

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Záběrný moment asynchronního motoru

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan PIKOUS**
Osobní číslo: **E10B0100P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Záběrný moment asynchronního motoru**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Popište parametry, na kterých závisí záběrný moment asynchronního motoru.
2. Přehledově uveďte metody měření záběrného momentu asynchronního motoru.
3. Provedte měření záběrného momentu v závislosti na napájecím napětí.
4. Pokuste se experimentálně specifikovat vliv nesymetrického napájecího napětí na záběrný moment.
5. Shrňte obdržené výsledky a písemně je okomentujte v závěru práce.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **Bartoš, V., Skala, B. : Měření na elektrických strojích. Skripta ZČU, Plzeň 2002**
2. **Trinkewitz, Z.: Průmyslové zkoušky velkých elektrických strojů točivých. SNTL Praha 1982**
3. **internet**

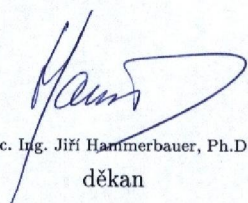
Vedoucí bakalářské práce:

Doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

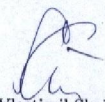
Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2012**

Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2013**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan




Doc. Ing. Vlastimil Škočil, CSc.

vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na měření záběrného momentu asynchronního motoru v závislosti na symetrickém i nesymetrickém napájecím napětí a porovnání výsledků měření při symetrickém napětí se simulací v prostředí MATLAB.

V teoretické části je stručně charakterizován princip asynchronního motoru, jsou popsány parametry, na kterých závisí záběrný moment asynchronního motoru, a jsou uvedeny metody jeho měření. V praktické části této práce jsou na základě uskutečněných měření identifikovány parametry náhradního schématu asynchronního motoru, na jejichž základě byla v prostředí MATLAB provedena simulace velikosti záběrného momentu v závislosti na symetrickém napájecím napětí. Pro zjištění vlivu nesymetrie napájecího napětí na záběrný moment asynchronního motoru je pro srovnání provedeno i měření při zapojení různých rezistorů do série s jednou statorovou fází.

Klíčová slova

Třífázový asynchronní motor, záběrný moment asynchronního motoru, náhradní schéma, momentová charakteristika, výpočet parametrů náhradního schématu, závislost záběrného momentu na napájecím napětí

Abstract

The presented bachelor thesis is aimed at measuring of the starting torque of an induction motor in dependency on the symmetric and asymmetric supply voltage and comparison of the results of symmetrical voltage measurements with a simulation in MATLAB.

In the theoretical part there is described the principle of an induction motor, there are described the parameters that influence the induction motor starting torque and the methods of its measurement. In the practical part of this thesis there are identified equivalent circuit parameters of the induction motor based on the performed measurements. The simulation of the starting torque of the induction motor in MATLAB was done based on the determined parameters of the equivalent circuit. A measurement with various resistors in series with one stator phase was done in order to determine the effect of voltage unbalance on induction motor starting torque.

Key words

Three-phase induction motor, induction motor starting torque, equivalent circuit, calculation of equivalent circuit parameters, speed-torque characteristic, dependency of starting torque on the supply voltage

Prohlášení

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

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

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

V Plzni dne 21.5.2013

Jan Pikous

.....

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Bohumilovi Skalovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 ASYNCHRONNÍ MOTOR	12
1.1 PRINCIP.....	12
1.2 KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ.....	14
1.2.1 <i>Vinutá kotva</i>	15
1.2.2 <i>Kotva nakrátko</i>	15
1.3 NÁHRADNÍ SCHÉMA A ENERGETICKÁ BILANCE	17
1.4 ASYNCHRONNÍ MOTOR NAKRÁTKO.....	20
2 MOMENT ASYNCHRONNÍHO MOTORU	22
2.1 PROVOZNÍ REŽIMY ASYNCHRONNÍHO MOTORU.....	23
2.2 VLIV ÚHLOVÉHO ZRYCHLENÍ ROTORU NA MOMENT.....	25
2.3 ZÁBĚRNÝ MOMENT ASYNCHRONNÍHO MOTORU.....	26
2.3.1 <i>Kmitání záběrného momentu asynchronního motoru</i>	26
2.4 PARAMETRY ZÁBĚRNÉHO MOMENTU ASYNCHRONNÍHO MOTORU	27
2.4.1 <i>Napájecí napětí</i>	27
2.4.2 <i>Odpor statorového a rotorového vinutí</i>	29
2.4.3 <i>Rozptylová reaktance vinutí</i>	30
2.4.4 <i>Frekvence napájecího napětí</i>	30
2.5 METODY MĚŘENÍ ZÁBĚRNÉHO MOMENTU.....	31
3 ZÁBĚRNÝ MOMENT KONKRÉTNÍHO MOTORU	36
3.1 MĚŘENÍ ZÁBĚRNÉHO MOMENTU	36
3.1.1 <i>Při symetrickém napájecím napětí</i>	36
3.1.2 <i>Při nesymetrickém napájecím napětí</i>	37
3.2 URČENÍ PARAMETRŮ PRO SIMULACI	39
3.3 SIMULACE V PROSTŘEDÍ MATLAB.....	43
ZÁVĚR	47
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	49
PŘÍLOHY	1
PŘÍLOHA 1: NAMĚŘENÉ HODNOTY MOMENTU AM PŘI ROZBĚHU ZA RŮZNÝCH NAPĚTÍ (SYMETRICKÉ NAPÁJENÍ) .	1
PŘÍLOHA 2: NAMĚŘENÉ HODNOTY M PŘI ROZBĚHU ZA RŮZNÝCH NAPĚTÍ (NESYMETRICKÉ NAPÁJENÍ)	2
PŘÍLOHA 3: MĚŘENÉ SOUSTROJÍ S ASYNCHRONNÍM MOTOREM.....	2
PŘÍLOHA 4: SKRIPT PRO VÝPOČET PARAMETRŮ AM, SIMULACE.....	3
PŘÍLOHA 5: VÝŇATEK Z KATALOGU	5
PŘÍLOHA 6: POUŽITÉ PŘÍSTROJE A SCHÉMA ZAPOJENÍ.....	6

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na měření a simulaci záběrného momentu trojfázového asynchronního motoru v závislosti na napájecím napětí.

Asynchronní motory se staly v novodobé historii lidstva nedílnou součástí běžného života. Setkáváme se s nimi na každém kroku. Doby, kdy k práci a pohonu strojů a zařízení postačovala lidská či zvířecí síla, jsou již dávno za námi, a bez motorů jako zdrojů pohybu a pohonu si již nedokážeme představit fungování našeho světa. A právě asynchronní motory prokázaly v konkurenčním prostředí různých konstrukčních řešení své přednosti a svou nezastupitelnou roli. Počínaje prvním Teslovým asynchronním motorem až po v současné době nejpoužívanější motor s kotvou nakrátko proběhl dlouhý vývoj. Dalším technologickým pokrokem, zařazováním sofistikovanějších materiálů a zdokonalováním spínacích prvků výkonové elektroniky se spolu s progresivním uplatňováním počítačového řízení a diagnostiky budou nepochybně tyto motory zdokonalovat i v budoucnu.

K posouzení a měření jsem použil asynchronní motor s kotvou nakrátko o výkonu 1,5 kW, který v roce 1971 vyrobil závod MEZ Mohelnice. Text práce je rozdělen do tří částí; první se zabývá základním popisem asynchronního motoru, druhá část se věnuje popisu parametrů záběrného momentu a třetí část obsahuje výsledky vlastního měření a simulace v prostředí MATLAB.

Seznam symbolů a zkratk

$1f, 3f$	Počet fází [-]
$L1, L2, L3$	Fázové vodiče napájecí soustavy [-]
u_u, u_v, u_w	Okamžité hodnoty napájecího napětí [V]
U_{\max}	Amplituda napájecího napětí [V]
N	Střední pracovní vodič napájecí soustavy [-]
U_1	Napájecí napětí [V]
U_{i1}	Indukované napětí statoru [V]
U_2'	Napětí rotoru přepočítané na stator [V]
U_0	Napětí naprázdno [V]
U_k	Napětí nakrátko [V]
M	Moment motoru [Nm]
M_Z	Záběrný moment motoru [Nm]
B	Magnetická indukce [T]
B_u, B_v, B_w	Složky magnetická indukce ve statoru [T]
μ	Magnetická permeabilita [$H \cdot m^{-1}$]
Φ	Magnetický tok [Wb]
Φ_m	Maximální magnetický tok [Wb]
p	Počet pólových dvojic [-]
m	Počet fází statorového vinutí [-]
τ_p	Pólová rozteč [°]
δ	Vzduchová mezera mezi státorem a rotorem [m]
k	Transformační poměr [-]
s	Skluz [-, %]
n	Otáčky rotoru [$ot \cdot min^{-1}$]
c_1	Komplexní činitel rozptylu [-]

f_1	Frekvence napájecího napětí [Hz]
f_{1n}	Nominální frekvence napájecího napětí statoru [Hz]
f_2	Rotorová frekvence [$rad \cdot s^{-1}$]
ω, ω_s	Úhlová rychlost, synchronní úhlová rychlost [$rad \cdot s^{-1}$]
$\cos \varphi_k$	Účinitel nakrátko [-]
R_{ef}	Efektivní velikost odporu při uplatnění skin efektu [Ω]
R_2'	Odpor rotorového vinutí přepočítaný na stranu statoru [Ω]
R_1	Odpor statorového vinutí [Ω]
R_{Fe}	Odpor respektující ztráty v železe [Ω]
$R_{Fe+mech}$	Odpor respektující ztráty v železe a mechanické ztráty [Ω]
$X_{1\sigma}$	Rozptylová reaktance statorového vinutí [Ω]
$X_{2\sigma}'$	Rozptylová reaktance rotorového vinutí přepočítaná na stranu statoru [Ω]
jX_μ	magnetizační reaktance [Ω]
ΔP_0	Příkon motoru ve stavu naprázdno [W]
ΔP_{j0}	Jouleovy ztráty ve vinutí statoru při chodu naprázdno [W]
ΔP_{Fe}	Ztráty v železe [W]
ΔP_m	Mechanické ztráty [W]
Z_k	Celková impedance z měření nakrátko [Ω]
R_k	Reálná složka celkové impedance z měření nakrátko [Ω]
$X_{\sigma k}$	Imaginární složka celkové impedance z měření nakrátko [Ω]
I_1	Statorový proud [A]
I_μ	Magnetizační proud [A]
I_2'	Proud rotoru přepočítaný na stator [A]
MATLAB.....	Výpočetní prostředí Matrix laboratory společnosti MathWorks
AM.....	Asynchronní motor
TM	Torzni dynamometr

1 Asynchronní motor

První model fungujícího asynchronního motoru s vinutou kotvou vytvořil v roce 1887 Nikola Tesla a o rok později jej demonstroval v American Institute of Electrical Engineers. [1] Dnes patří asynchronní motor k nejrozšířenějším druhům elektrického pohonu pro svou jednoduchost, spolehlivost a nízkou až zanedbatelnou potřebu údržby. Na toto místo se dostává s nástupem výkonové elektroniky, která pomáhá odstranit dvě významné nevýhody, pro které zejména v minulosti bývaly v regulaci nasazovány stejnosměrné motory. Asynchronní motor při roztáčení z nulových otáček zatěžuje síť až sedminásobným proudovým odběrem než při nominálních otáčkách. Druhou nevýhodou je obtížnost plynulé regulace otáček a získání dostatečného záběrného momentu. S rozvojem vypínatelných polovodičových součástek se obě tyto nevýhody asynchronních motorů eliminují. Asynchronní motory se vyrábí v širokém rozsahu výkonů od jednotek wattů až do několika desítek megawattů. V minulosti se rozběh a regulace řešily použitím vinutého rotoru, jehož vinutí byla vyvedena přes kroužky na svorkovnici a bylo možné při rozběhu postupně snižovat odpor kotvy. Toto opatření zvýšilo záběrný moment a při vhodných otáčkách bylo možné zařazené odpory zkratovat pro lepší ekonomiku chodu. Na straně statoru bývalo několik vinutí, jejichž přepínáním se měnil počet pólových dvojic a tedy nominální rychlost. V současnosti převládají v drtivé většině asynchronní motory s kotvou nakrátko, což je konstrukčně nejjednodušší řešení. Pro aplikace, kde není vhodné či nutné nasadit výkonovou elektroniku, bývá kotva nakrátko v různých modifikacích zvyšujících záběrný moment, například odporová klec, sofistikovanější dvojitá klec (Boucherotova) či klec vírová. [2]

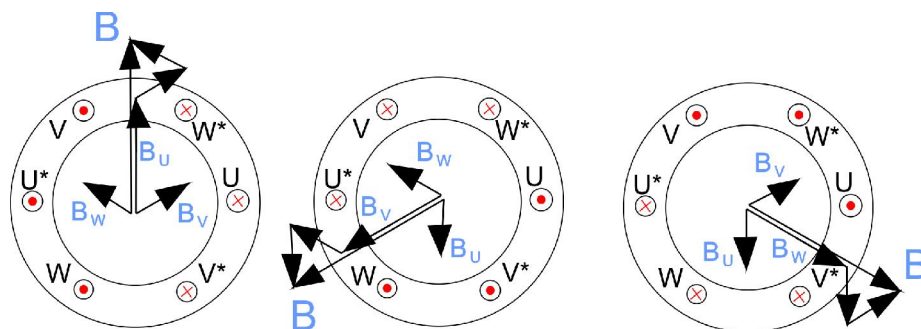
1.1 Princip

Asynchronní motor je točivý elektrický stroj s dvěma částmi magnetického obvodu oddělenými malou vzduchovou mezerou. Na stacionární části magnetického obvodu zvané stator jsou umístěna vzájemně geometricky o 120° posunutá vinutí třech fází napájená harmonickými napětími posunutými o 120° elektrických. Pro okamžité hodnoty napájecích napětí platí:

$$\begin{aligned}u_U &= U_{\max} \sin(\omega t) \\u_V &= U_{\max} \sin(\omega t - 120^\circ) \\u_W &= U_{\max} \sin(\omega t - 240^\circ) \\u_U + u_V + u_W &= 0\end{aligned}\tag{1.1}$$

Vektorovým součtem složek vybuzeného magnetického pole všech tří cívek je otáčející se fázor magnetické indukce \mathbf{B} , jehož absolutní hodnota se v čase nemění.

Koncový bod fázoru magnetické indukce opisuje v ideálním případě, kdy jsou cívky napájeny harmonickými napětími a magnetický obvod je homogenní, kružnici.



Obr. 1.1 Vznik točivého pole [7]

Maximální hodnota magnetické indukce je ve vzduchové mezeře 1,5 násobkem amplitudy indukce pulsujícího pole jedné fáze. Při symetrickém napájení vinutí dochází k postupu točivého pole o jednu pólouvu rozteč vždy za jednu polovinu periody napájecího napětí. Elektrický úhel je tedy násobkem mechanického úhlu a počtu pólových dvojic stroje. Rychlost otáčení statorového magnetického pole je tzv. synchronní rychlost, která závisí podle vztahu (1.2) jen na frekvenci napájecího napětí a počtu pólových dvojic statorového vinutí stroje.

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \left[\text{min}^{-1}, \text{Hz}, - \right] \quad (1.2)$$

Rotor je spřažen s točivým magnetickým polem statoru a je v něm indukováno napětí, které protlačí proud a dojde k silové interakci vzniklého magnetického pole rotoru s točivým magnetickým polem statoru. Napětí a proudy se točivým magnetickým polem dle indukčního zákona mohou indukovat do rotoru jen při rozdílu otáček rotoru od otáček synchronních. Rozdíl otáček magnetického točivého pole a otáček rotoru v poměru k synchronním otáčkám se označuje jako skluz.

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \left[- \right] \quad (1.3)$$

Na skluzu závisí frekvence indukovaného proudu v rotoru. Při rozběhu je skluz roven jedné, takže podle vztahu (1.4) je rotorový kmitočet při rozběhu 50 Hz a se zvyšujícími se otáčkami při rozběhu se snižuje. Toho využívá při rozběhu Boucherotova a vírová klec k zvýšení záběrného momentu motoru zvýšením rozběhové impedance rotoru a jejím postupným snížením během rozběhu.

$$f_2 = \frac{s \cdot \omega_1 \cdot p}{2\pi} = s \cdot f_1 \left[\text{Hz}, -, \text{Hz} \right] \quad (1.4)$$

Po rozběhu dosáhne rotor asynchronního motoru asynchronních otáček, jejichž velikost závisí na napájecí frekvenci, počtu pólových dvojic a skluzu souvisejícím se zatížením stroje mechanickým momentem. Počet otáček rotoru stroje za minutu je vyjádřen vztahem:

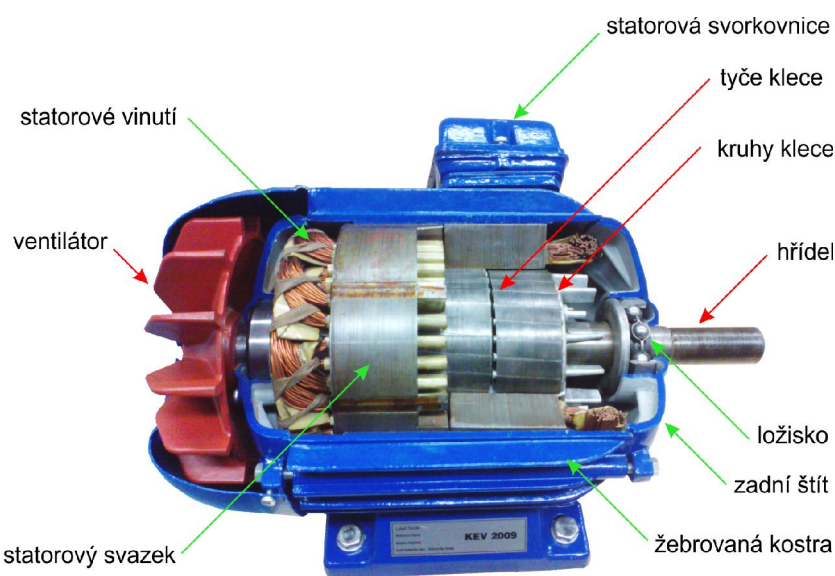
$$n = \frac{60 \cdot f_1}{p} \cdot (1 - s) \quad [\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}, \text{Hz}, -, -] \quad (1.5)$$

U trojfázového vinutí se smysl otáčení mění (reverzuje) vzájemným prohozením přívodů dvou statorových fází.

