

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

NÁHRADNÍ ZAPOJENÍ ASYNCHRONNÍCH STROJŮ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

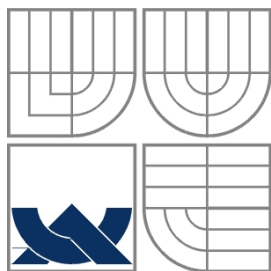
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

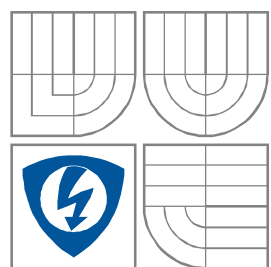
Bc. Radim Běloušek

AUTHOR

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

NÁHRADNÍ ZAPOJENÍ ASYNCHRONNÍCH STROJŮ

SUBSTITUTING CIRCUIT OF THE ASYNCHRONOUS MACHINES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

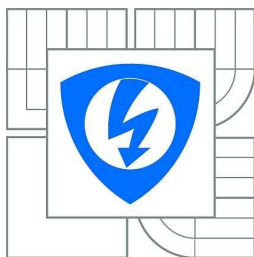
Bc. Radim Běloušek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Dr. Ing. Miroslav Patočka

BRNO, 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Bc. Radim Běloušek

ID: 98235

Ročník: 2

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Náhradní zapojení asynchronních strojů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. U asynchronního stroje porovnejte vlastnosti náhradního zapojení ve tvaru T-článku, gama-článku a inverzního gama-článku.
2. Analyzujte a porovnejte různé způsoby identifikace parametrů náhradního zapojení.
3. Z náhradního zapojení odvoďte momentovou a proudovou charakteristiku asynchronního motoru a analyzujte odchylky mezi charakteristikami vypočtenými a změřenými.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího

Termín zadání: 23.9.2010

Termín odevzdání: 19.5.2011

Vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Miroslav Patočka

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Přestože asynchronní motory patří mezi nejjednodušší a provozně nejspolehlivější stroje, je identifikace parametrů jejich náhradního zapojení obtížná. V této práci je řešena problematika identifikace parametrů náhradního zapojení ve tvaru T-článku i Γ -článku. Součástí práce je rovněž návrh magnetického obvodu asynchronního stroje, výpočet magnetizační i rozptylových indukčností, odporů stroje. Závěr práce je pak věnován citlivostní analýze momentové a proudové charakteristiky asynchronního motoru při změně jednotlivých parametrů náhradního zapojení.

Abstract

Although induction motors are the simplest and most working reliability machines, is the identification of the parameters of their substituting circuit very difficult. There is solved the identification of the parameters of the substituting circuit in the T-network and Γ -network in this work. The work also includes the proposal of magnetic circuit of the induction motor, the calculation of magnetizing and leakage inductances and resistances of the machine. The conclusion of the work is devoted to the sensitivity analysis of current and torque characteristics of induction motor upon the change of the single parameters of the substituting circuit.

Klíčová slova

Identifikace; náhradní zapojení; asynchronní motor; T-článek; Γ -článek; moment; proud; momentová charakteristika; proudová charakteristika; citlivost; analýza.

Keywords

Identification; substitute circuit; asynchronous machine; T-network; Γ -network; torque; current; torque characteristic; current characteristic; sensitivity; analysis.

Bibliografická citace

BĚLOUŠEK, R. Náhradní zapojení asynchronních strojů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 86 s. Vedoucí diplomové práce doc. Dr. Ing. Miroslav Patočka.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Náhradní zapojení asynchronních strojů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Dr. Ing. Miroslavu Patočkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne Podpis autora

OBSAH

1 ÚVOD	15
2 NÁHRADNÍ ZAPOJENÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU VE TVARU Γ -ČLÁNKU	16
2.1 Identifikace parametrů náhradního zapojení asynchronního motoru	17
2.2 Přesná identifikace náhradního zapojení	18
3 VÝPOČET PARAMETRŮ ASYNCHRONNÍHO MOTORU AOM090L02-016	24
3.1 Výpočet magnetické indukce ve vzduchové mezeře	24
3.2 Výpočet magnetického napětí vzduchové mezery	26
3.3 Výpočet magnetického napětí zubů statoru	28
3.4 Výpočet magnetického napětí zubů rotoru	29
3.5 Výpočet magnetického napětí jha statoru	31
3.6 Výpočet magnetického napětí jha rotoru	33
3.7 Výpočet odporu vinutí statoru	36
3.8 Výpočet odporu vinutí rotoru	37
3.9 Výpočet magnetizační indukčnosti	39
3.10 Výpočet rozptylových indukčností	40
3.10.1 Rozptylová indukčnost statoru	40
3.10.2 Rozptylová indukčnost rotoru	43
3.11 Přepočet T-článku na Γ -článek	47
4 VÝPOČET MOMENTOVÉ A PROUDOVÉ CHARAKTERISTIKY ASYNCHRONNÍHO MOTORU	49
5 CITLIVOSTNÍ ANALÝZA PRVKŮ NÁHRADNÍHO ZAPOJENÍ	54
5.1 Citlivost momentové charakteristiky	54
5.1.1 Citlivost charakteristiky na odpor rotoru R	54
5.1.2 Citlivost charakteristiky na odpor vinutí statoru R_l	55
5.1.3 Citlivost charakteristiky na odpor R_{Fe}	56
5.1.4 Citlivost charakteristiky na magnetizační indukčnost L_l	58
5.1.5 Citlivost charakteristiky na rozptylovou indukčnost L_2	59

5.2	Citlivost proudové charakteristiky.....	61
5.2.1	Citlivost charakteristiky na odpor rotoru R	61
5.2.2	Citlivost charakteristiky na odpor vinutí statoru R_1	62
5.2.3	Citlivost charakteristiky na odpor R_{Fe}	63
5.2.4	Citlivost charakteristiky na magnetizační indukčnost L_1	65
5.2.5	Citlivost charakteristiky na rozptylovou indukčnost L_2	67
5	ZÁVĚR.....	69
	LITERATURA.....	70
	PŘÍLOHY.....	71
	Příloha 1 – Parametry motoru AOM090L02.....	71
	Příloha 2 - Výpočty.....	72
	Příloha 3 - Měření.....	73
	Příloha 4.....	85

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1	Přechod od náhradního zapojení v podobě T-článku k Γ -článku, převzato z [1]	16
Obr. 2.2	Náhradní zapojení asynchronního motoru ve tvaru Γ -článku. a) Pro ideální bezztrátový stroj, b) Včetně ztrát v mědi a železe	17
Obr. 2.3	Měření asynchronního motoru ve dvou pracovních bodech A, B v blízkosti jmenovitého bodu N	18
Obr. 2.4	Vstupní impedance náhradního zapojení a) musí být stejná jako změřená, b) převzato z [3]	18
Obr. 2.5	Náhradní schéma asynchronního motoru ve stavu naprázdno	20
Obr. 2.6	Rozdělení mechanických ztrát a ztrát v železe asynchronního motoru ve stavu naprázdno	20
Obr. 2.7	Rozdělení mechanických ztrát a ztrát v železe motoru AOM090L02-016	22
Obr. 2.8	Náhradní zapojení asynchronního motoru ve tvaru Γ -článku	23
Obr. 3.1	Náhradní zapojení asynchronního motoru ve tvaru: a) T-článku, b) Γ -článku	47
Obr. 4.1	Náhradní zapojení asynchronního motoru ve tvaru Γ -článku pro výpočet momentové charakteristiky	49
Obr. 4.2	Momentová charakteristika asynchronního motoru AOM090L02-016	51
Obr. 4.3	Proudová charakteristika asynchronního motoru AOM090L02-016	52
Obr. 5.1	Citlivost momentové charakteristiky na odpor rotoru R	55
Obr. 5.2	Citlivost momentové charakteristiky na odpor vinutí statoru R_1	56
Obr. 5.3	Citlivost momentové charakteristiky na odpor R_{Fe}	57
Obr. 5.4	Citlivost momentové charakteristiky na magnetizační indukčnost L_1	58
Obr. 5.5	Citlivost momentové charakteristiky na rozptylovou indukčnost L_2	59
Obr. 5.6	Citlivost proudové charakteristiky na odpor rotoru R	62
Obr. 5.7	Citlivost proudové charakteristiky na odpor vinutí statoru R_1	63
Obr. 5.8	Citlivost proudové charakteristiky na odpor R_{Fe}	65
Obr. 5.9	Citlivost proudové charakteristiky na magnetizační indukčnost L_1	66
Obr. 5.10	Citlivost proudové charakteristiky na rozptylovou indukčnost L_2	68
Obr. P1	Závislost proudu na napětí při měření naprázdno	74
Obr. P2	Závislost příkonu na napětí při měření naprázdno	74

Obr. P3	Závislost proudu na momentu při zatěžovací zkoušce ($U = \text{konst.}$).....	75
Obr. P4	Závislost příkonu na momentu při zatěžovací zkoušce ($U = \text{konst.}$).....	76
Obr. P5	Závislost účinnosti na momentu při zatěžovací zkoušce ($U = \text{konst.}$).....	76
Obr. P6	Závislost proudu na napětí při zatěžovací zkoušce ($M = \text{konst.}$).....	78
Obr. P7	Závislost výkonu na napětí při zatěžovací zkoušce ($M = \text{konst.}$).....	78
Obr. P8	Závislost účinnosti na napětí při zatěžovací zkoušce ($M = \text{konst.}$).....	79
Obr. P9	Závislost proudu na napětí při měření nakrátko.....	80
Obr. P10	Závislost příkonu na napětí při měření nakrátko.....	80
Obr. P11	Závislost momentu na napětí při měření nakrátko.....	81
Obr. P12	Závislost momentu na skluzu – Momentová charakteristika.....	82
Obr. P13	Závislost odporu na čase.....	84
Obr. P14	Výkres plechu statoru.....	85
Obr. P15	Výkres plechu rotoru.....	86

SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1	Parametry náhradního zapojení asynchronního motoru dle kombinace měření A, B v lineární části momentové charakteristiky.....	23
Tabulka P1.1	Parametry motoru AOM090L02-016.....	71
Tabulka P3.1	Hodnoty z měření naprázdno.....	73
Tabulka P3.2	Hodnoty z měření při zatížení ($U = \text{konst.}$).....	75
Tabulka P3.3	Hodnoty z měření při zatížení ($M = \text{konst.}$).....	77
Tabulka P3.4	Hodnoty z měření při zkoušce nakrátko.....	79
Tabulka P3.5	Hodnoty z měření momentové charakteristiky.....	82
Tabulka P3.6	Hodnoty z měření při oteplovací zkoušce.....	83

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

I_0	proud naprázdno	A
I_{Fe}	činná složka proudu naprázdno	A
I_μ	magnetizační proud	A
I_2	rotorový proud	A
I_2'	proud rotoru přepočtený na stator	A
L_1	hlavní (magnetizační indukčnost)	H
L_2	indukčnost rotoru	H
L_A, L_B	indukčnosti vstupní impedance změřené, vypočtené	H
M	moment motoru	Nm
M_n	jmenovitý moment motoru	Nm
P_δ	činný příkon motoru	W
P_{p0}, P_{p1}, P_{pk}	příkon motoru ve stavu naprázdno, při zatížení, nakrátko	W
P_{Fe}	ztráty v železe	W
P_{mech}	mechanické ztráty	W
P_δ	výkon motoru ve vzduchové mezeře	W
R_2	odpor rotoru	Ω
R, R_2'	odpor rotoru přepočtený na stator	Ω
R_1	odpor vinutí statoru	Ω
R_A, R_B	odpory vstupní impedance změřené, vypočtené	Ω
R_{Fe}	odpor respektující ztráty v železe	Ω
U	napájecí napětí	V
U_1, U_{L1}	napětí na příčné větvi	V
U_0	napětí ve stavu naprázdno	V
U_K	napětí ve stavu nakrátko	V
X_{1L}	rozptylová reaktance statoru	Ω
X_{2L}	rozptylová reaktance rotoru	Ω
X_{2L}'	rozptylová reaktance rotoru přepočtená na stator	Ω
X_y	magnetizační reaktance	Ω

Z_{vst}	vstupní impedance	Ω
$Z_{\text{vst,A}}, Z_{\text{vst,B}}$	vstupní impedance změřená, vypočtená	Ω
n	otáčky rotoru	min^{-1}
n_s	synchronní otáčky	min^{-1}
p	počet pólů	-
s	skluz	-
$\cos\varphi$	účinník	-
η	účinnost	%
ω	úhlový kmitočet statorového napětí a proudu	Hz

1 ÚVOD

Asynchronní motory patří mezi nejjednodušší, provozně nejspolehlivější a v praxi nejpoužívanější elektrické stroje. To je dáno především jejich jednoduchou konstrukcí, nízkou cenou a minimálními nároky na údržbu.

Aby bylo možné asynchronní motor využívat v dynamicky náročných aplikacích, je nutno napájet motor z měniče kmitočtu a použít vektorové řízení. Kvalita vektorového řízení se odvíjí od přesnosti matematického modelu stroje, tj. od přesnosti parametrů náhradního zapojení. Matematický model i náhradní zapojení obsahují ovšem řadu parametrů, které je nutno přesně identifikovat.

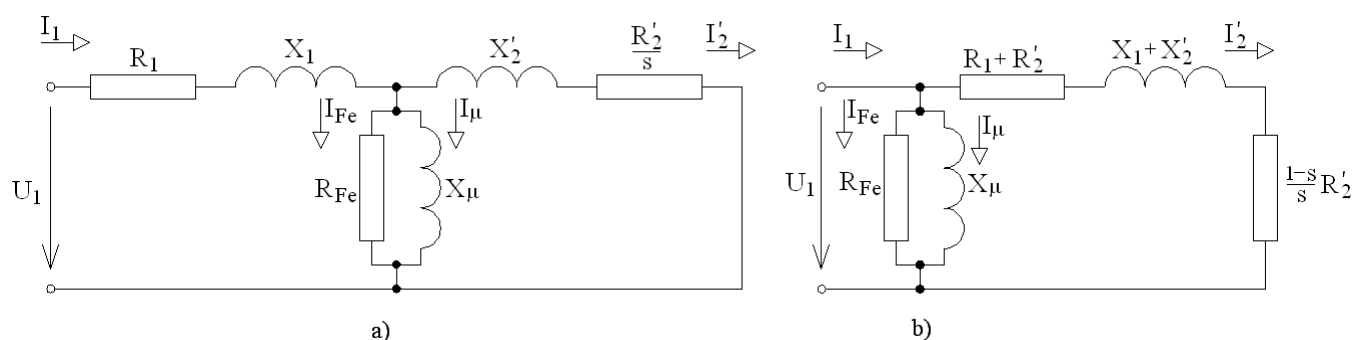
Ukazuje se, že přesná (nikoli přibližná) identifikace náhradního zapojení je docela složitou záležitostí. Proto je výhodné identifikovat náhradní zapojení kombinací různých metod, tj. využít informací plynoucích z konstrukce asynchronního stroje, teoretických postupů při návrhu stroje i experimentálních metod.

V této práci je použita kombinace všech tří uvedených postupů.

2 NÁHRADNÍ ZAPOJENÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU VE TVARU Γ – ČLÁNKU

Náhradní zapojení asynchronního motoru je analogické s náhradním zapojením transformátoru. V klasické literatuře, např. viz [1], je náhradní zapojení znázorňováno v podobě T-článku.

Odvození momentové charakteristiky pomocí náhradního zapojení v podobě T-článku, který se používá v elektrotechnice více než sto let, je příliš složitý. Ve výpočtu momentové charakteristiky se vyskytují složité algebraické výrazy. Běžně se tedy postupuje tak, že T-článek bývá nahrazen na Γ -článkem. Toto nahrazení je ovšem nepřesné, jedná se o neekvivalentní obvodovou úpravu, viz např. [1], odkud je úmyslně převzat obr. 2.1.



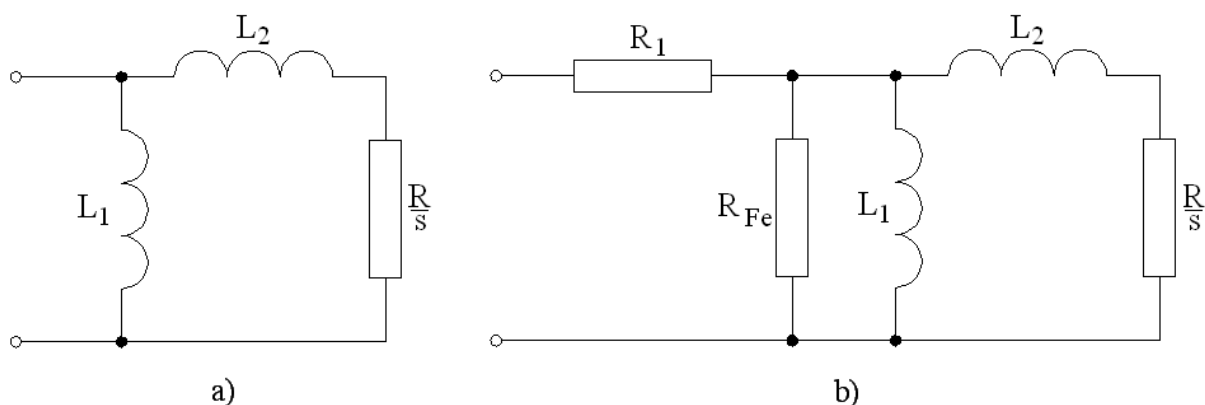
Obr. 2.1: Přechod od náhradního zapojení v podobě T-článku k Γ -článku, převzato z [1].

Abychom mohli přepočítat sekundární impedance na primární stranu, viz obr. 2.1, musí být znám převod separovaného transformátoru (transformátor, ze kterého jsou myšlenkovitě separovány rozptylové indukčnosti mimo transformátor). Tento se ovšem liší od převodu původního transformátoru. Postup v literatuře je ovšem takový, že tento neznámý převod je nahrazen převodem původního transformátoru, viz [1].

Ve [2] je dokázáno, že každý pasivní přenosový dvojbran, tedy i původní transformátor, musí mít tři stupně volnosti. Nově vzniklý separovaný transformátor musí mít také tři stupně volnosti. Obsahuje však čtyři neznámé veličiny, což je v přímém rozporu s počtem stupňů volnosti. Je tedy nutné jednu z veličin zvolit a zbylé dopočítat. Existence dvou rozptylových indukčností je tedy chybná, náhradní zapojení vystačí s jedinou rozptylovou indukčností, viz lit. [2].

Matematický postup přesného přepočtu T-článku na Γ -článek je ukázán v literatuře [2]. Je zde také doložena a vysvětlena nevýhodnost náhradního zapojení asynchronního motoru v podobě T-článku.

Náhradní zapojení ve tvaru Γ -článku je plnohodnotné a přesné zatímco náhradní zapojení ve tvaru T-článku je zbytečně složité, viz literatura [2].



Obr. 2.2: Náhradní zapojení asynchronního motoru ve tvaru Γ -článku. a) Pro ideální bezztrátový stroj, b) Včetně ztrát v mědi a železe.

Náhradní zapojení ve tvaru Γ -článku je ukázáno na obr. 2.2. Z porovnání obrázků 2.1a) a 2.2b) plyne, že v případě náhradního zapojení ve tvaru Γ -článku chybí po formální stránce satorová rozptylová indukčnost. Takto zvolené náhradní zapojení je zcela plnohodnotné a přesné, viz literatura [2].

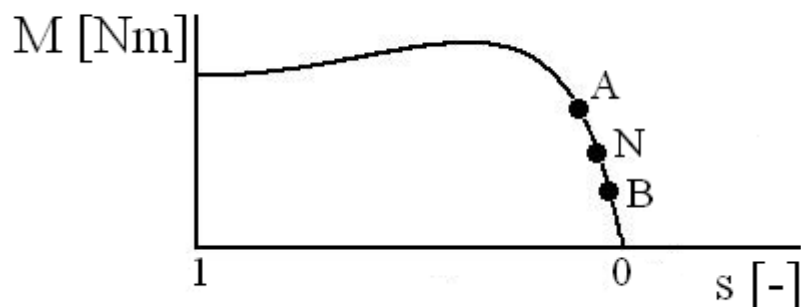
2.1 Identifikace parametrů náhradního zapojení asynchronního motoru

Přestože asynchronní motor patří mezi nejjednodušší a provozně nejspolehlivější motory, je identifikace parametrů jeho náhradního zapojení velice obtížná. Na rozdíl od transformátoru má asynchronní motor na rotoru klecové vinutí, které nelze rozpojit a změřit. Absence měření ze strany rotoru musí být nahrazena měřeními ve dvou různých pracovních bodech A, B dle obr. 2.3. Pro identifikaci parametrů náhradního zapojení využijeme následujícího postupu:

- Přesná identifikace, měření ve dvou pracovních bodech A, B z blízkého okolí jmenovitého bodu N, viz obr. 2.3. Jedná se o identifikaci matematicky velmi obtížnou.

Identifikace parametrů náhradního zapojení je tedy složitý proces. Cílem identifikace je určení všech parametrů popisujících náhradní zapojení asynchronního motoru, tj. určení R_1

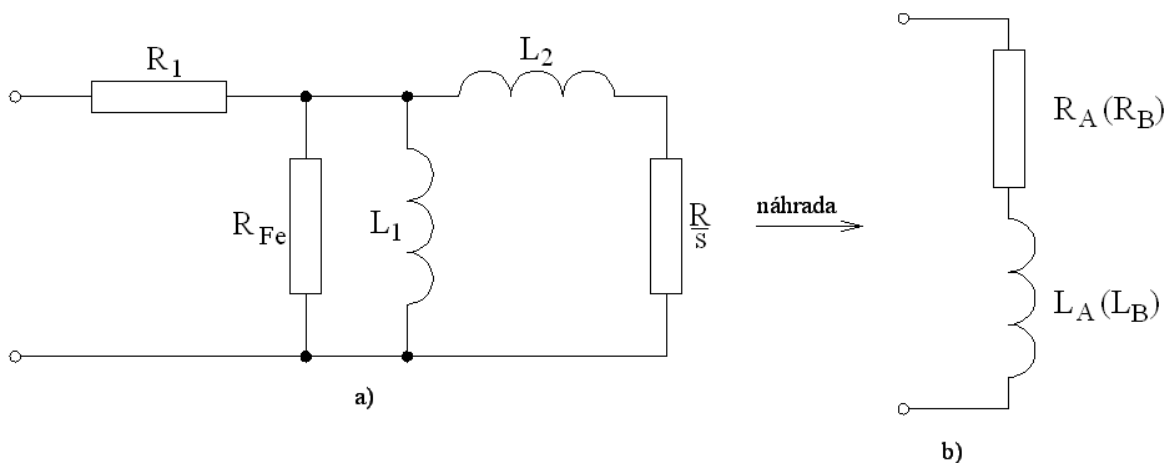
(odpor vinutí statoru), L_1 (hlavní indukčnost), R_{Fe} (odpor respektující ztráty v železe), L_2 (rozptylová indukčnost), R (odpor rotoru). K identifikaci je nutné využít jak znalostí teorie, konstrukce asynchronních motorů tak i experimentálních měření.



Obr. 2.3: Měření asynchronního motoru ve dvou pracovních bodech **A**, **B** v blízkosti jmenovitého bodu **N**.

2.2 Přesná identifikace náhradního zapojení

Princip identifikace spočívá v porovnání změřené a vypočtené vstupní impedance motoru. Měření provádíme ve dvou pracovních bodech A, B viz obr. 2.4b). Dle obr. 2.4a) vypočítáme teoreticky vstupní impedanci motoru.



Obr. 2.4: Vstupní impedance náhradního zapojení a) musí být stejná jako změřená, b) převzato z [3]

Dle obr. 2.4a) nabývá teoretická vstupní impedance hodnoty:

$$Z_{vst} = R + j \cdot \omega L \quad \text{tedy}$$

$$Z_{vst} = R_1 + \frac{j \cdot \omega L_1 \cdot R_{Fe} \cdot \left(j \cdot \omega L_2 + \frac{R}{s} \right)}{j \cdot \omega L_1 \cdot R_{Fe} + j \cdot \omega L_1 \cdot \left(j \cdot \omega L_2 + \frac{R}{s} \right) + R_{Fe} \cdot \left(j \cdot \omega L_2 + \frac{R}{s} \right)} \quad (2.1)$$

Obdobně vyjádříme prakticky změřenou impedanci motoru ve dvou bodech A, B:

$$\begin{aligned} Z_{vst,A} &= R_A + j \cdot \omega L_A \\ Z_{vst,B} &= R_B + j \cdot \omega L_B \end{aligned} \quad (2.2)$$

Odpor R_1 považujeme za známou hodnotu, měřením jednoznačně zjistitelnou. Porovnáním rovnic (2.1) a (2.2) získáme soustavu čtyř rovnic o čtyřech neznámých L_1 , R_{Fe} , L_2 , R :

$$\begin{aligned} L_1 R_{Fe} R_X + L_2 R_{Fe} R_X + L_1 R_X \frac{R}{s_A} + L_A R_{Fe} \frac{R}{s_A} &= \omega^2 L_A L_1 L_2 + L_1 R_{Fe} \frac{R}{s_A} \\ \omega^2 L_A L_1 \frac{R}{s_A} + \omega^2 L_A L_2 R_{Fe} + \omega^2 L_A L_1 R_{Fe} + \omega^2 L_1 L_2 R_X &= R_{Fe} R_X \frac{R}{s_A} + \omega^2 L_1 L_2 R_{Fe} \\ L_1 R_{Fe} R_Y + L_2 R_{Fe} R_Y + L_1 R_Y \frac{R}{s_B} + L_B R_{Fe} \frac{R}{s_B} &= L_1 R_{Fe} \frac{R}{s_B} + \omega^2 L_B L_1 L_2 \\ \omega^2 L_B L_1 \frac{R}{s_B} + \omega^2 L_B L_2 R_{Fe} + \omega^2 L_B L_1 R_{Fe} + \omega^2 L_1 L_2 R_Y &= R_{Fe} R_Y \frac{R}{s_B} + \omega^2 L_1 L_2 R_{Fe} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Nejjednodušší řešení této soustavy je pomocí eliminační metody, tedy z jedné rovnice se vyjádří jeden hledaný parametr, který se dosadí do zbývajících rovnic. Získá se tak soustava rovnic o jedničku menší, tj. v našem případě soustava tří rovnic o třech neznámých. Stejným způsobem, tj. vyjádřením dalšího hledaného parametru a dosazením do zbývajících rovnic, pokračujeme až do úplného vyřešení celé soustavy.

