

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

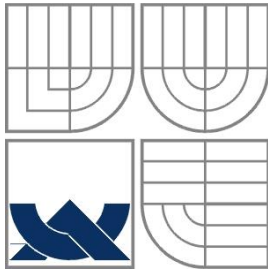
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

ANALÝZA PARAMETRŮ NÁHRADNÍCH ZAPOJENÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU

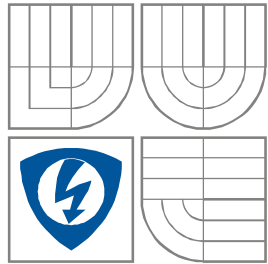
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ONDŘEJ MINKS



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



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

ANALÝZA PARAMETRŮ NÁHRADNÍCH ZAPOJENÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU

PARAMETER ANALYSIS OF INDUCTION MOTOR EQUIVALENT CIRCUITS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ONDŘEJ MINKS

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MARTIN MACH



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Ondřej Minks

ID: 146905

Ročník: 3

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Analýza parametrů náhradních zapojení asynchronního motoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Proveďte literární rešerši na téma náhradní zapojení asynchronního motoru a měření jeho parametrů.
2. Z měřených charakteristik asynchronního motoru určete parametry pro jeho náhradní zapojení ve tvaru T, gama a inverzního gama článku. A tyto náhradní zapojení vzájemně porovnejte.
3. Proveďte měření na asynchronním motoru pro různé hodnoty napětí. Z těchto měření určete napěťové závislosti jednotlivých parametrů náhradních zapojení.
4. Vytvořte model asynchronního motoru platný pro různé napěťové úrovně.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Patočka M. Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice. Brno: VUTIUM, 2011. 564 s. ISBN: 978-80-214-4003- 6.
- [2] Fitzgerald A. E., Kingsley Jr. Ch., Umans S. Electric Machinery. McGraw-Hill Science, 2002. 704 s. ISBN: 0073660094.
- [3] Boldea I., Tutelea L. N. Electric Machines: Steady State, Transients, and Design with MATLAB. CRC Press, 2009. 797 s. ISBN: 1420055720.

Termín zadání: 27.9.2013

Termín odevzdání: 2.6.2014

Vedoucí práce: Ing. Martin Mach

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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

Práce se zabývá určením parametrů asynchronního motoru pro náhradní zapojení ve tvaru T-článku, Γ -článku a $\bar{\Gamma}$ -článku z měření naprázdno a zjištěním napěťové závislosti parametrů. Pro každé z těchto zapojení stanovuje závislosti momentu a statorového proudu na skluzu. Pomocí programu MATLAB jsou díky simulacím teoreticky odvozené závislosti srovnány se skutečnými, změřenými na motoru s kotvou nakrátko o výkonu 0,6 kW, $2p = 2$, a to jak v pracovní, tak i v celé motorické oblasti.

Abstract

This work deals with the determination of the parameters of induction motor equivalent circuits in T-network, gamma-network and inverted gamma-network form from no-load test and discovering voltage dependence of these parameters. For each of these circuits are determined dependencies of the torque and the stator current on the slip. Using the MATLAB simulations, the theoretically derived dependencies are compared with real, which are measured on the motor with the squirrel-cage rotor with power 0,6 kW, $2p = 2$, both in operating and in whole motor area.

Klíčová slova

Asynchronní motor; analýza parametrů; náhradní zapojení; T-článek; Gamma-článek; inverzní Gamma-článek; moment; momentová charakteristika; statorový proud

Keywords

Induction motor; analysis of parameters; equivalent circuit; T-network; Gamma-network; inverted Gamma-network; torque; torque characteristic; stator current

Bibliografická citace

MINKS, O. *Analýza parametrů náhradních zapojení asynchronního motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 61 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Mach.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Analýza parametrů asynchronního motoru jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské 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

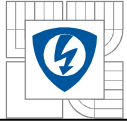
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Machovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

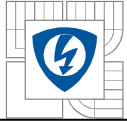
V Brně dne

Podpis autora

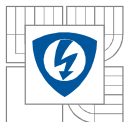


OBSAH

1 ÚVOD	14
2 OBVODOVÝ MODEL A PARAMETRY ASYNCHRONNÍHO MOTORU	15
2.1 STANOVENÍ PŘEVODU MOTORU	16
2.1.1 PŘEVOD NAPĚTÍ	16
2.1.2 PŘEVOD PROUDU	16
2.1.3 PŘEVOD IMPEDANCÍ.....	17
2.1.3.1 Motor s kroužkovou kotvou	17
2.1.3.2 Motor s kotvou nakrátko	17
2.2 ROZDĚLENÍ VÝKONU ASYNCHRONNÍHO MOTORU	19
2.3 ODPOR VSTUPNÍHO VINUTÍ	21
2.4 ODPOR REPREZENTUJÍCÍ ZTRÁTY V ŽELEZE A MAGNETIZAČNÍ REAKTANCE	21
2.5 ROZPTYLOVÁ INDUKČNOST STATORU A ROTORU	22
2.6 ROTOROVÝ ODPOR PŘEPOČTENÝ NA STRANU STATORU	22
3 NÁHRADNÍ ZAPOJENÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU	23
3.1 VÝCHOZÍ ZAPOJENÍ ČLÁNKU	23
3.1.1 ODVOZENÍ ZÁVISLOSTI STATOROVÉHO PROUDU NA SKLUZU	24
3.1.2 ODVOZENÍ MOMENTU V ZÁVISLOSTI NA SKLUZU	24
3.1.3 STANOVENÍ PARAMETRŮ Z MĚŘENÍ NAPRÁZDNO	26
3.2 ZAPOJENÍ VE TVARU T-ČLÁNKU	27
3.2.1 ODVOZENÍ ZÁVISLOSTI STATOROVÉHO PROUDU NA SKLUZU	28
3.2.2 ODVOZENÍ MOMENTU V ZÁVISLOSTI NA SKLUZU	29
3.2.3 STANOVENÍ PARAMETRŮ Z MĚŘENÍ NAPRÁZDNO	30
3.3 ZAPOJENÍ VE TVARU Γ-ČLÁNKU	32
3.3.1 ODVOZENÍ ZÁVISLOSTI STATOROVÉHO PROUDU NA SKLUZU	32
3.3.2 ODVOZENÍ MOMENTU V ZÁVISLOSTI NA SKLUZU	33
3.3.3 STANOVENÍ PARAMETRŮ Z MĚŘENÍ NAPRÁZDNO	34
3.4 ZAPOJENÍ VE TVARU T-ČLÁNKU	35
3.4.1 ODVOZENÍ ZÁVISLOSTI STATOROVÉHO PROUDU NA SKLUZU	35
3.4.2 ODVOZENÍ MOMENTU V ZÁVISLOSTI NA SKLUZU	36
3.4.3 STANOVENÍ PARAMETRŮ Z MĚŘENÍ NAPRÁZDNO	37
4 ZKOUŠENÍ ASYNCHRONNÍCH STROJŮ	38
4.1 ZKOUŠKA NAKRÁTKO	38
4.2 ZKOUŠKA NAPRÁZDNO	39
4.3 MĚŘENÍ PŘI ZATÍŽENÍ	40
5 VÝSLEDKY MĚŘENÍ	41
5.1 ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKA	41
5.2 ZKOUŠKA NAPRÁZDNO	41
5.3 ZKOUŠKA NAKRÁTKO	41
6 VYPOČTENÉ PARAMETRY	42

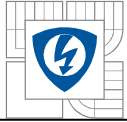


6.1 VÝPOČET PARAMETRŮ R_0 A ωL_0 PRO STANOVENÍ PŘÍČNÉ VĚTVE	42
6.2 VÝPOČET PARAMETRŮ PRO T-ČLÁNEK	42
6.3 VÝPOČET PARAMETRŮ PRO Γ -ČLÁNEK	43
6.4 VÝPOČET PARAMETRŮ PRO \bar{I} -ČLÁNEK.....	43
7 SROVNÁNÍ CHARAKTERISTIK MOTORU	44
7.1 PROUDOVÉ CHARAKTERISTIKY PRO JEDNOTLIVÁ NÁHRADNÍ ZAPOJENÍ	44
7.2 MOMENTOVÉ CHARAKTERISTIKY PRO JEDNOTLIVÁ NÁHRADNÍ ZAPOJENÍ	44
7.3 NAMĚŘENÉ ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKY V POROVNÁNÍ S VYPOČTENÝMI	45
8 ZÁVĚR.....	49
LITERATURA	51
PŘÍLOHY	52
P-1: ODVOZENÍ ZÁVISLOSTI STATOROVÉHO PROUDU NA SKLUZU PRO VÝCHOZÍ ČLÁNEK	52
P-2: ODVOZENÍ ZÁVISLOSTI STATOROVÉHO PROUDU NA SKLUZU PRO T-ČLÁNEK	53
P-3: ODVOZENÍ ZÁVISLOSTI MOMENTU NA SKLUZU PRO T-ČLÁNEK	54
P-4: ODVOZENÍ ZÁVISLOSTI STATOROVÉHO PROUDU NA SKLUZU PRO \bar{I} -ČLÁNEK	55
P-5: PARAMETRY MOTORU	56
P-6: CELKOVÉ VÝSLEDKY ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKY	56
P-7: CELKOVÉ VÝSLEDKY MĚŘENÍ NAPRÁZDNO	57
P-8: NAMĚŘENÉ A VYPOČTENÉ HODNOTY ODPORU R_{FE}	57
P-9: NAMĚŘENÉ A VYPOČTENÉ HODNOTY INDUKČNOSTI L_M	58
P-10: PROUDOVÁ ZÁVISLOST ZMĚŘENÝCH PARAMETRŮ PODÉLNÉ VĚTVE	59
P-11: NAPĚŤOVÁ ZÁVISLOST VYPOČTENÝCH PARAMETRŮ PŘÍČNÉ VĚTVE.....	60
P-12: UKÁZKA MĚŘENÉHO ZAŘÍZENÍ.....	61



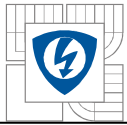
SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1: Náhradní zapojení jedné fáze ASM ve tvaru T-článku.....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 2-2: Princip klecového vinutí [1].....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 2-3: Tok výkonu asynchronního motoru [6]</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 2-4: Zapojení vstupního vinutí asynchronního motoru do hvězdy.....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 3-1: Momentová charakteristika asynchronního stroje [6].....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3-2: Náhradní zapojení jedné fáze ASM ve tvaru výchozího článku [6]</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 3-3: Celková impedance při měření naprázdno.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 3-4: Část obvodu uplatněná při měření naprázdno pro náhradní zapojení jedné fáze ASM ve tvaru výchozího článku.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 3-5: Upravené náhradní zapojení jedné fáze ASM tvaru T-článku</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 3-6: Závislost statorového proudu na skluzu pro náhradní zapojení ve tvaru T-článku.....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 3-7: Závislost momentu na skluzu pro náhradní zapojení ve tvaru T-článku.....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 3-8: Část obvodu uplatněná při měření naprázdno pro náhradní zapojení v tvaru T-článku</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 3-9: Náhradní zapojení jedné fáze ASM ve tvaru Γ-článku.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 3-10: Závislost statorového proudu na skluzu pro náhradní zapojení ve tvaru Γ-článku.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 3-11: Závislost momentu na skluzu pro náhradní zapojení ve tvaru Γ-článku.....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 3-12: Část obvodu uplatněná při měření naprázdno pro náhradní zapojení v tvaru Γ-článku</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 3-13: Náhradní zapojení jedné fáze ASM ve tvaru I-článku.....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 3-14: Závislost statorového proudu na skluzu pro náhradní zapojení ve tvaru I-článku.....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 3-15: Závislost momentu na skluzu pro náhradní zapojení ve tvaru I-článku</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 4-1: Charakteristiky nakrátko asynchronního motoru [2]</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 4-2: Náhradní schéma asynchronního motoru při měření nakrátko</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 4-3: Rozdělení ztrát v železe a ztrát mechanických</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 7-1: Srovnání vypočtených proudových charakteristik pro jednotlivá náhradní zapojení....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 7-2: Srovnání vypočtených momentových charakteristik pro jednotlivá náhradní zapojení.</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 7-3: Srovnání naměřené proudové charakteristiky s vypočtenými</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 7-4: Srovnání naměřené momentové charakteristiky s vypočtenými.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 7-5: Naměřená pracovní oblast zatěžovací charakteristiky motoru ATAS T22VT512 (7-0512)</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 7-6: Srovnání pracovních oblastí naměřené momentové charakteristiky s vypočtenými.....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 7-7: Srovnání pracovních oblastí naměřené proudové charakteristiky s vypočtenými</i>	<i>48</i>



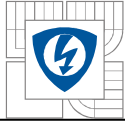
SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1: Výsledky zkoušky naprázdno motoru AOM090L02-016.....</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 2: Výsledky měření nakrátko pro motor AOM090L02-016.....</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 3: Celkové výsledky měření zatěžovací charakteristiky pro motor ATAS T22VT512 (7-0512)</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 4: Výsledky měření naprázdno pro motor ATAS T22VT512 (7-0512).....</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 5: Srovnání hodnot odporu R_{Fe} získaného přímým výpočtem a výpočtem pro jednotlivá náhradní zapojení pro různá vstupní napětí motoru ATAS T22VT512 (7-0512).....</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 6: Srovnání hodnot indukčnosti L_{μ} získané přímým výpočtem a výpočtem pro jednotlivá náhradní zapojení pro různá vstupní napětí motoru ATAS T22VT512 (7-0512).....</i>	<i>58</i>

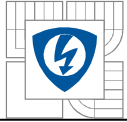


SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

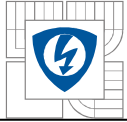
$\cos\varphi$	-	účinník
f	Hz	frekvence
F	A	magnetické napětí
I_1	A	komplexní hodnota statorového proudu (efektivní hodnota)
I_{1n}	A	komplexní hodnota jmenovitého statorového proudu (efektivní hodnota)
I_2	A	komplexní hodnota rotorového proudu (efektivní hodnota)
I_2'	A	komplexní hodnota rotorového proudu přepočteného na stator (efektivní hodnota)
I_0	A	komplexní hodnota magnetizačního proudu (efektivní hodnota)
I_u	A	imaginární složka magnetizačního proudu (efektivní hodnota)
I_{Fe}	A	reálná složka magnetizačního proudu (efektivní hodnota)
I_{10}	A	efektivní hodnota proudu naprázdno
I_{1k}	A	efektivní hodnota proudu nakrátko
I_t	A	proud v tyči klece rotoru
I_d	A	hodnota stejnosměrného proudu protékajícího mezi dvěma fázemi
k_{v1}	-	činitel vinutí statoru
k_{v2}	-	činitel vinutí rotoru
$L_{\sigma 1}$	H	rozptylová indukčnost statoru
$L_{\sigma 2}$	H	rozptylová indukčnost rotoru
$L_{\sigma 20}$	H	rozptylová indukčnost rotoru při frekvenci točivého magnetického pole
$L'_{\sigma 2}$	H	rozptylová indukčnost rotoru přepočtená na stator
$L'_{\sigma 20}$	H	rozptylová indukčnost rotoru při frekvenci točivého magnetického pole přepočtená na stator
L_μ	H	magnetizační indukčnost
m	-	počet fází
M	Nm	moment motoru
N	-	počet závitů na fázi
n	min^{-1}	otáčky motoru
n_1	min^{-1}	synchronní otáčky
P_1	W	příkon
P_2	W	výkon na hřídeli



P_{10}	W	příkon naprázdno
P_{1k}	W	příkon nakrátko
P_{el}	W	elektrický výkon spotřebovaný na všech rotorových činných odporech
P_{mech}	W	celkový mechanický výkon
P_{δ}	W	výkon přenášený přes vzduchovou mezeru
ΔP_0	W	ztráty naprázdno
ΔP_{j1}	W	ztráty ve vinutí statoru
ΔP_{j2}	W	ztráty ve vinutí rotoru
ΔP_{Fe}	W	ztráty v železe
ΔP_{mech}	W	mechanické ztráty
p	-	počet pólových dvojic
p_u	-	napět'ový převod
p_i	-	proudový převod
p_z	-	impedanční převod
Q_2	-	počet drážek
R_1	Ω	odpor statorového vinutí
R	Ω	odpor rotorového vinutí
R'	Ω	odpor rotorového vinutí přepočteného na stator
R_{Fe}	Ω	odpor reprezentující ztráty v železe
R_t	Ω	odpor tyče
R_k	Ω	odpor části kruhu připadající na jednu tyč
s	-	skluz
U_1	V	komplexní hodnota statorového napětí (efektivní hodnota)
U_{10}	V	efektivní hodnota napětí naprázdno
U_{1k}	V	efektivní hodnota napětí nakrátko
U_2	V	komplexní hodnota rotorového napětí
U_d	V	hodnota stejnosměrného napětí mezi dvěma fázemi
U_i	V	efektivní hodnota indukovaného napětí
U_n	V	efektivní hodnota jmenovitého napětí
U_{pom}	-	poměrné napětí
$X_{\sigma 1}$	Ω	rozptylová reaktance statoru
$X_{\sigma 2}$	Ω	rozptylová indukčnost rotoru
$X_{\sigma 20}$	Ω	rozptylová reaktance rotoru při frekvenci točivého magnetického pole



$X'_{\sigma 2}$	Ω	rozptylová reaktance rotoru přepočtená na stator
$X'_{\sigma 20}$	Ω	rozptylová reaktance rotoru při frekvenci točivého magnetického pole přepočtená na stator
$X_{t\sigma}$	Ω	rozptylová reaktance tyče
$X_{k\sigma}$	Ω	rozptylová reaktance části kruhu mezi tyčemi
X_{μ}	Ω	hlavní magnetizační reaktance
κ	-	největší společný dělitel počtu drážek Q_2 a počtu pólových dvojic p
Φ	Wb	magnetický tok
ω	rad/s	úhlová rychlost
ω_1	rad/s	synchronní úhlová rychlost
ω_m	rad/s	úhlová rychlost rotoru



1 ÚVOD

Asynchronní (také jinak indukční) stroje jsou v současnosti nejpoužívanějšími elektrickými stroji. Jejich velkými výhodami jsou hlavně jednoduchá konstrukce a tím i vysoká spolehlivost, vhodný průběh momentové charakteristiky a nízká cena. Tyto střídavé stroje vynalezl ke konci 19. století Nikola Tesla. Současné stroje mohou dosahovat výkonů řádově až MW.

Využívají se jako motory, kdy dochází k přeměně elektrické energie na energii mechanickou. Nejčastěji se používají k pohonům nevyžadujícím změnu rychlosti, protože otáčivá rychlost asynchronního stroje souvisí s rychlostí točivého pole. Avšak mohou také pracovat ve funkci generátorů, kdy z mechanické energie dodávají elektřinu do sítě. Vyskytují se zpravidla trojfázové, motory malých výkonů (přibližně do 1 kW) však mohou být i jednofázové.

Obecně má motor pevný stator a pohyblivý rotor. Mezi nimi je malá vzduchová mezera. Ve statoru složeného ze statorových plechů se nachází vinutí uložené v jeho drážkách po obvodu vzduchové mezery. Vinutí bývá rozložené a jeho konce jsou vyvedeny do svorkovnic. Rotorové vinutí je nejčastěji tvořeno klecí – tyčemi z mědi nebo hliníku, případně mosazi, které jsou spojeny po obou stranách zkratovacími kruhy shodného materiálu. Drážky se vyskytují různých tvarů a mají vliv na průběh točivého momentu motoru v závislosti na rychlosti otáčení a na jeho záběrný moment. Tomuto konstrukčnímu uspořádání říkáme klecový rotor. Druhou možností je tzv. rotor kroužkový, kdy do nosné kostry je vložen magnetický obvod tvořen z dynamoplechů ve tvaru mezikruží, na jejichž povrchu jsou drážky pro uložení vinutí. Toto vinutí je trojfázové, shodného typu jako vinutí statoru a se stejným počtem pólů. Rotorové vinutí je vyvedeno ke třem sběracím kroužkům, které jsou uloženy na ocelovém pouzdru, navlečeném na hřídel. Z nich je možno vést prostřednictvím kartáčků proud ke spouštěcím odporům.

Trojfázová vinutí bývají spojena buď do hvězdy (konec všech fází spojen do jednoho uzlu, začátky připojeny na jednotlivé fáze U, V a W zdroje napětí) nebo do trojúhelníku (konec předešlé fáze vinutí spojen se začátkem následující, uzly jsou připojeny k jednotlivým fázím zdroje).

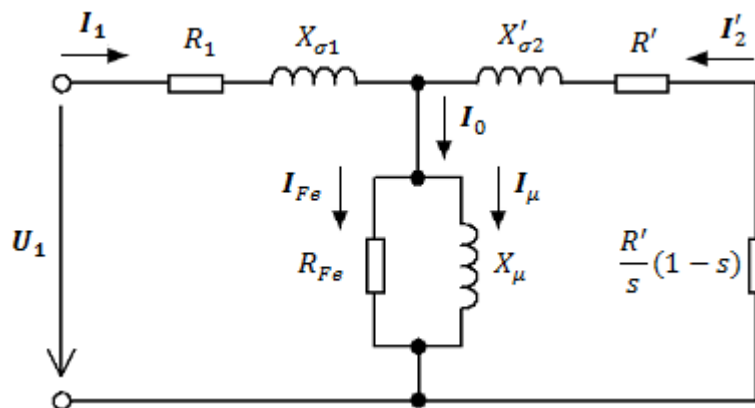
Funkce motoru spočívá ve vytvoření točivého magnetického pole ve vzduchové mezeře, které je buzeno trojfázovým vinutím statoru. Jednotlivé fáze tohoto vinutí jsou vůči sobě prostorově posunuty o 120° elektrických. Napájení vinutí je prováděno ze souměrné soustavy trojfázových napětí. Tím protéká vinutím souměrná soustava proudů, které jsou vzájemně časově posunuty o 120° , díky čemuž vzniká točivé magnetické pole otáčející se synchronní rychlostí otáčení. Tyto stroje nemají budiče, jsou magnetovány ze statoru připojeného k síti, proto mají co nejmenší vzduchové mezery.