1.2 Konstrukční uspořádání

Točivý stroj lze rozdělit na dvě hlavní části a to stator a rotor. Konstrukce stacionární části stroje se sestává ze statorového svazku, statorového vinutí, kostry, ložiskových štítů, ložisek a statorové svorkovnice. [2]

Magnetický obvod statoru je tvořen statorovým svazkem složeným z dynamových plechů nejčastěji tloušťky 0,5 mm. Ve vnitřním obvodu mezikruží jsou drážky pro uložení trojfázového vinutí, jehož vývody jsou přivedeny na svorkovnici. Mechanická pevnost a vnější tvar stroje jsou dány litinovou kostrou, ve které je statorový svazek zalisován. S kostrou tvoří jednotný celek ložiskové štíty, ve kterých je pomocí ložisek uložena hřídel stroje vyčnívající ze zadního štítu. Na hřídeli je kromě rotorové klece upevněn i ventilátor zajišťující chlazení stroje za chodu. Uzavřené a povrchově chlazené stroje mají na kostře žebrování ulehčující odvod tepla. Takové motory mohou být zcela uzavřené bez vnějšího ventilátoru, nebo s ventilátorem umístěným na straně řemenice vně ložiskového štítu. Celková konstrukce stroje se liší podle provedení rotorového vinutí či klece. Rozložení konstrukčních prvků stroje s klecí nakrátko je ilustrováno na *Obr. 1.2*.



Obr.1.2 Řez asynchronním motorem s kotvou nakrátko v laboratoři KEV ZČU

Rotorový magnetický obvod je složen z dynamových plechů pro snížení ztrát vířivými proudy. V zásadě se asynchronní motory dělí podle typu rotorového vinutí na vinutou kotvu a klec nakrátko. Vhodnou konstrukcí klece lze nastavit požadované parametry záběrného momentu, záběrného proudu, ztrát a účinnosti motoru.

1.2.1 Vinutá kotva

Rotorové vinutí spojené do hvězdy má počet fází stejný jako statorové vinutí. Drtivá většina asynchronních motorů běžně používaných v průmyslu i domácnostech je s ohledem na třífázovou napájecí síť třífázová. Vinutá neboli kroužková kotva umožňuje přes kartáče dosedající na kroužky rotoru připojit spouštěcí odpor. Zvýšení odporu rotorového vinutí vede ke snížení záběrného proudu a zvýšení záběrného momentu. Po rozběhu se tento odpor vyřazuje zkratováním pro zvýšení účinnosti stroje. Vinutá kotva se využívala již u historicky prvních asynchronních motorů. V současnosti jsou motory s vinutou kotvou na ústupu kvůli své vyšší složitosti, ceně a vysokým ztrátám ve spouštěcích odporech při rozběhu.

1.2.2 Kotva nakrátko

Rotorové vinutí je tvořeno tyčemi uloženými v drážkách magnetického obvodu rotoru. Klecová kotva má tolik fází, z kolika tyčí se skládá. Tyče bývají vedeny šikmo k podélné ose pro snížení kmitání rotoru a na čelech rotoru jsou vodivě spojeny kruhy. Nejčastěji je rotorový elektrický obvod odstříknut z hliníku, ovšem pro speciální aplikace jako jsou jeřáby, výtahy a podobně mohou být tyče či spojovací kruhy vytvořeny z mosazi. Hovoříme pak o odporové kleci.

- **Odporová klec**

Zvýšení odporu tyčí by bylo možné dosáhnout snížením průřezu či zvýšením měrného odporu materiálu, ze kterého jsou vyrobeny. Zmenšením průřezu by došlo ke snížení tepelné kapacity, a volí se tedy druhá varianta. Tyče jsou vyrobeny například z mosazi nebo siluminu. Na koncích jsou spojeny kruhy nakrátko. Vhodným odporem klece lze dosáhnout velikosti záběrného momentu rovnající se maximálnímu momentu stroje. Momentová charakteristika takového stroje je měkčí. Pro tyto vlastnosti se asynchronní v motory s odporovou klecí používají u jeřábů a výtahů.

- **Vírová klec**

Rotorové vinutí se sestává z úzkých hlubokých drážek. Reaktance tyčí se mění s hloubkou uložení tyče. Při záběru je rotorová frekvence rovna statorové, protože skluz je roven jedné. Pro frekvenci napětí a proudu v rotoru platí vztah (1.6).

$$\omega = 2\pi \cdot f_2 = 2\pi \cdot (s \cdot f_1) \quad [\text{Hz}, -, \text{Hz}] \quad (1.6)$$

Tvar klece je volen tak, aby se co nejméně uplatňoval skinefekt. Efektivní průřez rotorové tyče uvažujeme pro zjednodušení jako součin šířky drážky a hloubky vniku a .

$$a = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \gamma}} \quad [m] \quad (1.7)$$

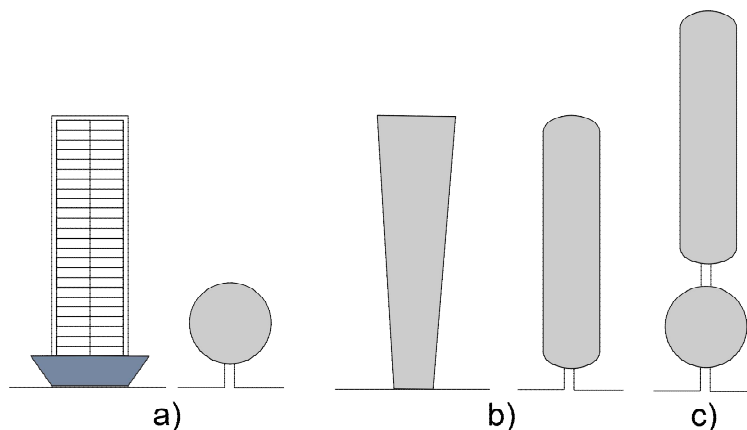
Hloubka vniku a je vzdálenost, kde se amplituda proudové hustoty sníží na e^{-1} (přibližně na 36,8% své hodnoty na povrchu). Efektivní odpor je vyjádřen vztahem

$$R_{ef} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{2\pi r a} \quad [\Omega]. \quad (1.8)$$

Odpor tyče s poloměrem r je u asynchronního motoru nejvyšší při $s=1$ a se zvyšujícími se otáčkami se snižuje.

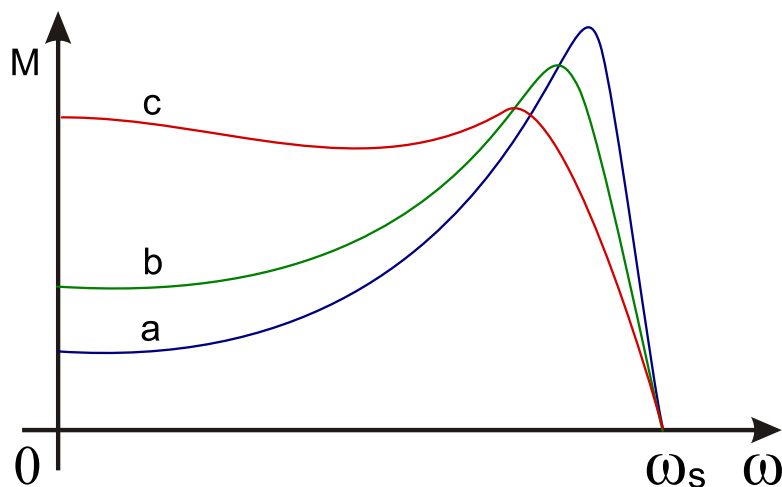
- **Dvojitá klec**

Dvojitá klec mění při chodu svou reaktanci a odpor. Rotor má dvě samostatné klece, soustavy tyčí nestejného průřezu spojené vodivými kruhy, jak je naznačeno na Obr. 1.3c. Tyč pracovní klece je dále od povrchu rotoru, má vyšší reaktanci než rozběhová klec a je spřažena s plným rozptylovým magnetickým tokem. Rozběhová klec je spřažena s malou částí rozptylového magnetického toku a její menší průřez jí dává větší elektrický odpor a menší reaktanci než pracovní kleci. Při skluzu kolem 1 způsobuje vyšší frekvence rotorového proudu nerovnoměrné rozdělení procházejícího proudu do rozběhové klece a jen malá část proudu teče pracovní klecí s vyšší impedancí. Jak rotorová frekvence klesá, klesá i reaktance rozběhové klece a v ustáleném stavu se proud dělí v poměru odporů jednotlivých klecí. Dvojitá klec kombinuje výhody jednoduché a odporové klece. Dosahuje se zvětšení záběrného momentu a zmenšení záběrného proudu. Momentová charakteristika je součtem momentových charakteristik rozběhové (odporové) a pracovní klece.



Obr. 1.3 Příklad tvarů rotorových drážek asynchronního motoru [10]
kroužkové stroje s mělkou rotorovou drážkou b) vírová c) dvojitá klec

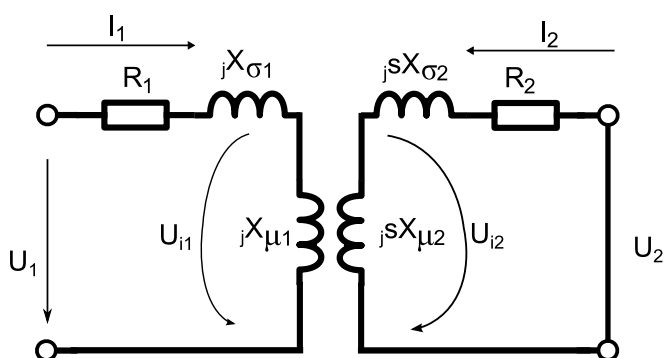
Orientační průběhy momentových charakteristik asynchronních motorů s jednotlivými klecemi jsou zobrazeny na *Obr. 1.4*.



Obr. 1.4 Momentové charakteristiky klecí nakrátko [10]

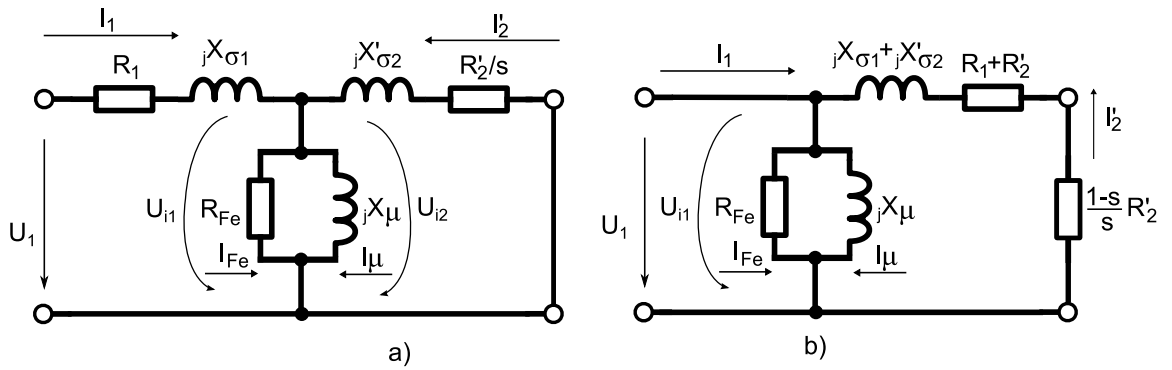
1.3 Náhradní schéma a energetická bilance

Asynchronní motory bývají nazývány též motory indukčními, neboť statorové vinutí je s rotorovým vinutím vázáno magnetickou vazbou přes vzduchovou mezeru. Moment rotoru je vytvořen vzájemným působením silových účinků statorového a indukovaného rotorového proudu. Náhradní schéma asynchronního motoru je díky principiální podobnosti obdobné s náhradním schématem transformátoru. Náhradní schéma asynchronního motoru musí respektovat rozdíly oproti náhradnímu schématu transformátoru. Výstupní výkon stroje je mechanický, počet fází statoru a rotoru nemusí být stejný (kromě strojů s vinutou kotvou), kmitočet v rotoru se od statorového liší (v případě skluzu odlišného od 1), magnetický obvod má větší mezeru. Obvodově je asynchronní stroj znázorněn na *Obr. 1.5* níže.



Obr. 1.5 Obvodové znázornění asynchronního stroje [5]

Rotorové vinutí je zkratováno. Případný odpor kotvy je přičten k odporu R_2 . Pro odvození momentové charakteristiky se používá neekvivalentní úprava náhradního schématu na zjednodušený Γ -článek. Přechod od úplného náhradního schématu k zjednodušené variantě je ilustrován na *Obr. 1.6* na další straně.



Obr. 1.6 Přechod od úplného náhradního schématu k zjednodušené variantě [5]

Z druhého Kirchhoffova zákona pro obvod (a) platí

$$U_1 = (R_1 + jX_{\sigma 1}) \cdot I_1 + U_{i1} \quad (1.9)$$

$$0 = (R_2 + jsX_{\sigma 2}) \cdot I_2 + U_{i2} \quad (1.10)$$

Převod je transformační poměr asynchronního stroje.

$$k = \frac{U_{i1}}{U_{i2}} = \frac{4,44N_1k_{V1}\Phi_m f_1}{4,44N_2k_{V2}\Phi_m f_1} = \frac{N_1k_{V1}}{N_2k_{V2}} \quad [-] \quad (1.11)$$

Pro rotorovou část stroje pak platí

$$0 = (R_2 + jsX_{\sigma 2}) \cdot I_2 + \frac{U_{i1}s}{k} \quad (1.12)$$

Po dosazení a úpravě lze původní rovnice pro obvod (a) upravit na

$$U_1 = (R_1 + jX_{\sigma 2}) \cdot I_1 + U_{i1} \quad (1.13)$$

$$0 = (R_2 + jX_{\sigma 2}) \cdot I_2 + \frac{U_{i1}}{k} \quad (1.14)$$

Rotorové veličiny se přepočítávají přes transformační poměr

$$R_2' = k^2 R_2 ; L_{\sigma 2}' = k^2 L_{\sigma 2} ; I_2' = I_2 k^{-1} \quad (1.15)$$

Ve zjednodušeném Γ -článku platí podle 1. Kirchhoffova zákona vztahy

$$I_{10} = I_1 + I_2' \quad (1.16)$$

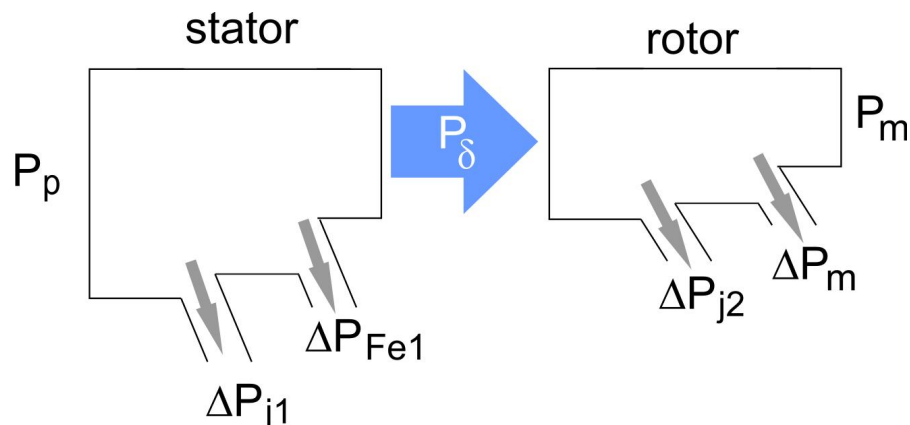
$$I_{10} = I_{\mu} + I_{Fe} \quad (1.17)$$

kde pro magnetizační proud a pro činný proud ke krytí ztrát v železe platí

$$I_{\mu} = \frac{U_1}{jX_{\mu}} \quad (1.18)$$

$$I_{Fe} = \frac{U_1}{R_{Fe}} \quad (1.19)$$

Přeměnu činného příkonu P_p na užitečný mechanický výkon na hřídeli P_m a na ztráty naznačuje energetická bilance asynchronního motoru vyznačená na Obr. 1.7.



Obr. 1.7 Energetická bilance asynchronního motoru [5]

Vzduchovou mezerou se na rotor přenese výkon P_δ , který se spotřebuje na krytí ztrát ΔP_{j2} , ΔP_m , ΔP_{Fe2} a užitečný výkon P_m . Pro zjednodušení se neuvažují ztráty v železe rotoru ΔP_{Fe2} .

$$P_\delta = P_p - \Delta P_{j1} - \Delta P_{Fe1} \quad [W] \quad (1.20)$$

Pro výkon ve vzduchové mezeře taktéž platí

$$P_\delta = P + \Delta P_{j2} + \Delta P_m \quad [W]. \quad (1.21)$$

Pro mechanický výkon na hřídeli motoru platí vztah

$$P = \omega \cdot M \quad [W]. \quad (1.22)$$

Dosažením skluzu lze vyjádřit vztah mezi výkonem přenášeným vzduchovou mezerou a Jouleovými ztrátami ΔP_{j2} . Předpokladem je zanedbání mechanických ztrát ΔP_m . Platí, že

$$P_\delta = M \omega_1 \quad [W] \quad (1.23)$$

$$M \omega_1 = M \cdot \omega + \Delta P_{j2} \quad [W]. \quad (1.24)$$

Dosažením $\omega_1 - \omega = s \cdot \omega \quad [rad \cdot s^{-1}]$ a úpravou vznikne vztah

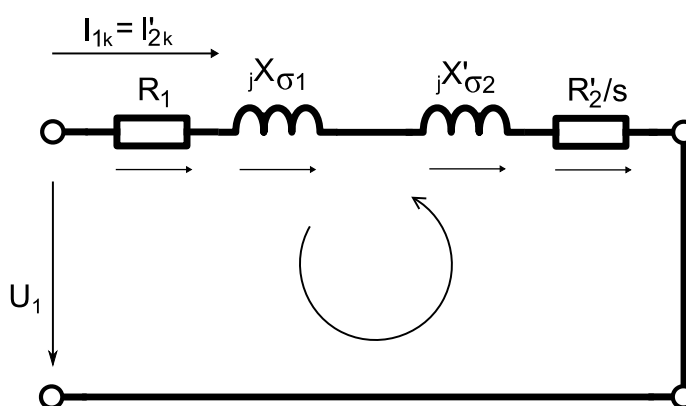
$$M (\omega_1 - \omega) = M \omega_1 s = \Delta P_{j2} \quad [W]. \quad (1.25)$$

Jouleovy ztráty ΔP_{j2} jsou tedy přímo úměrné skluzu stroje.

$$\Delta P_{j2} = P_\delta s \quad [W] \quad (1.26)$$

1.4 Asynchronní motor nakrátko

Při rozběhu asynchronního motoru dochází v prvních okamžicích po připojení na síť k situaci, kdy má rotor nulové otáčky, skluz je roven jedné a statorové vinutí již vytváří točivé magnetické pole indukující do rotorového vinutí napětí, které rotorovou klecí protlačuje zkratový proud o frekvenci f_l . Na indukování tohoto velmi malého napětí stačí malý magnetický tok Φ_2 , z čehož plyne, že Φ_1 se rozdělí na rozptylové toky $\Phi_{\sigma 1}$ a $\Phi_{\sigma 2}$. Reaktanci X_{μ} a odpor $R_{F\epsilon}$ lze zanedbat, protože proud příčnou větví náhradního schématu na Obr. 1.6 je oproti proudu nakrátko mnohonásobně menší. Pro chod nakrátko asynchronního motoru lze pak zjednodušit náhradní schéma tak, jak je zachyceno na Obr. 1.8.

