5. Uděláme spojnicí koncového bodu fázoru proudu I_0 a bodu D . Tato úsečka k průsečíku s kružnicí udává přímku výkonů. Když z počátečního bodu vedeme přímku k průsečíku úsečky I_0D a kružnice dostaneme koncový bod fázoru proudu I_{Kn} .

5 Zhodnocení výsledků

V této kapitole jsou uvedeny hodnoty momentů a proudů získané z matematického modelu simulovaného v programu MATLAB Simulink a kružnicového diagramu pro dvě hodnoty odporu v obvodu rotoru. V obou případech byly zjištěny charakteristiky pro motorický režim (skluz 0 až 1) a také pro režim brzda (skluz 1 až 2).

5.1 Moment

Tvar křivek momentů z matematického modelu a kružnicového diagramu je podobný. Rozdíl je ale velikosti maximálních hodnot, které se liší o 11 %. Stejný rozdíl je také v hodnotách záběrného momentu pro $R_2' = 5,19 \Omega$. V případě záběrného momentu pro odpor $R_2' = 2,1 \Omega$ se hodnoty liší o 6,7 %.

Z grafů odečtené hodnoty pro:

Jmenovité otáčky ($s = 0,09$):

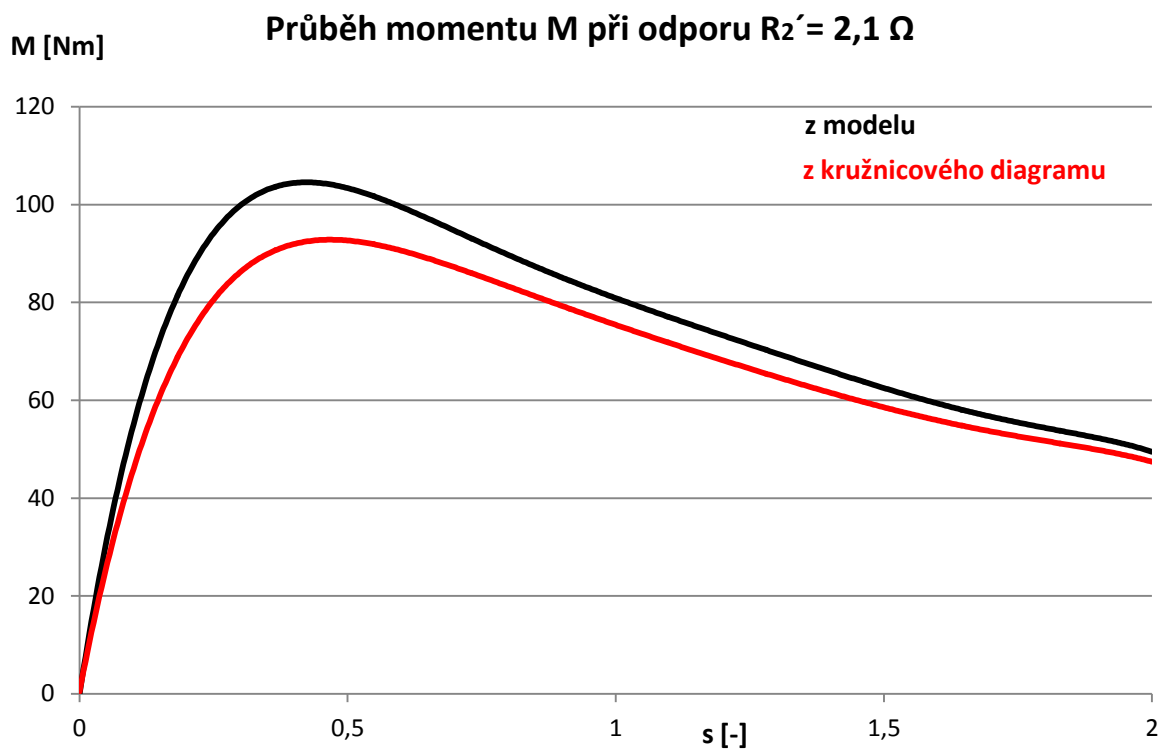
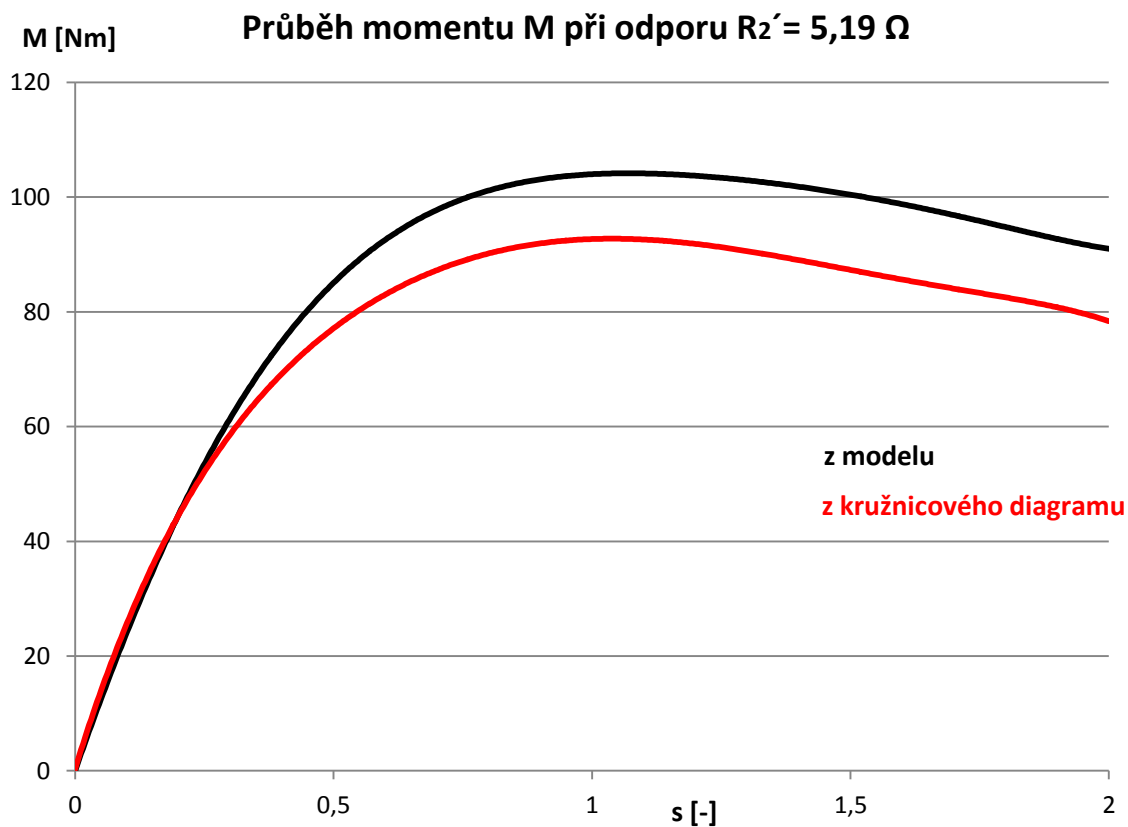
Tabulka 8 – Odečtené hodnoty pro jmenovité otáčky