V [3] bylo ukázáno, že řešení soustavy (2.3) vede na rovnice čtrnáctého řádu a je tedy algebraicky nemožné. Při zavedení vhodného zjednodušujícího předpokladu, zanedbání resp. určení parametru R_{Fe} z měření naprázdno snížíme počet hledaných parametrů i rovnic v soustavě (2.3) o jedničku. Soustava rovnic má pak jednoznačné řešení:

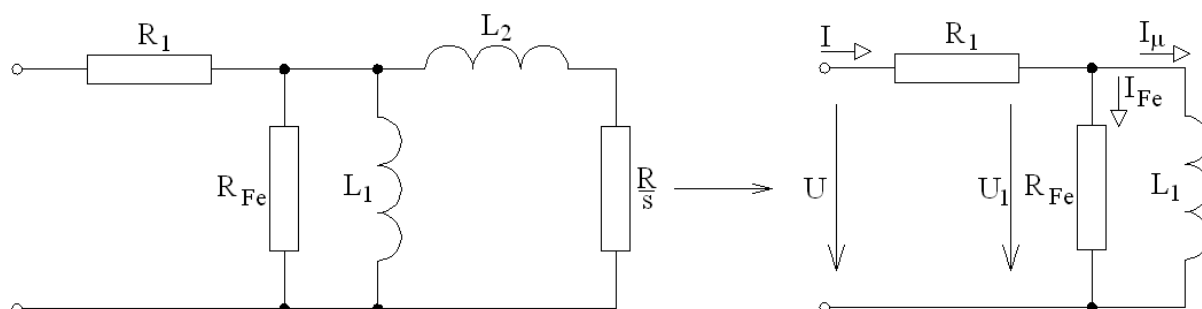
$$R = \frac{\omega^2 L_A L_1 L_2 s_A - L_1 K_1 - L_2 K_1}{L_A R_{Fe} + L_1 R_X - L_1 R_{Fe}} \quad (2.4)$$

$$L_2 = \frac{L_1^2 K_4 - L_1 K_3}{L_1^2 K_2 - L_1 2K_4 + K_3} \quad (2.5)$$

$$L_1 = \frac{K_{10} + \sqrt{K_{10}^2 - K_9 K_{11}}}{K_9} \quad (2.6)$$

kde K_1 až K_{11} jsou obecné konstanty vzniklé při výpočtu, viz Příloha 2.

Určení parametru R_{Fe} pomocí měření naprázdno:

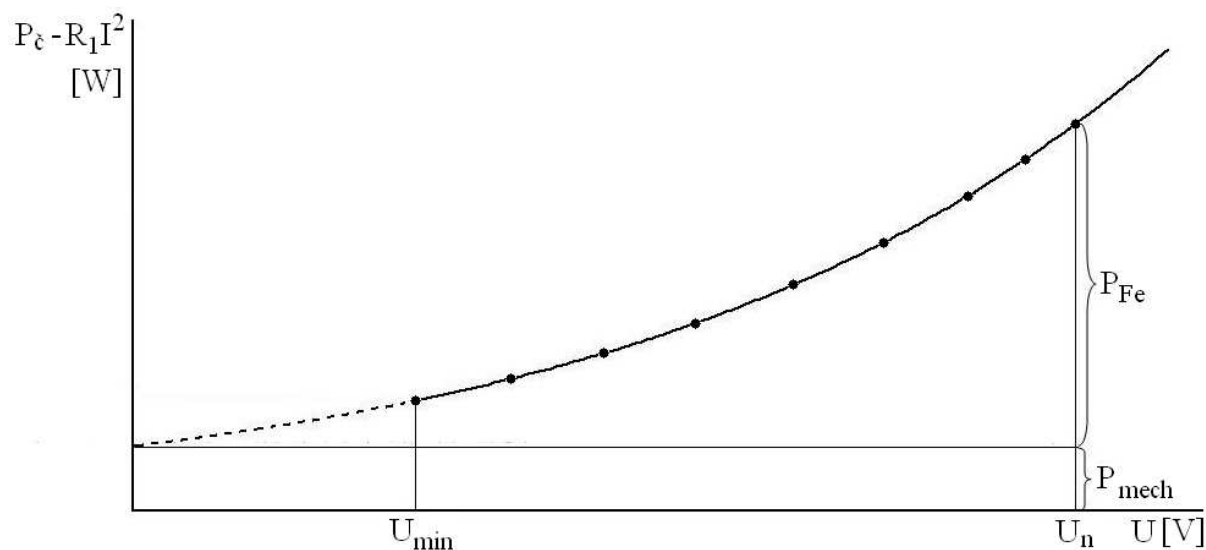


Obr. 2.5: Náhradní schéma asynchronního motoru ve stavu naprázdno.

Při měření ve stavu naprázdno zaznamenáváme fázové napětí U , fázové proudy I a fázové činné příkony $P_{\check{c}}$ v každé fázi. Celkový činný příkon je dán vztahem:

$$P_{\check{c}} = R_1 I^2 + P_{Fe} + P_{mech} \quad (2.7)$$

Složku $R_1 I^2$ určíme jednoduše, neboť odpor R_1 se změří Ω -metrem. Mechanické ztráty P_{mech} (ztráty ventilační a tření v ložiskách) určíme dle obr. 2.6.



Obr. 2.6: Rozdělení mechanických ztrát a ztrát v železe asynchronního motoru ve stavu naprázdno.

Postup určení mechanických ztrát P_{mech} , viz obr. 2.6.:

- Při měření postupně snižujeme napájecí napětí (od jmenovitého napětí U_n až po minimální U_{\min}) a měříme celkový činný příkon $P_{\check{c}}$.
- Na vodorovnou osu zaznamenáváme napětí U , na svislou osu zaznamenáváme $(P_{\check{c}} - R_1 I^2)$.
- Při snížení napětí pod hranici U_{\min} klesne vnitřní moment motoru a motor se zastaví. Další měření již není možné, je nutné provést extrapolaci křivky do nuly (čárkovaná část křivky). Při nízkých hodnotách vstupního napětí roste skluz. V grafu na obr. 2.6 je tato část vyznačena čárkovaně.
- Hodnota hledaných mechanických ztrát je dána průnikem extrapolované části křivky se svislou osou, neboť podle rovnice (2.7) jsou hodnoty na svislé ose $(P_{\check{c}} - R_1 I^2)$ rovny součtu $(P_{Fe} + P_{\text{mech}})$.

Ztráty v železe určíme dle rovnice:

$$P_{Fe} = P_{\check{c}} - R_1 \cdot I^2 - P_{\text{mech}} \quad (2.8)$$

Dle obr. 2.4 platí:

$$U_1 = U - R_1 I \quad (2.9)$$

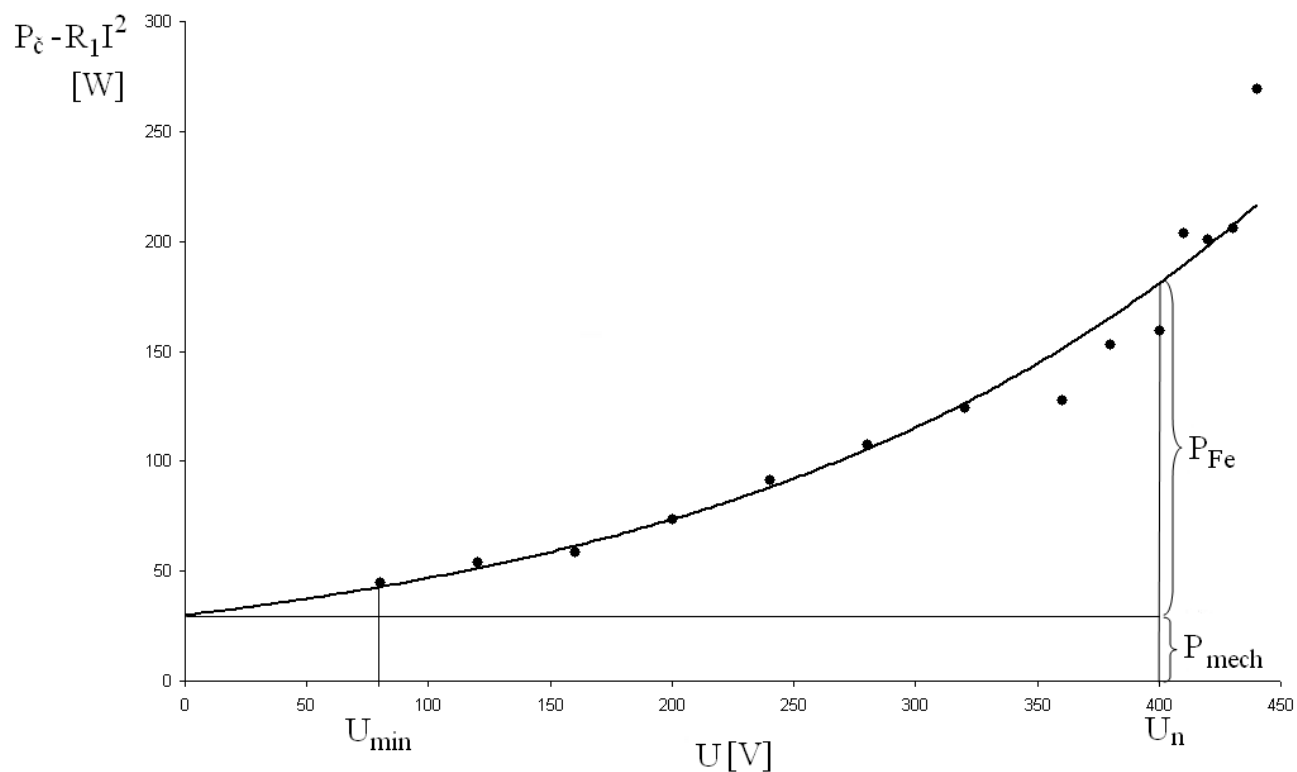
Využitím vztahů (2.8) a (2.9) určíme hodnotu parametru R_{Fe} (odpor respektující ztráty v železe):

$$R_{Fe} = \frac{U_1^2}{P_{Fe}} \quad (2.10)$$

Identifikace byla provedena na motoru AOM090L02-016, v.č. 6204718. Jedná se o asynchronní motor s kotvou nakrátko. Parametry motoru: 2p=2; 2,2KW; 400V-Y; 50Hz; $\cos\varphi=0,88$; $\eta=81\%$. Identifikace vychází z naměřených hodnot. Na motoru byla provedena zkouška naprázdno, zatěžovací při konstantním napětí a momentu, zkouška nakrátko, měření momentové charakteristiky a oteplovací zkouška. Všechny naměřené hodnoty i graficky znázorněné závislosti jsou uvedeny v tabulce, viz Příloha 3 - Měření.

Identifikace pomocí měření naprázdno:

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce P3.1, viz Příloha 3.



Obr. 2.7: Rozdělení mechanických ztrát a ztrát v železe motoru AOM090L02-016

Z obr. 2.7 a vztahu (2.8) získáme hodnotu ztrát v železe: $P_{\text{Fe}} = 158,0$ W.

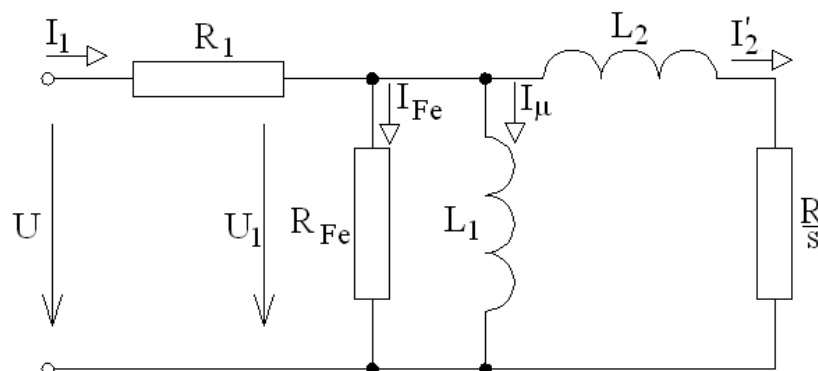
Přímo z měření, viz Příloha 3, známe hodnotu odporu satoru: $R_1 = \underline{\underline{2,91 \Omega}}$.

Ze vztahů (2.9) a (2.10) určíme ztráty v železe:

$$R_{\text{Fe}} = \frac{(U - R_1 I)^2}{P_{\text{Fe}}} = \underline{\underline{982 \Omega}} \quad (2.11)$$

Přesná identifikace:

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce P3.2, viz Příloha 3.



Obr. 2.8: Náhradní zapojení asynchronního motoru ve tvaru Γ -článku.

Parametry náhradního zapojení určíme dosazením do rovnic (2.4), (2.5) a (2.6). Pro různé kombinace měření dle obr. 2.3 získáme různé hodnoty parametrů náhradního zapojení, viz tabulka 2.1.

Tabulka 2.1: Parametry náhradního zapojení asynchronního motoru dle kombinace měření A, B v lineární části momentové charakteristiky

M_A [Nm]	M_B [Nm]	L_1 [H]	L_2 [H]	R [Ω]
4	6	0,360	0,009	2,264
4	8	0,383	0,021	2,252
4	10	0,379	0,019	2,255
6	8	0,436	0,028	2,204
6	10	0,405	0,021	2,223
8	10	0,357	0,017	2,274

Parametry náhradního zapojení získané aritmetickým průměrem z jednotlivých měření dle tabulky 2.1:

$$L_1 = \underline{0,387 \text{ H.}}$$

$$L_2 = \underline{0,019 \text{ H.}}$$

$$R = \underline{2,245 \Omega.}$$

3 VÝPOČET PARAMETRŮ ASYNCHRONNÍHO MOTORU AOM090L02-016

V této kapitole je proveden výpočet parametrů asynchronního motoru AOM090L02-016. Při výpočtu vycházím ze vztahů uvedených v literatuře [4].

3.1 Výpočet magnetické indukce ve vzduchové mezeře

Pokud chceme vypočítat magnetický obvod asynchronního motoru, musíme nejdříve určit velikost magnetické indukce ve vzduchové mezeře.

Efektivní hodnotu indukované elektromotorické síly za předpokladu sinusové změny magnetického toku ϕ_{\max} a rozloženého vinutí určíme ze vztahu:

$$E_1 = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \phi_{\max} \cdot N_{S1} \cdot k_{V1} \quad (3.1)$$

kde E_1 je efektivní hodnota napětí fáze
 f_1 je kmitočet
 ϕ_{\max} je maximální hodnota magnetického toku
 N_{S1} je počet závitů jedné fáze v sérii
 k_{V1} je činitel vinutí

Počet závitů jedné fáze v sérii určíme jako:

$$N_{S1} = \frac{1}{2} \frac{V_{d1} \cdot Q_1}{m_1 \cdot a_1} \quad (3.2)$$

kde V_{d1} je počet vodičů v jedné drážce statoru
 Q_1 je počet drážek statoru
 m_1 je počet fází statoru
 a_1 je počet paralelních větví

Počet vodičů v drážce je dán vztahem:

$$V_{d1} = \frac{\pi \cdot D \cdot A \cdot a_1}{I_{1N} \cdot Q_1} \quad (3.3)$$

kde D je vnitřní průměr statoru
 A je proudové zatížení, hodnotu proudového zatížení udává praxe $A = 21834 \text{ A/m}$
 I_{1N} je primární proud

Primární proud je dán vztahem:

$$I_{1n} = \frac{P}{3 \cdot U_f \cdot \cos \varphi \cdot \eta} \quad (3.4)$$

kde P je výkon motoru
 U_f je fázová hodnota napájecího napětí
 $\cos \varphi$ je účinník
 η je účinnost

Přepočet sdruženého napájecího napětí na fázové napájecí napětí:

$$U_f = \frac{U_s}{\sqrt{3}} \quad (3.5)$$

$$\underline{U_f = 231 V}$$

Primární proud je tedy:

$$\underline{I_{1n} = 4,5 A}$$

Počet vodičů v drážce je tedy dle rovnice (3.3):

$$\underline{V_{d1} = 47}$$

A počet závitů jedné fáze v sérii je podle rovnice (3.2):

$$\underline{N_{s1} = 188}$$

Činitel vinutí určíme z rovnice:

$$k_{v1} = k_y \cdot k_q \quad (3.6)$$

kde k_y je činitel zkrácení kroku

k_q je činitel rozlohy

$$k_y = \sin\left(\frac{y}{Q_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(\frac{Q_1}{2p} \cdot \frac{1}{Q_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right) \quad (3.7)$$

$$k_q = \frac{\sin \frac{q_1 \cdot \alpha}{2}}{q_1 \cdot \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin\left(\frac{Q_1}{2p \cdot m_1} \cdot \frac{\alpha}{2}\right)}{\frac{Q_1}{2p \cdot m_1} \cdot \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin\left(\frac{Q_1}{2p \cdot m_1} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{360 \cdot p}{Q_1}\right)}{\frac{Q_1}{2p \cdot m_1} \cdot \sin\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{360 \cdot p}{Q_1}\right)} = \frac{\sin \frac{90}{m_1}}{\frac{Q_1}{2p \cdot m_1} \cdot \sin \frac{180 \cdot p}{Q_1}} \quad (3.8)$$

kde y je krok

Q_p je počet drážek na pól

q_1 je počet drážek statoru na pól a fázi

α je drážkový úhel

p je počet pólpárů

Činitel vinutí je z rovnic (3.6), (3.7) a (3.8):

$$\underline{k_{v1} = 0,958}$$

Zavedeme-li předpoklad $E_1 = U_f$ (zanedbáme primární ohmický a induktivní úbytek), získáme rovnici pro ideální magnetický tok naprázdno:

$$\phi_{00} = \frac{E_1}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f_1 \cdot N_{S1} \cdot k_{V1}} = \frac{U_f}{\frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot f_1 \cdot N_{S1} \cdot k_{V1}} \quad (3.9)$$

$$\underline{\underline{\phi_{00} = 5,77 \text{ mWb}}}$$

Ideální magnetická indukce v mezeře se určí podle vztahu:

$$B_{00} = \phi_{00} \cdot \frac{P}{D \cdot l} \quad (3.10)$$

kde l je délka svazku bez ventilačních kanálů

$$\underline{\underline{B_{00} = 0,796 \text{ T}}}$$

3.2 Výpočet magnetického napětí vzduchové mezery

Magnetické napětí pro vzduchovou mezeru určíme ze vztahu:

$$F_{\delta} = \frac{1}{\mu_0} \cdot B_{\delta} \cdot \delta \cdot k_c \quad (3.11)$$

kde μ_0 je magnetická permeabilita vzduchu

k_c je Carterův činitel

δ je vzduchová mezera

B_{δ} je skutečná hodnota magnetické indukce ve vzduchové mezeře

Carterův činitel je určen vztahem:

$$k_c = k_{cs} \cdot k_{cr} \quad (3.12)$$

kde k_{cs} je Carterův činitel statoru

k_{cr} je Carterův činitel rotoru

$$k_{cs} = \frac{t_{ds}}{t_{ds} - \frac{b_{0s}^2}{b_{0s} + 5 \cdot \delta}} = \frac{\frac{\pi \cdot D}{Q_1}}{\frac{\pi \cdot D}{Q_1} - \frac{b_{0s}^2}{b_{0s} + 5 \cdot \delta}} \quad (3.13)$$

$$k_{cr} = \frac{t_{dr}}{t_{dr} - \frac{b_{0r}^2}{b_{0r} + 5 \cdot \delta}} = \frac{\frac{\pi \cdot D}{Q_2}}{\frac{\pi \cdot D}{Q_2} - \frac{b_{0r}^2}{b_{0r} + 5 \cdot \delta}} \quad (3.14)$$

kde t_{ds} je drážková rozteč statoru
 b_{0s} je otevření drážky statoru
 t_{dr} je drážková rozteč rotoru
 b_{0r} je otevření drážky rotoru
 Q_2 je počet drážek rotoru

Carterův činitel je tedy z rovnic (3.12), (3.13) a (3.14):

$$\underline{\underline{k_c = 1,303}}$$

Skutečnou hodnotu magnetické indukce ve vzduchové mezeře určíme ze vztahu:

$$B_\delta = B_{00} \cdot \chi_1 \cdot \frac{1}{k_1} \cdot \frac{l}{l_i} \quad (3.15)$$

kde χ_1 je primární činitel vazby
 $\frac{1}{k_1}$ je činitel deformace
 $\frac{l}{l_i}$ je poměr skutečné ku ideální délce železa

χ_1 (primární činitel vazby) při prvním výpočtu odhadujeme (podle počtu pólů a velikosti stroje) a po výpočtu reaktancí provádíme kontrolu správnosti odhadu, případně výpočet opakujeme:

$$\chi_1 = \frac{X_{11}}{X_1} = \frac{X_{11}}{X_{11} + X_{\sigma 1}} \quad (3.16)$$

kde X_{11} je magnetizační reaktance
 X_1 je totální primární reaktance
 $X_{\sigma 1}$ je rozptylová reaktance statoru

$$\underline{\underline{\chi_1 = 0,97}}$$

Činitel deformace $\frac{1}{k_1}$ vyjadřuje zploštění pole ve vzduchové mezeře. Toto zploštění nastává v důsledku změny magnetického odporu železa podél pólové rozteče. Činitel deformace závisí na provedení statorového vinutí (poměrné zkrácení kroku vinutí) a velikosti činitele nasycení přechodové vrstvy k_z . Odhadujeme:

$$\underline{\underline{\frac{1}{k_1} = 0,92}}$$

Za poměr skutečné ku ideální délce železa dosazujeme $\frac{l}{l_i} = 1$, neboť délka statoru a rotoru je stejná.

Skutečná hodnota magnetické indukce ve vzduchové mezeře je tedy podle rovnice (3.15):

$$\underline{\underline{B_{\delta} = 0,71 T}}$$

Magnetické napětí vzduchové mezery dle vztahu (3.11):

$$\underline{\underline{F_{\delta} = 220,9 A}}$$

3.3 Výpočet magnetického napětí zubů statoru

Zdánlivá indukce ve statorovém zubu je dána vztahem:

$$B_{zs}'' = B_{00} \cdot \frac{t_{ds}}{b_{z1} \cdot k_{Fe}} = B_{00} \cdot \frac{\pi \cdot D}{Q_1 \cdot b_{z1} \cdot k_{Fe}} \quad (3.17)$$

kde b_{z1} je šířka zubu statoru u dna

k_{Fe} je činitel plnění železa

$$b_{z1} = \frac{\pi \cdot D_{sp}}{Q_1} - b_{2s} = \frac{\pi \cdot \left(D + 2 \cdot \left(h_{0s} + h_{1s} + h_s - \frac{b_{2s}}{2} \right) \right)}{Q_1} - b_{2s} \quad (3.18)$$

kde D_{sp} je roztečný průměr pro výpočet šířky zubu

h_{0s} je výška krčku drážky statoru

h_{1s} je výška uzávěru drážky statoru

h_s je hloubka drážky statoru

b_{2s} je šířka drážky u dna

$$\underline{\underline{b_{z1} = 4,35 mm}}$$

Hodnota zdánlivé indukce je tedy:

$$\underline{\underline{B_{zs}'' = 1,866 T}}$$

Magnetická indukce v zubu statoru s respektováním deformace magnetického pole ve vzduchové mezeře je dána:

$$B_{zs}' = B_{zs}'' \cdot \frac{1}{k_1} = \underline{\underline{1,72 T}} \quad (3.19)$$

Z tabulky 4-5/2 viz [4]:

$$B_{zs} = B_{zs}' = \underline{\underline{1,72 T}} \quad (3.20)$$

Pro vypočítanou hodnotu B_{zs} odečteme z magnetizační charakteristiky podle tabulky D 2.21 viz [5] pro zuby statoru magnetickou intenzitu:

$$\underline{\underline{H_{zs} = 7000 \text{ A/m}}}$$

Velikost magnetického napětí zubu statoru určíme ze vztahu:

$$F_{zs} = H_{zs} \cdot l_{zs} \quad (3.21)$$

kde l_{zs} je délka indukční čáry

$$l_{zs} = \left(h_s - \frac{b_{2s}}{2} \right) + \Delta l_{zs1} + \Delta l_{zs2} \quad (3.22)$$

kde Δl_{zs1} je prodloužení pro zaoblenou část drážky

Δl_{zs2} je prodloužení pro lichoběžníkový tvar

$$\Delta l_{zs1} = k_{H1s} \cdot \frac{b_{1s}}{2} \quad (3.23)$$

$$\Delta l_{zs2} = k_{H2s} \cdot \frac{b_{2s}}{2} \quad (3.24)$$

kde k_{H1s} je koeficient pro výpočet přírůstku délky indukční čáry u krčku statorové drážky

k_{H2s} je koeficient pro výpočet přírůstku délky indukční čáry u dna statorové drážky

b_{1s} je šířka drážky statoru u krčku

Pro $k_{1s} = \frac{b_{1s}}{t_{ds}} = \frac{5,8}{9,687} = 0,6$ a pro $B''_{zs} = 1,72 \text{ T}$ je podle tabulky 4-7/1 viz [4] koeficient

$$k_{H1s} = 0,3 \rightarrow \Delta l_{zs1} = 0,87 \text{ mm} .$$

Pro $k_{2s} = \frac{b_{2s}}{t_{ds}} = \frac{7,3}{9,687} = 0,75$ a pro $B''_{zs} = 1,72 \text{ T}$ je podle tabulky 4-7/1 viz [4] koeficient

$$k_{H2s} = 0,2 \rightarrow \Delta l_{zs2} = 0,73 \text{ mm} .$$

Délka indukční čáry je tedy podle rovnice (3.22):

$$\underline{\underline{l_{zs} = 7,6 \text{ mm}}}$$

Velikost magnetického napětí zubu statoru podle rovnice (3.21):

$$\underline{\underline{F_{zs} = 53,2 \text{ A}}}$$

3.4 Výpočet magnetického napětí zubů rotoru

Výpočet magnetického napětí zubu rotoru je obdobný jako výpočet magnetického napětí zubu statoru s tím rozdílem, že při výpočtu skutečné hodnoty magnetické indukce B_{zr} je nutné respektovat primární činitel vazby χ_1 .