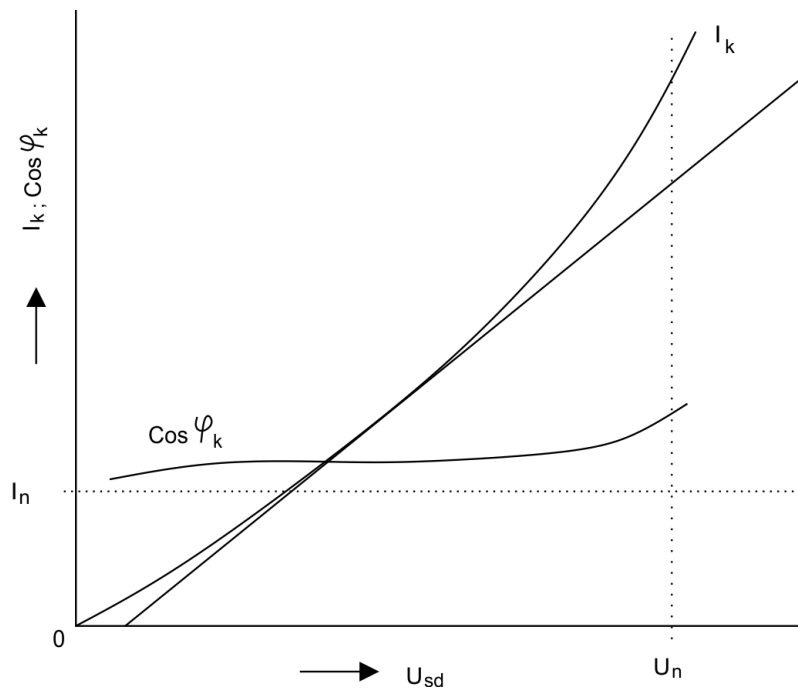


Obr. 1.8 Náhradní schéma AM při chodu nakrátko [2]

Zkratový proud je pak dán vztahem

$$I_{1k} = \frac{U_1}{(R_1 + R'_2) + j(X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2})} [A]. \quad (1.27)$$

Obvykle se velikost zkratového (záběrného) proudu pohybuje v intervalu $(3,5 \text{ až } 7)I_L$. Měření nakrátko se provádí při zabrzděném rotoru mechanickou brzdou, která neumožňuje roztočení hřídele měřeného stroje. Určuje se tak charakteristika nakrátko $I_{1k} = f(U_k)$, průběh ztrát nakrátko a účinník nakrátko. Průběh charakteristiky nakrátko a účinníku nakrátko je ilustrován na Obr. 1.9. Je patrný dvojitý ohyb charakteristiky $I_{1k} = f(U_k)$. Ohyb charakteristiky při nižších proudech se objevuje jen u motorů s otevřenými drážkami statoru i rotoru. Odklon průběhu proudu nakrátko při vyšších hodnotách nastává u všech typů strojů. [10]



Obr. 1.9 Průběh charakteristiky nakrátko a účinníku nakrátko AM [10]

Pro určení proudu nakrátko při jmenovitém napětí se používá lineární extrapolace podle vztahu (1.28).

$$I_{1kn} = I_k \cdot \frac{U_n - U_{k0}}{U_k - U_{k0}} \quad [A] \quad (1.28)$$

Skutečný průběh charakteristiky naprázdno se liší od přímky vlivem sycení zubů statorového magnetického obvodu a hlav zubů rotorového magnetického obvodu rozptylovými toky. Odchyłka proudu nakrátko od interpolované hodnoty by se měla pohybovat mezi 10 až 20 %. [4]

2 Moment asynchronního motoru

Vztah pro vnitřní moment asynchronního motoru lze pro rotor nakrátko odvodit z náhradního schématu. Předpokladem $U_2=0$. U kroužkových motorů by se případná impedance nebo odpor připojený k rotorovému vinutí započítal do impedance rotoru. Výkon ve vzduchové mezeře je nepřímo závislý na skluzu

$$P_{\delta} = \frac{3R_2' \cdot I_2'^2}{s}. \quad (2.1)$$

Rotorový proud lze vyjádřit z náhradního schématu asynchronního motoru podle schématu na *Obr. 1.6b* nebo při chodu nakrátko. Takto získaná hodnota nerespektuje vliv příčné větve náhradního schématu na velikost proudu v rotoru.

$$I_2'^2 = \frac{U_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right) + (X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2})} \quad (2.2)$$

Po dosazení rovnice (2.2) do rovnice (2.1) pro výkon ve vzduchové mezeře platí:

$$P_{\delta} = \frac{3R_2'}{s} \cdot \frac{U_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right) + (X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2})} \quad (2.3)$$

Vydělením předchozího vztahu synchronní úhlovou rychlostí lze vyjádřit vztah pro moment asynchronního motoru

$$M = \frac{3R_2'}{\omega_s \cdot s} \cdot \frac{U_1^2}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2})^2}. \quad (2.4)$$

Při přesnějším odvození momentové rovnice se v literatuře [5] zavádí komplexní činitel rozptylu c_1 .

$$c_1 = 1 + \frac{R_1 + jX_{\delta 1}}{1} \cdot \frac{1}{\frac{1}{R_{Fe}} + \frac{1}{jX\mu}} \quad (2.5)$$

Jeho absolutní hodnota pak vstupuje do rovnice pro moment

$$M = \frac{3R_2'}{\omega_1 \cdot s} \cdot \frac{U_1^2}{\left(R_1 + c_1 \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 X'_{\sigma 2})^2}. \quad (2.6)$$

Z náhradního schématu na Obr. 1.6a lze získat přesnější vztah pro moment AM uvažováním vlivu R_{Fe} a jX_{μ} na moment. Jejich sérioparalelní kombinací s R'_2 a $jX'_{\sigma 2}$ a součtem s R_1 a $jX_{\sigma 1}$ se získá impedance jedné fáze vzhledem ke statorovým svorkám

$$Z_1 = R_1 + jX_{\sigma 1} + \frac{1}{\frac{1}{R_{Fe}} + \frac{1}{jX_{\mu}} + \frac{1}{R'_2 + jX'_{\sigma 2}}}. \quad (2.7)$$

Rotorový proud se pro zvýšení přesnosti vyjádří z indukovaného napětí U_i

$$U_i = \frac{\left| \frac{1}{\frac{1}{R_{Fe}} + \frac{1}{jX_{\mu}} + \frac{1}{R'_2 + jX'_{\sigma 2}}} \right|}{|Z_1|} U_{1f}, \quad (2.8)$$

kteřé se ve vztahu pro výpočet proudu dosadí do čitatele zlomku

$$I'_2 = \frac{U_i}{\sqrt{(R'_2)^2 + (X'_{\sigma 2})^2}}. \quad (2.9)$$

Moment asynchronního motoru je pak roven

$$M_e = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{R'_2}{s} \cdot I_2'^2. \quad (2.10)$$

2.1 Provozní režimy asynchronního motoru

Asynchronní stroj může pracovat v těchto provozních režimech:

- **Indukční motor**

Statorové vinutí vytváří točivé magnetické pole, které v rotoru otáčejícím se nižší než synchronní rychlostí indukuje napětí. V uzavřeném obvodu rotoru protékají proudy, které způsobí silové působení pole statoru a rotoru orientované podle Flemingova pravidla levé ruky. Působením síly na rameno vzniká moment, který otáčí rotorem ve směru otáčení magnetického pole statoru. Motor přeměňuje dodanou elektrickou energii na mechanickou.

- **Indukční generátor**

Roztočením rotoru nad synchronní otáčky (záporný skluz) se činná složka statorového proudu stane zápornou a asynchronní stroj začne dodávat do sítě činný výkon. Velikost dodávaného výkonu i účinník závisí na dodané mechanické energii - otáčkách rotoru. K této činnosti spotřebovává stroj jalový výkon ze sítě.

Asynchronní generátor nemůže fungovat samostatně. Jalový výkon musí získávat buď ze sítě, do které pracuje, nebo z kondenzátorové baterie či synchronního stroje.

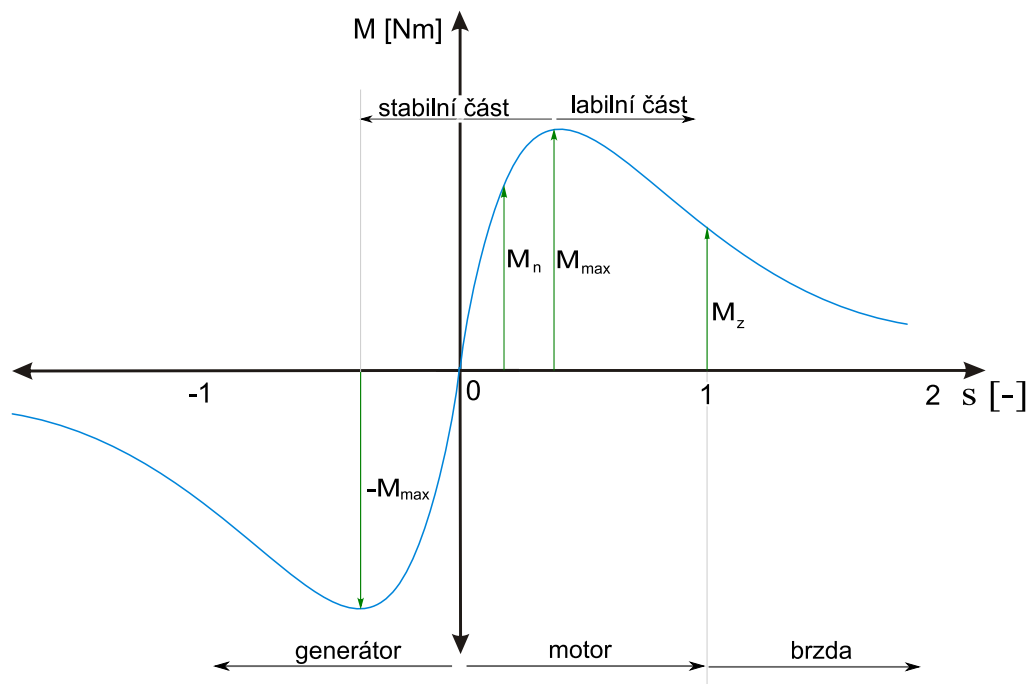
- **Indukční brzda**

Vytvořením točivého magnetického pole s opačným smyslem otáčení, než jakým se otáčí rotor, působí asynchronní stroj jako brzda. Stroj ze sítě odebírá značný proud, větší než záběrný, a je velmi tepelně namáhán. Záporné otáčky způsobí, že skluz je větší než 1. S klesajícími otáčkami rotoru vzrůstá brzdný moment a stroj se musí po zastavení odpojit, jinak by se roztočil na druhou stranu. [2]

- **Indukční brzda**

Frekvence proudu v rotorovém obvodu je závislá na skluzu. Této závislosti lze využít k odebírání proudu z rotoru u kroužkového stroje. S vývojem polovodičové techniky toto využití klesá. Objevuje se jen ve speciálních případech například vojenské techniky.

Statická momentová charakteristika asynchronního stroje pracujícího v režimech motor, generátor a brzda je vyobrazena na *Obr. 2.1*.



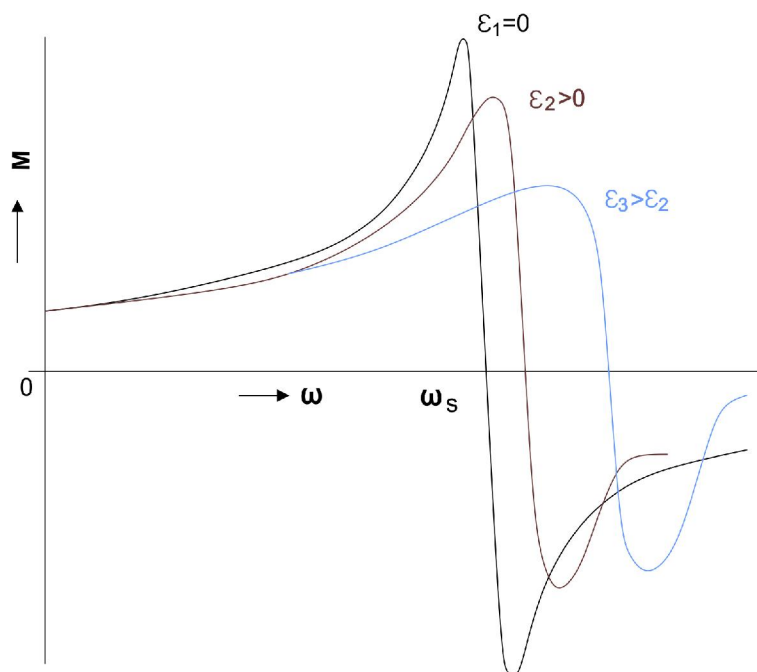
Obr.2.1 Statická momentová charakteristika asynchronního stroje [3]

Při určité hodnotě skluzu dosahuje moment asynchronního motoru svého maxima. Je to dáno tím, že součin magnetického toku a rotorového proudu je v tomto okamžiku největší. Tento bod je nazýván bodem zvratu M_{max} . Rozděluje momentovou charakteristiku na stabilní část od synchronních otáček k bodu zvratu M_{max} a část labilní od M_{max} do nulových otáček.

Motor pracující ve stabilní části momentové charakteristiky při vyšším zatížení zvýší moment a skluz. Při provozu motoru v labilní části dojde při zvýšení zatížení k zvýšení skluzu a poklesu momentu. Při dalším zvyšování zatížení by se motor zastavil a vlivem velkých ztrát nakrátko by se zničil. Poměr M_{max}/M_n je označován jako momentová přetížitelnost. Při návrhu pohonu zařízení asynchronním strojem je nutné počítat s určitou výkonovou rezervou. Obvykle se výkon asynchronního motoru volí o třetinu vyšší než vypočtený výkon. Motor tak pracuje s 75% zatížením. Je tak vytvořena momentová rezerva v případě podpětí napájecí sítě, sníží se tepelné namáhání motoru a vychází příznivý účinník. U asynchronních motorů trvale zatěžovaných méně než 75% nominálního momentu dochází k snižování účinnosti a účinníku $\cos \varphi$. [15]

2.2 Vliv úhlového zrychlení rotoru na moment

Při rychlých změnách otáček dochází k uplatnění přechodových jevů, které způsobují, že moment stroje je závislý i na zrychlení rotoru. Charakteristika naznačená na *Obr. 2.2* ukazuje závislost průběhu momentu a tvaru momentové charakteristiky na konstantním zrychlení rotoru. Reálný stroj se však rozbíhá s proměnným zrychlením rotoru. Z průběhů je patrné, že při velkém skluzu je vliv úhlového zrychlení rotoru na moment asynchronního stroje zanedbatelný.



Obr. 2.2 Vliv úhlového zrychlení rotoru na moment asynchronního stroje [10]

Pro účely této bakalářské práce je vliv úhlového zrychlení rotoru na moment zanedbatelný a dále s ním není uvažováno.

2.3 Záběrný moment asynchronního motoru

V okamžiku připojení asynchronního motoru k síti se vytvoří statorové točivé magnetické pole. Rotor je v okamžiku spuštění v klidu. Skluz je tedy roven 1. Z náhradního schématu asynchronního motoru je odvozena momentová rovnice, do které je pro výpočet záběrného momentu dosazen skluz roven 1.