Odpor rotoru	Moment z mat. modelu	Moment z kruž. diagramu	Jmenovitý moment
$R_2' = 2,1 \Omega$	$M = 50,7 \text{ Nm}$	$M = 42,8 \text{ Nm}$	$M_n = 31,5 \text{ Nm}$
$R_2' = 5,19 \Omega$	$M = 21,8 \text{ Nm}$	$M = 24 \text{ Nm}$	

Nulové otáčky ($s = 1$):

Tabulka 9 – Odečtené hodnoty pro nulové otáčky

Odpor rotoru	Záběrný moment z mat. modelu	Záběrný moment z kruž. diagramu
$R_2' = 2,1 \Omega$	$M_z = 80,8 \text{ Nm}$	$M_z = 75,4 \text{ Nm}$
$R_2' = 5,19 \Omega$	$M_z = 103,8 \text{ Nm}$	$M_z = 92,7 \text{ Nm}$

Graf 7 - Průběh momentu M při odporu $R_2' = 2,1 \Omega$ Graf 8 - Průběh momentu M při odporu $R_2' = 5,19 \Omega$

Maximální moment:

Tabulka 10 – Odečtené hodnoty pro maximální moment

Odpor rotoru	Max. moment z mat. modelu	Skuz zvratu z mat. modelu	Max. moment z kruž. diagramu	Skuz zvratu z kruž. diagramu
$R_2' = 2,1 \Omega$	$M_{\max} = 104,1 \text{ Nm}$	$s_{\max} = 0,43$	$M_{\max} = 92,9 \text{ Nm}$	$s_{\max} = 0,48$
$R_2' = 5,19 \Omega$	$M_{\max} = 104,4 \text{ Nm}$	$s_{\max} = 1,06$	$M_{\max} = 92,9 \text{ Nm}$	$s_{\max} = 1,03$

Pro jmenovité otáčky zvětšením ohmického odporu v obvodu rotoru se mění tvar momentové charakteristiky tak, že lineární pracovní část je méně strmá, takže zatěžovací charakteristika je měkčí. Skuz zvratu pro maximální moment je v obou případech takřka totožný. Při normálním odporu rotoru je skuz při maximálním momentu $s_{\max} = 0,43$. Přidáním odporu do obvodu rotoru bylo docíleno rozběhu skoro s maximálním momentem, který se zvýšil skoro o 20 %.