Zdánlivá indukce v rotorovém zubu je dána vztahem:

$$B_{zr}'' = B_{00} \cdot \frac{t_{dr}}{b_{z2} \cdot k_{Fe}} = B_{00} \cdot \frac{\pi \cdot D}{Q_2 \cdot b_{z2} \cdot k_{Fe}} \quad (3.25)$$

kde b_{z2} je střední šířka zubu rotoru

$$b_{z2} = t_{drx} - b_{rx} = \frac{\pi \cdot (d - 2 \cdot h_{rx})}{Q_2} - b_{rx} \quad (3.26)$$

kde t_{drx} je drážková rozteč zubu rotoru

b_{rx} je šířka drážky v 6-ti desetinách hloubky drážky, $b_{rx} = 3,79 \text{ mm}$ viz výkres plechu rotoru v příloze 4 (na zvoleném průměru)

d je průměr rotoru

h_{rx} je hloubka drážky rotoru, která odpovídá 6-ti desetinám hloubky drážky ($h_r + h_{0r}$),
 $h_{rx} = 8,85 \text{ mm}$ viz výkres plech rotoru v příloze 4 (na zvoleném průměru)

$$\underline{\underline{b_{z2} = 5,42 \text{ mm}}}$$

Hodnota zdánlivé indukce je tedy:

$$\underline{\underline{B_{zr}'' = 1,89 \text{ T}}}$$

Magnetická indukce v zubu rotoru s respektováním deformace magnetického pole ve vzduchové mezeře:

$$B_{zr}' = B_{zr}'' \cdot \chi_1 \cdot \frac{1}{k_1} = 1,89 \cdot 0,97 \cdot 0,92 = \underline{\underline{1,69 \text{ T}}} \quad (3.27)$$

Z tabulky 4-5/2 viz [4]:

$$B_{zr} = B_{zr}' = \underline{\underline{1,69 \text{ T}}} \quad (3.28)$$

Pro vypočítanou hodnotu B_{zr} odečteme z magnetizační charakteristiky D 2.21 viz [5] pro zuby rotoru magnetickou intenzitu:

$$\underline{\underline{H_{zr} = 5700 \text{ A/m}}}$$

Velikost magnetického napětí zubu statoru určíme ze vztahu

$$F_{zr} = H_{zr} \cdot l_{zr} \quad (3.29)$$

kde l_{zr} je délka indukční čáry

$$l_{zr} = \left(h_r - \frac{b_{1r}}{2} - \frac{b_{2r}}{2} \right) + \Delta l_{zr1} + \Delta l_{zr2} \quad (3.30)$$

kde h_r je hloubka drážky rotoru

b_{1r} je šířka drážky rotoru u vzduchové mezery

b_{2r} je šířka drážky rotoru u dna

Δl_{zr1} je prodloužení indukční čáry pro zaoblenou část drážky

Δl_{zr2} je prodloužení indukční čáry pro zaoblenou část drážky

$$\Delta l_{zr1} = k_{H1r} \cdot \frac{b_{1r}}{2} \quad (3.31)$$

$$\Delta l_{zr2} = k_{H2r} \cdot \frac{b_{2r}}{2} \quad (3.32)$$

kde k_{H1r} je koeficient pro výpočet přírůstku délky indukční čáry u krčku rotorové drážky

k_{H2r} je koeficient pro výpočet přírůstku délky indukční čáry u dna rotorové drážky

Pro $k_{1r} = \frac{b_{1r}}{t_{dr}} = \frac{6}{12,236} = 0,49$ a pro $B_{zr}'' = 1,89 T$ je podle tabulky 4-7/1 viz [4] koeficient

$$k_{H1r} = 0,45 \rightarrow \Delta l_{zr1} = 1,35 \text{ mm}.$$

Pro $k_{2r} = \frac{b_{2r}}{t_{dr}} = \frac{1,5}{12,236} = 0,12$ a pro $B_{zr}'' = 1,89 T$ je podle tabulky 4-7/1 viz [4] koeficient

$$k_{H2r} = 0,9 \rightarrow \Delta l_{zr2} = 0,675 \text{ mm}.$$

Délka indukční čáry je tedy podle rovnice (3.30):

$$\underline{\underline{l_{zr} = 12,525 \text{ mm}}}$$

Velikost magnetického napětí zubu rotoru podle rovnice (3.29):

$$\underline{\underline{F_{zr} = 71,4 \text{ A}}}$$

3.5 Výpočet magnetického napětí jha statoru

Pro průměr patní kružnice pro drážky typu „S“ platí vztah, který respektuje vnikání magnetického toku do kořenů zubů:

$$D_{zs} = D + 2 \cdot \left(h_{0s} + h_s + h_{1s} - \frac{1}{6} \cdot b_{2s} \right) \quad (3.33)$$

$$\underline{\underline{D_{zs} = 93,87 \text{ mm}}}$$

Pro výšku statorového jha platí:

$$h_{js} = \frac{D_e - D_{zs}}{2} \quad (3.34)$$

kde D_e je vnější průměr statoru

$$\underline{\underline{h_{js} = 18,57 \text{ mm}}}$$

Amplituda magnetické indukce statorového jha je dána vztahem:

$$B_{js} = B_{00} \cdot \frac{D}{h_{js} \cdot 2p \cdot k_{Fe}} \quad (3.35)$$

$$B_{js} = \underline{\underline{1,67 T}}$$

Tato hodnota indukce ve jhu statoru je identická s indukcí ve jhu statoru při zatížení.

Pro vypočítanou hodnotu magnetické indukce statorového jha při zatížení odečteme z magnetizační charakteristiky podle tabulky D 2.22 viz [5] pro jho statoru magnetickou intenzitu:

$$\underline{\underline{H'_{js} = 1381 A/m}}$$

Magnetické napětí jha statoru je popsáno rovnicí:

$$F_{js} = H_{js} \cdot l_{js} = H'_{js} \cdot l_{js} \cdot k_{0s} \cdot k_{0Bs} \cdot c_{ks} \quad (3.36)$$

kde H_{js} je skutečná magnetická intenzita jha statoru

H'_{js} je náhradní magnetická intenzita jha statoru

l_{js} je délka siločáry statorového jha (polovina pólové rozteče na středním průměru jha)

k_{0s} je opravný činitel – oprava na zploštění křivky magnetické indukce 3. harmonickou

k_{0Bs} je opravný činitel – empirická oprava, která přibližně respektuje vliv změny permeability ve jhu

c_{ks} je opravný činitel – oprava na kruhový průběh indukčních čar

$$l_{js} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{D_{js}}{2p} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{D_e + D_{zs}}{2p} \quad (3.37)$$

kde D_{js} je střední průměr jha statoru

$$\underline{\underline{l_{js} = 88,31 mm}}$$

$$k_{0s} = \frac{8 + \frac{1}{k_1}}{12 - 3 \cdot \frac{1}{k_1}} \quad (3.38)$$

$$\underline{\underline{k_{0s} = 0,965}}$$

$$k_{0Bs} = \frac{1}{0,094 \cdot B_{js} + 0,903} \quad (3.39)$$

$$\underline{\underline{k_{0Bs} = 0,943}}$$

$$c_{ks} = \frac{2 \cdot a_s}{(1 + a_s)} \cdot \frac{1}{\cot gh \left[\frac{p \cdot (1 - a_s)}{a_s} \right]} \cdot \frac{a_s^p + a_s^{-p}}{a_s^p - a_s^{-p}} \quad (3.40)$$

kde a_s je poměr patní kružnice k vnějšímu průměru plechu statoru

$$a_s = \frac{D_{zs}}{D_e} = \frac{D_e - 2h_{js}}{D_e} \quad (3.41)$$

Pro $a_s = 0,716$ je $c_{ks} = f(a_s, p) \approx 0,98$ - viz tabulka 4-10 v [4]

Magnetické napětí jha statoru podle (3.36)

$$\underline{\underline{F_{js} = 108,76 \text{ A}}}$$

Magnetické napětí statoru je dáno:

$$F_s = F_{zs} + F_{js} \quad (3.42)$$

$$\underline{\underline{F_s = 161,96 \text{ A}}}$$

3.6 Výpočet magnetického napětí jha rotoru

Průměr patní kružnice je dán vztahem, který respektuje vnikání magnetického toku do kořenů zubů stejně jako u statoru:

$$d_{zr} = d - 2 \cdot \left(h_{0r} + h_r - \frac{1}{6} \cdot b_{2r} \right) \quad (3.43)$$

$$\underline{\underline{d_{zr} = 44,4 \text{ mm}}}$$

Výška jha rotoru:

$$h_{jr} = \frac{d_{zr} - d_i}{2} \quad (3.44)$$

kde d_i je vnitřní průměr rotoru

$$\underline{\underline{h_{jr} = 7,2 \text{ mm}}}$$

Magnetická indukce jha rotoru v neutrální zóně je dána vztahem:

$$B_{jr} = B_{00} \cdot \frac{D}{(h_{jr} + \Delta h_{jr}) \cdot 2p \cdot k_{Fe}} \cdot \mathcal{X}_1 \quad (3.45)$$

kde Δh_{jr} je prodloužení jha rotoru, které respektuje protékání magnetického toku hřídelem u dvoupólového stroje, $\Delta h_{jr} = 12,45 \text{ mm}$

$$\underline{B_{jr} = 1,53 T}$$

Tato hodnota indukce ve jhu rotoru je identická s indukcí ve jhu rotoru při zatížení.

Pro vypočítanou hodnotu magnetické indukce rotorového jha při zatížení odečteme z magnetizační charakteristiky podle tabulky D 2.22 viz [5] pro jho rotoru magnetickou intenzitu:

$$\underline{H'_{jr} = 657 A/m}$$

Magnetické napětí jha rotoru je popsáno rovnicí:

$$F_{jr} = H_{jr} \cdot l_{jr} = H'_{jr} \cdot l_{jr} \cdot k_{0r} \cdot k_{0Br} \cdot c_{kr} \quad (3.46)$$

kde H_{jr} je skutečná magnetická intenzita jha rotoru

H'_{jr} je náhradní magnetická intenzita jha rotoru

l_{jr} je délka siločáry rotorového jha

k_{0r} je opravný činitel – oprava na zploštění křivky magnetické indukce 3. harmonickou

k_{0Br} je opravný činitel – empirická oprava, která přibližně respektuje vliv permeability ve jhu

c_{kr} je opravný činitel – oprava na kruhový průběh indukčních čar

$$l_{jr} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{d_{jr}}{2p} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{d_i + h_{jr}}{2p} \quad (3.47)$$

kde d_{jr} je střední průměr jha rotoru

$$\underline{l_{jr} = 29,217 mm}$$

$$k_{0r} = f\left(\frac{1}{k_1}\right) - \text{viz tabulka 4-8 v [4]} \quad (3.48)$$

$$\underline{k_{0r} = 0,965}$$

$$k_{0Br} = \frac{1}{0,094 \cdot B_{jr} + 0,903} \quad (3.49)$$

$$\underline{k_{0Br} = 0,955}$$

$$c_{kr} = \frac{2 \cdot a_r}{(1 + a_r)} \cdot \frac{1}{\cot gh\left[\frac{p \cdot (1 - a_r)}{a_r}\right]} \cdot \frac{a_r^p + a_r^{-p}}{a_r^p - a_r^{-p}} \quad (3.50)$$

kde a_r je poměr patní kružnice drážky rotoru k průměru hřídele motoru

$$a_r = \frac{d_{zr}}{d_i} = \frac{d_i + 2h_{jr}}{d_i} \quad (3.51)$$

Pro $a_r = 1,48$ je $c_{kr} = f(a_r, p) \approx 1,02$ - viz tabulka 4-10 v [4]

Magnetické napětí jha rotoru podle (3.46)

$$\underline{F_{jr} = 18,04 \text{ A}}$$

Magnetické napětí rotoru:

$$F_r = F_{zr} + F_{jr} \quad (3.52)$$

$$\underline{F_r = 89,44 \text{ A}}$$

Celkové magnetické napětí na motoru je dáno vztahem:

$$\sum F = F_\delta + F_{zs} + F_{js} + F_{zr} + F_{jr} \quad (3.53)$$

$$\underline{\sum F = 472,3 \text{ A}}$$

Ověření přesnosti výpočtu:

Koeficient nasycení přechodové vrstvy:

$$k_z = 1 + \frac{F_{zs} + F_{zr}}{F_\delta} \quad (3.54)$$

$$\underline{k_z = 1,564}$$

Činitel deformace ve vzduchové mezeře:

$$\frac{1}{k_1} = p_0 + p_1 \cdot k_z + p_2 \cdot k_z^2 + p_3 \cdot k_z^3 + p_4 \cdot k_z^4 \quad (3.55)$$

Koeficienty polynomu $(p_0, p_1, p_2, p_3, p_4)$ pro jednovrstvé vinutí s $q = 4$, $y_{el} = 12$ jsou uvedeny v tabulce 4-2 viz [4]:

$$\underline{\frac{1}{k_1} = 0,922}$$

Hodnota předpokládaného činitele deformace a vypočteného se prakticky neliší.

Magnetizační proud je dán vztahem:

$$I_\mu = \frac{p \cdot \sum F}{0,45 \cdot m_1 \cdot N_{s1} \cdot k_{V1}} \quad (3.56)$$

$$\underline{I_\mu = 1,94 \text{ A}}$$

3.7 Výpočet odporu vinutí statoru

Fázový odpor určíme podle vztahu:

$$R_1 = \rho_{Cu} \cdot \frac{V_{d1} \cdot l_v \cdot Q_1}{S_V \cdot a_1 \cdot m_1} \quad (3.57)$$

kde ρ_{Cu} je měrný elektrický odpor mědi při 20°C

l_v je střední délka statorového vodiče

S_V je průřez vodiče

Střední délka statorového vodiče:

$$l_v = l + l_\varepsilon = l + (k_{l\varepsilon} \cdot t_{y1}) = l + k_{l\varepsilon} \cdot \left(\frac{\pi}{Q_1} \cdot D_1 \cdot y_{1c} \right) \quad (3.58)$$

kde l_ε je délka čela

$k_{l\varepsilon}$ je koeficient udávající poměr mezi skutečnou délkou čela a roztečí cívky ve středu drážky, podle tabulky 5-2 viz [4] je pro $2p=2$ a pro jednovrstvé vinutí $k_{l\varepsilon} = 1,35$

t_{y1} je rozteč cívky ve středu drážky

D_1 je roztečný průměr cívky (obvykle ve středu drážky), $D_1 = 90 \text{ mm}$

y_{1c} je mechanický krok v počtu drážkových roztečí, $y_{1c} = 10$

$$\underline{\underline{l_v = 257 \text{ mm}}}$$

Průřez vodiče určíme ze vztahu:

$$S_V = \frac{I_{ln}}{\sigma \cdot a_1} \quad (3.59)$$

kde σ je proudová hustota, $\sigma = 7,5 \text{ A/mm}^2$

Průřezu $\underline{\underline{S_V = 0,6 \text{ mm}^2}}$ odpovídá průměr vodiče $d = 0,87 \text{ mm}$. Z důvodu nižší pracnosti zvoleny dva paralelní dráty o průměrech $d_1 = 0,6 \text{ mm}$, $d_2 = 0,63 \text{ mm}$.

Z tabulky 6-11 viz [4] určíme měrný elektrický odpor mědi při 20°C:

$$\rho_{Cu} = \frac{1}{57} \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

Fázový odpor je tedy podle rovnice (3.57):

$$\underline{\underline{R_1 = 2,825 \Omega}}$$

Po oteplení $\vartheta_s = 80 \text{ K}$ bude hodnota fázového odporu:

$$R_{1\vartheta} = R_1 \cdot \frac{235 + \vartheta_s}{235 + 20} \quad (3.60)$$

$$\underline{\underline{R_{1\vartheta} = 3,49 \Omega}}$$

3.8 Výpočet odporu vinutí rotoru

Odpor vinutí rotoru určíme ze vztahu:

$$R_2 = R_t + \frac{2 \cdot R_k}{\left(2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot p}{Q_2}\right)^2} \quad (3.61)$$

kde R_t je tyče rotorové klece

R_k je odpor kruhu

Pro odpor tyče rotorové klece platí vztah:

$$R_t = \rho_{Al} \cdot \frac{l_t}{S_t} \quad (3.62)$$

kde ρ_{Al} je měrný odpor hliníku při 20 °C

l_t je délka tyče, $l_t = 118 \text{ mm}$

S_{tr} je plocha drážky rotoru

Z tabulky 6-11 viz [4] odečteme měrný odpor hliníku při 20 °C:

$$\rho_{Al} = \frac{1}{34} \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$S_{tr} = S_{1r} + S_{hr} + S_{2r} \quad (3.63)$$

kde S_{1r} je plocha u otevření drážky

S_{hr} je plocha lichoběžníkové části

S_{2r} je plocha u dna drážky

$$S_{1r} = \frac{\pi}{8} \cdot b_{1r}^2 \quad (3.64)$$

$$S_{hr} = \frac{1}{2} \cdot (b_{1r} + b_{2r}) \cdot \left(h_r - \frac{b_{1r}}{2} - \frac{b_{2r}}{2} \right) \quad (3.65)$$

$$S_{2r} = \frac{\pi}{8} \cdot b_{2r}^2 \quad (3.66)$$

Plocha drážky rotoru podle rovnice (3.63):

$$\underline{S_{tr} = 54,4 \text{ mm}^2}$$

Odpor tyče rotorové klece podle rovnice (3.62):

$$\underline{R_l = 63,8 \cdot 10^{-6} \Omega}$$

Pro odpor kruhu platí vztah:

$$R_k = \rho_{Al} \cdot \frac{\pi \cdot D_{C2}}{S_{C2} \cdot Q_2} \quad (3.67)$$

kde D_{C2} je střední průměr kruhu nakrátko

S_{C2} je průřez kruhu nakrátko

$$\underline{D_{C2} = 53,0 \text{ mm}}$$

$$\underline{S_{C2} = 206,0 \text{ mm}^2}$$

Velikost odporu kruhu vypočítáme ze vztahu (3.67):

$$\underline{R_k = 1,25 \cdot 10^{-6} \Omega}$$

Celková hodnota odporu vinutí rotoru je dána vztahem (3.61):

$$\underline{R_2 = 86,9 \cdot 10^{-6} \Omega}$$

Přepočet odporu vinutí rotoru na stator:

$$R_{21} = R_2 \cdot \frac{m_1 \cdot (N_{S1} \cdot k_{V1})^2}{m_2 \cdot (N_{S2} \cdot k_{V2})^2} \quad (3.68)$$

kde m_2 je počet fází rotoru, u klecového vinutí platí $m_2 = Q_2$

N_{S2} je počet závitů rotoru

k_{V2} je činitel vinutí rotoru, u klecového vinutí platí $k_{V2} = 1$

Počet závitů na rotoru určíme podle vztahu:

$$N_{S2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{d2} \cdot Q_2}{a_2 \cdot m_2} \quad (3.69)$$

kde V_{d2} je počet vodičů v drážce rotoru, u klecového vinutí platí $V_{d2} = 1$

a_2 je počet paralelních větví rotoru, u klecového vinutí platí $a_2 = 1$

Velikost přepočteného odporu vinutí rotoru na stator je podle rovnice (3.68):

$$\underline{R_{21} = 1,78 \Omega}$$

Po oteplení o $\vartheta_r = 95 \text{ K}$ bude hodnota odporu vinutí rotoru přepočtená na stator:

$$R_{21\vartheta} = R_{21} \cdot \frac{235 + \vartheta_r}{235 + 20} \quad (3.70)$$

$$\underline{\underline{R_{21\vartheta} = 2,3 \Omega}}$$

3.9 Výpočet magnetizační indukčnosti

Magnetizační reaktanci určíme ze vztahu:

$$X_{11} = 16 \cdot m_1 \cdot f_1 \cdot (N_{s1} \cdot k_{v1})^2 \cdot \frac{\tau_p}{\delta''} \cdot \frac{l}{p} \cdot 10^{-7} \quad (3.71)$$

kde τ_p je pólová rozteč

δ'' je ekvivalentní vzduchová mezera

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot D}{2p} \quad (3.72)$$

$$\delta'' = \delta' \cdot k_F = \delta \cdot k_C \cdot k_F \quad (3.73)$$

kde δ' je náhradní vzduchová mezera

k_F je koeficient nasycení magnetického obvodu

$$k_F = \frac{\sum F}{F_\delta} \quad (3.74)$$

$$\underline{\underline{k_F = 2,14}}$$

Ekvivalentní vzduchová mezera je potom dle rovnice (3.73):

$$\underline{\underline{\delta'' = 0,837 \text{ mm}}}$$

Magnetizační reaktance je tedy podle vztahu (3.71):

$$\underline{\underline{X_{11} = 105,95 \Omega}}$$

Této magnetizační reaktanci odpovídá indukčnost o velikosti:

$$L_{11} = \frac{X_{11}}{\omega} \quad (3.75)$$

kde ω je úhlová rychlost magnetického pole statoru

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \quad (3.76)$$

$$\underline{\underline{L_{11} = 0,337 \text{ H}}}$$

3.10 Výpočet rozptylových indukčností

3.10.1 Rozptylová indukčnost statoru

Rozptylová reaktance statoru je dána vztahem:

$$X_{\sigma 1} = X_{d1} + X_{c1} + X_{\delta 1} \quad (3.77)$$

kde X_{d1} je drážková reaktance statoru

X_{c1} je reaktance prostoru čel statoru

$X_{\delta 1}$ je reaktance diferenčního rozptylu

Drážkovou reaktanci statoru určíme z rovnice:

$$X_{d1} = 4 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \mu_0 \cdot \frac{N_{s1}^2 \cdot l}{p \cdot q_1} \cdot \lambda_1 \quad (3.78)$$

kde λ_1 je jednotková vodivost drážky statoru

Jednotkovou vodivost drážky statoru určíme podle vztahu:

$$\lambda_1 = \lambda_{2s} + \lambda_{hs} + \lambda_{zs} + \lambda_{ks} + \lambda_{zis} \quad (3.79)$$

kde λ_{2s} je jednotková vodivost půlkruhové části u dna drážky

λ_{hs} je jednotková vodivost lichoběžníkové části drážky

λ_{zs} je jednotková vodivost klínového prostoru závěru drážky

λ_{ks} je jednotková vodivost krčku drážky

λ_{zis} je jednotková vodivost prostoru nad klínem, kde bývá přeložena drážková izolace

Jednotková vodivost půlkruhové části u dna drážky je dána vztahem:

$$\lambda_{2s} = \frac{S_{2s}^2}{S_{1s}^2} \cdot \lambda_{2\bullet} \quad (3.80)$$

kde S_{2s} je plocha půlkruhové části u dna drážky

S_{1s} je plocha půlkruhové části u dna drážky a lichoběžníkové části drážky

$\lambda_{2\bullet}$ je vodivost půlkruhové části u dna drážky zaplněné vodičem, $\lambda_{2\bullet} = 0,178$

$$S_{2s} = \frac{\pi}{8} \cdot b_{2s}^2 \quad (3.81)$$

$$S_{1s} = S_{2s} + S_{hs} \quad (3.82)$$

kde S_{hs} je plocha lichoběžníkové části drážky statoru

$$S_{hs} = \frac{1}{2} \cdot (b_{1s} + b_{2s}) \cdot h_{ls} \quad (3.83)$$

kde h_{ls} je hloubka lichoběžníkové části drážky statoru, $h_{ls} = 6 \text{ mm}$

Jednotková vodivost půlkruhové části u dna drážky je podle vztahu (3.80):

$$\underline{\underline{\lambda_{2s} = 0,0215}}$$

Jednotková vodivost lichoběžníkové části drážky je dána vztahem:

$$\lambda_{hs} = \frac{S_{2s}^2 \cdot \lambda_{L1s} + 2 \cdot \lambda_{2hs} \cdot S_{2s} \cdot S_{hs} + S_{hs}^2 \cdot \lambda_{L2s}}{S_{ts}^2} \quad (3.84)$$

kde λ_{L1s} je vodivost lichoběžníkové části drážky bez vodičů (bez proudu)

λ_{2hs} je vzájemná vodivost mezi půlkruhovou a lichoběžníkovou částí drážky

λ_{L2s} je vodivost lichoběžníkové části drážky s vodičem (při průtoku proudu)

$$\lambda_{L1s} = \frac{\ln\left(\frac{b_{2s}}{b_{1s}}\right)}{2 \cdot \arctg\left(\frac{b_{2s} - b_{1s}}{2h_{ls}}\right)} \quad (3.85)$$

$$\lambda_{L2s} = \frac{h_{ls}}{3b_{1s}} \cdot k_{tzs} \quad (3.86)$$

kde k_{tzs} je korekční činitel pro stator

$$k_{tzs} = \frac{3}{n_s^2} \cdot \frac{b_{1s}}{b_{2s}} \cdot \left[\frac{m_s}{4} + 1 + \frac{0,5 \cdot m_s^2 - m_s + \ln(m_s + 1)}{m_s^3} \right] \quad (3.87)$$

kde n_s je poměr šířek drážky statoru zvětšený o jednu

m_s je poměr šířek drážky statoru zmenšený o jednu

$$n_s = \frac{b_{1s}}{b_{2s}} + 1 \quad (3.88)$$

$$m_s = \frac{b_{1s}}{b_{2s}} - 1 \quad (3.89)$$

Vzájemná vodivost mezi půlkruhovou a lichoběžníkovou částí drážky je dána vztahem:

$$\lambda_{2hs} = \frac{h_{ls}}{2b_{1s}} \cdot k_{vzs} \quad (3.90)$$

kde k_{vzs} je korekční činitel pro stator

$$k_{vzs} = 2 \cdot \frac{m_s + 1}{n_s} \cdot \left[\frac{1}{2} + \frac{m_s - \ln(m_s + 1)}{m_s^2} \right] \quad (3.91)$$

Jednotková vodivost lichoběžníkové části drážky je podle vztahu (3.84):

$$\underline{\underline{\lambda_{hs} = 0,373}}$$

Jednotková vodivost klínového prostoru závěru drážky je dána vztahem:

$$\lambda_{zs} = \frac{2,3 \cdot h_{1s}}{b_{0s} + b_{1s}} \quad (3.92)$$

$$\underline{\underline{\lambda_{zs} = 0,261}}$$

Jednotková vodivost krčku drážky, za předpokladu, že $\frac{h_{0s}}{b_{0s}} < 1$ je dána vztahem:

$$\lambda_{ks} = 1,3 \cdot \frac{h_{0s}}{b_{0s}} \quad (3.93)$$

$$\underline{\underline{\lambda_{ks} = 0,217}}$$

Za předpokladu, že $\left(\frac{u_k + \sum i_s}{b_{1s}} \right) < 0,35$, je jednotková vodivost prostoru nad klínem dána

vztahem:

$$\lambda_{zis} = 0,358 \cdot \left(\frac{u_k + \sum i_s}{b_{1s}} \right) + 0,653 \cdot \left(\frac{u_k + \sum i_s}{b_{1s}} \right) \quad (3.94)$$

kde $u_k = 0,2 \text{ mm}$

$\sum i_s$ je izolace, $\sum i_s = 0,3 \text{ mm}$

$$\underline{\underline{\lambda_{zis} = 0,087}}$$

Jednotková vodivost drážky statoru je tedy podle rovnice (3.79):

$$\underline{\underline{\lambda_1 = 0,9595}}$$

Drážková reaktance statoru je podle rovnice (3.78):

$$\underline{\underline{X_{d1} = 0,656 \Omega}}$$

Reaktance prostoru čel statoru se určí podle rovnice:

$$X_{c1} = \frac{X_c}{2} \quad (3.95)$$

kde X_c je celková reaktance prostoru čel

$$X_c = 4 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \mu_0 \cdot \frac{N_{s1}^2 \cdot l_c}{p} \cdot \lambda_c \quad (3.96)$$

kde λ_c je jednotková vodivost prostoru čel, $\lambda_c = 0,3$ viz tabulka 5-3 v [4]

$$\underline{\underline{X_c = 1,33 \Omega}}$$

$$\underline{\underline{X_{c1} = 0,665 \Omega}}$$

Reaktance diferenčního rozptylu je dána vztahem:

$$X_{\delta 1} = \tau_{\delta 1\%} \cdot X_{11} \cdot k_F \quad (3.96)$$

kde $\tau_{\delta 1\%}$ je činitel diferenčního rozptylu, $\tau_{\delta 1\%} = 0,88965$ viz tabulka 5-10/a v [4]

$$\underline{\underline{X_{\delta 1} = 2,017 \Omega}}$$

Rozptylová reaktance statoru je tedy podle rovnice (3.77):

$$\underline{\underline{X_{\sigma 1} = 3,338 \Omega}}$$

Rozptylové reaktanci statoru odpovídá indukčnost o velikosti:

$$\underline{\underline{L_{\sigma 1} = 0,011 L}}$$

Nyní můžeme překontrolovat primárního činitele vazby podle rovnice (3.16), kterého jsme na začátku výpočtu volili:

$$\chi_1 = \frac{X_{11}}{X_1} = \frac{X_{11}}{X_{11} + X_{\sigma 1}} = \underline{\underline{0,97}}$$