Varianta výpočtu podle náhradního schématu pro chod nakrátko:

$$M_z = \frac{3R_2'}{\omega_1} \cdot \frac{U_1^2}{(R_1 + c_1R_2')^2 + (X_{\sigma 1} + c_1X_{\sigma 2}')^2} \quad (2.11)$$

Varianta výpočtu podle náhradního schématu respektujícího R_{Fe} a jX_{μ} :

$$M_e = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{R_2'}{1} \cdot \frac{U_i^2}{(R_2')^2 + (X_{\sigma 2}')^2} \quad (2.12)$$

2.3.1 Kmitání záběrného momentu asynchronního motoru

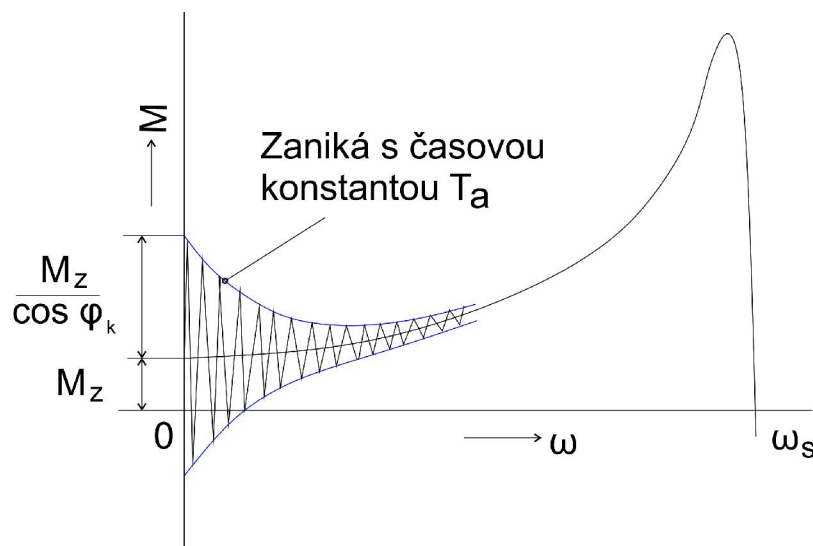
Při připojení asynchronního motoru na síť dojde k přechodovým jevům, při kterých se motor chová jako připojená indukčnost v obvodu střídavého proudu. V systému se vyskytují dva prvky akumulující energii. Vinutí motoru akumulují energii ve formě magnetického pole a hmota rotoru ve formě kinetické energie. Vznikne přechodová složka momentu se síťovou frekvencí s amplitudou zanikající podle časové konstanty T_a . Literatura [10] uvádí následující vzorec matematicky popisující kmitání záběrného momentu při rozběhu asynchronního motoru:

$$M = -\frac{M_z}{\cos \varphi_k} \cdot \cos(\omega_1 t - \varphi_k) e^{-\frac{t}{T_a}}, \quad (2.13)$$

kde počáteční amplituda kmitavé složky je

$$M_0 = \frac{M_z}{\cos \varphi_k}. \quad (2.14)$$

Účinník nakrátko asynchronních motorů s kotvou nakrátko se běžně pohybuje v rozmezí 0,25 až 0,3. Amplituda kmitání přechodné složky momentu tak bývá tři až čtyřnásobek záběrného momentu. U velkých motorů je časová konstanta i několik sekund a přechodná složka momentu se uplatňuje po celou dobu rozběhu. [10] Na Obr. 2.3 je ilustrován průběh přechodné složky momentu u menšího stroje.



Obr. 2.3 Přechodná střídavá složka momentu po zapnutí asynchronního stroje na síť [10]

Přechodná složka momentu vyskytující se při měření záběrného momentu asynchronního motoru v praktické části této bakalářské práce je patrná v průbězích závislosti momentu na čase v příloze 1 a 2.

2.4 Parametry záběrného momentu asynchronního motoru

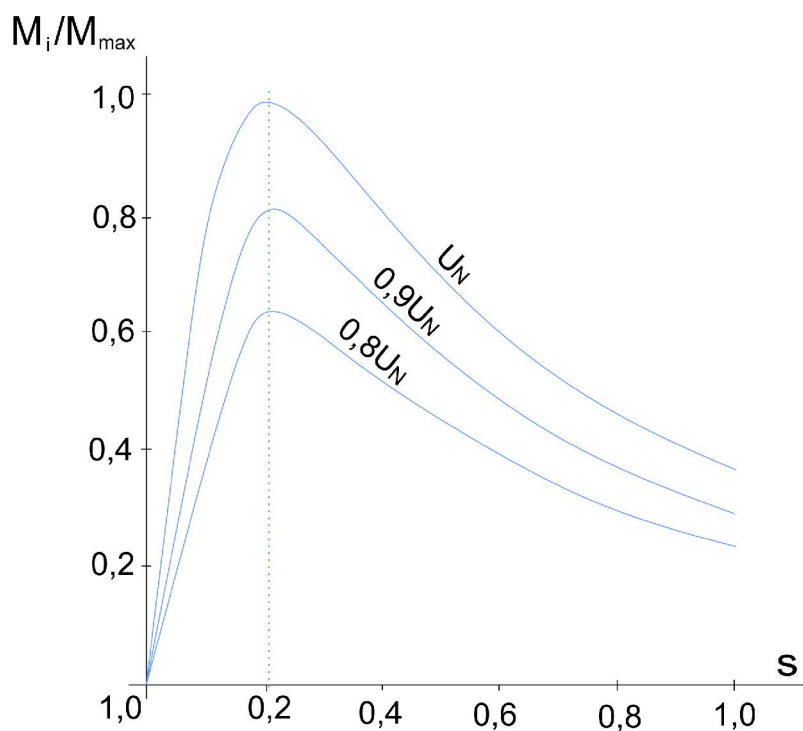
Rovnice (2.11) a (2.12) platí pro motory s velkou časovou konstantou, neboť popisují moment AM při ustáleném stavu. Po položení $s=1$ je patrná závislost záběrného momentu na následujících veličinách a parametrech.

2.4.1 Napájecí napětí

Ze vztahu pro velikost záběrného momentu vyplývá jeho kvadratická závislost na napětí. Záběrný moment při sníženém napětí lze dopočítat z poměru kvadrátů sníženého napětí U_1 k nominálnímu napájecímu U_{1n} , jak je uvedeno ve vztahu (2.15).

$$M_z = M_{zn} \frac{U_1^2}{U_{1n}^2} = M_{zn} \frac{I_{1z}^2}{I_{1zn}^2} \quad (2.15)$$

Snížení záběrného momentu může být způsobeno kolísáním napětí napájecí soustavy. Dovolená výchylka 10% způsobí pokles záběrného nebo nominálního momentu na 81% hodnoty při nominálním napětí, jak ilustruje Obr. 2.4.



Obr. 2.4 Vliv napětí na moment AM [5]

Úbytek napětí se vytváří i na přívodních vodičích a pro jeho minimalizaci je nutné vodiče dostatečně proudově dimenzovat.

S přihlédnutím k dostatečnému rozběhovému momentu lze snížení napájecího napětí použít jako jednu z metod omezení proudového rázu při rozběhu asynchronního motoru. Snížení napájecího napětí je dosahováno několika metodami, například napájením přes autotransformátor nebo statorový odporový spouštěč, kde jsou zařazeny rezistory či tlumivky do série se statorovými svorkami, na kterých průchodem proudu vzniká úbytek napětí. Postupně se zvyšujícími otáčkami rozbíhajícího se motoru dochází k vyřazování skupin rezistorů a tlumivek. Speciálním případem spouštění asynchronního motoru při sníženém napětí je přepínání vinutí z hvězdy do trojúhelníka. Statorová vinutí motoru jsou při rozběhu zapojena do hvězdy, čímž je de facto napájecí napětí motoru $\sqrt{3}$ krát menší než U_n . Proudový ráz při rozběhu z nulových otáček i odebíraný výkon tak klesne na třetinu a po roztočení rotoru na 85% nominálních otáček se speciálním přepínačem vinutí přepne do trojúhelníka. První i druhý vzniklý proudový ráz bude mnohem menší než při přímém připojení na síť. Kvůli třetinovému záběrnému momentu je nutné rozbíhat nezátížené motory. Statorové cívky stroje musí být dostatečně napěťově dimenzovány. V síti 230/400 V lze takto rozbíhat asynchronní motory se štítkovou hodnotou 400/690 V. [2]

2.4.2 Odpor statorového a rotorového vinutí

Průchodem záběrného proudu statorovým vinutím vznikne na jeho činném odporu úbytek napětí, který způsobí pokles záběrného momentu.

Velikost rotorového odporu se určí pro skluz 1

$$R_2' = \sqrt{R_1^2 + X_k^2}. \quad (2.16)$$

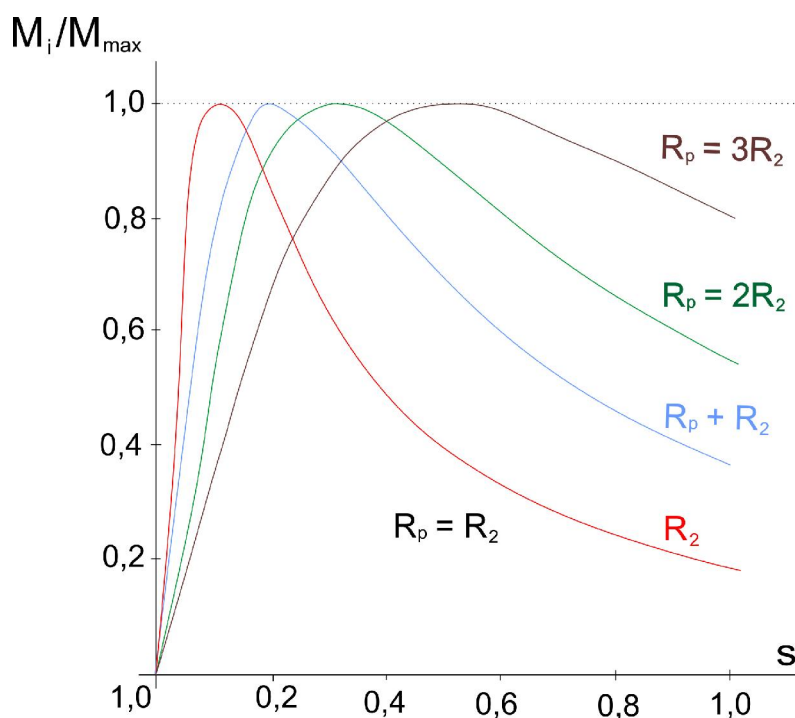
Závislost záběrného momentu na R_2' při frekvenci napájecího napětí 50 Hz popisuje například vztah podle [2].

$$M_z = \frac{9,55m_1R_2'I_{1z}^2}{n_s} \quad (2.17)$$

Záběrný moment asynchronního motoru tedy závisí na odporu rotorového vinutí či klece přímo úměrně. Na rotorovém odporu závisí skluz, záběrný moment a proud, celkový průběh momentové charakteristiky a účinnost motoru.

$$\frac{s_A}{s_B} = \frac{R_{2A}}{R_{2B}} \quad (2.18)$$

Vliv odporu rotorové klece na průběh momentové charakteristiky a velikost záběrného momentu je ilustrován na *Obr. 2.5*.



Obr. 2.5 Průběh momentové charakteristiky v závislosti na odporu rotoru [5]

Ve strojích s velkými nároky na záběrný moment a nižšími požadavky na účinnost pohonu, například ve výtazích a jeřábech, se používají asynchronní motory s tzv. odporovou kotvou.

2.4.3 Rozptylová reaktance vinutí

Zatímco hlavní magnetický tok je spřažen s oběma vinutími a pro elektromechanickou přeměnu je činným tokem, rozptylový magnetický tok zabírá pouze s vinutím, které jej vyvolalo, a tento tok neprochází přes vzduchovou mezeru mezi státorem a rotorem stroje. K činnosti asynchronního motoru není rozptylový magnetický tok žádoucí. Rozlišuje se rozptyl drážkový, rozptyl kolem čel vinutí a diferenční rozptyl.

- **Drážkový rozptyl**

Je vytvářen indukčními čarami uzavírajícími se kolem vodičů v drážce. Tyto indukční čáry procházejí prostorem drážky, jhem a zuby magnetického obvodu.

- **Rozptyl kolem čel vinutí**

Rozptyl kolem čel vinutí vzniká indukčními čarami kolem volných čel vinutí statoru i rotoru.

- **Diferenční rozptyl**

Jedná se o uměle zavedený pojem vyjadřující zmenšení indukovaného napětí vlivem vyšších harmonických v průběhu magnetického toku. Není vytvářen konkrétními indukčními čarami. [2]

Rozptylová reaktance vinutí snižuje napětí U_i . Má větší vliv na napětí U_i než odpor ve statorovém vinutí R_l , který je na $X'_{2\sigma}$ kolmý. Proto je lepší jako předřadník pro snížení záběrného proudu zařazovat tlumivku než odpor.

2.4.4 Frekvence napájecího napětí

Indukované napětí statoru je úměrné magnetickému toku a frekvenci podle vztahu (2.19). Při zanedbání úbytku napětí na statorové impedanci se napájecí napětí U_l rovná indukovanému napětí U_{il} . Pokud by byl asynchronní stroj napájen střídavým napětím s konstantní efektivní hodnotou, při snížení frekvence napájecího napětí vzroste magnetická indukce a došlo by k přesycení magnetického obvodu a proudovému přetížení vinutí stroje.

$$U_{il} = 4,44N_1k_{v1}\Phi_m f_1 = 4,44N_1k_{v1}Bf_1S \quad (2.19)$$

Pro zabránění saturace a pro minimalizaci ztrát je asynchronní motor provozován s jmenovitým tokem ve vzduchové mezeře současnou regulací velikosti a frekvence napájecího napětí, tak aby byl zachován poměr napětí a frekvence.

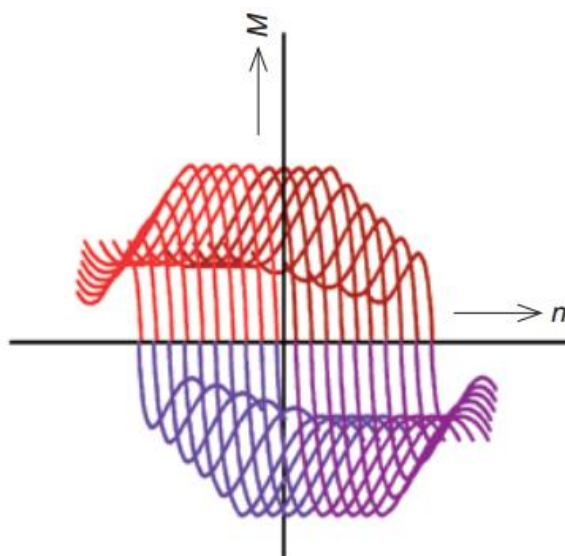
$$\frac{U_1}{f_1} = konst. \quad (2.20)$$

Snižování frekvence napájecího napětí posouvá průběh momentové charakteristiky směrem k nižším otáčkám při zachování účinnosti stroje. Při vhodně zvolené frekvenci napájecího napětí lze motor rozbíhat s vysokým, až maximálním momentem.

Je nutné brát v úvahu, že při nízkých otáčkách ztrácí výkon vnitřní ventilátor motoru a vinutí může být tepelně přetěžováno. Při zvyšování frekvence nad nominální hodnotu nelze nadále zvyšovat velikost napájecího napětí a moment asynchronního motoru se vzrůstající hodnotou hyperbolicky klesá. [15] Jsou-li zanedbány přídavné ztráty v motoru způsobené napájením z měniče frekvence a působení ložiskových proudů, účinnost stroje je i zde zachována.

$$M_{\max} = M_{\max n} \frac{U_1^2}{U_{1n}^2} \cdot \frac{f_{1n}^2}{f_1^2} \quad (2.21)$$

Závislost momentových charakteristik asynchronního stroje na frekvenci napájecího napětí je ilustrována na Obr. 2.6.



Obr. 2.6 Momentové charakteristiky asynchronního motoru s měničem frekvence (převzato z [13])

2.5 Metody měření záběrného momentu

Různé metody měření záběrného momentu vycházejí z typu použitého měřicího zařízení. Při výběru je nutné přihlídnout k velikosti stroje, velikosti vyvíjeného momentu a požadované přesnosti. Nejčastěji se měří:

- **Odporovým potenciometrem**

Měřicí ústrojí pracuje jako snímač úhlové výchylky. Tento způsob vyžaduje velké deformace měřicího členu. Jedná se o málo využívaný typ snímače. Používá se jako převodník k mechanickým snímačům momentu síly, kdy je jeho výstupem elektrický signál. [12]

- **Odporovým tenzometrem**

Deformace měřicí hřídele působí na tenkou měřicí mřížku tenzometru o známém odporu, která je s ní mechanicky spojena, nejčastěji nalepena ve směru maximálních smykových

napětí pod úhlem 45° k ose hřídele. Relativní změna odporu je u všech typů odporových tenzometrů vyjádřena vztahem podle [14].

$$\frac{\Delta R}{R} = C_1 \frac{\Delta l}{l} + C_2 \left(\frac{\Delta l}{l} \right)^2 = C_1 \varepsilon + C_2 \varepsilon^2 \quad (2.22)$$

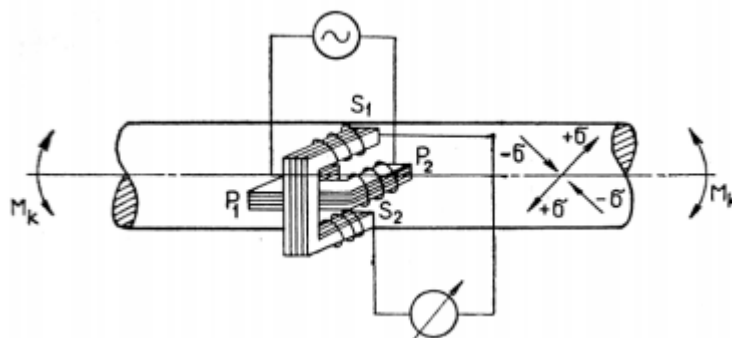
Odpor nedeformovaného tenzometru je označen R , délka tenzometru před deformací l a změna délky měřicího členu tenzometru vlivem deformace je označena Δl . C_1 a C_2 jsou konstanty deformační rovnice. Poměrná deformace ε měřicího členu vyvolá změnu odporu tenzometru ΔR . K vyhodnocení změny odporu a kompenzace vlivu teploty je použito můstkové zapojení. Dnes se využívají polovodičové odporové tenzometry na bázi germania a křemíku. Deformační citlivost je u nich až 100x větší než u kovových tenzometrů. Životnost měřicího ústrojí je při dynamickém namáhání dána životností měřicí hřídele. [12, 14]

- **Indukčními měřiči**

Dvěma indukčními snímači polohy s cívkami, které jsou zapojeny v můstkovém zapojení, lze měřit úhlovou výchylku dvou průřezů hřídele převedenou mechanickým ústrojím na vzduchovou mezeru. Jiná konstrukce spočívá v opatření deformační hřídele třemi ozubenými feromagnetickými prstenci. Zuby krajních s určitou vzduchovou mezerou zapadají do zubů prostředního prstence. Při deformaci hřídele dojde k změně vzduchových mezer mezi zuby a s tím spojená změna indukčnosti obklopující cívky je dále vyhodnocována. [12]

