

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Záběrný proud asynchronního motoru

**vedoucí práce: Doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.
autor: Jiří Ponert**

2013

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

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

Jméno a příjmení: **Jiří PONERT**
Osobní číslo: **E10B0238P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Záběrný proud asynchronního motoru**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Popište možné způsoby spouštění asynchronních motorů.
2. Popište metody omezení záběrných proudů.
3. Provedte měření záběrných proudů a porovnejte je s proudy stanovenými z charakteristiky nakrátko.
4. Jako v předchozím bodě postupujte i při stanovení účinníku při rozběhu motoru.
5. Shrňte obdržené výsledky a okomentujte je písemně v závěru práce.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

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

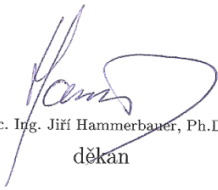
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

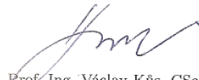
1. Bartoš, V., Skala, B.: Měření na elektrických strojích. Skripta ZČU, Plzeň 2002
2. Trinkewitz, Z.: Průmyslové zkoušky velkých elektrických strojů točivých. SNTL Praha 1987
3. Internet

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




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Anotace

Předmětem této bakalářské práce je popsat jednotlivé druhy spouštění asynchronních motorů a jejich vliv na velikost záběrového proudu, dále změření velikosti záběrného proudu, proudu nakrátko a účinníku.

Cílem této práce je porovnat velikosti záběrného proudu s charakteristikou nakrátko, která vychází z měření nakrátko a totéž porovnání provést pro účinník.

Klíčová slova

Asynchronní motor, stator, rotor, kotva nakrátko, kroužková kotva, vinutí stroje, točivé elektromagnetické pole, indukce, magnetický tok, účinník, autotransformátor, softstartér, frekvenční měnič, záběrový proud, proud nakrátko, skluz, proměnná frekvence, asymetrický spouštěč, charakteristika nakrátko

Starting current of the asynchronous machine

Annotation

The subject of this thesis is to describe the different types of starting of induction motors and their influence on the size of the starting current, in addition to measure the size of the starting current, short-circuit current and power factor.

The aim of this work is to compare the size of the starting current with a short circuit characteristic, which is based on short circuit measurement and to make the same comparison for the power factor.

Key words

Induction motor, stator, rotor, squirrel cage, wound rotor, winding, rotating magnetic field, induction, magnetic flux, power factor, autotransformer, soft starter, frequency converter, starting current, short circuit current, slip, variable frequency, asymmetrical starter, characteristic short

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 23.5.2013

.....
Jméno a příjmení

Poděkování

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

V neposlední řadě je mou milou povinností poděkovat rodičům, kteří mě jak morálně, tak finančně během celého studia podporovali, a všem vyučujícím, kteří se na mém vzdělání na ZČU podíleli.

Obsah

OBSAH.....	8
ÚVOD.....	12
SEZNAM V PRÁCI POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	13
1 ASYNCHRONNÍ MOTOR.....	15
1.1 Rozdělení a charakteristické údaje.....	16
1.2 Konstrukce trojfázového asynchronního motoru s kotvou nakrátko	17
1.3 Konstrukce trojfázového asynchronního motoru s kotvou kroužkovou	19
1.4 Princip indukčního stroje	20
1.5 Náhradní schéma asynchronního motoru.....	23
1.6 Výkonová bilance asynchronního motoru	25
1.7 Asynchronní motor nakrátko.....	27
1.7.1 Vlastnosti.....	27
1.7.2 Princip měření nakrátko	28
2 VLASTNOSTI SPOUŠTĚNÍ (ROZBĚHŮ) TROJFÁZOVÝCH ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ	29
2.1 Všeobecné zásady	30
2.2 Úprava svorkovnice	32
2.3 Základní ukazatele spouštění	33
3 ZPŮSOBY SPOUŠTĚNÍ (ROZBĚHŮ) INDUKČNÍCH MOTORŮ	33
3.1 Spouštění při kterém nedochází ke zmenšení záběrného proudu.....	34
3.1.1 Spouštění přímým připojením k síti	34
3.1.1.1 Realizace přímého připojení k síti	35

3.1.1.2	Vliv přímého připojení k síti na různé druhy zátěže.....	35
3.1.1.3	Příklad provedení současného přímého připojení na síť.....	36
3.1.2	Spouštění rozběhovou spojkou.....	37
3.2	Snížení záběrného proudu při rozběhu.....	38
3.2.1	Sníženým napětím	38
3.2.1.1	Sníženým napětím - spouštění kombinací hvězda / trojúhelník - Y / Δ	38
3.2.1.2	Sníženým napětím - spouštění se statorovým spouštěčem	42
3.2.1.3	Sníženým napětím - autotransfornátorem.....	43
3.2.1.4	Sníženým napětím - Softstartérem.....	43
3.2.2	Spouštění roztáčecím motorem	46
3.3	Snížení záběrného momentu	46
3.3.1	Jemný rozběh s asymetrickým spouštěčem	46
3.3.2	Hrubý rozběh s asymetrickým spouštěčem	47
3.4	Snížení záběrného proudu při rozběhu a zvýšení záběrného momentu	47
3.4.1	Spouštění dvojmotorovým rozběhem.....	47
3.4.2	Spouštění proměnou frekvencí	48
3.4.2.1	Přímý měnič kmitočtu.....	48
3.4.2.2	Nepřímý měnič kmitočtu	49
3.4.2.2.1	Skalární řízení měniče kmitočtu.....	50
3.4.2.2.2	Vektorové řízení.....	53
3.4.3	Spouštění se speciálními klecemi	53
3.4.3.1	Odporová klec.....	53
3.4.3.2	Dvojitá klec.....	54
3.4.3.3	Vírová klec.....	56

3.4.4 Spouštění s vinutou klecí.....	58
4 MĚŘENÍ ZÁBĚRNÝCH PROUDŮ	59
4.1 Schéma zapojení měřeného motoru a popis jednotlivých prvků	59
4.2 Měření č.1.: Měření záběrových proudů	60
4.2.1 Tabulky naměřených hodnot	61
4.2.2 Grafy.....	61
4.2.3 Zpracování hodnot.....	62
4.3 Měření č.2.: Měření nakrátko	63
4.3.1 Tabulky naměřených hodnot	63
4.3.2 Grafy.....	64
4.3.3 Zpracování hodnot.....	64
4.4 Měření č.3.: Měření nakrátko	65
4.4.2 Tabulky naměřených hodnot	65
4.4.2 Grafy.....	66
4.4.3 Zpracování hodnot.....	67
5 SIMULACE ZÁBĚRNÉHO PROUDU	67
5.1 Určení provozních charakteristik	68
6 POROVNÁNÍ MĚŘENÍ ZÁBĚRNÝCH PROUDŮ A SIMULACE	71
7 MĚŘENÍ ÚČINÍKU	72
7.1 Tabulka naměřených hodnot	72
7.2 Grafy	73
7.3 Zpracování hodnot	74
ZÁVĚR	75
SEZNAM POUŽITÉ A CITOVANÉ LITERATURY	77

PŘÍLOHY	1
OBSAH CD	14

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na měření a vyhodnocení záběrného proudu asynchronního motoru. K měření byl použit asynchronní motor o jmen. výkonu 1.5 kW a roku výroby 1971 od firmy MEZ MOHELNICE. Změřená hodnota záběrného proudu při jmenovitém napětí se porovnává se změřenou hodnotou proudu nakrátko taktéž při jmenovitém napětí z charakteristiky nakrátko.

S touto problematikou souvisí rozběhy asynchronních motorů, které jsou zde také popsány.

Text je rozdělen do sedmi částí. V první části je popis obecně asynchronních motorů, jako jsou charakteristické údaje, konstrukce, princip a měření.

Druhá část je zaměřena na rozběhy asynchronních motorů, z hlediska vlastností a obecně důvodů, proč nemůžeme připojit asynchronní motor o daných výkonech přímo na síť. Principy daných druhů rozběhů, které mají různé vlastnosti z hlediska momentu a odebíraného proudu, jsou popsány ve třetí kapitole.

Čtvrtá kapitola je zaměřena na měření proudů, jak záběrových, tak nakrátko. Jsou zde popsány metody měření, s danými průběhy proudů.

V páté kapitole je simulace záběrného proudu. Z naměřených hodnot naprázdno a nakrátko byly spočteny parametry náhradního schématu asynchronního motoru, ze kterých lze určit provozní charakteristiky, například charakteristiku nakrátko atd.

Šestá kapitola se zabývá porovnáním změřených hodnot, a to proudů záběrných při jmenovitém napětí a proudů nakrátko při jmenovitém napětí.

V sedmé kapitole je uvedeno měření pro účinník. Je zde opět popsána metoda měření s vyhodnocením výsledků s odpovídajícími grafy.

Seznam v práci použitých symbolů a zkratk

Symboly

U_1	[V]	napájecí napětí
U_i	[V]	indukované napětí
U_2'	[V]	napětí rotoru přepočítané na stator
U_0	[V]	fázové napětí ve stavu naprázdno
U_k	[V]	fázové napětí ve stavu nakrátko
I_0	[A]	proud naprázdno
I_k	[A]	proud nakrátko
I_{KN}	[A]	jmenovitý proud nakrátko
I_{Fe}	[A]	činná složka proudu naprázdno
I_μ	[A]	magnetizační proud
I_1	[A]	statorový proud
I_z	[A]	záběrný proud
I_2'	[A]	proud rotoru přepočítaný na stator
I_m, I_p	[A]	mezní hranice kolísání proudu při spouštění kroužkového motoru
R_2'	[Ω]	odpor rotoru přepočtený na stator
R_1	[Ω]	odpor vinutí statoru
R_{Fe}	[Ω]	odpor respektující ztráty v železe
R_k	[Ω]	reálná složka Z_k
jX_μ	[Ω]	magnetizační reaktance
$jX_{1\sigma}$	[Ω]	rozptylová reaktance statoru
$jX_{2\sigma}'$	[Ω]	rozptylová reaktance rotoru přepočtená na stator
$X_{\sigma k}$	[Ω]	imaginární složka Z_k
Z_k	[Ω]	celková impedance z měření nakrátko

ΔP_0 [W]	příkon motoru ve stavu naprázdno
ΔP_{j0} [W]	Jouleovy ztráty ve vinutí statoru při chodu naprázdno
ΔP_{Fe} [W]	ztráty v železe
ΔP_m [W]	mechanické ztráty
P_δ [W]	výkon ve vzduchové mezeře
Φ [Wb]	magnetický tok
M [N · m]	moment
M_e [N · m]	elektromagnetický moment
M_m, M_p [N · m]	mezní hranice kolísání momentu při spouštění kroužkového motoru
n [min ⁻¹]	otáčky rotoru
n_s [min ⁻¹]	synchronní otáčky
s [-]	skluz
ω_s [rad · s ⁻¹]	synchronní úhlová rychlost
p [min ⁻¹]	počet pólových dvojic
f_1 [Hz]	frekvence statoru
f_2 [Hz]	rotorová frekvence
k_M [-]	momentový poměr
k_I [-]	proudový poměr
u_Z [V]	průběh napětí přímého měniče napětí na zátěži
p [-]	počet pulzů (u usměřňovačů)
T_1 [s]	doba činnosti usměřňovače I nebo II (u cyklokonvertorů)
N [-]	počet závitů na statoru
B [T]	magnetická indukce
S_{FE} [m ²]	průřez statorového vinutí = konstantní
k_V [-]	činitel statorového vinutí = konstantní
n_1, n_2, n_3	jednotlivé spouštěcí stupně kroužkového motoru

Zkratky

<i>AC</i>	střídavý proud
<i>DC</i>	stejnoseměrný proud
<i>MCU</i>	Motor Control Unit
<i>DOL</i>	Direct On Line
<i>KM1</i>	Síťový stykač
<i>VSD</i>	Variable speed drive
<i>VFD</i>	Variable frequency drive
<i>AM</i>	Asynchronní motor
<i>IGBT</i>	Insulated Gate Bipolar Transistor
<i>GTO</i>	Gate turn-off thyristor

1 Asynchronní motor

Před nástupem střídavých pohonů byl nejvíce používán motor stejnosměrný. Stejnoseměrný motor měl z hlediska regulace dobré vlastnosti a jejich dosažení bylo nejjednodušší. Jeho regulační charakteristiky se nejvíce blížily technologickým požadavkům. Dnes se tyto stroje nahrazují stroji střídavými, odstraňují se tím nevýhody strojů stejnosměrných (konstrukčně složitě, komutátor, kartáče atd.). Indukční pohony jsou dnes řízeny prostřednictvím řídicí elektroniky složené z polovodičových součástí (GTO tyristory, IGBT tranzistory atd.), měničové techniky (střídače, střídavé měniče kmitočtu), regulační techniky atd. Takto řízené indukční stroje mají regulační charakteristiky shodné se stroji stejnosměrnými v plném regulačním rozsahu. [1]

Indukční stroje mají jednoduchou konstrukci, obsluhu, a velkou provozní spolehlivost v širokém rozsahu výkonů, jsou kompaktní a nenáročné na údržbu. Tento druh motoru je nejrozšířenější a nejpoužívanější. Používají se k pohonům čerpadel, ventilátorů, kompresorů, výtahů atd. Provádí se v provedení s kotvou kroužkovou nebo s kotvou nakrátko v širokém rozsahu výkonů (několik wattů až do desítek MW). [2]

1.1 Rozdělení a charakteristické údaje

Indukční stroj může pracovat v režimech:

- a) indukční motor - přeměna el. energie na mechanickou - $\mathbf{M} > 0$, $\mathbf{P} > 0$, ($\omega_s > \omega > 0$), ($0 < s < 1$),
- b) indukční generátor - přeměna mechanické energie na elektrickou - $\mathbf{M} < 0$, $\mathbf{P} < 0$, ($\omega_s < \omega$), ($s < 0$),
- c) indukční brzda - rotor se otáčí proti směru otáčení točivého magnetického pole statoru - $\mathbf{M} > 0$, $\mathbf{P} < 0$, ($\omega < 0$), ($s > 1$),
- d) indukční měnič kmitočtu - proud indukovaný v otáčejícím se rotoru nabývá při různých otáčkách jinou frekvenci [1]

Indukční stroj se dále dělí:

- podle počtu fází statorového vinutí
 - a) jednofázové
 - b) dvojfázové
 - c) trojfázové
- podle provedení rotorového vinutí
 - a) kotva nakrátko (klec)
 - b) kotva kroužková (vinutá) [2]

Charakteristické údaje:

- elektromechanické
 - a) jmenovitý výkon P_N
 - b) jmenovitá rychlost ω_N
 - c) jmenovitý moment M_N
- energetické
 - účinnost η_N
- elektrické
 - a) jmenovité napájecí napětí U_N
 - b) jmenovitý proud I_N
 - c) jmen. frekvence f_N
 - d) jmenovitý účiník φ_N

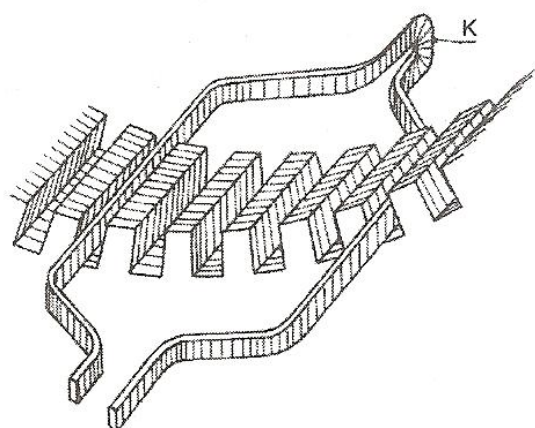
- zatěžovací
 - a) max. proud I_{max}
 - b) max. moment M_{max}
- rozběhové
 - poměrný rozběhový proud i_r
- mechanické
 - a) moment setrvačnosti J
 - b) moment zátěže M_z [1]

1.2 Konstrukce trojfázového asynchronního motoru s kotvou nakrátko

Jedná se o točivý elektrický stroj sloužící k elektromechanické přeměně elektrické energie. Tento stroj má magnetický obvod rozdělen na dvě části (stator a rotor) a každá z nich je opatřena vinutím, která jsou od sebe oddělena malou vzduchovou mezerou.

Konstrukční části motoru jsou: statorový svazek, statorové vinutí, kostra, ložiskové štíty, ložiska, rotor s klecí, ventilátor a statorová svorkovnice. [2]

Statorový svazek je složen z dynamových plechů a je zalisován v litinové kostře, která dává motoru vnější tvar. Svazek má uvnitř drážkování, ve kterém je uloženo trojfázové vinutí. Vodiče vinutí jsou obvykle ve dvou vrstvách, a spojeny v čelech (Obr.1.1). Vinutí je připojeno na trojfázovou síť a vybudí točivé magnetické pole. [2]



Obr. 1.1 Uložení vodičů vinutí do mag. obvodu statoru [8]

Válcový rotor je tvořen dynamovými plechy nalisovanými na hřídeli. V drážkách, které se nachází na vnější straně obvodu jsou zalisovány kovové tyče vinutí. Tyče jsou po

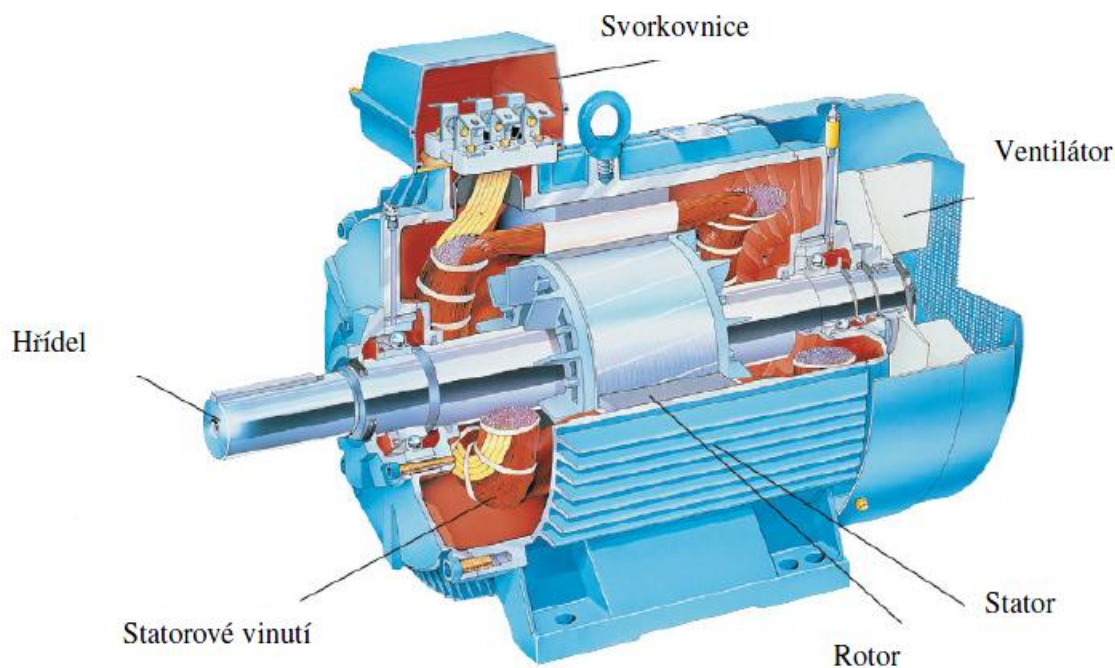
obou stranách spojeny vodivými kruhy a tvoří tzv. rotorovou klec nakrátko. Pro snížení hlučnosti a omezení vlivu harmonických se konstrukčně upraví drážky a tyče zešíkmením. Nejpoužívanějším materiálem ze kterého jsou tyče i kruhy zhotoveny je hliník. [2]

Hřídel je uložen ve dvou valivých ložiskách a ta jsou upevněna v ložiskových štítech. Ložiskové štíty tvoří s kostrou jednotný celek. Hřídel přenáší točivý moment motoru a je vyveden ze zadního ložiskového štítu. U předního ložiskového štítu je zevnitř na hřídeli umístěn ventilátor. Ventilátor obstarává chlazení, vytváří vzduch proudící kolem vinutí a magnetického obvodu. [2]

Statorová svorkovnice slouží k přívodu proudu do vinutí. Kryt svorkovnice je tvořen lisovaným plechem.

Identifikace míst pro připojení vinutí, značení svorek vinutí, smysl točení, vztah mezi značením svorek a smyslem točení je dána podle ČSN EN 60034-8 ed. 2 .

Stroj je pro mechanické usazení opatřen patkami. Patky jsou součástí kostry statoru. [2]

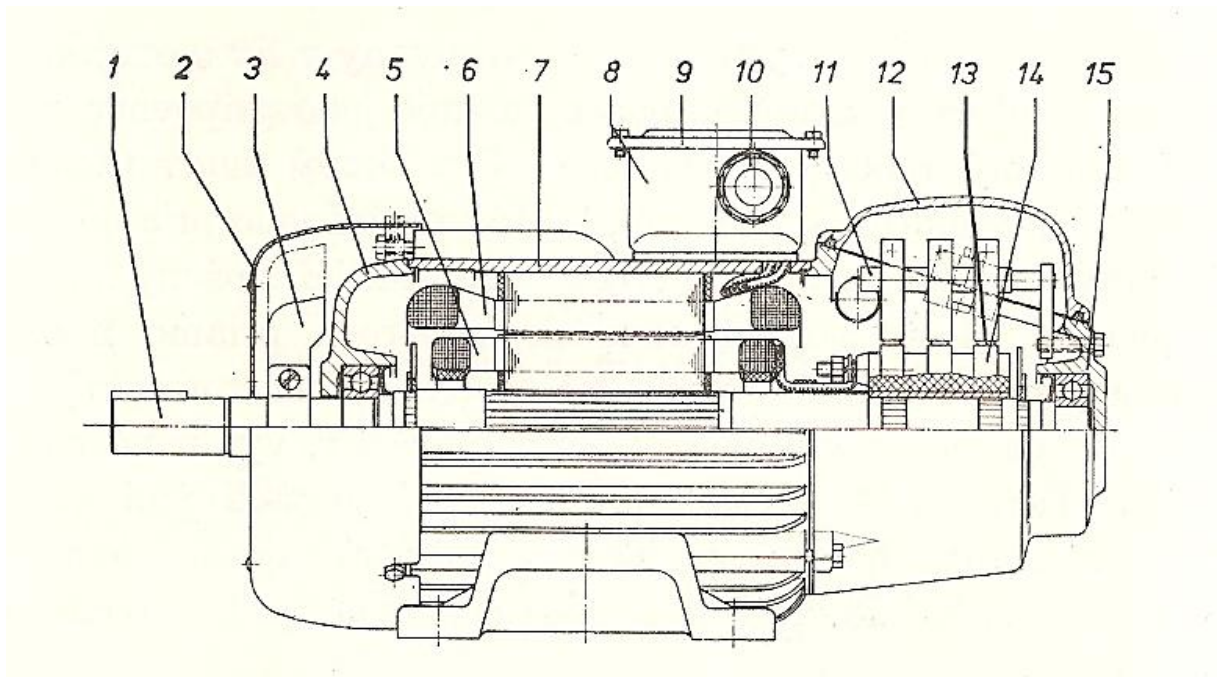


Obr. 1.2 Řez třífázovým asynchronním motorem s kotvou nakrátko [10]

1.3 Konstrukce trojfázového asynchronního motoru s kotvou kroužkovou

Toto řešení se používá u velkých motorů, kde potřebujeme omezit velikost záběrného proudu při spouštění nebo zmenšení otáček. Rotor má v drážkách umístěno vinutí, které je spojeno do hvězdy nebo trojúhelníka. Rotorové vinutí musí mít vždy stejný počet pólů jako statorové vinutí. Vývody jednotlivých fází jsou vyvedeny na kroužky. Kroužky jsou izolovaně umístěny na hřídeli. Na kroužky dosedají kartáče. Kartáče jsou vyvedeny na rotorovou svorkovnici, ke které se připojí reostat. Po rozběhu se spojí kroužky nakrátko, tím se vyřadí přechodový odpor kartáčů a odpor přívodů ke spouštěči. U některých motorů lze zdvihnout kartáče nad kroužky. [2]

Stator je stejný jako u motoru s kotvou nakrátko. [2]



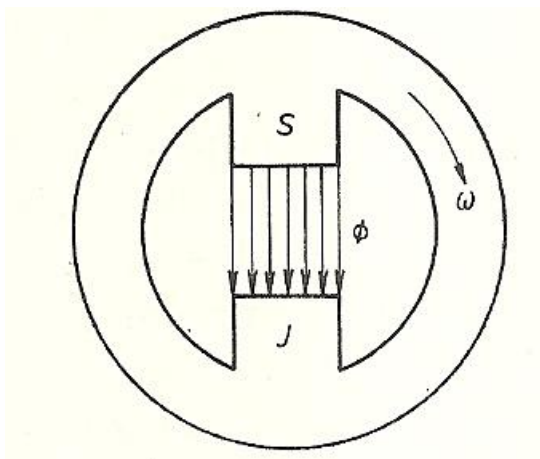
Obr. 1.3 Řez kroužkovým motorem [2]

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

1.4 Princip indukčního stroje

Základní princip asynchronního stroje je založen na vzájemné elektromagnetické vazbě mezi státorem, který vytvoří točivé magnetické pole ve vzduchové mezeře a rotorem, do kterého se vlivem toč. magnetického pole indukují napětí, a to pak protlačí proud. Vzhledem k tomu, že samotný princip je založen na indukci napětí a proudu do rotoru, se tento stroj nazývá indukčním strojem. [4]

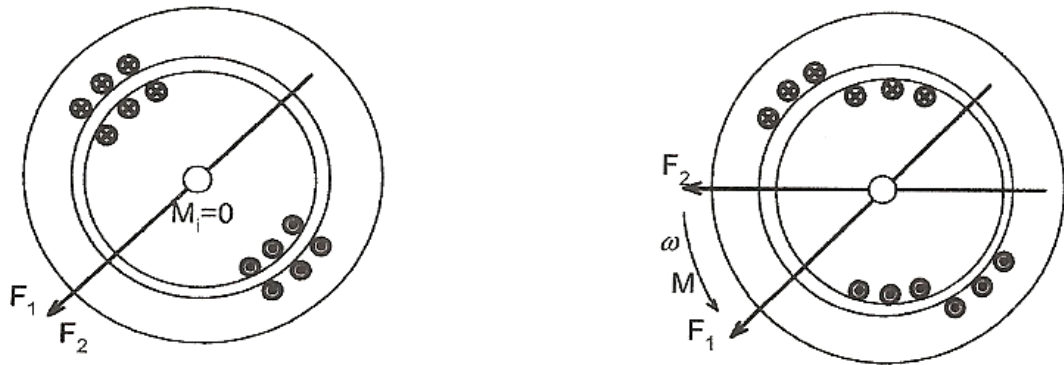
Pro objasnění principu funkce asynchronního motoru je nutné zmínit vznik točivého pole. Točivé magnetické pole si můžeme představit jako pole permanentního magnetu, který se v prostoru otáčí (Obr. 1.4). Točivé pole je vytvořeno třífázovým vinutím, prostorově rozloženým ve satorových drážkách. Jednotlivá fázová vinutí jsou prostorově posunuta o 120° . Vinutí je napájeno třífázovým napětím. Proudů jednotlivých vinutí jsou časově posunuta o 120° . [5]



Obr. 1.4 Homogenní dvoupólové točivé pole [2]

Točivé pole statoru má magnetické napětí F_1 , které protíná stojící rotorové vodiče a indukují do nich napětí U_{i2} . Vodiče jsou spojeny kruhy nakrátko a tak tvoří uzavřený obvod (klec nakrátko) proto napětí, které se indukují do klece může protlačit rotorový proud I_2 . Proud naindukovaný do rotoru vytvoří své vlastní magnetické pole rotoru F_2 . Spolupůsobením obou polí se vytváří vnitřní elektromagnetický moment (točivý) [7]

$$\mathbf{M} \approx \mathbf{F}_1 \times \mathbf{F}_2 \quad [7] \quad (2.4-1)$$



Obr. 1.5 Vznik točivého momentu [7]

Rotor se sám roztáčí a točivé pole ho unáší, stoupá úhlová rychlost ω ,

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}; \text{ot} \cdot \text{min}^{-1}] \quad [7] \quad (1.4-2)$$

kde n [$\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$] je mechanická rychlost.