3.10.2 Rozptylová indukčnost rotoru

Rozptylová reaktance rotoru přepočtená na stator je dána vztahem:

$$X'_{\sigma 2} = X'_{d2} + X'_{c2} + X'_{\delta 2} \quad (3.97)$$

kde X'_{d2} je drážková reaktance rotoru přepočtená na stator

X'_{c2} je reaktance prostoru čel rotoru

$X'_{\delta 2}$ je reaktance diferenčního rozptylu

$$X'_{d2} = X''_{d2} \cdot \frac{4 \cdot m_1 \cdot (N_{s1} \cdot k_{v1})^2}{Q_2} \quad (3.98)$$

kde X''_{d2} je drážková reaktance rotoru

$$X_{d2}'' = 4 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \mu_0 \cdot \frac{N_{S2}^2 \cdot l}{p \cdot q_2} \cdot \lambda_2 \quad (3.99)$$

kde q_2 je počet drážek na pól a fázi rotoru
 λ_2 je jednotková vodivost drážky rotoru

$$q_2 = \frac{Q_2}{2 \cdot p \cdot m_2} \quad (3.100)$$

Jednotková vodivost drážky rotoru je dána vztahem:

$$\lambda_2 = \lambda_{1r} + \lambda_{hr} + \lambda_{2r} \quad (3.101)$$

kde λ_{1r} je jednotková vodivost půlkruhové části u dna drážky
 λ_{hr} je jednotková vodivost lichoběžníkové části drážky
 λ_{2r} je jednotková vodivost horní půlkruhové části drážky

$$\lambda_{1r} = \frac{(S_{2r} + S_{hr})^2 \cdot \lambda_{1\bullet r} + 2 \cdot \lambda_{12hr} \cdot (S_{2r} + S_{hr}) \cdot S_{1r} + S_{1r}^2 \cdot \lambda_{1\circ r}}{S_{1r}^2} \quad (3.102)$$

kde $\lambda_{1\bullet r}$ je jednotková vodivost spodní půlkruhové části drážky zaplněné vodičem
 λ_{12hr} je vzájemná vodivost
 $\lambda_{1\circ r}$ je jednotková vodivost spodní půlkruhové části drážky bez vodičů

$$\lambda_{1\bullet r} = \frac{0,437}{0,359 + \frac{b_{0r}}{b_{1r}}} - 0,2115 \quad (3.103)$$

$$\lambda_{1\circ r} = \frac{1,152}{0,696 + \frac{b_{0r}}{b_{1r}}} - 0,338 \quad (3.104)$$

$$\lambda_{12hr} = \frac{0,496}{0,378 + \frac{b_{0r}}{b_{1r}}} - 0,186 \quad (3.105)$$

$$\lambda_{2r} = \frac{S_{2r}^2}{\sum S_r^2} \cdot \lambda_{2\bullet} \quad (3.106)$$

Jednotková vodivost lichoběžníkové části drážky je dána vztahem:

$$\lambda_{hr} = \frac{S_{2r}^2 \cdot \lambda_{L1r} + 2 \cdot \lambda_{2hr} \cdot S_{2r} \cdot S_{hr} + S_{hr}^2 \cdot \lambda_{L2r}}{S_{tr}^2} \quad (3.107)$$

kde λ_{L1r} je vodivost lichoběžníkové části drážky bez vodičů (bez proudu)

λ_{2hr} je vzájemná vodivost mezi půlkruhovou a lichoběžníkovou částí drážky

λ_{L2r} je vodivost lichoběžníkové části drážky s vodičem (při průtoku proudu)

$$\lambda_{L1r} = \frac{\ln\left(\frac{b_{2r}}{b_{1r}}\right)}{2 \cdot \operatorname{arctg}\left(\frac{b_{2r} - b_{1r}}{2h_{1r}}\right)} \quad (3.108)$$

$$\lambda_{L2r} = \frac{h_{1r}}{3b_{1r}} \cdot k_{tzr} \quad (3.109)$$

$$\lambda_{2hr} = \frac{h_{1r}}{2b_{1r}} \cdot k_{vzr} \quad (3.110)$$

kde h_{1r} je hloubka lichoběžníkové části drážky rotoru, $h_{1r} = 10,5 \text{ mm}$

k_{tzr} je korekční činitel pro rotor

k_{vzr} je korekční činitel pro rotor

$$k_{tzr} = \frac{3}{n_r^2} \cdot \frac{b_{1r}}{b_{2r}} \cdot \left[\frac{m_r}{4} + 1 + \frac{0,5 \cdot m_r^2 - m_r + \ln(m_r + 1)}{m_r^3} \right] \quad (3.111)$$

$$k_{vzr} = 2 \cdot \frac{m_r + 1}{n_r} \cdot \left[\frac{1}{2} + \frac{m_r - \ln(m_r + 1)}{m_r^2} \right] \quad (3.112)$$

kde n_r je poměr šířek drážky zvětšený o jednu

m_r je poměr šířek drážky zmenšený o jednu

$$n_r = \frac{b_{1r}}{b_{2r}} + 1 \quad (3.113)$$

$$m_r = \frac{b_{1r}}{b_{2r}} - 1 \quad (3.114)$$

Drážková reaktance rotoru přepočtená na stator je tedy podle rovnice (3.98):

$$\underline{X'_{d2}} = 0,847 \Omega$$

Reaktance prostoru čel rotoru je dána rovnicí:

$$X'_{c2} = X_{c1} = \frac{X_c}{2} \quad (3.115)$$

$$\underline{X'_{c2}} = 0,665 \Omega$$

Reaktance diferenčního rozptylu je dána rovnicí:

$$X'_{\delta 2} = \tau_{\delta 2\%} \cdot X_{11} \cdot k_F \quad (3.116)$$

kde $\tau_{\delta 2}$ je diferenční rozptyl klece

$$\tau_{\delta 2\%} = \frac{10}{3} \cdot \left(\frac{10}{m_2} \right)^2 \quad (3.117)$$

$$\underline{X'_{\delta 2}} = 2,093 \Omega$$

Rozptylová reaktance rotoru přepočtená na stator je tedy podle rovnice (3.97):

$$\underline{X'_{\sigma 2}} = 3,605 \Omega$$

Vliv natočení drážek je dán vztahem:

$$\beta = \frac{b}{t_{dr}} \quad (3.118)$$

kde b je natočení rotorové drážky, $b = 15,5 \text{ mm}$

$$\underline{\beta} = 1,267$$

Tj. rotorová drážka je natočena o 126,7 % k drážkové rozteči rotoru.

Rozptylová reaktance rotoru je tedy dána vztahem:

$$X_{\sigma 2} = X'_{\sigma 2} \cdot \beta \quad (3.119)$$

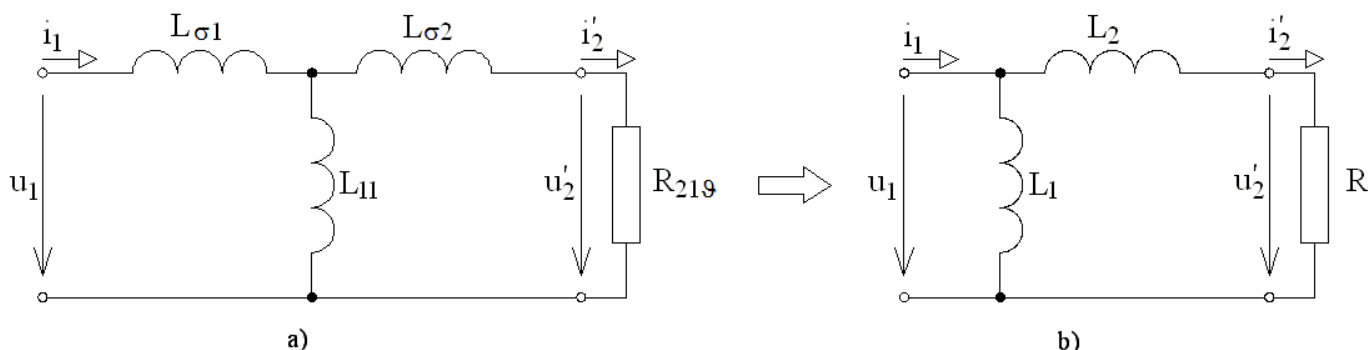
$$\underline{X_{\sigma 2}} = 4,568 \Omega$$

Této rozptylové reaktanci odpovídá indukčnost:

$$L_{\sigma 2} = \frac{X_{\sigma 2}}{\omega} \quad (3.120)$$

$$\underline{L_{\sigma 2}} = 0,0145 \text{ H}$$

3.11 Přepočet T-článku na Γ -článek



Obr. 3.1: Náhradní zapojení asynchronního motoru ve tvaru: a) T-článku, b) Γ -článku

Pro přepočet T-článku na Γ -článek musíme najít vztahy popisující tento přepočet. Postup pak bude následující:

- Určení vstupní impedance asynchronního motoru ve tvaru T-článku dle obrázku 3.1a):

$$Z_{vst,T} = \frac{p^2(L_{\sigma 1}L_{\sigma 2} + L_{\sigma 1}L_{11} + L_{11}L_{\sigma 2}) + p(L_{\sigma 1}R_{21\vartheta} + L_{11}R_{21\vartheta})}{p(L_{\sigma 2} + L_{11}) + R_{21\vartheta}} \quad (3.121)$$

- Určení vstupní impedance asynchronního motoru ve tvaru Γ -článku dle obrázku 3.1b):

$$Z_{vst,\Gamma} = \frac{p^2L_1L_2 + pL_1R}{p(L_2 + L_1) + R} \quad (3.122)$$

- Porovnání pravých stran impedančních rovnic (3.121) a (3.122):

$$\frac{p^2(L_{\sigma 1}L_{\sigma 2} + L_{\sigma 1}L_{11} + L_{11}L_{\sigma 2}) + p(L_{\sigma 1}R_{21\vartheta} + L_{11}R_{21\vartheta})}{p(L_{\sigma 2} + L_{11}) + R_{21\vartheta}} = \frac{p^2L_1L_2 + pL_1R}{p(L_2 + L_1) + R} \quad (3.123)$$

Tuto rovnici nejprve zbavíme zlomků a poté porovnáme koeficienty u mocnin p^2 , p^1 , p^0 . Tím získáme soustavu tří rovnic o třech neznámých L_1 , L_2 , R :

$$L_1 = L_{\sigma 1} + L_{11} \quad (3.124)$$

$$L_2 = \frac{L_{\sigma 2}(L_{\sigma 1} + L_{11})^2 + L_{\sigma 1}L_{11}(L_{\sigma 1} + L_{11})}{L_{11}^2} \quad (3.125)$$

$$R = R_{21\vartheta} \frac{(L_{\sigma 1} + L_{11})^2}{L_{11}^2} \quad (3.126)$$

Pokud za parametry popisující T-článek dosadíme námi vypočítané hodnoty z předchozích kapitol:

$$L_{\sigma_1} = 0,011 \text{ H}$$

$$L_{11} = 0,337 \text{ H}$$

$$L_{\sigma_2} = 0,0145 \text{ H}$$

$$R_{21\vartheta} = 1,78 \Omega$$

Získáme hledané parametry náhradního zapojení ve tvaru Γ -článku:

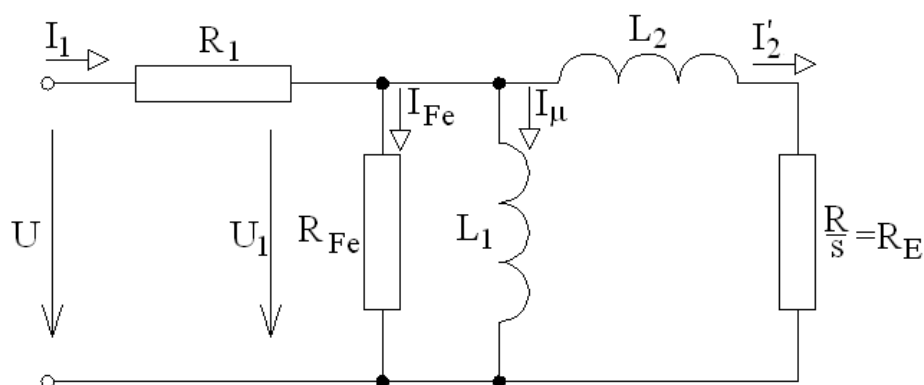
$$\underline{\underline{L_1 = 0,348 \text{ H}}}$$

$$\underline{\underline{L_2 = 0,027 \text{ H}}}$$

$$\underline{\underline{R = 2,453 \Omega}}$$

4 VÝPOČET MOMENTOVÉ A PROUDOVÉ CHARAKTERISTIKY ASYNCHRONNÍHO MOTORU

V předchozích kapitolách byla provedena identifikace parametrů náhradního zapojení asynchronního motoru dle obr. 2.2 b). A byl také proveden výpočet těchto parametrů z konstrukčních údajů. Tyto parametry mohou sloužit k výpočtu momentu asynchronního motoru. Moment vypočítáme podle obr. 2.2 b).



Obr. 4.1: Náhradní zapojení asynchronního motoru ve tvaru Γ -článku pro výpočet momentové charakteristiky

Vstupní impedanci náhradního zapojení asynchronního motoru určíme dle obr. 4.1:

$$\frac{U}{I} = Z_{vst} = \frac{R_1 R_E R_{Fe} - \omega^2 L_1 L_2 (R_1 + R_{Fe}) + j\omega(L_1 + L_2) R_1 R_{Fe} + j\omega R_E (R_1 + R_{Fe})}{R_E R_{Fe} - \omega^2 L_1 L_2 + j\omega(L_1 R_{Fe} + L_2 R_{Fe} + L_1 R_E)} \quad (4.1)$$

Napětí U_1 v náhradním zapojení dle obr. 4.1 je dáno:

$$U_1 = \frac{\frac{j\omega L_1 R_{Fe}}{j\omega L_1 + R_{Fe}} (j\omega L_2 + R_E)}{\frac{j\omega L_1 R_{Fe}}{j\omega L_1 + R_{Fe}} + j\omega L_2 + R_E} U \quad (4.2)$$

$$R_1 + \frac{j\omega L_1 + R_{Fe}}{\frac{j\omega L_1 R_{Fe}}{j\omega L_1 + R_{Fe}} + j\omega L_2 + R_E}$$

$$U_1 = U \frac{j\omega L_1 R_{Fe} (R_E + j\omega L_2)}{R_1 R_E R_{Fe} - \omega^2 L_1 L_2 (R_1 + R_{Fe}) + j\omega (L_1 + L_2) R_1 R_{Fe} + j\omega L_1 R_E (R_1 + R_{Fe})} \quad (4.3)$$

Proud rotoru přepočtený na stator je dán rovnicí:

$$I_2' = \frac{U_1}{R_E + j\omega L_2} \quad (4.4)$$

$$I_2' = U \frac{j\omega L_1 R_{Fe}}{R_1 R_E R_{Fe} - \omega^2 L_1 L_2 (R_1 + R_{Fe}) + j\omega (L_1 + L_2) R_1 R_{Fe} + j\omega L_1 R_E (R_1 + R_{Fe})}$$

$$|I_2'| = \frac{U}{\sqrt{\left[R_1 \left(1 + \frac{L_2}{L_1} \right) + R_E \left(1 + \frac{R_1}{R_{Fe}} \right) \right]^2 + \left[\omega L_2 \left(1 + \frac{R_1}{R_{Fe}} \right) - \frac{R_1 R_E}{\omega L_1} \right]^2}} \quad (4.5)$$

Výkon ve vzduchové mezeře je dán vztahem:

$$P_\delta = 2\pi m_s M = 2\pi \frac{\omega_s}{2\pi} M = \omega_s M = \frac{\omega}{p} M \quad (4.6)$$

Elektrický příkon na ekvivalentním odporu $R_E = \frac{R}{s}$ se rovná:

$$P_{el} = 3R_E |I_2'|^2 = 3 \frac{R}{s} |I_2'|^2 \quad (4.7)$$

Přičemž platí:

$$P_\delta = P_{el} \quad (4.8)$$

$$M \frac{\omega}{p} = 3 \frac{R}{s} |I_2'|^2 \quad (4.9)$$

Odtud tedy:

$$M = 3 \frac{Rp}{\omega s} |I_2'|^2 \quad (4.10)$$

Po dosazení čtverce absolutní hodnoty proudu I_2' do rovnice (4.10) získáme základní rovnici momentové charakteristiky asynchronního motoru:

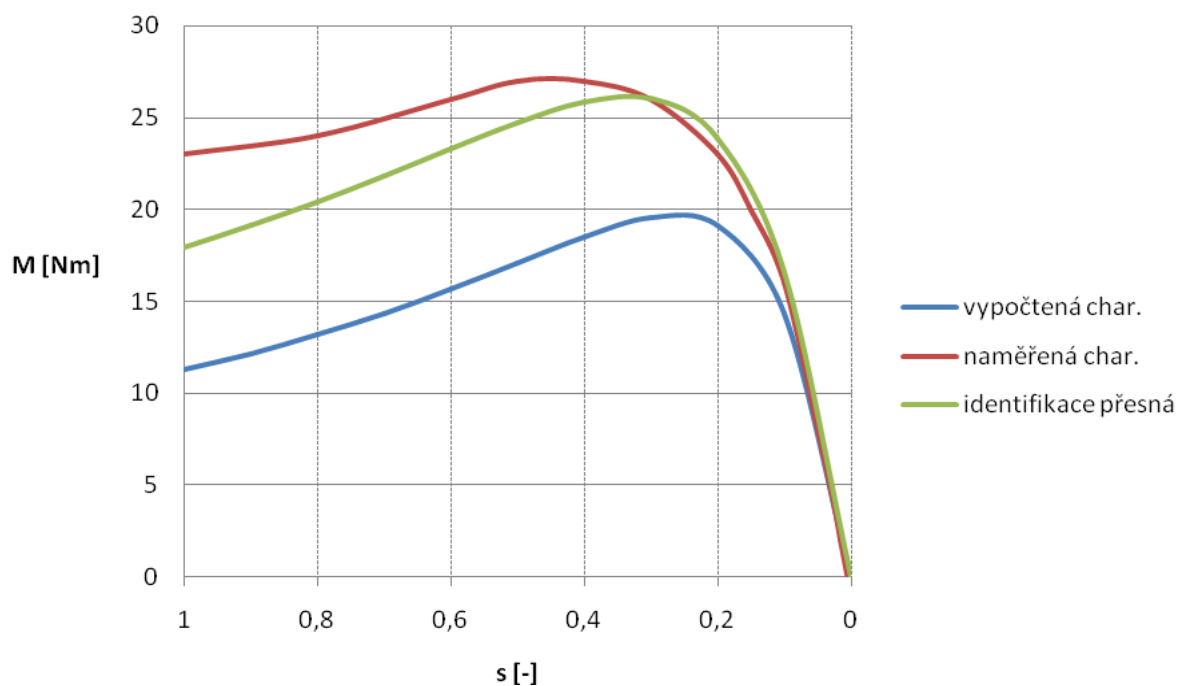
$$M = \frac{3U^2 R p}{\omega s} \frac{1}{\left[\left(1 + \frac{L_2}{L_1} \right) R_1 + \left(1 + \frac{R_1}{R_{Fe}} \right) \frac{R}{s} \right]^2 + \left[\left(1 + \frac{R_1}{R_{Fe}} \right) \omega L_2 - \frac{R_1 R}{\omega L_1 s} \right]^2} \quad (4.11)$$

Celkový proud motoru plyne přímo z rovnice (4.1)

$$I = U \frac{\frac{\omega}{R_{Fe}} + \left(1 + \frac{L_2}{L_1} \right) \frac{\omega}{pR} s + j \left(\frac{\omega^2 L_2}{pR_{Fe} R} s - \frac{1}{L_1} \right)}{\left(1 + \frac{R_1}{R_{Fe}} \right) \omega + \left(1 + \frac{L_2}{L_1} \right) \frac{R_1 \omega}{pR} s + j \left[\left(1 + \frac{R_1}{R_{Fe}} \right) \frac{\omega^2 L_2}{pR} s - \frac{R_1}{L_1} \right]} \quad (4.12)$$

Velikost proudu je pak dána rovnicí:

$$|I| = U \sqrt{\frac{\left[\frac{\omega}{R_{Fe}} + \left(1 + \frac{L_2}{L_1} \right) \frac{\omega}{pR} s \right]^2 + \left[\frac{\omega^2 L_2}{R_{Fe} pR} s - \frac{1}{L_1} \right]^2}{\left[\left(1 + \frac{R_1}{R_{Fe}} \right) \omega + \left(1 + \frac{L_2}{L_1} \right) \frac{R_1 \omega}{pR} s \right]^2 + \left[\left(1 + \frac{R_1}{R_{Fe}} \right) \frac{\omega^2 L_2}{pR} s - \frac{R_1}{L_1} \right]^2}} \quad (4.13)$$



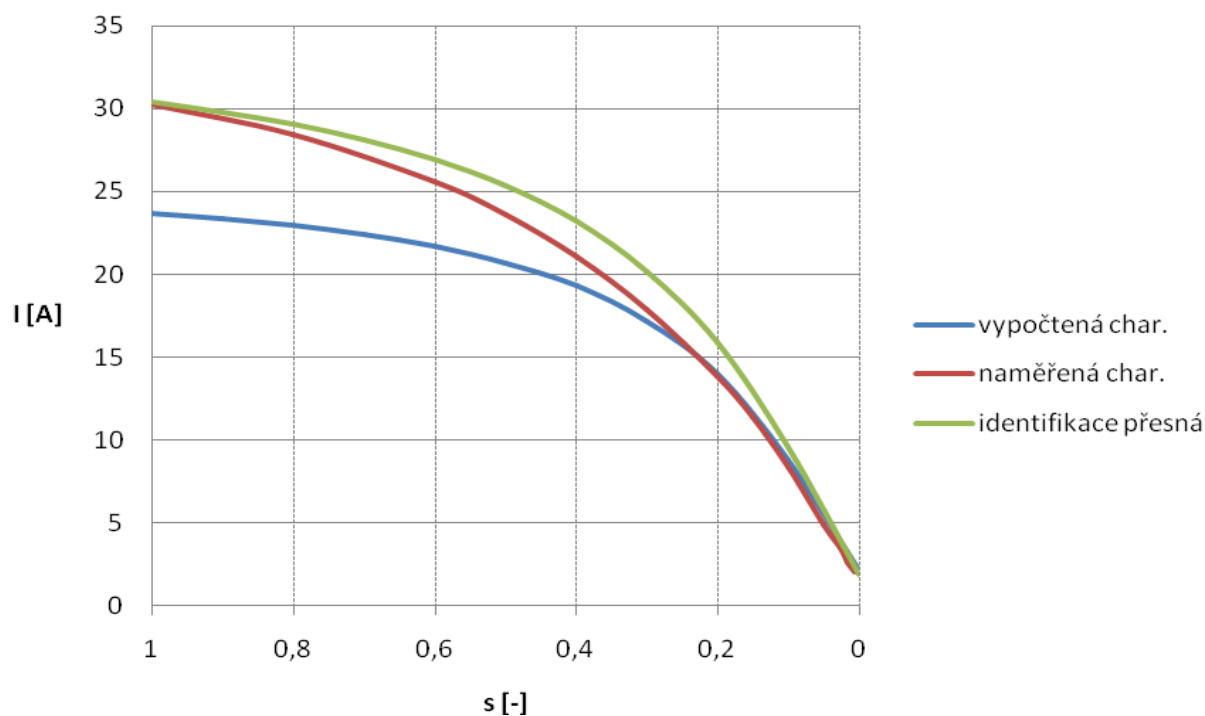
Obr. 4.2: Momentová charakteristika asynchronního motoru AOM090L02-016

V grafu na obr. 4.2 jsou zobrazeny tři průběhy:

- Moment změřený (červená křivka)
- Moment spočítaný – parametry získány z identifikace přesné (zelená křivka)
- Moment spočítaný – návrh motoru z konstrukčních údajů (modrá křivka)

Z jednotlivých průběhů momentových charakteristik v grafu 4.2 plyne, že průběh momentové charakteristiky získané měřením a výpočtem je odlišný. Rozdíl momentové charakteristiky získané měřením a výpočtem je způsoben jednak nepřesnostmi při měření (nastavování dynamometru, vliv kmitočtu sítě, oteplení motoru během měření), jednak způsobem výpočtu momentu podle rovnice (4.11). Při výpočtu pomocí této rovnice totiž považujeme jednotlivé parametry za konstantní. U reálného stroje je tomu ovšem jinak. Jednotlivé parametry náhradního zapojení se v průběhu měření mění, především v závislosti na oteplení motoru.

V grafu na obr. 4.2 jsou rovněž zobrazeny průběhy momentových charakteristik získané výpočtem pomocí parametrů určených z identifikace přesné (zelená křivka) a z parametrů získaných z návrhu při využití konstrukčních údajů (modrá křivka). Rozdílnost obou charakteristik získaných výpočtem v nelineární části křivky je způsoben řadou zjednodušení, které bylo nutno přijmout během výpočtu.



Obr. 4.3: Proudová charakteristika asynchronního motoru AOM090L02-016

V grafu na obr. 4.3 jsou zobrazeny tři průběhy:

- Proud změřený (červená křivka)
- Proud spočítaný – parametry získány z identifikace přesné (zelená křivka)
- Proud vypočítaný – návrh motoru z konstrukčních údajů (modrá křivka)

Jak již bylo zmíněno, dosažení identického průběhu naměřených i vypočtených momentových i proudových charakteristik je nemožné. Je to dáno jednak způsobem výpočtu momentových resp. proudových charakteristik podle rovnic (4.11) resp. (4.13), kdy považujeme jednotlivé parametry při výpočtu za konstantní, jednak způsobem měření, kdy během měření dochází vlivem oteplení ke změně odporů vinutí stroje. Obdobně jako v případě momentové charakteristiky lze i v případě proudové charakteristiky za příčinu rozdílnosti obou průběhů vypočtených křivek považovat řadu zjednodušení, které bylo nutno při výpočtu přijmout.

5 CITLIVOSTNÍ ANALÝZA PRVKŮ NÁHRADNÍHO ZAPOJENÍ

Jak již bylo demonstrováno, dosažení shodného průběhu naměřené a vypočítané momentové a proudové charakteristiky je velice obtížné. Při výpočtu momentové charakteristiky podle rovnice (5.1), a proudové charakteristiky podle rovnice (5.24), jsou všechny parametry považovány za konstantní. Ve skutečnosti u reálného stroje tomu tak není.

V této kapitole se tedy zabýváme citlivostí momentové a proudové charakteristiky na jednotlivé parametry náhradního zapojení.

