ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Porovnání provozních charakteristik asynchronního stroje získaných různými přístupy

Jiří Ipser **2016**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: **2015/2016**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Jiří IPSER**
Osobní číslo:	**E13B0275P**
Studijní program:	**B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor:	**Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu:	**Porovnání provozních charakteristik asynchronního stroje získaných různými přístupy**
Zadávající katedra:	**Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte teoretický rozbor sledovaných provozních charakteristik asynchronního stroje.
2. Vytipujte vhodné metody výpočtu provozních vybraných charakteristik.
3. Vámi vybrané přístupy realizujte a porovnejte oblast jejich platnosti.
4. Proveďte závěrečné zhodnocení.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

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

Seznam odborné literatury:

1. **Pyrhönen, J., Jokinen, T., Hrabovcová, V.: Design of rotation electrical machines. John Wiley & Sons, Ltd, 2008.**
2. **Boldea, I; Nasar, S.A., "The Induction Machine Handbook", CRC Press, Boca Raton, 2002.**
3. **Kopylov, I., P.: Stavba elektrických strojů. SNTL/MIR, 1988.**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Vladimír Kindl, Ph.D.**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2016**

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

L.S.

Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na porovnání vybraných provozních charakteristik asynchronního motoru, které jsou získány dvěma přístupy. První přístup je založen na použití metody náhradního schématu naopak druhý přístup je založen na použití metody kružnicového diagramu.

Tato práce je rozdělena do čtyř částí. V první časti je stručně charakterizovaný princip funkce asynchronního motoru a obecně popsána konstrukce, která zahrnuje popis jednotlivých částí asynchronního motoru. Druhá část se zabývá měřením na asynchronním motoru. V této části je zmíněn štítek měřeného motoru a použitý měřicí přístroj. Dále obsahuje popis měření naprázdno, měření nakrátko a měření převodu. Třetí část se podrobně věnuje metodám (tj. náhradní schéma a kružnicový diagram), které byly použity pro výpočet provozních charakteristik. V poslední části se pojednává o všech vytvořených provozních charakteristikách a o jejich následném zhodnocení.

Klíčová slova

3-f asynchronní motor, provozní charakteristiky asynchronního motoru, náhradní schéma, kružnicový diagram, měření naprázdno, měření nakrátko, momentová charakteristika

Abstract

The presented bachelor thesis is focused on the comparison of selected operational characteristics of an Induction machine, which are obtained using two approaches. The first approach is based on using the method of substitute schema; on the contrary the second approach is based on using the method of circular diagram.

This thesis is divided into four parts. The first part briefly describes the operating principle of the induction machine and generally discloses the structure that includes a description of each part of the asynchronous engine. The second part deals with the measurement on the asynchronous engine. In this part name plate of the measured engine and utilized measuring device are mentioned. The second part also includes a description of the no-load test, short-circuit test and measurement of the voltage ration. The third part is devoted in detail to methods (i.e. substitute schema and circular diagram) which were used for the calculation of operating characteristics. The last part deals with all created operating characteristics and their subsequent evaluation.

Key words

3-phase induction machine, operating characteristics of the induction machine, substitute schema, circular diagram, no-load test, short -circuit test, torque characteristic

Prohlášení

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.

.....

podpis

V Plzni dne 31.5.2016 Jiří Ipser

Poděkování

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

Obsah

OBSAH ... **8**

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK ... **9**

ÚVOD ... **11**

1 ASYNCHRONNÍ MOTOR ... **12**

1.1 PRINCIP ČINNOSTI ASYNCHRONNÍHO STROJE ... 12
1.2 KONSTRUKCE ASYNCHRONNÍHO MOTORU ... 14
1.2.1 Stator motoru ... *14*
1.2.2 Rotor motoru ... *14*

2 MĚŘENÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU ... **17**

2.1 ŠTÍTEK MĚŘENÉHO MOTORU ... 17
2.2 POUŽITÝ MĚŘICÍ PŘÍSTROJ ... 17
2.3 MĚŘENÍ NAPRÁZDNO ... 18
2.4 MĚŘENÍ NAKRÁTKO ... 20
2.5 MĚŘENÍ PŘEVODU STROJE ... 23
2.5.1 Postup určení převodu pro motor s vinutou kotvou ... *23*