Tím se snižuje vzájemná relativní rychlost ω_2 mezi toč. magnetickým polem statoru a mechanickou rychlostí rotoru. S rostoucími otáčkami se zmenšuje pohyb vodičů kotvy vůči statorovému poli a klesá indukované napětí U_{i2} a tím pádem i proud a moment. Kdyby motor dosáhl synchronních otáček ω_1 ($n = n_1$) tzn. rotor by se točil stejnou rychlostí jako točivé magnetické pole statoru ($\omega_2 = 0$), došlo by k vytvoření stacionárního magnetického pole, siločáry statorového pole by neprotínaly vodiče rotorového vinutí (nulové indukované napětí, nulový proud a točivý moment M_i). Vlivem ztrát na ložiskách, vnitřním popřípadě vnějším ventilátoru atd. dojde k poklesu otáček a elektromagnetický moment opět roste z nulové hodnoty až do vyrovnání ztrát a zátěžného momentu na hřídeli. Dojde k ustálení otáček na určité hodnotě pod synchronními otáčkami točivého magnetického pole statoru. [7]

Otáčky točivého magnetického pole jsou otáčkami synchronními a přímo závisí na frekvenci napájecího proudu f_1 a počtu pólů vinutí p . Dvoupólové pole vykoná za jeden kmit jednu otáčku. Otáčka je úměrná dvěma pólovým roztečím. Pólová rozteč je vzdálenost os sousedních pólů. Při frekvenci $f_1 = 50$ [Hz] má dvoupólové pole synchronní otáčky úměrné [2]

$$n_1 = 60 \cdot f_1 [\text{ot}/\text{min}^{-1}; \text{Hz}] \quad [2] \quad (1.4-3)$$

Čtyřpólové pole vykoná za jeden kmit půl otáčky a jako pole dvoupólové se posune o dvě pólové rozteče. Otáčky jsou pak úměrné

$$n_s = \frac{60 \cdot f_1}{2} [\text{ot}/\text{min}^{-1}; \text{Hz}] \quad [2] \quad (1.4-4)$$

obecně pak pro synchronní otáčky platí

$$n_s = \frac{n_1}{p} = \frac{60 \cdot f_1}{p} [\text{ot}/\text{min}^{-1}; \text{Hz}] \quad [2] \quad (1.4-5)$$

kde p = počet pólových dvojic (S - J) a $2p$ je počet pólů.

Pro dvoupólové pole platí $n_1 = n_s$, pro vícepólové pole je dán vztah (1.4-5).

Rozdíl mezi otáčkami synchronními n_s a rotoru (mechanická rychlost) n udává skluz

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} [-] \quad [2] \quad (1.4-6)$$

nebo skluz v procentech

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100[\%] \quad [2] \quad (1.4-7)$$

Rychlost rotoru (mechanická rychlost) n je dána vztahem:

$$n = \frac{60 \cdot f_1}{p} \cdot (1 - s) [\text{ot}/\text{min}^{-1}; \text{Hz}] \quad [2] \quad (1.4-8)$$

Kmitočet indukovaného proudu a napětí do rotoru je dán relativní rychlostí pole statoru a vodičů rotoru ω_2 .

$$\omega_2 = \omega_s - \omega [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad [7] \quad (1.4-9)$$

Indukované napětí a proud do rotoru mají frekvenci f_2 .

$$f_2 = s \cdot f_1 [\text{Hz}] \quad [7] \quad (1.4-10)$$

Pro otáčky točivého mag. pole rotoru platí:

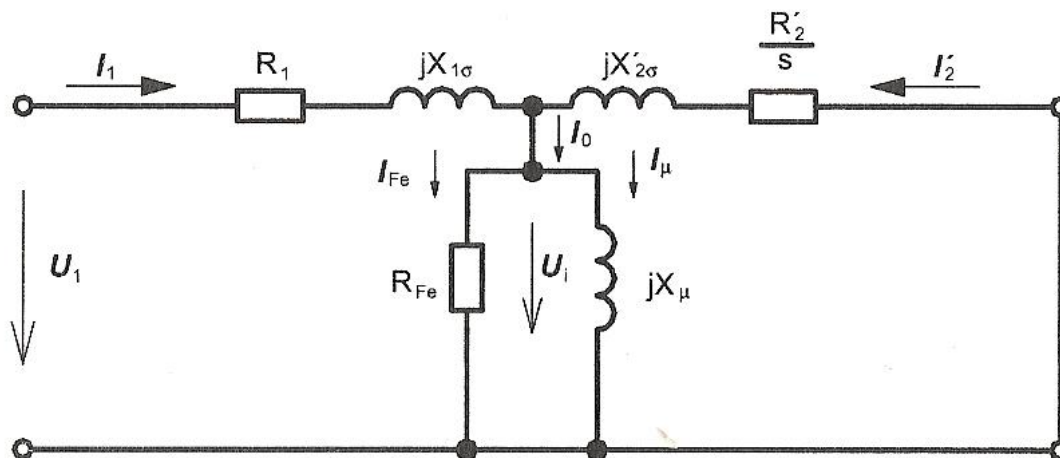
$$n_2 = n_1 \cdot s [\text{ot}/\text{min}^{-1}] \quad [7] \quad (1.4-11)$$

Součet otáček mag. pole rotoru a mechanické rychlosti rotoru je roven synchronním otáčkám.

$$n_s = n + n_2 [\text{ot}/\text{min}^{-1}] \quad [7] \quad (1.4-12)$$

Z toho vyplývá nulová (vzájemná) relativní rychlost v každém okamžiku.

1.5 Náhradní schéma asynchronního motoru



Obr. 1.6 Náhradní schéma [7]

Náhradní schéma asynchronního motoru je analogické se schématem transformátoru. Vezmeme-li motor s vinutou kotvou, která je zabrzděna, připojena přes kroužky a svorkovnici k odporům spojeným do hvězdy, bude se do ní indukovat napětí po připojení napájecího napětí na stator. Indukované napětí bude mít stejnou frekvenci jako je frekvence napájecího napětí. Takto upravený motor by se choval jako transformátor s odporovou zátěží. [8]

Využijeme-li této podobnosti můžeme vyjít při určování náhradního schématu ze schématu transformátoru, z kterého můžeme popsat motor pomocí elektrických obvodů. [8]

Náhradní schéma motoru od transformátoru má jisté rozdíly. Proudů ve statoru mají oproti rotoru odlišné kmitočty, počet fází je shodný jen u vinuté kotvy, u klece nakrátko představuje každá tyč jednu fázi. Magnetizační proud je mnohem vyšší než u transf. vlivem vzduchové mezery. Vzduchová mezera značně zvyšuje magnetický odpor a zmenšuje zkratový proud. Čím menší vzduchová mezera je, tím je menší i magnetizační proud. Velikost vzduchové mezery se pohybuje kolem 0,2 až 2 mm podle výkonu stroje. [7]

Jedná se o schéma jedné fáze motoru, kde veličina respektující změnu zatížení a otáček motoru je skluz.

Stejně jako u transformátoru se i zde nachází přepočtené hodnoty. Při přepočtu parametrů a proudu rotoru na stator $I_2', R_2', L_{2\sigma}'$, se musí respektovat geometrické uspořádání vinutí statoru a rotoru. [8]

Rovnice náhradního schématu jsou:

$$\mathbf{U}_1 = (R_1 + jX_{1\sigma}) \cdot \mathbf{I}_1 + \mathbf{U}_i \quad [7] \quad (1.5-1)$$

$$0 = \left(\frac{R_2'}{s} + jX_{2\sigma}' \right) \cdot \mathbf{I}_2' + \mathbf{U}_i \quad [7] \quad (1.5-2)$$

Joulový ztráty v rotoru jsou dány vztahem:

$$\Delta P_{j2} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 = m_1 \cdot R_2' \cdot I_2'^2 = s \cdot P_\delta, \quad [7] \quad (1.5-3)$$

kde m_1 je počet fází statoru a m_2 je pro rotor.

Výkon ve vzduchové mezeře je:

$$P_\delta = m_1 \cdot \frac{R_2'}{s} \cdot I_2'^2 \quad [1] \quad (1.5-4)$$

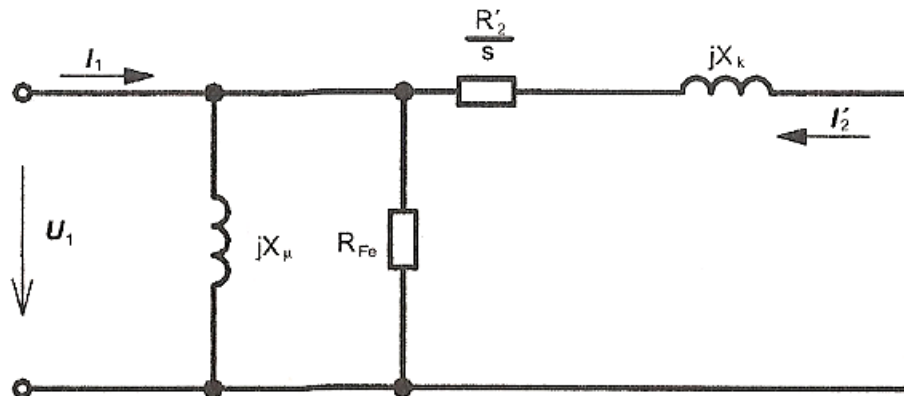
$$P_\delta = P_i + \Delta P_{j2} \quad [1] \quad (1.5-5)$$

P_i udává vnitřní elektromechanický výkon

Pro výpočet mechanického výkonu se nejdřív rozdělí odpor R_2'/s . Tímto krokem získáme zvlášť ztráty a zvlášť mechanický výkon. Výkon na hřídeli získáme odečtením Joulových ztrát od celkového výkonu v rotoru: [7]

$$P = P_\delta - \Delta P_{j2} = P_\delta(1 - s) \quad [1] \quad (1.5-6)$$

$$P = m_1 \cdot \frac{R_2'}{s} \cdot I_2'^2 - m_1 \cdot R_2' \cdot I_2'^2 = m_1 \cdot R_2' \cdot I_2'^2 \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad [7] \quad (1.5-7)$$



Obr. 1.7 Zjednodušené náhradní schéma [7]

Výpočet proudu rotoru přepočtený na stator se určí ze zjednodušeného náhradního schématu (Obr. 1.7). Uvažujeme zdroj o konstantním kmitočtu. Impedance motoru je určena z chodu nakrátko.

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}')^2}} \quad [1] \quad (1.5-8)$$

po zavedení $jX_k = j(X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')$ a pro zanedbání pro malé R_1 se vztah zjednoduší na

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(\frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_k^2}} \quad [1] \quad (1.5-9)$$

dále můžeme určit proud statoru, vycházíme z (Obr. 1.6) :

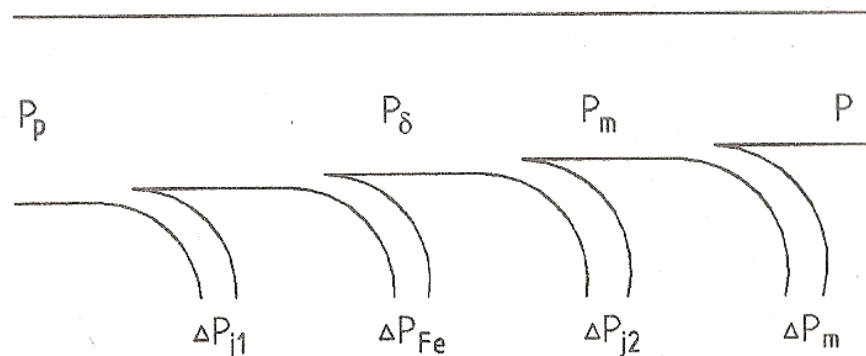
$$I_1 = I_s = \frac{U_{1f}}{Z_1} \quad [7] \quad (1.5-10)$$

kde Z_1 se počte jako

$$Z_1 = Z_s + Z_{ab} = R_1 + jX_{1\sigma} + Z_{ab} \quad [1] \quad (1.5-11)$$

$$Z_{ab} = \frac{1}{\frac{1}{R_{Fe}} + \frac{1}{jX_{\mu}} + \frac{1}{\frac{R_2'}{s} + jX_{\sigma 2}'}} \quad [7] \quad (1.5-12)$$

1.6 Výkonová bilance asynchronního motoru



Obr. 1.8 Tok výkonu asynchronním motorem [8]

V motorickém režimu vstupuje do statorového vinutí činný elektrický příkon P_p . Tento příkon se spočítá z parametrů, které vystupují v náhradním schématu. Výkon vypočítaný v náhradním schématu je nutné vynásobit třemi, jelikož náhradní schéma je uvedeno pro jednu fázi, ale za předpokladu symetrie všech třech fází platí též pro 3f stroj. [8]

$$P_p = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 \quad [8] \quad (1.6-1)$$

Joulové ztráty ve vinutí statoru jsou dány vztahem (2.5-14). Vznikají ve všech fázích při průchodu statorového proudu.

$$\Delta P_{j1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \quad [8] \quad (1.6-2)$$

Ztráty vířivými proudy ΔP_{Fe} , nebo také ztráty magnetizační vznikají v železném magnetickém obvodu statoru motoru a jsou dány indukovaným napětím U_i a odporem respektující ztráty v železe. [8]

$$\Delta P_{Fe} = m_1 \cdot \frac{U_i^2}{R_{Fe}} \quad [8] \quad (1.6-3)$$

Výkon ve vzduchové mezeře P_δ je výkon točivého magnetického pole přenášeného na rotor. Tento výkon stanovíme z el. příkonu stroje, pokud od něj odečteme ztráty ve vinutí stroje a magnetickém obvodu. [8]

$$P_\delta = P_p - \Delta P_{j1} - \Delta P_{Fe} \quad [7] \quad (1.6-4)$$

Výkon přenesený do rotoru se dělí na ztráty mechanické ΔP_m , ztráty ve vinutí rotoru

$$\Delta P_{j2} = m_1 \cdot R_2' \cdot I_2'^2 \quad [7] \quad (1.6-5)$$

a užitečný mechanický výkon na hřídeli P .

$$P = P_\delta - \Delta P_{j2} - \Delta P_m \quad [7] \quad (1.6-7)$$

Je zde také mechanický výkon P_m , který vznikne odečtením Joulových ztrát ΔP_{j2} od výkonu P_δ .

$$P_m = P_\delta - \Delta P_{j2} \quad [7] \quad (1.6-8)$$

Mechanický výkon je dán vztahem:

$$P_m = m_1 \cdot I_2' \cdot R_2' \cdot \frac{1-s}{s} \quad [8] \quad (1.6-9)$$

Část mechanického výkonu se spotřebuje na krytí mechanických ztrát ΔP_m . Mechanické ztráty jsou způsobené ložisky, ventilací stroje a jsou úměrné

$$\Delta P_m \approx n^2 \quad [7] \quad (1.6-10)$$

Zanedbáme-li mechanické ztráty ΔP_m je pak moment na hřídeli roven momentu vnitřnímu, tj. $M = M_i$. Pak můžeme napsat

$$P_\delta = M_i \cdot \omega_1 \quad [7] \quad (1.6-11)$$

Vzhledem k velmi nízkému kmitočtu indukovaného napětí v rotoru, lze ztráty v mag. obvodu zanedbat

$$\Delta P_{Fe2} = 0 \quad [7] \quad (1.6-12)$$

Z hodnot ztrát a výkonu lze napsat vztah pro účinnost motoru:

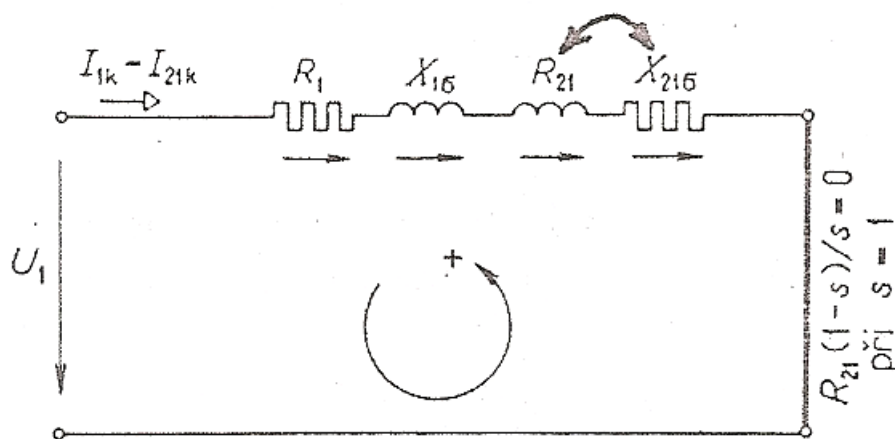
$$\eta = \frac{P}{P + \Delta P_{j1} + \Delta P_{j2} + \Delta P_m + \Delta P_{Fe}} = \frac{P}{P_P} \quad [8] \quad (1.6-13)$$

Účinnost se pohybuje okolo 0,65 u malých strojů a nad 0,95 pro motory s největšími výkony. [7]

1.7 Asynchronní motor nakrátko

1.7.1 Vlastnosti

Indukční motor pracuje v režimu nakrátko, jestliže rotor stojí ($s=1, n=0$). Točivé mag. pole protíná rotorové tyče synchronními otáčkami a indukuje do nich zkratový proud o frekvenci f_1 . [2]



Obr. 1.9 Náhradní schéma indukčního motoru pro chod nakrátko [2]

Pro určení velikosti ustáleného proudu nakrátko, zanedbáme reaktanci X_μ a odpor R_{Fe} , neboť proud I_0 je v porovnání s proudem nakrátko zanedbatelný. Zkratový proud je omezen pouze impedancemi vinutí

$$I_{1k} = \frac{U_1}{Z} \quad [2] \quad (1.7-1)$$

kde

$$Z = (R_1 + R_{21}) + j(X_{1\sigma} + X_{21\sigma}) \quad [2] \quad (1.7-2)$$

Velikost zkratového proudu je $I_{1k} = (3,5 \text{ až } 7)I_1$

Napětí indukované do rotoru je velmi malé, z důvodu velmi malého odporu rotorového vinutí při nulovém zatěžovacím odporu. Na jeho indukování stačí jen malý magnetický tok Φ_2 . Z toho důvodu se mag. tok Φ_1 rozdělí na rozptylové toky [2]

$$\Phi_1 = \Phi_{1\sigma} + \Phi_{2\sigma} \quad [2] \quad (1.7-3)$$

1.7.2 Princip měření nakrátko

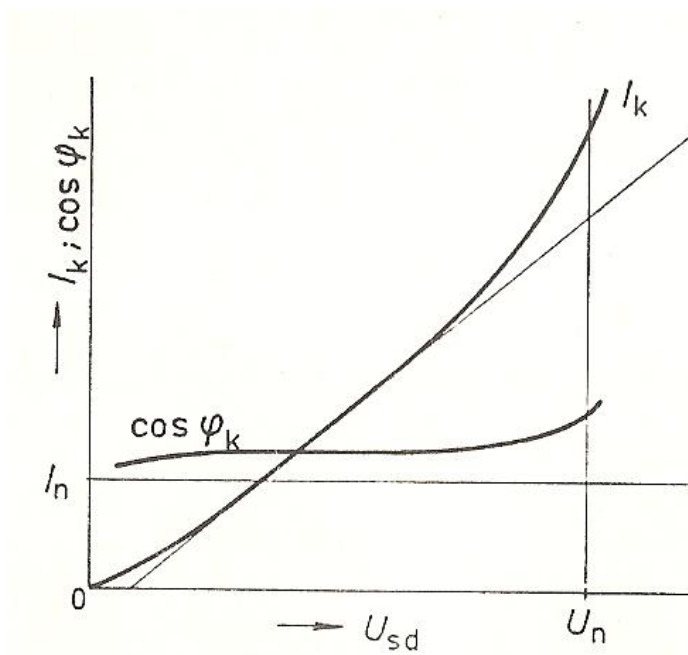
Při měření nakrátko se musí rotor daného stroje mechanicky zabrzdit. Mechanická brzda musí udržet rotor v klidu i při maximálním momentu, aby se rotor neroztočil. Při měření nakrátko se určuje charakteristika nakrátko, účinník nakrátko a průběh ztrát nakrátko. V této práci jsem se zaměřil jen na charakteristiku nakrátko a účinník nakrátko. Charakteristika nakrátko je závislost $I_k = f(U_k)$ viz (Obr. 1.10). [13]

Průběh charakteristiky nakrátko se od přímkové charakteristiky liší. Odlišnost je dána sycením zubů statoru a hlav rotorových zubů rozptylovými toky ve stroji. Jejich úplné nasycení se projeví jako zvětšení vzduchové mezery. Pro výpočet proudu nakrátko pro jmenovité napětí se používá lineární extrapolace, použijeme vztah

$$I_{kn} = \frac{U_n - U_{k0}}{U_k - U_{k0}} \cdot I_k \quad [13] \quad (1.7-4)$$

Proud I_k roste po tečně k naměřené charakteristice, odchylka od takto stanovené hodnoty by měla být asi 10 ÷ 20 %. [13]

Průběh charakteristiky nakrátko je na (Obr. 1.10). Ohyb charakteristiky při větších proudech je obvyklý u všech strojů, ohyb na začátku se projeví jen u strojů s otevřenými drážkami statoru i rotoru a s velkou vzduchovou mezerou.



Obr. 1.10 Závislost proudu a účinníku nakrátko asynchronního stroje na svorkovém napětí [14]

Průběh účinníku $\cos \varphi$ je závislý na teplotách vinutí, především rotoru, které se stanoví měřeními jen v mimořádných případech. Z tohoto důvodu nelze ve většině případech jednotlivé změřené body spojit plynulou křivkou. [14]

2 Vlastnosti spouštění (rozběhů) trojfázových asynchronních motorů

V této kapitole se budu zabývat důvody ze kterých musíme omezovat záběrné proudy a samotnými metodami spouštění asynchronních motorů. Tato kapitola nese název spouštění asynchronních motorů a přitom píše o omezování záběrných proudů, je to z důvodu, že různými druhy spouštění můžeme libovolně měnit (řídít) velikost záběrného proudu a momentu.

Záběrné proudy musíme omezovat z důvodů ochrany samotného motoru, ale také k zabránění poklesu napětí v síti při spouštění motorů.

Další nevýhodou je pulzace momentu v prvních chvílích po připojení motoru na síť, které jsou nezanedbatelné. Přenáší se na připojené zařízení, což vede k mechanickému namáhání ložisek, spojky atd.

Z těchto důvodů se musí ovládat (omezovat) rozběhový proud, který by jinak byl značně vysoký, a to zejména při prvních cyklech od začátku přechodového jevu.

2.1 Všeobecné zásady

Spouštění AM (připojení k síti) je největším provozním problémem indukčních motorů, který je pak přechodným dějem, během kterého se mění rychlost, proudy a moment motoru. Charakteristickým údajem je záběrný proud a jemu odpovídající záběrný moment. [2]

V okamžiku připojení k napájecí síti se motor s kotvou nakrátko chová podobně jako transformátor nakrátko. V tomto okamžiku asynchronní motor při spouštění odebírá velký záběrný proud, jehož časový průběh má charakter zkratu a velikost se nemění ani v průběhu velké části rozběhu viz (Obr. 2.1). Záběrný proud vyvolá velké elektromagnetické síly, které nepříznivě působí na čela vinutí a při častém spouštění pak hrozí tepelné poškození stroje. Proud je omezen jak vyplývá z náhradního schématu jen velmi malou impedancí. Impedance je dána statorovým a rotorovým odporem a odporem rozptylových indukčností. Velikost záběrného proudu u motoru s kotvou nakrátko je přibližně 4-7 násobek jmenovitého proudu v závislosti na konstrukčním provedení daného motoru, např. na počtu pólů, provedení drážek atd., a 2 násobek u strojů s kotvou kroužkovou (vinutou) při zařazeném spouštěcím odporu. [9]

Na veřejnou síť lze motor přímo připojit do 22 [kVA] spouštěcího výkonu a až 42 [kVA] po dohodě s energetickým podnikem, jinak se přímé připojení na síť nepřipouští, před připojením na síť se musí zajistit, aby došlo k omezení záběrného proudu.