5.1 Citlivost momentové charakteristiky

V kapitole 4 byla odvozena rovnice pro výpočet momentové charakteristiky asynchronního motoru:

$$M = \frac{3U^2 R p}{\omega s} \frac{1}{\left[\left(1 + \frac{L_2}{L_1} \right) R_1 + \left(1 + \frac{R_1}{R_{Fe}} \right) \frac{R}{s} \right]^2 + \left[\left(1 + \frac{R_1}{R_{Fe}} \right) \omega L_2 - \frac{R_1}{\omega L_1} \frac{R}{s} \right]^2} \quad (5.1)$$

Citlivostí momentové charakteristiky na zvolený parametr náhradního zapojení je myšlena parciální derivace momentové charakteristiky podle zvoleného parametru.

5.1.1 Citlivost charakteristiky na odpor rotoru R

Upravíme si rovnici (5.1) jako funkci R :

$$M = \frac{3U^2 p s}{\omega} \frac{R}{R^2 K_{1,R} + R K_{2,R} + K_{3,R}} \quad (5.2)$$

$K_{1,R}$, $K_{2,R}$, $K_{3,R}$ jsou konstanty, které vznikly úpravou rovnice (5.1):

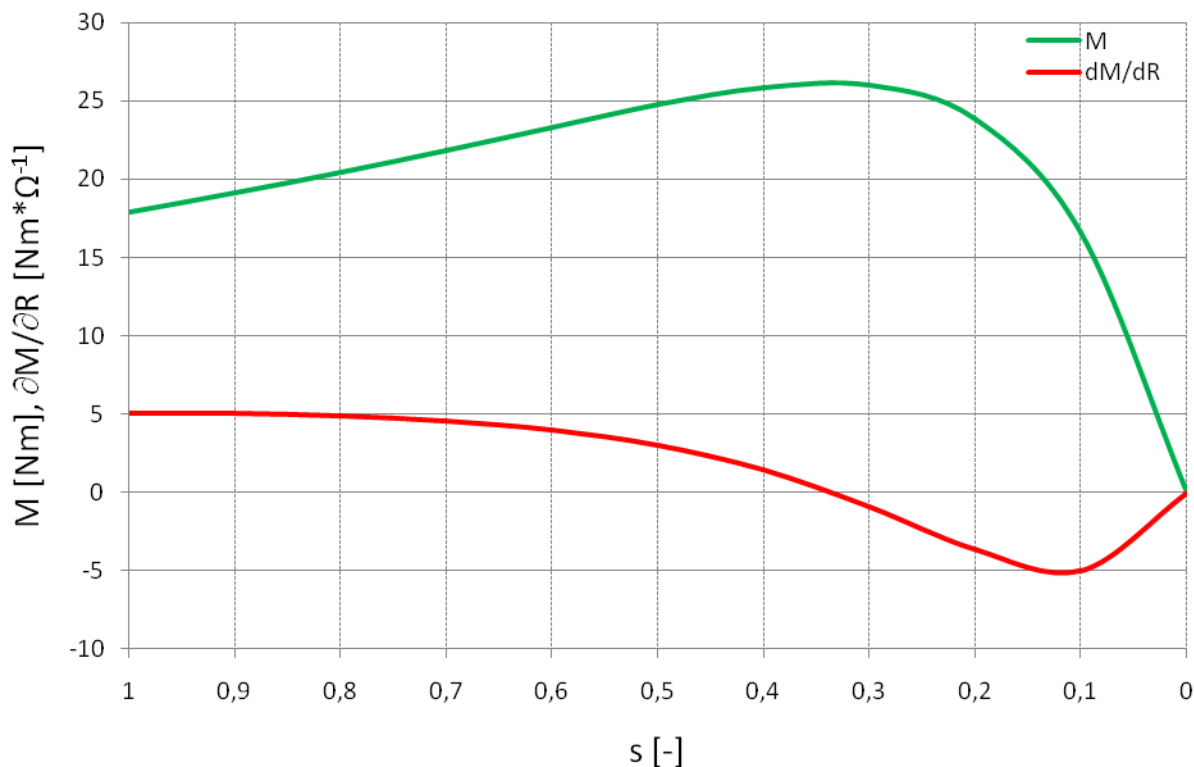
$$K_{1,R} = \left[\left(1 + \frac{R_1}{R_{Fe}} \right)^2 + \frac{R_1^2}{\omega^2 L_1^2} \right] \quad (5.3)$$

$$K_{2,R} = 2R_1 s \left(1 + \frac{R_1}{R_{Fe}} \right) \quad (5.4)$$

$$K_{3,R} = \left[R_1^2 s^2 \left(1 + \frac{L_2}{L_1} \right)^2 + \omega^2 L_2^2 s^2 \left(1 + \frac{R_1}{R_{Fe}} \right)^2 \right] \quad (5.5)$$

Citlivost potom určíme jako derivaci rovnice (5.2) podle R :

$$\frac{\partial M}{\partial R} = \frac{3U^2 ps}{\omega} \frac{K_{3,R} - R^2 K_{1,R}}{\left[R^2 K_{1,R} + RK_{2,R} + K_{3,R} \right]^2} \quad (5.6)$$



Obr. 5.1: Citlivost momentové charakteristiky na odpor rotoru R

Vidíme, že citlivost pro skluz od nuly po moment zvratu je záporná. V této oblasti s rostoucím odporem klesá moment a to tak, že 1Ω odpovídá 5 Nm.

5.1.2 Citlivost charakteristiky na odpor vinutí statoru R_I

Upravíme si rovnici (5.1) jako funkci R_I :

$$M = \frac{3U^2 R s p}{\omega} \frac{1}{R_1^2 K_{1,R1} + R_1 K_{2,R1} + \omega^2 L_2^2 s^2 + R^2} \quad (5.7)$$

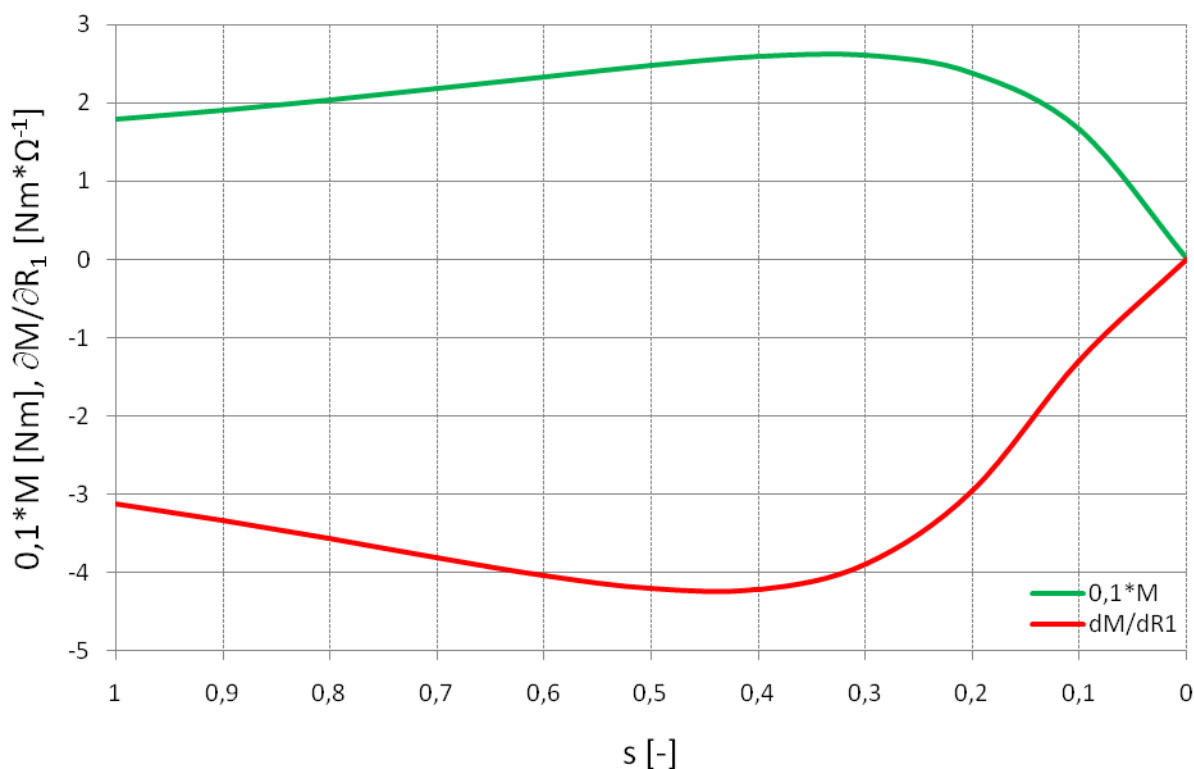
$K_{1,R1}$, $K_{2,R1}$ jsou konstanty, které vznikly úpravou rovnice (5.1):

$$K_{1,R1} = \left\{ \left[\left(1 + \frac{L_2}{L_1} \right) s + \frac{R}{R_{Fe}} \right]^2 + R \left(\frac{R}{\omega^2 L_1^2} - \frac{2s}{R_{Fe}} \frac{L_2}{L_1} \right) + \omega^2 L_2^2 s^2 \frac{1}{R_{Fe}^2} \right\} \quad (5.8)$$

$$K_{2,R1} = \left[2R \left(s + \frac{R}{R_{Fe}} \right) + 2\omega^2 L_2^2 s^2 \frac{1}{R_{Fe}} \right] \quad (5.9)$$

Citlivost potom určíme jako derivaci rovnice (5.7) podle R_1 :

$$\frac{\partial M}{\partial R_1} = - \frac{3U^2 R s p}{\omega} \frac{2R_1 K_{1,R1} + K_{2,R1}}{\left[R_1^2 K_{1,R1} + R_1 K_{2,R1} + \omega^2 L_2^2 s^2 + R^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \quad (5.10)$$



Obr. 5.2: Citlivost momentové charakteristiky na odpor vinutí statoru R_1

Vidíme, že s rostoucím odporem vinutí statoru (s rostoucí teplotou) klesá moment. Tento negativní vliv pozorujeme v celé oblasti.

5.1.3 Citlivost charakteristiky na odpor R_{Fe}

Upravíme si rovnici (5.1) jako funkci R_{Fe} :

$$M = \frac{3U^2 R s p}{\omega} \frac{R_{Fe}^2}{R_{Fe}^2 K_{3,RFe} + R_{Fe} K_{2,RFe} + K_{1,RFe}} \quad (5.11)$$

$K_{1,RFe}$, $K_{2,RFe}$, $K_{3,RFe}$ jsou konstanty, které vznikly úpravou rovnice (5.1):

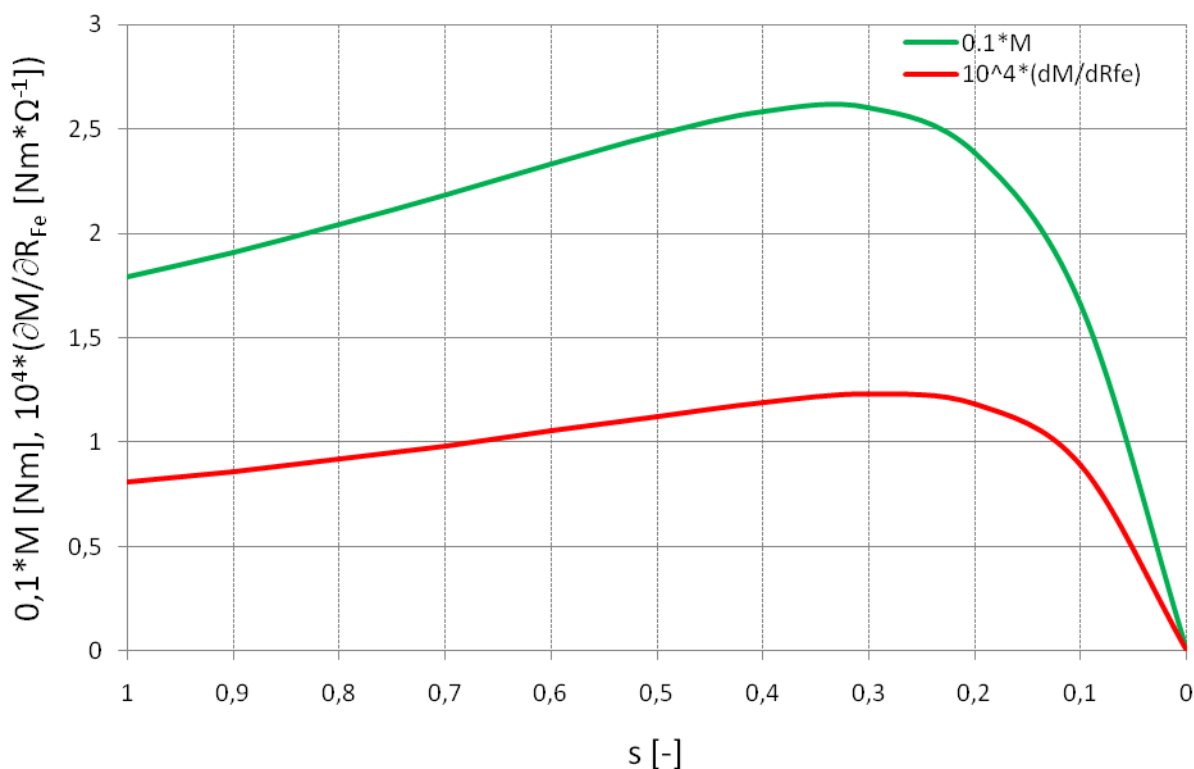
$$K_{1,RFe} = [R_1^2 R^2 + \omega^2 L_2^2 R_1^2 s^2] \quad (5.12)$$

$$K_{2,RFe} = [2R_1 R (R_1 s + R) + 2\omega^2 L_2^2 R_1 s^2] \quad (5.13)$$

$$K_{3,RFe} = \left[R_1^2 s^2 \left(1 + \frac{L_2}{L_1} \right)^2 + \omega^2 L_2^2 s^2 + R^2 \left(1 + \frac{R_1^2}{\omega^2 L_1^2} \right) + 2R_1 R s \right] \quad (5.14)$$

Citlivost potom určíme jako derivaci rovnice (5.11) podle R_{Fe} :

$$\frac{\partial M}{\partial R_{Fe}} = \frac{3U^2 R s p}{\omega} \frac{R_{Fe}^2 K_{2,RFe} + 2R_{Fe} K_{1,RFe}}{[R_{Fe}^2 K_{3,RFe} + R_{Fe} K_{2,RFe} + K_{1,RFe}]^2} \quad (5.15)$$



Obr. 5.3: Citlivost momentové charakteristiky na odpor R_{Fe}

Vidíme, že odpor R_{Fe} nemá na citlivost momentové charakteristiky prakticky žádný vliv.

5.1.4 Citlivost charakteristiky na magnetizační indukčnost L_I

Upravíme si rovnici (5.1) jako funkci L_I :

$$M = \frac{3U^2 R_s p}{\omega} \frac{L_1^2}{L_1^2 K_{2,L1} + L_1 2R_1^2 L_2 s^2 + K_{1,L1}} \quad (5.16)$$

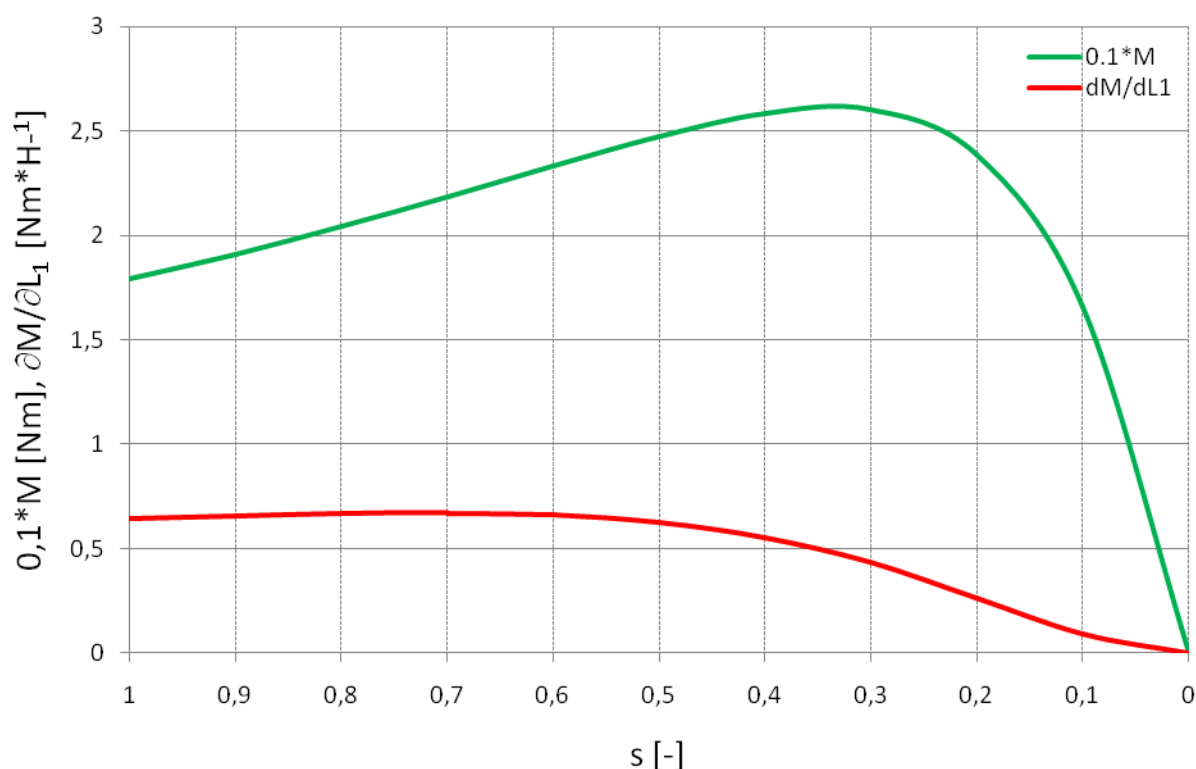
$K_{1,L1}$, $K_{2,L1}$, jsou konstanty, které vznikly úpravou rovnice (5.1):

$$K_{1,L1} = \left[\frac{R_1^2 R^2}{\omega^2} + R_1^2 L_2^2 s^2 \right] \quad (5.17)$$

$$K_{2,L1} = \left\{ R_1^2 s^2 + \left(1 + \frac{R_1}{R_{Fe}} \right) \left[2R_1 R_s + \left(1 + \frac{R_1}{R_{Fe}} \right) (R^2 + \omega^2 L_2^2 s^2) \right] \right\} \quad (5.18)$$

Citlivost potom určíme jako derivaci rovnice (5.16) podle L_I :

$$\frac{\partial M}{\partial L_1} = \frac{3U^2 R_s p}{\omega} \frac{L_1^2 2R_1^2 L_2 s^2 + L_1 2K_{1,L1}}{\left[L_1^2 K_{2,L1} + L_1 2R_1^2 L_2 s^2 + K_{1,L1} \right]^2} \quad (5.19)$$



Obr. 5.4: Citlivost momentové charakteristiky na magnetizační indukčnost L_I

Vidíme, že indukčnost L_I má na citlivost momentové charakteristiky jen nepatrný vliv.

5.1.5 Citlivost charakteristiky na rozptylovou indukčnost L_2

Upravíme si rovnici (5.1) jako funkci R_{Fe} :

$$M = \frac{3U^2 R_{sp}}{\omega} \frac{1}{L_2^2 K_{1,L2} + L_2 \frac{2R_1^2 s^2}{L_1} + K_{2,L2}} \quad (5.20)$$

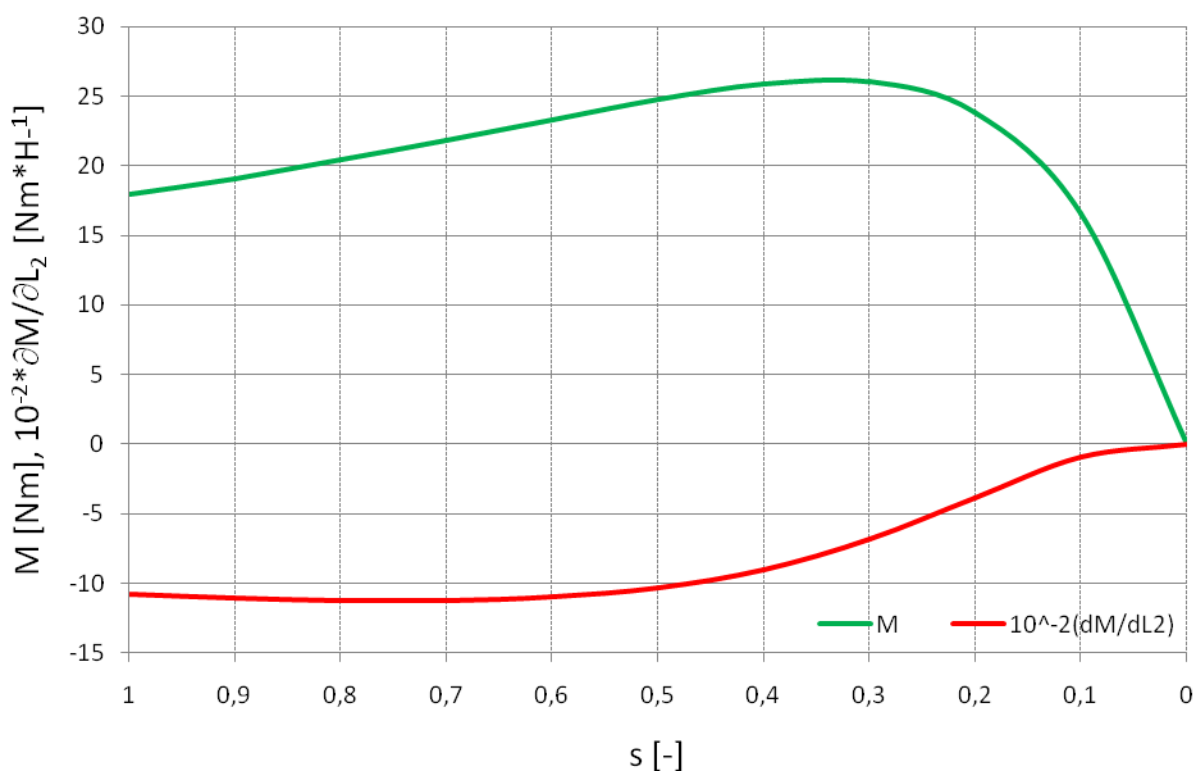
$K_{1,L2}$, $K_{2,L2}$, jsou konstanty, které vznikly úpravou rovnice (5.1):

$$K_{1,L2} = \left[\frac{R_1^2 s^2}{L_1^2} + \omega^2 s^2 \left(1 + \frac{R_1}{R_{Fe}} \right)^2 \right] \quad (5.21)$$

$$K_{2,L2} = \left\{ \left(1 + \frac{R_1}{R_{Fe}} \right) \left[2R_1 R_s + R^2 \left(1 + \frac{R_1}{R_{Fe}} \right) \right] + R_1^2 \left(s^2 + \frac{R^2}{\omega^2 L_1^2} \right) \right\} \quad (5.22)$$

Citlivost potom určíme jako derivaci rovnice (5.20) podle L_2 :

$$\frac{\partial M}{\partial L_2} = - \frac{3U^2 R_{sp}}{\omega} \frac{2L_2 K_{1,L2} + \frac{2R_1^2 s^2}{L_1}}{\left[L_2^2 K_{1,L2} + L_2 \frac{2R_1^2 s^2}{L_1} + K_{2,L2} \right]^2} \quad (5.23)$$



Obr. 5.5: Citlivost momentové charakteristiky na rozptylovou indukčnost L_2

Vidíme, že citlivost momentové charakteristiky na parametr rozptylové indukčnosti je největší ze všech.

Z grafů na obr. 5.1, obr. 5.2 je patrné, že citlivost momentové charakteristika je závislá na odporech vinutí statoru i rotoru. Odpor vinutí statoru i rotoru je navíc teplotně závislý a tato teplotní závislost ovlivňuje též moment stroje. Z grafu na obr. 5.5 je zřejmé, že citlivost momentové charakteristiky je závislá rovněž na rozptylové indukčnosti.

Naopak z grafů na obr. 5.3, resp. Obr. 5.4 plyne, že citlivost momentové charakteristiky nezávisí na odporu reprezentující ztráty v železe, resp. na magnetizační induččnosti.

5.2 Citlivost proudové charakteristiky

V kapitole 4 byla odvozena rovnice pro výpočet proudové charakteristiky asynchronního motoru:

$$|I| = U \sqrt{\frac{\left[\frac{\omega}{R_{Fe}} + \left(1 + \frac{L_2}{L_1}\right) \frac{\omega}{pR} s \right]^2 + \left[\frac{\omega^2 L_2}{R_{Fe} pR} s - \frac{1}{L_1} \right]^2}{\left[\left(1 + \frac{R_1}{R_{Fe}}\right) \omega + \left(1 + \frac{L_2}{L_1}\right) \frac{R_1 \omega}{pR} s \right]^2 + \left[\left(1 + \frac{R_1}{R_{Fe}}\right) \frac{\omega^2 L_2}{pR} s - \frac{R_1}{L_1} \right]^2}} \quad (5.24)$$

Citlivostí proudové charakteristiky na zvolený parametr náhradního zapojení je myšlena parciální derivace proudové charakteristiky podle zvoleného parametru.