3 METODY PRO VÝPOČET PROVOZNÍCH CHARAKTERISTIK ... **25**

3.1 NÁHRADNÍ SCHÉMA ASYNCHRONNÍHO MOTORU ... 25
3.1.1 Parametry náhradního schématu ... *27*
3.1.2 Energetická bilance asynchronního motoru ... *28*
3.1.3 Výpočet parametrů náhradního schématu z měření naprázdno a nakrátko ... *29*
3.2 KRUŽNICOVÝ DIAGRAM ASYNCHRONNÍHO MOTORU ... 31
3.2.1 Konstrukce kružnicového diagramu ... *31*

4 PROVOZNÍ CHARAKTERISTIKY ASYNCHRONNÍHO STROJE ... **35**

4.1 MOMENTOVÁ CHARAKTERISTIKA ... 35
4.2 PROUDOVÁ CHARAKTERISTIKA ... 37
4.3 PŘÍKONOVÁ CHARAKTERISTIKA ... 38
4.4 VÝKONOVÁ CHARAKTERISTIKA ... 39
4.5 ÚČINNOST ... 40
4.6 VYHODNOCENÍ GRAFŮ ... 41
4.6.1 Postup pro získání křivky metodou náhradního schématu: ... *42*
4.6.2 Postup pro získání křivky pomocí metody kružnicového diagramu: ... *43*
4.6.3 Příčiny rozdílů ... *45*

ZÁVĚR ... **47**

SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ ... **48**

PŘÍLOHY ... **1**

Seznam symbolů a zkratek

ΔP_k ..... Celkové ztráty v chodu nakrátko [W]

ΔP_0 ..... Celkové ztráty v chodu naprázdno [W]

P_1 ..... Elektrický příkon [W]

$U_{k\ fáz}$ ..... Fázové napětí nakrátko [V]

$U_{1\ fáz}$ ..... Fázové napájecí napětí [V]

L1, L2, L3 ..... Fázové vodiče napájecí soustavy

f_1 ..... Frekvence napájecího napětí [Hz]

Z_k ..... Impedance nakrátko [Ω]

U_{i1}, U_{i2} ..... Indukované napětí na statoru / na rotoru [V]

U_{i20} ..... Indukované napětí do stojícího a rozpojeného rotoru [V]

ΔP_{jk} ..... Joulovy ztráty v chodu nakrátko [W]

ΔP_{j2} ..... Joulovy ztráty ve vinutí rotoru [W]

ΔP_{j1} ..... Joulovy ztráty ve vinutí statoru [W]

ΔP_{j0} ..... Joulovy ztráty ve vinutí statoru v chodu naprázdno [W]

U_N ..... Jmenovité napětí [V]

I_N ..... Jmenovitý proud [A]

U2, V2, W2 ..... Konec vinutí na svorkovnici

jX_μ ..... Magnetizační reaktance stroje [Ω]

M_{max} ..... Maximální moment [Nm]

ω_m ..... Mechanická úhlová rychlost [rad/s]

ΔP_m ..... Mechanické ztráty [W]

P, P_2 ..... Mechanický výkon [W]

m_m ..... Měřítko momentů [Nm/mm]

m_i ..... Měřítko proudů [A/mm]

m_p ..... Měřítko výkonů [W/mm]

M ..... Moment motoru [Nm]

U_1 ..... Napájecí napětí [V]

U_k ..... Napětí nakrátko [V]

U_0 ..... Napětí naprázdno [V]

$R_2^{'}$ ..... Odpor rotorového vinutí přepočtený na stator [Ω]

R_1 ..... Odpor statorového vinutí [Ω]

R_{Fe} ..... Odpor symbolizující ztráty vznikající v železe [Ω]

U1, V1, W1 ..... Počátek vinutí na svorkovnici

p_p ..... Počet pól párů [-]

I_k ..... Proud nakrátko [A]

I_{kN} ..... Proud nakrátko při jmenovitém napájení [A]

I_0 ..... Proud naprázdno [A]

I_μ ..... Proud tekoucí magnetizační reaktancí [A]

I_{Fe} ..... Proud tekoucí odporem R_{Fe} [A]

k ..... Převod stroje [-]

ΔP_d ..... Přídavné ztráty [W]

PM ..... Přímka momentů

PP ..... Přímka příkonů

PV ..... Přímka výkonů

X_k ..... Reaktance nakrátko [Ω]

f_2 ..... Rotorová frekvence [Hz]