V průmyslu nebo zařízeních se samostatným napájecím transformátorem lze připojit motor přímo do sítě, není-li jeho výkon větší než 50% jmenovitého výkonu transformátoru. [9]

Při přímém připojení motoru na síť dochází k velkému proudovému nárazu, který způsobí pokles napětí a tím pádem i pokles momentu, jelikož moment je úměrný kvadrátu napětí.

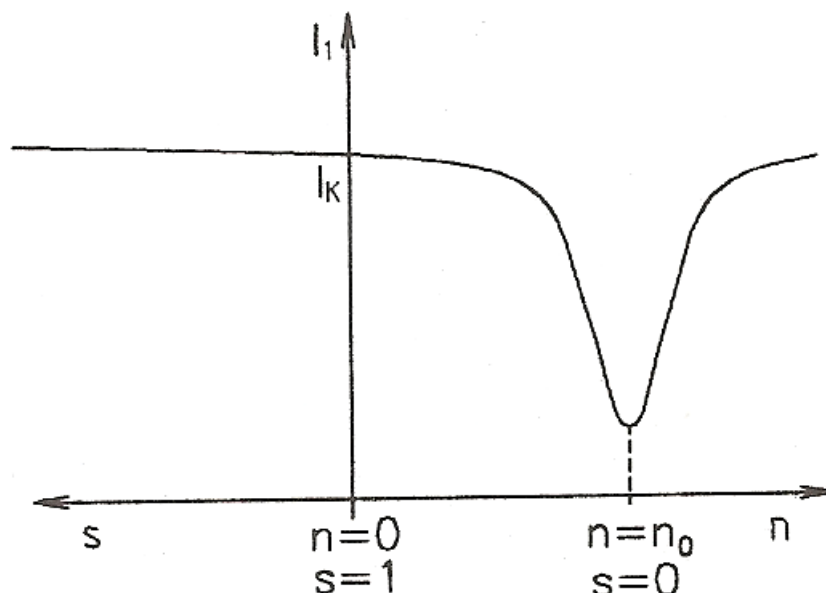
$$M \sim U^2 \quad (2.1 -1)$$

Pokles napětí má nepříznivé důsledky i pro ostatní spotřebiče v síti a zároveň zmenšení momentů všech indukčních motorů pracujících ve stejné síti, dále může vyvolat v distribuční síti vybavení ochran.

Velikost poklesu napětí závisí na tvrdosti sítě. Bude-li se jednat o tvrdou síť napětí na kterou je motor připojen, tak při rozběhu nedojde k poklesu momentu, musí se kontrolovat velikost proudů při rozběhu, aby nedošlo k poškození vinutí stroje nebo napájecího zařízení. Většinou jsou motory připojeny na veřejnou síť, která tyto parametry nemá. [9]

Proto požadujeme, aby při spouštění indukčních motorů byl záběrný proud co nejmenší a záběrný moment co největší, toho docílíme různými metodami spouštění indukčních motorů. Takto spouštěné motory potřebují další zařízení jako je např. řídicí elektronika, která musí být řízena určitým softwarem atd. Tím přicházíme o pohon, který byl nejjednodušší, nejlacinější atd. [2]

Z hlediska spouštění je nejvýhodnější kroužkový motor, u kterého můžeme libovolně zmenšit záběrný proud a zvětšit záběrný moment až na moment zvratu, vhodnou volbou rotorového odporu. Tyto motory s kotvou nakrátko jsou však složitější, choulostivější a vzhledem k motorům s kotvou nakrátko mají další nevýhody. [2]



Obr. 2.1 Proud nakrátko I_{1K} , při připojení motoru na napájecí síť [8]

Výhody motoru s kotvou nakrátko ve srovnání s kroužkovým motorem jsou:

1. Větší účinník zejména u menších výkonů. Účinníky se vyrovnávají při výkonech nad 30 kW.
2. Větší účinnost při menších výkonech.
3. Větší přetížitelnost.
4. Možnost většího oteplení rotoru.
5. Konstrukční jednoduchost; odpadají kartáče, kroužky apod.
6. Menší hmotnost a nižší cena. [2]

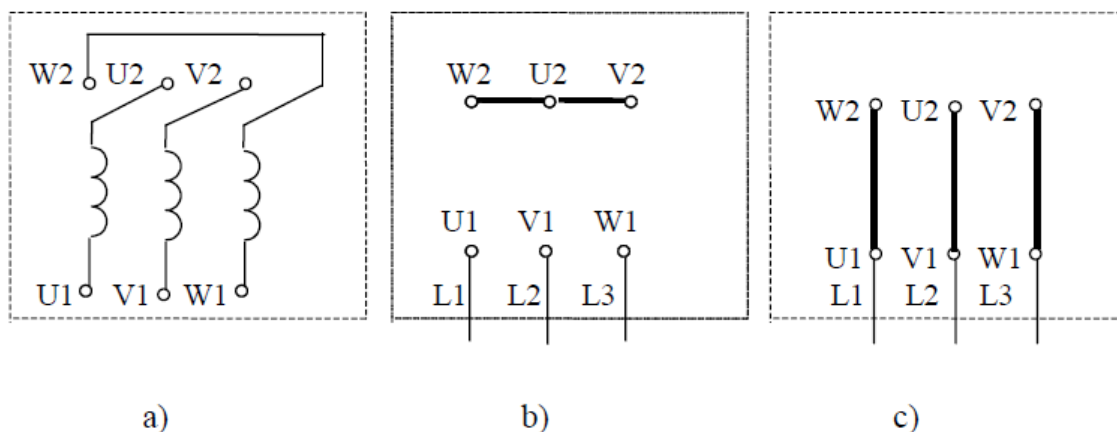
2.2 Úprava svorkovnice

Vlastní připojení indukčních motorů k síti umožňuje šest svorek statorové svorkovnice. Indukční motory s výkonem větším než 3 kW mají svorkovnice se šesti svorkami (u menších motorů do 3 kW a kroužkové motory na napětí 500 V nebo o výkonu větším než 100 kW mají svorkovnici jen se třemi svorkami, které jsou označeny podle ČSN EN 60034-8 ed. 2 značkami U1 - U2 - V1 - V2, W1 - W2. Pomocí svorek můžeme vinutí přepojit do hvězdy nebo do trojúhelníka. [2]

Způsob zapojení motoru musí být uveden na štítku, např. označení 400/230 V - Y / Δ , to znamená, že v síti se sdruženým napětím 3 x 400 V se zapojí vinutí do hvězdy (obr. 2.2b) a v síti se sdruženým napětím 3 x 230 V do trojúhelníka (obr. 2.2c). [2]

Napětí a proud na vinutí v trojúhelníku je $\sqrt{3}x$ větší vyšší než ve hvězdě a moment je 3x větší. Z hlediska napájecí sítě je proud v přívodech 3x větší (v trojúhelníku přívodní fáze napájí dvě vinutí, ve třífázovém systému to vede na $\sqrt{3}x$ větší hodnotu než je ve vinutí). [15]

Kostra motoru se musí prostřednictvím uzemňovací svorky připojit na uzemnění nebo na nulový vodič trojfázové sítě. [2]



Obr. 2.2 Svorkovnice asynchronního motoru : a) připojení vinutí, b) spojení do hvězdy (Y - Zapojení 400 V (690V)), c) spojení do trojúhelníka (D - Zapojení 230 V (400V)) [4]

2.3 Základní ukazatele spouštění

Podle spouštěného zařízení se stanoví vlastnosti rozběhu:

- Dostatečně velký záběrný moment (s ohledem na překonání zatížení motoru v klidu a při rozběhu).

Spouštění se zátěží charakterizuje činitel:

$$k_M = \frac{M_{záb}}{M_n} \quad [7] \quad (2.3 -1)$$

- Malý záběrný proud (s ohledem na napájecí vedení a síť, ve kterých dochází vlivem záběrného proudu k velkým proudovým nárazům a tím k úbytku napětí, to se projeví poklesem záběrného momentu, $M \approx U^2$). [7]

Záběrný proud charakterizuje činitel:

$$k_I = \frac{I_k}{I_n} \quad [7] \quad (2.3 -2)$$

- Plynulost rozběhu, sleduje se: $I = f(t)$; $n = f(t)$, $s = f(t)$.
- Doba akcelerace.
- Ztráty při rozběhu.
- Oteplení vlastního stroje rozběhem.
- Jednoduchost spouštění. [7]

3 Způsoby spouštění (rozběhů) indukčních motorů

Při rozběhu motoru musí rychlost motoru ω projít oblastmi vysokého skluzu (zde jsou velké ztráty a proudy) až do pracovní oblasti. Podle požadavku sítě a poháněné aplikace, jestli nevdí proudové a momentové rázy atd. se používají zvláštní opatření (ze vztahu (1.5-10) vyplývá), že záběrný proud lze principiálně snížit: napětím, odpory, indukčnostmi a napájecí frekvencí). [15]

Dané způsoby realizace se dělí podle vlastností:

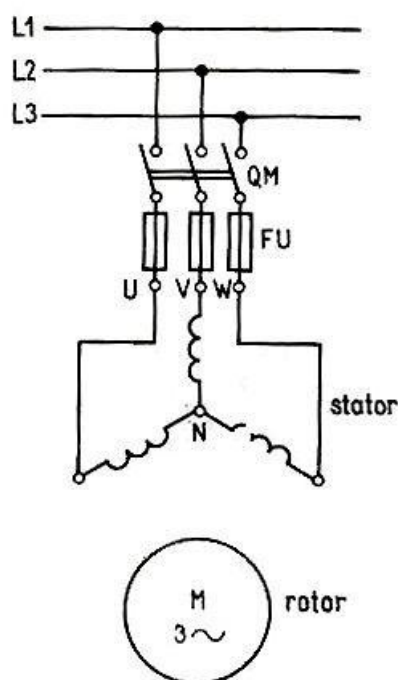
- a) Neomezí se záběrný proud ani se nevětší záběrný moment
- b) Omezí se pouze záběrný proud (jen pro lehké rozběhy - pro malé M_z)
- c) Omezí se pouze záběrný moment

- d) Zajistí se omezení proudu a zvětšení záběrného momentu (pokud nelze snížit zátěžný moment M_z) [15]

3.1 Spouštění při kterém nedochází ke zmenšení záběrného proudu

3.1.1 Spouštění přímým připojením k síti

Jedná se o nejběžnější metodu spouštění používanou v průmyslových aplikacích. Tohoto způsobu lze využít u veřejné sítě jen do spouštěcího příkonu 22 kVA, tzn. asi do výkonu 3 kW, na síti průmyslových závodů lze připojit motory značně větších výkonů. Tento způsob rozběhu nedokáže omezit záběrný proud. Používá se u rozběhu s plným zatížením, kde nejsou požadavky na jemnost rozběhu. Velikost záběrového proudu se obvykle pohybuje kolem 6 až 7 násobku jmenovitého proudu, ale u některých aplikací, může dosahovat i 9 až 10 násobku jmen. proudu a to zejména u těžkých rozběhů. Další nevýhoda nastává při připojení zatíženého motoru na síť, vzniká vysoká proudová špička (Diracův impuls). Tato špička může nabývat až 14-ti násobku jmenovitého proudu. [10]



Obr. 3.1 Připojení indukčního motoru trojpolovým spínačem [12]

Odebíraný proud při rozběhu motoru ze sítě, neklesá úměrně se stoupajícími otáčkami. Během rozběhu proud klesne jen o malou část, nejvíce klesne po přiblížení k jmenovitým otáčkám na hodnotu odpovídající zatížení motoru. viz (obr 2.1). [8]

Velikost motoru a jeho zapojení ovlivňují hodnoty záběrného proudu, obecně lze říci, že čím je motor menší, tím je větší záběrný proud.

Při přímém připojení na síť nás zajímá nejen velikost proudu, ale i momentu. Velikost počátečního kroutícího momentu na hřídeli je vysoká, ve většině případu o mnoho vyšší, než dané aplikace potřebují. Záběrový moment koresponduje se silou, zbytečně vysoký záběrový moment vyvolá vysokou sílu ve vazbě motor - poháněná technologie. Tato metoda spouštění ve většině případů vyhoví požadavkům připojení a v některých případech je jedinou možnou alternativou připojení motoru na síť, jestliže potřebujeme rozběh s plným zatížením. [10]

3.1.1.1 Realizace přímého připojení k síti

Motor se k síti může připojit pomocí:

a) trojpólového spínače (stiskací, válcový, vačkový); pojistky musí být mezi motorem a spínačem, aby byla jejich výměna bezpečná (obr 3.1).

b) stykače (při dálkovém ovládní); pojistky musí být před stykačem, který je jimi současně chráněn, proti tepelnému přetížení se kombinuje s tepelným relé.

c) jističe, který současně zastupuje i zkratovou nadproudovou ochranu.

Jestliže jsou pojistky z nějakých důvodů před vypínačem, musí to být uvedeno na zvláštní výstražné tabulce.

Reverzace se uskutečňuje záměnou libovolných dvou přírodních vodičů (reverzační přepínač nebo stykačová reverzační kombinace). [2]

3.1.1.2 Vliv přímého připojení k síti na různé druhy zátěže

Přímé připojení motoru na síť je nejrozšířenějším spouštěním. Při těchto startech je zátěž a napájecí síť nejvíce namáhána. Může se jednat o namáhání mechanickými nárazy, namáhání ložisek atd. Jak již bylo řečeno tato metoda má velký počáteční kroutící moment, který není vždy žádán. [10]

a) Odstředivý ventilátor

Odstředivé ventilátory mají velmi velký zátěžový moment a postupně se zvyšující moment setrvačnosti, který prodlužuje dobu rozběhu. Vlivem velkého počátečního

kroutícího momentu stroje začnou řemeny, které přenášejí sílu vazby motor-ventilátor, prokluzovat, protože nejsou schopny přenést tuto sílu. Tento problém při častých rozběhách znamená, zvýšení nákladů na údržbu, výměnu řemenů a ložisek. [10]

b) Odstředivé čerpadlo

Vlivem přímého připojení na síť vznikne velký hnací moment, který rozběhne čerpadlo na jmenovité otáčky příliš rychle, z důvodů malého momentu zátěže. Tím vznikají tlakové nárazy v soustavách potrubí, které způsobují mechanické opotřebení potrubí a čerpadel. Záběrný proud čerpadla je při spouštění na svém maximu tj. až 7-mi násobku jmen. proudu. [10]

c) Kompresor

U kompresorů moment zátěže lineárně stoupá s otáčkami motoru kompresoru. Přímým připojením kompresoru na síť se kompresor a vazba motor-kompresor (hnací řemen mezi motorem a kompresorem) vystavuje velkému mechanickému namáhání. Při použití řemenů, dochází k jejich prokluzům. Záběrný proud dosahuje až 7-mi násobku jmen. proudu vlivem velkého záběrného momentu. Přímé připojení kompresoru k síti se nedoporučuje. [10]

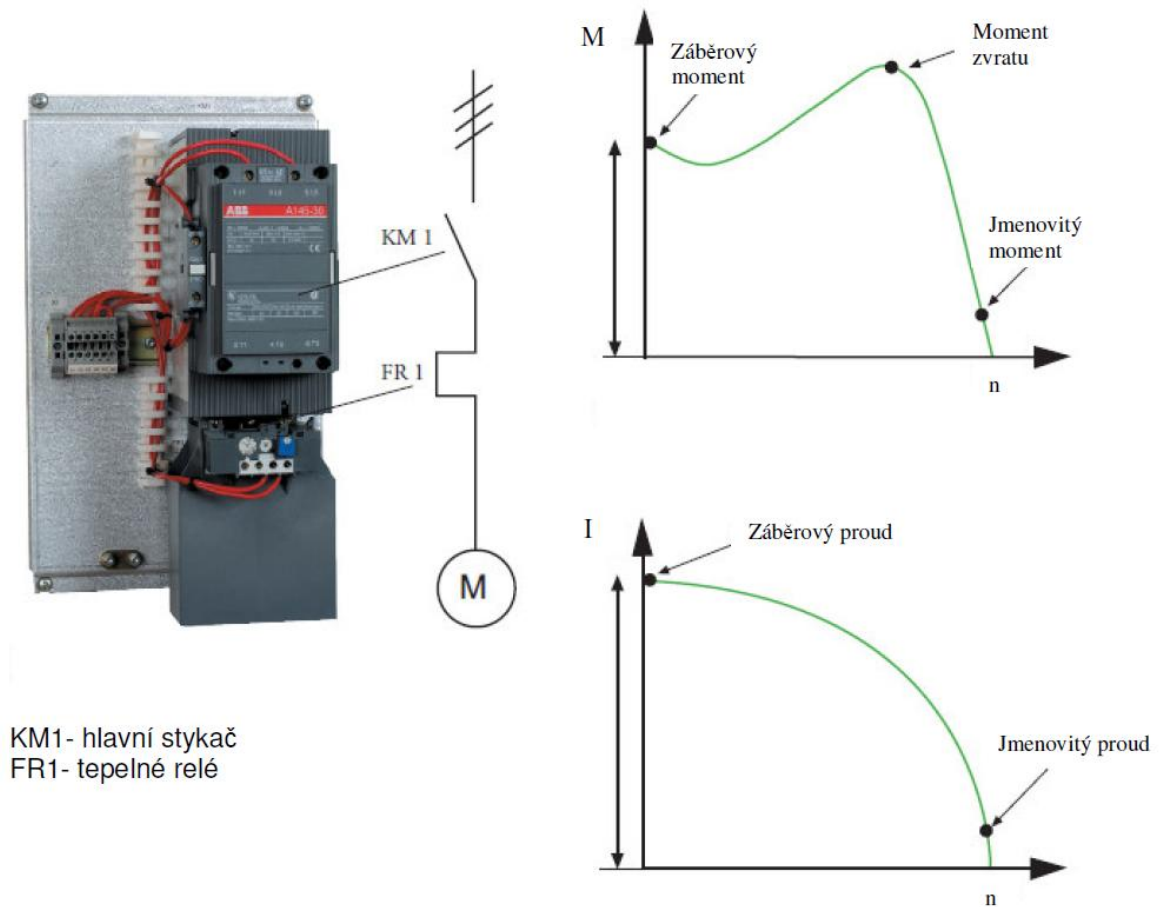
d) Dopravníkový pás

Jedna z mála aplikací, kde nevádí velký záběrný moment motoru při přímém spouštění je dopravníkový pás. Zde se naopak vyžaduje shodnost momentu zátěže s záběrným momentem motoru. Při přímém připojení motoru k pásu je sice vysoká pravděpodobnost prokluzu (vyzutí) pásu, ale to se vyřeší přidáním hydraulické spojky. Tento způsob je ale nákladný jak ekonomicky tak na údržbu. [10]

3.1.1.3 Příklad provedení současného přímého připojení na síť

Příklad přímého připojení na síť (Obr. 3.2 vlevo.) od firmy ABB. Jedná se řídicí jednotku motoru skládající se z hlavního stykače a tepelného relé. Toto je možné pouze pro typy motorů podporované jednotkami MCU (Motor Control Unit). Jedná se o motory pro přímé připojení na síť (DOL - Direct On Line) s jednotkou dálkového ovládání (DOL RCU)]. [11]

Momentová charakteristika $M = f(n)$ a proudová charakteristika $I = f(n)$ pro příklad přímého připojení se systémem DOL (Obr.3.2 vpravo.) [10]



Obr. 3.2 Příklad elektroniky pro přímé připojení na síť od firmy ABB je uveden vlevo, vpravo nahoře je zobrazen moment a vpravo dole proud pro rozběh přímého připojení na síť. [10]

3.1.2 Spouštění rozběhovou spojkou

Rychlý rozběh bez zatížení umožňují rozběhové spojky. Jsou to třecí spojky, montované přímo do řemenice, které jsou v klidu rozpojeny. Zapojí se jen po dosažení určitých otáček působením odstředivé síly.

Rozběhové spojky by se měly používat při těžkém rozběhu do výkonu 7,5 kW, jde-li o motor se spouštěcím nárazem větším než 22kVA. Používají se odstředivé automatické spojky (asi do výkonu 15kW), elektromagnetické bubnové spojky atd.

Použitím rozběhové spojky se nezmění záběrný proud, jen se zkrátí doba rozběhu, což kromě jiného zvýhodní nadproudové jištění. [2]

3.2 Snížení záběrného proudu při rozběhu

3.2.1 Sníženým napětím

U AM nakrátko není možno zvětšovat odpor rotorového obvodu (vyjma motorů se speciálně upravenou rotorovou klecí) a tím zvětšovat záběrný moment. Je možno jen zmenšovat proudový náraz při současném zmenšení záběrného momentu.

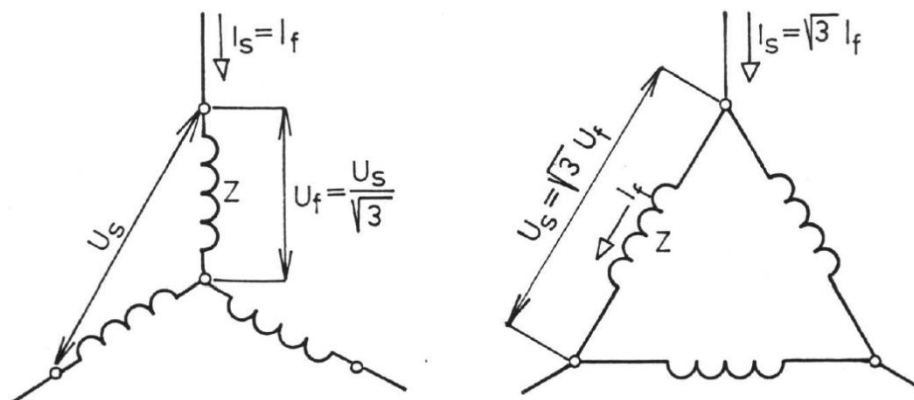
AM nakrátko o výkonech větších než 3 kW lze spouštět sníženým napětím U_1 na statoru, což samozřejmě způsobí jednak snížení proudového nárazu, tak i snížení záběrného momentu a rozběh trvá delší dobu. Z tohoto důvodu se takto spouštějí motory s malým zatěžovacím momentem při rozběhu nebo motory, které nejsou při rozběhu zatíženy. [7]

3.2.1.1 Sníženým napětím - spouštění kombinací hvězda / trojúhelník - Y / Δ

Sníženého napětí pro rozběh lze dosáhnout přepínačem hvězda - trojúhelník. Podmínkou je, aby vinutí motoru bylo navrženo tak, že jeho jmenovité napětí při spojení do trojúhelníku odpovídá sdružené (mezifázové) hodnotě napětí sítě a aby vinutí mělo vyvedeny všechny začátky a konce jednotlivých fází.

Na štítku musí být označení 690/400 V - Y / Δ . Pro rozběh Y / D v síti se sdruženým napětím 3 x 400 V se zapojí vinutí do hvězdy a na to samé napětí se posléze zapojí do trojúhelníku. Při spojení do hvězdy bude svorkové napětí 3x menší, než které motor potřebuje, aby docílil stejného výkonu jako při spojení do trojúhelníku.

[2]



Obr. 3.3 Napěťové a proudové poměry při spouštění asynchronního motoru přepínáním Y/D

[2]

Při spojení do hvězdy (Obr. 3.3) je napětí na jedné fázi motoru $U_s/\sqrt{3}$ (při spojení do trojúhelníku U_s). Při fázové impedanci Z je poměr proudů pro obě spojení ve vinutí jedné fáze $I_Y/I_D = 1/\sqrt{3}$ a v síťových přívodech k motoru $I_{Ys}/I_{Ds} = 1/(\sqrt{3} \cdot \sqrt{3})$.