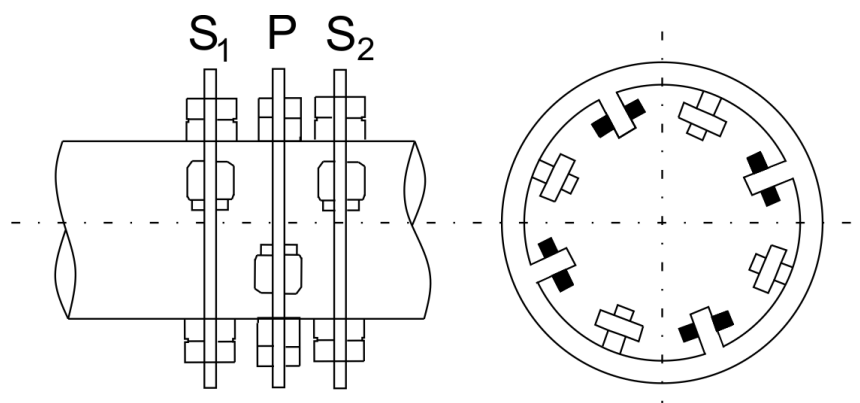
- **Magnetoanizotropními měřiči**

Magnetoanizotropní snímače využívají změny magnetické vodivosti feromagnetik ve směru působící síly. Magnetický obvod snímačů je sestaven ze dvou částí tak, aby na povrchu měřicí hřídele bylo v případě, že není mechanicky namáhána, symetrické magnetické pole. První část magnetického obvodu je rovnoběžná s osou měřicí hřídele a je opatřena budícím vinutím napájeným střídavým proudem s konstantním napětím a kmitočtem. Druhá část magnetického obvodu je k budící části kolmá, a dokud je budící magnetické pole souměrné, není magnetický tok spřažen s cívkou na sekundárním magnetickém obvodu. Při zatížení hřídele krouticím momentem dochází k deformaci magnetického pole a k zasažení magnetického toku do sekundárního magnetického obvodu. Na sekundární cívce se indukuje napětí úměrné působícímu momentu síly. [12]



Obr. 2.7 Principiální uspořádání magnetoanizotropního měřiče momentu (převzato z [12])

Vzhledem k vysoké náročnosti na homogenitu měřící hřídele se používá složitější konstrukce prstencového snímače se dvěma protilehlými měřícími a středním budícím prstencem. Měřící prstence mají snímací cívky zapojené antisériově tak, aby detekovaly změnu magnetické vodivosti v důsledku tahových i tlakových namáhání měřící hřídele. [12]



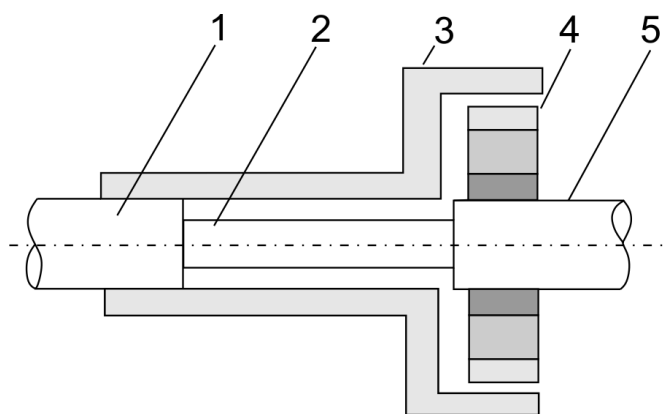
Obr. 2.8 Prstencový magnetoanizotropní snímač momentu síly [12]

- **Magnetoelastickými měřiči**

Měřící hřídel je deformována momentem měřeného stroje a dochází ke změně její permeability. Jsou snímány vzniklé změny indukčnosti měřící cívky. Pro snížení vlivu vůle v ložiscích a vlivu nepřesností tvaru hřídele se měří změna permeability ve dvou bodech na přímce svírající s osou hřídele úhel 45° . [12]

- **Kapacitními snímači**

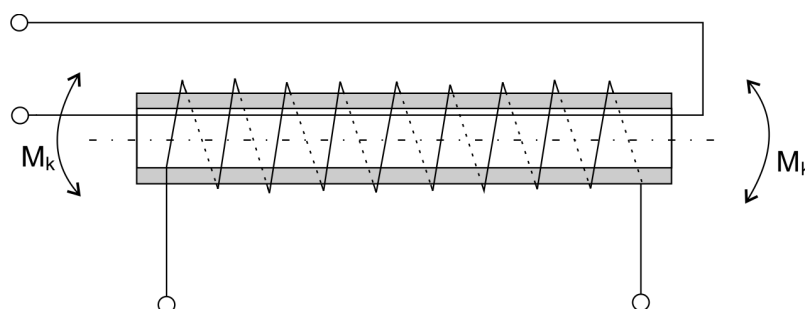
Využívají změny kapacity vzduchového kondenzátoru v závislosti na vzdálenosti elektrod, popřípadě jejich aktivní plochy. Na měřící hřídeli jsou obě elektrody pevně přichyceny tak, že se působením deformace měřící hřídele měřeným momentem vzájemně natáčí, čímž se mění aktivní plocha mezi nimi.



Obr. 2.9 Kapacitní snímač, 2 - měřící hřídel, 3 a 4 - měřící elektrody, 5 - hřídel [12]

- **Měřiči na základě inverze Wiedemannova jevu**

Torzní feromagnetická trubka je obklopena souosou snímací cívkou s velkým počtem závitů a toroidním budícím vinutím napájeným střídavým proudem. V závitech snímací cívky se při zkrucování torzní tyče indukují elektrické napětí vytvořené podélnou složkou magnetického pole. Toto napětí je úměrné součiniteli magnetostrikce materiálu trubky, úhlu jejího zkrutu a velikosti budícího pole. [12] Schéma měřícího ústrojí založeného na tomto principu je zobrazeno na Obr. 2.10.



Obr. 2.10 Měřič momentu využívající inverzi Wiedemannova jevu [12]

- **Rotačními akcelerometry**

Výstupní signál je nenulový jen při změně rychlosti. Měřící člen založený na Ferrarisově principu reaguje jen na přechodný děj. Stator měřícího ústrojí je tvořen permanentními magnety, v jejichž poli se otáčí většinou hliníkový rotor, ve kterém vznikají vířivé proudy. Do snímacích cívek se naindukují napětí jen při změně vířivých proudů, tedy rychlosti rotoru akcelerometru. Výstupní signál je úměrný zrychlení. Při znalosti momentu setrvačnosti na měřené hřídeli je možné vypočítat záběrný moment.

Výhodou je zanedbatelné ovlivnění chování motoru, neboť hmotnost tělesa rotačního akcelerometru je v porovnání s hmotností rotoru měřeného stroje minimální. Výjimkou mohou být velmi malé stroje. [17]

- ***Dynamometry***

K měřenému stroji je na hřídel připojen stejnosměrný či střídavý stroj s možností říditelné rychlosti, jehož stator není pevně uchycen za patky a má možnost otáčení. Ke statoru dynamometru je upevněno přes rameno známé délky závaží přímo cejchované v Nm . Klasická konstrukce dynamometru vyhovuje pouze pro měření ustálených stavů či přechodových jevů s velkou časovou konstantou. [4]

- ***Výpočet z rozběhové charakteristiky***

Při rozběhu asynchronního motoru se pomocí stejnosměrného generátoru na hřídeli měřeného stroje zaznamenávají otáčky rotoru v čase. Metoda je založena na principu, že moment motoru se při rozběhu spotřebuje na krytí ztrát třením, ventilací a zrychlení rotačních částí.

Při zanedbání mechanických ztrát lze ze změřené závislosti otáček na čase dopočítat momentovou charakteristiku a záběrný moment. Tato metoda popsaná v literatuře [16] se dnes s výhodou realizuje v upravené podobě digitálními snímači otáček.

Reakci rotoru lze rovněž zaznamenat piezoelektrickými snímači umístěnými pod patkami stroje. Stroj lze také vybavit pomocnými cívkami umístěnými do statorového magnetického obvodu, které snímají magnetický tok. Vnitřní tzv. elektromagnetický moment lze pak stanovit z indukovaného napětí těchto cívek a z velikostí fázových proudů. Při zadané torzní tuhosti jednotlivých částí hřídele je možné na obou částech hřídele umístit inkrementální čidlo a změřit torzní zkrut hřídele, ze kterého se moment stroje vypočítá. [4]

3 Záběrný moment konkrétního motoru

V praktické části této bakalářské práce je zpracováno provedené měření záběrného momentu konkrétního asynchronního motoru, výpočet jeho parametrů z měření naprázdno a nakrátko a porovnání vypočteného teoretického elektromagnetického momentu a skutečně naměřeného záběrného momentu daného asynchronního motoru.

3.1 Měření záběrného momentu

Závislost rozběhového momentu asynchronního motoru na velikosti napájecího napětí byla měřena v laboratoři katedry elektromechaniky a výkonové elektroniky vybavené transformátorem s regulovatelným výstupním napětím, který byl použit pro získání různých hodnot napájecího napětí. Měřený motor byl napájen sníženým napětím, aby záběrný moment nepoškodil měřící člen torzního dynamometru na hřídeli mezi měřeným motorem a nenabuzeným stejnosměrným strojem. Elektrický signál z dynamometru i signál z proudové (napěťové) sondy byl snímán digitálním osciloskopem a záznam z tohoto přístroje ve formátu CSV byl následně analyzován v prostředí MATLAB.

Byla provedena měření záběrného momentu při symetrickém i nesymetrickém napájení.

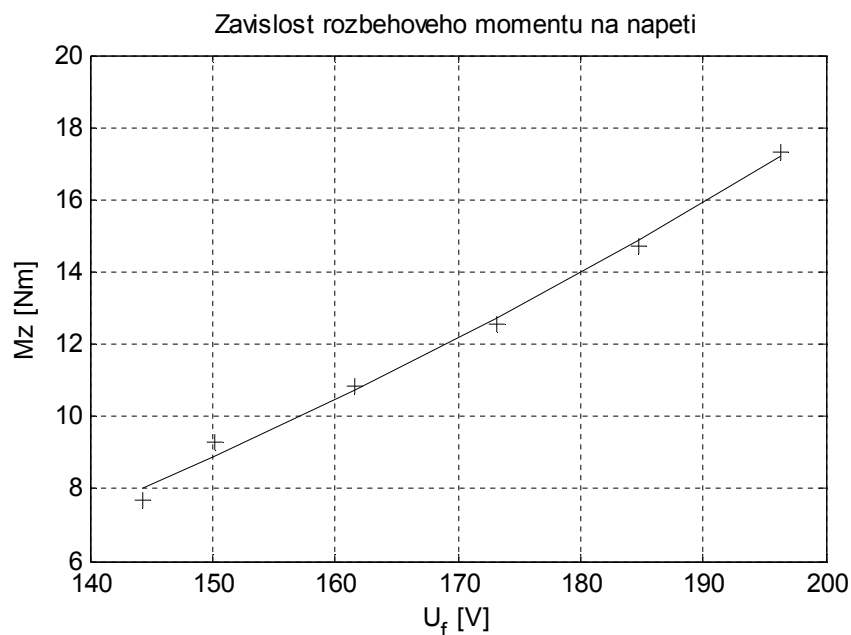
3.1.1 Při symetrickém napájecím napětí

Při symetrickém napájení bylo provedeno šest měření při šesti různých snížených napětích. Hodnota sdruženého napětí byla odečtena z měřícího přístroje až po poklesu vlivem průchodu záběrného proudu statorovým odporem. Střední hodnoty záběrného momentu měřeného AM jsou vypsány v tabulce 3.1.

Tab. 3.1 Střední hodnoty naměřeného záběrného momentu AM při různých napětích

U_s [V]	250	260	280	300	320	340
M_z naměřený [Nm]	7,678	9,317	10,849	12,556	14,727	17,322

Střední hodnota záběrného momentu každého dílčího měření byla v závislosti na napájecím napětí zobrazena v grafu na Obr. 3.1.



Obr. 3.1 Závislost záběrného momentu na napětí

Naměřené hodnoty proložené polynomem druhého řádu potvrzují kvadratickou závislost momentu asynchronního motoru na velikosti napájecího napětí odvozenou v kapitole 2.

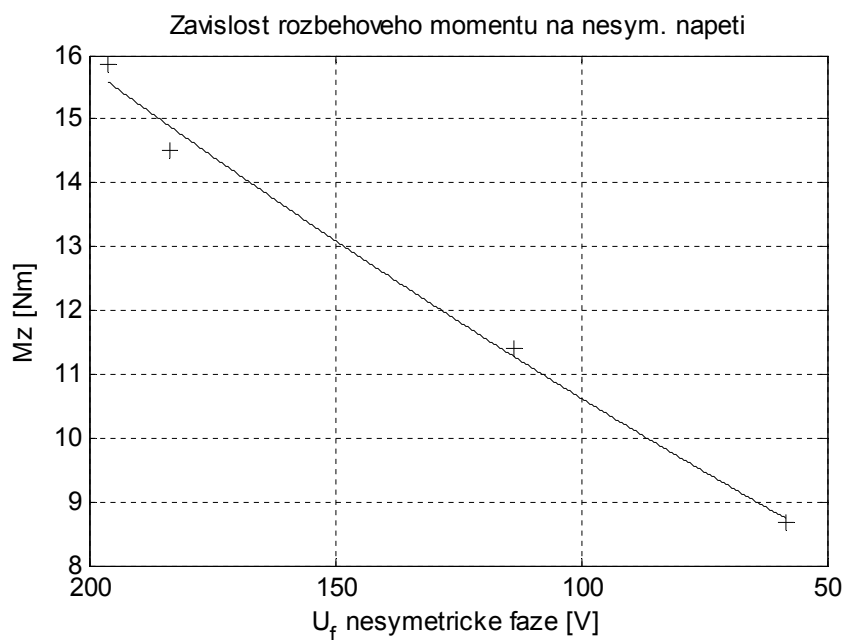
3.1.2 Při nesymetrickém napájecím napětí

Nesymetrického napájecího napětí bylo dosaženo zapojováním různých rezistorů do série s napájecí fází L_1 a jednou fází statorového vinutí zapojeného do hvězdy. Průchodem záběrného proudu rezistorem na něm vzniká úbytek napětí a na jednu fází statorového vinutí je tak přivedeno nižší napětí označené v tabulce jako $U_{f,nesym}$.

Tab. 3.II Střední hodnoty záběrného momentu AM při různých nesymetrických napětích

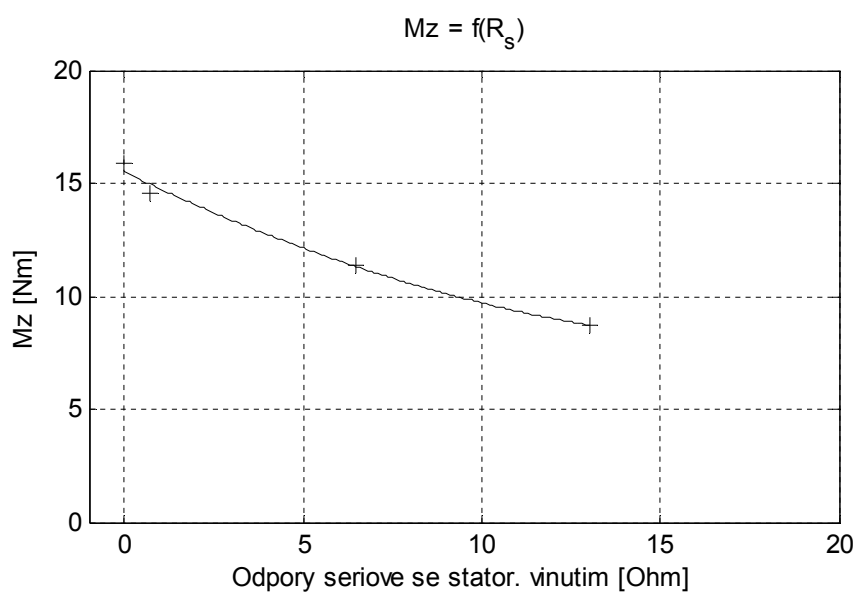
U_s [V] neovlivněných fází	340			
Odpor v nesym. fázi [Ω]	0	0,7	6,5	13
$U_{f,nesym}$ [V]	196,299	183,628	113,568	58,413
M_z [Nm]	15,867	14,517	11,394	8,689

Změřená závislost záběrného momentu na velikosti sníženého napětí v jedné fázi statoru byla graficky znázorněna na Obr. 3.2.



Obr. 3.2 Závislost záběrného momentu na napětí nesymetrické fáze

Je patrné, že nesymetrie v jedné fázi snižuje záběrný moment stroje a prodlužuje dobu rozběhu. Závislost rozběhového momentu na velikosti odporu v jedné fázi statorového vinutí je zobrazena na Obr. 3.3.



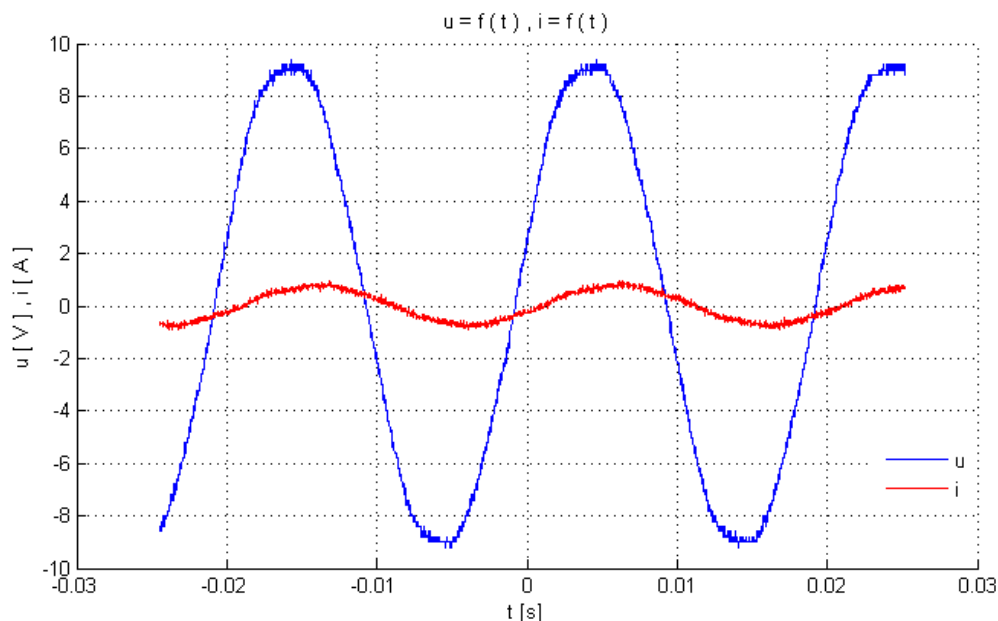
Obr. 3.3 Závislost záběrného momentu na odporu sériově s nesymetrickou fází

Na průbězích momentu v čase (viz příloha 2) je také patrný vznik oscilačního momentu, který roste s nesymetrií napájecího napětí.