$I_2^{'}$ ..... Rotorový proud přepočtený na stator [A]

$jX_{2\sigma}^{'}$ ..... Rozptylová reaktance rotorového vinutí přepočtená na stator [Ω]

$jX_{1\sigma}$ ..... Rozptylová reaktance statorového vinutí [Ω]

s ..... Skluz [-]

s_m ..... Skluz při maximálním momentu [-]

ΔP_{Fe+m} ..... Součet mechanický ztrát a ztrát v železe [W]

I_1 ..... Statorový proud [A]

ω_s ..... Synchronní úhlová rychlost [rad/s]

cos φ ..... Účiník [-]

cos φ_k ..... Účiník nakrátko [-]

cos φ_0 ..... Účiník naprázdno [-]

η ..... Účinnost stroje [%]

P_δ ..... Výkon ve vzduchové mezeře [W]

$U_2^{'}$ ..... Výstupní napětí rotoru přepočítané na stator [V]

ΔP_{Fe} ..... Ztráty v železe [W]

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na porovnání provozních charakteristik asynchronního motoru. Popisuje postup k získání provozních charakteristik pomocí metody náhradního schématu a kružnicového diagramu.

První asynchronní motor pocházející z roku 1887 se pojí se jménem Nikola Tesla. Od jeho vzniku prošel celou řadou vývojových fází. S vyvíjejícími se technologiemi si lze všimnout i velikého pokroku v oblasti asynchronních motorů. V současné době se nejvíce používají asynchronní motory s kotvou nakrátko.

V minulosti se asynchronní motor používal převážné v zařízeních, ve kterých nebylo za potřebí regulovat otáčky, jelikož regulace změnou napájecího napětí není výhodná. V současné době dochází k rozvíjení měničů frekvence, jejichž úkolem je řešit nejen snadné a energeticky hospodárné řízení otáček, ale i rozběhy motorů.

Asynchronní motor je nejčastějším typem pohonu v průmyslu vůbec. Důvodem častého použití je především jeho vysoká spolehlivost, snadná údržba a poměrně jednoduchá výroba. Asynchronní motor je provozován v různých režimech, zátěžných stavech a proměnných vnějších vlivech. Z tohoto důvodu je vhodné znát jeho provozní charakteristiky ještě před tím, než jej do pohonu navrhneme. Tyto charakteristiky je možné získat několika přístupy. Každý přístup však dává malinko odlišné výsledky. Cílem této práce je zjistit, jak moc se výsledky liší pro metodu náhradního schématu a kružnicového diagramu.

1 Asynchronní motor

Asynchronní motor je nejvyužívanějším elektromotorem především v průmyslu, což je dáno hlavně jednoduchou konstrukcí motoru, velkou provozní spolehlivostí a dobrými provozními vlastnostmi. Výkony vyráběných motorů se pohybují od jednotek W pro nízké napětí až do desítek MW pro vysoké napětí. [1]

V dřívější době se asynchronní motory většinou napájely přímo ze sítě, ale v současné době se stále častěji používají v regulačních pohonech ve vztahu s polovodičovými měniči. [1]

1.1 Princip činnosti asynchronního stroje

Připojením třífázové napěťové soustavy na statorové vinutí zastaveného motoru, vznikne točivé magnetické pole ve statoru. Siločáry statorového pole protínají stojící rotorové vodiče a vzhledem k tomu, že magnetický tok je časově proměnný, začne se indukovat napětí v rotoru. Indukované napětí má za následek to, že začne protékat rotorový proud. Proud v rotoru vytvoří vlastní magnetické pole. Při nulových otáčkách rotoru je frekvence rotorového napětí i proudu určena frekvencí statorového proudu. Stavem nakrátko označujeme situaci, při které je statorové vinutí napájené třífázovou soustavou napětí a rotor nemá žádné otáčky. Vzájemné silové působení vzniklého magnetického pole rotoru s točivým polem statoru zapříčiní vznik elektromagnetického momentu. Rotor se začne pohybovat, dojde ke zvýšení rychlosti rotoru, a tím začne relativní rychlost vůči točivému poli statoru klesat. Důsledkem je snížení frekvence rotorového proudu. [1; 2]