Při zjišťování informací o konkrétním asynchronním motoru (např. k účelům řízení) je třeba znát také jeho parametry. Tyto se určují na základě třech zkoušek – měření naprázdno, měření nakrátko a měření při zatížení.

Práce je zaměřena na analýzu parametrů asynchronního motoru ve tvaru T-článku, Γ -článku a T-článku (inverzního Γ -článku) a dále je pro tato zapojení odvozena závislost statorového proudu a momentu na skluzu a provedeno srovnání těchto závislostí s naměřenými.

2 OBVODOVÝ MODEL A PARAMETRY ASYNCHRONNÍHO MOTORU

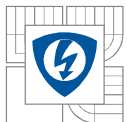
Obvodový model asynchronního motoru je znázorněn na Obr. 2-1. Je obdobný náhradnímu zapojení transformátoru. Zapojení ve tvaru T-článku se ve většině literatur vyskytuje nejčastěji. Je uváděno jako přesné náhradní schéma. Ve skutečnosti je však toto zapojení zbytečně složité a jeho přesnost je stejná jako u ostatních článků. Náhradní zapojení ve tvaru Γ -článku i T-článku obsahují vždy pouze jednu hlavní a jednu rozptylovou indukčnost, zatímco v T-článku nacházíme rozptylové indukčnosti dvě. Ve [3] je však ukázán výskyt pouze dvou nezávislých toků, tj. hlavního a rozptylového, a žádným měřením není možné rozdělit tuto jedinou rozptylovou indukčnost na dvě.



Obr. 2-1: Náhradní zapojení jedné fáze ASM ve tvaru T-článku

Význam jednotlivých symbolů (převzato z [7]):

U_1	[V]	komplexní hodnota statorového napětí (efektivní hodnota)
I_1	[A]	komplexní hodnota statorového proudu (efektivní hodnota)
I'_2	[A]	komplexní hodnota rotorového proudu přepočteného na stator (efektivní hodnota)
I_0	[A]	magnetizační proud statoru
I_{Fe}	[A]	reálná složka magnetizačního proudu
I_μ	[A]	imaginární složka magnetizačního proudu
R_1	[Ω]	odpor statorového vinutí
R'	[Ω]	odpor rotorového vinutí přepočteného na stator
R_{Fe}	[Ω]	odpor reprezentující ztráty v železe
$X_{\sigma 1}$	[Ω]	rozptylová reaktance statoru
$X'_{\sigma 2}$	[Ω]	rozptylová reaktance rotoru přepočtená na stator
X_μ	[Ω]	hlavní magnetizační reaktance



Odpor $\frac{R'}{s}(1-s)$ je tzv. fiktivním odporem. Elektrický výkon spotřebovaný na tomto odporu představuje mechanický výkon na hřídeli.

2.1 Stanovení převodu motoru

Pro přepočítání parametrů asynchronního motoru je třeba znát jeho převodní činitele. Jejich stanovení je obdobné jako u transformátoru. Převodní činitelé budou stanoveny pro oba typy asynchronního motoru – s kroužkovým i klecovým rotorem.

2.1.1 Převod napětí

Převodní činitele asynchronního motoru mezi statorovým a rotorovým napětím lze podle [2] odvodit z poměru vnitřních napětí statoru:

$$U_{i1} = 4,44 \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1} \cdot \phi_1 \quad (2.1.1)$$

a rotoru:

$$U_{i2} = 4,44 \cdot f_2 \cdot N_2 \cdot k_{v2} \cdot \phi_2, \quad (2.1.2)$$

kde k_{v1} [-] činitel vinutí statoru,

k_{v2} [-] činitel vinutí rotoru.

Jejich poměrem je získán převod napětí p_u :

$$p_u = \frac{U_{i1}}{U_{i2}} = \frac{N_1 \cdot k_{v1}}{N_2 \cdot k_{v2}} \quad (2.1.3)$$

Pozn.: U motorů s kroužkovým rotorem je v praxi převod napětí určen z tzv. kroužkového napětí stroje v klidu U_{20} , které je přítomno mezi kroužky kotvy při otevřeném rotorovém vinutí, je-li do statoru přivedeno trojfázové jmenovité napětí U_{1n} . Toto se užívá také k návrhu motoru a je obdobné postupu při stanovování převodu u transformátoru naprázdno [2].

2.1.2 Převod proudu

V [2] je ukázáno, že pro stanovení převodu proudu se vychází z rovnosti magnetických napětí $F_1 = F_2$ stanovených pro proudy I'_2 , případně I_2 :

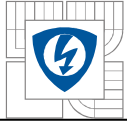
$$F_1 = \frac{m_1}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{N_1 \cdot k_{v1}}{p} \cdot I'_2 \quad (2.1.4)$$

a rotoru

$$F_2 = \frac{m_2}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{N_2 \cdot k_{v2}}{p} \cdot I_2 \quad (2.1.5)$$

Ze vzájemné rovnosti magnetických napětí vyplývá převod proudů p_i :

$$p_i = \frac{I'_2}{I_2} = \frac{m_2 \cdot N_2 \cdot k_{v2}}{m_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1}} \quad (2.1.6)$$



Pro porovnání je z [4] také vidět, že součet proudů tekoucích statorovým a rotorovým (přepočteným na stranu statoru) vinutím je roven magnetizačnímu proudu statoru:

$$I_1 - I_2 \frac{m_2 \cdot N_2 \cdot k_{v2}}{m_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1}} = I_0, \quad (2.1.7)$$

Rovnici (2.1.7) lze upravit do následujícího tvaru:

$$I_1 - I'_2 = I_0 \quad (2.1.8)$$

Z výše uvedeného vyplývá, že přepočtení rotorového proudu na stranu statoru je uskutečněno pomocí proudového převodu.

2.1.3 Převod impedancí

2.1.3.1 Motor s kroužkovou kotvou

Pro motor s kroužkovou kotvou je převod stanoven obdobně také pro impedance. Ten je z [2] určen podle podmínky neměnnosti ztrát Joulovým teplem, patřících skutečnému vinutí rotoru či myšlenému vinutí statoru:

$$m_2 \cdot R \cdot I_2^2 = m_1 \cdot R' \cdot I_2'^2 \quad (2.1.9)$$

Při použití vztahu (p_i) poté po úpravě:

$$R' = \frac{m_2}{m_1} \cdot \left(\frac{I_2}{I_2'} \right)^2 = \frac{m_2}{m_1} \cdot \left(\frac{N_1 \cdot k_{v1}}{N_2 \cdot k_{v2}} \right)^2 \cdot R \quad (2.1.10)$$

Převod impedancí p_z je roven:

$$p_z = \frac{R'}{R} = \frac{m_1}{m_2} \cdot \left(\frac{N_1 \cdot k_{v1}}{N_2 \cdot k_{v2}} \right)^2 \quad (2.1.11)$$

Odpor rotorového vinutí přečtený na stranu statoru je tedy:

$$R' = p_z \cdot R \quad (2.1.12)$$

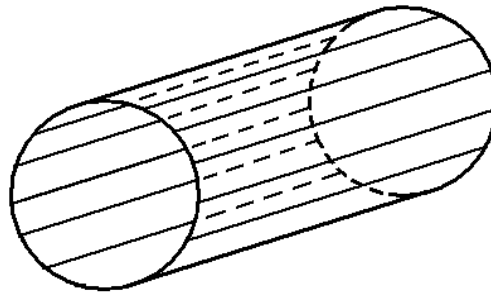
a rozptylová reaktance rotorového vinutí:

$$\frac{X'_{2\sigma}}{X_{2\sigma}} = \frac{R'}{R}, \quad (2.1.13)$$

$$X'_{2\sigma} = X_{2\sigma} \cdot \frac{m_1}{m_2} \cdot p_u^2 \quad (2.1.14)$$

2.1.3.2 Motor s kotvou nakrátko

V rámci práce bude při měření použit motor s kotvou nakrátko (s klecovým vinutím rotoru). Obecně je klec tvořena tyčemi (např. měděnými), které jsou uloženy v drážkách rotoru a jsou spojeny v každém čele rotoru kruhem nakrátko (Obr. 2-2 [1]). Klec je vhodná pro různé počty pólů $2p$ a její výroba je levná.



Obr. 2-2: Princip klecového vinutí [1]

Uvažme, že klec obsahuje Q_2 tyčí, které jsou vpředu i vzadu spojeny kruhem nakrátko. Jednovrstvová klec má stejný počet tyčí jako drážek. Při návrhu klece mohou nastat dva případy. V prvním není počet drážek soudělný s počtem pólových dvojic, v druhém případě má počet drážek určitou společnou míru s počtem pólových dvojic [1].

Počet drážek není soudělný s počtem pólových dvojic

Není-li počet drážek Q_2 soudělný s počtem pólových dvojic p , pak bude počet fází klece $m_2 = Q_2$. Fázový proud I_2 je roven proudu, který protéká tyčí I_t , počet závitů na fázi je $N_2 = 0,5$, protože pouze jeden vodič připadá na fázi. Činitel vinutí k_{v2} je proto také roven jedné [1].

Převod impedancí je poté dle (2.1.11):

$$p_z = \frac{m_1}{m_2} \cdot \left(\frac{N_1 \cdot k_{v1}}{N_2 \cdot k_{v2}} \right)^2 = \frac{m_1}{Q_2} \cdot \left(\frac{N_1 \cdot k_{v1}}{0,5 \cdot 1} \right)^2 = \frac{4m_1 N_1^2 k_{v1}^2}{Q_2} \quad (2.1.15)$$

a odpor tyče R_t je zde zároveň odporem fáze R , z čehož vyplývá:

$$R' = \frac{4m_1 N_1^2 k_{v1}^2}{Q_2} \cdot R_t \quad (2.1.16)$$

Počet drážek je soudělný s počtem pólových dvojic

Pokud má počet drážek Q_2 nejvyšší společnou míru κ s počtem pólových dvojic p , pak počet fází je roven:

$$m_2 = \frac{Q_2}{\kappa} \quad (2.1.17)$$

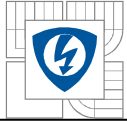
a fázový proud I_2 je κ -krát větší než proud v tyči I_t , protože κ tyčí je spojeno paralelně v každé fázi. Počet závitů na fázi je opět $N_2 = 0,5$ a činitel vinutí k_{v2} roven jedné.

Převod impedancí:

$$p_z = \frac{m_1}{m_2} \cdot \left(\frac{N_1 \cdot k_{v1}}{N_2 \cdot k_{v2}} \right)^2 = \frac{4m_1 N_1^2 k_{v1}^2 \kappa}{Q_2}, \quad (2.1.18)$$

Převod p_z je tedy užíván k přepočtu (např. odporu jedné fáze rotoru na fázi statoru), a protože je v tomto případě κ tyčí spojeno paralelně, pak odpor fáze rotoru je roven:

$$R = \frac{R_t}{\kappa} \quad (2.1.19)$$



Přepočtený odpor klece je poté totožný s (2.1.16), protože odpor rotoru je vyjádřen odporem jedné tyče R_t :

$$R' = p_z \cdot R = \frac{4m_1 N_1^2 k_{v1}^2 \kappa}{Q_2} \cdot \frac{R_t}{\kappa} = \frac{4m_1 N_1^2 k_{v1}^2}{Q_2} \cdot R_t \quad (2.1.20)$$

K odporu tyče je třeba však ještě připočítat obě přilehlé oblasti kruhů klece, jejichž vliv je v [1] vyjádřen. Odpor jedné fáze rotoru vztažený na proud tyče:

$$R = R_t + \frac{2R_k Q_p^2}{\pi^2}, \quad (2.1.21)$$

kde R_k [Ω] odpor části kruhu, připadající na jednu tyč.

Q_p je počet tyčí v jedné pólové rozteči:

$$Q_p = \frac{Q_2}{2p} \quad (2.1.22)$$

Výsledný odpor fáze rotoru přepočtený na fázi statoru je dle (2.1.20):

$$R' = \frac{4m_1 N_1^2 k_{v1}^2}{Q_2} \cdot \left(R_t + \frac{2R_s Q_p^2}{\pi^2} \right) \quad (2.1.23)$$

A obdobně jako ve vztahu (2.1.20) se rozptylová reaktance klecového vinutí rotoru:

$$X_{\sigma 2} = X_{t\sigma} + \frac{2X_{k\sigma} Q_p^2}{\pi^2} \quad (2.1.24)$$

přepočte na fázi statoru [1]:

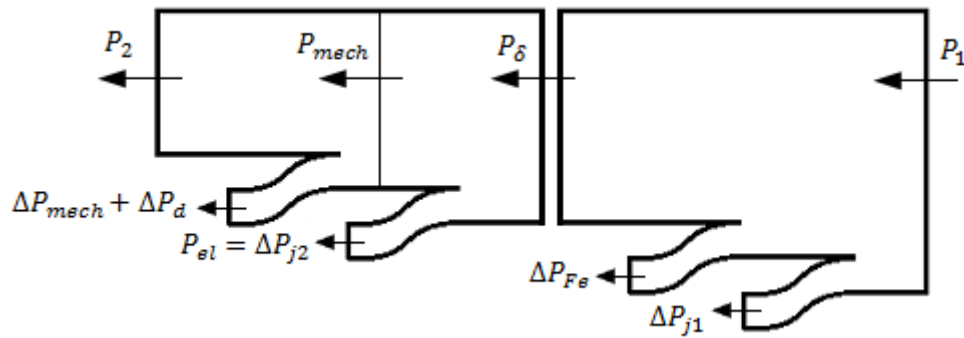
$$X'_{\sigma 2} = \frac{4m_1 N_1^2 k_{v1}^2}{Q_2} \cdot X_{\sigma 2}, \quad (2.1.25)$$

kde $X_{t\sigma}$ [Ω] rozptylová reaktance tyče,

$X_{k\sigma}$ [Ω] rozptylová reaktance části kruhu mezi tyčemi [1], [4].

2.2 Rozdělení výkonu asynchronního motoru

Jako ve všech zařízeních i u asynchronního motoru dochází vlivem průchodu proudu vinutími, třením a jiným zákonitostem ke ztrátám výkonu. Příkon přiváděný do stroje je zmenšen o ztráty, výsledný výkon na hřídeli stroje proto není s příkonem shodný. Nejvýznamnější energetické úbytky ukazuje Obr. 2-3, kde je vidět tok výkonu asynchronního motoru.



Obr. 2-3: Tok výkonu asynchronního motoru [6]

Z příkonu P_1 , který odebírá motor ze sítě, jsou hrazeny činné ztráty ve vinutí statoru ΔP_{j1} a také ztráty v železe (v magnetickém obvodu motoru) ΔP_{Fe} .

Výkon přenášený přes vzduchovou mezeru P_δ dále prochází do rotoru, v němž vznikají další ztráty, tj. činné ztráty ve vinutí rotoru ΔP_{j2} . Zbýlý výkon je tzv. mechanický výkon stroje P_{mech} , kdy je na stator i rotor působeno totožným momentem M [6].

Z [6] je dále možno vidět:

$$P_\delta = M \cdot \omega_1 = M \cdot 2\pi \cdot \frac{f_1}{p} = M \cdot 2\pi \cdot n_1 \quad (2.2.1)$$

a

$$P_{mech} = M \cdot \omega = M \cdot \omega \cdot (1 - s) \quad (2.2.2)$$

Z Obr. 2-3 je dále patrné, že

$$P_{el} = P_\delta - P_{mech} = M \cdot (\omega_1 - \omega) , \quad (2.2.3)$$

kde P_{el} je elektrický výkon, který je spotřebován na všech rotorových činných odporech. Z rovnic (2.2.1) a (2.2.3) vyplývá:

$$\frac{P_{el}}{P_\delta} = M \cdot \frac{\omega_1 - \omega}{M \cdot \omega_1} = s \quad (2.2.4)$$

Díky tomu je možno vidět, že elektrický výkon P_{el} je roven součinu skluzu a výkonu přenášenému přes vzduchovou mezeru.

$$P_{el} = P_\delta \cdot s \quad (2.2.5)$$

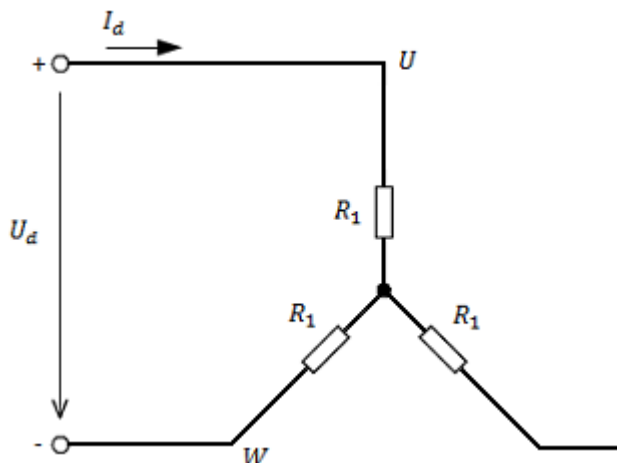
Výkonu P_{el} se říká skluzový výkon. Jeho změnou je možno řídit otáčky asynchronního motoru.

Celkový mechanický výkon P_{mech} však není výkon, který je přenášen na hřídel. Tento je ještě snížen o vlastní mechanické ztráty stroje ΔP_{mech} a také o dodatečné ztráty ΔP_d . Výsledný výkon přenášený na hřídel je tedy:

$$P_2 = P_{mech} - \Delta P_{mech} - \Delta P_d \quad (2.2.6)$$

2.3 Odpor vstupního vinutí

Odpor vstupního vinutí (vinutí statoru) je možno jednoduše změřit stejnosměrnou Ohmovou metodou. Na svorky libovolných dvou fází (např. U a W, viz. Obr. 2-4) se provede připojení stejnosměrného zdroje napětí. Následně jsou změřeny hodnoty stejnosměrného napětí a proudu [5].



Obr. 2-4: Zapojení vstupního vinutí asynchronního motoru do hvězdy

Při zapojení do hvězdy se dle Ohmova zákona vždy pro danou dvojici svorek vypočte odpor podílem poloviny napětí na svorkách a proudu tekoucího vinutím [5]:

$$R'_1 = \frac{U_d}{2 \cdot I_d} \quad (2.3.1)$$

Výsledná hodnota odporu vstupního vinutí je určena aritmetickým průměrem z vypočtených hodnot.

2.4 Odpor reprezentující ztráty v železe a magnetizační reaktance

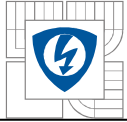
Při stanovování odporu reprezentujícího ztráty v železe R_{Fe} je nutné, aby měření probíhalo vždy ve stavu naprázdno. Měření je činný příkon P_{10} při napájení jmenovitým napětím U_{10} a jmenovitým kmitočtem f (tomu odpovídá jmenovité sycení železa).

Velikost tohoto odporu poté lze určit ze znalosti příkonu a napájecího napětí pomocí vztahu [7]:

$$R_{Fe} = \frac{U_{10}^2}{P_{10}} \quad (2.4.1)$$

Velmi důležitá je při tomto měření hodnota kmitočtu. Hysterezní ztráty se totiž zvyšují s první mocninou kmitočtu, vířivé ztráty pak s jeho druhou mocninou (za předpokladu, že při změně kmitočtu je udržována konstantní amplituda magnetické indukce v jádře, tedy poměr U_{10}/f) [3].