Při přepnutí do hvězdy poklesne tedy síťový proud na 1/3 hodnoty, kterou by měl při spojení do trojúhelníku. [9]

Motor se k síti připojí v zapojení do hvězdy a po rozběhu asi na 85 % jmenovitých otáček se pomocí stykačů přepne do trojúhelníku (Obr. 3.5). [2]

Podle (Obr. 3.3) platí pro trojúhelník:

Proud v přívodu

$$I_s = \sqrt{3} I_f = \frac{\sqrt{3} U_s}{Z} \quad [2] \quad (3.2-1)$$

kde fázový proud je dán vztahem

$$I_f = \frac{U_s}{Z} \quad [2] \quad (3.2-2)$$

Podle (Obr. 3.3) platí pro hvězdu:

Proud ve fázi

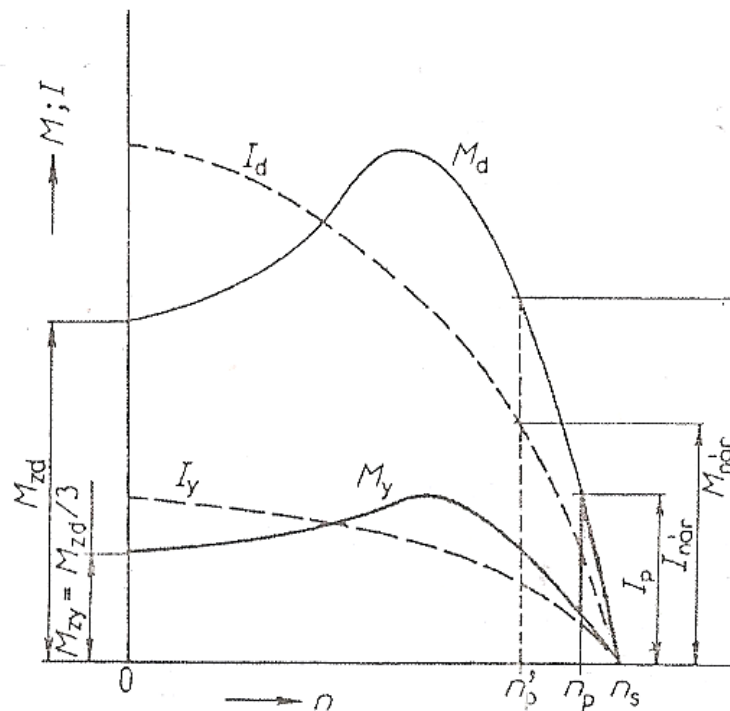
$$I_f = I_s = \frac{U_f}{Z} = \frac{U_s}{Z\sqrt{3}} \quad [2] \quad (3.2-3)$$

Dělením rovnic pro proudy v přívodních vodičích dostaneme

$$\frac{I_y}{I_d} = \frac{\frac{U_s}{\sqrt{3}Z_f}}{\frac{\sqrt{3}U_s}{Z_f}} = \frac{1}{3} \quad [2] \quad (3.2-4)$$

Vzhledem k tomu, že záběrný moment je úměrný druhé mocnině napětí na vinutí fáze, je poměr záběrných momentů [2]

$$\frac{M_y}{M_d} = \frac{1}{3} \quad [2] \quad (3.2-5)$$



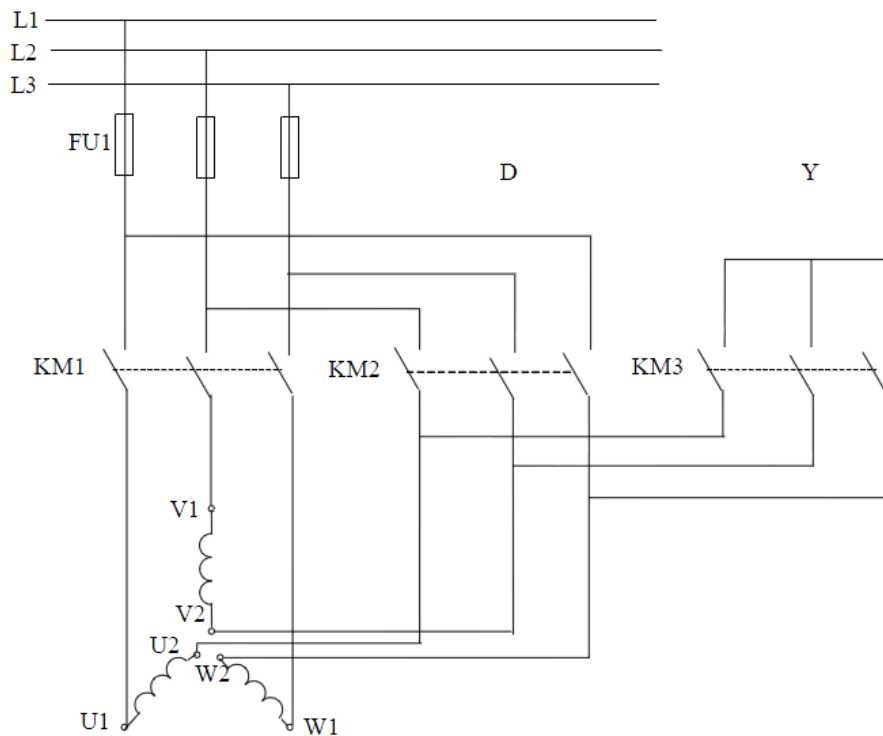
Obr. 3.4 Průběh momentu a proudu při spouštění přepínačem Y/D [2]

Přepínač se používá do výkonů asi 4 kW. Po zapojení do hvězdy musí motor dosáhnout alespoň 85% jmenovitých otáček.

Přepínač Y/D musí být konstruován tak, aby ho nebylo možné rychle přepnout z polohy Y do polohy D. Předčasné přepnutí vyvolá značný proudový náraz, jak to vyplývá z charakteristiky (Obr. 3.4).

Proudy i momenty pro spojení do Y jsou třetinové. Správně se přepíná při otáčkách n_p , při nichž se nový proudový náraz rovná nejvýše prvnímu proudovému nárazu I_p .

Předčasným přepnutím vznikne proudový a momentový náraz $I_{nár}$, $M_{nár}$ (Obr 3.4), který úplně zruší výhodu přepínače. K předčasnému přepnutí dochází i tehdy, jestliže motor není svou charakteristikou přizpůsoben průběhu zatěžovacího momentu. [2]



Obr. 3.5 Spouštění motoru stykačovým přepínáním [4]

S ohledem na zmenšený záběrný moment lze spouštět přepínačem Y/D jen motory, které se rozbíhají bez zatížení, naprázdno, nebo jen s malým zatížením (ventilátory, obráběcí stroje, pily, stroje v zemědělství apod.). [2]

Pro čerpadlové a ventilátorové aplikace je moment zátěže při startu velice nízký a kvadraticky se zvyšuje s otáčkami. Při dosažení 80-85 % jmenovité rychlosti motoru se moment zátěže rovná hnacímu momentu a motor neakceleruje. Po dosažení jmenovité rychlosti je nutné přepnout z hvězdy do trojúhelníku. Toto přepnutí trvá cca 0,5 s a vede k vysokým proudovým a momentovým špičkám, které mají za následek vysoké namáhání izolací motoru. Hodnota špičky při přepnutí dosahuje až hodnoty záběrového proudu při přímém připojení motoru na síť.

U aplikací s momentem zátěže větším než 50 % jmenovitého momentu na hřídeli motoru nelze tuto metodu připojení na síť použít. [10]

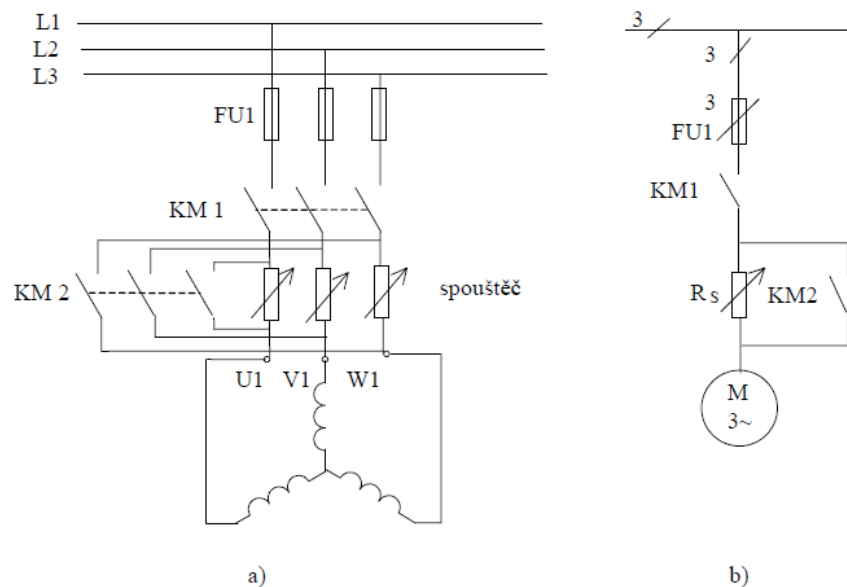
3.2.1.2 Sníženým napětím - spouštění se satorovým spouštěčem

Záběrný proud lze zmenšit snížením svorkového napětí. Moment ale klesá s druhou mocninou napětí a u tohoto způsobu rozběhu se záběrný moment sníží značně.

Do série se satorovým vinutím zapojíme symetrický trojfázový spouštěcí odpor nebo tlumivku, které lze také zapojit do uzlu vinutí. U motorů menších výkonů se používá spouštěcí odpor, u větších motorů spouštěcí tlumivka (reaktorové spouštění). Podle výrazu (1.5-10) se snížením napětí lineárně zmenší záběrný proud motoru a záběrný moment se zmenší se čtvercem napájecího napětí. [2]

Na začátku rozběhu jsou odpory nastaveny na největší úrovni. Napětí na svorkách motoru je ze začátku na minimu a pak se postupně zvyšuje. Předřadný odpor se zmenšuje a moment roste rychleji než v zapojení hvězda-trojúhelník, kde je napětí konst. po celou dobu zapojení do hvězdy. [16]

Satorový spouštěč je vhodný zejména tehdy, jestliže chceme dosáhnout jemný záběr motoru rozbíhajícího se s malým zatížením. Při rozběhu se odpory postupně vyřadí a motor je po rozběhu zapojen na plné napětí. [2]

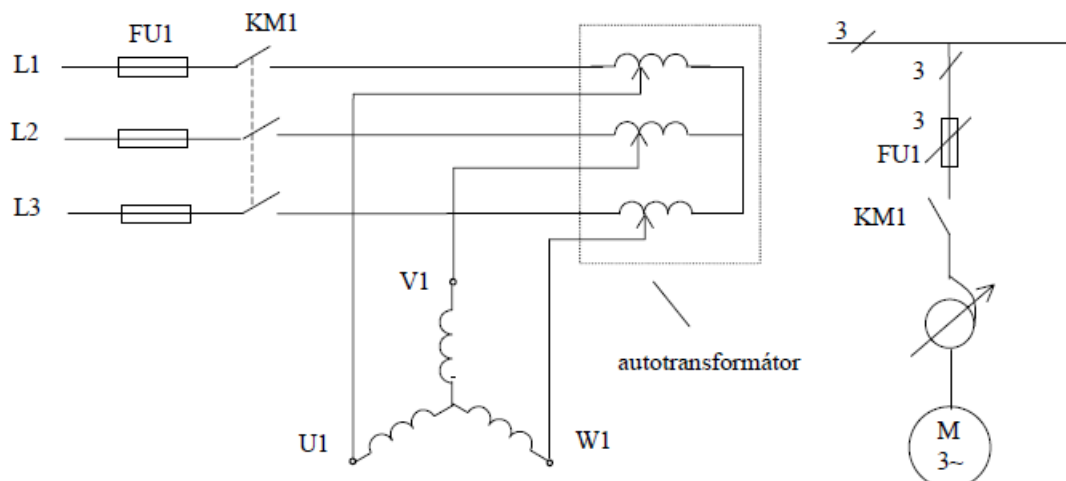


Obr. 3.6 Spouštění motoru se satorovým spouštěčem: a) trojpólové schéma, b) jednopólové schéma [9]

3.2.1.3 Sníženým napětím - autotransfornátorem

Větší motory, které vyžadují větší zmenšení záběrného proudu, než jaké umožňuje přepínač Y/D, se připojují k síti přes jednoduchý autotransfornátor, který má podle potřeby několik sekundárních odboček, obvykle na 50,65 % a 80 % závitů. Autotransfornátor je obdobou spouštění statorovým spouštěčem s tím rozdílem, že velikost napětí při spouštění se reguluje autotransfornátorem zapojeným do série se statorovým vinutím. Po rozběhu se autotransfornátor vyřadí, z tohoto důvodu se může použít levnější autotransfornátor, který se během rozběhu značně přetíží. Motory mají kvadraticky zmenšený záběrný proud a jemu úměrný kvadraticky zmenšený moment $M \sim U^2 \Rightarrow$ ztrátový rozběh.

Spouštěcí autotransfornátor se používá velmi zřídka. [2]



obr. 3.7 Spouštění motoru spouštěcím autotransfornátorem, zleva trojpólové schéma (KM1 - síťový stykač), jednopólové schéma [9]

3.2.1.4 Sníženým napětím - Softstartérem

Metoda spouštění motoru pomocí softstartéru (obr. 3.9) je odlišná, než předchozí způsoby.

Jedná se o polovodičový fázově řízený měnič střídavého napětí - elektronický rozběhový člen, který má ve fázi instalované dva anti-paralelně řazené tyristory, které jsou ovládány řídicí deskou a umožní řízený pozvolný rozběh AM, při kterém dochází k výraznému snížení záběrného proudu a momentu. [4]

Samotná regulace je napěťová, tj. řídicí deska softstartéru postupně zvyšuje/snižuje nastavenou efektivní hodnotu napětí ve fázích a to po obsluhou nastavenou dobu.

Využívá se principu, že napětí na svorkách motoru během startu je nízké a tudíž i rozběhový proud a moment. [10]

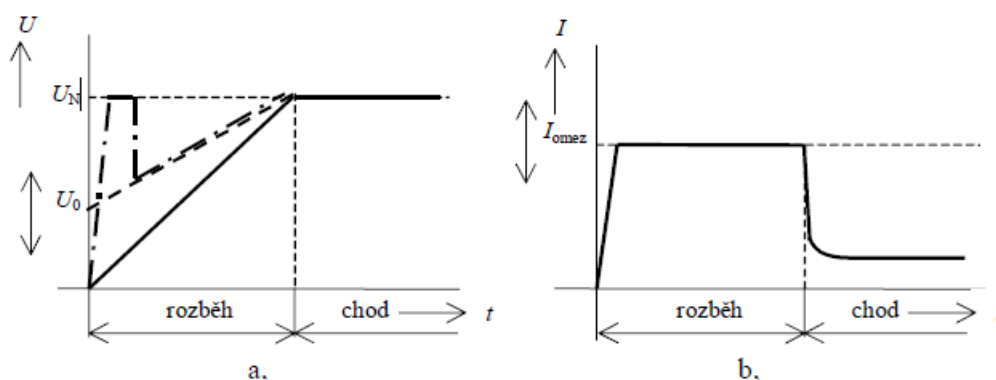
Řízením okamžiku sepnutí antiparalelně zapojených tyristorů se dosáhne postupného zvyšování/snižování efektivního svorkového napětí motoru, dochází k postupnému zvětšení/snížení momentu na hřídeli motoru a postupnému zvýšení/snížení síťového proudu motoru a jeho otáček. Při rozběhu se postupně mění řídicí úhel otevření od úplného zavření až do úplného otevření jednotlivých tyristorů. Díky antiparalelnímu zapojení tyristorů je na svorkách motoru sinusové napětí. Rozběh a doběh motoru tímto způsobem je plynulý. [17]

Obecně lze říct, že softstartér použijeme tam, kde je velký záběrový proud, který potřebujeme omezit, nebo tam, kde vysoký záběrový moment způsobuje trhání, rázy či jiné mechanické problémy. Někdy ale použijeme provedení softstartérů umožňující na počátku rozběhu krátkodobé dosažení vyššího momentu motoru. [10]

Mnohá poháněná zařízení potřebují při rozběhu překonat velké odpory a po překonání těchto odporů pomalu zvyšovat otáčky. To je možné v režimu kick-start (Obr. 3.8-a), na několik set ms se plně otevře střídavý měnič napětí a na motor se připojí plné napájecí napětí ze sítě. Tím motor vyvine maximální moment při záběru, poté se napětí měniče sníží na startovací hodnotu a po "rampě" postupně dosáhne plné velikosti. [17]

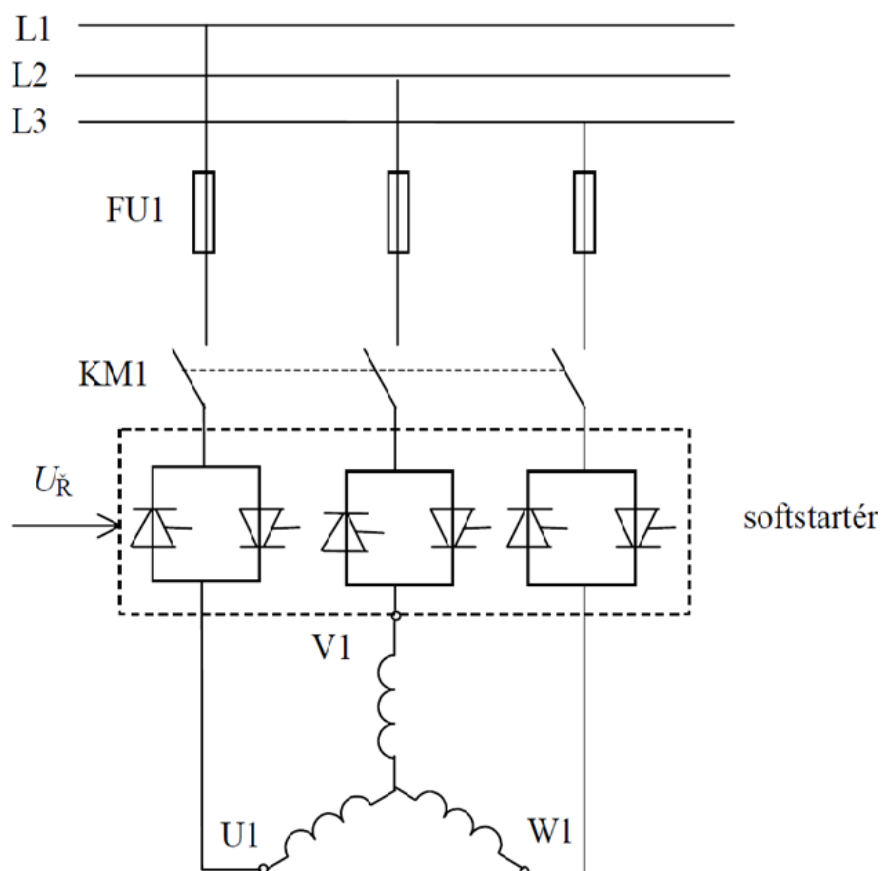
Zvláště výhodné je použití softstartérů u čerpadlových (např. regulace topení) a ventilátorových aplikací, princip tohoto polovodičového měniče je např. využíván v zařízení pro stmívání osvětlení. V neposlední řadě u aplikací přepravy materiálu pomocí dopravníkových pásů, kde řízení doběhu využíváme k prevenci zničení přepravovaného materiálu díky rychlému zastavení. [10]

Řízení rozběhu se může také provádět nastavením konstantního proudu motoru (proudovým omezením) během rozběhu (Obr. 3.8-b). [4]



Obr. 3.8 a) rozběh motoru se skokovým napětím (kick-start) - čerchovaně, s plynulým rozběhem - plná čára b) rozběh s proudovým omezením [4]

Po rozběhu se softstartér odpojí, přemostí tzv. bypassem, který snižuje ztrátový výkon softstartéru po ukončení rozběhu.



Obr. 3.9 Spouštění motoru polovodičovým řízeným měničem napětí. (KM1 - síťový stykač, $U_{\text{Ř}}$ - řídicí napětí) [4]

3.2.2 Spouštění roztáčecím motorem

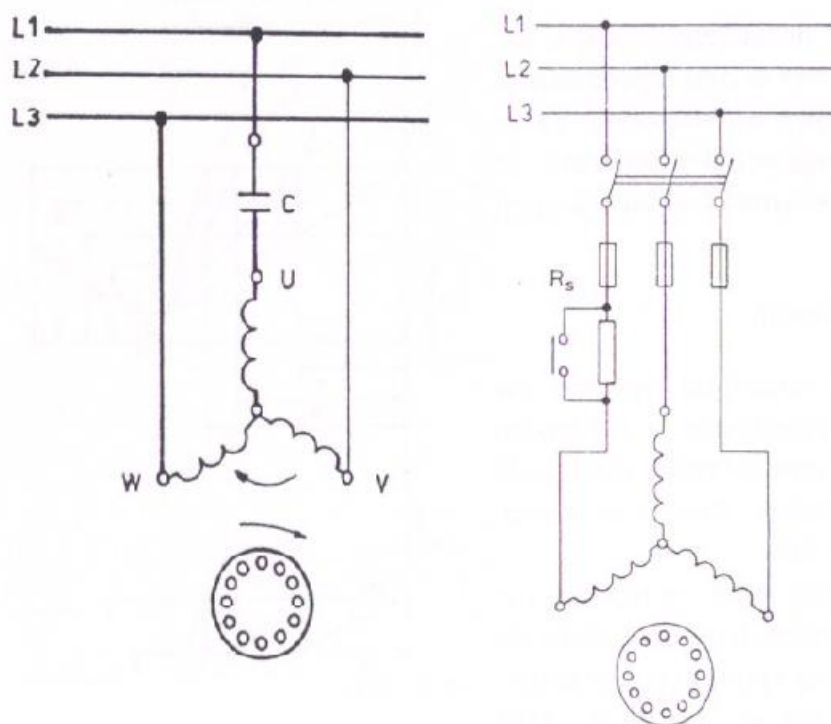
Tento způsob se používá pro spouštění velkých motorů. Motor, který chceme připojit k síti nejprve roztočíme před připojením na síť malým motorem na přiměřené otáčky. Jestliže mají oba motory stejný počet pólů, potom se otáčky ustálí pod hranicí synchronních otáček. Následně se hlavní motor připojí k síti a roztáčecí motor se odpojí od sítě. [2]

Nevýhodou je, že proudový náraz může vzniknout i přes dostatečně velké otáčky, a to vlivem přechodného jevu při vzniku točivého magnetického pole statoru. To se odstraňuje vhodnými zapojeními obou motorů. Tento způsob je vhodný pro velké výkony, tzn. 3 až 6 MW. [2]

3.3 Snížení záběrného momentu

3.3.1 Jemný rozběh s asymetrickým spouštěčem

U některých poháněných aplikací se stroje nesmějí spouštět s prudkým nárazem, jedná se např. o textilní stroje. Pro spouštění motoru s asymetrickým spouštěčem se rozběhový rezistor nebo tlumivka zapojí jen do jedné fáze statorového vinutí (Obr. 3.10-vpravo). Tímto spouštěním se dosáhne malého záběrného momentu (nikoliv však malého záběrného proudu), minimálního počátečního zrychlení a pomalého vzrůstu otáček až do ustáleného stavu. Po rozběhnutí se tento odpor překlene např. stykačem. [2]



Obr. 3.10 Zleva: hrubý rozběh s nesouměrným zapojením kondenzátoru, spouštění motoru s rezistorem zapojeným v jedné fázi [2]

3.3.2 Hrubý rozběh s asymetrickým spouštěčem

U zařízeních s velkým zátěžným momentem jako jsou např. jeřáby a odstředivky poháněné indukčními motory je potřeba pro rozběh vyvinout velký záběrný moment. V ustáleném stavu naopak potřebují jen malý výkon a moment. Těchto parametrů lze dosáhnout strojem i malého výkonu, při zařazení spouštěcího kondenzátoru do jedné fáze statorového vinutí (Obr. 3.10-vlevo). Lze použít i transformátor zapojený mezi dvě fáze. [2]

3.4 Snížení záběrného proudu při rozběhu a zvýšení záběrného momentu

3.4.1 Spouštění dvojmotorovým rozběhem

Pro zmenšení proudového nárazu a zvětšení záběrného momentu byl navržen dvojmotor (podle Boucherota), jehož odpor klece se při rozběhu zvětšuje zařazováním dvou motorů proti sobě. Jedná se o dva motory na společné hřídeli se dvěma ložisky. Ve společné kostře jsou dva statory, jeden pevný a druhý, který se může pootočit pomocí šroubového převodu o celou pólovou rozteč. Oba rotory jsou na společné hřídeli, společné tyče jsou uprostřed

spojeny odporovým kruhem nakrátko (konce tyčí obou klecí jsou spojeny vodivými kruhy nakrátko). Motor se rozbíhá tak, že se k síti připojí současně oba statory (pootočený jsou proti sobě o 180° el.). Proto jsou proudy indukované v kotvě v protifázi a uzavírají se středním odporovým kruhem, takže motor má při rozběhu velký odpor, malý záběrný proud a velký záběrný moment. [2]

3.4.2 Spouštění proměnou frekvencí

Frekvenční měnič někdy také nazývaný VSD (Variable speed drive), nebo VFD (Variable Frequency Drive) je taktéž velmi častým prostředkem připojení motoru k síti.

Protože otáčky motoru jsou závislé na frekvenci, umožňuje frekvenční měnič regulovat otáčky motoru pomocí změny výstupní frekvence. Využití frekvenčního měniče je tedy, když je potřeba regulace rychlosti motoru během trvalého provozu. [10]

V mnoha aplikacích je frekvenční motor stále používán pouze jako prostředek k řízenému startu a zastavení navzdory skutečnosti, že není žádná potřeba regulace otáček motoru během provozu. [10]

Řízením výstupní frekvence dosahuje jmenovitý moment na hřídeli motoru vysokých hodnot i u nízkých otáček motoru. Rozběhový proud motoru je taktéž výrazně omezen a pohybuje se kolem 0,5-1 násobku proudu jmenovitého. [10]

U motoru můžeme pomocí frekvenčního měniče docílit "dokonalého" startu i zastavení. V případě použití inkrementálního čidla u motoru, který reguluje frekvenční měnič docílujeme maximálního momentu i při nulových otáčkách motoru. Inkrementální čidlo zajišťuje zpětnou vazbu o přesných otáčkách motoru. [10]

U frekvenčních měničů je nezbytné použití filtrů k redukci vyšších harmonických generovaných frekvenčním měničem. [10]

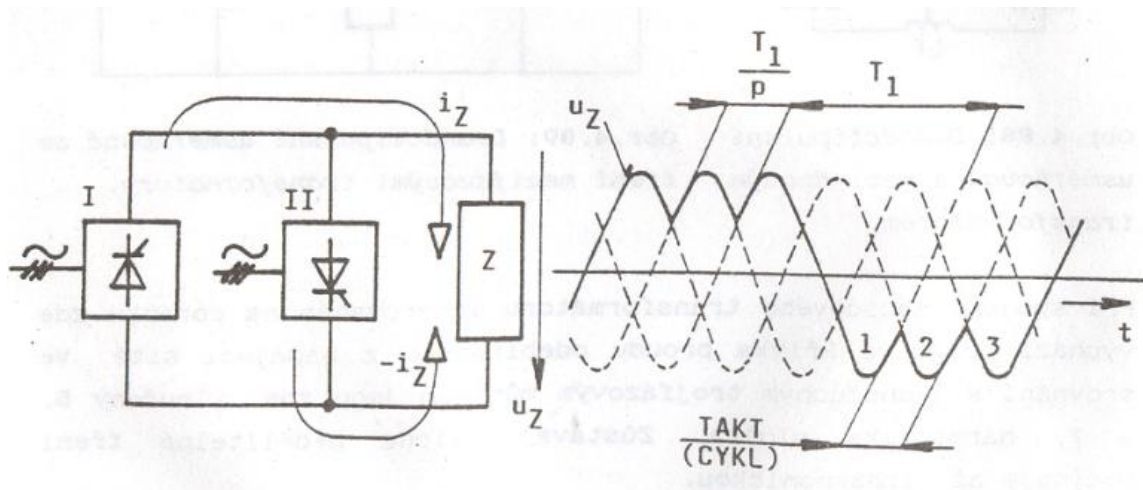
Frekvenční řízení je řízení pomocí regulace tzv. točivého magnetického pole. Je to řízení v přímé úměře. Je hospodárné, bezztrátové a plynulé. Jako zdroj proměnné frekvence je frekvenční měnič, které jsou většinou složené z tyristorů nebo nověji z tranzistorů.