5.2 Proud

Tvary křivek průběhu proudu jsou podobné, liší se jen ve velikosti, zejména při rozběhu pro odpor $R_2' = 2,1 \Omega$, kdy je rozdíl mezi hodnotami 13 %. Pro jmenovité otáčky jsou získané hodnoty proudu takřka totožné.

Z grafů odečtené hodnoty pro:

Jmenovité otáčky ($s = 0,09$):

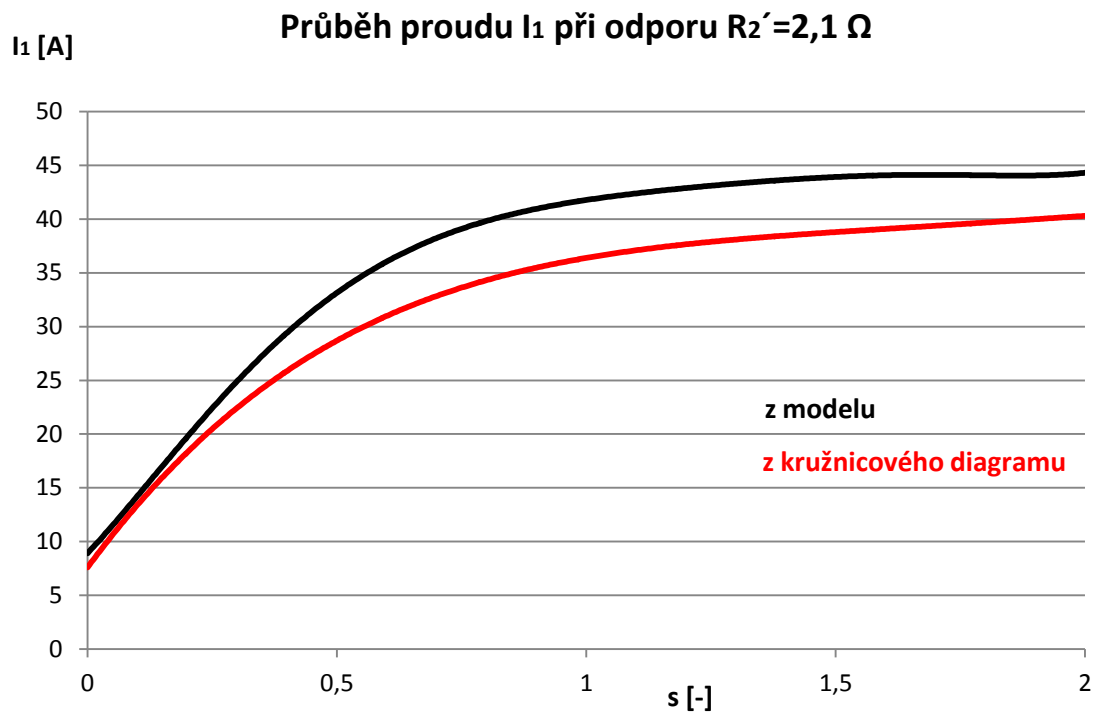
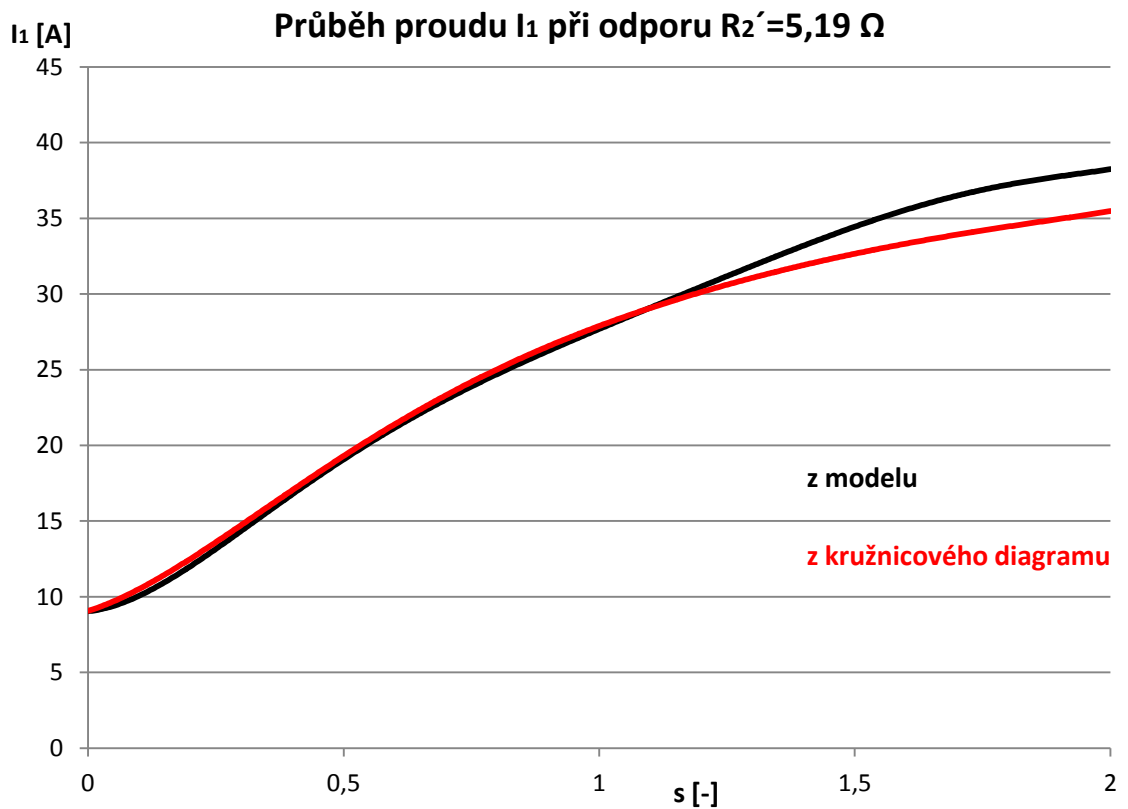
Tabulka 11 - Odečtené hodnoty pro jmenovité otáčky