3.2 Určení parametrů pro simulaci

Z měření naprázdno na nezatíženém stroji byly po odeznění přechodových jevů získány hodnoty zapsané v tabulce 3.III, ze kterých byly vypočteny ztráty naprázdno ΔP_0 .

Průběh naměřených okamžitých hodnot fázového napětí a proudu asynchronního motoru při sníženém napětí je znázorněn na Obr. 3.4. Z těchto hodnot se následně dopočítají hodnoty pro nominální napájecí napětí.



Obr. 3.4 Okamžité fázové hodnoty napětí a proudu AM při sníženém napětí

Tab. 3. III Naměřené a vypočtené hodnoty při sníženém napětí

	$I_0 [A]$	$U_0 [V]$	$\varphi_0 [^\circ]$	$\cos(\varphi_0)$	$\Delta P_0 [W]$
při sníženém napětí	0,6647	6,65	29,7	0,8686	11,52
pro nominální napětí	2,206	220,62	66,72	0,3952	577,05

Pro ztráty naprázdno platí

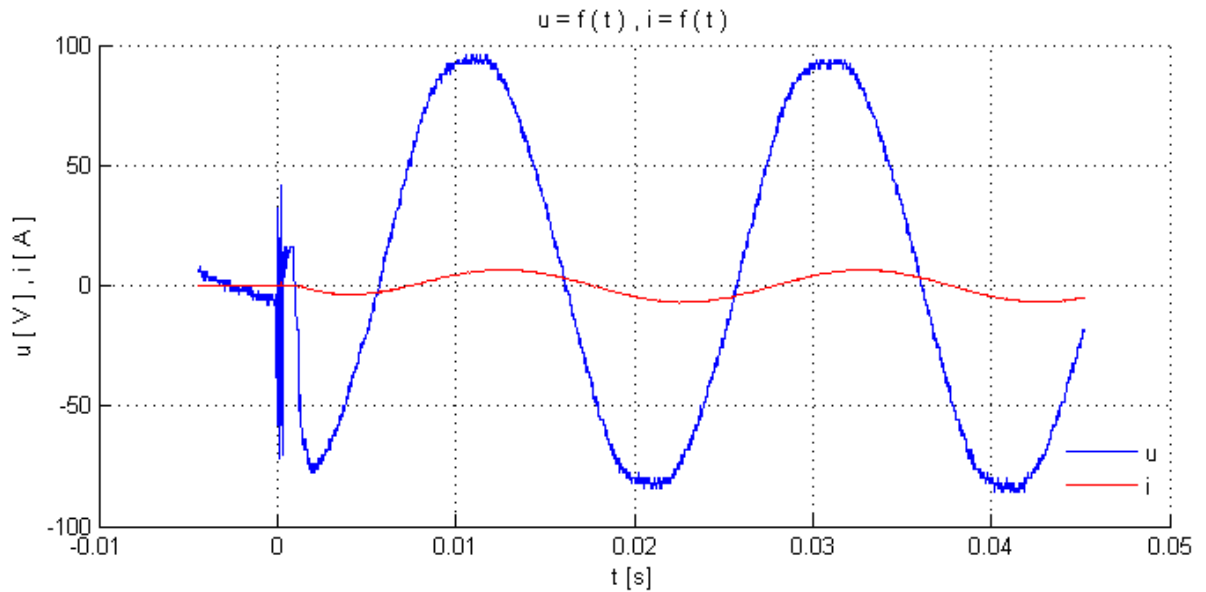
$$\Delta P_0 = 3U_0 I_0 \cos(\varphi_0) [W]. \quad (3.1)$$

Po dosazení hodnot pro snížené napětí

$$\Delta P_0 = 3 \cdot 6,65 \cdot 0,665 \cdot 0,86 [W]$$

$$\Delta P_0 = 11,52 W.$$

Pro zjištění ztrát nakrátko byla hřídel rotoru zablokována a při sníženém napětí byly změřeny fázové hodnoty napětí a proudu nakrátko.



Obr. 3.5 Okamžité hodnoty fázového napětí a proudu nakrátko při sníženém napětí

Tab. 3.IV Naměřené a vypočtené hodnoty pro AM nakrátko při sníženém napětí

$I_k [A]$	$U_k [V]$	$\varphi_k [^\circ]$	$\cos_k(\varphi)$	$\Delta P_k [W]$
4,925	67,88	32,4	0,8443	845,77

Ztráty nakrátko při sníženém napětí se vypočítají následovně:

$$\Delta P_k = 3U_k I_k \cos(\varphi_k) [W] \quad (3.2)$$

$$\Delta P_k = 3 \cdot 67,88 \cdot 4,925 \cdot 0,8443 [W]$$

$$\Delta P_k = 845,77 W [W]$$

Reálná složka proudu nakrátko při sníženém napětí vychází

$$I_k \cdot \cos(\varphi_k) = \frac{\Delta P_k}{3U_k} = \frac{845,77}{3 \cdot 67,88} = 4,1533 A. \quad (3.3)$$

Imaginární složka proudu nakrátko při sníženém napětí je

$$I_k \cdot \sin(\varphi_k) = \sqrt{I_k^2 - (I_k \cdot \cos(\varphi_k))^2} = \sqrt{4,925^2 - 4,1533^2} = 2,6469 A. \quad (3.4)$$

Vypočítané hodnoty pro snížené napětí se musí přepočítat na fázové napětí 220 V.

$$I_{KN} = (4,1533 - 2,6469j) \cdot \frac{220}{67,88} = 13,4608 - 8,5786j A \quad (3.5)$$

Celková impedance z měření nakrátko vychází

$$Z_k = R_k + jX_{\sigma k} = \frac{U_f}{I_{KN}} = \frac{220}{13,4608 - 8,5786j} = 11,6230 + 7,4074j \Omega. \quad (3.6)$$

$$X_{\sigma k} = 7,4074 \Omega = X_{1\sigma} + X'_{\sigma 2} [\Omega] \quad (3.7)$$

$$X_{1\sigma} = X'_{\sigma 2} = 3,7037 \Omega \quad (3.8)$$

$$R_k = R_1 + \frac{R_2'}{s} \quad [\Omega] \quad (3.9)$$

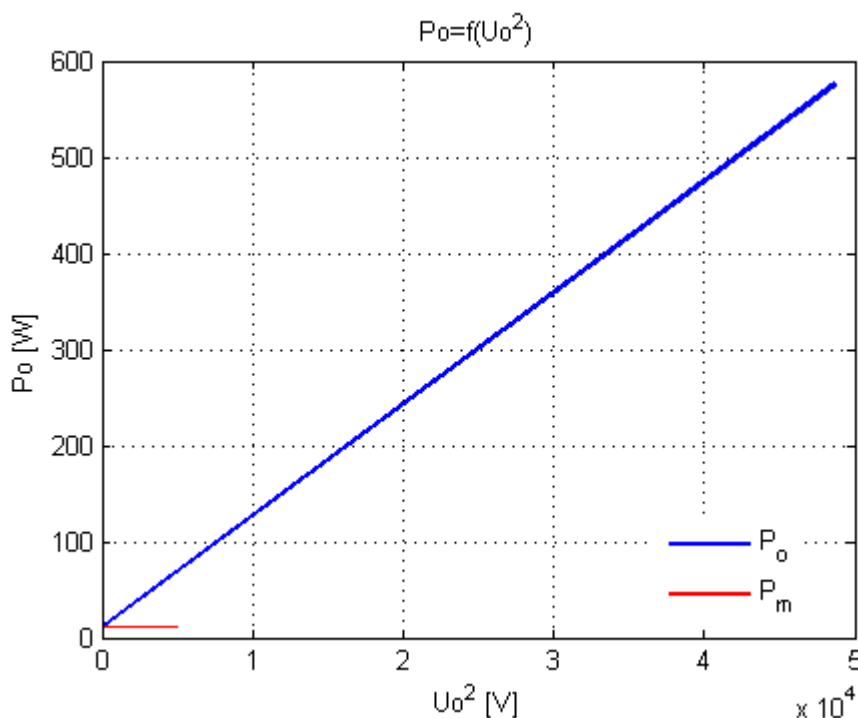
Pro odpor statorového vinutí platí

$$R_1 = \frac{R_2'}{s} = 5,8115 \quad \Omega. \quad (3.10)$$

Změřené ztráty naprázdno jsou součtem ztrát Jouleových, ztrát v železe a mechanických ztrát.

$$\Delta P_0 = \Delta P_{j0} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_m \quad [W] \quad (3.11)$$

Mechanické ztráty byly určeny graficky znázorněním ztrát naprázdno v kvadratické stupnici napětí, čímž se kvadratická závislost ztrát naprázdno na napětí zobrazí jako přímka. Extrapolací do nulového napětí byla zjištěna hodnota mechanických ztrát jako průsečík přímky ztrát naprázdno a horizontální přímky vedené od nulového napětí v grafu na *Obr. 3.6*.



Obr. 3.6 Určení mechanických ztrát

Hodnota mechanických ztrát byla určena $\Delta P_m = 11 \text{ W}$. Pro hodnoty $I_0 = 2,206 \text{ A}$, $\Delta P_0 = 577,05 \text{ W}$ a $R_1 = 5,8115 \Omega$ platí pro ztráty ve vinutí statoru

$$\Delta P_{j0} = 3 \cdot R_1 \cdot I_0^2 = 3 \cdot 5,8115 \cdot 2,206^2 = 84,8439 \text{ W} \quad (3.12)$$

Ztráty v železe jsou vypočteny ze vztahu

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_0 - \Delta P_{j0} - \Delta P_m \quad [W] \quad (3.13)$$

$$\Delta P_{Fe} = 577,05 - 84,8439 - 11 = 481,2061 \text{ W} \quad (3.14)$$

Reálná složka proudu naprázdno pak vychází

$$I_{Fe+mech} = I_0 \cos(\varphi_0) = 2,206 \cdot 0,3952 = 0,8718 \text{ A} . \quad (3.15)$$

Obdobným způsobem je spočtena imaginární složka proudu naprázdno.

$$I_{\mu} = I_0 \sin(\varphi_0) = 2,206 \cdot 0,9186 = 2,026 \text{ A} \quad (3.16)$$

Proud naprázdno složením reálné a imaginární složky je vyjádřen

$$I_0 = 0,8718 - 2,026j \text{ A} . \quad (3.17)$$

Pro výpočet magnetizační reaktance a odporu respektující ztráty v železe a mechanické ztráty je místo svorkového napětí použito vnitřní indukované napětí.

$$U_{if} = 220 - X_{\sigma 1} \cdot I_0 = 211,8296 \text{ V} . \quad (3.18)$$

Magnetizační reaktance pak vychází

$$X_{\mu} = \frac{U_{if}}{I_{\mu}} = \frac{211,8296}{2,0264} = 104,5349 \text{ } \Omega . \quad (3.19)$$

Odpor respektující ztráty v železe a mechanické ztráty je vypočítán

$$R_{Fe+mech} = \frac{U_{if}}{I_{Fe+mech}} = \frac{211,8296}{0,8718} = 242,9796 \text{ } \Omega . \quad (3.20)$$

Vypočítaná hodnota odporu se následně rozdělí na jednotlivé části

$$I_{Fe} = \frac{\Delta P_{Fe}}{3U_f} = \frac{481,2061}{3 \cdot 220} = 0,7291 \text{ A} \quad (3.21)$$

$$R_{Fe} = \frac{U_f}{I_{Fe}} = \frac{220}{0,7291} = 301,7419 \text{ } \Omega \quad (3.22)$$

Odpor R_{mech} se určí z rozdílu proudů

$$I_{mech} = 0,8718 - 0,7291 = 0,1427 \text{ A}; \quad (3.23)$$

$$R_{mech} = \frac{U_f}{I_{mech}} = \frac{220}{0,1427} = 1541,69 \text{ } \Omega . \quad (3.24)$$

Výše uvedeným postupem se získají parametry konkrétního asynchronního motoru pro výpočet elektromagnetického záběrného momentu. Analyzovaný motor měl statorová vinutí zapojena do hvězdy. Přehled získaných parametrů je zpracován v tabulce 3.V na další straně.

Tab. 3.V Přehled zjištěných parametrů konkrétního motoru

veličina	značení	hodnota	jednotky
počet fází	m	3	-
počet pólů	2p	4	-
jmenovité Usdruž	U_n	380	V
kmitočet	f	50	Hz
statorový odpor vinutí	R_1	5,8115	Ohm
statorový rozptyl	$X_{1\sigma}$	3,7037	Ohm
rotorový odpor / skluz	R_2/s	5,8115	Ohm
rotorový rozptyl přepočten	$X_{2\sigma}$	3,7037	Ohm
magnetizační reaktance	X_μ	104,5349	Ohm
R ztráty Fe	R_{Fe}	301,7419	Ohm
mechanické ztráty	ΔP_m	11	W

3.3 Simulace v prostředí MATLAB

Výpočet vnitřního elektromagnetického momentu se provádí v prostředí MATLAB následujícím postupem. Předpokladem pro výpočet je skluz roven jedné. Je uveden příklad výpočtu pro snížené sdružené napětí 300 V.

$$U_{1f} = \frac{300}{\sqrt{3}} = 173,205 \text{ V} \quad (3.25)$$

$$\omega_s = \frac{2\pi f_1}{p} = \frac{2\pi \cdot 50}{2} = 157 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.26)$$

$$Z_{ab} = \frac{1}{\frac{1}{R_{Fe}} + \frac{1}{jX_\mu} + \frac{1}{R_2' + jX_{\sigma 2}'}} = \frac{1}{\frac{1}{301,7419} + \frac{1}{104,5349j} + \frac{1}{5,8115 + 3,7037j}} =$$

$$= 5,3569 + 3,7317j \Omega \quad (3.27)$$

$$Z_1 = R_1 + jX_{\sigma 1} + Z_{ab} = 5,8115 + 3,7037j + 5,3569 + 3,7317j =$$

$$= 11,1684 + 7,4354j \Omega \quad (3.28)$$

Statorový proud se vypočte

$$I_1 = \frac{U_{1f}}{Z_1} = \frac{173,205}{11,1684 + 7,4354j} = 10,7457 - 7,1540j \text{ A} \quad (3.29)$$

$$U_i = \frac{|Z_{ab}|}{|Z_1|} U_{f1} = \frac{6,5285}{13,4171} \cdot 173,205 = 84,2782 \text{ V} \quad (3.30)$$

$$I_2' = \frac{U_i}{\sqrt{(R_2')^2 + (X_{\sigma 2}')^2}} = \frac{84,2782}{\sqrt{5,8115^2 + 3,7037^2}} = 12,2295 \text{ A} \quad (3.31)$$

Záběrný moment při skluzu 1 ve variantě respektující vliv příčné větve náhradního schématu se rovná:

$$M_z = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{R_2'}{1} \cdot I_2^2 = \frac{3}{157} \cdot 5,8115 \cdot 12,2295^2 = 16,6084 \text{ Nm}$$

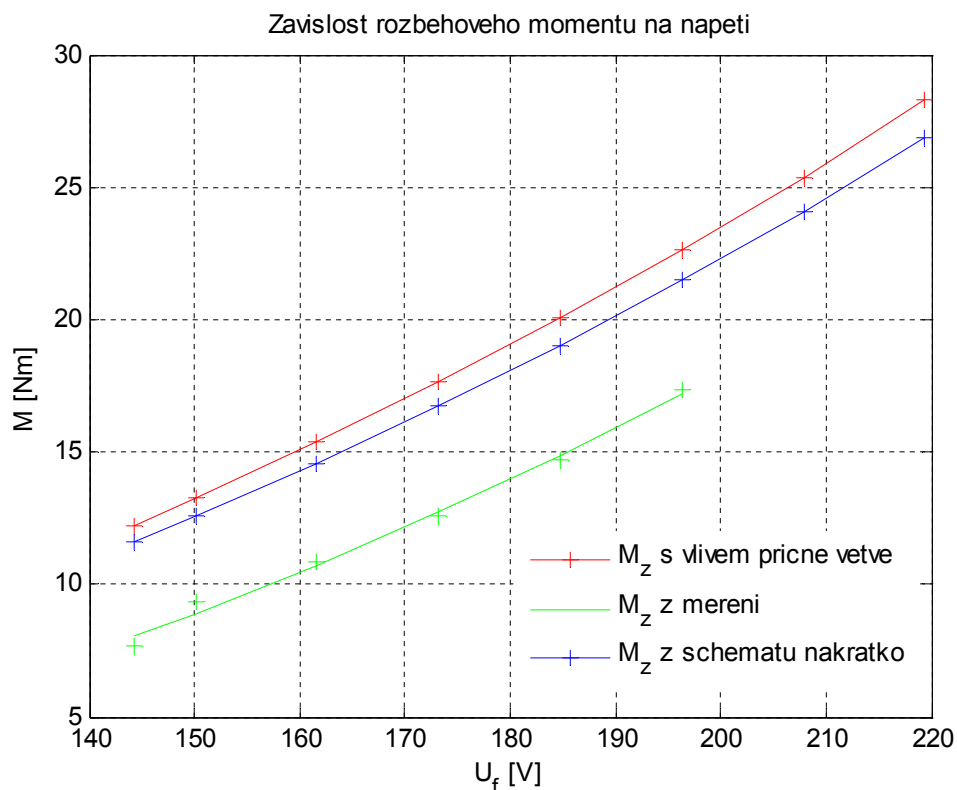
Výpočet činitele rozptylu:

$$c_1 = 1 + \frac{R_1 + jX_{\sigma 1}}{1} = 1 + \frac{5,8115 + 3,7037j}{\frac{1}{\frac{1}{R_{Fe}} + \frac{1}{jX_{\mu}}}} = 1,0554 \angle -2,3390^\circ$$

Záběrný moment vypočtený ze zjištěných parametrů

$$M_z = \frac{3R_2'}{\omega_1} \cdot \frac{U_1^2}{(R_1 + c_1R_2')^2 + (X_{\sigma 1} + c_1X_{\sigma 2})^2} = \frac{3 \cdot 5,8115}{157} \cdot \frac{173,205^2}{(5,8115 + 1,0554 \cdot 5,8115)^2 + (3,7037 + 1,0554 \cdot 3,7037)^2} = 16,6046 \text{ Nm}$$

Naměřené hodnoty záběrného momentu při symetrickém napájení i výsledek simulace byly vyneseny graficky na Obr. 3.7.