Měniče se vyrábí ve dvojím základním provedení. Jedná se o přímé měniče kmitočtu a nepřímé měniče kmitočtu. Přímé měniče kmitočtu se dělí na maticové a cyklokonvertory.

3.4.2.1 Přímý měnič kmitočtu

U těchto měničů se křivka výstupního napětí vytváří přímo z částí křivek trojfázového (více fázového napětí) o kmitočtu zpravidla 50 [Hz]. Vhodně řízené čtyřkvadrantové spojení

usměrňovačů (antiparalelní spojení 2 usměrňovačů) je v podstatě jednofázový přímý měnič kmitočtu. [6]



Obr. 3.11 Jednofázový měnič kmitočtu [6]

Usměrňovač I a II čtyřkvadrantového měniče se periodicky střídají v činnosti a tím se na zátěži vytváří střídavé jednofázové napětí. Výstupní kmitočet se mění s počtem taktů (cyklů) mezi střídáním činnosti jednotlivých usměrňovačů. Na (Obr. 3.11) je vidět střídání usměrňovačů po třech cyklech. Můstkový usměrňovač je 6 pulzní, max. počet cyklů je 6, záleží na tom, jak dlouho ho nechám pracovat.

Výstupní kmitočet je možné pouze snižovat. Maximální výstupní kmitočet trojfázových cyklokonvertorů je 25 [Hz]. [6]

Tyto měniče se používají pro velké výkony až 10 [MW], pro napájení čerpadel, lomových mlýnů atd.

Pro trojfázovou rozdílnou zátěž se může měnič skládat až z 36 tyristorů (6 můstků, 3x antiparalelní spojení 2 usměrňovačů). Nejsou-li jednotlivé fáze zátěže oddělené (spojení Y nebo D) je třeba použít transformátor se třemi sekundáry (symetrické spojení s rozděleným napájením) [6]

3.4.2.2 Nepřímý měnič kmitočtu

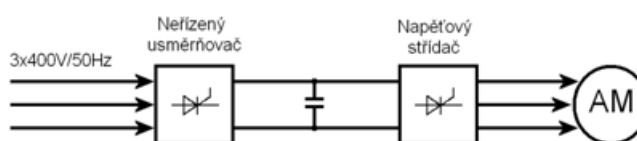
Samotný frekvenční měnič se skládá ze dvou částí. První konvertuje frekvenci sítě AC (50-60Hz) na frekvenci DC a druhou, konvertující frekvenci DC zpět na AC, tu ale s frekvencí proměnlivou mezi 0-250 Hz. [10]

Vytvářím z jedné frekvence druhou s mezi obvodem. Vstupní střídavé napětí je nejprve usměrněno, nejčastěji diodovým usměrňovačem, poté následuje stejnosměrný mezi obvod

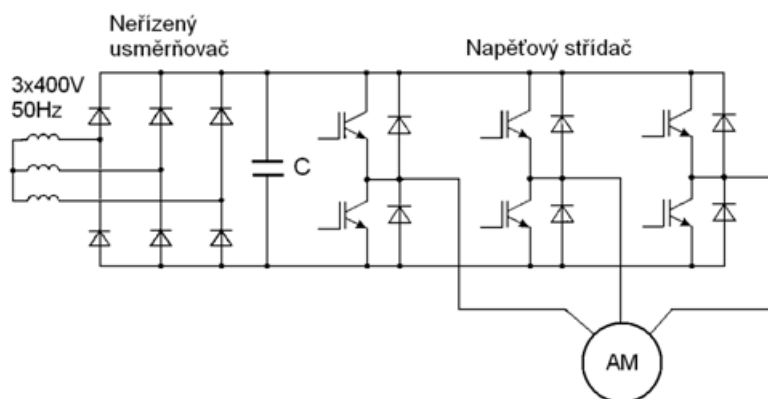
buď napětového typu s filtračním kondenzátorem, nebo proudového typu s filtrační tlumivkou a poté je ve střídači formována trojfázová soustava s proměnnou frekvencí a efektivní hodnotou napětí. Proměnná frekvence nabývá nejčastěji hodnot 0 - 3 kHz. Výstupní frekvence je omezená rychlostí polovodičových prvků (tyristory, výkonové tranzistory).

Střídač je proveden 1. nebo 3. fázově, můstkové nebo uzlové zapojení.

Oba dva díly frekvenčního měniče (střídač, usměrňovač) lze provést v 4. kvadrantovém provedení. Tyristory, tranzistory jsou řízené a je možné prohodit funkce usměrňovače a střídače, tzv. rekuperace (při brzdění motoru mohou vrátit energii zpět do sítě).



Obr. 3.12. Blokové schéma nepřímého měniče kmitočtu s napětovým střídačem, bez možnosti brzdění a rekuperace. [18]



Obr. 3.13 Skutečné schéma nepřímého měniče kmitočtu s napětovým střídačem, bez možnosti brzdění a rekuperace. [18]

Měniče kmitočtu umožňují plynulou změnu výstupního kmitočtu v širokém rozsahu a tomu odpovídající rychlost AM.

3.4.2.2.1 Skalární řízení měniče kmitočtu

Skalární řízení, tj. řízení otáček změnou úhlové rychlosti točivého magnetického pole. Jedná se o kmitočtové řízení otáčivé rychlosti motoru. Do určité rychlosti se dá řídit při

konstantním poměru napětí a kmitočtu na vstupu AM, tudíž při konstantním magnetickém toku motoru pro kmitočty v rozmezí 0 - 50 Hz. [18]

$$s = \frac{f_1 - f}{f_1} \quad (3.2-6)$$

Při řízení musí platit rovnice indukovaného napětí:

$$U_i = 4,44 \cdot N \cdot B \cdot S_{Fe} \cdot f \cdot k_V \quad (3.2-7)$$

a) Oblast konstantního momentu ($0 < f < f_0$), ($\Psi_1 = \text{konst.}$ a $I_1 = \text{konst.}$ a $R_1 = 0$)

$$U_1 = \frac{d\Psi_1}{d_t} = k f_1 \Psi_1 \Rightarrow \Psi_1 \approx \frac{U_1}{f_1} = \text{konst.} \quad [18] \quad (3.2-8)$$

$$M = \Psi_1 \cdot I_1 = \text{konst.}, P = U_1 \cdot I_1 \neq \text{konst.} \quad [18] \quad (3.2-9)$$

V oblasti nižší než 50 Hz se frekvence zvyšuje (snižuje) spolu s napětím, tím je dodržen konstantní poměr $U/f = \text{konst.}$

Kdybychom nechali napětí konstantní a zvyšovali jen frekvenci, tak podle zachování rovnosti rovnice (3.2-7) se začne zmenšovat mag. indukce $B \downarrow \rightarrow H \downarrow \rightarrow M \downarrow$. Moment by nebyl v rozsahu 0-50 Hz konstantní, proto se do 50 Hz zvyšuje spolu s momentem i napětí. Toto platí u sítě 230/400V.

Tvar momentových charakteristik zůstává zachován s tím, že jednotlivé charakteristiky pro různě velké kmitočty jsou posunuty, jak je vidět na (obr.3.14-dole). Velikost maximálního momentu je konstantní (obr.3.14- nahoře). [3]

b) Oblast konstantního výkonu ($f > f_0$), ($U_{1i} = U_1 = \text{konst.}$ a $I_1 = \text{konst.}$ a $R_1 = 0$)

$$U_1 = \frac{d\Psi_1}{d_t} = k f_1 \Psi_1 \Rightarrow \Psi_1 \approx \frac{U_1}{f_1} \neq \text{konst.} \quad [18] \quad (3.2-10)$$

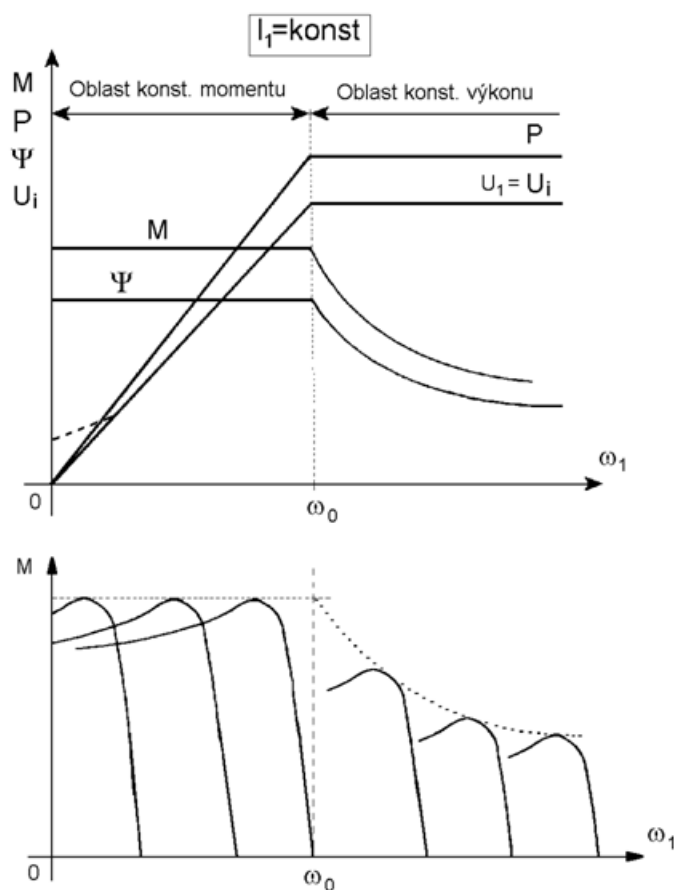
$$M \approx \Psi_1 \cdot I_1 \Rightarrow M \approx \frac{1}{f_1} \neq \text{konst.}, P = U_1 \cdot I_1 = \text{konst.} \quad [18] \quad (3.2-11)$$

V oblasti kmitočtů vyšších než 50 Hz nelze již dodržet konstantní poměr U/f , platí pro síť 230/400V, jestliže by jsme měli zdroj vyššího napětí než 400V, tak bychom mohli dodržet konstantní poměr U/f .

Řízení se provádí při konstantním napájecím napětím a proto zde rovněž dochází k poklesu momentu. [4]

c) Vlastnosti skalárního řízení

- Umožňuje jednoduchým způsobem řídit otáčky střídavých strojů.
- Zajišťuje chod v optimálních podmínkách pouze v ustáleném stavu.
- Neumožňuje dosáhnout špičkových parametrů takto řízeného pohonu.
- Většina průmyslových aplikací používá skalární řízení [18]



Obr. 3.14 Průběh momentů a výkonů na frekvenci. [18]

3.4.2.2.2 Vektorové řízení

Princip vektorového řízení asynchronního motoru spočívá v odděleném řízení spřaženého magnetického toku motoru a jeho vnitřního momentu. Praktická realizace potom spočívá v rozkladu prostorového vektoru statorového proudu na dvě navzájem kolmé složky I_d , I_q , které určují magnetizaci stroje a jeho moment a souvisí tedy s jalovým a činným výkonem stroje. [18]

Charakteristické vlastnosti vektorového řízení:

- nepřímé měření a řízení momentu a magnetického toku
- výpočet M a Ψ je pomocí matematického modelu. Výpočet probíhá na základě veličin, které lze technicky jednoduše měřit (statorový proud, napětí, otáčky)
- vysoká dynamika a přesnost regulace pohonu
- umožňuje provoz v optimálních podmínkách v ustáleném stavu i během přechodových jevů
- regulační vlastnosti pohonů s vektorovou regulací odpovídají vlastnostem stejnosměrného stroje s cizím buzením
- při vysoké spínací frekvenci (20kHz) má pohon malé momentové vibrace [18]

Vektorové řízení lze rozlišit podle orientace souřadného systému:

- řízení orientované na statorový magnetický tok
- řízení orientované na rotorový magnetický tok
- řízení orientované na hlavní magnetický tok [18]

3.4.3 Spouštění se speciálními klecemi

3.4.3.1 Odporová klec

Odporové klece se používají u jeřábových a výtahových motorů, kde je velký záběrný moment, který je zvláště důležitý. Tento moment je větší, než kterého může dosáhnout normální klec.

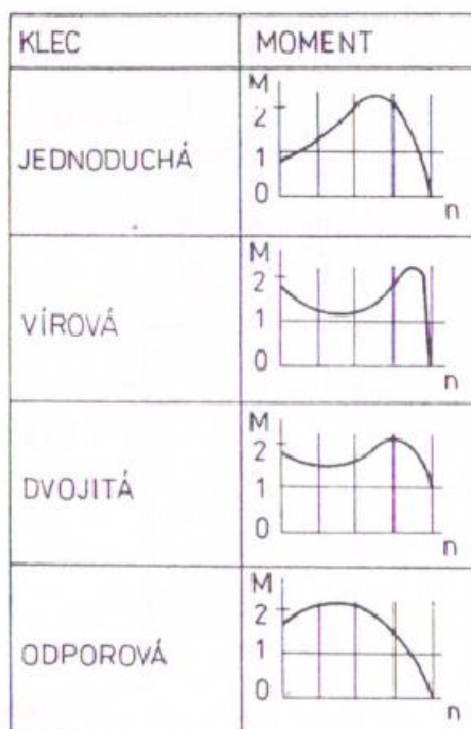
Odporová klec má tyče i kruhy zhotovené z materiálu o větším měrném odporu např. mosazi, siluminu, nebo jsou tyče zhotoveny z mědi a spojovací kruhy jsou z mosazi. Většímu odporu

rotorového obvodu odpovídá větší záběrný moment, ale současně i větší skluz a horší účinnost motoru. [2]

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

Zmenšení odporu zmenšením samotného průřezu není vhodné, neboť menšímu průřezu odpovídá menší tepelná kapacita a tím i větší oteplení. [2]

Momentová charakteristika s odporovou klecí je na (Obr. 3.15)



Obr. 3.15 Typické průběhy momentové charakteristiky pro různé druhy klecí [2]

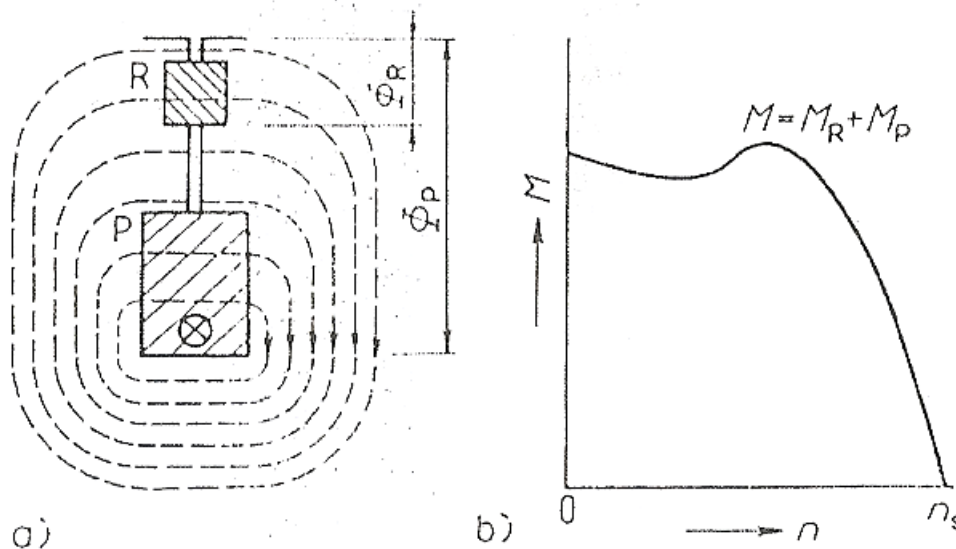
3.4.3.2 Dvojitá klec

Dvojitá klec (Boucherot) má dvě soustavy tyčí nestejného průřezu nad sebou nebo vedle sebe. Tyto tyče jsou spolu spojeny vodivými kruhy (Obr. 3.16a).

Touto klecí dosáhneme zvětšení záběrného momentu a zmenšení záběrného proudu, bez zhoršení účinnosti motoru. [2]

Klec se skládá z rozběhové klece R a pracovní klece, která je hluboko v železe rotoru. Tyč pracovní klece je spřažena s plným rozptylovým magnetickým tokem Φ_P , tyč rozběhové klece je spřažena jen s jeho malou částí Φ_R . Při rozběhu, kdy prochází tyčemi proud síťového kmitočtu, je reaktance spodní tyče mnohonásobně větší než reaktance horní tyče. [2]

Rotorový záběrný proud se do obou tyčí rozdělí nepřímo úměrně impedancím. Jeho větší část prochází horní rozběhovou klecí, která má menší průřez, horší měrnou vodivost tudíž větší odpor a chová se jako odporová klec. Motor má při rozběhu větší moment a menší proud. [2]



Obr. 3.16 Dvojitá klec

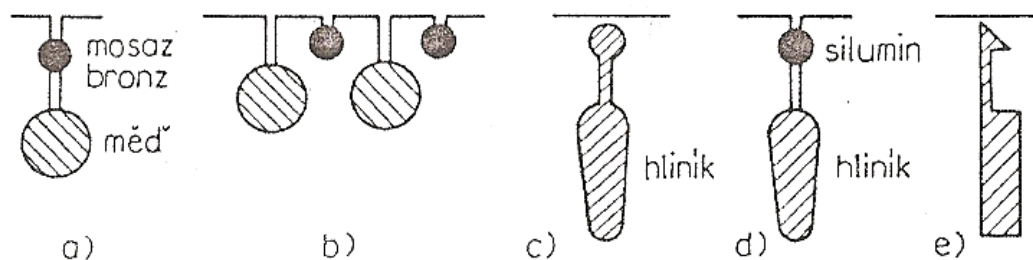
a) vysvětlení funkce, b) momentová charakteristika [2]

Po rozběhnutí motoru (za chodu) je malý skluzový kmitočet, reaktance tyčí je nepatrná a proud je rozdělen do obou tyčí nepřímo úměrně jejich odporům. Motor se chová jako motor s jednoduchou klecí. [2]

Momentová charakteristika se získá sečtením charakteristiky pracovní (M_P) a rozběhové klece (M_R).

Úpravou tyčí dvojitě klece můžeme momentovou charakteristiku motoru ovlivnit v širokých mezích a přizpůsobit potřebám stroje. [2]

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



Obr. 3.17 Úprava tyčí dvojité klece [2]

Původní dvojité klece měly kruhové měděné tyče, rozběhové tyče byly z bronzu nebo z mosazi (obr. 3.17). Hliníkové klece mají tyče podle obr. 3.17c.

Motory nad 50 kW mají rozběhové tyče ze siluminu, který má větší měrný odpor a určuje tyčím větší průřez s větší tepelnou kapacitou (obr. 3.17d). Z výrobních důvodů mohou mít tyče tvar podle obr.3.17e, drážky se mohou vyrobít pomocí silnějších a trvanlivějších přípravků. [2]

Vzduchová mezera musí být mezi oběma tyčemi proto, aby se celý rozptylový magnetický tok neuzavíral jen kolem horní tyče. [2]

Dnes se dělají motory na 4 kW jen s dvojitou klecí.

3.4.3.3 Vírová klec

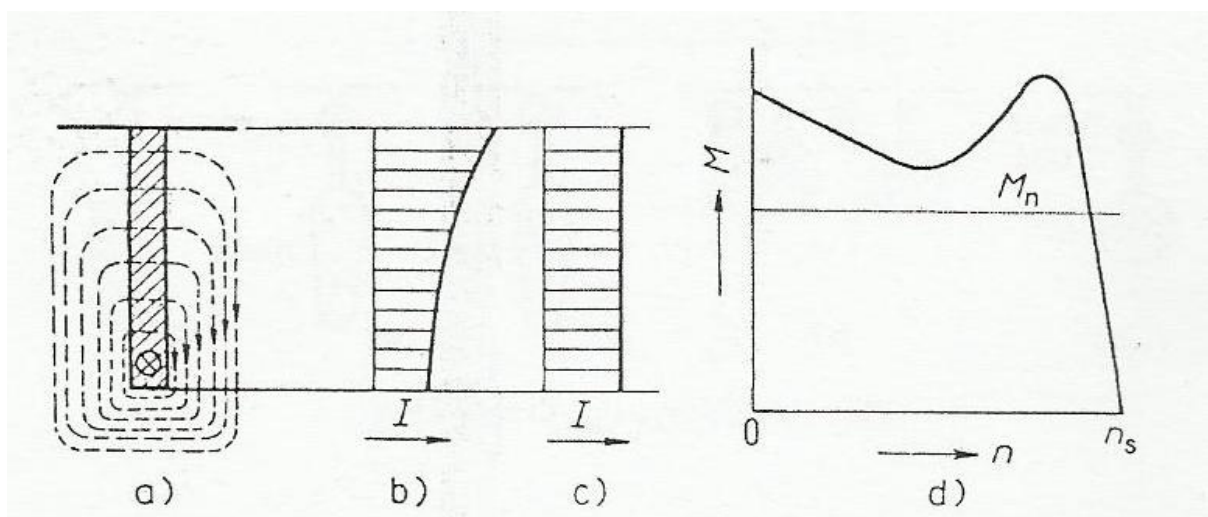
Vírová klec má tyče uloženy v úzkých a hlubokých drážkách. Virovou klecí lze dosáhnout zmenšení záběrného proudu a zvětšení záběrného momentu jako u klece dvojité.

Spodní vlákna vysoké tyče jsou spřažena s větším rozptylovým magnetickým tokem než horní vlákna tyče, takže při rozběhu mají větší reaktanci a proud se z nich vytlačuje do horních vrstev. Proud tedy prochází menším průřezem a klec se chová jako odporová. Za chodu se proud rozdělí téměř rovnoměrně po celém průřezu podle (Obr. 3.19).

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

Obvyklý průběh momentu je na obr. 3.18d.

Motory s vírovou klecí se používají zejména pro větší výkony, vysoká napětí a poměrně menší požadované záběrné momenty. [2]

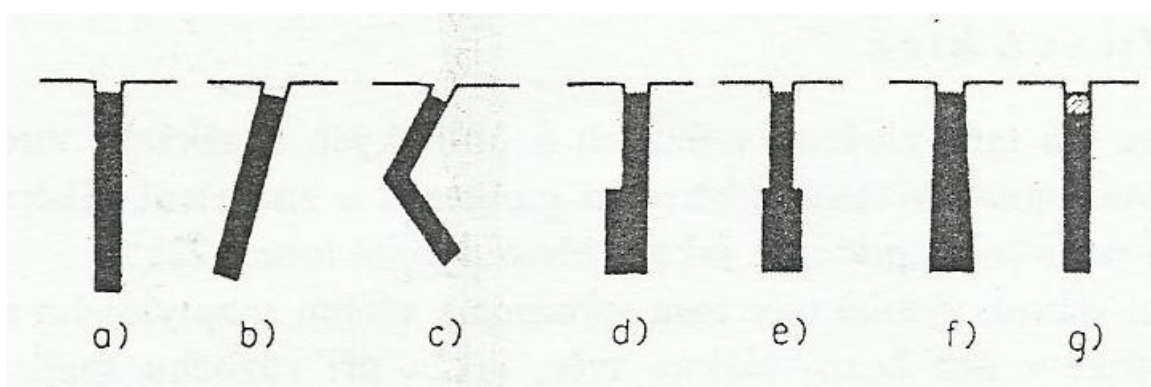


Obr. 3.18 Vírová klec

a) rozložení indukčních čar, b) rozložení proudu při rozběhu, c) rozložení proudu za chodu, d) momentová charakteristika vírové klece [2]

Tyče mají různé tvary znázorněné na (Obr. 3.19).