Odpor rotoru	Proud z mat. modelu	Proud z kruž. diagramu	Jmenovitý proud
$R_2' = 2,1 \Omega$	$I = 13,7 \text{ A}$	$I = 12,9 \text{ A}$	$I_n = 10,8 \text{ A}$
$R_2' = 5,19 \Omega$	$I = 9,9 \text{ A}$	$I = 10,4$	

Nulové otáčky ($s = 1$):

Tabulka 12 - Odečtené hodnoty pro nulové otáčky

Odpor rotoru	Záběrný proud z mat. modelu	Záběrný proud z kruž. diagramu
$R_2' = 2,1 \Omega$	$I_z = 41,8 \text{ A}$	$I_z = 36,4 \text{ A}$
$R_2' = 5,19 \Omega$	$I_z = 27,7 \text{ A}$	$I_z = 27,9 \text{ A}$

Graf 9 - Průběh proudu I při odporu $R_2' = 2,1 \Omega$ Graf 10 - Průběh proudu I při odporu $R_2' = 5,19 \Omega$

Proudová přetížitelnost (proudový náraz na síť):

Tabulka 13 - Proudová přetížitelnost

Odpor rotoru	Proudová přetížitelnost z mat. modelu	Proudová přetížitelnost z kruž. diagramu
$R_2' = 2,1 \Omega$	$\frac{I_z}{I_n} = \frac{41,8}{10,8} = 3,87$	$\frac{I_z}{I_n} = \frac{36,4}{10,8} = 3,37$
$R_2' = 5,19 \Omega$	$\frac{I_z}{I_n} = \frac{27,7}{10,8} = 2,56$	$\frac{I_z}{I_n} = \frac{27,9}{10,8} = 2,58$

Pro jmenovité otáčky jsou získané hodnoty proudu z matematického modelu a kružnicového diagramu skoro totožné se jmenovitým proudem. Hodnoty záběrného proudu v případě odporu $R_2' = 2,1 \Omega$ se liší o 13 %, pro odpor $R_2' = 5,19 \Omega$ jsou skoro shodné. Zvětšením ohmického odporu v obvodu rotoru přibližně 2,5 krát se snížila hodnota záběrného proudu přibližně o 30 %, tím pádem o stejnou hodnotu klesl proudový náraz na síť při rozběhu stroje. V režimu brzda se při odporu $R_2' = 2,1 \Omega$ proud moc nezvyšoval, výraznější nárůst proudu byl při odporu $R_2' = 5,19 \Omega$.