Obr. 3.7 Naměřené a vypočtené záběrné momenty AM

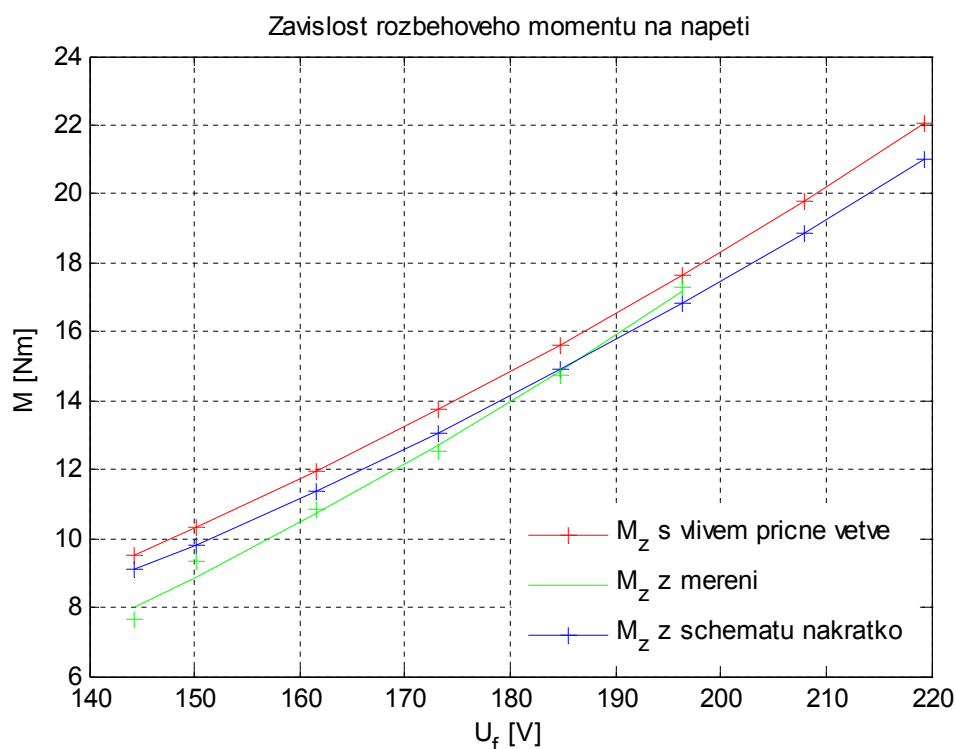
Pro zpřesnění parametrů AM tak, aby vypočítané hodnoty lépe korespondovaly s naměřenými, byly experimentálně upravovány poměry mezi satorovými a rotorovými

odporů a reaktancemi. Původní podíl 1:1 byl změněn na 39:61 u odporů a 34:66 u reaktancí. Výsledné hodnoty parametrů jsou uvedeny v tabulce VI.

Tab. 3.VI Přehled zjištěných parametrů konkrétního motoru po korekci

veličina	značení	hodnota	jednotky
počet fází	m	3	-
počet pólů	2p	4	-
jmenovité sdružené napětí	U_n	380	V
kmitočet	f	50	Hz
statorový odpor vinutí	R_1	7,0848	Ohm
statorový rozptyl	$X_{1\sigma}$	4,8889	Ohm
rot odpor / skluz	R_2/s	5,8115	Ohm
rotorový rozptyl přepočten	$X_{2\sigma}$	2,5185	Ohm
magnetizační reaktance	X_μ	139,5185	Ohm
R ztráty Fe	R_{Fe}	301,7419	Ohm
mechanické ztráty	ΔP_m	11	W

Výsledky simulace rozběhového momentu v závislosti na napájecím napětí a skutečně naměřené hodnoty jsou vyobrazeny na Obr. 3.8.



Obr. 3.8 Naměřené a vypočtené záběrné momenty AM po korekci parametrů náhradního schématu

Na Obr. 3.8 je červeně vyznačen průběh záběrného momentu získaného z rovnice (2.12), který respektuje vliv příčné větve náhradního schématu. Zelený průběh zobrazuje změřené záběrné momenty pro vyznačená napětí a modrá křivka reprezentuje hodnoty záběrného momentu spočítaného podle vztahu (2.11), který zanedbává vliv R_{Fe} a jX_μ na proud v rotoru.

Z grafu na *Obr. 3.8* vyplývá, že pro potřeby výpočtu záběrného momentu AM je vhodnější vycházet ze schématu nakrátko a uvažovat činitel rozptylu. Obdobný motor SIEMENS má dle výňatku z katalogu $M_z = 24,4 Nm$ pro nominální napětí. [18] To přibližně odpovídá zde zjištěným parametrům.

Závěr

Tato bakalářská práce se zaměřila na měření asynchronního motoru v závislosti na velikosti napájecího napětí a experimentálně byl zjištěn i pokles záběrného momentu vlivem nesymetrického napájení. Motor byl měřen pouze do napětí 340 V, aby se vysokým záběrovým momentem nezničil torzní dynamometr, který spojoval hřídel měřeného motoru a nenabuzený stejnosměrný stroj (viz příloha 2). Interval napětí, na kterých mohl být záběrný moment měřen, byl omezen shora kvůli bezpečnosti měřeného napětí a zároveň byl omezen zdola minimálním momentem potřebným pro rozběh soustrojí.

Dalším z cílů této bakalářské práce bylo zjištění parametrů náhradního schématu asynchronního motoru a následné provedení simulace závislosti rozběhového momentu na velikosti napájecího napětí. Z měření naprázdno a nakrátko byly v kapitole 3 vypočteny parametry náhradního schématu AM. Tím, že výpočet parametrů je získáván z několika měření a je použito rozdělení statorových a odporových reaktancí v poměru 1:1, je bez následné korekce zatížen větší nepřesností než provedená měření záběrného momentu. Proto byly pro korekci získaných parametrů asynchronního motoru jako referenční hodnoty vzaty naměřené momenty v závislosti na napájecím napětí, u kterých byl největším faktorem nepřesnosti odečet hodnoty napájecího napětí z voltmetru transformátoru po poklesu při připojení motoru k síti. Přesnějšího rozdělení statorových a rotorových odporů a reaktancí bylo dosaženo experimentálním nastavováním jejich poměrů tak, aby se průběh vypočítaného a naměřeného záběrného momentu v závislosti na napětí lišil co nejméně. Výpočet parametrů AM respektující tyto úpravy je zpracován v prostředí MATLAB a příslušný skript M-File je uveden v příloze 4.

Poměrně problematické bylo posouzení získaných hodnot, protože neexistují přesné referenční hodnoty pro tento konkrétní měřený motor. K porovnání s reálně existujícími motory byly použity parametry sériově vyráběného asynchronního motoru SIEMENS, který se svou konstrukcí, výkonem i nominálními otáčkami nejvíce přibližuje měřeného motoru.

Nesymetrického napájení bylo dosaženo zapojováním rezistorů sériově s jednou fází statorového vinutí zapojeného do hvězdy. Při měření vlivu nesymetrického napětí na záběrný moment byl limitujícím faktorem výběr vhodných rezistorů. Z měření vyplývá, že se zvyšujícím se úbytkem napětí na takto zapojeném rezistoru klesá záběrný moment, prodlužuje se celková doba rozběhu a narůstají vibrace motoru, způsobené netočivými složkami magnetického pole, což je patrné na záznamu z dynamometru v příloze 2.

Z porovnání měřeného motoru s obdobným komerčně vyráběným motorem vyplývá, že naměřené a vypočtené hodnoty jsou v podstatě adekvátní a použitá metoda výpočtu je tudíž vyhovující a použitelná pro zpracovávání obdobné problematiky i u dalších motorů. Toto zjištění je spolu s ověřením kvadratické závislosti záběrného momentu AM na napájecím napětí a vlivu nesymetrie v jedné fázi statorového vinutí hlavním přínosem této bakalářské práce.

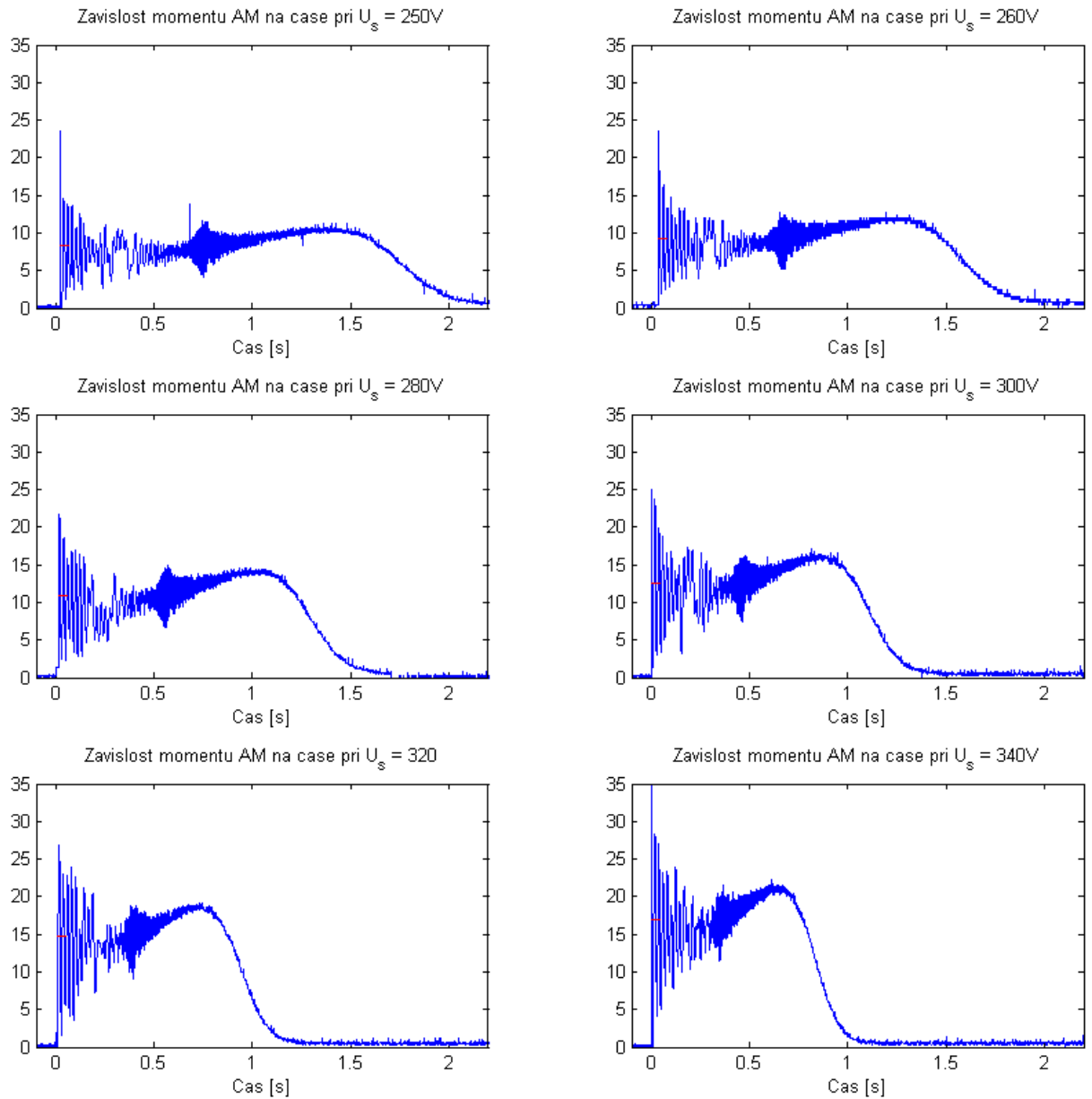
Seznam literatury a informačních zdrojů

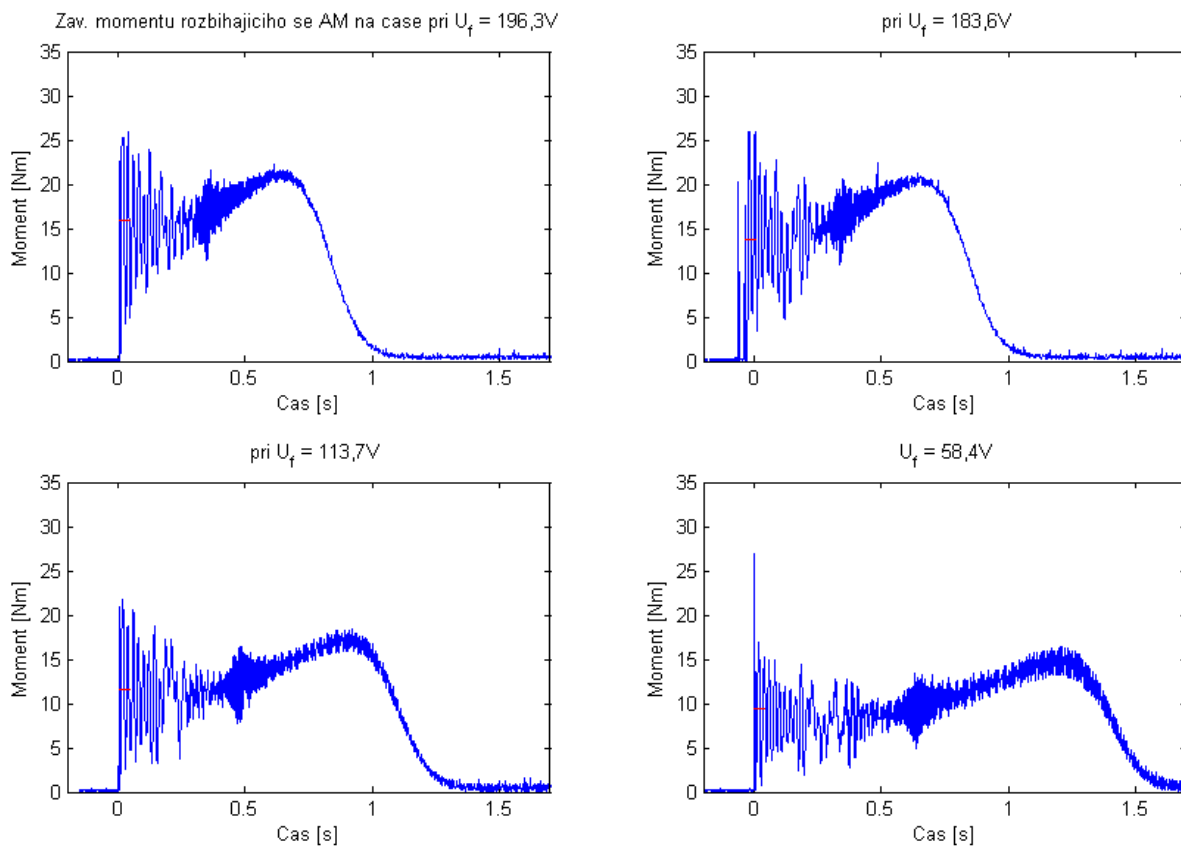
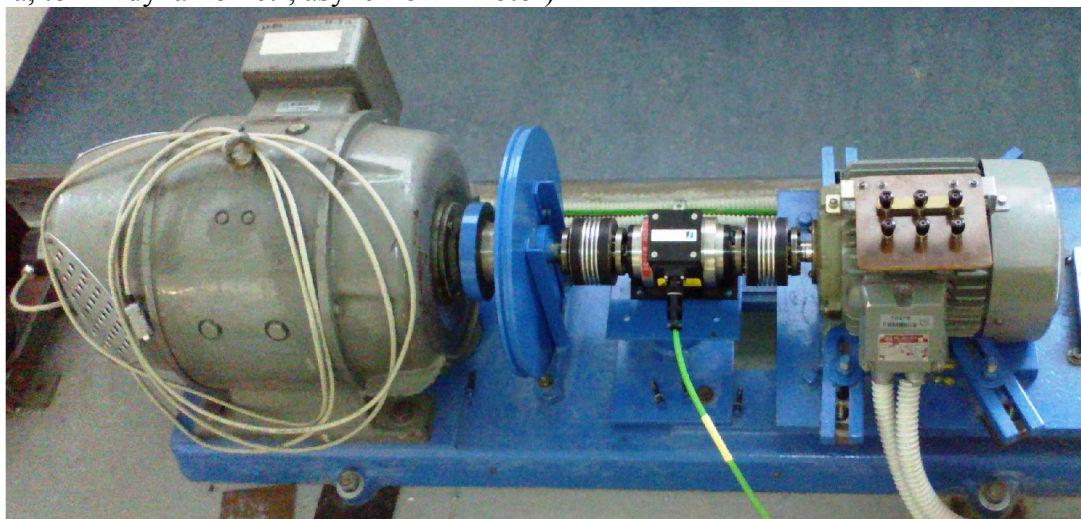
- [1] ALGER, P. L., ARNOLD, R. E. The history of induction motors in America. *Proceedings of the IEEE*. roč. 64, č. 9, s. 1380-1383. ISSN 0018-9219. DOI: 10.1109/PROC.1976.10329. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1454598>
- [2] KOČMAN, K., HOLBA, J., IHLÁR, A., MRAVEC, R. *Elektrické stroje a přístroje I*. Praha: SNTL, 1990. 424 s.
- [3] SUCHÁNEK, V. *Silnoproudá elektrotechnika v automatizaci*. 3. vyd. Praha: SNTL, 1982. 336 s.
- [4] BARTOŠ, V., SKALA, B. *Měření na elektrických strojích*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002. 109 s. ISBN 80-7082-896-X.
- [5] BARTOŠ, V. *Teorie elektrických strojů*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. 230 s. ISBN 80-7043-509-7.
- [6] VOŽENÍLEK, L. *Kurs elektrotechniky*. 2. přeprac. vyd. Praha: SNTL, 1988. 367 s.
- [7] Učební text ČVUT. [online]. [cit. 2012-12-01]. Dostupné z: http://motor.feld.cvut.cz/www/materialy/A5M14RPI/Vytahy_a_el_pohony_II.pdf
- [8] BAŠTA, J., CHLÁDEK, J., MAYER, I. *Teorie elektrických strojů*, Praha: SNTL/ALFA, 1968
- [9] ROUBÍČEK, O. *Elektrické motory a pohony*. 1. vyd. Praha: BEN-technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-092-X.
- [10] TRINKEWITZ, Z. *Průmyslové zkoušky velkých elektrických strojů točivých*. Praha: SNTL, 1981. 400 s.
- [11] PETROV, GEORGIJ N. *Elektrické stroje 2: asynchronní stroje - synchronní stroje*. 1. vyd. Praha: Academia, 1982. 728 s.
- [12] ZEHNULA, K. *Snímače neelektrických veličin*. 2. uprav. vyd. Praha: SNTL 1983, 371 s.
- [13] PAVELKOVÁ, N. Moderní pohony s asynchronními motory a měniči frekvence. *Automa: časopis pro automatizační techniku* [online]. Praha: FCC Public, 2010, č. 5, s. 5 [cit. 2013-03-08]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/41060.pdf>
- [14] HRUBANT, L., HRUBANT J.. Odporové tenzometry z pohledu využití v automatizovaných soustavách. *Automa: časopis pro automatizační techniku* [online]. Praha: FCC Public, 2004, č. 7, s. 5 [cit. 2013-03-08]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/au070427.pdf>