5.2.1 Citlivost charakteristiky na odpor rotoru R

Upravíme si rovnici (5.24) jako funkci R :

$$|I| = U \sqrt{\frac{K_{1,R} + RK_{2,R} + R^2 K_{3,R}}{K_{4,R} + RK_{5,R} + R^2 K_{6,R}}} \quad (5.25)$$

$K_{1,R}, K_{2,R}, K_{3,R}, K_{4,R}, K_{5,R}, K_{6,R}$ jsou konstanty, které vznikly úpravou rovnice (5.24):

$$K_{1,R} = \left[\frac{1}{L_1^2} + \frac{\omega^2}{R_{Fe}^2} \right] \quad (5.26)$$

$$K_{2,R} = \left[2 \frac{\omega^2 s}{pR_{Fe}} \right] \quad (5.27)$$

$$K_{3,R} = \left[\left(1 + 2 \frac{L_2}{L_1} + \frac{L_2^2}{L_1^2} + \frac{\omega^2 L_2^2}{R_{Fe}^2} \right) \frac{\omega^2 s^2}{p^2} \right] \quad (5.28)$$

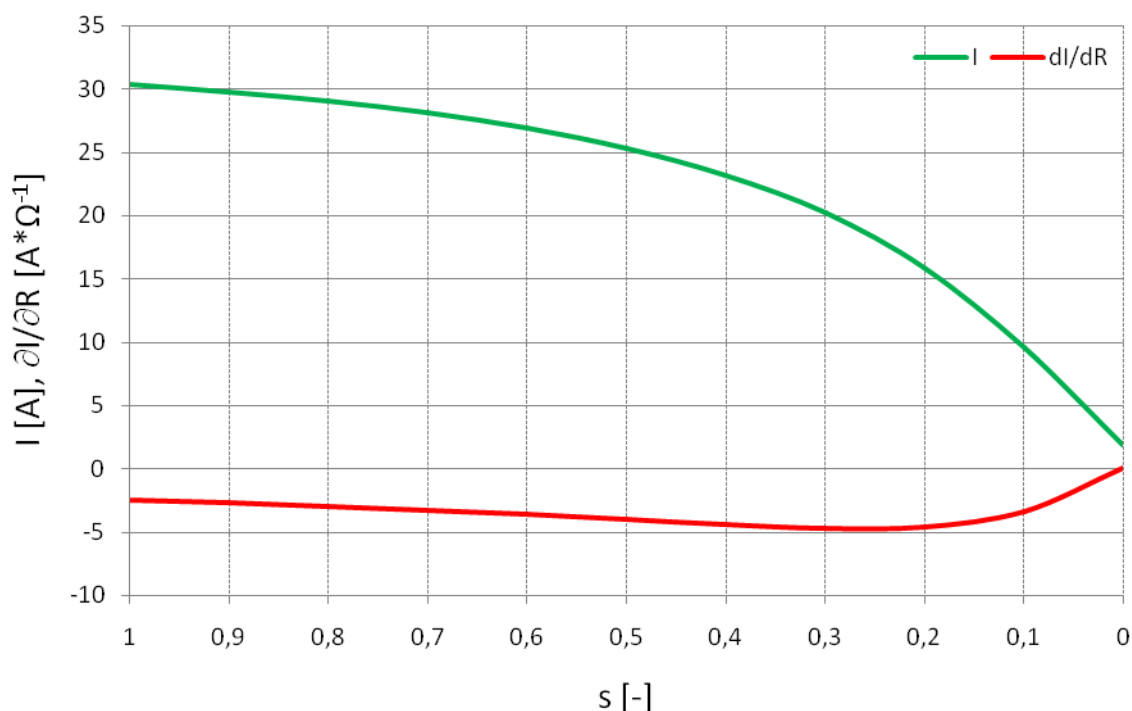
$$K_{4,R} = \left[\left(1 + 2 \frac{R_1}{R_{Fe}} + \frac{R_1^2}{R_{Fe}^2} \right) \omega^2 + \frac{R_1^2}{L_1^2} \right] \quad (5.29)$$

$$K_{5,R} = \left[2 \frac{R_1 \omega^2 s}{p} \left(1 + \frac{R_1}{R_{Fe}} \right) \right] \quad (5.30)$$

$$K_{6,R} = \left[\left(1 + 2 \frac{L_2}{L_1} + \frac{L_2^2}{L_1^2} \right) \frac{R_1^2 \omega^2 s^2}{p^2} + \left(1 + 2 \frac{R_1}{R_{Fe}} + \frac{R_1^2}{R_{Fe}^2} \right) \frac{\omega^4 L_2^2 s^2}{p^2} \right] \quad (5.31)$$

Citlivost potom určíme jako derivaci rovnice (5.25) podle R :

$$\frac{\partial I}{\partial R} = U \frac{R^2(K_{1,R}K_{5,R} - K_{2,R}K_{4,R}) + R(2K_{1,R}K_{6,R} - 2K_{3,R}K_{4,R}) + (K_{2,R}K_{6,R} - K_{3,R}K_{5,R})}{2(R^2K_{4,R} + RK_{5,R} + K_{6,R})^2 \cdot \sqrt{\frac{R^2K_{1,R} + RK_{2,R} + K_{3,R}}{R^2K_{4,R} + RK_{5,R} + K_{6,R}}}} \quad (5.32)$$



Obr. 5.6: Citlivost proudové charakteristiky na odpor rotoru R

Z grafu na obr. 5.6 plyne, že citlivost je v celém rozsahu záporná. Největší hodnoty dosahuje při momentu zvratu.

5.2.2 Citlivost charakteristiky na odpor vinutí statoru R_I

Upravíme si rovnici (5.24) jako funkci R_I :

$$|I| = U \sqrt{\frac{K_{1,R1}}{K_{2,R1} + R_I K_{3,R1} + R_I^2 K_{4,R1}}} \quad (5.33)$$

$K_{1,R1}$, $K_{2,R1}$, $K_{3,R1}$, $K_{4,R1}$ jsou konstanty, které vznikly úpravou rovnice (5.24):

$$K_{1,R1} = \left[\frac{\omega}{R_{Fe}} + \left(1 + \frac{L_2}{L_1} \right) \frac{\omega}{pR} s \right]^2 + \left[\frac{\omega^2 L_2}{R_{Fe} pR} s - \frac{1}{L_1} \right]^2 \quad (5.34)$$

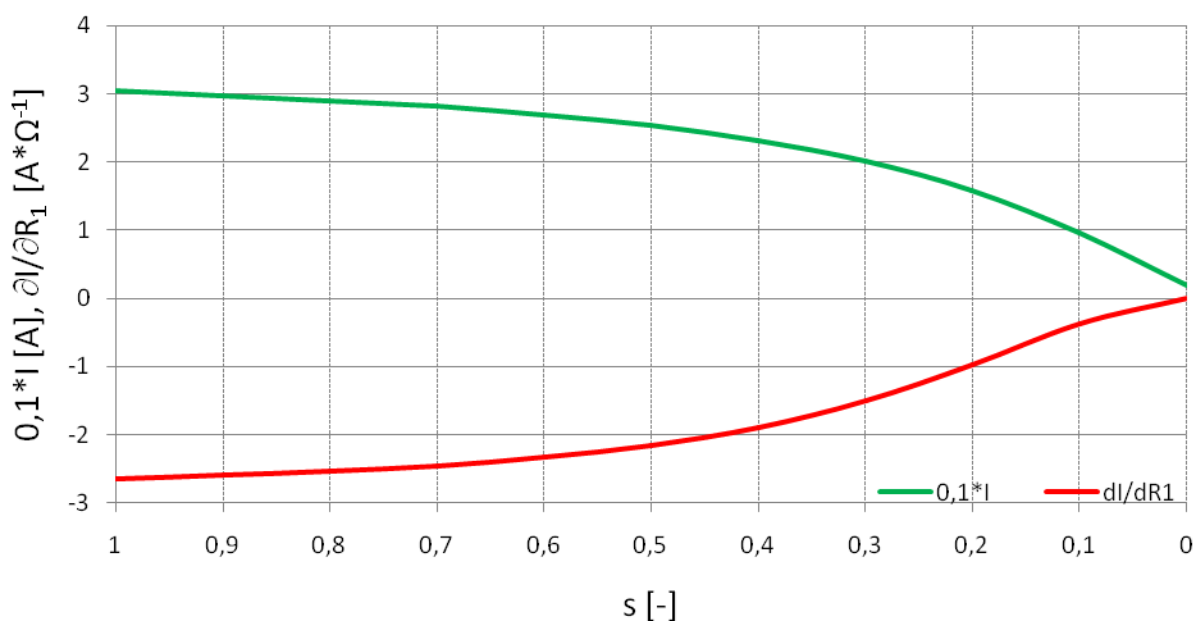
$$K_{2,R1} = \left[\frac{\omega^2 s^2}{p^2 R^2} \left(1 + 2 \frac{L_2}{L_1} + \frac{L_2^2}{L_1^2} + \frac{2\omega^2 L_2^2}{R_{Fe}^2} \right) + \frac{\omega^2}{R_{Fe}} \left(\frac{1}{R_{Fe}} + \frac{2s}{pR} \right) + \frac{1}{L_1^2} \right] \quad (5.35)$$

$$K_{3,R1} = \left[2\omega^2 \left(\frac{1}{R_{Fe}} + \frac{s}{pR} + \frac{\omega^2 L_2^2 s^2}{p^2 R^2 R_{Fe}} \right) \right] \quad (5.36)$$

$$K_{4,R1} = \left[\omega^2 \left(1 + \frac{\omega^2 L_2^2 s^2}{p^2 R^2} \right) \right] \quad (5.37)$$

Citlivost potom určíme jako derivaci rovnice (5.33) podle R_j :

$$\frac{\partial I}{\partial R_1} = - \frac{U}{2} \frac{\sqrt{K_{1,R1}} (2R_1 K_{2,R1} + K_{3,R1})}{(R_1^2 K_{2,R1} + R_1 K_{3,R1} + K_{4,R1}) \cdot \sqrt{R_1^2 K_{2,R1} + R_1 K_{3,R1} + K_{4,R1}}} \quad (4.38)$$



Obr. 5.7: Citlivost proudové charakteristiky na odpor vinutí statoru R_j

S rostoucím odporem vinutí statoru (s rostoucí teplotou) klesá moment i proud motoru. Z grafu na obr. 5.7 plyne, že citlivost je v celém rozsahu záporná.

5.2.3 Citlivost charakteristiky na odpor R_{Fe}

Upravíme si rovnici (5.24) jako funkci R_{Fe} :

$$|I| = U \sqrt{\frac{R_{Fe}^2 K_{1,RFe} + R_{Fe} K_{2,RFe} + K_{3,RFe}}{R_{Fe}^2 K_{4,RFe} + R_{Fe} K_{5,RFe} + K_{6,RFe}}} \quad (5.39)$$

$K_{1,RFe}, K_{2,RFe}, K_{3,RFe}, K_{4,RFe}, K_{5,RFe}, K_{6,RFe}$ jsou konstanty, které vznikly úpravou rovnice (5.24):

$$K_{1,RFe} = \left[\frac{\omega^2 s^2}{p^2 R^2} \left(1 + 2 \frac{L_2}{L_1} + \frac{L_2^2}{L_1^2} \right) + \frac{1}{L_1^2} \right] \quad (5.40)$$

$$K_{2,RFe} = \left[\frac{2\omega^2 s}{pR} \right] \quad (5.41)$$

$$K_{3,RFe} = \left[\omega^2 \left(1 + \frac{\omega^2 L_2^2 s^2}{p^2 R^2} \right) \right] \quad (5.42)$$

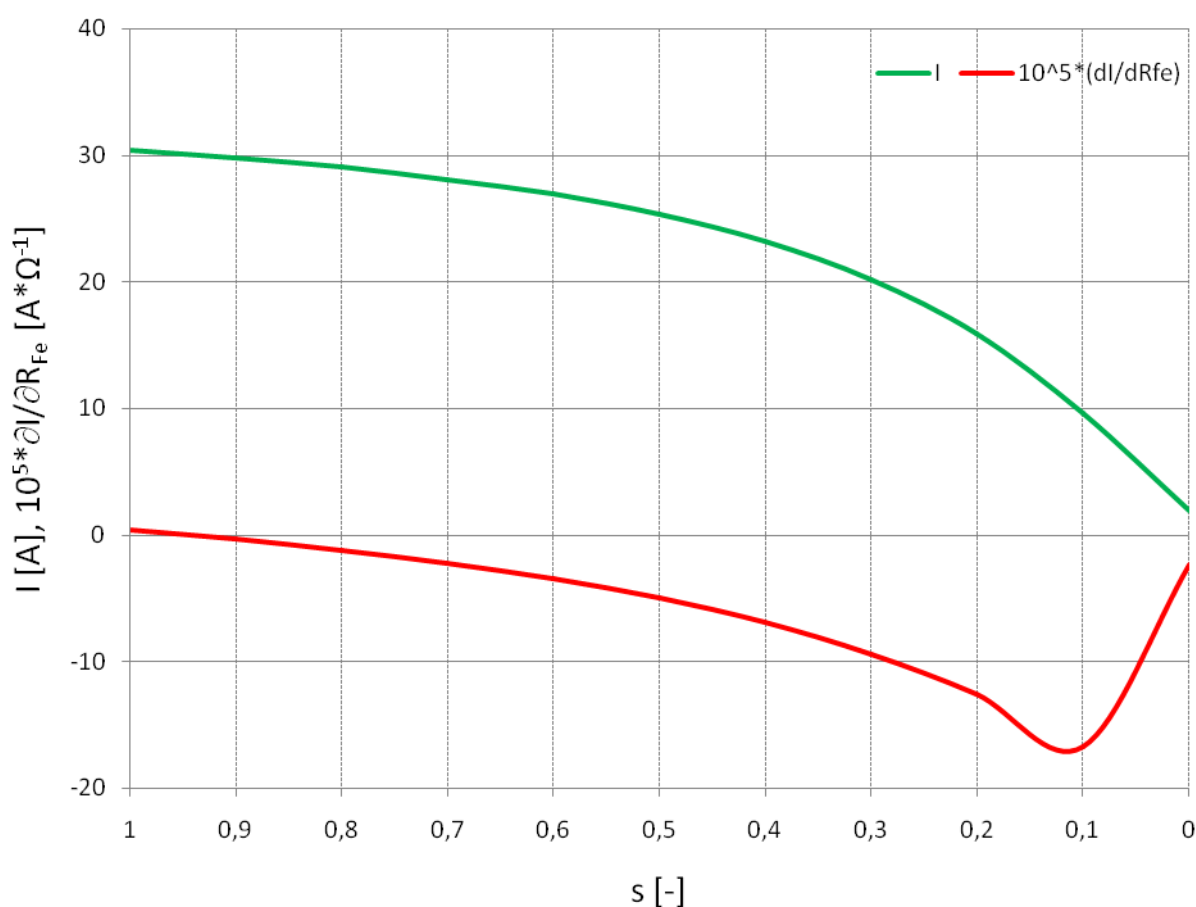
$$K_{4,RFe} = \left[\omega^2 + \frac{2\omega^2 s R_1}{pR} + \left(1 + 2 \frac{L_2}{L_1} + \frac{L_2^2}{L_1^2} \right) \frac{\omega^2 s^2 R_1^2}{p^2 R^2} + \frac{\omega^4 L_2^2 s^2}{p^2 R^2} + \frac{R_1^2}{L_1^2} \right] \quad (5.43)$$

$$K_{5,RFe} = \left[2\omega^2 R_1 \left(1 + \frac{s R_1}{pR} + \frac{\omega^2 L_2^2 s^2}{p^2 R^2} \right) \right] \quad (5.44)$$

$$K_{6,RFe} = \left[\omega^2 R_1^2 \left(1 + \frac{2\omega^2 L_2^2 s^2}{p^2 R^2} \right) \right] \quad (5.45)$$

Citlivost potom určíme jako derivaci rovnice (5.39) podle R_{Fe} :

$$\frac{\partial I}{\partial R_{Fe}} = U \frac{R_{Fe}^2 (K_{1,RFe} K_{5,RFe} - K_{2,RFe} K_{4,RFe}) + R_{Fe} (2K_{1,RFe} K_{6,RFe} - 2K_{3,RFe} K_{4,RFe}) + (K_{2,RFe} K_{6,RFe} - K_{3,RFe} K_{5,RFe})}{2(R_{Fe}^2 K_{4,RFe} + R_{Fe} K_{5,RFe} + K_{6,RFe})^2} \cdot \sqrt{\frac{R_{Fe}^2 K_{1,RFe} + R_{Fe} K_{2,RFe} + K_{3,RFe}}{R_{Fe}^2 K_{4,RFe} + R_{Fe} K_{5,RFe} + K_{6,RFe}}} \quad (5.46)$$



Obr. 5.8: Citlivost proudové charakteristiky na odpor R_{Fe}

Z grafu na obr. 5.8 plyne, že odpor R_{Fe} nemá na citlivost proudové charakteristiky prakticky žádný vliv.

5.2.4 Citlivost charakteristiky na magnetizační indukčnost L_I

Upravíme si rovnici (5.24) jako funkci L_I :

$$|I| = U \sqrt{\frac{L_1^2 K_{1,L1} + L_1 K_{2,L1} + K_{3,L1}}{L_1^2 K_{4,L1} + L_1 K_{5,L1} + K_{6,L1}}} \quad (5.47)$$

$K_{1,L1}, K_{2,L1}, K_{3,L1}, K_{4,L1}, K_{5,L1}, K_{6,L1}$ jsou konstanty, které vznikly úpravou rovnice (5.24):

$$K_{1,L1} = \left[\frac{\omega^2}{R_{Fe}} \left(\frac{1}{R_{Fe}} + \frac{2s}{pR} \right) + \frac{\omega^2 s^2}{p^2 R^2} \left(1 + \frac{\omega^2 L_2^2}{R_{Fe}^2} \right) \right] \quad (5.48)$$

$$K_{2,L1} = \left[\frac{2\omega^2 s^2 L_2}{p^2 R^2} \right] \quad (5.49)$$

$$K_{3,L1} = \left[\frac{\omega^2 s^2 L_2^2}{p^2 R^2} + 1 \right] \quad (5.50)$$

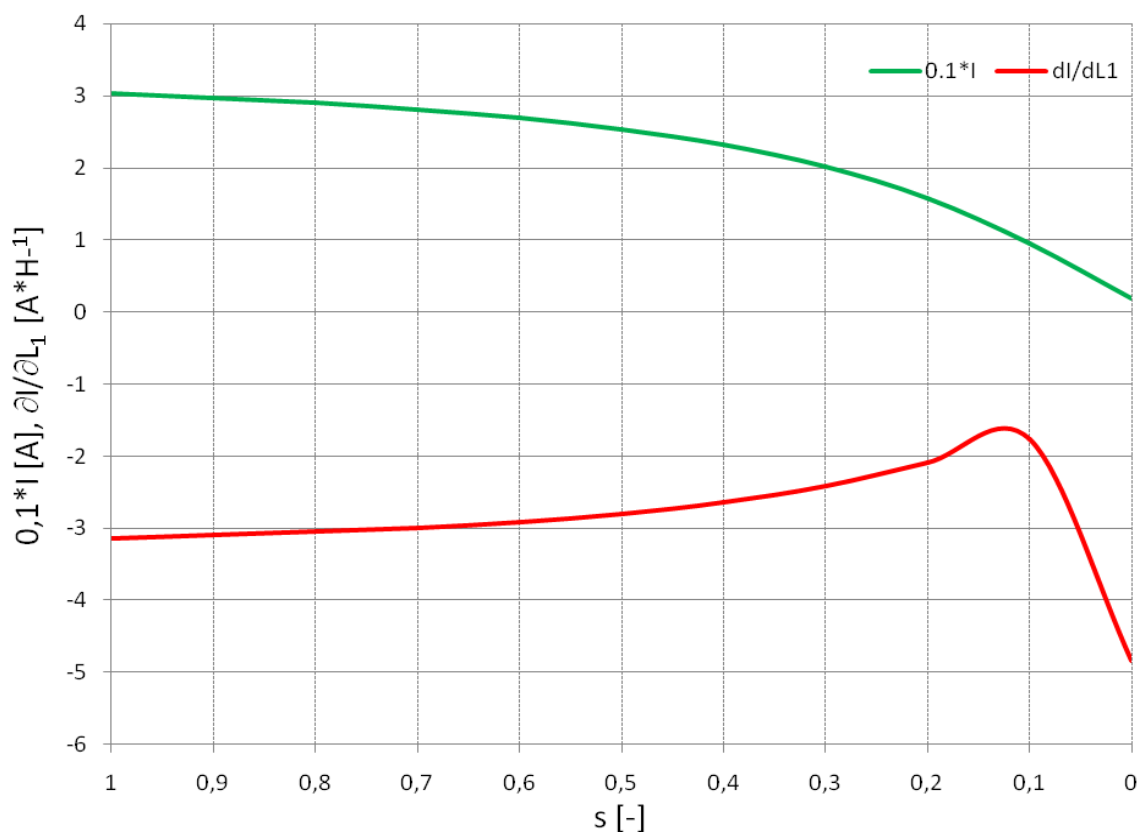
$$K_{4,L1} = \left[\omega^2 + \frac{\omega^2 R_1}{R_{Fe}} \left(2 + \frac{R_1}{R_{Fe}} \right) + \left(1 + \frac{R_1}{R_{Fe}} \right) \left(\frac{2\omega^2 s R_1}{pR} + \frac{2\omega^4 s^2 L_2^2 R_1}{p^2 R^2 R_{Fe}} \right) + \frac{\omega^2 s^2}{p^2 R^2} (R_1^2 + \omega^2 L_2^2) \right] \quad (5.51)$$

$$K_{5,L1} = \left[\frac{2\omega^2 R_1^2 s^2 L_2}{p^2 R^2} \right] \quad (5.52)$$

$$K_{6,L1} = \left[R_1^2 \left(1 + \frac{\omega^2 L_2^2 s^2}{p^2 R^2} \right) \right] \quad (5.53)$$

Citlivost potom určíme jako derivaci rovnice (5.47) podle L_1 :

$$\frac{\partial I}{\partial L_1} = U \frac{L_1^2 (K_{1,L1} K_{5,L1} - K_{2,L1} K_{4,L1}) + L_1 (2K_{1,L1} K_{6,L1} - 2K_{3,L1} K_{4,L1}) + (K_{2,L1} K_{6,L1} - K_{3,L1} K_{5,L1})}{2(L_1^2 K_{4,L1} + L_1 K_{5,L1} + K_{6,L1})^2} \cdot \sqrt{\frac{L_1^2 K_{1,L1} + L_1 K_{2,L1} + K_{3,L1}}{L_1^2 K_{4,L1} + L_1 K_{5,L1} + K_{6,L1}}} \quad (5.54)$$



Obr. 5.9: Citlivost proudové charakteristiky na magnetizační indukčnost L_1

Z grafu na obr. 5.9 plyne, že magnetizační indukčnost má na citlivost jen nepatrný vliv. Citlivost je v celém rozsahu otáček záporná.

5.1.5 Citlivost charakteristiky na rozptylovou indukčnost L_2

Upravíme si rovnici (5.24) jako funkci L_2 :

$$|I| = U \sqrt{\frac{L_2^2 K_{1,L2} + L_2 K_{2,L2} + K_{3,L2}}{L_2^2 K_{4,L2} + L_2 K_{5,L2} + K_{6,L2}}} \quad (5.55)$$

$K_{1,L2}, K_{2,L2}, K_{3,L2}, K_{4,L2}, K_{5,L2}, K_{6,L2}$ jsou konstanty, které vznikly úpravou rovnice (5.24):

$$K_{1,L2} = \left[\frac{\omega^2 s^2}{p^2 R^2} \left(\frac{1}{L_1^2} + \frac{\omega^2}{R_{Fe}^2} \right) \right] \quad (5.56)$$

$$K_{2,L2} = \left[\frac{2\omega^2 s^2}{p^2 R^2 L_1} \right] \quad (5.57)$$

$$K_{3,L2} = \left[\frac{\omega^2}{R_{Fe}^2} + \frac{\omega^2 s}{pR} \left(\frac{2}{R_{Fe}} + \frac{s}{pR} \right) + \frac{1}{L_1^2} \right] \quad (5.58)$$

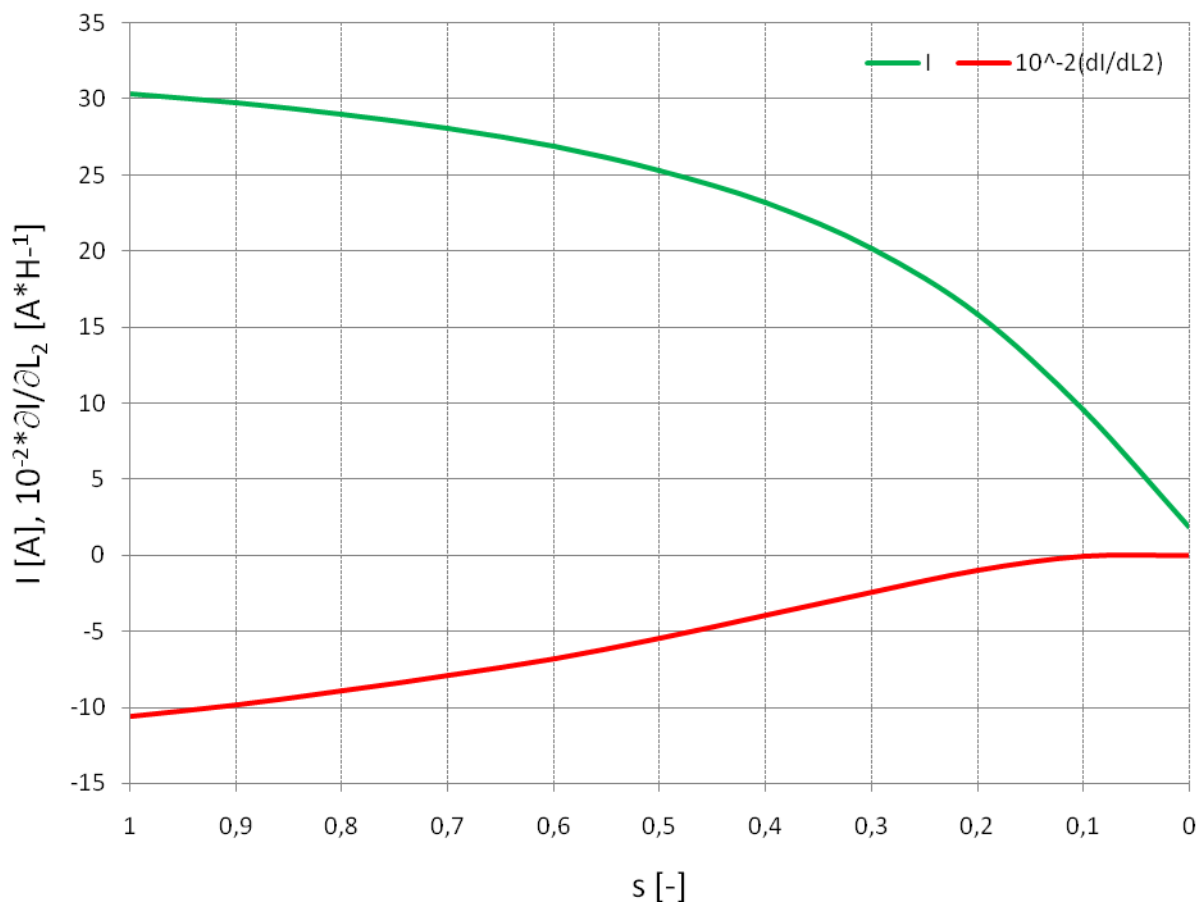
$$K_{4,L2} = \left[\frac{\omega^2 s^2}{p^2 R^2} \left(\frac{R_1^2}{L_1^2} + \omega^2 \left(1 + 2 \frac{R_1}{R_{Fe}} + \frac{R_1^2}{R_{Fe}^2} \right) \right) \right] \quad (5.59)$$

$$K_{5,L2} = \left[\frac{2\omega^2 R_1^2 s^2}{p^2 R^2 L_1} \right] \quad (5.60)$$

$$K_{6,L2} = \left[\omega^2 \left(1 + \frac{R_1}{R_{Fe}} \right) \left(1 + \frac{R_1}{R_{Fe}} + \frac{2R_1 s}{pR} \right) + R_1^2 \left(\frac{\omega^2 s^2}{p^2 R^2} + \frac{1}{L_1^2} \right) \right] \quad (5.61)$$

Citlivost potom určíme jako derivaci rovnice (5.55) podle L_2 :

$$\frac{\partial I}{\partial L_2} = U \frac{L_2^2 (K_{1,L2} K_{5,L2} - K_{2,L2} K_{4,L2}) + L_2 (2K_{1,L2} K_{6,L2} - 2K_{3,L2} K_{4,L2}) + (K_{2,L2} K_{6,L2} - K_{3,L2} K_{5,L2})}{2(L_2^2 K_{4,L2} + L_2 K_{5,L2} + K_{6,L2})^2} \cdot \sqrt{\frac{L_2^2 K_{1,L2} + L_2 K_{2,L2} + K_{3,L2}}{L_2^2 K_{4,L2} + L_2 K_{5,L2} + K_{6,L2}}} \quad (5.62)$$



Obr. 5.10: Citlivost proudové charakteristiky na rozptylovou indukčnost L_2

Z grafu na obr. 5.10 je patrné, že citlivost proudové charakteristiky na parametr rozptylové indukčnosti je největší ze všech.