Hlavní magnetizační reaktance je určena dle vztahu [7]:



$$X_{\mu} = \frac{U_{10}}{\sqrt{3} \cdot I_{10}} \sin \left[\arccos \left(\frac{P_{10}}{\sqrt{3} \cdot U_{10} \cdot I_{10}} \right) \right] \quad (2.4.2)$$

2.5 Rozptylová indukčnost statoru a rotoru

Při měření nakrátko jsou změřeny hodnoty odporů a reaktancí podélné větve. Celková rozptylová reaktance je tedy vypočtena následným vztahem [7]:

$$X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2} = \sqrt{\left(\frac{U_{1k}}{\sqrt{3} I_{1k}} \right)^2 - \left(\frac{P_k}{3 I_k^2} \right)^2}, \quad (2.5.1)$$

z něhož lze úpravou zjistit celkovou rozptylovou indukčnost:

$$L_{\sigma 1} + L_{\sigma 2} = \frac{\sqrt{\left(\frac{U_{1k}}{\sqrt{3} I_{1k}} \right)^2 - \left(\frac{P_k}{3 I_k^2} \right)^2}}{2\pi f} \quad (2.5.2)$$

2.6 Rotorový odpor přepočtený na stranu statoru

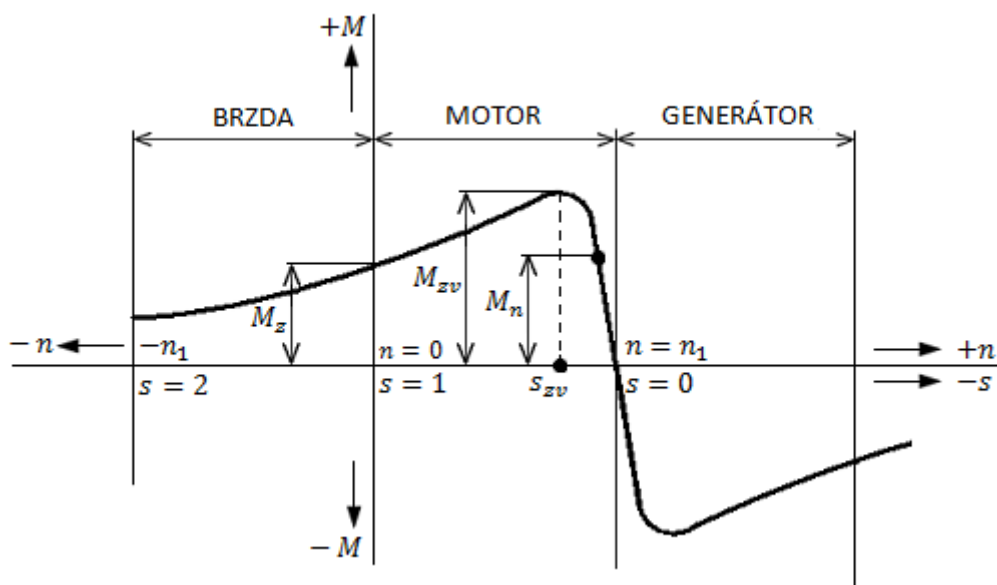
Hodnota rotorového odporu přepočteného na stranu statoru je známa díky změřenému odporu vstupního vinutí R_1 a příkonu P_{1k} a proudu I_{1k} zjištěných při měření nakrátko [7]:

$$R' = \frac{P_{1k}}{3 I_{1k}^2} - R_1 \quad (2.6.1)$$

3 NÁHRADNÍ ZAPOJENÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU

V této práci budou zmíněna celkem čtyři náhradní zapojení asynchronního motoru, a to ve tvaru výchozího článku, T-článku, Γ -článku a Υ -článku. Zapojení ve tvaru výchozího článku však není považováno za přesnou náhradu a v práci je díky své jednoduchosti uvažováno pouze k pochopení problematiky. Všeobecně je ovšem možných variant náhradních zapojení velké množství. Důležité je zmínit, že parametry jednotlivých náhradních zapojení nejsou ekvivalentní.

Pro výše zmíněná zapojení bude dále určena závislost momentu motoru na skluzu $M = f(s)$. Momentová charakteristika je závislost točivého momentu motoru na jeho skluzu (či otáčkách) při jmenovitém, případně i jiném statorovém napětí. Tato charakteristika slouží pro posouzení vlastností motoru. Průběh momentové charakteristiky asynchronního stroje je vyobrazen na Obr. 3-1.



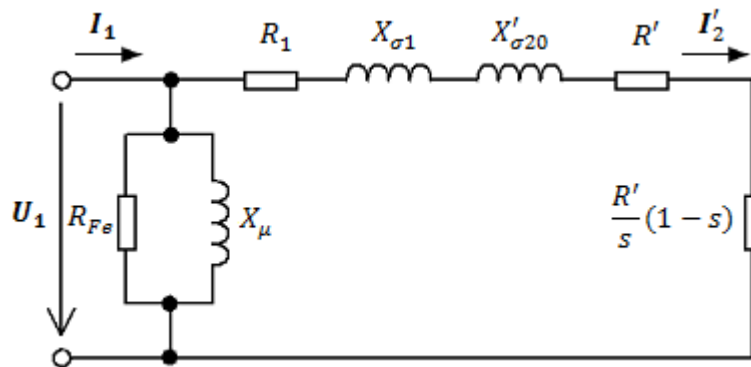
Obr. 3-1: Momentová charakteristika asynchronního stroje [6]

Význam jednotlivých symbolů:

M_z	[Nm]	záběrný moment
M_{zv}	[Nm]	moment zvratu (maximální moment)
M_n	[Nm]	jmenovitý moment
s_{zv}	[-]	skluz zvratu

3.1 Výchozí zapojení článku

Toto zapojení představuje mnohá zjednodušení a není proto zcela přesné. Dochází v něm k přesunutí příčné větve na úplný začátek svorek. Díky tomu lze dostat velkého zjednodušení při odvození závislosti momentu stroje na skluzu, protože podélná větev představuje prostou sériovou kombinaci.



Obr. 3-2: Náhradní zapojení jedné fáze ASM ve tvaru výchozího článku [6]

3.1.1 Odvození závislosti satorového proudu na skluzu

Závislost satorového proudu na skluzu pro zapojení výchozího článku lze zjistit jednoduše poměrem vstupního napětí U_1 a celkové impedance Z .

Z Obr. 3-2 jsou patrné impedance Z_1 :

$$Z_1 = \frac{R_{Fe} \cdot j\omega L_{\mu}}{R_{Fe} + j\omega L_{\mu}} \quad (3.1.1)$$

a Z_2

$$Z_2 = R_1 + j\omega L_{\sigma 1} + j\omega L'_{\sigma 20} + \frac{R'}{s}, \quad (3.1.2)$$

kde $L'_{\sigma 20}$ je rozptylová indukčnost rotorového vinutí.

Satorový proud v závislosti na skluzu je tedy:

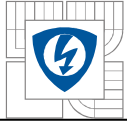
$$I_1 = \frac{U_1}{\frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2}}, \quad (3.1.3)$$

po dosazení a úpravě (Příloha P-1) jeho absolutní hodnota:

$$I_1 = \frac{U_1 \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{R_1}{R_{Fe}} + \frac{R'}{sR_{Fe}} + \frac{L_{\sigma 1}}{L_{\mu}} + \frac{L'_{\sigma 20}}{L_{\mu}}\right)^2 + \left(\frac{R_1}{\omega L_{\mu}} + \frac{R'}{s\omega L_{\mu}} - \frac{\omega L_{\sigma 1}}{R_{Fe}} - \frac{\omega L'_{\sigma 20}}{R_{Fe}}\right)^2}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'}{s}\right)^2 + \left(-\frac{\omega L_{\sigma 1}}{R_{Fe}} - \frac{\omega L'_{\sigma 20}}{R_{Fe}}\right)^2}} \quad (3.1.4)$$

3.1.2 Odvození momentu v závislosti na skluzu

Z Obr. 3-2 lze vidět, že hodnota proudu I_2' je rovna:



$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 20})^2}}, \quad (3.1.5)$$

kde $X'_{\sigma 20}$ je rozptylová reaktance rotorového vinutí při frekvenci f_1 (frekvenci točivého magnetického pole). Jak ukazuje [6], z obvodového modelu je možné dále určit velikost výkonu P_{mech} :

$$P_{mech} = m \cdot \frac{R'}{s} (1 - s) \cdot I_2'^2, \quad (3.1.6)$$

kde m značí počet fází stroje. Vztah pro mechanický moment motoru je poté:

$$M_{mech} = \frac{P_{mech}}{\omega_m} \quad (3.1.7)$$

Mechanická úhlová rychlost rotoru je určena rozdílem uhlových rychlostí točivých polí statoru a rotoru:

$$\omega_m = \omega_1 - \omega_2 = \omega_1 \cdot (1 - s) \quad (3.1.8)$$

Hodnota momentu je poté určena podílem výkonu a úhlového kmitočtu, ze vztahu (3.1.6) dosadíme do (3.1.7) [6]:

$$M = \frac{P}{\omega_m} = \frac{P_{mech}}{\omega_m} \quad (3.1.9)$$

Při znalosti (3.1.5) je proto po dosazení a následném vyjádření získán vztah pro hodnotu elektrického výkonu:

$$P_{mech} = \frac{R'}{s} (1 - s) \cdot I_2'^2 = \frac{\frac{R'}{s} (1 - s) \cdot U_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 20})^2} \quad (3.1.10)$$

Výsledný vztah pro moment motoru s náhradním zapojením ve tvaru hybrid- Γ v závislosti na skluzu je po dosazení [6]:

$$M = \frac{P_{mech}}{\omega_m} = \frac{\frac{R'}{s} (1 - s) \cdot U_1^2}{\omega_1 \cdot (1 - s) \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 20})^2\right]}, \quad (3.1.11)$$

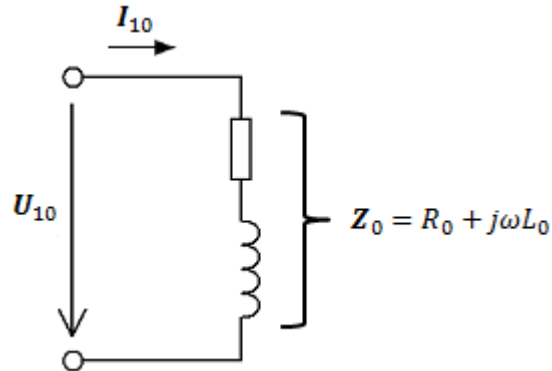
a po úpravě:

$$M = \frac{3 \cdot \frac{R'}{s} \cdot U_1^2}{\omega_1 \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 20})^2\right]} \quad (3.1.12)$$

Při pohledu na výsledný vztah je patrné, že změna napájecího napětí (zejména jeho pokles) výrazným způsobem ovlivní hodnotu momentu.

3.1.3 Stanovení parametrů z měření naprázdno

V této práci budou parametry příčné větve u zapojení ve tvaru výchozího článku z měření naprázdno určeny následujícím způsobem:

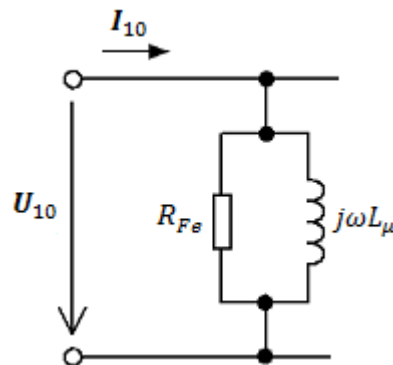


Obr. 3-3: Celková impedance při měření naprázdno

Z měření naprázdno je zjištěna reálná a komplexní část impedance (Obr. 3-3):

$$\mathbf{Z}_0 = R_0 + j\omega L_0 \quad (3.1.13)$$

Při měření bude uplatněna vždy konkrétní část obvodu dle typu náhradního zapojení. V případě náhradního zapojení výchozího článku se jedná o část, kterou ukazuje Obr. 3-3, tedy pouze o příčnou větev.



Obr. 3-4: Část obvodu uplatněná při měření naprázdno pro náhradní zapojení jedné fáze ASM ve tvaru výchozího článku

Z Obr. 3-4 vyplývá celková hodnota impedance při měření naprázdno:

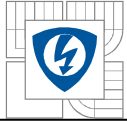
$$\mathbf{Z}_{hr} = \frac{1}{\frac{1}{R_{Fe}} + \frac{1}{j\omega L_{\mu}}}, \quad (3.1.14)$$

po úpravě na admitanci:

$$\mathbf{Y}_{hr} = \frac{1}{R_{Fe}} - j \frac{1}{\omega L_{\mu}} \quad (3.1.15)$$

je známa reálná a imaginární část admitance při měření naprázdno pro výchozí článek.

Admitance při měření naprázdno jsou si vzájemně rovny:



$$\frac{1}{Z_0} = Y_{hr} \quad (3.1.16)$$

Dle (3.1.16) je admitance sériového obvodu při měření naprázdno:

$$\frac{1}{Z_0} = \frac{1}{R_0 + j\omega L_0} \quad (3.1.17)$$

a po usměrnění zlomku:

$$\frac{1}{Z_0} = \frac{R_0 - j\omega L_0}{R_0^2 + (\omega L_0)^2} = \frac{R_0}{R_0^2 + (\omega L_0)^2} - j \frac{\omega L_0}{R_0^2 + (\omega L_0)^2} \quad (3.1.18)$$

Při platnosti (3.1.16) je tedy vidět, že srovnáním (3.1.15) a (3.1.18) je reálná část admitance:

$$\frac{R_0}{R_0^2 + (\omega L_0)^2} = \frac{1}{R_{Fe}} \quad (3.1.19)$$

a imaginární část admitance:

$$\frac{\omega L_0}{R_0^2 + (\omega L_0)^2} = \frac{1}{\omega L_\mu} \quad (3.1.20)$$

Výsledkem jsou vztahy pro výpočet parametrů příčné větve náhradního zapojení jedné fáze asynchronního motoru ve tvaru výchozího článku:

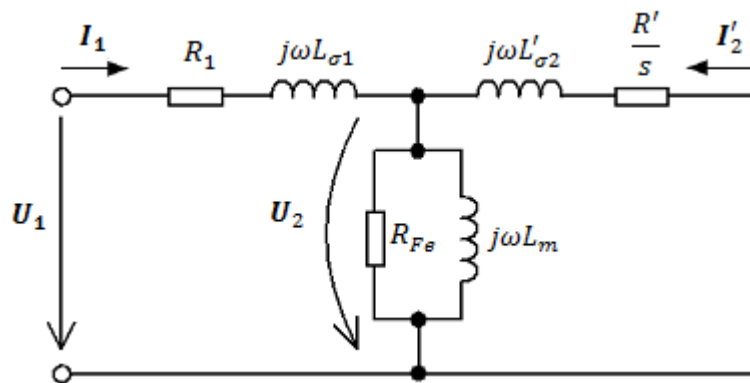
$$R_{Fe} = \frac{R_0^2 + (\omega L_0)^2}{R_0}, \quad (3.1.21)$$

$$L_\mu = \frac{R_0^2 + (\omega L_0)^2}{\omega^2 L_0} \quad (3.1.22)$$

3.2 Zapojení ve tvaru T-článku

Jak již bylo řečeno v kapitole 2, v literaturách se jako přesné náhradní schéma asynchronního motoru uvádí nejčastěji zapojení ve tvaru T-článku. V [3] je dokázáno, že tohle zapojení je v porovnání s Γ -článkem i T-článkem složitější. Objevují se zde dvě rozptylové indukčnosti, z nichž jedna je nadbytečná.

Samotné náhradní zapojení v tomto tvaru je pro praktické využití poměrně značně složité a navíc i zbytečné, jeho přesnost je totožná s ostatními články.



Obr. 3-5: Upravené náhradní zapojení jedné fáze ASM tvaru T-článku

Porovnáním Obr. 2-1 a Obr. 3-5 je vidět, že:

$$X_{\sigma 1} = j\omega L_{\sigma 1} \quad (3.2.1)$$

$$X'_{\sigma 2} = j\omega L'_{\sigma 2} \quad (3.2.2)$$

$$X_{\mu} = j\omega L_{\mu} \quad (3.2.3)$$

$$R' + \frac{R'}{s}(1 - s) = \frac{R'}{s} \quad (3.2.4)$$

3.2.1 Odvození závislosti satorového proudu na skluzu

Pro stanovení závislosti satorového proudu asynchronního motoru na skluzu (tzv. proudové charakteristiky) je potřeba nejdříve určit hodnotu impedancí jednotlivých větví.

Při pohledu na náhradní zapojení ve tvaru T-článku je patrné, že impedance příčné větve Z_2 bude:

$$Z_2 = \frac{R_{Fe} \cdot j\omega L_{\mu}}{R_{Fe} + j\omega L_{\mu}}, \quad (3.2.5)$$

impedance podélné větve je pak rozdělena na dvě části:

$$Z_1 = R_1 + j\omega L_{\sigma 1}, \quad (3.2.6)$$

a

$$Z_3 = \frac{R'}{s} + j\omega L'_{\sigma 2} \quad (3.2.7)$$

Závislost je získána poměrem vstupního napětí a impedance obvodu:

$$I_1 = \frac{U_1}{\frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1} \quad (3.2.8)$$

Konečné určení proudové charakteristiky pro náhradní zapojení ve tvaru T-článku představuje rovnice (3.2.9), naznačený postup při odvození je možno vidět v Příloze P-2:

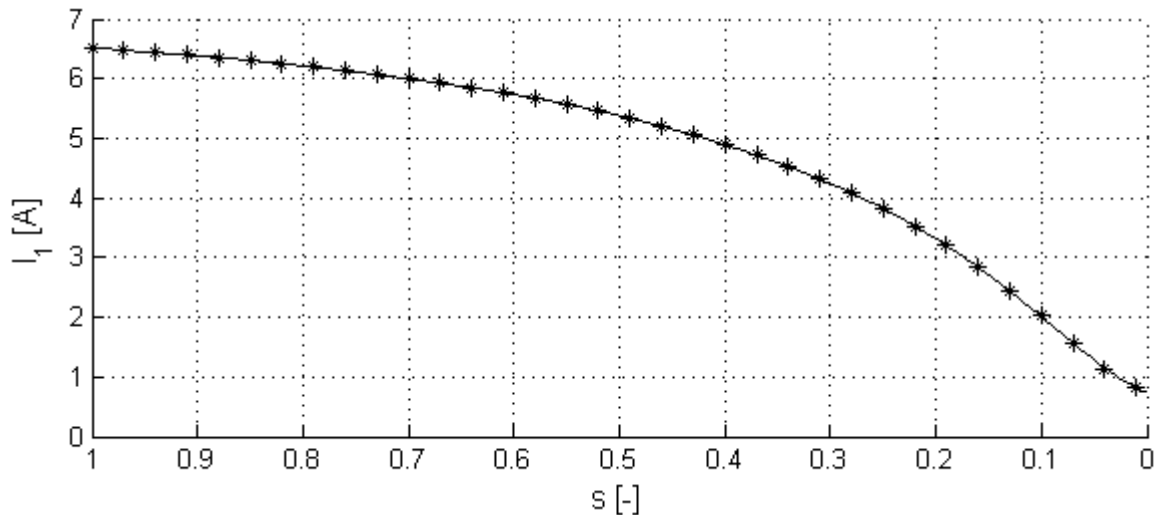
$$I_1 = \frac{U_1 \cdot \sqrt{\left(s + s \frac{L'_{\sigma 2}}{L_\mu} + \frac{R'}{R_{Fe}}\right)^2 + \left(\frac{R'}{\omega L_\mu} - s \frac{\omega L'_{\sigma 2}}{R_{Fe}}\right)^2}}{\sqrt{\alpha_7 + \alpha_8}}, \quad (3.2.9)$$

koeficienty α_7 a α_8 vyjadřují:

$$\alpha_7 = \left(R' + sR_1 + s \frac{R_1 L'_{\sigma 2}}{L_\mu} + \frac{R' R_1}{R_{Fe}} + \frac{R' L_{\sigma 1}}{L_\mu} + \frac{R' R_1}{\omega L_\mu} - s \frac{\omega^2 L_{\sigma 1} L'_{\sigma 2}}{R_{Fe}} \right)^2$$

$$\alpha_8 = \left(\frac{R' R_1}{\omega L_\mu} - s \frac{\omega R_1 L'_{\sigma 2}}{R_{Fe}} - s \frac{\omega L_{\sigma 1} L'_{\sigma 2}}{L_\mu} - \frac{\omega R' L_{\sigma 1}}{R_{Fe}} - s \omega L'_{\sigma 2} - s \omega L_{\sigma 1} \right)^2$$

Průběh odvozené závislosti satorového proudu na skluzu je vidět na Obr. 3-6.