Pokud motor není zatížen, rotor se roztočí na rychlost, která je blízká synchronní rychlosti. Kvůli ztrátám však není rotor schopný roztočit se na synchronní otáčky. To je důvod, proč tomuto stroji říkáme asynchronní. Jedinou možností, jak roztočit rotor na synchronní otáčky, je dodání vnějšího mechanického momentu. Pokud se synchronní rychlost rovná rotorové rychlosti, pak je relativní rychlost nulová, v rotoru se neindukují žádné proudy a motor nevyvíjí žádný moment. Tento případ lze pojmenovat jako stav naprázdno. Zvyšováním mechanického momentu, který z vnějšku dodáváme rotoru, způsobí zrychlení rotoru a dostane se do nadsynchronních otáček. Při těchto otáčkách se začne z rotoru do statoru indukovat napětí. Nyní se z motoru stane asynchronní generátor, jenž přeměňuje mechanickou energii na elektrickou energii. V generátorovém stavu je

moment záporný, protože se otáčky rotoru snaží přiblížit synchronním otáčkám a dochází k generátorickému brzdění. [1; 2]

Motor je ve stavu, kdy se točí téměř synchronní rychlostí a na hřídeli není odebírán žádný mechanický výkon. Pokud motor v tomto stavu zatížíme mechanickým momentem, dojde k poklesu otáček a zvýšení velikosti i frekvence rotorového proudu. Zatížený motor se otáčí podsynchronní rychlostí a přeměňuje elektrickou energii na mechanickou. [1]

Pokud se točivé pole statoru točí opačným směrem než pole rotoru, dochází k zvětšení kmitočtu a velikosti rotorového proudu. Tento stav se nazývá protiproudé brzdění. Motor při protiproudém brzdění nevrací elektrickou energii do sítě, nýbrž přeměňuje energii na teplo. [1]

V rotoru se může indukovat napětí, pouze pokud je rozdíl mezi synchronní rychlostí točivého pole statoru a mechanickou rychlostí rotoru. Tento rozdíl nazýváme skluz, jenž je definovaný vztahem:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s}. \tag{1.1}$$

Skluz může být udaný i v procentech a mění se pro různý režim motoru. Rotorovou frekvenci lze vypočítat prostřednictvím skluzu. [1; 3]

$$f_2 = s \cdot f_1 \tag{1.2}$$

Tab. 1.1: Přehled režimů asynchronního motoru.

Režim	Rychlost	Skluz
Generátorické brzdění	$\omega_m > \omega_s$	$s < 0$
Chod naprázdno	$\omega_m \doteq \omega_s$	$s = 0$
Motorický chod	$0 < \omega_m < \omega_s$	$1 > s > 0$
Chod nakrátko	$\omega_m = 0$	$s = 1$
Protiproudé brzdění	$\omega_m < 0$	$s > 1$

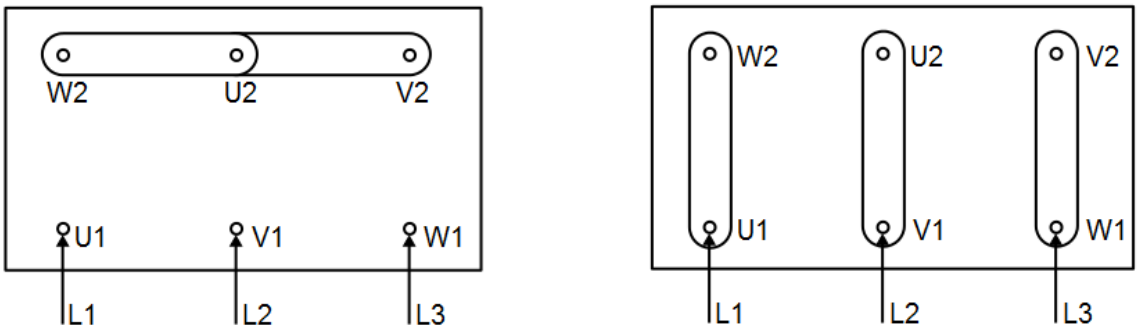
Pozn.: U skutečného chodu naprázdno jsou mechanické otáčky mírně nižší než synchronní. [1]

1.2 Konstrukce asynchronního motoru

Asynchronní stroj je rozdělen na dvě hlavní časti: stator a rotor. [5]