Závěr

Cílem diplomové práce bylo vytvořit matematický model daného asynchronního motoru a porovnat průběhy momentu a proudu ze simulace se zjištěnými průběhy z grafické konstrukce kružnicového diagramu. Na motoru i modelu provést úpravu odporu v obvodu rotoru a ověřit platnost grafické úpravy R_2' kružnicového diagramu provedené v literatuře [9].

Tvary křivek zjištěného momentu a proudu mají přibližně stejný průběh, liší se ale v maximálních hodnotách momentu o 11 % a hodnotách záběrného proudu pro $R_2' = 2,1 \Omega$ o 13 %. Zvětšením odporu v obvodu rotoru se změkčí zatěžovací charakteristika, protože lineární pracovní část je méně strmá. Proud procházející přes rotorové vinutí klesl. Maximální moment se posune blíže ke skluzu blízcího se 1 a tím se docílí rozběhu s vyšším záběrným momentem. Sníží se proud odebíraný při spouštění stroje, tím pádem se sníží proudový náraz na síť při rozběhu. Při jmenovitých otáčkách spouštěcí odpory rotorového vinutí způsobí zvýšení ztrát. Zvýšení odporu rotorového vinutí se uplatní zejména při rozběhu, poté je potřeba odpory vyřadit a vinutí spojit nakrátko.

Ze zjištěných průběhů můžeme říci, že grafická úprava kružnicového diagramu respektující úpravu odporu rotoru pro asynchronní stroj s vinutou kotvou provedená v literatuře [9] je celkem přesný způsob řešení. Nutno poznamenat, že pro tvorbu matematického modelu jsou vzaty v úvahu určité zjednodušující předpoklady, které by ale neměly příliš ovlivnit přesnost modelu. Hodnoty získané z modelu ukazují ideální průběh těchto veličin. Konstrukce kružnicového diagramu platí pro konstantní hodnoty impedancí a odporů, ve skutečnosti jsou ale tyto veličiny funkcí napětí, proudu, skluzu.

Modelování je vhodné k simulování různých poruchových stavů, které můžou na stroji nastat a sledování chování výstupních veličin na změnu vstupní veličiny. Kružnicový diagram je vhodný k porovnávání parametrů různých strojů a u strojů, které se nedají pro svůj vysoký výkon zatížit.

Použitá literatura

- [1] BARTOŠ, Václav; SKALA, Bohumil.: *Měření na elektrických strojích*. Plzeň : ZČU, 2006. 109 s.
- [2] MĚŘIČKA, Jiří; HAMATA, Václav; VOŽENÍLEK, Petr.: *Elektrické stroje*. Praha : ČVUT, 2001. 311 s.
- [3] TRINKEWITZ, Zdeněk.: *Průmyslové zkoušky velkých elektrických strojů*. Praha : SNTL, 1981. 400 s.
- [4] BAŠTA, Jan; KULDA, Vojtěch; PAVLÁSEK, František.: *Měření na elektrických strojích: 4. Měření na indukčních strojích*. Praha : SNTL, 1962. 309 s.
- [5] KARBAN, Pavel.: *Výpočty a simulace v programech Matlab a Simulink*. Brno : Computer Press, 2006. 220 s.
- [6] KOZÁK, Štefan; KAJAN, Slavomír.: *MATLAB – SIMULINK 1*. Bratislava : STU, 1999. 126 s.
- [7] JAVŮREK, Jiří.: *Regulace moderních elektrických pohonů*. Praha : Grada Publishing, 2003. 264 s.
- [8] DARDA, Radek.: *Modelování dynamických stavů AM a následná verifikace výsledků měřením*. Plzeň : ZČU, 2008. 49 s.
- [9] KUBEŠ, Daniel.: *Výměna měděné klece za klec mosaznou*. Plzeň : ZČU, 2010. 35 s.
- [10] <http://webs.zcu.cz/fel/kev/+EMCH/Matematick%82%20modely2.pdf>
- [11] http://phobos.vscht.cz/konference_matlab/MATLAB06/prispevky/thondel/thondel.pdf

Seznam příloh

Kružnicový diagram pro odpor $R_2' = 2,1 \Omega$	2
Kružnicový diagram pro odpor $R_2' = 5,19 \Omega$	3
Matematický model asynchronního motoru	4