Obr. 3-6: Závislost satorového proudu na skluzu pro náhradní zapojení ve tvaru T-článku

3.2.2 Odvození momentu v závislosti na skluzu

Nyní je při znalosti impedancí možné začít odvozovat závislost momentu na skluzu. Ta se určí ze vztahu:

$$M = \frac{P_{mech}}{\omega_{mech}} = \frac{\frac{R'}{s} \cdot I_2'^2}{\omega_1} \quad (3.2.10)$$

Proud I_2' je rotorový proud přepočtený na stranu satoru. Z Obr. 3-5 jednoznačně vyplývá, že jeho komplexní hodnota je určena napětím U_2 a impedancí Z_3 :

$$I_2' = \frac{U_2}{Z_3} \quad (3.2.11)$$

a konečně napětí U_2 , jehož hodnota je pro výpočet závislosti potřebná, lze z Obr. 3-5 stanovit následovně:

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{\frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3}}{\frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1} \quad (3.2.12)$$

Po následných úpravách (viz. Příloha P-3) je tedy získána závislost momentu asynchronního motoru na skluzu pro náhradní zapojení ve tvaru T-článku:

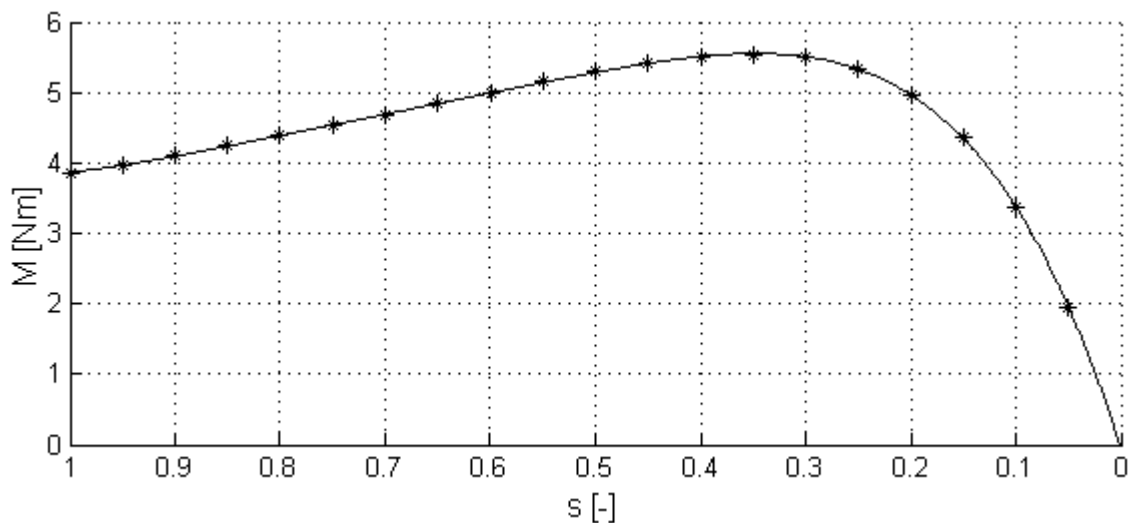
$$M = \frac{3U_1^2 \cdot \left(\frac{R'}{\omega L'_{\sigma 2}} + s\right)^2 \cdot \frac{R'}{s}}{\omega_1 \cdot (\alpha_{11}^2 + \alpha_{12}^2)}, \quad (3.2.13)$$

kde koeficienty α_{11} a α_{12} představují:

$$\alpha_{11} = \left[(-s\omega L_{\sigma 1} L'_{\sigma 2} - R' L_{\sigma 1}) \left(\frac{1}{L_{\sigma 1}} + \frac{R_1}{R_{Fe} L_{\sigma 1}} + \frac{1}{L'_{\sigma 2}} + \frac{1}{L_{\mu}} + \frac{R'}{s R_{Fe} L'_{\sigma 2}} \right) + \frac{R' R_1}{\omega L_{\mu}} + \frac{R'^2 R_1}{s \omega^2 L_{\mu} L'_{\sigma 2}} \right]$$

$$\alpha_{12} = \left[\left(-R_1 - \frac{R' R_1}{s \omega L'_{\sigma 2}} \right) \left(\frac{R'}{R_1} + s + \frac{s L'_{\sigma 2}}{L_{\mu}} + \frac{R' L_{\sigma 1}}{R_1 L_{\mu}} + \frac{R'}{R_{Fe}} \right) + \frac{s \omega^2 L_{\sigma 1} L'_{\sigma 2}}{R_{Fe}} + \frac{\omega L_{\sigma 1} R'}{R_{Fe}} \right]$$

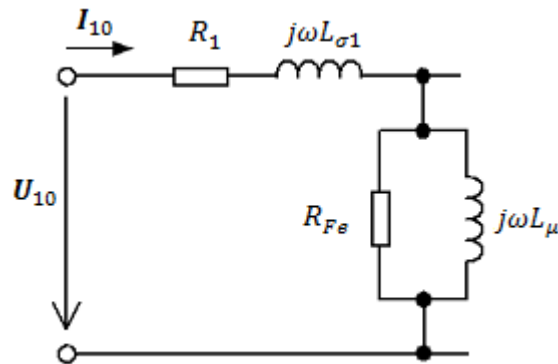
Průběh odvozené závislosti momentu na skluzu je zobrazen na Obr. 3-7.



Obr. 3-7: Závislost momentu na skluzu pro náhradní zapojení ve tvaru T-článku

3.2.3 Stanovení parametrů z měření naprázdno

Při srovnání s kapitolou 3.1.3 vyplývá, že reálná část impedance naprázdno bude větší o odpor vstupního vinutí R_l a imaginární část o rozptylovou indukčnost statorového vinutí $L_{\sigma 1}$ (viz. Obr. 3.8). Tato změna je při výpočtu dále uvažována.



Obr. 3-8: Část obvodu uplatněná při měření naprázdno pro náhradní zapojení v tvaru T-článku

Podle vztahu (3.1.13) bude tedy impedance naprázdno:

$$\mathbf{Z}_T = R_1 + j\omega L_{\sigma 1} + \frac{1}{\frac{1}{R_{Fe}} + \frac{1}{j\omega L_{\mu}}} \quad (3.2.14)$$

Reálná část impedance zapojení je ve srovnání s (3.1.14) tedy rozšířena o odpor R_1 a rozptylovou indukčnost $L_{\sigma 1}$. Při platnosti:

$$\mathbf{Z}_0 = \mathbf{Z}_T \quad (3.2.15)$$

je poté výraz upraven na:

$$(R_0 - R_1) + j(\omega L_0 - \omega L_{\sigma 1}) = \frac{1}{\frac{1}{R_{Fe}} + \frac{1}{j\omega L_{\mu}}} \quad (3.2.16)$$

Převedením impedancí v (3.2.16) na admitance:

$$\frac{1}{(R_0 - R_1) + j(\omega L_0 - \omega L_{\sigma 1})} = \frac{1}{R_{Fe}} + \frac{1}{j\omega L_{\mu}} \quad (3.2.17)$$

je poté v (3.2.17) stejným způsobem jako v (3.1.18) provedeno usměrnění zlomku na levé straně rovnice:

$$\begin{aligned} \frac{1}{(R_0 - R_1) + j(\omega L_0 - \omega L_{\sigma 1})} \cdot \frac{(R_0 - R_1) - j(\omega L_0 - \omega L_{\sigma 1})}{(R_0 - R_1) - j(\omega L_0 - \omega L_{\sigma 1})} \\ = \frac{(R_0 - R_1) - j(\omega L_0 - \omega L_{\sigma 1})}{(R_0 - R_1)^2 + (\omega L_0 - \omega L_{\sigma 1})^2} \end{aligned} \quad (3.2.18)$$

Úpravou zlomku je opět získána reálná a imaginární část:

$$\frac{(R_0 - R_1)}{(R_0 - R_1)^2 + (\omega L_0 - \omega L_{\sigma 1})^2} - j \frac{(\omega L_0 - \omega L_{\sigma 1})}{(R_0 - R_1)^2 + (\omega L_0 - \omega L_{\sigma 1})^2}, \quad (3.2.19)$$

Díky kterým získáme stejně jako v (3.1.19) a (3.1.20) vztahy pro výpočet odporu R_{Fe} :

$$R_{Fe} = \frac{(R_0 - R_1)^2 + (\omega L_0 - \omega L_{\sigma 1})^2}{(R_0 - R_1)} \quad (3.2.20)$$

a indukčnosti L_{μ} :

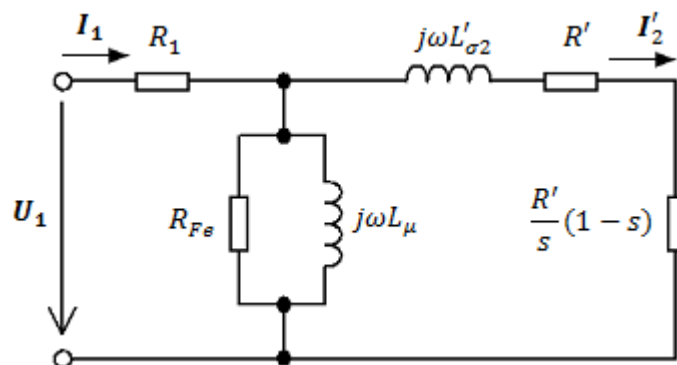
$$L_{\mu} = \frac{(R_0 - R_1)^2 + (\omega L_0 - \omega L_{\sigma 1})^2}{\omega^2(L_0 - L_{\sigma 1})} \quad (3.2.21)$$

3.3 Zapojení ve tvaru Γ -článku

Náhradní zapojení asynchronního motoru ve tvaru Γ -článku je obecně považováno za zjednodušující a méně přesné než náhradní zapojení ve tvaru T-článku. V [3] je provedeno přesné odvození náhradního zapojení transformátoru ve tvaru T-článku, Γ -článku a \bar{T} -článku. Odvození je sice provedeno pro transformátor, je však možné ho užít i pro náhradní zapojení jedné fáze asynchronního motoru.

Rozdíl mezi náhradními zapojeními T-článku a Γ -článku spočívá v chybějící satorové rozptylové indukčnosti u Γ -článku. To ovšem neznamená, že se rozptyl ve satorovém vinutí neobjevuje. Naopak je v [3] dokázáno, že ze dvou rozptylových indukčností v náhradním zapojení ve tvaru T-článku je jedna nadbytečná [7].

Náhradní zapojení jedné fáze asynchronního motoru ve tvaru Γ -článku je znázorněno na Obr. 3-9.



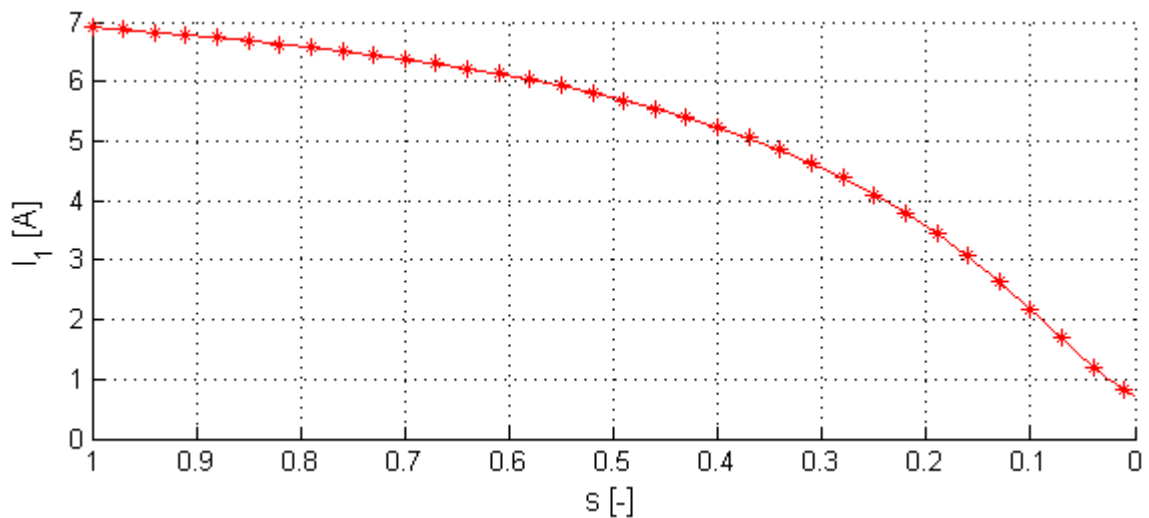
Obr. 3-9: Náhradní zapojení jedné fáze ASM ve tvaru Γ -článku

3.3.1 Odvození závislosti satorového proudu na skluzu

Protože pro zapojení ve tvaru T-článku byla v kapitole 3.2.1 proudová charakteristika již odvozena, je její stanovení pro Γ -článek velmi jednoduchou záležitostí. Jak již bylo řečeno, jedna ze dvou rozptylových reaktancí je v T-článku nadbytečná. Ve vztahu (3.2.9) zanedbána rozptylová indukčnost satoru $L_{\sigma 1}$, výsledkem je tvar proudové charakteristiky pro náhradní zapojení ve tvaru Γ -článku. Je třeba poznamenat, že parametry jednotlivých zapojení nejsou ekvivalentní, tj. rozptylová indukčnost $L'_{\sigma 2}$ T-článku není shodná s $L'_{\sigma 2}$ Γ -článku.

$$I_1 = \frac{U_1 \cdot \sqrt{\left(s + s \frac{L'_{\sigma 2}}{L_{\mu}} + \frac{R'}{R_{Fe}}\right)^2 + \left(\frac{R'}{\omega L_{\mu}} - s \frac{\omega L'_{\sigma 2}}{R_{Fe}}\right)^2}}{\sqrt{\left(R' + sR_1 + s \frac{R_1 L'_{\sigma 2}}{L_{\mu}} + \frac{R' R_1}{R_{Fe}} + \frac{R' R_1}{\omega L_{\mu}}\right)^2 + \left(\frac{R' R_1}{\omega L_{\mu}} - s \frac{\omega R_1 L'_{\sigma 2}}{R_{Fe}} - s \omega L'_{\sigma 2}\right)^2}} \quad (3.3.1)$$

Průběh závislosti satorového proudu na skluzu lze vidět na Obr. 3-10.



Obr. 3-10: Závislost satorového proudu na skluzu pro náhradní zapojení ve tvaru Γ -článku

3.3.2 Odvození momentu v závislosti na skluzu

Obdobným způsobem je postupováno i v případě odvození závislosti momentu na skluzu pro Γ -článek. Z rovnice závislosti momentu na skluzu pro T-článek odvozené v kapitole 3.2.2 je opět zanedbána rozptylová indukčnost satorového vinutí $L_{\sigma 1}$. Tím je získán vztah, vyjadřující závislost momentu na skluzu Γ -článku:

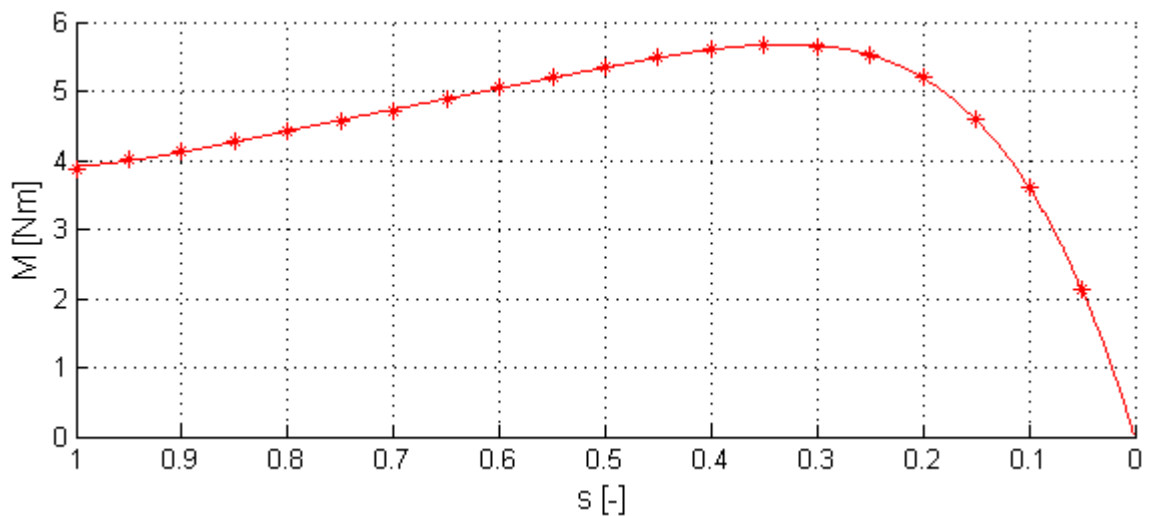
$$M = \frac{3U_1^2 \cdot \left[\left(\frac{R'}{\omega L'_{\sigma 2}} \right)^2 + s^2 \right] \cdot \frac{R'}{s}}{\omega_1 \cdot (\alpha_{21}^2 + \alpha_{22}^2)}, \quad (3.3.2)$$

kde α_{21} a α_{22} jsou:

$$\alpha_{21} = \left(-s\omega L'_{\sigma 2} - \frac{s\omega R_1 L'_{\sigma 2}}{R_{Fe}} + \frac{R' R_1}{\omega R_{Fe} L_{\mu}} + \frac{R'^2}{s\omega L'_{\sigma 2}} + \frac{R' R_1}{\omega L_{\mu}} + \frac{R' R_1}{\omega L'_{\sigma 2}} \right)$$

$$\alpha_{22} = \left(-2R' - sR_1 - \frac{sR_1 L'_{\sigma 2}}{L_{\mu}} - \frac{R' R_1}{R_{Fe}} + \frac{R_1 R'^2}{s\omega^2 R_{Fe} L_{\mu} L'_{\sigma 2}} \right)$$

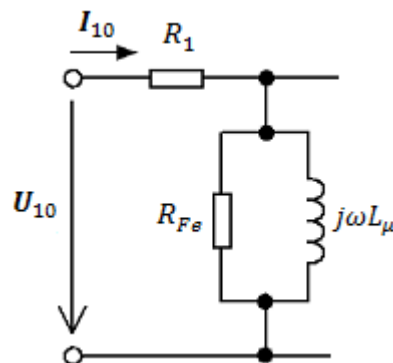
Průběh odvozené závislosti momentu na skluzu ukazuje Obr. 3-11. Oba průběhy jsou prakticky shodné, což potvrzuje, že jednotlivá zapojení jsou vzájemně ekvivalentní.



Obr. 3-11: Závislost momentu na skluzu pro náhradní zapojení ve tvaru Γ -článku

3.3.3 Stanovení parametrů z měření naprázdno

Při srovnání s kapitolou 3.1.3 vyplývá, že reálná část impedance naprázdno bude větší o odpor vstupního vinutí R_1 (viz. Obr. 3.12). Tento odpor je při výpočtu dále uvažován.



Obr. 3-12: Část obvodu uplatněná při měření naprázdno pro náhradní zapojení v tvaru Γ -článku

Stejným způsobem jako v předchozích případech bude tedy impedance naprázdno:

$$Z_{\Gamma} = R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_{Fe}} + \frac{1}{j\omega L_{\mu}}} \quad (3.3.3)$$

Reálná část impedance zapojení je v porovnání s (3.1.14) tedy rozšířena o odpor R_1 . Při platnosti:

$$Z_0 = Z_{\Gamma} \quad (3.3.4)$$

je tedy výraz upraven:

$$R_0 - R_1 + j\omega L_0 = \frac{1}{\frac{1}{R_{Fe}} + \frac{1}{j\omega L_{\mu}}} \quad (3.3.5)$$

Převedením impedancí v (3.3.5) na admitance:

$$\frac{1}{(R_0 - R_1) + j\omega L_0} = \frac{1}{R_{Fe}} + \frac{1}{j\omega L_{\mu}} \quad (3.3.6)$$

je poté v (3.3.6) stejným způsobem jako v (3.1.18) provedeno usměrnění zlomku na levé straně rovnice:

$$\frac{1}{(R_0 - R_1) + j\omega L_0} \cdot \frac{(R_0 - R_1) - j\omega L_0}{(R_0 - R_1) - j\omega L_0} = \frac{(R_0 - R_1) - j\omega L_0}{(R_0 - R_1)^2 + (\omega L_0)^2} \quad (3.3.7)$$

Úpravou zlomku je opět získána reálná a imaginární část:

$$\frac{(R_0 - R_1)}{(R_0 - R_1)^2 + (\omega L_0)^2} - j \frac{\omega L_0}{(R_0 - R_1)^2 + (\omega L_0)^2}, \quad (3.3.8)$$

Díky kterým získáme stejně jako v (3.1.19) a (3.1.20) vztahy pro výpočet odporu R_{Fe} :

$$R_{Fe} = \frac{(R_0 - R_1)^2 + (\omega L_0)^2}{(R_0 - R_1)} \quad (3.3.9)$$

a indukčnosti L_μ :

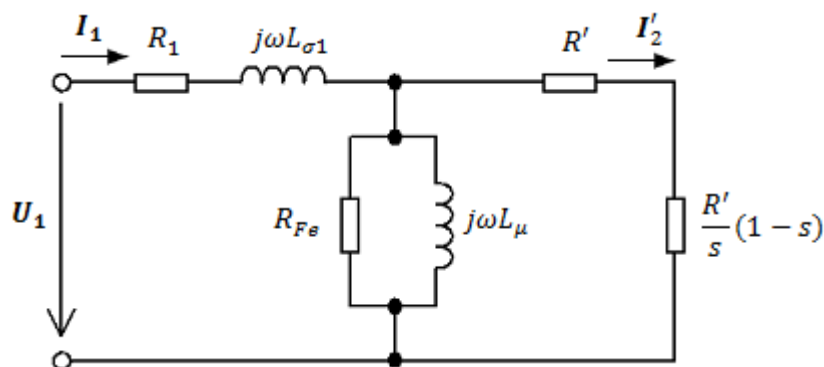
$$L_\mu = \frac{(R_0 - R_1)^2 + (\omega L_0)^2}{\omega^2 L_0} \quad (3.3.10)$$

3.4 Zapojení ve tvaru T-článku

Náhradní zapojení v tomto tvaru je vhodné použít v případě, že je asynchronní motor napájen zdrojem proudu [3].

T-článek představuje opět jisté zjednodušení. Ve srovnání s T-článkem se zde objevuje znovu pouze jedna rozptylová indukčnost, v tomto případě statorová $L_{\sigma 1}$.