-
- [15] MAJDA, F. Jmenovitý a skutečný výkon asynchronního motoru versus řešení přívodu. *Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku* [online]. Praha: FCC PUBLIC s. r. o., 2009, č. 8, s. 3 [cit. 2013-03-10]. ISSN 1210-0889. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/39461.pdf>
- [16] ATKINSON, C. R., DOWIE, E. G. The Acceleration-Oscillogram Method of Motor-Torque Measurement. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*. 1942, vol. 61, issue 1, s. 7-9. DOI: 10.1109/T-AIEE.1942.5058422. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5058422>
- [17] SKALA, B. Rotační akcelerometr – cesta k měření rychlých kmitů a točivého momentu. *Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku* [online]. Praha: FCC PUBLIC s. r. o., 2004, č. 2, [cit. 2013-05-10]. ISSN 1210-0889. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25703
- [18] Siemens, s.r.o. *Katalog K02-0811 CZ*

Přílohy

Příloha 1: Naměřené hodnoty momentu AM při rozběhu za různých napětí (symetrické napájení)



Příloha 2: Naměřené hodnoty momentu AM při rozběhu za různých napětí (nesymetrické napájení)**Příloha 3: Měřené soustrojí s asynchronním motorem (zleva nenabuzený stejnosměrný motor, spojka, torzní dynamometr, asynchronní motor)**

Příloha 4: Výpočet parametrů AM, simulace a zpracování naměřených záběrných momentů v závislosti na velikosti napájecího napětí v prostředí MATLAB

```

clear;clc;pocet=40;
Matice1=csvread ('TEK0000.csv'); %250V
t1=Matice1( : , [4]);y1=Matice1 ( : , [5]);
for l=1:2482
    if y1(l)>2.6
        y1(l)=y1(l-1);end
    if y1(l)<-0.5
        y1(l)=y1(l-1) ;end; end
Matice2=csvread ('TEK0003.csv'); %260V
t2=Matice2( : , [4]);y2=Matice2( : , [5]);
for l=1:2482
    if y2(l)>2.6
        y2(l)=y2(l-1);end
    if y2(l)<-0.5
        y2(l)=y2(l-1);end; end
Matice3=csvread ('TEK0004.csv'); %280V
t3=Matice3( : , [4]);y3=Matice3( : , [5]);
for l=1:2482
    if y3(l)>2.3
        y3(l)=y3(l-1);end
    if y3(l)<-0.5
        y3(l)=y3(l-1) ;end; end
Matice4=csvread ('TEK0007.csv'); %300V
t4=Matice4( : , [4]);y4=Matice4 ( : , [5]);
for l=1:2482
    if y4(l)>3
        y4(l)=y4(l-1) ;end
    if y4(l)<-0.5
        y4(l)=y4(l-1) ;end; end
Matice5=csvread ('TEK0008.csv'); %320V
t5=Matice5( : , [4]);y5=Matice5 ( : , [5]);
for l=1:2482
    if y5(l)>3.9
        y5(l)=y5(l-1);end
    if y5(l)<-0.5
        y5(l)=y5(l-1);end; end
Matice6=csvread ('TEK0010.csv'); %340V
t6=Matice6( : , [4]);y6=Matice6( : , [5]);
for l=1:2482
    if y6(l)>4.3
        y6(l)=y6(l-1);end
    if y6(l)<-0.5
        y6(l)=y6(l-1);end;end
for l=1:2482
    if y1(l)>0.7
        mom1=y1(l:(pocet+l));cas1=t1(l:(pocet+l));break; end; end
    for l=1:2482
        if y2(l)>0.7
            mom2=y2(l:(pocet+l));cas2=t2(l:(pocet+l)); break; end; end
    for l=1:2482
        if y3(l)>0.7
            mom3=y3(l:(pocet+l));cas3=t3(l:(pocet+l)); break; end; end
    for l=1:2482
        if y4(l)>0.7
            mom4=y4(l:(pocet+l));cas4=t4(l:(pocet+l)); break; end; end
    for l=1:2482
        if y5(l)>0.7
            mom5=y5(l:(pocet+l));cas5=t5(l:(pocet+l)); break;end; end

```

```

for l=1:2482
    if y6(l)>0.7
        mom6=y6(l:(pocet+l));cas6=t6(l:(pocet+l)); break;end; end
moment1=mean (mom1) ; moment2=mean (mom2) ;moment3=mean (mom3) ;
moment4=mean (mom4) ;moment5=mean (mom5) ;moment6=mean (mom6);
Momenty=[moment1 moment2 moment3 moment4 moment5 moment6] ;
% Vykresleni grafu z osciloskopu
figure('Name','Moment v case pri ruznych U_f', 'NumberTitle','off');
subplot (2,3,1); plot (t1,y1);axis ([-0.1 2.2 0 3.5]);axis on;hold on;
plot (cas1,moment1,'r+');hold off;xlabel('Cas [s]');title ('Zav. rozb. momentu na case pri 250V')
subplot (2,3,2); plot (t2,y2);axis ([-0.1 2.2 0 3.5]);axis on;hold on;plot (cas2,moment2,'r+');
hold off;xlabel('Cas [s]');title ('Zav. rozb.o momentu na case pri 260V');
subplot (2,3,3);
plot (t3,y3);axis ([-0.1 2.2 0 3.5]);axis on;hold on;plot (cas3,moment3,'r+');hold off;xlabel('Cas [s]')
title ('Zavislost rozbehoveho momentu na case pri 280V');
subplot (2,3,4);
plot (t4,y4);axis ([-0.1 2.2 0 3.5]);axis on;hold on;plot (cas4,moment4,'r+');hold off;xlabel('Cas [s]')
title ('Zavislost rozbehoveho momentu na case pri 300V')
subplot (2,3,5); plot (t5,y5);axis ([-0.1 2.2 0 3.5]);axis on;hold on;plot (cas5,moment5,'r+');hold off;
xlabel('Cas [s]');title ('Zavislost rozbehoveho momentu na case pri 320V')
subplot (2,3,6); plot (t6,y6);axis ([-0.1 2.2 0 3.5]);axis on;hold on;plot (cas6,moment6,'r+');hold off;
xlabel('Cas [s]');title ('Zavislost rozbehoveho momentu na case pri 340V')
napeti_namer=[250,260,280,300,320,340]; %z V metru po poklesu
napeti_namer_1f=napeti_namer./sqrt(3);moment_namer= Momenty *10
% Vypocet parametru AM
dPm=11; %mech ztraty
Po=577.05; %jmenovity vykon naprazdno
Io=2.206; %jmenovity proud naprazdno
Pk=845.77; %vykon nakratko
Uk=67.88; %napeti pro vykon nakratko zmerene
U1f=220; %fazove jmen. napeti
fi=66.7215; % uhel mezi U a I
lk=4.925; %proud nakratko pri sniz. napeti
f1=50; %frekvence statoru
p=2; %pocet p
IRe=Pk/(3*Uk) ;Imag=1i*sqrt((lk^2)-(IRe^2)) ;lkn=(IRe-Imag)*(U1f/Uk) ;Zk=U1f/lkn ;
R22=(((real(Zk))/100)*39) ; %korekce R a X rotoru a statoru
Xsigma2=(((imag(Zk))/100) *34) ; %rozdeleni statorovych a rotorovych
R1=(((real(Zk))/100)*61); %velicin
Xsigma1=(((imag(Zk))/100) *66) ;
Pl1=3*R1*(Io^2) ;Pfe=Po-Pl1-dPm ;lfe=Io*cos(fi) ;lu=Io*sin(fi) ;Ui_1faz=U1f-(Xsigma1*Io) ;
Xu=Ui_1faz/lu ;Rfe_mech=Ui_1faz/lfe;lfe_1f=Pfe/(3*U1f) ;Rfe=Ui_1faz/lfe_1f ;
%Spocitane parametry
c=abs(1+(R1+Xsigma1*i)/(1/(1/Rfe+1/Xu*i)))/%cinitel rozptylu
U1=[380,360,340,320,300,280,260,250];U1f=U1/(sqrt(3))
Zab=1/((1/Rfe)+(1/(Xu*i)))+(1/(R22+(Xsigma2*i)));Z1=R1+(Xsigma1*i)+Zab;l1=U1f./Z1
Ui=(abs(Zab)./abs(Z1)).*U1f ;l2=Ui./sqrt(R22*R22+Xsigma2*Xsigma2)
ws=(2*pi*f1)/p;Melmag=(3/ws)*(R22)*(l2.*l2)
t=U1f;y=Melmag;Mz=(3*R22/ws)*(U1f.*U1f) /((R1+c*R22).^2 +(Xsigma1+c*Xsigma2).^2)
pol1=polyfit (t,y,2);proloz_y= polyval (pol1,t);pol2=polyfit (napeti_namer_1f,moment_namer,2);
proloz_y2= polyval (pol2,napeti_namer_1f);pol3=polyfit(t,Mz,2);proloz_y3=polyval (pol3,t);
%vykresleni simulovanych a namerenych hodnot
figure('Name','M_z pri ruznych napetich', 'NumberTitle','off');
plot (t,proloz_y,'-r+',napeti_namer_1f,proloz_y2,'-g', t,proloz_y3,'-
b+',napeti_namer_1f,moment_namer,'g+')
hleg1=legend ('M_z z rov.40','M_z mereni','M_z rov. 39');set(hleg1,'Location','NorthEastOutside');
grid on;axis on;xlabel('U_f [V]');ylabel('M [Nm]')
title ('Zavislost rozbehoveho momentu na napeti')

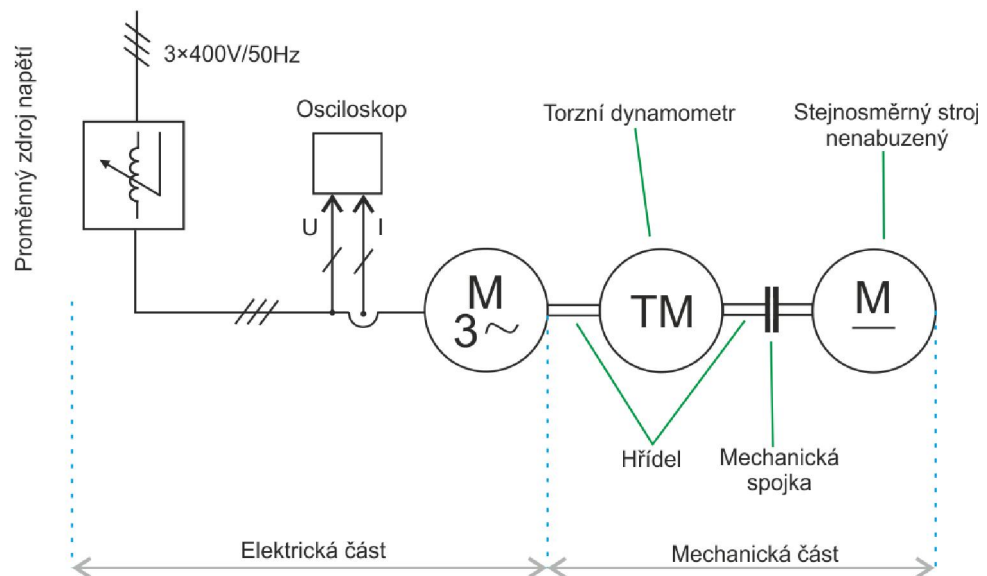
```

Příloha 5: Výňatek z katalogu K02-0811 CZ, Siemens s.r.o [18] (Zvýrazněn stroj konstrukčně blízký měřenému motoru.)

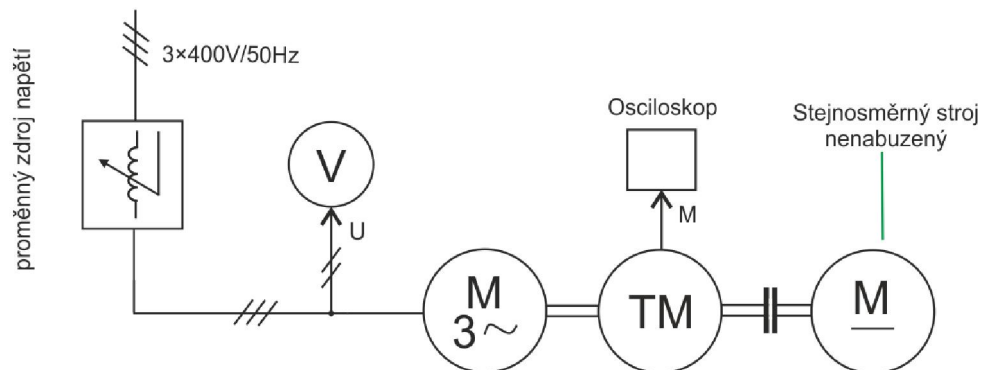
Jmen. výkon	Velikost	Objednáč. číslo	Otáčky	Parametry při jmenovitém výkonu				Poměrný záběrný moment	Poměrný záběrný proud	Poměrný moment zvratu	Momen- tová třída	Momen- tová charak- teris- tika Diagram č.	Moment setrvač- nosti J	Hmot- nost		
				Účinnost		Účinek	Jmenovitý proud při 400 V								Jmenovitý moment	100%
4-pól, 1500 min ⁻¹ , 50Hz																
kW			min ⁻¹	%	%											
0,06	56	1LA7 050-4AB..	1350	56	55	0,77	0,20	0,42	1,9	2,6	1,9	13	12	0,00027	3,0	
0,09	56	1LA7 053-4AB..	1350	58	57	0,77	0,29	0,63	1,9	2,6	1,9	13	12	0,00027	3,0	
0,12	63	1LA7 060-4AB..	1350	55	54	0,75	0,42	0,84	1,9	2,8	2,0	13	12	0,0003	3,5	
0,18	63	1LA7 063-4AB..	1350	60	60	0,77	0,56	1,3	1,9	3,0	1,9	13	12	0,0004	4,1	
0,25	71	1LA7 070-4AB..	1350	60	60	0,79	0,76	1,8	1,9	3,0	1,9	13	12	0,0006	4,8	
0,37	71	1LA7 073-4AB..	1370	65	65	0,80	1,03	2,5	1,9	3,3	2,1	13	12	0,0008	6,0	
0,55	80	1LA7 080-4AA..	1395	67	67	0,82	1,45	3,7	2,2	3,9	2,2	16	3	0,0015	8,0	
0,75	80	1LA7 083-4AA..	1395	72	72	0,81	1,86	5,1	2,3	4,2	2,3	16	3	0,0018	9,4	
1,1	90S	1LA7 090-4AA..	1415	77	77	0,81	2,55	7,4	2,2	4,6	2,4	16	3	0,0028	12,2	
1,5	90L	1LA7 096-4AA..	1420	79	79	0,81	3,4	10,1	2,4	5,3	2,6	16	3	0,0035	15,6	
2,2	100L	1LA7 106-4AA..	1420	82	82,5	0,82	4,7	14,8	2,5	5,6	2,8	16	3	0,0048	21,5	
3	100L	1LA7 107-4AA..	1420	83	83,5	0,82	6,4	20,2	2,7	5,6	3,0	16	3	0,0058	24,5	
4	112M	1LA7 113-4AA..	1440	85	85,5	0,83	8,2	26,5	2,7	6	3,0	16	2	0,011	31,0	
5,5	132S	1LA7 130-4AA..	1455	86	86	0,81	11,4	36,1	2,5	6,3	3,1	16	3	0,018	42,5	
7,5	132M	1LA7 133-4AA..	1455	87	87,5	0,82	15,2	49,2	2,7	6,7	3,2	16	3	0,024	49,0	
11	160M	1LA7 163-4AA..	1460	88,5	89	0,84	21,5	72	2,2	6,2	2,7	16	3	0,040	68,0	
15	160L	1LA7 166-4AA..	1460	90	90,2	0,84	28,5	98,1	2,6	6,5	3,0	16	3	0,052	93,5	

Příloha 6: Použité přístroje a schéma zapojení

Varianta zapojení pro určení parametrů



Varianta zapojení pro měření záběrného momentu



Asynchronní motor AP 90L-4, MEZ Mohelnice

- Y / D - 380 / 230 V
- Y / D - 3,6 / 6,2 A
- 1,5 kW
- 50 Hz
- 1430 ot./min.
- r.v. 1971

Transformátor T 107 (pult D107, laboratoř EK 101)

Stejnosměrný motor TMN 16b, MEZ Brno

Osciloskop Tektronix TDS2024B

Proudová sonda Tektronix A 622

Dynamometr Torquemaster TM 210