Z grafů na obr. 5.6, obr. 5.7 je patrné, že citlivost proudové charakteristiky je závislá na odporech vinutí statoru i rotoru. Odpor vinutí statoru i rotoru je navíc teplotně závislý a tato teplotní závislost ovlivňuje též moment i proud stroje. Z grafů na obr. 5.9, resp. 5.10 je zřejmé, že citlivost proudové charakteristiky je závislá rovněž na magnetizační, resp. rozptylové indukčnosti.

Naopak z grafu na obr. 5.8 plyne, že citlivost proudové charakteristiky nezávisí na odporu reprezentující ztráty v železe.

6 ZÁVĚR

Cílem práce byla identifikace parametrů náhradního zapojení asynchronního motoru. Práce je rozdělena do čtyř hlavních celků.

V prvním z nich (kapitola 2) je popsáno náhradního zapojení asynchronního motoru ve tvaru Γ -článku a identifikace jeho parametrů z naměřených zatěžovacích charakteristik. Identifikační postup byl ověřen na asynchronním motoru AOM090L02-016, $2p=2$, 2,2 kW.

V druhé části práce byl pro asynchronní motor AOM090L02-016 proveden výpočet magnetického obvodu, magnetizační indukčnost, rozptylových indukčností statoru a rotoru, odporů statoru i rotoru. Z těchto získaných údajů pak bylo sestaveno náhradní zapojení ve tvaru T-článku. V kapitole 3.11 je uveden přepočten parametrů náhradního zapojení ve tvaru T-článku na Γ -článek.

V kapitole 4 je proveden výpočet momentové a proudové charakteristiky asynchronního motoru. Dosažení identického průběhu naměřených i vypočtených momentových resp. proudových charakteristik je nemožné. Je to dáno jednak způsobem výpočtu momentových resp. proudových charakteristik podle rovnic (4.11) resp. (4.13), kdy považujeme jednotlivé parametry při výpočtu za konstantní, jednak způsobem měření, kdy během měření dochází vlivem oteplení ke změně odporů vinutí stroje.

V kapitole 5 byla provedena citlivostní analýza momentové resp. proudové charakteristiky na jednotlivé parametry náhradního zapojení. Momentová resp. proudová charakteristika je závislá na odporech vinutí statoru i rotoru, které jsou navíc teplotně závislé. Tato teplotní závislost ovlivňuje též moment i proud stroje. Momentová i proudová charakteristika je rovněž závislá na rozptylové indukčnosti, která je obtížně identifikovatelná.

LITERATURA

- [1] Bašta, J., Chládek, J., Mayer, I.: Teorie elektrických strojů, Praha, SNTL/ALFA, 1968.
- [2] Patočka, M.: Několik poznámek k transformátoru. Sborník Sympózia učitelů elektrických pohonů, SYMEP 04, Praha, ČVUT FEL, červen 2004.
- [3] Patočka, M., Běloušek, J.: Identifikace parametrů asynchronního motoru, EPVE 06, VUT FEKT, 2006.
- [4] Brázda, M., Staňa, R.: Výpočet asynchronního motoru, VUES, TZ-1600.
- [5] Kopylov, I. P. a kol.: Stavba elektrických strojů, Praha, SNTL, 1988.
- [6] Klimeš, B. a kol.: Matematické, fyzikální a chemické tabulky, Praha, SPN, 1988.
- [7] Měřička, J., Hamata, V., Voženílek, P.: Elektrické stroje, Praha, ČVUT, říjen 2001.

PŘÍLOHY

PŘÍLOHA 1 – Parametry motoru AOM090L02-016

Tabulka P1.1: Parametry motoru AOM090L02-016

Štítkové hodnoty		
Výkon	2,2	[kW]
Jmenovité napětí	400-Y	[V]
Jmenovitý proud	4,5	[A]
Otáčky	2 865	[min ⁻¹]
Účinník	0,88	[-]
Frekvence	50	[Hz]
Účinnost	81	[%]
Konstrukční údaje statorového svazku		
Vnější průměr	131	[mm]
Vnitřní průměr	74	[mm]
Délka svazku bez ventilačních kanálů	98	[mm]
Počet drážek	24	[-]
Drážka	S5,8x9,65	
Rozměry drážky	5,8/7,3x9,65:1,5:3,0	
Materiál	M700-50A/0,5	
Vodičů v drážce	47	[-]
Vodič (druh LCIA)	1 x Φ 0,60/0,65 1 x Φ 0,63/0,67	
Vinutí	JS;2p=2;m ₁ =3;y=1-12,2-11;a ₁ =1;a _{d1} =2	
Konstrukční údaje rotorového svazku		
Vnější průměr	73,4	[mm]
Vnitřní průměr	30	[mm]
Délka svazku bez ventilačních kanálů	98	[mm]
Střední průměr kruhu nakrátko	53	[mm]
Průřez kruhu nakrátko	206	[mm ²]
Vzduchová mezera	0,30	[mm]
Počet drážek	19	[-]
Drážka	V6x14,25	
Rozměry drážky	6,0/1,5x14,25:0,5:1,0	
Materiál	M700-50A/0,5	
Délka tyče rotoru	118	[mm]
Materiál vinutí, druh vinutí	hliník, jednoklecové	

PŘÍLOHA 2 - Výpočty

Konstanty vzniklé při určování vztahů identifikujících parametry náhradního zapojení asynchronního motoru dle obr. 2.2 b).

$$R_X = R_A - R_1$$

$$R_Y = R_B - R_1$$

$$K_1 = R_{Fe} R_X s_A$$

$$K_2 = \omega^2 R_X^2 - 2\omega^2 R_{Fe} R_X + \omega^4 L_A^2 + \omega^2 R_{Fe}^2$$

$$K_3 = \omega^2 L_A^2 R_{Fe}^2 + R_{Fe}^2 R_X^2$$

$$K_4 = \omega^2 L_A R_{Fe}^2$$

$$K_5 = \omega^4 L_A L_B \frac{s_A}{s_B} + \omega^2 R_X R_Y + \omega^2 R_{Fe}^2 - \omega^2 R_{Fe} (R_X + R_Y)$$

$$K_6 = \omega^2 L_B R_{Fe} R_X \left(1 - \frac{s_A}{s_B}\right) - \omega^2 L_B R_{Fe}^2$$

$$K_7 = \omega^2 L_A L_B R_{Fe}^2 + R_{Fe}^2 R_X R_Y \frac{s_A}{s_B}$$

$$K_8 = K_6 + \omega^2 L_A R_{Fe} R_Y \left(1 - \frac{s_A}{s_B}\right) - \omega^2 L_A R_{Fe}^2$$

$$K_9 = K_4 K_5 + K_2 K_6$$

$$K_{10} = \frac{1}{2} (K_3 K_5 + 2K_4 K_6 - K_2 K_7 - K_4 K_8)$$

$$K_{11} = K_3 K_6 - K_3 K_8 - K_4 K_7$$

PŘÍLOHA 3 - Měření

Typ: AOM090L02-016, 400 V–, 2.2 kW, 4.5 A, 2 860 min⁻¹, tř.isol. F, 50 Hz, cos φ 0.88

Odpory za studena:

R_{U-V} [Ω] 5,84

R_{U-W} [Ω] 5,82

R_{V-W} [Ω] 5,82

Izolační odpor:

R_{izol} [MΩ] >5,84

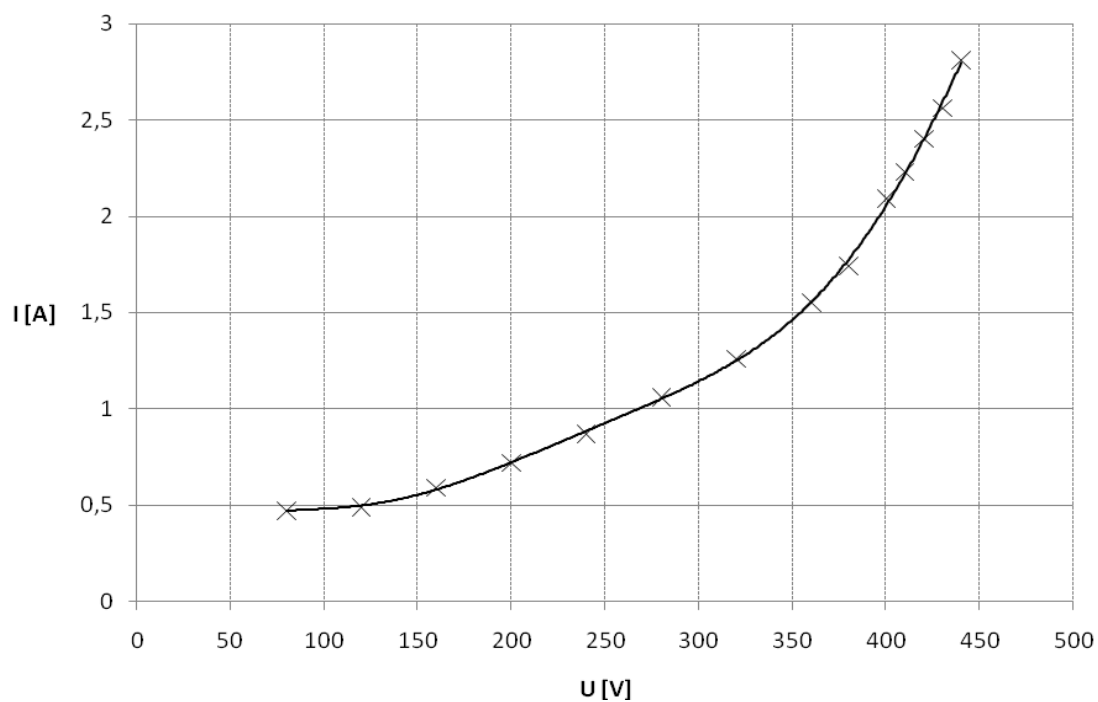
Elektrická odolnost:

U_Z [kV] 2,0

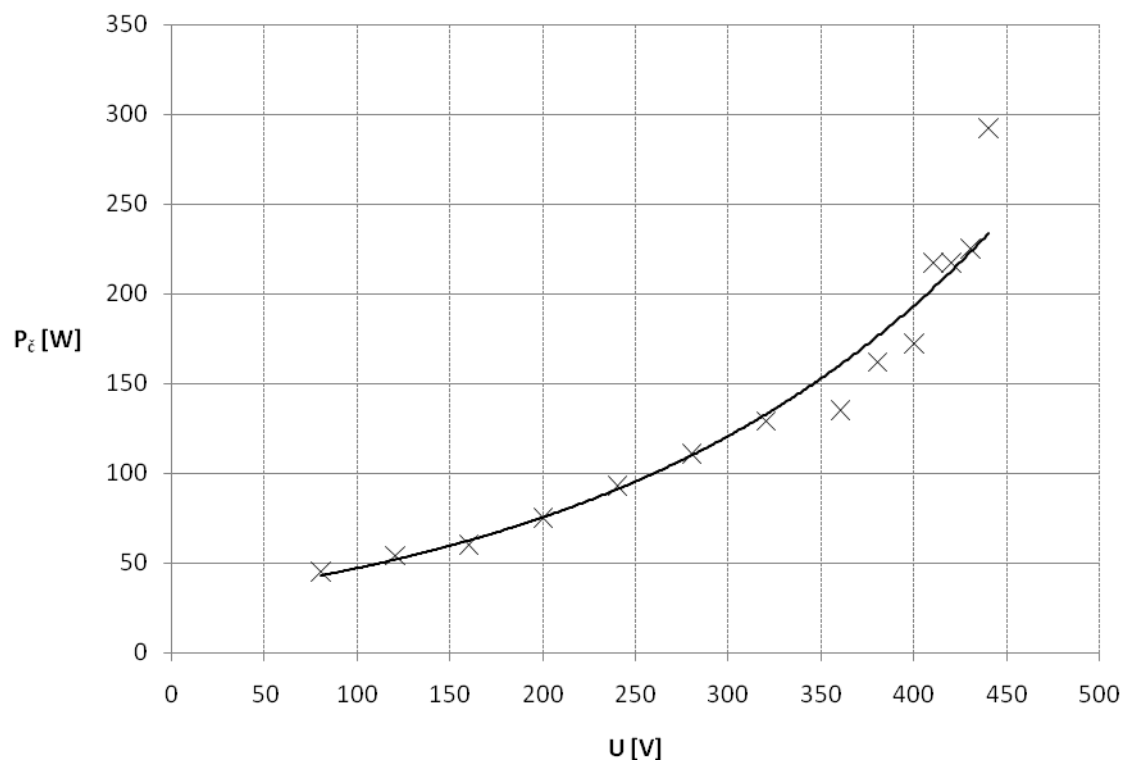
t [s] 1,0

Tabulka P3.1: Hodnoty z měření naprázdno

U [V]	80	120	160	200	240	280	320	360	380	400	410	420	430	440
I_U [d]	1,21	1,25	1,55	1,85	2,31	2,81	3,21	4,05	4,43	2,17	2,25	2,38	2,59	2,75
I_V [d]	1,18	1,24	1,45	1,81	2,15	2,64	3,23	3,95	4,45	2,17	2,33	2,51	2,61	2,96
I_W [d]	1,14	1,19	1,39	1,71	2,05	2,49	3,04	3,63	4,15	1,94	2,12	2,32	2,47	2,71
Φ [d]	1,18	1,23	1,46	1,79	2,17	2,65	3,16	3,88	4,34	2,09	2,23	2,40	2,56	2,81
k [-]	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	1	1	1	1	1
I [A]	0,47	0,49	0,59	0,72	0,87	1,06	1,26	1,55	1,74	2,09	2,23	2,40	2,56	2,81
α [d]	4,5	7,0	11,0	16,5	22,5	31,5	42,5	54,5	64,0	30,5	34,5	37,5	41,0	47,0
\pm [-]	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
β [d]	3,0	2,0	1,0	4,0	7,0	13,0	21,0	32,0	37,0	19,0	20,0	23,0	26,0	27,5
Σ [d]	7,5	9,0	10,0	12,5	15,5	18,5	21,5	22,5	27,0	11,5	14,5	14,5	15,0	19,5
k [-]	6	6	6	6	6	6	6	6	6	15	15	15	15	15
P_c [W]	45,0	54,0	60,0	75,0	93,0	111,0	129,0	135,0	162,0	172,5	217,5	217,5	225,0	292,5



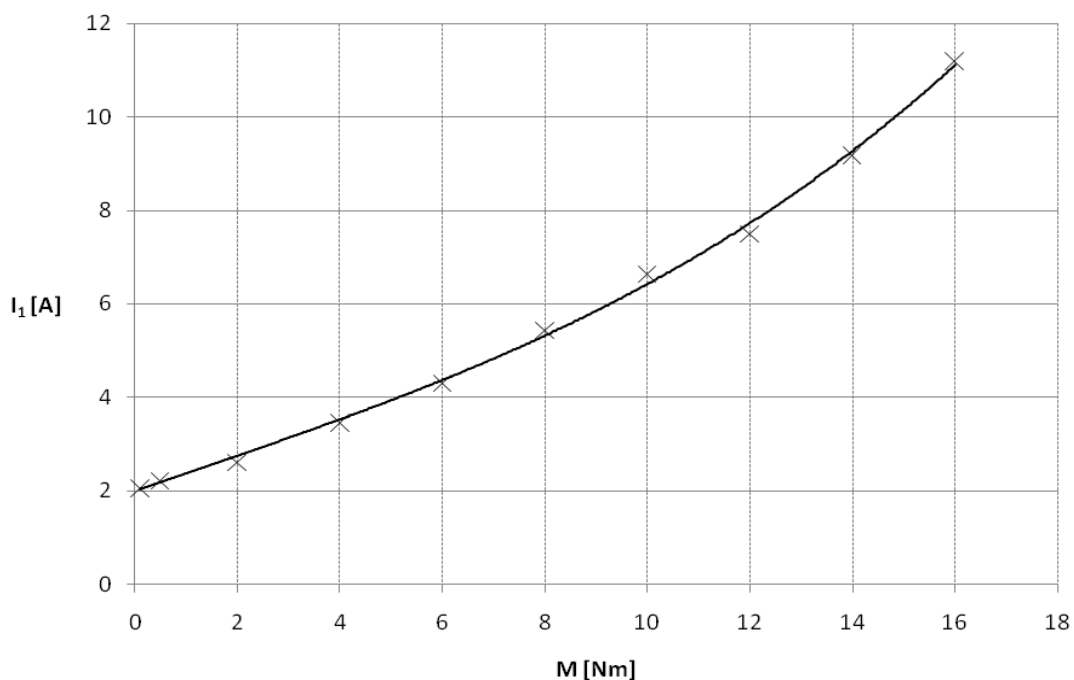
Obr. P1: Závislost proudu na napětí při měření naprázdno

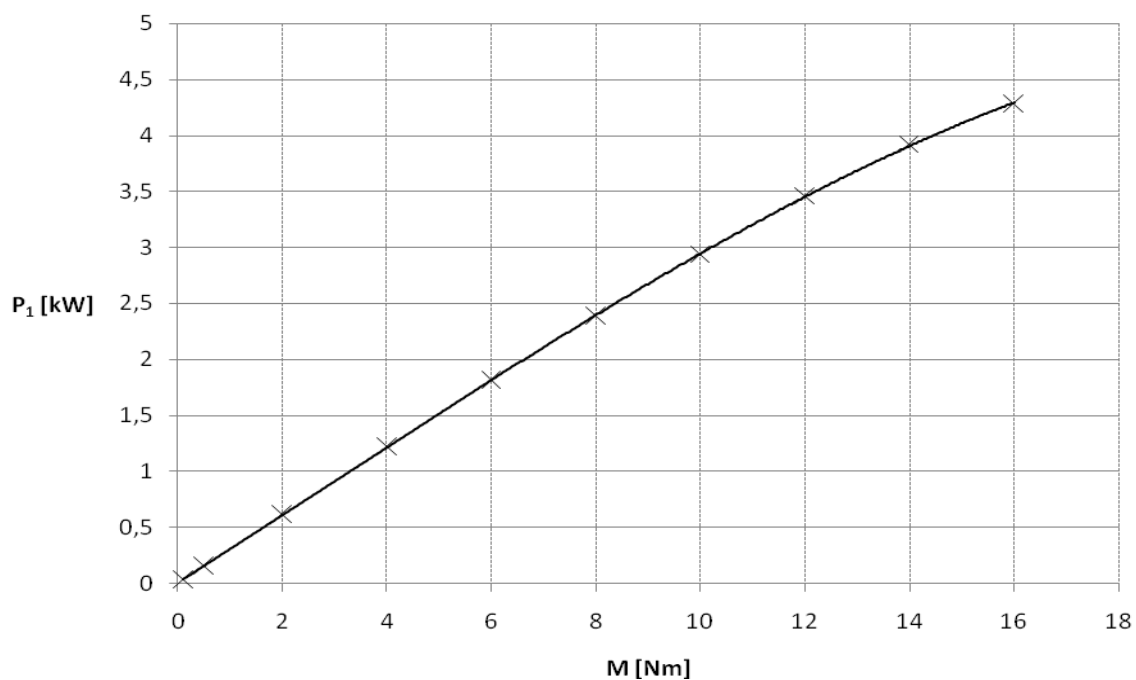


Obr. P2: Závislost příkonu na napětí při měření naprázdno

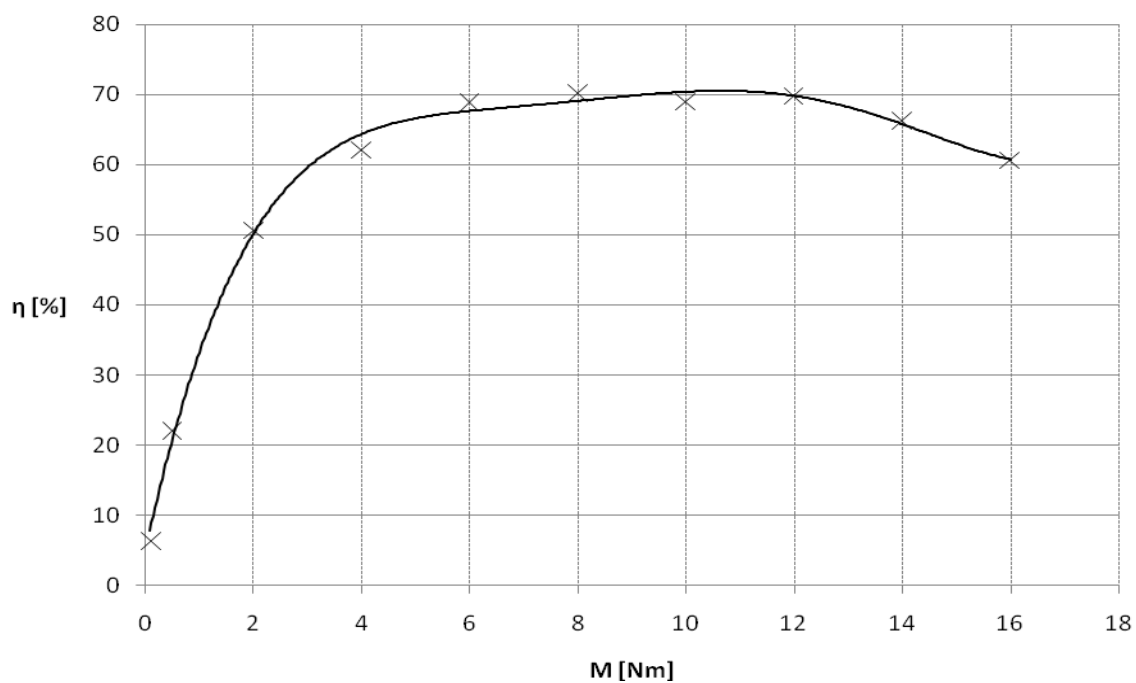
Tabulka P3.2: Hodnoty z měření při zatížení ($U = \text{konst.}$)

U [V]	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
I_U [d]	2,08	2,25	2,64	3,51	4,35	2,75	3,34	3,75	4,59	2,80
I_V [d]	2,15	2,25	2,66	3,49	4,36	2,71	3,32	3,75	4,61	2,79
I_W [d]	1,95	2,15	2,55	3,40	4,22	2,69	3,31	3,76	4,56	2,80
Φ [d]	2,06	2,22	2,62	3,47	4,31	2,72	3,32	3,75	4,59	2,80
k [-]	1	1	1	1	1	2	2	2	2	4
I_1 [A]	2,06	2,22	2,62	3,47	4,31	5,44	6,64	7,50	9,18	11,20
α [d]	39,0	46,0	64,0	90,5	114,0	71,0	88,0	102,0	121,5	72,5
\pm [-]	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
β [d]	6,0	1,0	17,5	41,0	62,0	42,5	54,0	63,5	76,0	46,0
Σ [d]	33,0	47,0	81,5	131,5	176,0	113,5	142,0	165,5	197,5	118,0
k [-]	15	15	15	15	15	30	30	30	30	60
P_{p1} [kW]	0,495	0,705	1,222	1,973	2,640	3,405	4,260	4,965	5,925	7,080
M [Nm]	0,1	0,5	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0	12,0	14,0	16,0
n [min^{-1}]	2983	2974	2953	2922	2892	2853	2804	2755	2676	2559
P_1 [kW]	0,031	0,156	0,618	1,224	1,817	2,390	2,936	3,462	3,923	4,287
η [%]	6,310	22,086	50,587	62,047	68,824	70,189	68,923	69,724	66,210	60,556
$\cos \varphi$ [-]	0,347	0,495	0,674	0,821	0,884	0,905	0,925	0,955	0,932	0,914

Obr. P3: Závislost proudu na momentu při zatěžovací zkoušce ($U = \text{konst.}$)



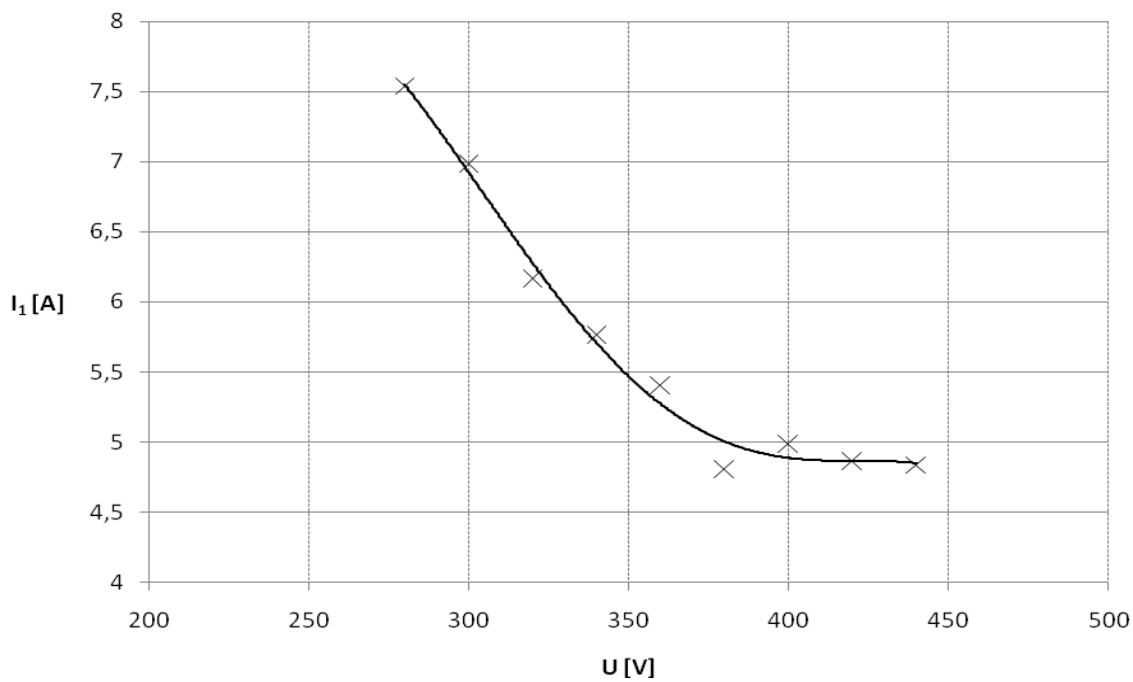
Obr. P4: Závislost příkonu na momentu při zatěžovací zkoušce ($U = \text{konst.}$)