Schéma náhradního zapojení jedné fáze asynchronního motoru ve tvaru T-článku je znázorněno na Obr. 3-13:



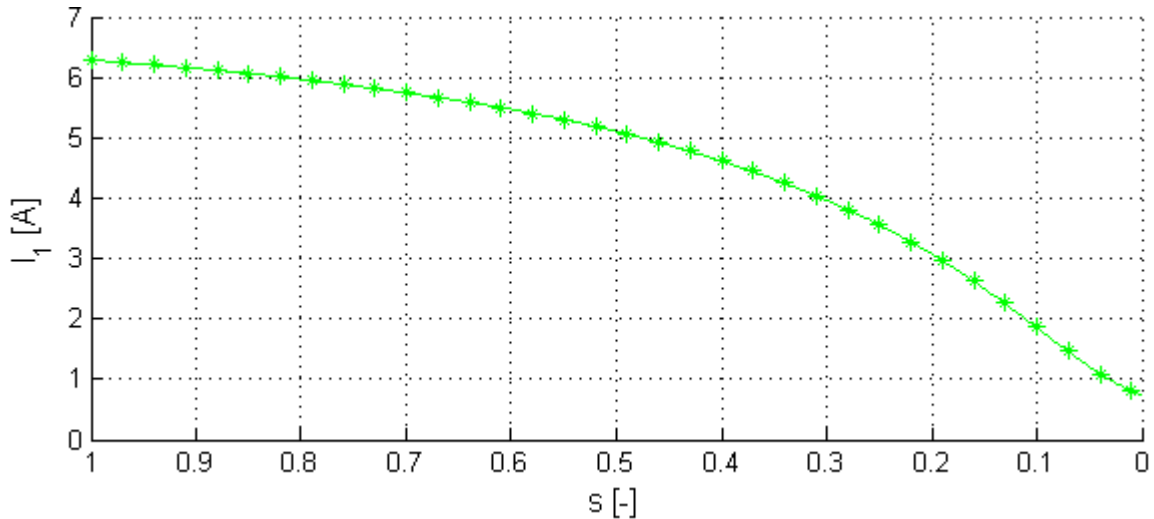
Obr. 3-13: Náhradní zapojení jedné fáze ASM ve tvaru T-článku

3.4.1 Odvození závislosti statorového proudu na skluzu

Stejným způsobem jako v předchozích bodech je provedeno odvození (Příloha P-4) závislosti statorového proudu I_1 na skluzu s i v případě T-článku, a to absolutní hodnotou podílu vstupního napětí U_1 a celkové impedance obvodu Z . Výslednou proudovou charakteristiku představuje rovnice (3.4.1):

$$I_1 = \frac{U_1 \cdot \sqrt{\left(s + \frac{R'}{R_{Fe}}\right)^2 + \left(\frac{R'}{\omega L_\mu}\right)^2}}{\sqrt{\left(R + sR_1 + \frac{R_1 R'}{R_{Fe}} + \frac{R' L_{\sigma 1}}{L_\mu} + \frac{R_1 R'}{\omega L_\mu}\right)^2 + \left(\frac{R_1 R'}{\omega L_\mu} - s\omega L_{\sigma 1} - \frac{\omega R' L_{\sigma 1}}{R_{Fe}}\right)^2}} \quad (3.4.1)$$

Odvozenou závislost satorového proudu na skluzu ukazuje Obr. 3-14.



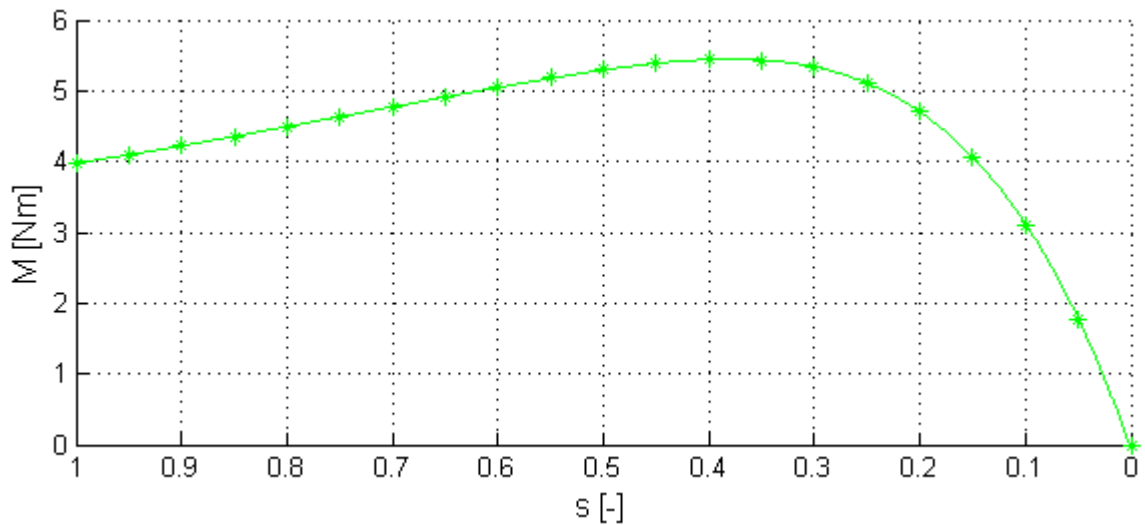
Obr. 3-14: Závislost satorového proudu na skluzu pro náhradní zapojení ve tvaru T-článku

3.4.2 Odvození momentu v závislosti na skluzu

Obdobě jako v případě Γ -článku, je i v případě náhradního zapojení ve tvaru T-článku pouze jedna rozptylová indukčnost. Rozdíl zde spočívá v zanedbání rozptylové indukčnosti rotoru $L'_{\sigma 2}$.

Odvození momentu pro T-článek (Příloha P-5) je tedy zjednodušeno prohlášením rozptylové indukčnosti rotoru přepočtené na stator $L'_{\sigma 2}$ za nulovou. Výsledný moment v závislosti na skluzu pak ukazuje (3.4.2), průběh odvozené závislosti je možno vidět na Obr. 3-15.

$$M = \frac{3U_1^2 \cdot R'^3 \cdot s}{\omega_1 \cdot \left[\left(sR'R_1 + R'^2 + \frac{R'^2 R_1}{R_{Fe}} + \frac{R' L_{\sigma 1}}{L_\mu} \right)^2 + \left(\frac{R_1 R'}{\omega L_\mu} - s\omega R' L_{\sigma 1} - \frac{\omega L_{\sigma 1} R'^2}{R_{Fe}} \right)^2 \right]} \quad (3.4.2)$$



Obr. 3-15: Závislost momentu na skluzu pro náhradní zapojení ve tvaru T-článku

3.4.3 Stanovení parametrů z měření naprázdno

V případě náhradního zapojení ve tvaru T-článku je schématická část obvodu uplatňovaná při měření totožná s T-článkem, výsledné vztahy pro výpočet parametrů jsou proto rovněž shodné. Pro odpor R_{Fe} platí vztah (3.2.20), pro magnetizační indukčnost L_{μ} pak (3.2.21).

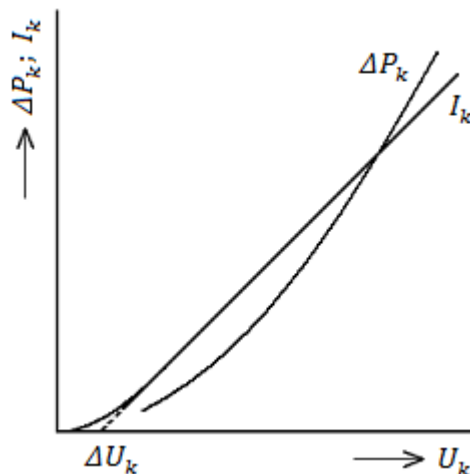
4 ZKOUŠENÍ ASYNCHRONNÍCH STROJŮ

U asynchronních motorů existují tři provozní stavy. Jedná se o chod naprázdno, chod nakrátko a chod při zatížení.

Měření prováděná při těchto provozních stavech poskytují potřebné údaje, díky kterým je možné analyzovat parametry asynchronních motorů.

4.1 Zkouška nakrátko

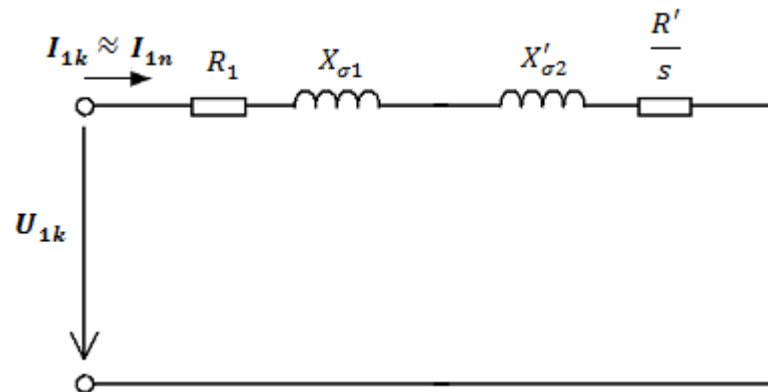
Při zkoušce nakrátko je měřený stroj, resp. jeho rotor, zabrzděn a jeho stator je napájen sníženým napětím za tím účelem, aby odebíral stroj postupně ze sítě proud přibližně $1,5I_n$; I_n a $0,5I_n$. Současně při tom jsou zjišťovány ztráty v chodu nakrátko ΔP_k . Dále jsou měřeny hodnoty napětí U_{1k} , proudu nakrátko I_{1k} , elektrického příkonu P_{1k} , odporu vstupního vinutí R_l a celkové rozptylové reaktance $X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}$. Při měření se motor značně zahřívá, je proto potřeba, aby měření proběhlo v co nejkratší době (po odečtení hodnot z měřicích přístrojů motor vypnout a počkat na jeho ochlazení a poté opět pokračovat v měření). Z hodnot ΔP_k , U_k a I_k získaných měřením jsou poté sestrojeny charakteristiky nakrátko podle Obr. 4-1 [2].



Obr. 4-1: Charakteristiky nakrátko asynchronního motoru [2]

V rámci měření nakrátko (tj. při zabrzděném rotoru) se motor netočí, hodnota otáček je proto nulová a tedy velikost skluzu je rovna jedné. Asynchronní motor je při měření ve stavu spouštění, lze proto z jeho výsledků zjistit hodnoty, které jsou pro spouštění typické, tj. záběrný proud a záběrný moment [2].

V konečné velikosti impedance nakrátko Z_{1k} se hlavní magnetizační reaktance X_μ ani odpor reprezentující ztráty v železe R_{Fe} neprojeví. Celá příčná větev náhradního zapojení tedy není při tomto měření uplatněna, jak ukazuje Obr. 4-2.



Obr. 4-2: Náhradní schéma asynchronního motoru při měření nakrátko

Samotným cílem zkoušky nakrátko je stanovit velikost ztrát nakrátko ΔP_k a zjistit hodnoty rozptylové indukčnosti statoru a rotoru a odporů statorového a rotorového vinutí.

Při zkoušce při plném napětí je záběrný proud, který motor vyvine při záběrném momentu, velikosti až sedmi násobku jmenovitého proudu I_n [2].

4.2 Zkouška naprázdno

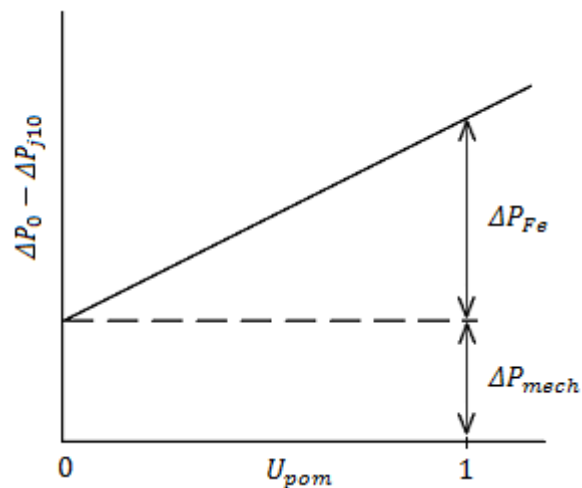
Pro zjištění parametrů příčné větve R_{Fe} a X_μ je konáno měření naprázdno. To je prováděno v motorickém chodu postupnou změnou statorového napětí U_I přibližně od $1,2U_n$ do $0,3U_n$. Při této zkoušce je hodnota skluzu velmi malá (téměř rovna nule) a rotor motoru se otáčí bez zatížení (rychlostí velmi blízké synchronní). Měření probíhá při jmenovitém kmitočtu. Z výsledků zkoušky lze posuzovat kvalitu magnetického obvodu a mechanického provedení motoru.

Měřenými veličinami jsou proudy naprázdno I_{10} a napětí naprázdno U_{10} ve všech fázích statoru, z nichž se určuje jejich střední hodnota. Proud naprázdno se skládá z činné a jalové složky, kdy činná složka hradí ztráty naprázdno a jalová složka budí magnetické pole. Poměr mezi činnou a jalovou složkou roste s růstem napětí.

Dále je měřen příkon naprázdno P_{10} (přiváděný do vinutí statoru) a ztráty naprázdno ΔP_0 . Z naměřených hodnot je poté provedeno rozdělení ztrát. Po snížení celkových ztrát naprázdno ΔP_0 o Joulovy ztráty ve vinutí statoru ΔP_{j10} je možné zjistit hodnotu ztrát v železe ΔP_{Fe} a mechanických ztrát ΔP_{mech} , jak lze vidět na Obr. 4-3.

Rozdělení ztrát:

$$\Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} = \Delta P_0 - 3 \cdot R_1 I_{10}^2 \quad (4.2.1)$$



Obr. 4-3: Rozdělení ztrát v železe a ztrát mechanických

Napětí U_{pom} je poměrné napětí, resp. kvadrát poměru změřené hodnoty napětí U_{10} a jmenovité hodnoty U_n :

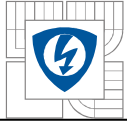
$$U_{pom} = \left(\frac{U_{10}}{U_n} \right)^2 \quad (4.2.2)$$

Mechanické ztráty ΔP_{mech} jsou od ztrát v železe ΔP_{Fe} odděleny extrapolací křivky ztrát ΔP_0 až na nulové napětí. Joulové ztráty proudem naprázdno jsou u strojů větších výkonů (nad 5 kW) zanedbány [1], [2], [4].

4.3 Měření při zatížení

Zatěžovací charakteristiky asynchronního stroje je potřeba znát, aby bylo možno posoudit jeho vlastnosti (např. přetížitelnost) a vhodnost pro konkrétní provozní a pracovní podmínky. Na těchto charakteristikách jsou vyobrazeny závislosti hlavních provozních veličin motoru (otáčky, příkon, moment, statorový proud, $\cos \varphi$, účinnost a skluz) v závislosti na výkonu stroje.

Charakteristiky je možné sestavit po odměření odpovídajících veličin stroje. Uskutečnit tato měření na strojích velkých výkonů je ovšem značně složité a také cenově nákladné. Sestrojení zatěžovacích charakteristik je proto možné i pomocí tzv. kruhového diagramu, pro jehož konstrukci stačí výsledků výše zmíněných zkoušek naprázdno a nakrátko [1], [2].



5 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

V rámci praktického ověření parametrů stroje bylo provedeno měření na konkrétním asynchronním motoru AOM090L02-016 (štitkové parametry v Příloze P-5).

5.1 Zatěžovací charakteristika

Pro uvedený motor byla nejprve změřena zatěžovací charakteristika, jejíž veškeré naměřené a vypočtené parametry jsou uvedeny v Tab. 3.

Odpory vstupního vinutí za studena:

$$R_U \quad [\Omega] \quad 11,880$$

$$R_V \quad [\Omega] \quad 12,115$$

$$R_W \quad [\Omega] \quad 11,475$$

5.2 Zkouška naprázdno

Po odměření zatěžovací charakteristiky byla dále také provedena zkouška naprázdno. Naměřené a vypočtené hodnoty parametrů asynchronního motoru jsou uvedeny v Tab. 4.

Odpory vstupního vinutí:

$$R_U \quad [\Omega] \quad 12,920$$

$$R_V \quad [\Omega] \quad 13,190$$

$$R_W \quad [\Omega] \quad 12,435$$

Tab. 1: Výsledky zkoušky naprázdno motoru AOM090L02-016

U_{10} [V]	I_{10} [A]	P_{10} [W]	R_{Fe} [Ω]	X_μ [Ω]	L_μ [H]
401,160	0,881	58,000	2774,815	263,961	0,619

5.3 Zkouška nakrátko

Při zkoušce nakrátko byly zjištěny parametry podélné větve. Měření bylo nutno provést v co nejkratším čase, protože dochází ke značnému zahřívání a tím mimo jiné k rychlému nárůstu odporu vstupního vinutí. Výsledek zkoušky ukazuje Tab. 5.

Odpory vstupního vinutí:

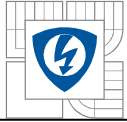
$$R_U \quad [\Omega] \quad 12,585$$

$$R_V \quad [\Omega] \quad 12,835$$

$$R_W \quad [\Omega] \quad 12,140$$

Tab. 2: Výsledky měření nakrátko pro motor AOM090L02-016

U_{1k} [V]	I_{1k} [A]	P_{1k} [W]	$X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}$ [Ω]	$L_{\sigma 1} + L_{\sigma 2}$ [H]	R' [Ω]
81,277	1,302	116,920	27,759	0,088	10,376



6 VYPOČTENÉ PARAMETRY

Ze vztahů odvozených v kapitolách 3.2.3 a 3.3.3 (náhradní zapojení ve tvaru T a Γ -článku) je z hodnot získaných měření naprázdno proveden výpočet parametru R_{Fe} pro všechna tři zapojení.

Střední hodnota odporu vstupního vinutí:

$$R_1 \quad [\Omega] \quad 12,633$$

6.1 Výpočet parametrů R_0 a ωL_0 pro stanovení příčné větve

Z měření naprázdno byly následujícími výpočty zjištěny reálné a imaginární části impedancí uplatněných částí obvodu (viz. Obr. 3.6).

Reálná část impedance Z_0 :

$$R_0 = \frac{U_{10}}{\sqrt{3}I_{10}} \cdot \cos\varphi_{10} \quad (6.1.1)$$

Imaginární část impedance Z_0 :

$$\omega L_0 = \frac{U_{10}}{\sqrt{3}I_{10}} \cdot \sin(\arccos\varphi_{10}) \quad (6.1.2)$$

Příklad výpočtu odporu a reaktance pro hodnotu napětí $U_{10} = 401,160$ [V] uvádí následující vztahy.

Hodnota reálné části impedance:

$$R_0 = \frac{U_{10}}{\sqrt{3}I_{10}} \cdot \cos\varphi_{10} = \frac{401,160}{\sqrt{3} \cdot 0,881} \cdot 0,095 = 24,885 \text{ } [\Omega] \quad (6.1.3)$$

Hodnota imaginární části impedance:

$$\omega L_0 = \frac{U_{10}}{\sqrt{3}I_{10}} \cdot \sin(\arccos\varphi_{10}) = \frac{401,160}{\sqrt{3} \cdot 0,881} \cdot \sin(\arccos(0,095)) = 261,594 \text{ } [\Omega] \quad (6.1.4)$$

Následně byl dle vztahů specifických pro každé ze tří typů zapojení proveden výpočet odporu R_{Fe} a indukčnosti L_μ . Hodnoty odporu R_{Fe} a indukčnosti L_μ pro všechny velikosti napětí nastavované při měření naprázdno je možno vidět v Tab. 5, resp. v Tab. 6.

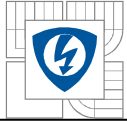
6.2 Výpočet parametrů pro T-článek

Výpočet parametrů příčné větve pro náhradní zapojení ve tvaru T-článku je dle vztahů (3.2.20) a (3.2.21) následující:

Odpor reprezentující ztráty v železe:

$$R_{Fe} = \frac{(24,885 - 12,633)^2 + (261,594 - 13,880)^2}{(24,885 - 12,633)} = 5020,497 \text{ } [\Omega] \quad (6.2.1)$$

Hlavní magnetizační indukčnost:



$$L_{\mu} = \frac{(24,885 - 12,633)^2 + (261,594 - 13,880)^2}{(100\pi)^2(0,833 - 0,044)} = 0,790 [H] \quad (6.2.2)$$

6.3 Výpočet parametrů pro Γ -článek

Obdobným způsobem je výpočet proveden také pro náhradní zapojení ve tvaru Γ -článku. Ze znalosti vypočtených reálných a imaginárních částí impedance je parametr R_{Fe} dle (3.3.9) určen:

$$R_{Fe} = \frac{(R_0 - R_1)^2 + (\omega L_0)^2}{(R_0 - R_1)} = \frac{(24,885 - 12,633)^2 + (261,594)^2}{(24,885 - 12,633)} = 5597,448 [\Omega] \quad (6.3.1)$$

A parametr L_{μ} dle (3.3.10) poté:

$$L_{\mu} = \frac{(R_0 - R_1)^2 + (\omega L_0)^2}{\omega^2 L_0} = \frac{(24,885 - 12,633)^2 + (261,594)^2}{(100\pi)^2 \cdot 0,833} = 0,835 [H] \quad (6.3.2)$$

Hodnoty vypočtených parametrů R_{Fe} a L_{μ} pro všechna nastavovaná napětí při měření naprázdno ukazuje Tab. 5, resp. Tab. 6.

6.4 Výpočet parametrů pro Υ -článek

Stejným způsobem jako v případě náhradního zapojení Υ -článku jsou určeny parametry i pro Υ -článek, jelikož je při měření uplatňována stejná část schématu. Rozdíl spočívá pouze ve velikosti rozptylové reaktance, která je u Υ -článku $X_{\sigma 1} = 27,759 [\Omega]$.