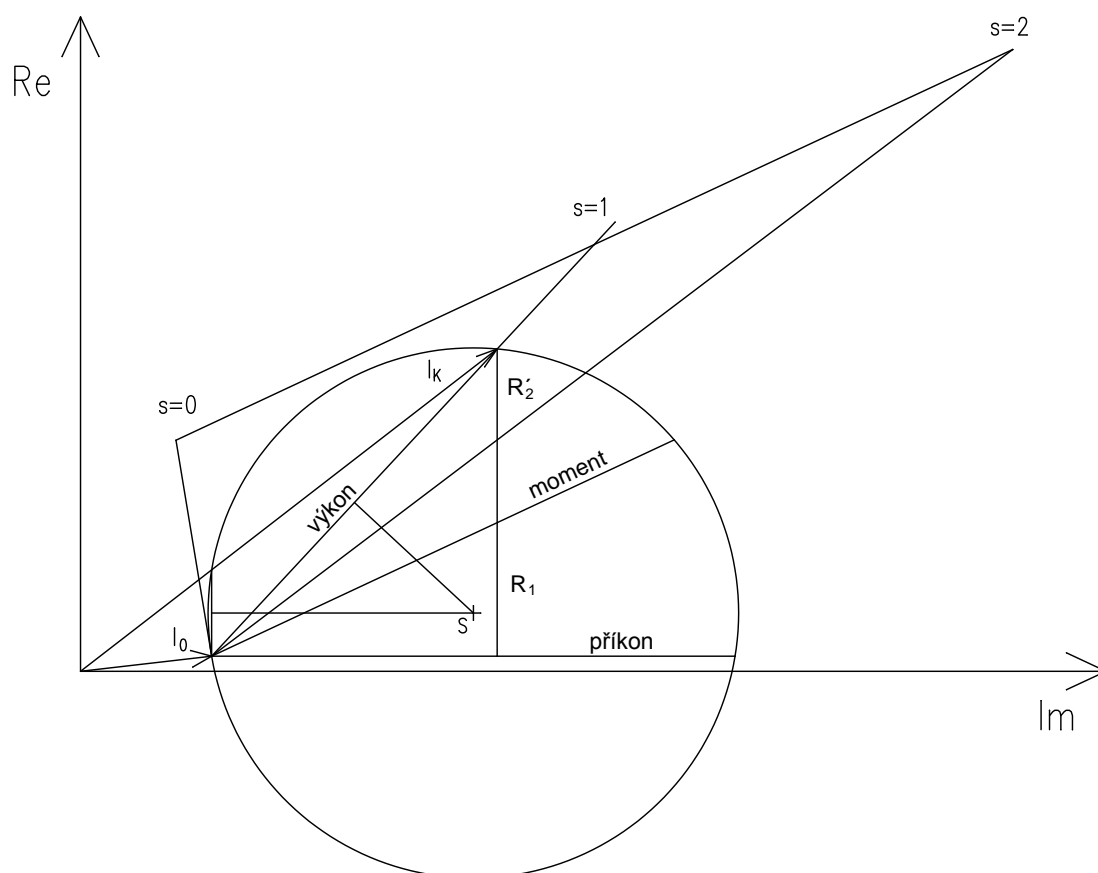
Kružnicový diagram pro odpor $R_2' = 2,1 \Omega$

Výpočet měřítek:

$$\text{Proud} \quad m_I = 0,5 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (\text{P.1})$$

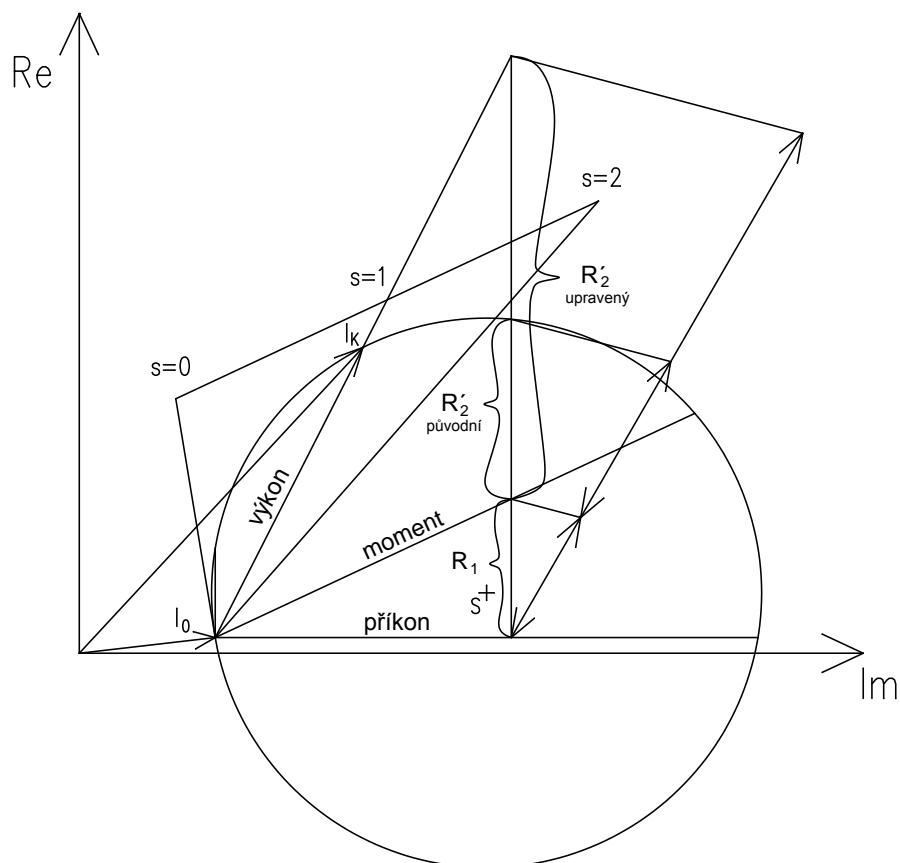
$$\text{Výkon} \quad m_P = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot m_I = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,5 = 329,09 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (\text{P.2})$$