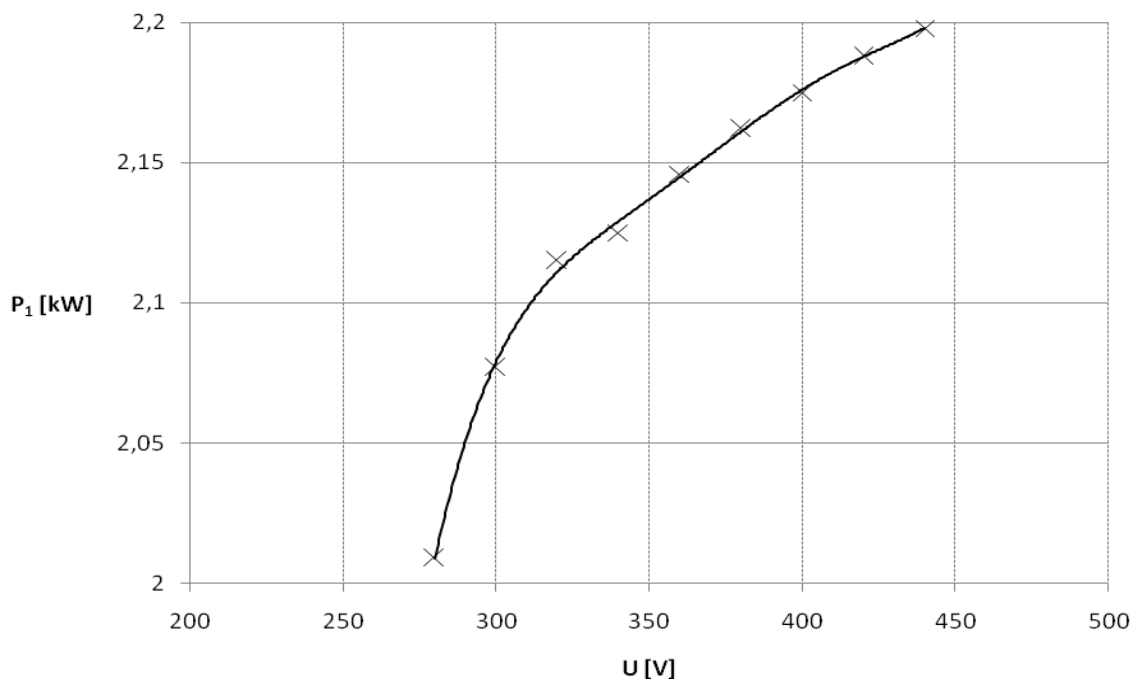
Obr. P5: Závislost účinnosti na momentu při zatěžovací zkoušce ($U = \text{konst.}$)

Tabulka P3.3: Hodnoty z měření při zatížení ($M = \text{konst.}$)

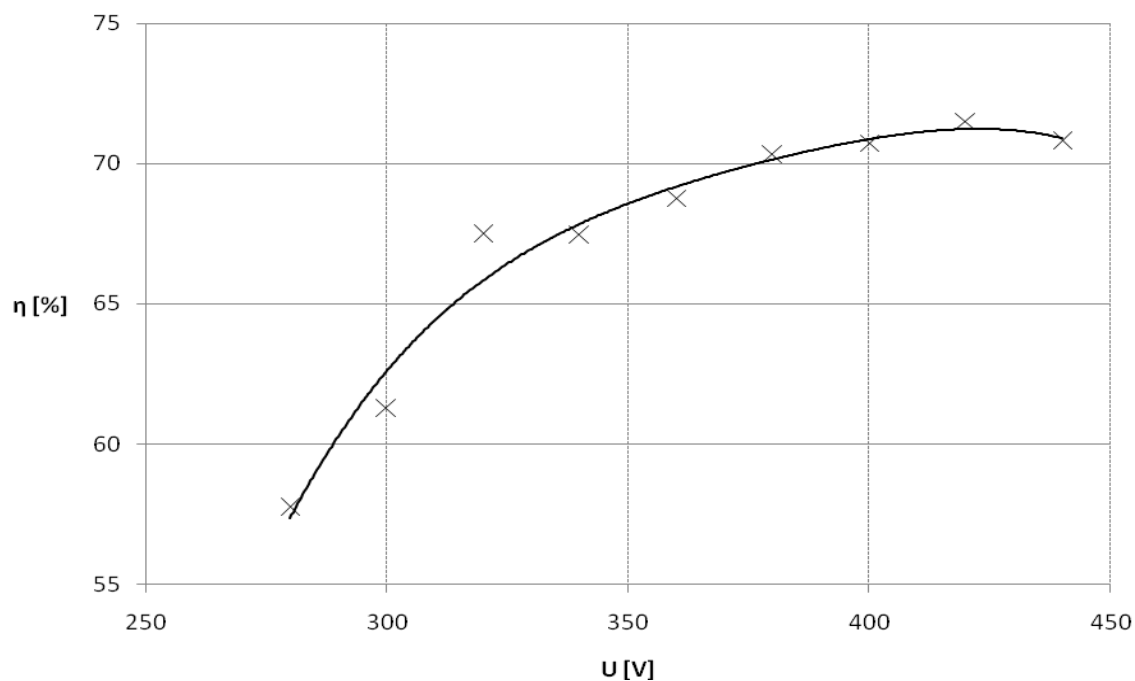
U [V]	440	420	400	380	360	340	320	300	280
I_U [d]	2,45	2,47	2,52	2,60	2,74	2,91	3,09	3,49	3,77
I_V [d]	2,46	2,45	2,51	2,58	2,69	2,88	3,11	3,51	3,79
I_W [d]	2,34	2,36	2,43	2,01	2,68	2,84	3,05	3,48	3,75
Φ [d]	2,42	2,43	2,49	2,40	2,70	2,88	3,08	3,49	3,77
k [-]	2	2	2	2	2	2	2	2	2
I_1 [A]	4,84	4,86	4,98	4,80	5,40	5,76	6,16	6,98	7,54
α [d]	69,0	66,0	64,5	63,5	64,0	64,0	64,0	69,0	72,0
\pm [-]	+	+	+	+	+	+	+	+	+
β [d]	34,5	36,0	38,0	39,0	40,0	41,0	40,5	44,0	44,0
Σ [d]	103,5	102,0	102,5	102,5	104,0	105,0	104,5	113,0	116,0
k [-]	30	30	30	30	30	30	30	30	30
P_{pl} [kW]	3,105	3,060	3,075	3,075	3,120	3,150	3,135	3,390	3,480
M [Nm]	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4
n [min^{-1}]	2837	2824	2807	2790	2769	2742	2730	2680	2593
P_1 [kW]	2,198	2,188	2,175	2,162	2,146	2,125	2,115	2,077	2,009
η [%]	70,799	71,511	70,734	70,305	68,770	67,451	67,477	61,258	57,737
$\cos \varphi$ [-]	0,843	0,867	0,892	0,975	0,925	0,930	0,917	0,934	0,952



Obr. P6: Závislost proudu na napětí při zatěžovací zkoušce ($M = \text{konst.}$)

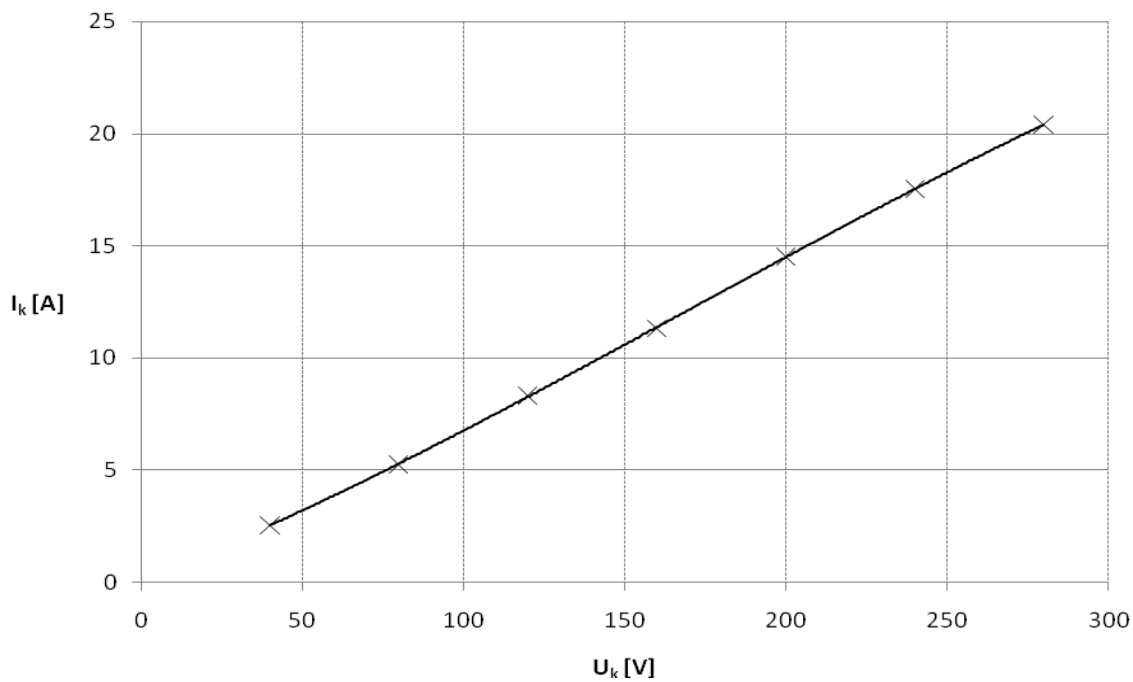


Obr. P7: Závislost výkonu na napětí při zatěžovací zkoušce ($M = \text{konst.}$)

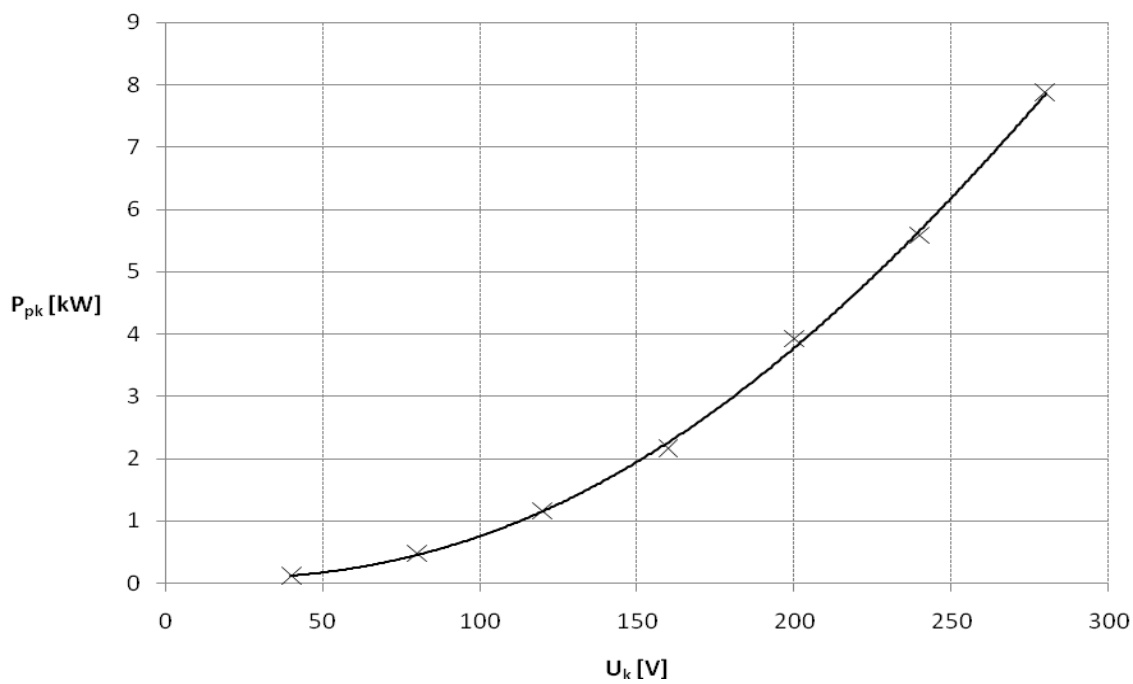
Obr. P8: Závislost účinnosti na napětí při zatěžovací zkoušce ($M = \text{konst.}$)

Tabulka P3.4: Hodnoty z měření při zkoušce nakrátko

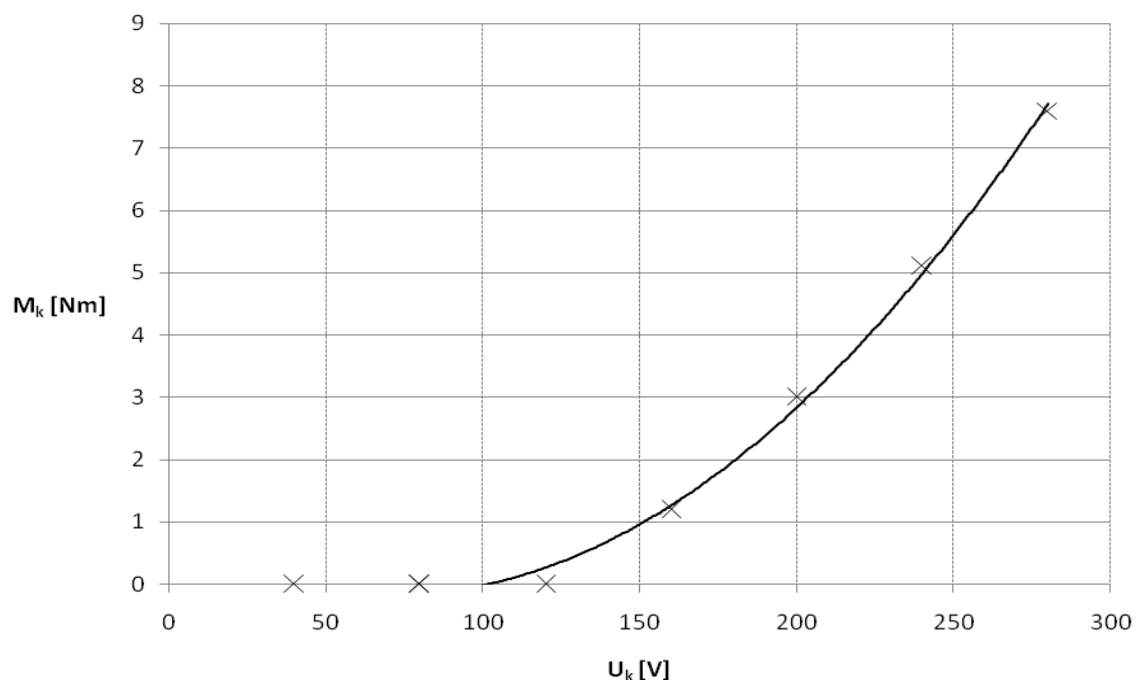
U_k [V]	40	80	120	160	200	240	280
I_U [d]	2,50	2,61	4,15	2,85	3,61	4,40	2,05
I_V [d]	2,56	2,66	4,18	2,80	3,65	4,35	2,05
I_W [d]	2,55	2,62	4,15	2,84	3,62	4,40	2,02
Φ [d]	2,54	2,63	4,16	2,83	3,63	4,38	2,04
k [-]	1	2	2	4	4	4	10
I_k [A]	2,54	5,26	8,32	11,32	14,51	17,53	20,40
α [d]	19,5	41,0	96,0	44,0	77,0	105,0	39,0
\pm [-]	+	+	+	+	+	+	+
β [d]	3,0	6,5	20,0	10,0	21,0	34,5	13,5
Σ [d]	22,5	47,5	116,0	54,0	98,0	139,5	52,5
k [-]	5	10	10	40	40	40	150
P_{pk} [kW]	0,113	0,475	1,160	2,160	3,920	5,580	7,875
M_k [Nm]	0	0	0	1,2	3,0	5,1	7,6



Obr. P9: Závislost proudu na napětí při zkoušce nakrátko



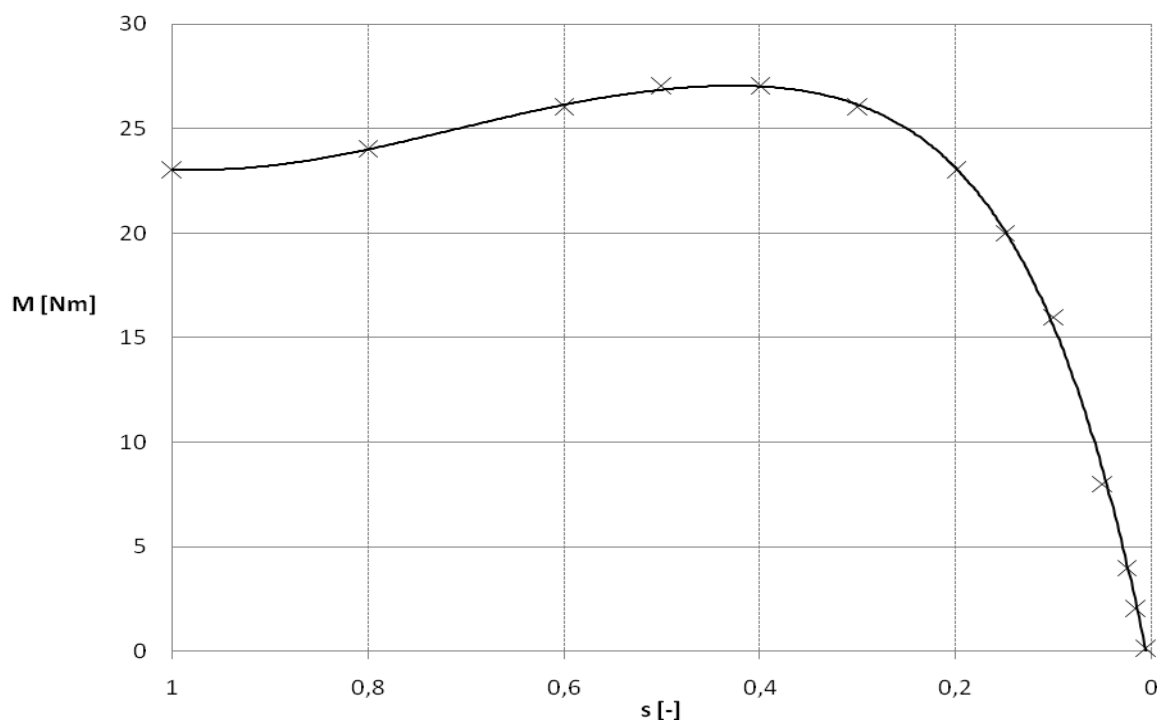
Obr. P10: Závislost příkonu na napětí při měření nakrátko



Obr. P11: Závislost momentu na napětí při měření nakrátko

Tabulka P3.5: Hodnoty z měření při měření momentové charakteristiky

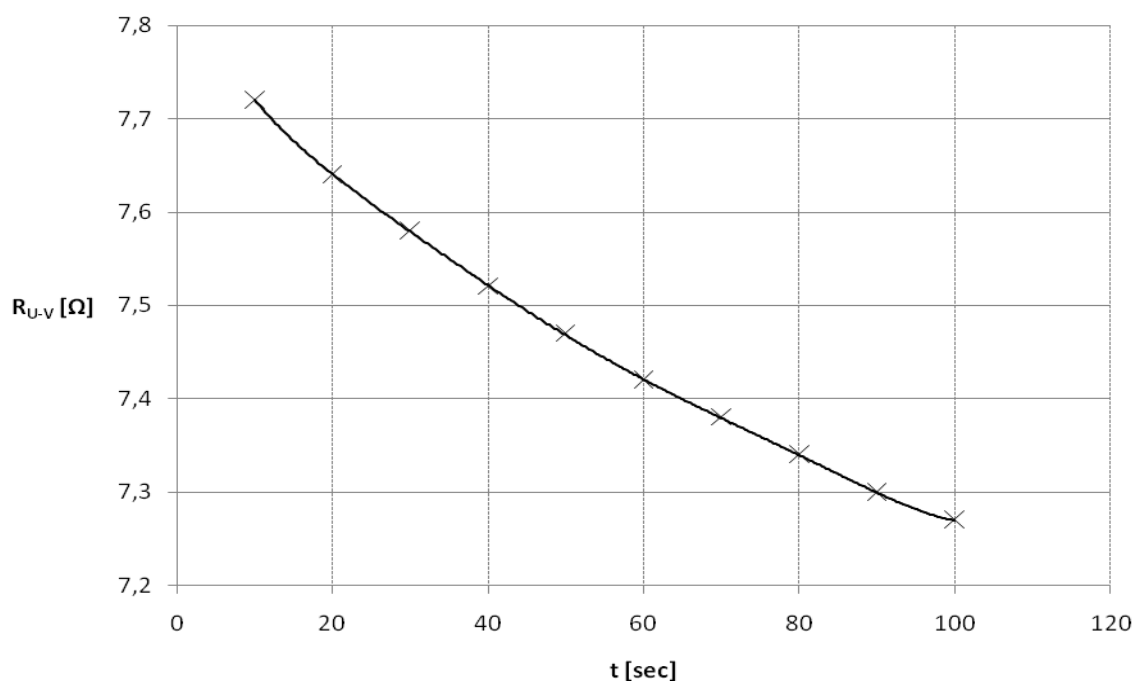
U [V]	I_1 [A]	P_1 [kW]	$\cos \varphi$ [-]	n [min ⁻¹]	M [Nm]	s [-]
400	2,06	0,030	0,347	2983	0,1	0,005667
400	2,62	0,618	0,674	2953	2,0	0,015667
400	3,47	1,223	0,821	2922	4,0	0,026000
400	4,92	2,430	0,874	2850	8,0	0,050000
400	8,40	3,930	0,908	2700	16,0	0,100000
400	11,37	4,720	0,903	2550	20,0	0,150000
400	13,88	5,060	0,892	2400	23,0	0,200000
400	17,92	5,000	0,872	2100	26,0	0,300000
400	21,06	4,490	0,857	1800	27,0	0,400000
400	23,56	3,770	0,845	1500	27,0	0,500000
400	25,58	2,980	0,835	1200	26,0	0,600000
400	28,46	1,390	0,814	600	24,0	0,800000
400	30,27	0	0,792	0	23,0	1,000000



Obr. P12: Závislost momentu na skluzu – Momentová charakteristika

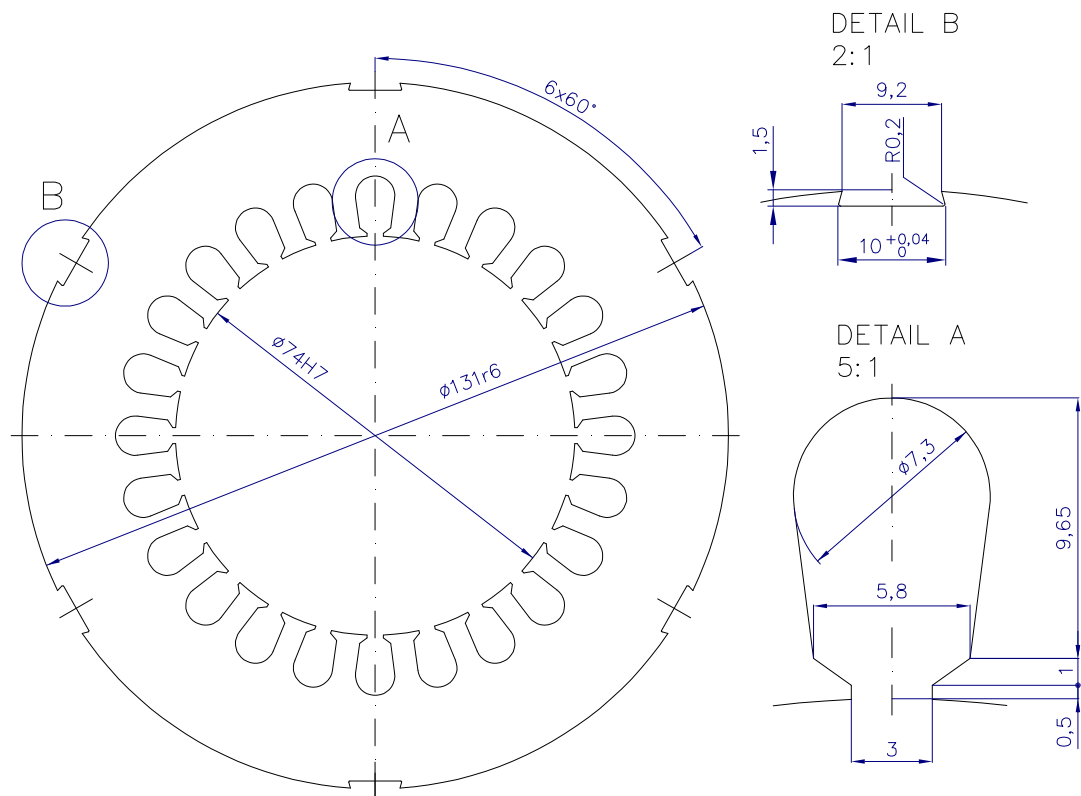
Tabulka P3.6: Hodnoty z měření při oteplovací zkoušce

U [V]	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
t [min]	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270
I_U [d]	5,20	5,04	5,10	5,14	5,10	5,16	5,16	5,16	5,08	5,10
I_V [d]	5,30	5,14	5,14	5,06	5,14	5,06	5,08	5,08	5,10	5,10
I_W [d]	5,20	5,00	5,06	5,04	5,14	5,08	5,04	5,06	5,12	5,12
Φ [d]	5,23	5,06	5,10	5,09	5,13	5,15	5,09	5,10	5,10	5,11
k [-]	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
I_1 [A]	5,23	5,06	5,10	5,09	5,13	5,15	5,09	5,10	5,10	5,11
α [d]	61,0	59,0	60,0	60,0	59,0	60,0	60,0	59,5	59,0	60,0
\pm [-]	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
β [d]	37,0	37,0	37,0	36,0	37,0	36,0	36,0	36,0	36,5	36,0
Σ [d]	98,0	96,0	97,0	96,0	96,0	96,0	96,0	95,5	95,5	96,0
k [-]	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
P_{p1} [kW]	2,940	2,880	2,910	2,880	2,880	2,880	2,880	2,865	2,865	2,880
M [Nm]	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4
n [min^{-1}]	2854	2822	2811	2809	2808	2807	2807	2808	2808	2808
P_1 [kW]	2,209	2,184	2,176	2,174	2,174	2,173	2,173	2,174	2,174	2,174
η [%]	75,14	75,85	74,77	75,47	75,47	75,44	75,44	75,88	75,88	75,47
$\cos \varphi$ [-]	0,811	0,821	0,824	0,817	0,810	0,807	0,817	0,811	0,811	0,814
$t_{\text{okolí}}$ [°C]	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
t_{pov} [°C]	21	48,0	52,0	54,0	55,0	55,0	56,0	55,0	55,0	55,0
t_{svo} [°C]	21	34,5	39,0	42,0	48,0	49,0	49,0	48,5	49,0	49,0
t_{kab} [°C]	21,0	33,0	37,0	40,5	43,5	44,5	45,0	45,5	45,5	46,0
t [sec]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
R_{U-V} [Ω]	7,72	7,64	7,58	7,52	7,47	7,42	7,38	7,34	7,30	7,27



Obr. P13: Závislost odporu na čase

PŘÍLOHA 4

PLOCHA DRÁŽKY cca 66,13 mm²

ROZMĚR	TOLER.
Ø74H7	+0,030 0,000
Ø131r6	+0,088 +0,063

MEZNÍ ÚCHYLKY ROZMĚRŮ DRÁŽKY H9

PAS 700-50A
SULF. ČSN EN 10106

RADIM BĚLOUŠEK

1:1

(5:1)

18.3.2011

AOM090L02

PLECH
STATORU

Obr. P14: Výkres plechu statoru