Odpor R_{Fe} je dle vztahu (3.2.20) tedy:

$$R_{Fe} = \frac{(24,885 - 12,633)^2 + (261,594 - 27,759)^2}{(24,885 - 12,633)} = 4474,991 [\Omega] \quad (6.3.1)$$

Hlavní magnetizační indukčnost dle (3.2.21) pak:

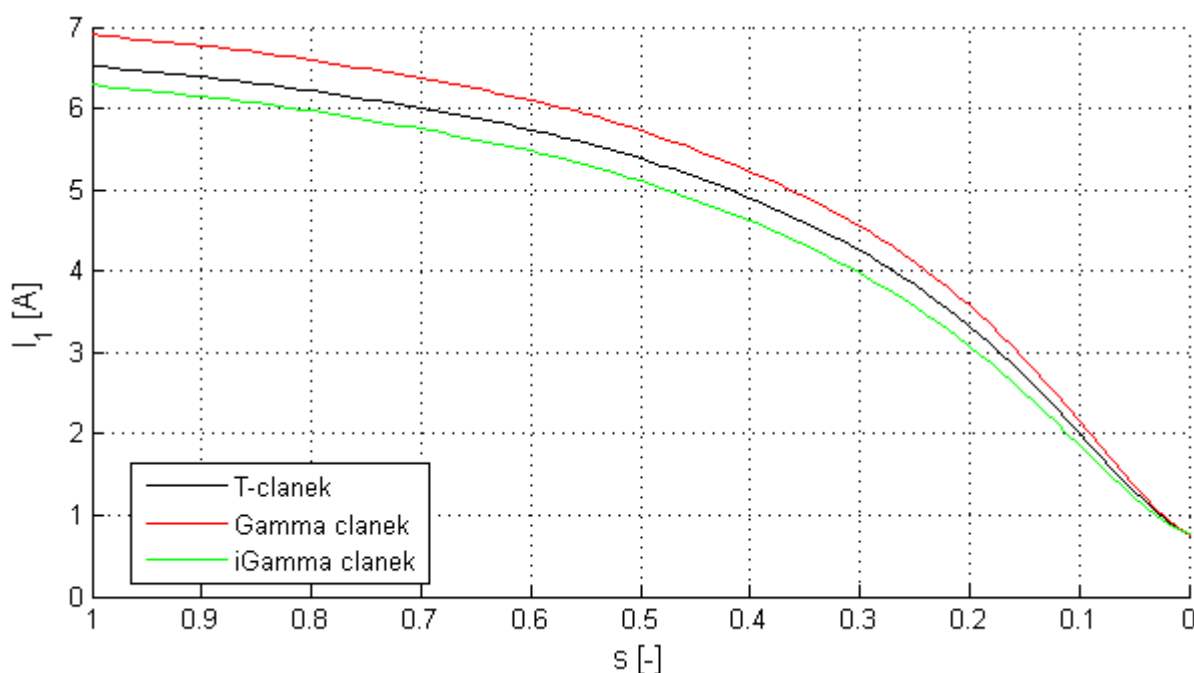
$$L_{\mu} = \frac{(24,885 - 12,633)^2 + (261,594 - 27,759)^2}{(100\pi)^2(0,833 - 0,088)} = 0,746 [H] \quad (6.3.2)$$

7 SROVNÁNÍ CHARAKTERISTIK MOTORU

Při odvození vztahů pro jednotlivá zapojení byly také pomocí programu MATLAB provedeny simulace průběhů momentových a proudových charakteristik pro jednotlivá náhradní zapojení. Při simulaci těchto průběhů byla respektována závislost parametrů příčné větve na napětí. Výsledky měření, včetně grafického zpracování závislosti prvků na napětí, je možné vidět v příloze.

7.1 Proudové charakteristiky pro jednotlivá náhradní zapojení

Srovnání vypočtených proudových charakteristik pro jednotlivá náhradní zapojení ukazuje Obr. 7-1:



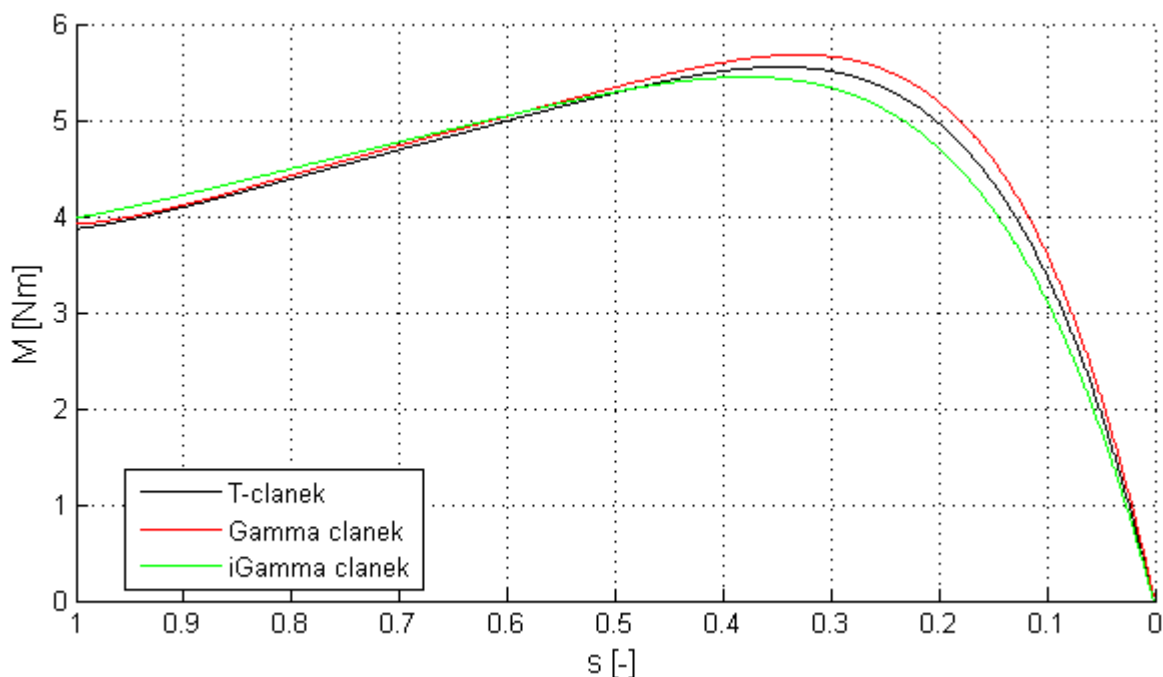
Obr. 7-1: Srovnání vypočtených proudových charakteristik pro jednotlivá náhradní zapojení

Jak lze z průběhu grafické závislosti vidět, proudová charakteristika T, Γ i \bar{T} -článku se příliš neliší a je proto možné považovat přepočty parametrů těchto zapojení za ekvivalentní.

Proudová i momentová charakteristika zapojení ve tvaru výchozího článku jsou v porovnání s ostatními zapojeními značně odlišné. Toto zapojení není vhodné užívat pro výpočty a simulace jako ekvivalentní náhradu, jeho jednoduchost je doprovázena značnou nepřesností.

7.2 Momentové charakteristiky pro jednotlivá náhradní zapojení

Srovnání vypočtených momentových charakteristik pro jednotlivá náhradní zapojení přináší Obr. 7-2 níže.

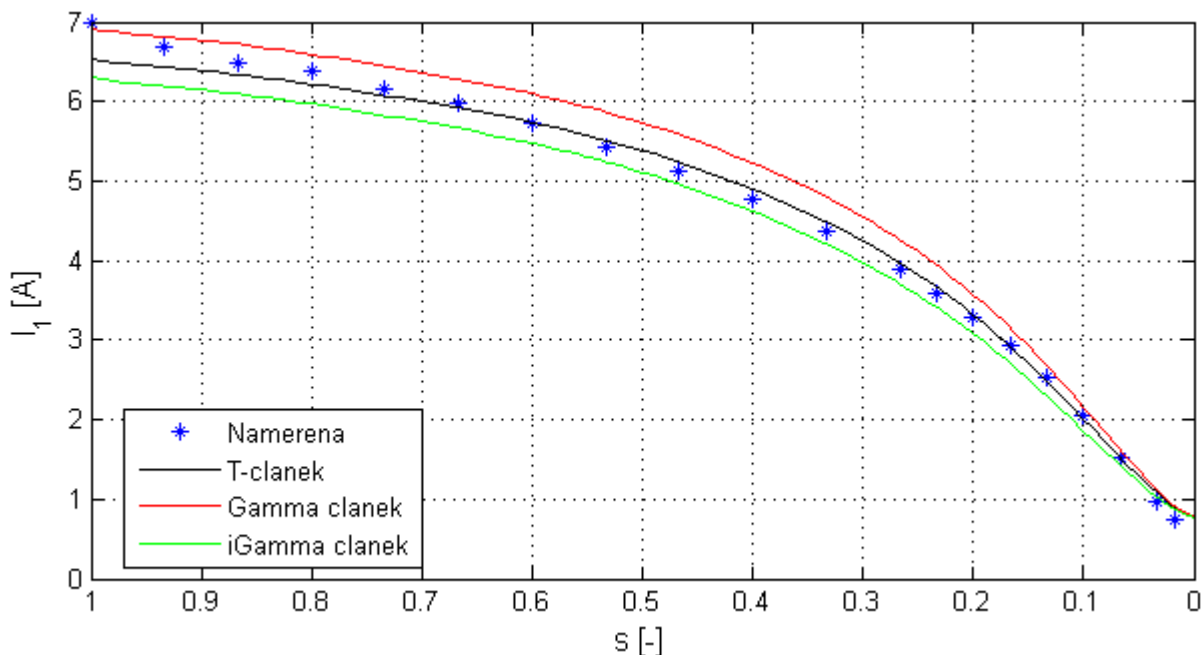


Obr. 7-2: Srovnání vypočtených momentových charakteristik pro jednotlivá náhradní zapojení

Jak lze vidět, průběhy momentových charakteristik náhradních zapojení ve tvaru T, Γ a T-článek jsou si velmi podobné.

7.3 Naměřené zatěžovací charakteristiky v porovnání s vypočtenými

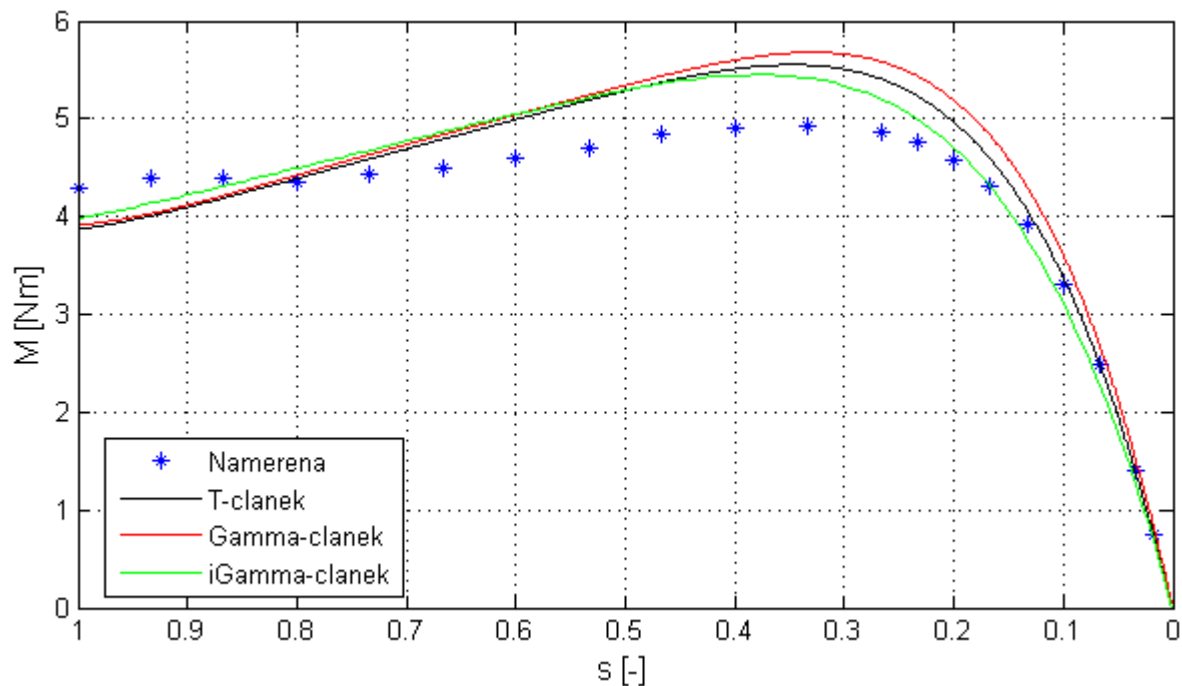
V rámci práce bylo provedeno měření zatěžovacích charakteristik motoru ATAS T22VT512 (7-0512) o jmenovitém výkonu 0,6 kW. Naměřenou proudovou charakteristiku lze vidět na Obr. 7-3:



Obr. 7-3: Srovnání naměřené proudové charakteristiky s vypočtenými

Z grafu vyplývá, že průběh naměřené proudové charakteristiky odpovídá simulacím, které byly zrealizovány pro jednotlivá náhradní zapojení. Měření bylo prováděno při sníženém napětí ($U \approx 200 \text{ V}$) a hodnoty proudů byly poté přepočteny na jmenovité napětí.

Stejným způsobem byla sestrojena i momentová charakteristika, kdy výsledný vnitřní moment (naměřený moment na hřídeli zvětšený o moment tření) byl opět přepočten na jmenovité napětí. Výsledný průběh momentové charakteristiky a její srovnání s vypočtenými je na Obr. 7-4.

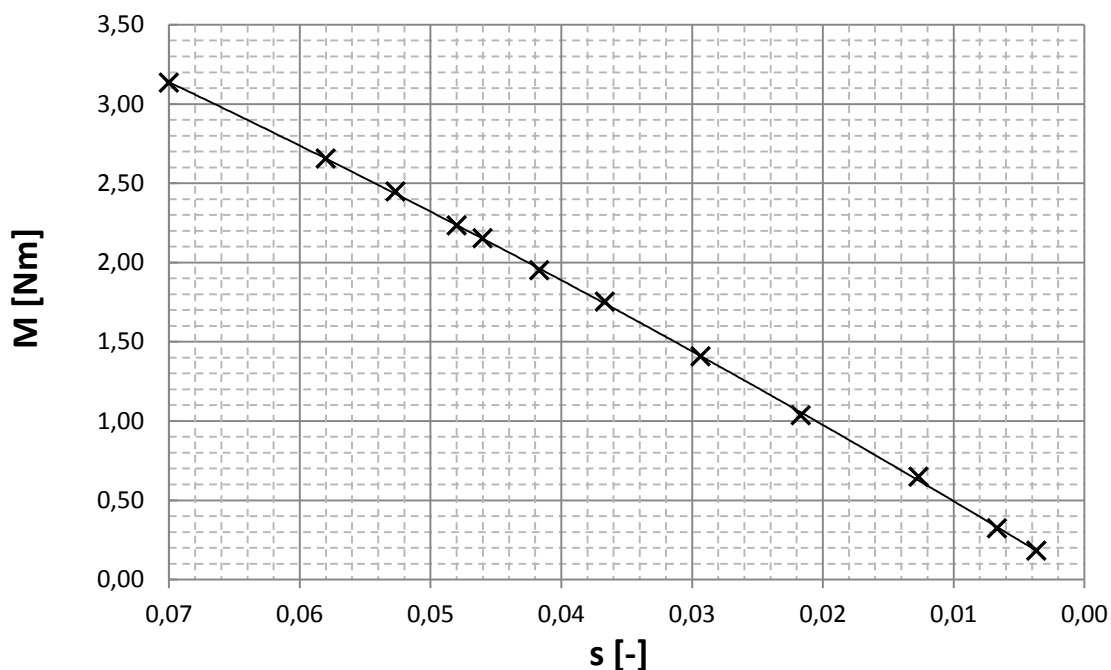


Obr. 7-4: Srovnání naměřené momentové charakteristiky s vypočtenými

Průběhy vypočtených charakteristik jsou naměřené charakteristice značně blízké. Rozdíl mezi změřeným průběhem a teoretickými spočívá například v proměnné hodnotě odporů vinutí, která se s teplotou (tj. dobou měření) mění, v důsledku toho se mimo jiné pozměňuje i pozice momentu zvratu, tj. jeho velikost a hodnota skluzu, při které moment zvratu nastává. Další chybou, mající vliv na přesnost charakteristiky, je vyjma teploty také chyba způsobená rozdílným sycením magnetického obvodu, která u měření při sníženém napětí nastává. V neposlední radě je příčinou rozdílů mezi charakteristikou naměřenou a vypočtenými také vliv vyšších harmonických, které se ve skutečném stroji vždy vyskytují, avšak při výpočtu je uvažována pouze první harmonická.

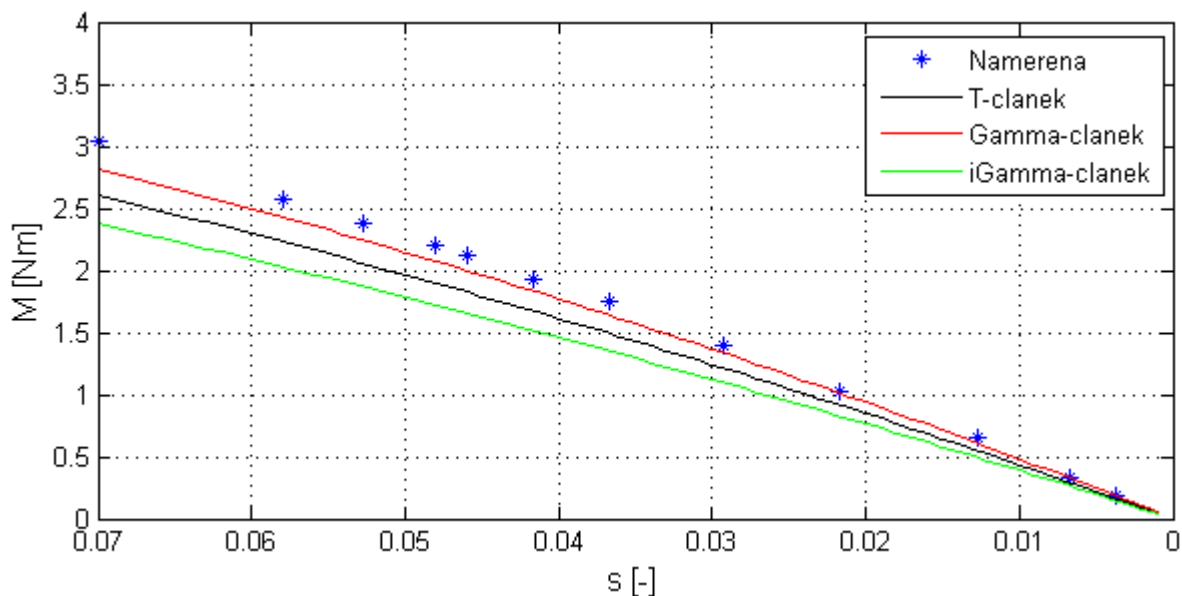
Momentu zvratu se u naměřené charakteristiky vyskytuje okolo skluzu $s_{zv1} = 0,3$ a jeho hodnota je přibližně $M_{zv1} = 5 \text{ Nm}$. U vypočtených charakteristik se jeho velikost pohybuje v rozmezí přibližně 5,5 až 5,7 Nm při skluzu $s_{zv2} = 0,35$. Záběrný moment pak má hodnotu asi $M_{z1} = 4,3 \text{ Nm}$, zatímco teoretická hodnota pro jednotlivá zapojení odpovídá hodnotě $M_{z2} = 4 \text{ Nm}$.

Pro pracovní oblast momentové charakteristiky použitého motoru bylo dále realizováno měření při jmenovitém napětí. V tomto případě se chyba způsobená rozdílným sycením, na rozdíl od měření při sníženém napětí, nevyskytuje a uplatněn je zde zejména vliv teploty motoru, resp. jeho vinutí. Výsledek měření pracovní oblasti představuje Obr. 7-5, resp. Obr. 7-6.

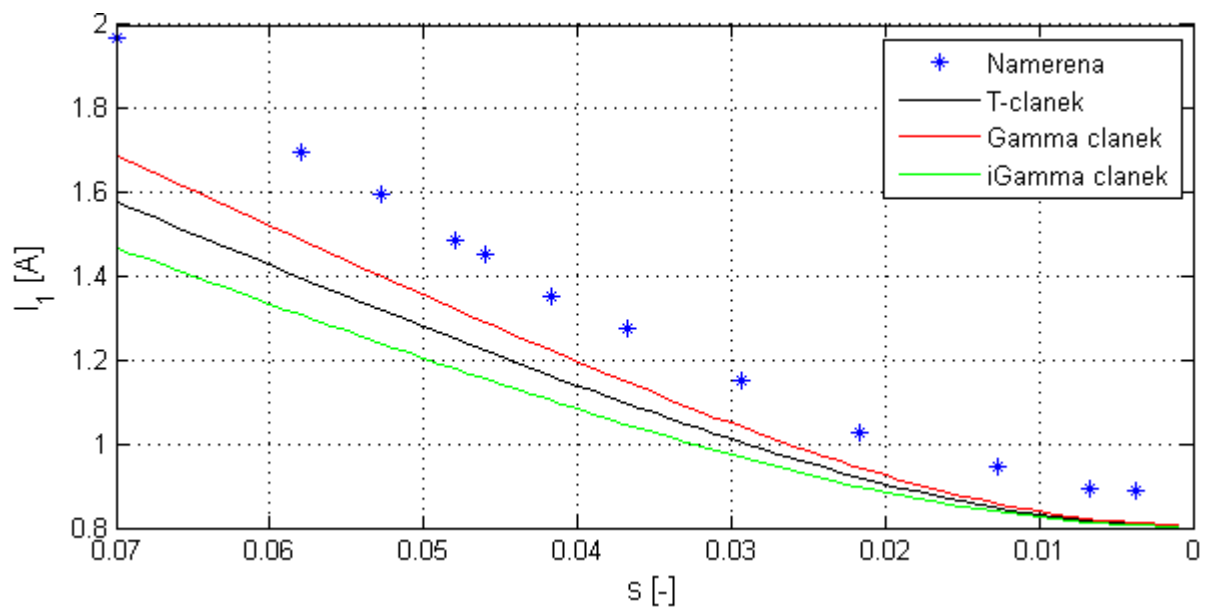
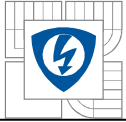


Obr. 7-5: Naměřená pracovní oblast zatěžovací charakteristiky motoru ATAS T22VT512 (7-0512)

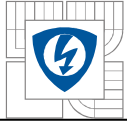
Na Obr. 7-6, resp. Obr. 7-7 je dále možno vidět srovnání naměřené pracovní oblasti zatěžovacích charakteristik pro daný motor s vypočtenými charakteristikami pro jednotlivá zapojení:



Obr. 7-6: Srovnání pracovních oblastí naměřené momentové charakteristiky s vypočtenými



Obr. 7-7: Srovnání pracovních oblastí naměřené proudové charakteristiky s vypočtenými



8 ZÁVĚR

Práce je rozdělena do několika částí.