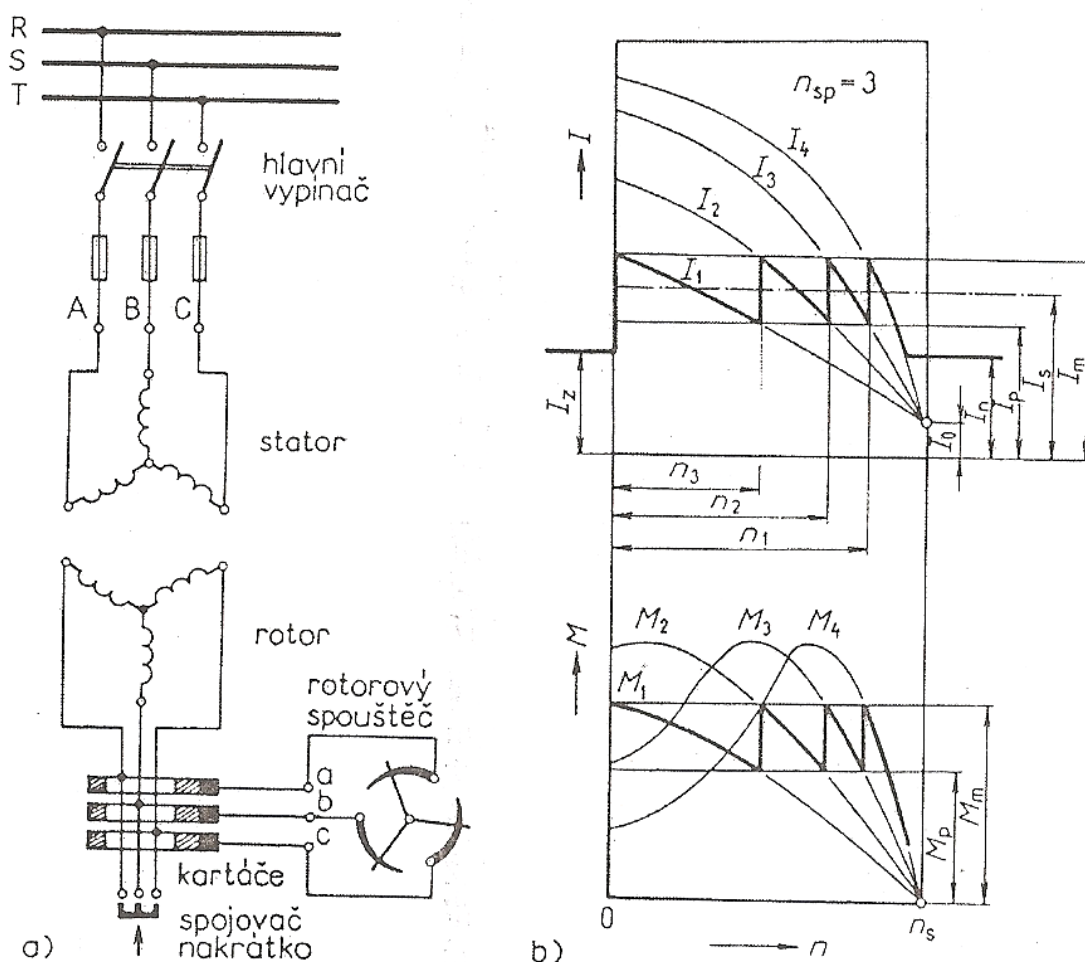
Zúžení profilu v horní části má zvětšit činný odpor za rozběhu. Stejného účinku lze dosáhnout ještě výhodněji kombinací tyčí s nestejným měrným odporem (Obr. 3.19g). Tyče mohou mít i různé mechanické vlastnosti. Klínový tvar podle (Obr. 3.19f) se zvláště hodí pro rychloběžné motory, neboť se odstředivou silou neuvolňuje. [2]



Obr. 3.19 Tvary tyčí vírové klece [2]

3.4.4 Spouštění s vinutou klecí

Rotor kroužkového motoru má normální trojfázové vinutí, obvykle trvale spojené do hvězdy. Začátky vinutí jsou připojeny ke třem sběracím kroužkům, na které dosedají tři uhlíkové kartáče, zapojené na rotorovou svorkovnici (a,b,c). Prostřednictvím sběracího mechanismu můžeme do rotorového obvodu zapojit vhodný spouštěcí odpor, kterým se dá libovolně zmenšit záběrný proud a zvětšit záběrný moment až na moment zvratu. Obvykle se na rotorovou svorkovnici připojuje rotorový spouštěč, tvořený třemi skupinami odporů. Velikost zapojeného odporu se během spouštění postupně zmenšuje, až po skončení rozběhu je v poslední poloze úplně vyřazen a rotorové vinutí se spojí nakrátko (Obr. 3.19). [2]



Obr. 3.19 Kroužkový motor: a) schéma, b) průběh spouštění [2]

4. Měření záběrných proudů

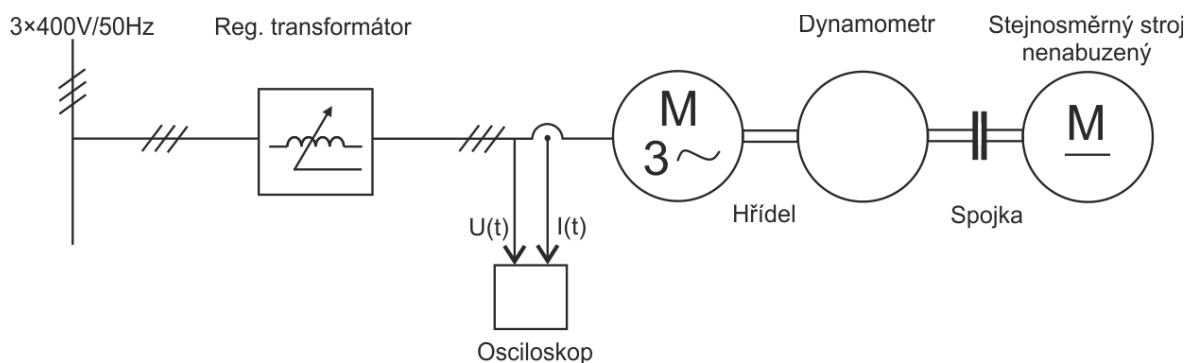
Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, záběrný proud se musí omezovat z různých důvodů. Nejdříve je nutné dané proudy změřit a správně vyhodnotit, a poté podle daných výsledků použít danou metodu pro omezení záběrných proudů.

V této části bakalářské práce se zaměřím na měření a vyhodnocení záběrného proudu daného asynchronního motoru. Budu měřit záběrné proudy, nebo se dá také říci proud nakrátko, obojí je totéž, různými způsoby. Záběrný proud protéká motorem v prvním okamžiku připojení k síti, než se stroj rozběhne. Z toho plyne, že v prvním okamžiku připojení motoru na síť se jedná o motor nakrátko.

Štítek asynchronního motoru:

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

4.1 Schéma zapojení měřeného motoru a popis jednotlivých prvků



Obr. 4.1 Schéma zapojení

Jak je vidět ze schématu (obr. 4.1), asynchronní motor byl k trojfázové síti připojen přes regulační transformátor, na kterém se nastavovala daná hodnota napětí pro jednotlivá měření.

Z osciloskopu byly vedeny dvě sondy, napěťová sonda se připojila na svorku jedné fáze motoru a proudová sonda se přiložila kolem vodiče spojující AM s regulačním transformátorem té samé fáze, kde byla připevněna napěťová sonda. Tímto jsme byli schopni zaznamenat průběh napětí a proudu, které AM odebíral.

Dále byl na hřídeli upevněn torzní dynamometr, který v tomto měření neměl podstatný vliv. Ovlivňoval jen max. velikost napájecího napětí AM, které jsme mohli použít, aby nedošlo k mechanickému poškození dynamometru. Napájecím napětím je dán moment motoru, který při zabrzděném rotoru působí přímo na dynamometr. Moment, který dynamometr vydrží, je omezen. Toto omezení jsme dodrželi omezením napájecího napětí.

Za dynamometrem byl na té samé hřídeli připojen stejnosměrný motor, který se při měření nakrátko neuplatňoval, jelikož byla použita mechanická brzda. Při měření naprázdno byl stejnosměrný motor nenabuzen.

Podrobně popsané použité přístroje jsou uvedeny v příloze 5.

4.2 Měření č.1.: Měření záběrových proudů

Toto měření spočívá připojením nezatíženého motoru na síť. Po dobu cca 3s od startu motoru byly zaznamenávány osciloskopem všechny hodnoty proudu v závislosti na čase. Tento časový interval je dostačující z hlediska vzniklého přechodového děje, který se vždy ustálil do 2s. Snímaný časový interval je také omezen pamětí osciloskopu, který musí každou změřenou hodnotu zaznamenat. Počet hodnot závisí na vzorkovací frekvenci. Vzorkovací perioda námi používaného osciloskopu byla při měření proudu nastavena na 1ms a udává časový rozestup hodnot změřených osciloskopem. Měřením jsme schopni zaznamenat velikost prvního proudového impulsu, který by měl odpovídat velikosti proudu nakrátko, pro dané připojené napětí. Měření se provádělo postupně pro malá napětí, které se následně se zvětšovalo. V našem případě byl motor spojen se stejnosměrným nenabuzeným motorem přes torzní dynamometr. Z toho důvodu jsme měřili jen do $U_s = 250 V$, abychom zabránili mechanickému poškození dynamometru. Pro každé měření se nejdříve nastavila hodnota napětí na zdroji, poté se zapnulo vzorkování osciloskopu a následně motor. Při rozběhu motoru došlo vždy k poklesu napětí. Napětí na motoru při rozběhu je tedy dáno nastaveným napětím, od kterého odečteme hodnotu, rovnu poklesu napětí. Po spuštění motoru, jsme sledovali nastavenou hodnotu napětí, a zaznamenali vždy nejmenší hodnotu při poklesu. Po

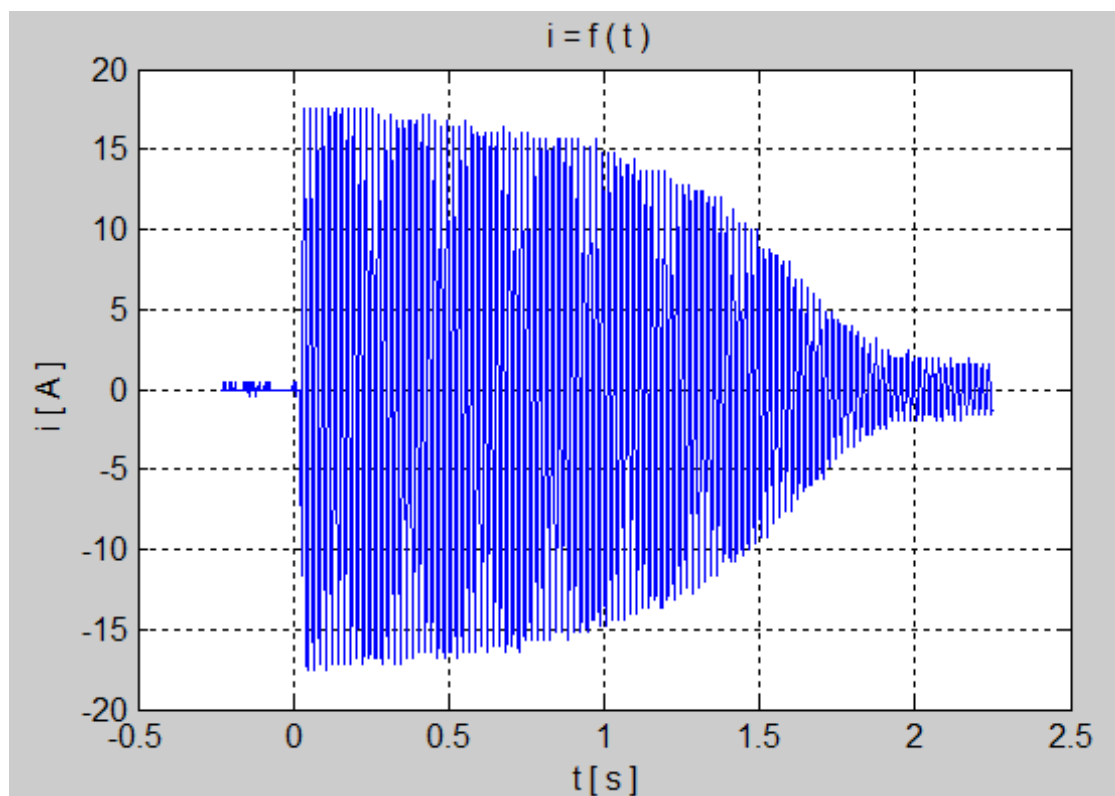
rozběhnutí motoru se vzorkování zastavilo a motor se odpojil od sítě. Vše se opakovalo pro jednotlivá napětí.

4.2.1 Tabulky naměřených hodnot

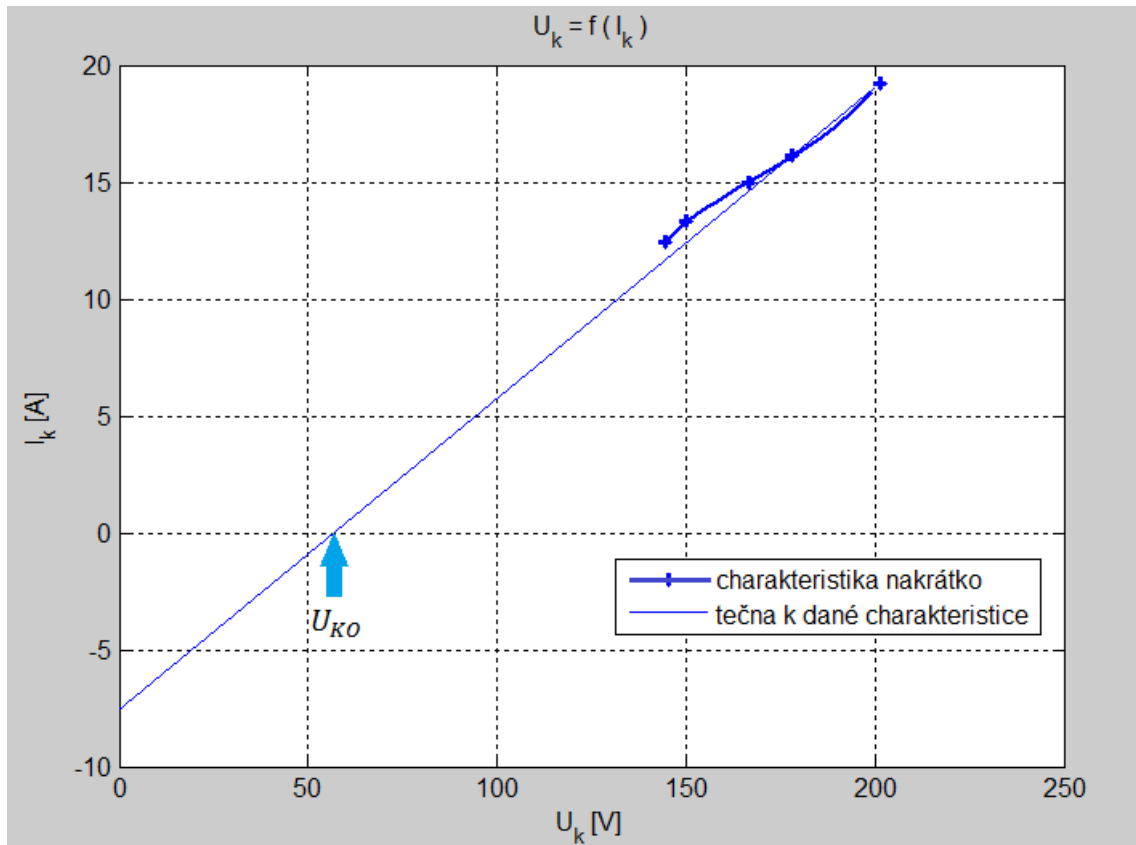
U_f [V]	I_z [A]
144,33	12,45
150,11	13,29
166,65	14,99
178,20	16,10
201,30	19,00

tab. 4.1 Asynchronní motor naprázdno - rozběh

4.2.2 Grafy



Graf 4.1 Průběh proudu v závislosti na čase pro napájecí napětí $U_s = 250$ [V]

Graf 4.2 Charakteristika nakrátko s tečnou pro odečet U_{K0}

4.2.3 Zpracování hodnot

Z každého měření pro dané napětí U_f (fázové napětí) jsme zaznamenali nejvyšší hodnotu proudu (tab. 4.1), jedná se o fázový proud v jedné fázi motoru.

Z navzorkovaných hodnot proudu se vybere ta největší a vydělí odmocninou ze dvou, pro získání efektivní hodnoty (osciloskop vzorkuje okamžité hodnoty). Samotná realizace je uvedena v příloze 4. Z naměřených hodnot (tab. 4.1) se sestrojí charakteristika nakrátko (Graf 4.2). Předpokládáme, že dané hodnoty jsou úměrné záběrnému (zkratovému) proudu pro daná napětí.

Příklad průběhu proudu v závislosti na čase (graf 4.1), ze kterého se odečítá daná maximální hodnota proudu pro daná napětí. Z průběhu proudu je vidět přechodový jev, který vznikne poté, co se motor připojí na síť. Proud vzroste na hodnotu I_K , a poté se ustálí na hodnotě I_0 .

K určení jmenovitého zkratového proudu I_{KN} použijeme vzorec (1.7-4). K výpočtu je nutné určit U_{K0} , tuto hodnotu odečteme pomocí tečny sestrojené k charakteristice nakrátko viz (Graf. 4.2).

$$U_{K0} = 56,9[V] \quad (4.2-1)$$

Dále potřebujeme hodnoty I_K , U_K , ty tvoří bod tečny k charakteristice nakrátko.

$$U_K = 178 [V], I_K = 16,1 [A] \quad (4.2-2)$$

Poté můžeme psát:

$$I_{KN} = \frac{U_N - U_{K0}}{U_K - U_{K0}} \cdot I_K [A] \quad (4.2-3)$$

$$I_{KN} = \frac{220 - 56,9}{178 - 56,9} \cdot 16,1 [A] \quad (4.2-4)$$

$$I_{KN} = 21,82 [A] \quad (4.2-5)$$

Tímto jsme získali jmen. zkrat proud $I_{KN} = 21,82 [A]$ pro jmenovité fáz. napětí $U_N = 220 [V]$.

4.3 Měření č.2.: Měření nakrátko

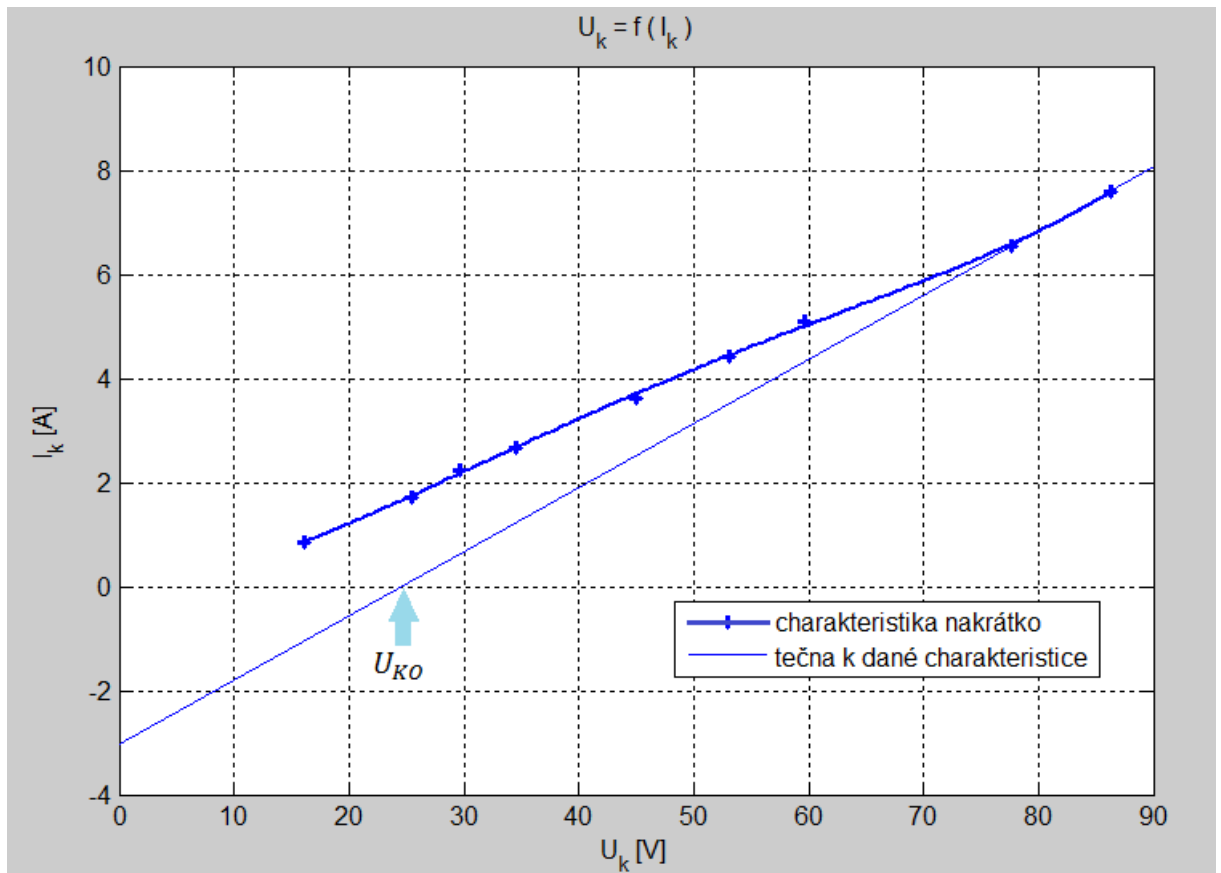
Při tomto měření byl rotor motoru mechanicky zabrzděn. Toto měření bylo provedeno spojitě. Napětí se postupně zvyšovalo a odečítal se proud v závislosti na napětí. Měřilo se jen při sníženém napětí do doby, kdy proud statoru nedosáhl zhruba dvojnásobku jmenovité hodnoty (Motor nakrátko a měření nakrátko je uvedeno v kapitole 1.7).

4.3.1 Tabulky naměřených hodnot

$U_K[V]$	$I_K[A]$
10,3	0,32
16,1	0,86
25,4	1,71
29,6	2,24
34,5	2,67
45	3,63
53,1	4,42
59,6	5,1
77,7	6,54
86,3	7,6

tab. 4.2 Asynchronní motor nakrátko

4.3.2 Grafy



Graf 4.3 Charakteristika nakrátko s tečnou pro odečet U_{K0}

4.3.3 Zpracování hodnot

Z naměřených hodnot sestrojíme charakteristiku nakrátko graf 4.3.

Jako v předchozím případě učíme hodnotu jmen. zkratového proudu. Odečteme hodnotu U_{K0} (Graf 4.3).

$$U_{K0} = 24[V] \quad (4.3-1)$$

Bod tečny k charakteristice

$$U_K = 86,3 [V], I_K = 7,6 [A] \quad (4.3-2)$$

Poté můžeme psát:

$$I_{KN} = \frac{U_N - U_{K0}}{U_K - U_{K0}} \cdot I_K [A] \quad (4.3-3)$$

$$I_{KN} = \frac{220 - 24}{86,3 - 24} \cdot 7,6[A] \quad (4.3-4)$$

$$I_{KN} = 23,9 [A] \quad (4.3-5)$$

Tímto jsme získali jmen. zkrat proud $I_{KN} = 23,9 [A]$ pro jmenovité fáz. napětí $U_N = 220 [V]$.

4.4 Měření č.3.: Měření nakrátko

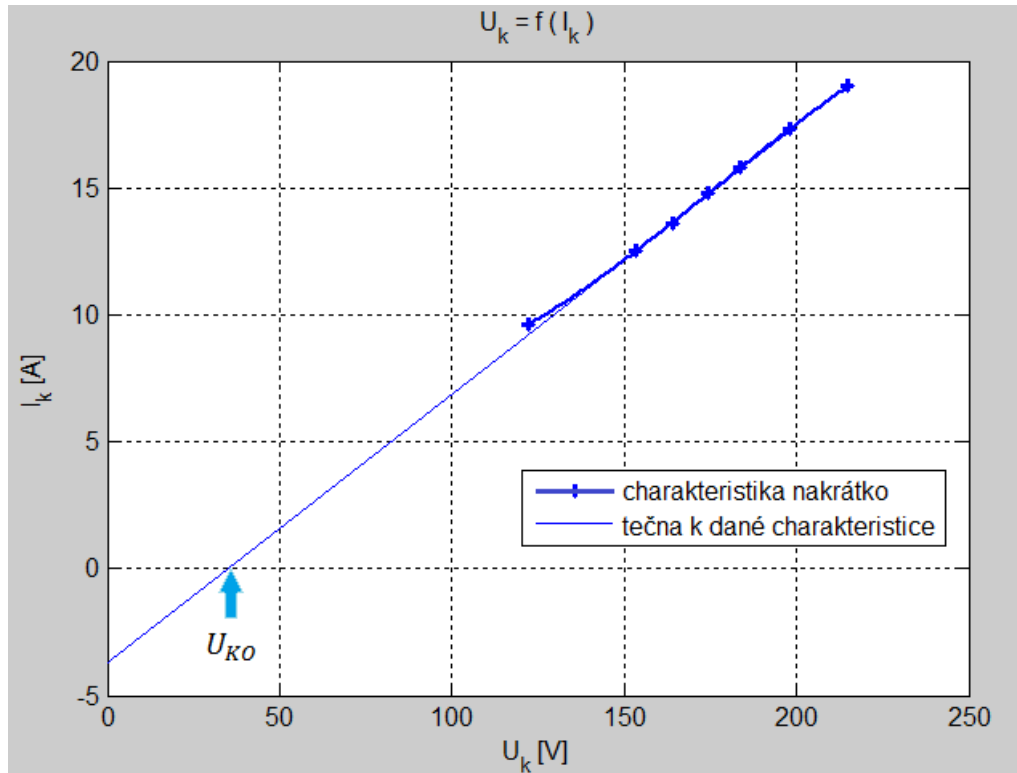
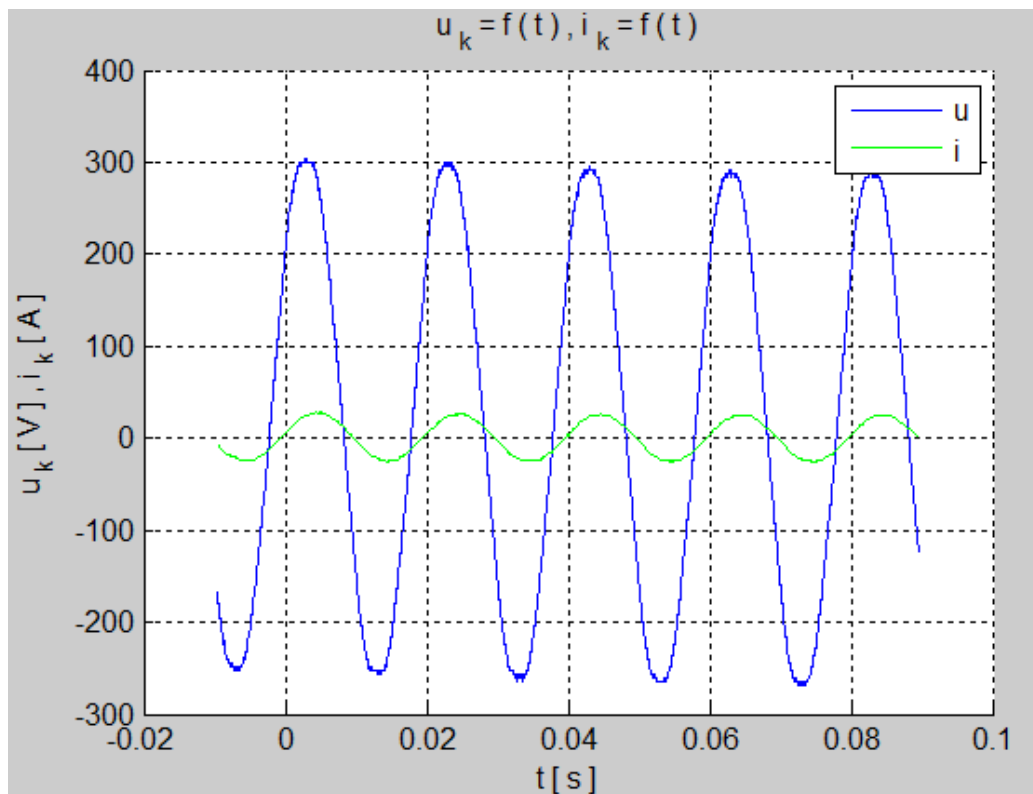
Rotor motoru jsme mechanicky zabrzdili, aby se nemohl roztočit. Na napájecím pultu jsme nastavili napětí, zapnuli jsme vzorkování osciloskopu a poté motor, který se po pár sekundách následně odpojil, aby nedošlo k tepelnému nebo jinému poškození. Osciloskop byl nastaven jako v případě prvního měření s rozdílem zavedení druhé proudové sondy. Tímto způsobem jsme měřili závislost proudu a napětí na čase motoru v chodu nakrátko. Tento postup se opakoval pro další napětí.