$$\text{Moment} \quad m_M = \frac{m_P}{\frac{\pi \cdot n_S}{30}} = \frac{329,09}{\frac{\pi \cdot 1000}{30}} = 3,14 \text{ Nm} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (\text{P.3})$$

Obr. příloha 1 - Kružnicový diagram pro odpor $R_2' = 2,1 \Omega$

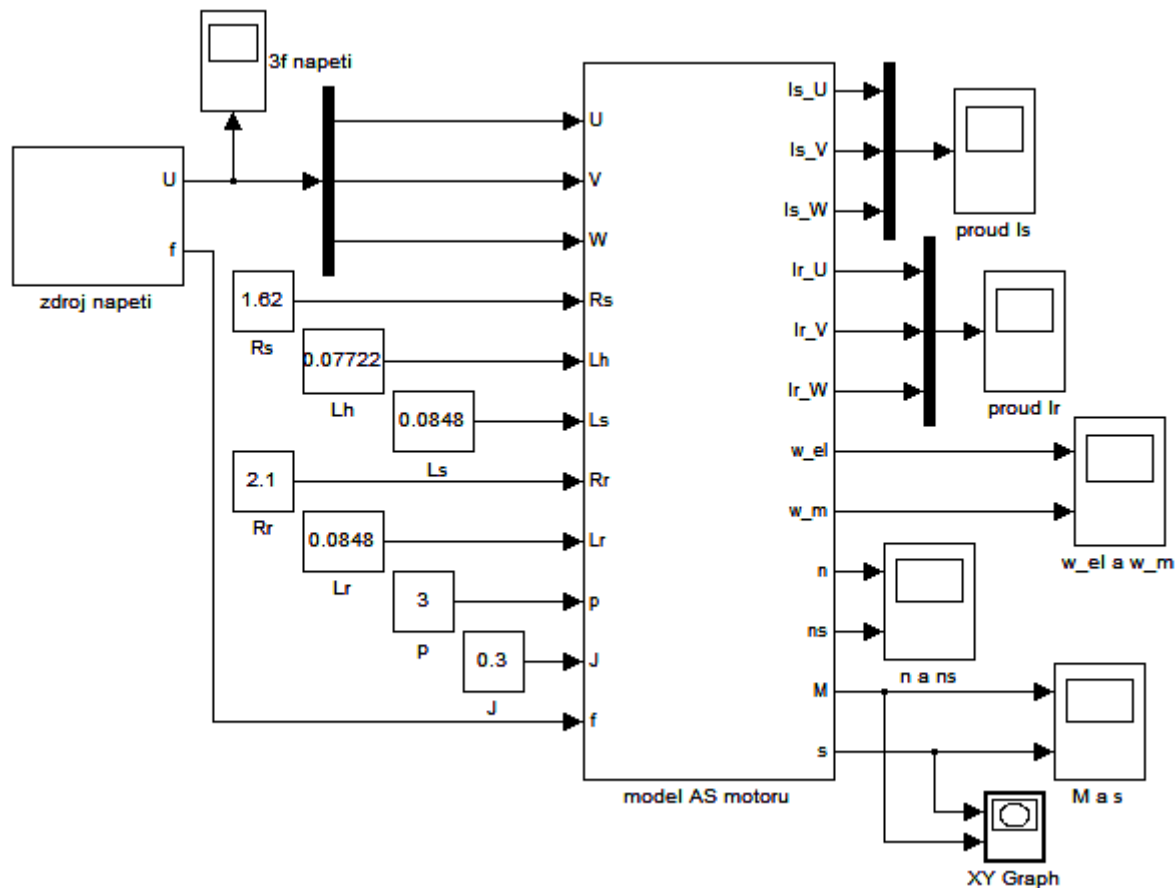
Kružnicový diagram pro odpor $R_2' = 5,19 \Omega$

Měřítko jsou stejná jako v předešlém případě.