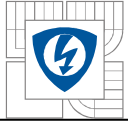
V první části (kapitola 2) je zobrazen obvodový model asynchronního motoru ve tvaru T-článku, na kterém jsou demonstrovány parametry asynchronního motoru a veličiny nezbytné pro jejich stanovení. Parametry jsou zde jednotlivě zmíněny, a to včetně jejich výpočtu ze zkoušek motoru platných pro výchozí zapojení článku, v případě odporu vstupního vinutí pak i ukázán způsob měření. Součástí kapitoly jsou také přepočítávací činitelé napětí, proudů a impedancí jak pro motor s klecovým vinutím tak i pro motor s kotvou kroužkovou.

Hlavní část práce je věnována jednotlivým druhům náhradních zapojení, pro něž je postupně provedeno odvození závislostí statorového proudu a momentu na skluzu. Součástí odvození je také zobrazení výsledného průběhu (vyjma výchozího článku) pro konkrétní parametry motoru T22VT512 (7-0512) firmy ATAS Elektromotory Náchod a. s. zjištěné z praktického měření. Z vyobrazených průběhů statorových proudů a momentů lze sledovat značnou podobnost mezi jednotlivými zapojeními. Složitost samotných vztahů pro stanovení těchto závislostí je značně rozdílná. V kapitole 3 je možné vidět, že funkce $M = f(s)$ a $I_1 = f(s)$ jsou v případě T-článku zdaleka nejkomplicovanější vlivem nacházejících se dvou rozptylových indukčností v náhradním zapojení, zatímco zapojení Γ a I-článku jsou citelně jednodušší. Pro uvažovaná náhradní zapojení je také odvozeno stanovení parametrů příčné větve.

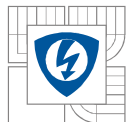
V kapitole 4 jsou jmenovány tři provozní stavy asynchronního motoru – chod nakrátko, naprázdno a při zatížení. Každý provozní stav je typický informacemi, které o stroji dokáže poskytnout. Zatímco díky chodu nakrátko lze zjistit parametry podélné větve a při chodu naprázdno parametry příčné větve, chod při zatížení podává informace o vhodnosti použití daného motoru do konkrétního prostředí.

V rámci práce bylo uskutečněno také praktické měření na dvojpólovém motoru ATAS Elektromotory Náchod a. s. T22VT512 (7-0512) se jmenovitým výkonem 0,6 kW, napětím 400V-Y a účínkem 0,83. Na tomto motoru bylo provedeno měření při chodu naprázdno, resp. s velmi malým skluzem. Z naměřených údajů byl učiněn výpočet odporu reprezentujícího ztráty v železe a hlavní magnetizační indukčnosti ze vztahů pro T, Γ a I-článek odvozených v kapitole 3. Získané hodnoty jsou uvedeny v Tab. 5 a jak lze vidět, jsou pro každé náhradní zapojení jedinečné. Dále bylo realizováno také měření nakrátko, ze kterého byly zjištěny parametry přímým výpočtem z naměřených hodnot, a změřeny zatěžovací charakteristiky, které jsou posléze srovnány s vypočtenými.

Poslední část je věnována samotnému porovnání charakteristik naměřených s vypočtenými z náhradního schématu. Pro zobrazení charakteristik v celém rozsahu bylo nutné vykonat měření při sníženém napětí a následně potřebné parametry na hodnotu při jmenovitém napětí přepočítat. Na vlastní průběh závislosti zjišťované při sníženém napětí měla v tomto ohledu největší vliv teplota motoru a chyba způsobená rozdílným sycením magnetického obvodu motoru. V rámci měření pracovní oblasti zatěžovacích charakteristik při jmenovitém napětí vliv neúplného sycení obvodu odpadá. Veškeré simulace jsou provedeny s respektováním napěťové závislosti

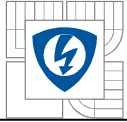


parametrů příčné větve. Rozdílnost charakteristik platných pro jednotlivé články je způsobena tím, že napěťová závislost parametrů příčné větve je dána proložením změřených úseků funkcí. To znamená, že každý odklon naměřené hodnoty od skutečné způsobuje určitou odchylku při přepočtu parametrů pro konkrétní článek a tím i odchylku ve výsledné funkci.



LITERATURA

- [1] ROUBÍČEK, O. *Elektrické motory a pohony: Příručka techniky, volby a užití vybraných druhů*. Praha: BEN, 2004, 192 s.
- [2] BAŠTA, J., CHLÁDEK, J., MAYER, I. *Teorie elektrických strojů*. Praha: SNTL/ALFA, 1968, 584 s.
- [3] PATOČKA, M. *Skripta: Vybrané statě z výkonové elektroniky: Magnetické obvody ve výkonové elektronice, pulsní měniče s transformátorem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008 [cit. 2013-11-30].
- [4] PETROV, G. N. *Elektrické stroje 2: Asynchronní stroje - synchronní stroje*. 2. dopl. vyd. Praha: Academia, 1982, 732 s.
- [5] STÝSKALA, V., DUDEK, J. *Elektrické stroje – Asynchronní motory* [online]. 2007 [cit. 2013-11-30]. Dostupný z WWW: <http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FS/prednasky/1_AM_FS.pdf>.
- [6] ONDRŮŠEK, Č. *Skripta: Elektrické stroje*, [cit. 2013-11-30].
- [7] CIPÍN, R. *Moderní matematické metody syntézy a analýzy střídavých strojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012 [cit. 2013-11-30], 120 s. Vedoucí dizertační práce doc. Dr. Ing. Miroslav Patočka.



PŘÍLOHY

P-1: Odvození závislosti statorového proudu na skluzu pro výchozí článek

Statorový proud je dán poměrem vstupního napětí a celkové impedance:

$$I_1 = \frac{U_1}{\frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2}} = \frac{U_1}{\frac{\frac{R_{Fe} \cdot j\omega L_\mu}{R_{Fe} + j\omega L_\mu} \cdot \left(R_1 + \frac{R'}{s} + j\omega L_{\sigma 1} + j\omega L'_{\sigma 2}\right)}{\frac{R_{Fe} \cdot j\omega L_\mu}{R_{Fe} + j\omega L_\mu} + \left(R_1 + \frac{R'}{s} + j\omega L_{\sigma 1} + j\omega L'_{\sigma 2}\right)}}, \quad (\text{P-1.1})$$

a po úpravě je získáno:

$$I_1 = U_1 \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{R_{Fe} R_1 \cdot j\omega L_\mu + R_{Fe} \frac{R'}{s} \cdot j\omega L_\mu - \omega^2 L_{\sigma 1} L'_{\sigma 2} - \omega^2 L'_{\sigma 2} L_\mu}, \quad (\text{P-1.2})$$

kde koeficienty α_1 a α_2 :

$$\alpha_1 = R_{Fe} \cdot j\omega L_\mu + R_1 \cdot j\omega L_\mu + \frac{R'}{s} \cdot j\omega L_{\sigma 1} + R_{Fe} \cdot j\omega L_{\sigma 1}$$

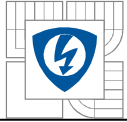
$$\alpha_2 = R_{Fe} \cdot j\omega L'_{\sigma 2} + R_{Fe} R_1 - \omega^2 L_{\sigma 1} L_\mu - \omega^2 L'_{\sigma 2} L_\mu + R_{Fe} \frac{R'}{s}$$

Vytknutím členu $\omega R_{Fe} L_\mu$ v čitateli i jmenovateli a jeho následným vykrácením je výsledný výraz:

$$I_1 = U_1 \frac{\left(j + j \frac{R_1}{R_{Fe}} + j \frac{R'}{s R_{Fe}} + j \frac{L_{\sigma 1}}{L_\mu} + j \frac{L'_{\sigma 2}}{L_\mu} + \frac{R_1}{\omega L_\mu} + \frac{R'}{s \omega L_\mu} - \frac{\omega L_{\sigma 1}}{R_{Fe}} - \frac{\omega L'_{\sigma 2}}{R_{Fe}}\right)}{\left(j R_1 + j \frac{R'}{s} - \omega \frac{L_{\sigma 1}}{R_{Fe}} - \omega \frac{L'_{\sigma 2}}{R_{Fe}}\right)}, \quad (\text{P-1.3})$$

jehož absolutní hodnotou získáváme závislost statorového proudu na skluzu:

$$I_1 = \frac{U_1 \sqrt{\left(1 + \frac{R_1}{R_{Fe}} + \frac{R'}{s R_{Fe}} + \frac{L_{\sigma 1}}{L_\mu} + \frac{L'_{\sigma 2}}{L_\mu}\right)^2 + \left(\frac{R_1}{\omega L_\mu} + \frac{R'}{s \omega L_\mu} - \frac{\omega L_{\sigma 1}}{R_{Fe}} - \frac{\omega L'_{\sigma 2}}{R_{Fe}}\right)^2}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'}{s}\right)^2 + \left(-\omega \frac{L_{\sigma 1}}{R_{Fe}} - \omega \frac{L'_{\sigma 2}}{R_{Fe}}\right)^2}} \quad (\text{P-1.4})$$



P-2: Odvození závislosti statorového proudu na skluzu pro T-článek

Stejně jako v předchozím případě je statorový proud dán poměrem statorového napětí a celkové impedance, po vyjádření tedy:

$$I_1 = \frac{U_1}{\alpha_3 + \alpha_4} \cdot \frac{1}{js\omega R_{Fe}L_\mu + js\omega R_{Fe}L'_{\sigma 2} - s\omega^2 L_\mu L'_{\sigma 2} + R_{Fe}R' + j\omega L_\mu R'} \quad (P-2.1)$$

kde koeficienty α_3, α_4 :

$$\alpha_3 = -s\omega^2 R_{Fe}L_\mu L'_{\sigma 2} - s\omega^2 R_1 L_\mu L'_{\sigma 2} + j\omega R_{Fe}R' L_\mu + js\omega R_{Fe}R_1 L_\mu + js\omega R_{Fe}R_1 L'_{\sigma 2} + R_{Fe}R' R_1$$

$$\alpha_4 = -js\omega^3 L_\mu L'_{\sigma 2} L_{\sigma 1} - s\omega^2 R_{Fe}L_\mu L_{\sigma 1} - s\omega^2 R_{Fe}L_{\sigma 1} L'_{\sigma 2} - \omega^2 R' L_\mu L_{\sigma 1} + j\omega R' R_1 L_\mu + j\omega R_{Fe}R' L_{\sigma 1}$$

Po vytknutí členu $\omega R_{Fe}L_\mu$ v čitateli i ve jmenovateli, jeho následným vykrácením a úpravou získáno:

$$I_1 = \frac{U_1 \cdot \left(js + js \frac{L'_{\sigma 2}}{L_\mu} + j \frac{R'}{R_{Fe}} - s\omega \frac{L'_{\sigma 2}}{R_{Fe}} + \frac{R'}{\omega L_\mu} \right)}{\alpha_5 + \alpha_6} \quad (P-2.2)$$

koeficienty α_5 a α_6 :

$$\alpha_5 = jR' + jsR_1 + js \frac{R_1 L'_{\sigma 2}}{L_\mu} - js\omega^2 \frac{L'_{\sigma 2} L_{\sigma 1}}{R_{Fe}} + j \frac{R' R_1}{R_{Fe}} + j \frac{R' L_{\sigma 1}}{L_\mu}$$

$$\alpha_6 = -s\omega L'_{\sigma 2} - s\omega \frac{R_1 L'_{\sigma 2}}{R_{Fe}} + \frac{R' R_1}{\omega L_\mu} - s\omega L_{\sigma 1} - s\omega \frac{L_{\sigma 1} L'_{\sigma 2}}{L_\mu} - \omega \frac{R' L_{\sigma 1}}{R_{Fe}}$$

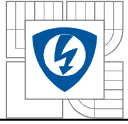
Absolutní hodnota:

$$I_1 = \frac{U_1 \cdot \sqrt{\left(s + s \frac{L'_{\sigma 2}}{L_\mu} + \frac{R'}{R_{Fe}} \right)^2 + \left(\frac{R'}{\omega L_\mu} - s \frac{\omega L'_{\sigma 2}}{R_{Fe}} \right)^2}}{\sqrt{\alpha_7 + \alpha_8}} \quad (P-2.3)$$

koeficienty α_7 a α_8 :

$$\alpha_7 = \left(R' + sR_1 + s \frac{R_1 L'_{\sigma 2}}{L_\mu} + \frac{R' R_1}{R_{Fe}} + \frac{R' L_{\sigma 1}}{L_\mu} + \frac{R' R_1}{\omega L_\mu} - s \frac{\omega^2 L_{\sigma 1} L'_{\sigma 2}}{R_{Fe}} \right)^2$$

$$\alpha_8 = \left(\frac{R' R_1}{\omega L_\mu} - s \frac{\omega R_1 L'_{\sigma 2}}{R_{Fe}} - s \frac{\omega L_{\sigma 1} L'_{\sigma 2}}{L_\mu} - \frac{\omega R' L_{\sigma 1}}{R_{Fe}} - s\omega L'_{\sigma 2} - s\omega L_{\sigma 1} \right)^2$$



P-3: Odvození závislosti momentu na skluzu pro T-článek

Pro zjištění závislosti momentu na skluzu je nejdříve potřeba určit hodnotu napětí U_2 (viz. Obr. 3-5). Tu zjistíme jednoduše pomocí vztahu pro napěťový dělič:

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{\frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3}}{\frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} + Z_1}, \quad (\text{P-3.1})$$

po úpravě pak:

$$U_2 = \frac{U_1 \cdot \frac{-s\omega^2 R_{Fe} L_\mu L'_{\sigma 2} + j\omega R_{Fe} R' L_\mu}{j s \omega R_{Fe} L_\mu + j s \omega R_{Fe} L'_{\sigma 2} - s\omega^2 L_\mu L'_{\sigma 2} + R_{Fe} R' + j\omega R' L_\mu}}{\frac{-s\omega^2 R_{Fe} L_\mu L'_{\sigma 2} + j\omega R_{Fe} R' L_\mu}{j s \omega R_{Fe} L_\mu + j s \omega R_{Fe} L'_{\sigma 2} - s\omega^2 L_\mu L'_{\sigma 2} + R_{Fe} R' + j\omega R' L_\mu} + R_1 + j\omega L_{\sigma 1}} \quad (\text{P-3.2})$$

Konečnou úpravou je získáno:

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{jR' - s\omega L'_{\sigma 2}}{\alpha_9 + \alpha_{10}}, \quad (\text{P-3.3})$$

koeficienty α_9 a α_{10} :

$$\alpha_9 = -\frac{j s \omega^2 L_{\sigma 1} L'_{\sigma 2}}{R_{Fe}} - s\omega L_{\sigma 1} L'_{\sigma 2} \left(\frac{1}{L_{\sigma 1}} + \frac{R_1}{R_{Fe} L_{\sigma 1}} + \frac{1}{L'_{\sigma 2}} + \frac{1}{L_\mu} + \frac{R'}{s R_{Fe} L'_{\sigma 2}} \right)$$
$$\alpha_{10} = jR_1 \left(\frac{R'}{R_1} + s + \frac{sL'_{\sigma 2}}{L_\mu} + \frac{R' L_{\sigma 1}}{R_1 L_\mu} + \frac{R'}{R_{Fe}} \right) + \frac{R' R_1}{\omega L_\mu}$$

Ze znalosti napětí U_2 je vypočten rotorový proud přepočtený na stranu statoru I'_2 :

$$I'_2 = \frac{U_2}{Z_3}, \quad (\text{P-3.4})$$

Tedy:

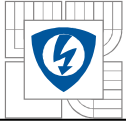
$$I'_2 = U_1 \cdot \frac{\frac{jR' - s\omega L'_{\sigma 2}}{\alpha_9 + \alpha_{10}}}{\frac{j s \omega L'_{\sigma 2} + R'}{s}} \quad (\text{P-3.5})$$

Po úpravách:

$$I'_2 = U_1 \cdot \frac{\left(\frac{jR'}{\omega L'_{\sigma 2}} - s \right)}{j \cdot \alpha_{11} + \alpha_{12}}, \quad (\text{P-3.6})$$

kde koeficienty α_{11} a α_{12} :

$$\alpha_{11} = \left[(-s\omega L_{\sigma 1} L'_{\sigma 2} - R' L_{\sigma 1}) \left(\frac{1}{L_{\sigma 1}} + \frac{R_1}{R_{Fe} L_{\sigma 1}} + \frac{1}{L'_{\sigma 2}} + \frac{1}{L_\mu} + \frac{R'}{s R_{Fe} L'_{\sigma 2}} \right) + \frac{R' R_1}{\omega L_\mu} + \frac{R'^2 R_1}{s\omega^2 L_\mu L'_{\sigma 2}} \right]$$



$$\alpha_{12} = \left[\left(-R_1 - \frac{R'R_1}{s\omega L'_{\sigma 2}} \right) \left(\frac{R'}{R_1} + s + \frac{sL'_{\sigma 2}}{L_\mu} + \frac{R'L_{\sigma 1}}{R_1L_\mu} + \frac{R'}{R_{Fe}} \right) + \frac{s\omega^2 L_{\sigma 1}L'_{\sigma 2}}{R_{Fe}} + \frac{\omega L_{\sigma 1}R'}{R_{Fe}} \right]$$

Absolutní hodnota rotorového proudu přepočteného na stranu statoru:

$$I'_2 = \frac{U_1 \cdot \sqrt{\left(\frac{R'}{\omega L'_{\sigma 2}} + s \right)^2}}{\sqrt{\alpha_{11}^2 + \alpha_{12}^2}} \quad (\text{P-3.7})$$

Nyní jsou známy veličiny potřebné pro výpočet momentu:

$$M = \frac{m \cdot \frac{R'}{s} \cdot I_2'^2}{\omega_1}, \quad (\text{P-3.8})$$

Výsledná závislost momentu na skluzu pro náhradní zapojení ve tvaru T-článku:

$$M = \frac{3U_1^2 \cdot \frac{R'}{s} \cdot \left(\frac{R'}{\omega L'_{\sigma 2}} + s \right)^2}{\omega_1 \cdot (\alpha_{11}^2 + \alpha_{12}^2)} \quad (\text{P-3.9})$$

P-4: Odvození závislosti statorového proudu na skluzu pro T-článek

Poměr statorového napětí a celkové impedance obvodu (z Obr. 3-13):

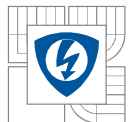
$$I_1 = \frac{U_1}{\left(\frac{R_{Fe} \cdot j\omega L_\mu \cdot \frac{R'}{s}}{R_{Fe} + j\omega L_\mu} \right) + (R_1 + j\omega L_{\sigma 1})} \quad (\text{P-4.1})$$

a po úpravě:

$$I_1 = \frac{U_1 \cdot \left(js + j \frac{R'}{R_{Fe}} + \frac{R'}{\omega L_\mu} \right)}{\left[\left(jR' + jsR_1 + j \frac{R_1R'}{R_{Fe}} + j \frac{R'L_{\sigma 1}}{L_\mu} + j \frac{R_1R'}{\omega L_\mu} \right) + \left(\frac{R_1R'}{\omega L_\mu} - s\omega L_{\sigma 1} - \frac{\omega R'L_{\sigma 1}}{R_{Fe}} \right) \right]} \quad (\text{P-4.2})$$

je absolutní hodnota:

$$I_1 = \frac{U_1 \cdot \sqrt{\left(s + \frac{R'}{R_{Fe}} \right)^2 + \left(\frac{R'}{\omega L_\mu} \right)^2}}{\sqrt{\left(R + sR_1 + \frac{R_1R'}{R_{Fe}} + \frac{R'L_{\sigma 1}}{L_\mu} + \frac{R_1R'}{\omega L_\mu} \right)^2 + \left(\frac{R_1R'}{\omega L_\mu} - s\omega L_{\sigma 1} - \frac{\omega R'L_{\sigma 1}}{R_{Fe}} \right)^2}} \quad (\text{P-4.3})$$



P-5: Parametry motoru

Štítkové parametry motoru ATAS T22VT512 (7-0512):

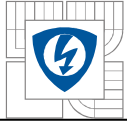
Štítkové hodnoty		
Jmenovitý výkon	0,6	[kW]
Jmenovité napětí	400-Y	[V]
Jmenovitý proud	1,6	[A]
Otáčky	2830	[min ⁻¹]
Účinnost	0,83	[-]
Frekvence	50	[Hz]
Hmotnost	29	[kg]
Stupeň krytí	IP 56	
Výrobní číslo	720328/10	

P-6: Celkové výsledky zatěžovací charakteristiky

Veškeré hodnoty z rozsahu měření zatěžovací charakteristiky shrnuje Tab. 3. Prvky M_i' a I' jsou výsledné hodnoty získané přepočtem na jmenovité napětí.