4.4.2 Tabulky naměřených hodnot

$U_k [V]$	$I_k [A]$
122,30	9,62
153,26	12,50
163,88	13,60
174,36	14,80
183,67	15,80
197,99	17,30
214,96	19,00

tab. 4.3 Asynchronní motor nakrátko

4.4.2 Grafy

Graf 4.4 Charakteristika nakrátko s tečnou pro odečet U_{KO} Graf 4.5 Průběh napětí a proudu v závislosti na čase pro napájecí napětí $U_s = 340[V]$

4.4.3 Zpracování hodnot

Z každého měření jako v měření č.1 jsme pro dané napětí zaznamenali největší hodnotu efektivního proudu (tab. 4.3). Z naměřených hodnot se sestrojí charakteristika nakrátko (graf 4.4). Předpokládáme, že daná hodnota je úměrná zkratovému proudu pro daná napětí.

Příklad průběhu proudu a napětí v závislosti na čase (graf 4.5), ze kterého se odečítá daná hodnota proudu pro daná napětí.

Dále učíme hodnotu jmen. zkratového proudu. Odečteme hodnotu U_{KO} viz (Graf 4.4)

$$U_{KO} = 35,3 V \quad (4.4-1)$$

Bod tečny k charakteristice

$$U_K = 215V, I_K = 19 A \quad (4.4-2)$$

Poté můžeme psát:

$$U_{KO} = 24[V] \quad (4.4-3)$$

$$I_{KN} = \frac{U_N - U_{KO}}{U_K - U_{KO}} \cdot I_K [A] \quad (4.4-4)$$

$$I_{KN} = \frac{220 - 35,3}{215 - 35,3} \cdot 19 [A] \quad (4.4-5)$$

$$I_{KN} = 19,54 [A] \quad (4.4-6)$$

Tímto jsme získali jmen. zkrat proud $I_{KN} = 19,54 [A]$ pro jmenovité fáz. napětí $U_N = 220 [V]$.

5 Simulace záběrného proudu

V této kapitole určíme hodnotu jmen. zkratového proudu ne pomocí měření, ale výpočtem. Z měření nakrátko a naprázdno na asynchronním motoru se určí parametry motoru, výpočet parametrů je uveden v příloze 2. Z vypočtených parametrů lze pak spočítat hodnoty proudů nakrátko (proud při $s = 1$) při jednotlivých napětích. Poté z těchto hodnot sestrojíme charakteristiku nakrátko a jako v předchozích měřeních určíme jmen. zkrat proud.

Výsledné parametry :

veličina	značení	hodnota	jednotky
počet fází	m	3	-
počet pólů	2p	4	-
jmenovité $U_{s\text{druž}}$	U_n	380	V
kmitočet	f	50	Hz
statorový odpor vinutí	R_1	5,712	Ohm
statorový rozptyl	$X_{1\sigma}$	3,704	Ohm
rot odpor / skluz	R_2/s	3,5	Ohm
rot rozptyl přepočtený	$X_{2\sigma}$	2,9035	Ohm
magn reaktance	X_μ	104,56	Ohm
R ztráty Fe	R_{Fe}	289,66	Ohm
mechanické ztráty	ΔP_m	11	W

tab. 5.1 Parametry asynchronního motoru

Parametry v tab. 1.5 patří k náhradnímu schématu v kap. 1.5 (obr. 1.6.)

5.1 Určení provozních charakteristik

Charakteristiky jsou pro různé skluzy. Jelikož naším cílem bylo nasimulovat as. motor při rozběhu, budeme počítat vždy se skluzem " 1 ", a to pro různá napětí. Tím nasimulujeme stav motoru nakrátko, tzv. záběrný proud pro různé velikosti napájecího napětí při skluzu $s=1$.

Příklad výpočtu pro první hodnotu napětí, námi zvolené napětí je jmenovité, vše se počítá při skluzu jedna.

Schéma pro výpočet je uvedeno v kap. 1.5, obr.1.6.

$$U_{S1} = 380 [V] \quad (5.1-1)$$

$$U_{1f} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220[V] \quad (5.1-2)$$

$$\Delta P_m = 11[W] \quad (5.1-3)$$

$$\begin{aligned}
 Z_{ab} &= \frac{1}{\frac{1}{R_{Fe}} + \frac{1}{jX_{\mu}} + \frac{1}{\frac{R_2'}{s} + jX_{\sigma 2}'}} \\
 &= \frac{1}{\frac{1}{289,66} + \frac{1}{j104,56} + \frac{1}{\frac{3,5}{1} + j2,9}} = 3,3012 + j2,8667 [\Omega]
 \end{aligned} \tag{5.1-4}$$

$$Z_1 = Z_s + Z_{ab} = R_1 + jX_{1\sigma} + Z_{ab} = 5,712 + j3,704 + 3,3012 + j2,8667 \tag{5.1-5}$$

$$= 9,0132 + j6,507 [\Omega]$$

statorový proud

$$I_1 = I_s = \frac{U_{1f}}{Z_1} = \frac{220}{9,0132 + j6,507} = \frac{220}{11,12 e^{j35,78}} = 19,732 e^{-j35,78} [A] \tag{5.1-6}$$

indukované napětí

$$U_i = \frac{|Z_{ab}|}{|Z_1|} \cdot U_{1f} = \frac{4,3772}{11,15} \cdot 220 = 86,267 [V] \tag{5.1-7}$$

proud rotoru přepočtený na stator

$$I_2' = \frac{U_i}{\sqrt{\left(\frac{R_2'}{s}\right)^2 + jX_{\sigma 2}'^2}} = \frac{86,267}{\sqrt{3,5^2 + j2,9035^2}} = 18,967 [A] \tag{5.1-8}$$

$$\omega_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p} = 157 [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}] \tag{5.1-9}$$

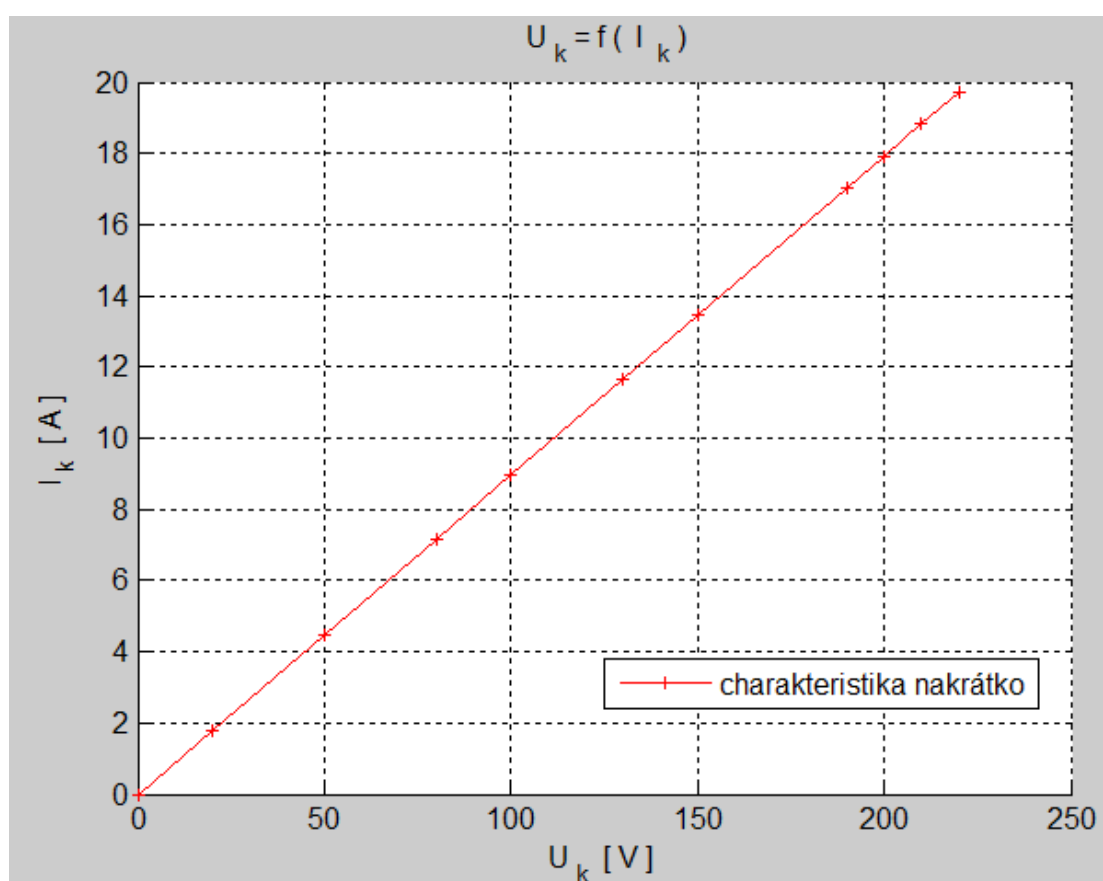
el. mag. moment

$$M_e = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{R_2'}{s} \cdot I_2'^2 = \frac{3}{157} \cdot 3,5 \cdot 18,967^2 = 24,06 [N \cdot m] \tag{5.1-10}$$

Spočítané hodnoty proudů pro různá napětí při skluzu jedna podle vztahu (5.1-6) jsou vynesena v tabulce 5.2 a zobrazena na grafu 5.1

U_k [V]	I_k [A]
220	19,73
210	18,8
200	17,9
190	17
150	13,45
130	11,65
100	7,2
50	4,48
20	1,79
0	0

tab. 5.2 Asynchronní motor nakrátko - simulace



Graf 5.1 Charakteristika nakrátko - simulace

6 Porovnání měření záběrných proudů a simulace

Při jednotlivých měřeních byly ze získaných hodnot vypočítány jednotlivé velikosti záběrných (zkratových) proudů při jmenovitém napájecím napětí, totéž platí také pro simulaci (tab. 6.1). Charakteristiky nakrátko pro jednotlivá měření a simulaci jsou na Grafu 6.1.

		I_z [A]
Měření č.1:	Měření záběrných proudů	21,82
Měření č.2:	Měření nakrátko	23,9
Měření č.3:	Měření nakrátko	19,54
Simulace:	Záběrného proudu	19,73

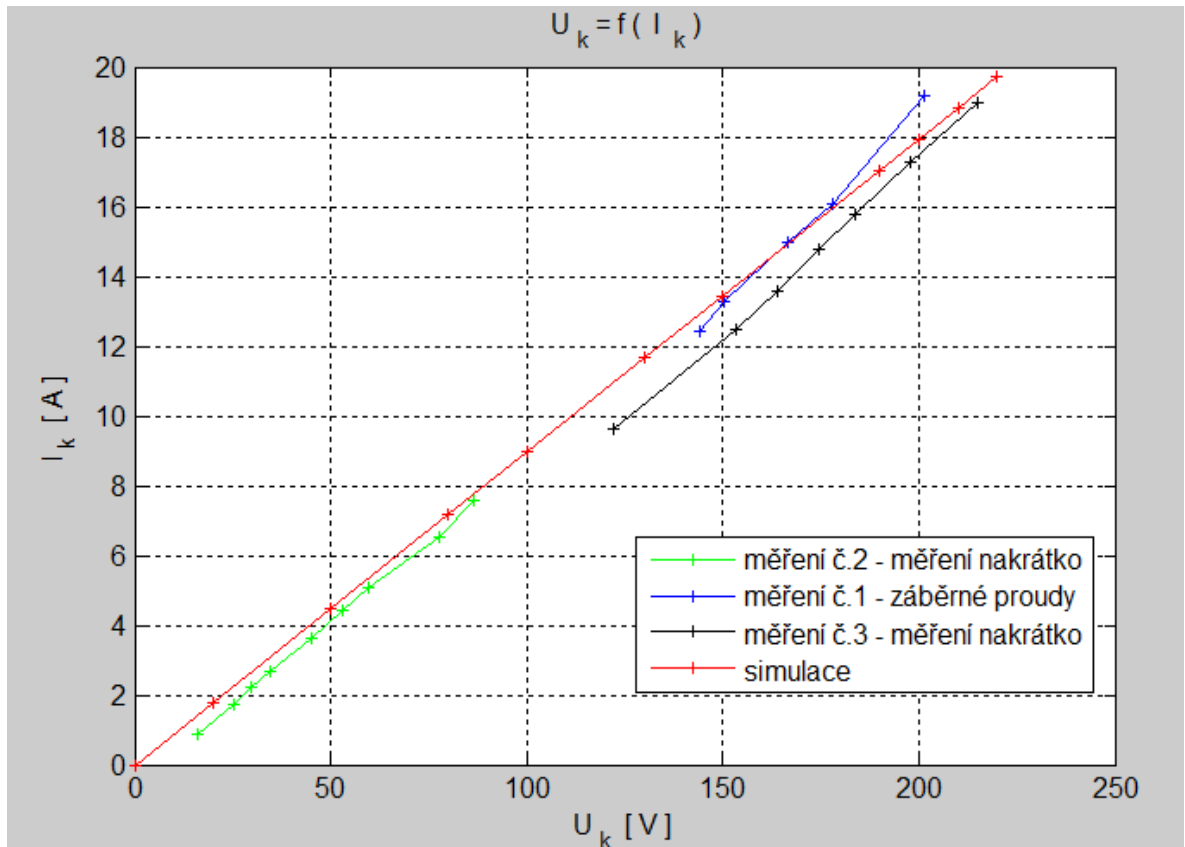
tab. 6.1. Záběrné proudy asynchronního motoru

Jednotlivá měření vztáhneme k měření č.2. Tento způsob vyhodnocení záběrného (zkratového) proudu (měření č.2) se v praxi provádí nejčastěji a s odchylkou (10 ÷ 20)% se berou hodnoty za skutečné. Mým cílem je určení rozdílu a porovnat takto získané hodnoty s dalšími způsoby měření.

		[%]
Měření č.1:	Měření záběrných proudů	9,53
Měření č.2:	Měření nakrátko	0
Měření č.3:	Měření nakrátko	18,24
Simulace:	Záběrného proudu	17,44

tab. 6.2 Procentní rozdíl změřeni

Procentní rozdíl, o kolik procent se jednotlivá měření liší od měření č.2 je dán v tabulce 6.2.



Graf 6.1 Charakteristiky nakrátko

7 Měření účinníku

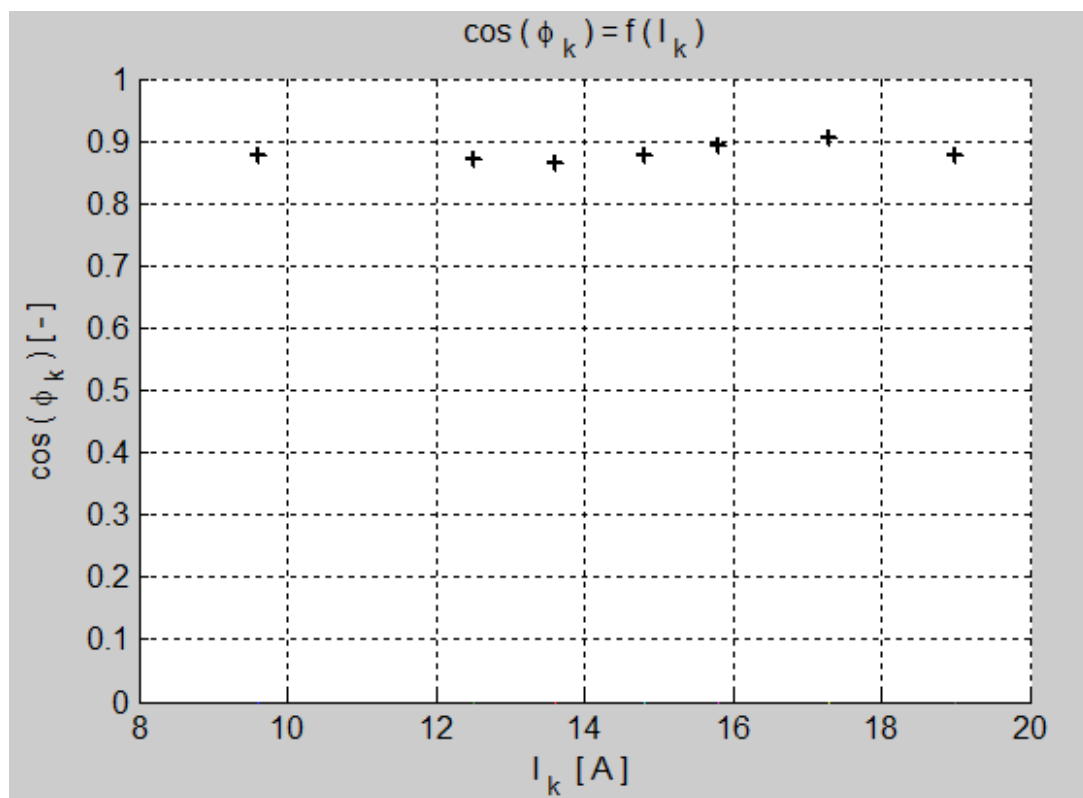
Toto měření je shodné s měřením č.3. Při měření č.3 jsme zaznamenávali průběh proudu a napětí (Graf 4.5), ze kterého můžeme vyhodnotit účinník motoru v chodu nakrátko při daném napětí.

7.1 Tabulka naměřených hodnot

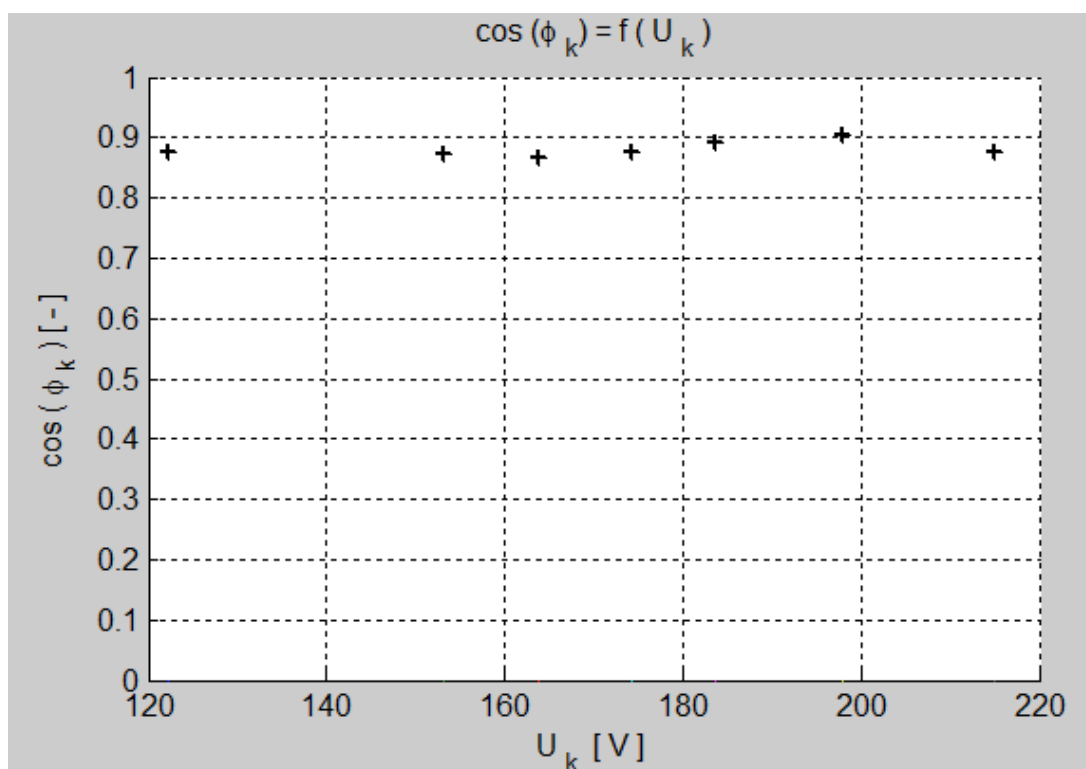
U_k [V]	I_k [A]	Φ_k [°]	$\cos(\Phi_k)$ [-]
122,30	9,62	28,80	0,876
153,26	12,50	29,36	0,872
163,88	13,60	30,00	0,865
174,36	14,80	28,80	0,876
183,67	15,80	27,00	0,891
197,99	17,30	25,20	0,905
214,96	19,00	28,80	0,876

tab. 7.1 Účinník nakrátko asynchronního motoru

7.2 Grafy



Graf 7.1 Závislost $\cos(\varphi_k)$ na proudu nakrátko I_k



Graf 7.2 Závislost $\cos(\varphi_k)$ na napětí nakrátko U_k

7.3 Zpracování hodnot

Pro každý průběh viz (Graf 4.5) se odečetl časový posuv mezi napětím a proudem Δt . Fázový posuv stanovíme podle vzorce

$$\varphi = \frac{\Delta t}{T} \cdot 360 [^\circ], \quad (7.3-1)$$

kde T je perioda průběhu napětí i proudu, která u každého průběhu byla 20 [ms].

Jako příklad výpočtu pro $U_k = 153,26 [V]$, časový posuv byl $\Delta t = 0,001648[ms]$ a potom můžeme psát podle vzorce (7.3-1)

$$\varphi_k = \frac{0,001648}{0,02} \cdot 360 [^\circ]$$

$$\varphi_k = 29,66[^\circ]$$

$$\cos(\varphi_k) = 0,869[-]$$

Takto se spočítají všechny hodnoty účinníku pro jednotlivá napětí (tab. 7.1)

Postup určení účinníku přímo z naměřených hodnot pomocí programu MATLAB je uveden v příloze 3.

Závěr

Z porovnání záběrných proudů je vidět, že k měření nakrátko se nejvíce přiblížilo měření č.1 - měření záběrného proudu. Hodnoty jmenovitého zkratového proudu se liší oproti měření č.2 - měření nakrátko o 9,5%. Tato odchylka mohla být zvětšena vzorkováním osciloskopu. Každá hodnota při vzorkování má od předchozí hodnoty časový rozestup 1ms. Jestliže by osciloskop teoreticky navzorkoval hodnotu před maximem amplitudy proudu a další za maximem, z toho plyne, že námi vyhodnocená maximální hodnota není maximální. Vzhledem k časovému rozestupu 1ms, je tato doba natolik krátká, že takto vzniklá chyba bude jen nepatrně ovlivňovat toto měření.

Další hodnotou je proud z měření č.3. Tato hodnota se liší o cca 18% a jako v případě měření č.1, mohla být tato chyba ovlivněna vzorkováním.

Hodnota získaná simulací se liší o 17,5%. Zde vše vychází z parametrů, které jsem spočítal z hodnot získaných měření. Jako v předchozích dvou případech byly hodnoty získány vzorkováním. Samotné vypočítané parametry jsem upravil pro přiblížení se skutečným parametrům. Zabrzděný motor má skoro nulový zatěžovací odpor. Indukované napětí potřebuje pro vytvoření menší proud. Z tohoto důvodu jsem zmenšil odpor rotoru a rozptylovou reaktanci od rotoru.

Charakteristika nakrátko od simulace (graf 6.1) je přímková, v ideálním případě by určitě byla, pokud by šlo o podobnost charakteristiky transformátoru nakrátko. Charakteristika má přímkový tvar z důvodu zanedbání postupného sycení statorových zubů a hlav rotorových zubů. Při výpočtu jsem zvolil hodnotu rozptylu pro jmenovité zatížení. Kdybych bral v potaz postupné zvyšování sycení magnetického obvodu na statoru a rotoru, charakteristika by měla na začátku tvar exponenciály a po nasycení magnetického obvodu by byla ke konci přímková, a následně poté rovnoběžná s charakteristikou z měření č.1 a č.2 viz graf 6.1.

Ze získaných hodnot je patrný rozdíl velikosti proudu nakrátko (měření č.2) a záběrných proudů (měření č.1). Měření č.2, které jsem měřil při sníženém napětí, a následně jsem dopočítával jmenovitý proud nakrátko, se liší od velikosti změřeného záběrného proudu (měření č.1) při rozběhu o cca 10%.

Další porovnání jsem provedl s novými motory nakrátko, s typovým označením 1 LA7, od firmy Siemens. Technická data motoru jsou v příloze 1. Jedná se o typově stejný motor v

porovnání s motorem, u kterého jsem zjišťoval záběrný proud, z hlediska počtu pólových dvojic, jmenovitého výkonu a otáček atd. Motor má jmenovitý proud nakrátko 18,35 A podle katalogu. V porovnání s hodnotou nakrátko (měření č.2), kterou jsem naměřil, je zde odchylka o cca 23% a oproti záběrnému proudu (měření č.1) odchylka činila cca 16 %. Musím brát v potaz, že se jedná o nový motor. Součásti, jako je magnetický obvod atd., mají dokonalejší technologické zpracování, použitý materiál a modernější použitou technologii při výrobě motoru, oproti motoru, na kterém bylo provedeno měření. Z tohoto důvodu se zde daná odchylka dá očekávat. Budu-li předpokládat 10 % - ní vliv nových technologických postupů a materiálu, dostanu se na odchylku 13 % oproti měření č.2 a 6 % oproti měření č.1- měření záběrného proudu. Velikost těchto odchylek je srovnatelná s odchylkami získanými měřeními.