1.2.1 Stator motoru

Stator je sestaven z plechů o různé tloušťce. V drážkách plechů je uloženo buď jednofázové nebo trojfázové vinutí. Konce vinutí jsou přivedeny na svorkovnici, kde jsou uspořádány tak, aby se vinutí dalo snadno přepojovat do hvězdy i do trojúhelníka. [4]



Obr. 1.1: Uspořádání vývodů vinutí na svorkovnici. [16]

Vinutí spojené do trojúhelníku získáme propojením svorek nad sebou. Vinutí spojené do hvězdy získáme propojením svorek vedle sebe. Abychom vystačili se třemi propojovacími plíšky, je zapotřebí, aby byla konstantní vzdálenost vertikálních i horizontálních svorek. V případech, kde není potřeba přepínat vinutí, jsou na svorkovnici pouze tři vývody zapojené buď do hvězdy nebo do trojúhelníka. [4]

1.2.2 Rotor motoru

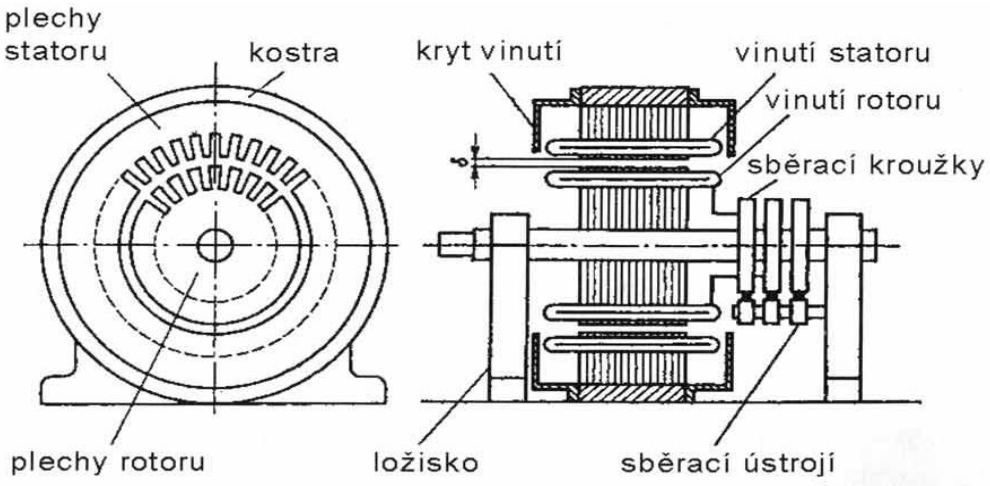
Rotor je složen stejně jako stator z plechů. Vinutí rotoru může být buď vinuté, které je vyvedené na kroužky (motor s kroužkovým rotorem) nebo klecové (motor s kotvou nakrátko). [4]

Motor s kroužkovým rotorem

V rotorových drážkách má uložené trojfázové vinutí spojené nejčastěji do hvězdy výjimečně do trojúhelníka. Jednotlivé fáze jsou přivedeny na tři vodivé kroužky, které jsou izolovaně připevněné na hřídeli. Na kroužky přiléhají uhlíkové kartáče. [5] Tyto kartáče

převádějí rotorový proud do obvodů, které slouží k řízení motoru. Kartáče jsou vzájemně izolované a upevněné na ložiskovém štítu nebo ložiskovém stojanu. [6]

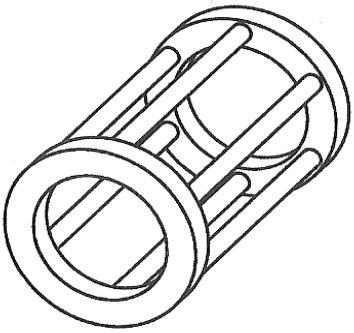
Kartáče jsou trvale přiloženy ke kroužkům pouze u motorů, u kterých se řídí rychlost otáčení vnějšími rotorovými obvody. Ve většině situací se však motor s přiloženými kartáči pouze rozbíhá. Po ukončení rozběhu se kartáče odkloní a kroužky se spojí nakrátko. Tuto schopnost zajišťuje speciální mechanizmus. [6]



Obr. 1.2: Motor s kroužkovým rotorem. [7]