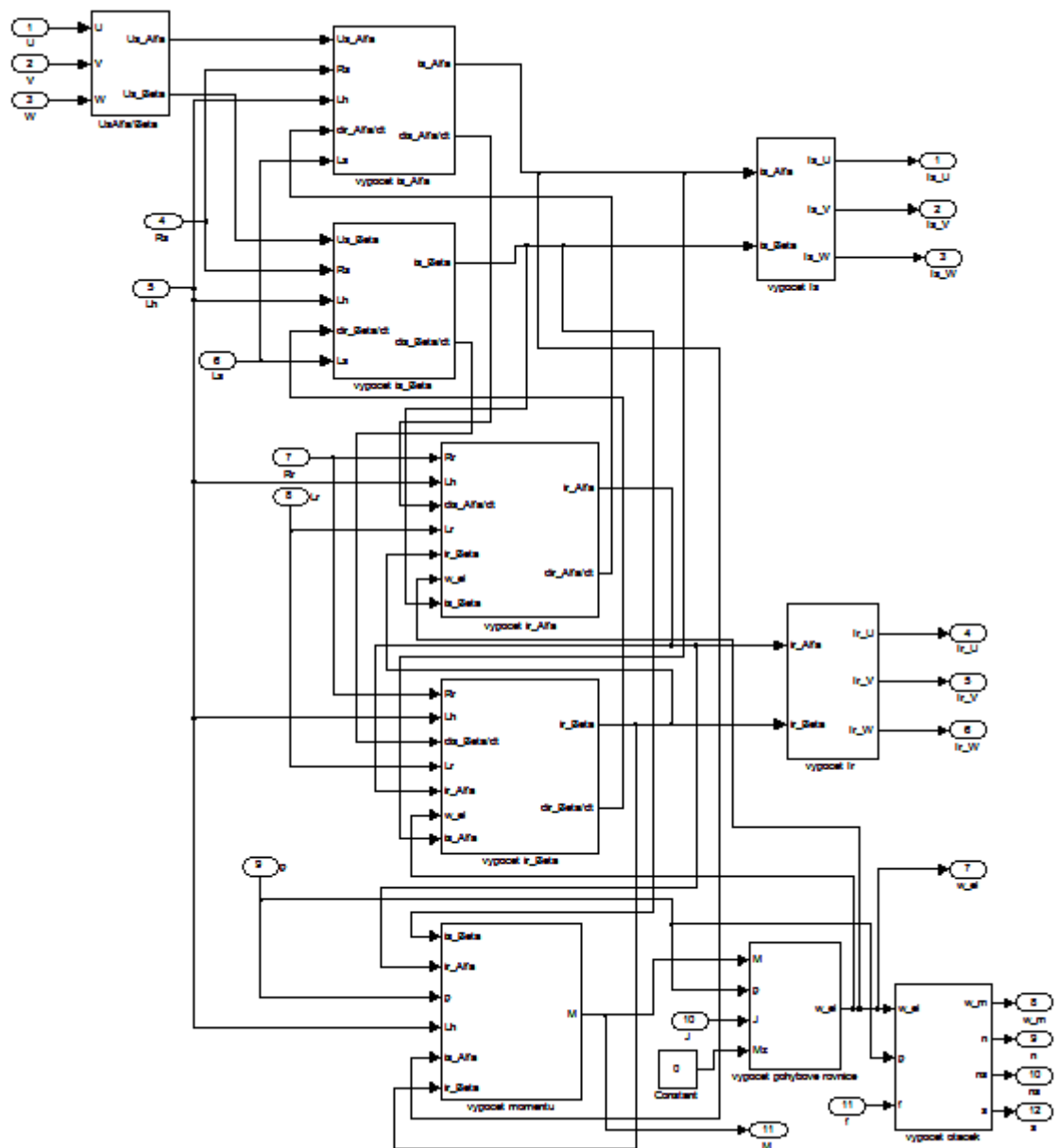


Obr. příloha 2 - Kružnicový diagram respektující úpravu odporu v obvodu rotoru

Matematický model asynchronního motoru



Obr. příloha 3 - Celkový model pro simulaci



Obr. příloha 4 - Vlastní model asynchronního stroje