Tab. 3: Celkové výsledky zatěžovací charakteristiky pro motor ATAS T22VT512 (7-0512)

U [V]	I [A]	P [W]	M_h [Nm]	M_t [Nm]	M_i [Nm]	n [min ⁻¹]	s [-]	M_i' [Nm]	I' [A]
202,037	3,533	928,400	1,092	0,000	1,092	0,000	1,000	4,280	6,995
202,360	3,387	915,200	1,030	0,096	1,126	200,000	0,933	4,400	6,695
202,640	3,280	898,200	1,018	0,107	1,125	400,000	0,867	4,384	6,474
202,787	3,234	882,200	1,002	0,119	1,121	600,000	0,800	4,362	6,378
202,750	3,123	860,400	1,012	0,128	1,140	800,000	0,733	4,437	6,161
202,977	3,037	839,700	1,022	0,135	1,157	1000,000	0,667	4,493	5,986
203,230	2,904	816,900	1,048	0,141	1,189	1200,000	0,600	4,606	5,716
203,760	2,769	793,000	1,075	0,146	1,221	1400,000	0,533	4,705	5,436
203,753	2,613	760,300	1,103	0,151	1,254	1600,000	0,467	4,833	5,130
204,220	2,438	723,100	1,123	0,153	1,276	1800,000	0,400	4,895	4,775
204,620	2,236	676,200	1,131	0,159	1,290	2000,000	0,333	4,930	4,372
204,857	1,988	613,000	1,111	0,163	1,274	2200,000	0,267	4,857	3,881
205,260	1,846	575,600	1,087	0,166	1,253	2300,000	0,233	4,758	3,597
205,283	1,682	528,900	1,037	0,166	1,203	2400,000	0,200	4,567	3,278
205,863	1,504	477,600	0,974	0,166	1,140	2500,000	0,167	4,304	2,922
205,660	1,295	412,400	0,868	0,167	1,035	2600,000	0,133	3,915	2,518
206,283	1,058	336,900	0,710	0,167	0,877	2700,000	0,100	3,298	2,051
206,817	0,792	246,300	0,491	0,172	0,663	2800,000	0,067	2,480	1,531
207,473	0,506	138,300	0,204	0,174	0,378	2900,000	0,033	1,405	0,976
207,720	0,381	78,300	0,028	0,174	0,202	2950,000	0,017	0,749	0,733



P-7: Celkové výsledky měření naprázdno

Veškeré výsledky při měření naprázdno ukazuje Tab. 4.

Tab. 4: Výsledky měření naprázdno pro motor ATAS T22VT512 (7-0512)

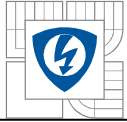
U_{10} [V]	I_{10} [A]	P_{10} [W]	$\cos\phi_{10}$ [-]	R_{Fe} [Ω]	X_{μ} [Ω]	L_{μ} [H]
450,770	1,347	109,440	0,104	1856,497	194,317	0,619
423,457	1,056	72,270	0,093	2480,573	232,451	0,740
401,160	0,881	58,000	0,095	2774,815	263,961	0,840
375,183	0,738	45,420	0,095	3099,672	294,864	0,939
352,757	0,650	37,530	0,095	3317,187	314,883	1,002
328,223	0,573	26,040	0,080	4135,143	331,875	1,056
301,317	0,504	18,410	0,070	4930,336	345,972	1,101
273,853	0,445	12,560	0,060	5969,670	355,826	1,133
252,557	0,405	11,180	0,063	5700,135	360,397	1,147
223,730	0,346	10,040	0,075	4981,918	374,197	1,191
203,187	0,307	9,010	0,084	4581,722	383,915	1,222
173,920	0,254	6,980	0,091	4334,144	396,928	1,263
149,373	0,214	5,880	0,106	3791,692	405,354	1,290
127,403	0,182	5,940	0,148	2730,477	408,046	1,299
103,340	0,149	4,390	0,165	2434,667	406,795	1,295
82,343	0,125	3,380	0,190	2006,482	387,457	1,233

P-8: Naměřené a vypočtené hodnoty odporu R_{Fe}

Srovnání hodnot odporů R_{Fe} ze zkoušky naprázdno přímým výpočtem a výpočtem pro zapojení jednotlivých článků představuje Tab. 5.

Tab. 5: Srovnání hodnot odporu R_{Fe} získaného přímým výpočtem a výpočtem pro jednotlivá náhradní zapojení pro různá vstupní napětí motoru ATAS T22VT512 (7-0512)

Přímý výpočet z měření		Γ -článek	T-článek	I-článek
U_{10} [V]	R_{Fe} [Ω]	R_{Fe} [Ω]	R_{Fe} [Ω]	R_{Fe} [Ω]
450,770	1856,497	4942,720	4255,709	3620,165
423,457	2480,573	5934,562	5242,218	4592,871
401,160	2774,815	5597,448	5020,497	4474,991
375,183	3099,672	5645,814	5123,639	4626,870
352,757	3317,187	5748,826	5250,311	4774,471
328,223	4135,143	7874,775	7226,952	6606,983
301,317	4930,336	10294,807	9482,378	8703,376
273,853	5969,670	14795,923	13660,870	12571,136
252,557	5700,135	12814,475	11843,432	10910,675
223,730	4981,918	9055,246	8393,429	7756,769
203,187	4581,722	7545,158	7007,153	6489,098
173,920	4334,144	6640,207	6181,808	5739,863



149,373	3791,692	5346,537	4984,684	4635,583
127,403	2730,477	3435,482	3203,916	2980,546
103,340	2434,667	2981,396	2779,624	2585,055
82,343	2006,482	2404,556	2233,518	2068,957

P-9: Naměřené a vypočtené hodnoty indukčnosti L_μ

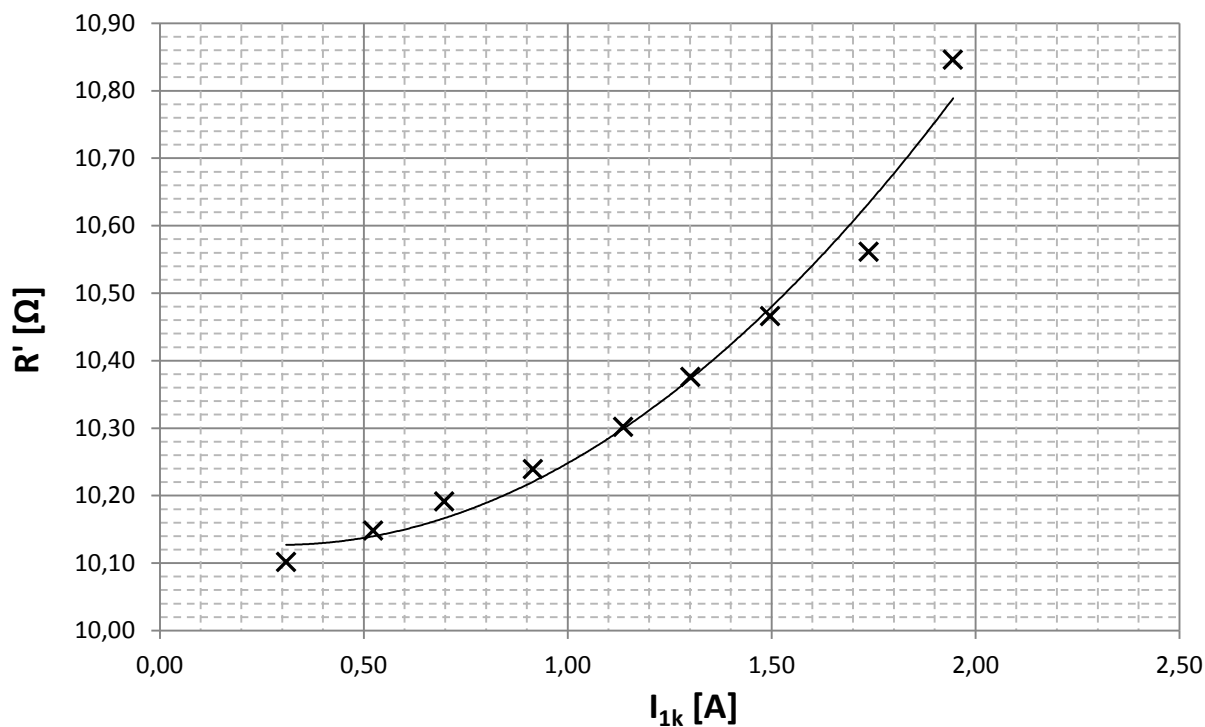
Srovnání hodnot indukčnosti L_μ ze zkoušky naprázdno přímým výpočtem a výpočtem pro zapojení jednotlivých článků představuje Tab. 6.

Tab. 6: Srovnání hodnot indukčnosti L_μ získané přímým výpočtem a výpočtem pro jednotlivá náhradní zapojení pro různá vstupní napětí motoru ATAS T22VT512 (7-0512)

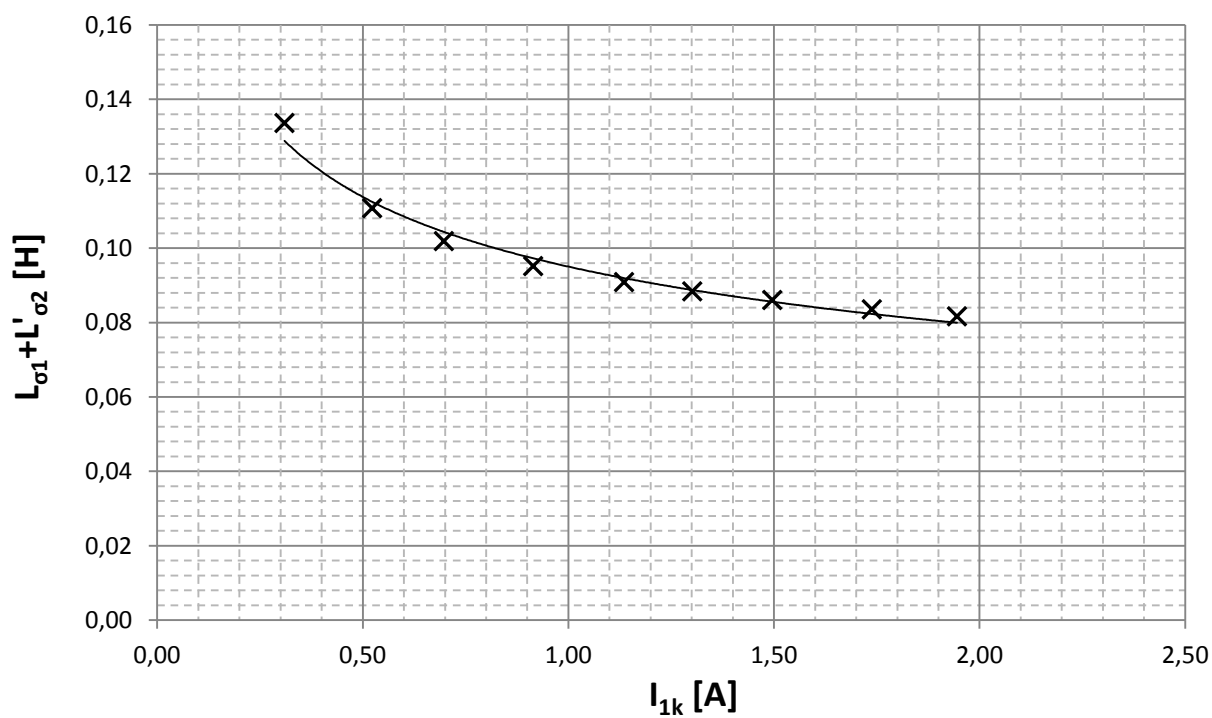
Přímý výpočet z měření		Γ -článek	T-článek	$\bar{\Gamma}$ -článek
U_{10} [V]	L_μ [H]	L_μ [H]	L_μ [H]	L_μ [H]
450,770	0,619	0,613	0,569	0,525
423,457	0,740	0,735	0,690	0,646
401,160	0,840	0,835	0,790	0,746
375,183	0,939	0,933	0,889	0,845
352,757	1,002	0,996	0,952	0,908
328,223	1,056	1,051	1,007	0,963
301,317	1,101	1,097	1,053	1,009
273,853	1,133	1,129	1,085	1,041
252,557	1,147	1,144	1,099	1,055
223,730	1,191	1,186	1,142	1,098
203,187	1,222	1,217	1,173	1,129
173,920	1,263	1,257	1,213	1,169
149,373	1,290	1,283	1,239	1,195
127,403	1,299	1,288	1,245	1,201
103,340	1,295	1,283	1,239	1,196
82,343	1,233	1,219	1,176	1,133



P-10: Proudová závislost změřených parametrů podélné větve

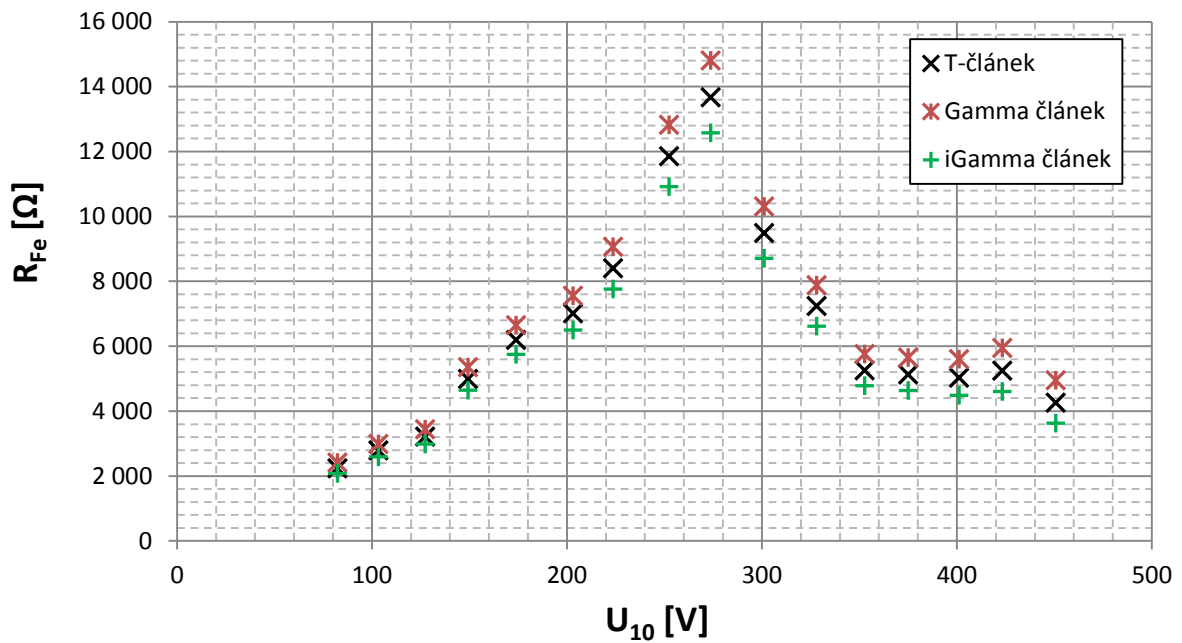


Obr. P- 1: Proudová závislost odporu R'

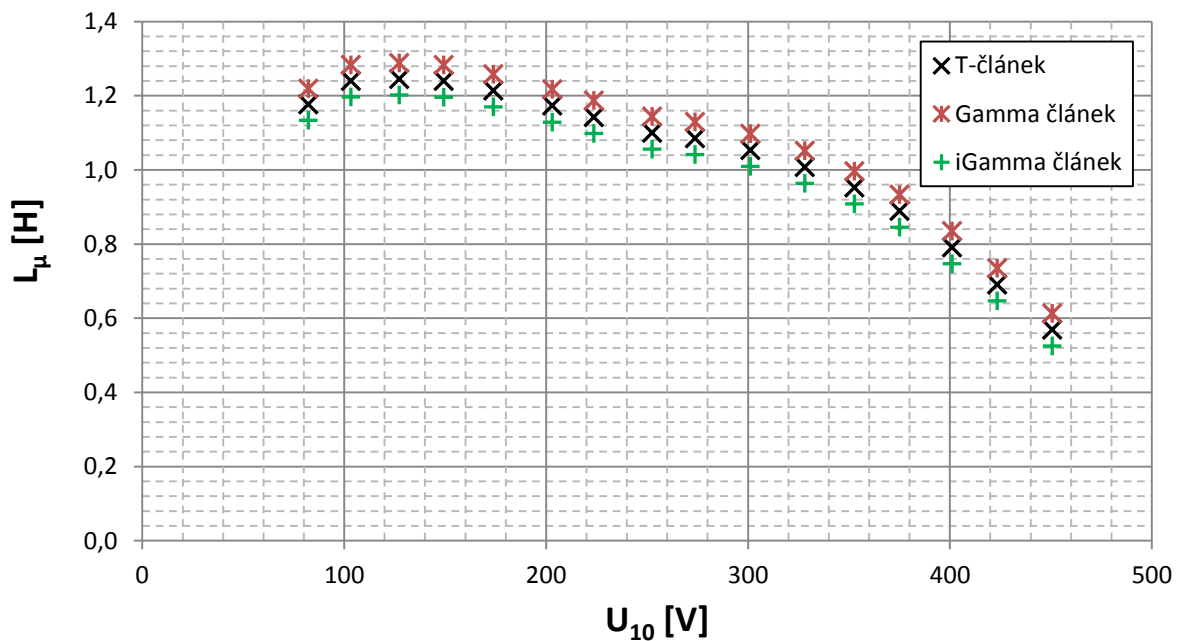


Obr. P- 2: Proudová závislost rozptylových indukčností $L_{\sigma 1}$ a $L'_{\sigma 2}$

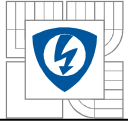
P-11: Napěťová závislost vypočtených parametrů příčné větve



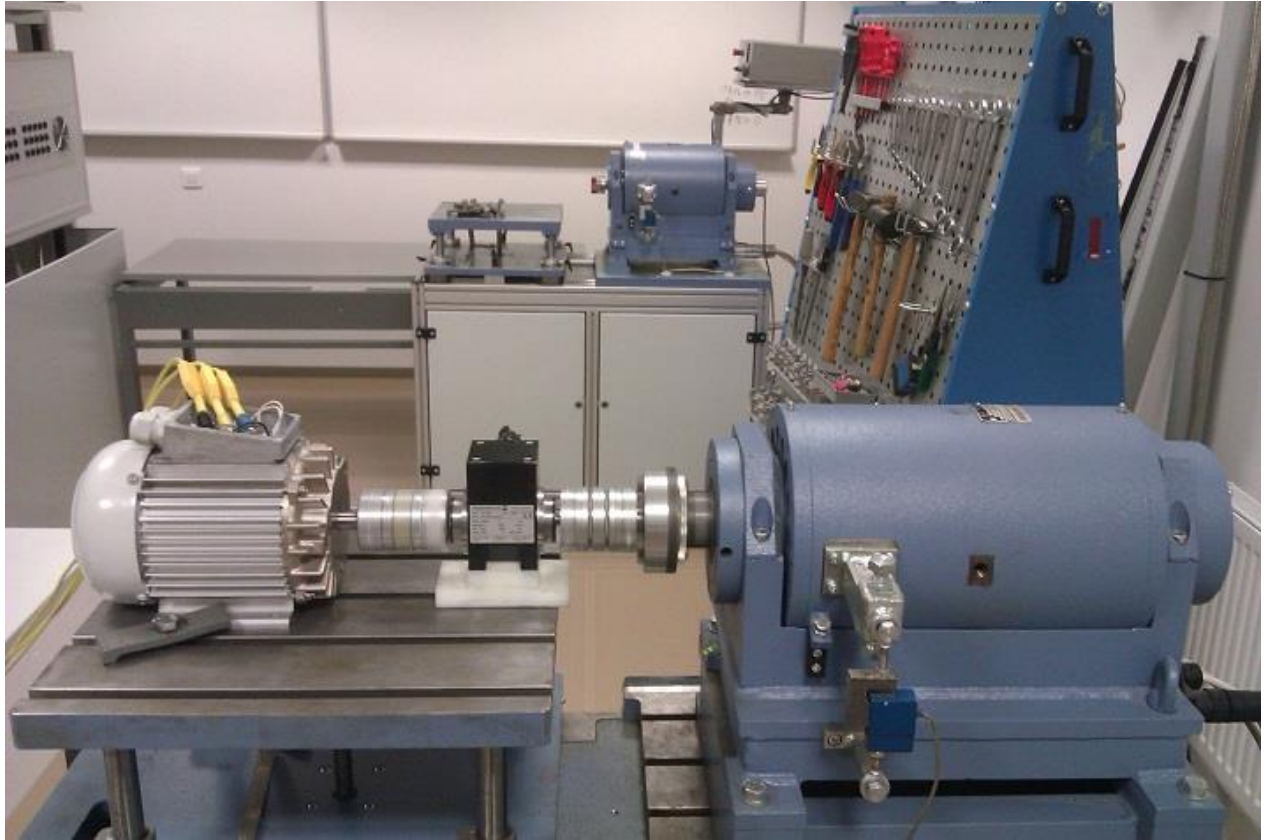
Obr. P- 3: Napěťová závislost vypočteného odporu R_{Fe} pro jednotlivá náhradní zapojení ASM



Obr. P- 4: Napěťová závislost vypočtené indukčnosti L_{μ} pro jednotlivá náhradní zapojení ASM



P-12: Ukázka měřeného zařízení



Obr. P- 5: Ukázka pracoviště všech prováděných měření