Z předchozích výsledků jsem dostal rozdíl velikosti záběrných proudů a proudů nakrátko, který činil po zprůměrování cca 10%. Mohu tedy říci, a to se dostávám k samotné podstatě této práce, že proud záběrový je proudem nakrátko. V prvním okamžiku, kdy motor ještě stojí, si po připojení k síti vezme proud, jehož první amplituda má velikost proudu nakrátko. V našem případě se jedná přibližně o pět a půl násobek jmenovitého proudu.

Účinník nakrátko po vyhodnocení jednotlivých měření se blíží k hodnotě 0,9. Je to dáno tím, že motor nakrátko má činný charakter. Jak již bylo zmíněno, k vytvoření stejně velkého indukovaného napětí, jako např. při jmenovitém zatížení, stačí jen malý magnetizační proud v poměru jmenovitého proudu. Náš výsledek je podle mého názoru uspokojivý. Motor nakrátko nikdy nemůže mít účinník roven jedné. Znamenalo by to nulový magnetizační proud, tím pádem nulové indukované napětí a nulový proud do rotoru motoru. Vzhledem k dané magnetické vazbě není toto možné.

Seznam použité a citované literatury

- [1] KŮS, Václav. *Elektrické pohony a výkonová elektronika*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. 180 s. ISBN 80-7043-422-8.
- [2] KOČMAN, Karel, Jozef HOLBA, Alexander IHLÁR a Rudolf MRAVENEC. *Elektrické stroje a přístroje I*. 1. vyd. Josef ŘÍHA. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1990, 424 s. ISBN 80-03-00406-3.
- [3] MLČÁK, Tomáš. *Elektrotechnika pro FMMI* [online]. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2010 [cit. 2013-03-06]. ISBN 978-80-248-2601-1. Dostupné z: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FEI/EFMMI/Elektrotechnika%20pro%20FMMI.pdf>
- [4] KOČMAN, Stanislav. *ASYNCHRONNÍ STROJE* [online]. Ostrava: Katedra obecné elektrotechniky FEI VŠB-TU Ostrava, 2002 [cit. 2013-03-06]. Dostupné z: <http://p.kobrlle.sweb.cz/stroje/as-skriptum.pdf>
- [5] SKALICKÝ, Jiří. *Elektrické servopohony* [online]. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vysoké učení technické v Brně. [cit. 2013-04-24]. Dostupné z: www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=33400
- [6] VONDRÁŠEK, František. *Výkonová elektronika. Sv. II, Měniče s vnější komutací*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1994. 149 s. ISBN 80-7082-137-X.
- [7] BARTOŠ, Václav et al. *Elektrické stroje*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2006. 139 s. ISBN 80-7043-444-9.
- [8] UHLÍŘ, Ivan et al. *Elektrické stroje a pohony*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. 120 s. ISBN 80-01-02482-2.
- [9] *Asynchronní motor* [online]. [cit. 2013-03-06]. Dostupné z: http://motor.feld.cvut.cz/www/materialy/XD14ZSE/Asynchronni_motor_1.pdf
- [10] ABB AUTOMATION TECHNOLOGIE. *Softstartéry: Průvodce problematikou softstartérů* [online]. Jiří VAŠINKA. 2009 [cit. 2013-03-07]. Dostupné z: [http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/dd33e4ab21ddb6d3c125764600480aeb/\\$file/softstarter-%20handbook.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/dd33e4ab21ddb6d3c125764600480aeb/$file/softstarter-%20handbook.pdf)
- [11] ABB ELSYNN. *Výrobová informace INSUM: Rozvaděče nízkého napětí* [online]. [cit. 2013-03-07]. Dostupné z: [http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/90e5a54198dbe03fc1257315004d31e6/\\$file/insum%20-%20vyrobova%20informace%20cz.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/90e5a54198dbe03fc1257315004d31e6/$file/insum%20-%20vyrobova%20informace%20cz.pdf)
- [12] *Motory* [online]. [cit. 2012-10-21]. Dostupné z: <http://stardas.hostujem.sk/skola/III.ro%E8n%EDk/Motory.pdf>

- [13] BARTOŠ, Václav a SKALA, Bohumil. *Měření na elektrických strojích*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002. 109 s. ISBN 80-7082-896-X.
- [14] TRINKEWITZ, Zdeněk. *Průmyslové zkoušky velkých elektrických strojů točivých*. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1981. 393 s.
- [15] PITTERMANN, Martin. *Elektrické pohony: základy*. Vyd. 1. Plzeň: Západočeská univerzita, 2008. 98 s. ISBN 978-80-7043-729-2
- [16] SCHNEIDER ELECTRIC. *AC motors starting and protection systems* [online]. [cit. 2013-03-07]. Dostupné z: <http://www.schneider-electric.hu/documents/automation-and-control/asg-4-motor-starting-and-protection.pdf>
- [17] *Analýza napěťových a proudových přechodných dějů při rozběhu a doběhu asynchronního motoru spínaného softstartérem* [online]. ČVUT fakulta elektrotechnická [cit. 2013-03-07]. Dostupné z: http://www.ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijni_materialy/RPI/Navod-Softstarter.pdf
- [18] RYDLO, Pavel. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. *Moderní regulované elektrické pohony a servopohony* [online]. [cit. 2012-10-07]. Dostupné z: [www.fm.tul.cz/esf0247/download_file.../BP_Rehak_prezentace.pdf?...](http://www.fm.tul.cz/esf0247/download_file.../BP_Rehak_prezentace.pdf?)
- [19] SIEMENS. *Nízkonapětové motory: Trojfázové asynchronní motory nakrátko 1 LA7* [online]. [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: http://www.elektromotory.net/upload/file/katalog_1la7.pdf

Přílohy

Příloha 1: Technická data 4 pólového motoru Siemens s typovým označením 1 LA7 - základní řady

Příloha 2: Výpočet paramentů asynchronního motoru

Příloha 3: Výpočet účinníku nakrátko pomocí programu MATLAB ze změřených hodnot pro jednotlivá napájecí napětí

Příloha 4: Vyhledávání maxima proudu a zobrazení průběhů proudů pomocí programu MATLAB

Příloha 5 : Použité přístroje

Příloha 6: Měřený asynchronní motor (vpravo) - na hřídeli je připevněn torzní dynamometr (uprostřed) a stejnosměrný motor (nejvíce vlevo)

Příloha 7: Měřený asynchronní motor (vpravo) - na hřídeli je připevněn torzní dynamometr

Příloha 1: Technická data 4 pólového motoru Siemens s typovým označením 1 LA7 - základní řady

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

[19]

Příloha 2: Výpočet parametřů asynchronního motoru**2.1. Údaje získané měřením**a) měření naprázdno

AM. má při měření naprázdno tyto údaje:

	I_0 [A]	U_0 [V]	φ_0 [°]	$\cos(\varphi_0)$	ΔP_0 [W]
při sníženém napětí	0,6647	6,65	29,7	0,8686	11,51
pro plné napětí	2,206	220,62	66,72	0,3952	575,05

tab. 2.1 Asynchronní motor naprázdno

příklad výpočtu ztrát naprázdno ΔP_0 :

$$\Delta P_0 = 3 \cdot U_0 \cdot I_0 \cdot \cos(\varphi_0) \text{ [W]} \quad (2.1-1)$$

$$\Delta P_0 = 3 \cdot 6,65 \cdot 0,665 \cdot 0,86 \text{ [W]} \quad (2.1-2)$$

$$\Delta P_0 = 11,51 \text{ [W]} \quad (2.1-3)$$

b) měření nakrátko

AM. má při měření nakrátko tyto údaje:

	I_k [A]	U_k [V]	φ_k [°]	$\cos(\varphi_k)$	ΔP_k [W]
při sníženém napětí	4,925	67,88	32,4	0,8443	845,77

tab. 2.2 Naměřené hodnoty, fázové, efektivní

příklad výpočtu ztrát nakrátko ΔP_k :

$$\Delta P_k = 3 \cdot U_k \cdot I_k \cdot \cos(\varphi_k) \text{ [W]} \quad (2.1-4)$$

$$\Delta P_k = 3 \cdot 67,88 \cdot 4,925 \cdot 0,8443 \text{ [W]} \quad (2.1-5)$$

$$\Delta P_k = 845,77 \text{ [W]} \quad (2.1-6)$$

2.2 Výpočet parametrů

Náhradní schéma asynchronního motoru pro které se počítají parametry je v kapitole 1.5, obrázek 1.6.

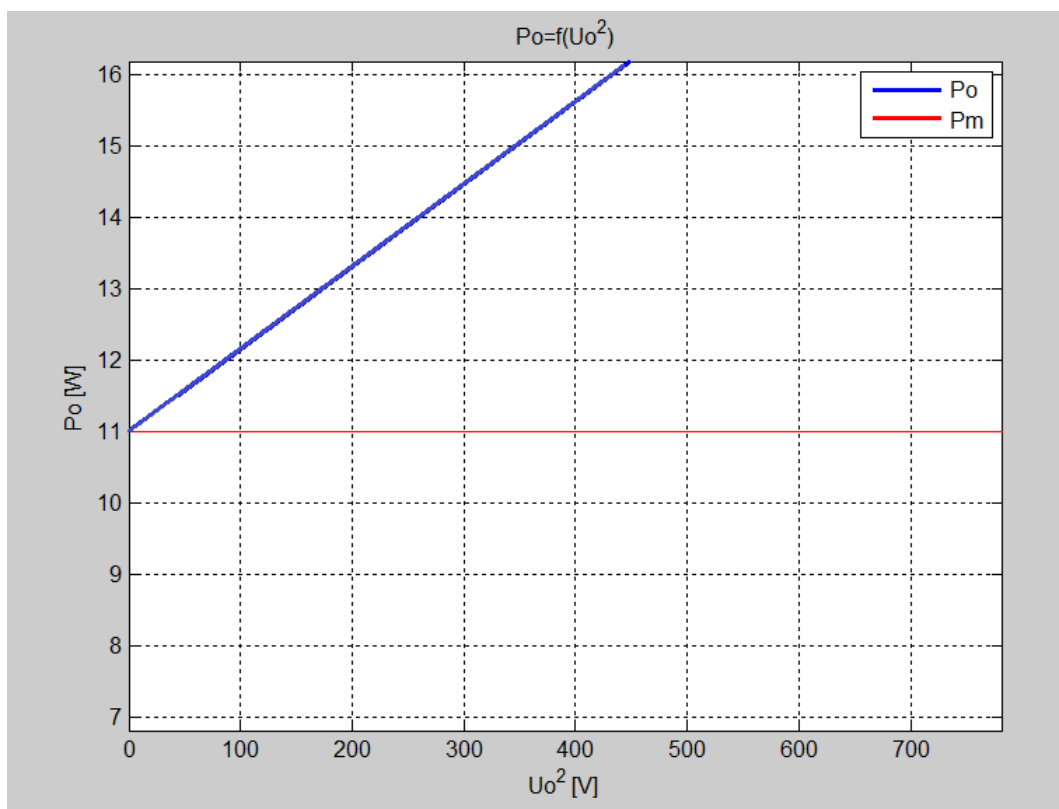
Ztráty změřené v chodu naprázdno, jsou dány součtem ztrát Joulových, ztrátami v železe magnetického obvodu a ztrát mechanických

$$\Delta P_0 = \Delta P_{j0} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_m \quad (2.2-7)$$

Pro určení ztrát mechanických provedeme grafické znázornění ztrát naprázdno a použijeme kvadratickou stupnici napětí. Použitím kvadratické stupnice napětí se závislost

$$\Delta P_0 = f(U^2) \quad (2.2-8)$$

zobrazí jako přímka. Její extrapolaci do nulového napětí stanovíme průsečík s osou ztrát a tato hodnota odpovídá ztrátám mechanickým.



Graf 2.1 Průběh ztrát naprázdno pro určení ztrát mechanických

Mechanické ztráty odečtené z grafu 2.1.

$$\Delta P_m = 11[\text{W}] \quad (2.2-9)$$

Při dosazení mech. ztrát do rovnice

$$\Delta P_0 = \Delta P_{j0} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_m \quad (2.2-10)$$

pro $I_0 = 2,206 [A]$, $\Delta P_0 = 577,05 [W]$

$$577,05 = \Delta P_{j0} + \Delta P_{Fe} + 11 \quad (2.2-11)$$

$$566,05 = 3 \cdot R_s \cdot 2,206^2 + \Delta P_{Fe} \quad (2.2-12)$$

R_s ... určíme z měření nakrátko

$$\Delta P_k = 3 \cdot U_k \cdot I_k \cdot \cos(\varphi_k) \quad (2.2-13)$$

reálná složka proudu nakrátko

$$I_k \cdot \cos(\varphi_k) = \frac{\Delta P_k}{3 \cdot U_k} = \frac{845,77}{3 \cdot 67,88} = 4,15 [A] \quad (2.2-14)$$

imaginární složka proudu nakrátko

$$\begin{aligned} I_k \cdot \sin(\varphi_k) &= \sqrt{I_k^2 - (I_k \cdot \cos(\varphi_k))^2} = \sqrt{4,925^2 - 4,15^2} \\ &= 2,65 [A] \end{aligned} \quad (2.2-15)$$

Takto spočítaný proud nakrátko odpovídá napětí $U_k = 67,88 [V]$, při jmenovitém napětí 220 [V] bude proud vyšší.

$$I_{KN} = (4,15 - j2,65) \cdot \frac{220}{67,88} = 13,46 - j8,58 [A] \quad (2.2-16)$$

Celková impedance z měření nakrátko

$$\begin{aligned} Z_k &= \frac{U_f}{I_{KN}} = \frac{220}{13,46 - j8,58} = 11,623 + j7,407 \\ &= R_k + jX_{\sigma k} [\Omega] \end{aligned} \quad (2.2-17)$$

$$R_k = 11,623 [\Omega] = R_1 + \frac{R_2'}{s} \Rightarrow R_1 = \frac{R_2'}{s} = 5,812 [\Omega] \quad (2.2-18)$$

$$R_1 = 5,812 [\Omega] \quad (2.2-19)$$

$$X_{\sigma k} = 8,58 [\Omega] = X_{1\sigma} + X_{2\sigma}' \Rightarrow X_{1\sigma} = X_{2\sigma}' = 3,704 [\Omega] \quad (2.2-20)$$

$$X_{1\sigma} = 3,704[\Omega] \quad (2.2-21)$$

Pro blíženi k reálným parametrům provedeme úpravu parametrů:

$$R_S = R_1 = 5,712 [\Omega] \quad (2.2-22)$$

$$\frac{R'_2}{s} = 3,5 [\Omega] \quad (2.2-23)$$

$$X_{1\sigma} = 3,704[\Omega] \quad (2.2-24)$$

$$X'_{2\sigma} = 2,9035[\Omega] \quad (2.2-25)$$

Ztráty ve vinutí statoru při chodu naprázdno

$$\Delta P_{j0} = 3 \cdot R_S \cdot I_0^2 = 3 \cdot 5,712 \cdot 2,206^2 = 83,39 [W] \quad (2.2-26)$$

ztráty v železe

$$\Delta P_0 = \Delta P_{j0} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_m \quad (2.2-27)$$

$$\Delta P_{Fe} = 566,05 - 83,39 = 482,659[W] \quad (2.2-28)$$

reálná složka proudu naprázdno

$$I_{Fe+mech} = I_o \cdot \cos(\varphi_0) = 2,206 \cdot 0,3952 = 0,872 [A] \quad (2.2-29)$$

imaginární složka proudu naprázdno

$$I_\mu = I_o \cdot \sin(\varphi_0) = 2,206 \cdot 0,9186 = 2,026 [A] \quad (2.2-30)$$

proud naprázdno

$$I_0 = 0,872 - j2,026 [A] \quad (2.2-31)$$

Pro zpřesnění výpočtu prvků X_μ a R_{Fe} použijeme U_i místo svorkového napětí

$$U_{if} = 220 - X_{1\sigma} \cdot I_0 = 211,83[V] \quad (2.2-32)$$

$$X_\mu = \frac{U_{if}}{I_\mu} = \frac{211,83}{2,026} = 104,56[\Omega] \quad (2.2-33)$$

Odpor respektující ztráty v železe a mechanické

$$R_{Fe+mech} = \frac{U_{if}}{I_{Fe+mech}} = \frac{211,83}{0,872} = 242,976[\Omega] \quad (2.2-34)$$

Rozdělení odporu $R_{Fe+mech}$ na odpory respektující ztráty v železe a ztráty mechanické. R_{Fe} počítáme jen ze ztráty v železe

$$I_{Fe} = \frac{\Delta P_{Fe}}{3 \cdot U_f} = \frac{482,66}{3 \cdot 220} = 0,73[A] \quad (2.2-35)$$

$$R_{Fe} = \frac{U_{if}}{I_{Fe}} = \frac{220}{0,73} = 289,66[\Omega] \quad (2.2-36)$$

Odporem R_{mech} prochází zbytek proudu

$$I_{mech} = I_{Fe+mech} - I_{Fe} = 0,872 - 0,73 = 0,142[A] \quad (2.2-37)$$

$$R_{mech} = \frac{U_f}{I_{mech}} = \frac{220}{0,142} = 1549,29[\Omega] \quad (2.2-38)$$

veličina	značení	hodnota	jednotky
počet fází	m	3	-
počet pólů	2p	4	-
jmenovité $U_{sdruž}$	U_n	380	V
kmitočet	f	50	Hz
statorový odpor vinutí	R_1	5,712	Ohm
statorový rozptyl	$X_{1\sigma}$	3,704	Ohm
rot odpor / skluz	R_2/s	3,5	Ohm
rot rozptyl přepočtený	$X_{2\sigma}$	2,9035	Ohm
magn reaktance	X_μ	104,56	Ohm
R ztráty Fe	R_{Fe}	289,66	Ohm
mechanické ztráty	ΔP_m	11	W

tab. 2.1 Parametry asynchronního motoru

Příloha 3: Výpočet účinníku nakrátko pomocí programu MATLAB ze změřených hodnot pro jednotlivá napájecí napětí

```

% Us=200 V -> proud: TEK0019 napětí: TEK0020
% Us=250 V -> proud: TEK0022 napětí: TEK0021
% Us=260 V -> proud: TEK0024 napětí: TEK0023
% Us=280 V -> proud: TEK0025 napětí: TEK0026
% Us=300 V -> proud: TEK0028 napětí: TEK0027
% Us=320 V -> proud: TEK0029 napětí: TEK0030
% Us=340 V -> proud: TEK0032 napětí: TEK0031

Maticel1=csvread ('TEK0026.csv');%napeti
t21_1=Maticel1( : , 4);
y21_1=Maticel1 ( : , 5);
Maticel1=csvread ('TEK0025.csv');%proud
t22_1=Maticel1( : , 4);
y22_1=Maticel1 ( : , 5);
p=1;m=1;a=zeros(20,1);b=size(y21_1);
for i=1:b(1)
if (i==1)&&(y21_1(i,1)==0)&&(t21_1(i,1)>0)
a(m)= t21_1(i,1);
m=m+1;
end
if
((i>1)&&(y21_1(i,1)==0)&&(t21_1(i,1)>0)&&((y21_1(i,1))~=
(y21_1(i-1,1))))
if(m==1);a(m)= t21_1(i,1);m=m+1;
else
if(t21_1(i,1)>(a(m-1,1)+0.005))
a(m)= t21_1(i,1); m=m+1;
end
end
end
end
end
m;D=zeros(m,1);
for s=1:m
D(s,1)=a(s,1);
end
end

```

```
m=1;a=zeros(20,1);b=size(y22_1);
for i=1:b(1)
    if (i==1)&&(y22_1(i,1)==0)&&(t22_1(i,1)>0.005)
        a(m)=t22_1(i,1);m=m+1;
    end
    if
((i>1)&&(y22_1(i,1)==0)&&(t22_1(i,1)>0.005)&&((y22_1(i,1)
)~=(y22_1(i-1,1))))
        if(m==1)
            a(m)=t22_1(i,1);m=m+1;
        else
            if(t22_1(i,1)>(a(m-1,1)+0.005))
                a(m)=t22_1(i,1);m=m+1;
            end
        end
    end
end
m=m-2;B=zeros(m,1);
for s=1:m
    B(s,1)=a(s,1);
end
G=zeros(m,1);P=zeros(m,1);V=zeros(m,1);
for s=1:m
    G(s,1)=abs(abs(B(s,1))-
abs(D(s,1)));V(s,1)=(G(s,1)/0.02)*360;
end
k=0;
for s=1:m
    k=k+V(s,1);
end
faz_posun_mezi_U_a_I_ve_stupnich=k/m
v=faz_posun_mezi_U_a_I_ve_stupnich;
cos_fi=abs(cosd(v))
```

Příloha 4: Vyhledávání maxima proudu a zobrazení průběhů proudů pomocí programu MATLAB

```
% vyhledávání maxima proudu, zobrazení průběhů proudů

% I pro Us=250 V -> TEK0001
% I pro Us=260 V -> TEK0002
% I pro Us=280 V -> TEK0005
% I pro Us=300 V -> TEK0006
% I pro Us=320 V -> TEK0009
% I pro Us=340 V -> TEK0011

Maticel1=csvread ('TEK0011.csv');%proud, zadat název
souboru viz tabulka
y21_1=Maticel1 ( : , 5);t21_1=Maticel1
(:,4);k=abs(y21_1(1,1));
b=size(y21_1);
for i=1:b(1)
    if(abs(y21_1(i,1))>k)
        k=abs(y21_1(i,1));
    end
end
i_max_v_Amper =k
I_MAX_v_Amper =k/(2^(1/2))
T=size(y21_1);n=zeros(T(1),1);
for i=1:T(1)
    n(i)=y21_1(i)/(2^(1/2));
end

plot(t21_1(:,1),y21_1(:,1),'-b');
xlabel(' t [ s ]');ylabel('i [ A ] ');
title('i = f ( t ) ','LineWidth',8);grid on;
```


Příloha 5 : Použité přístrojeOsciloskop

TEKTRONIX - TDS2024B

sériové číslo: C101759
rozsah kanálů: 4 analogové
šířka pásma: 200 MHz
vzorkování: 2GSPS
vstupní napětí: 300V
vstupní impedance: 1 M Ω

Proudová sonda

TEKTRONIX - A 622

frekvenční rozsah: AC/DC - 100 kHz
maximální vstupní proud: AC/DC - 100 A peak
výstup: 10 mV/A, 100 mV/A

Regulační transformátor

T 107 (laboratoř EK 101 , pult D107)

napětí: 3x (0 - 380 V)
max. proud: 45 A

Stejnoseměrný motor

MEZ BRNO n.p.

typ: TMN 16b
ev.č: 4367
čís.: 2603 117
výkon: 5.5 kW
napájecí napětí: 220 V
jmen. otáčky: 1400 ot/min
buzení: 220 V, 0.85 A
rv.: 1965

Asynchronní motor

MEZ MOHELNICE n.p.

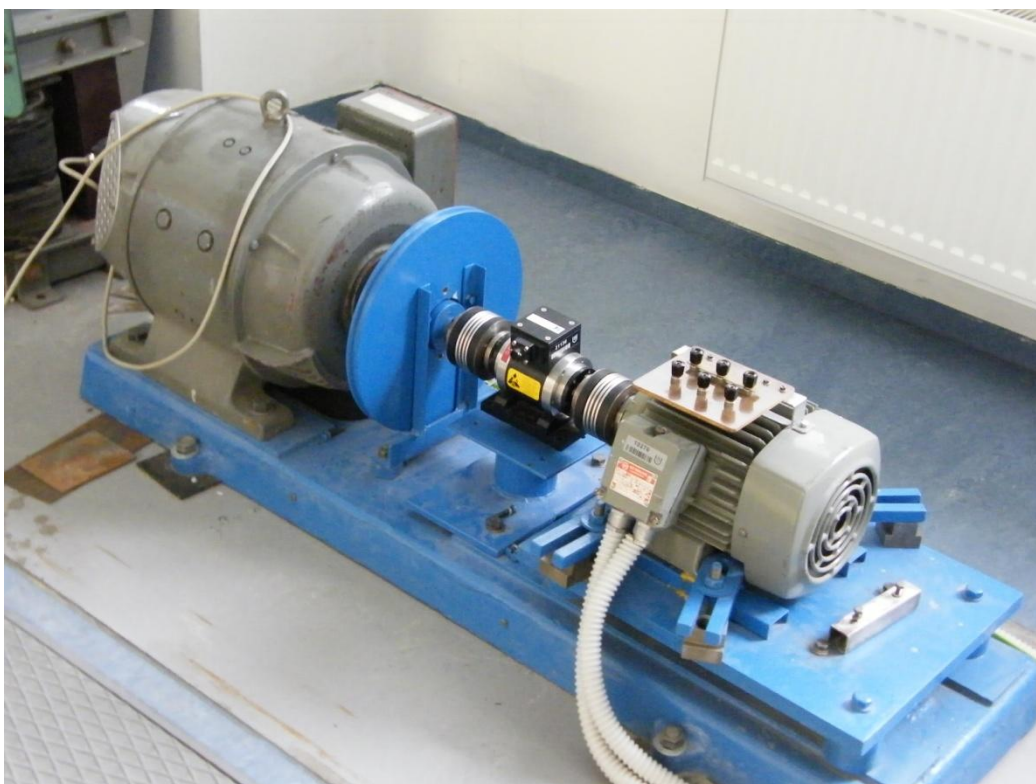
typ:	AP 90L - 4
čís.:	2358531
výkon:	1.5 kW
napájecí napětí:	Y/ Δ - 380/220 V
proud:	Y/ Δ - 3.6 / 6.2 A
frekvence:	50 Hz
jmen. otáčky:	1430 ot/min
rv.:	1971

Dynamometr

TORQUEMASTER

typ:	TM 210
jmen. moment:	50 N.m
cytlivost:	100 mV / N.m
max. rychlost:	10 000 min ⁻¹

Příloha 6: Měřený asynchronní motor (vpravo) - na hřídeli je připevněn torzní dynamometr (uprostřed) a stejnosměrný motor (nejvíce vlevo)



Příloha 7: Měřený asynchronní motor (vpravo) - na hřídeli je připevněn torzní dynamometr (vlevo)



Obsah CD

1. Bakalářská práce
2. Naměřené hodnoty