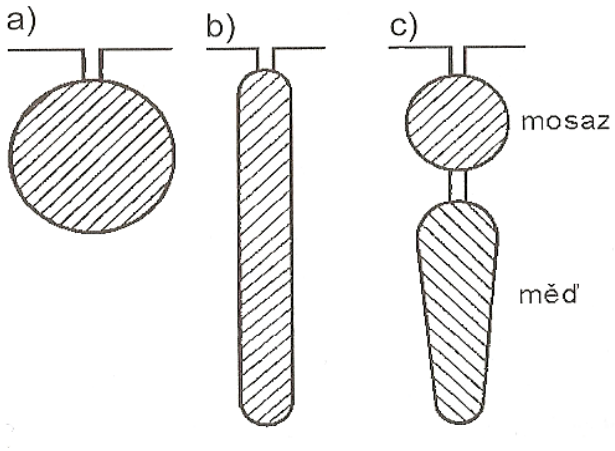
Motor s kotvou nakrátko

Klecové vinutí se skládá z robustních tyčí, které jsou spojeny po obou stranách vodivými kruhy. Vinutí je tedy trvale spojené nakrátko. Tyče a vodivé kruhy mohou být z mědi, hliníku nebo mosazi. [5]



Obr. 1.3: Klecové vinutí. [2]

Drážky motoru s kotvou nakrátko často bývají polouzavřené a různého tvaru, což ovlivňuje průběh točivého momentu v závislosti na rychlosti otáček a také záběrný moment motoru. [6]



Obr. 1.4: Tvary rotorových drážek: a) jednoduchá, b) vírová, c) dvojitá (Boucherotova) klec. [6]

2 Měření asynchronního motoru

2.1 Štítek měřeného motoru

Tab. 2.1: Štítek motoru.

Asynchronní motor		Typ: H112L06
Prov. IP44/G	Tvar: M101	Číslo: 123950
3,5 / 3 / 2,4 kW	885/910/930 ot/min	50 Hz
Stator - Y	380 V	11,5 / 10,5 / 10 A
Rotor - Y	120 V	21 / 18 / 14,5 A

2.2 Použitý měřicí přístroj

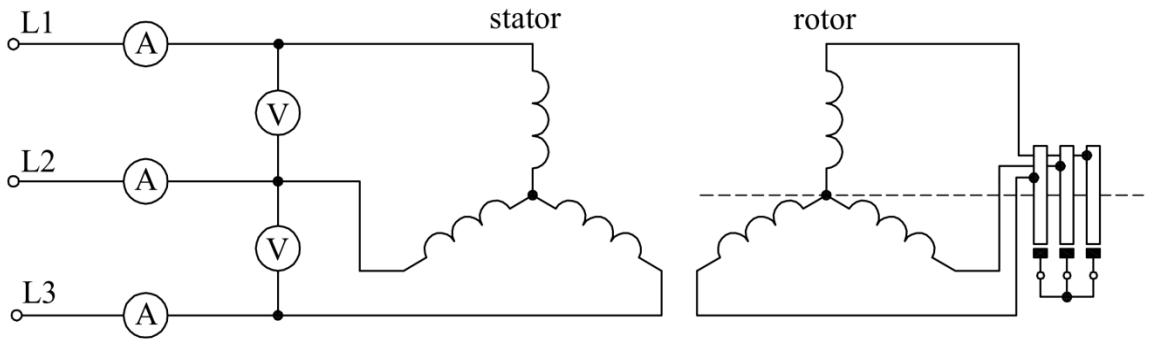
Obr. 2.1: Přístroj Hioki 3166. [8]

Vlastnosti přístroje Hioki 3166:

Přístroj umožňuje svorkové měření jednofázového i trojfázového elektrického vedení. Dále umožňuje současně měřit: napětí, proud, výkon (činný, jalový a zdánlivý), účiník a frekvenci. Pro přenos změřených dat do počítače je přístroj vybaven disketovou jednotkou a standardním rozhraním RS-232C. Jedná se o kompaktní přístroj: velikost knihy formátu B5 a hmotnost 1,6 kg činí tento přístroj snadno přenosným a ideálním pro použití ve stísněných podmínkách. Přístroj rozpozná odpojené vodiče, detekuje fázi a dokáže rozlišit chybně umístěné senzory, čímž se eliminují chyby měření. Pro měření jalového výkonu je možno volit mezi měřením výkonu pomocí wattmetru nebo výpočtem výkonu na základě napětí, proudu a činného výkonu. Přístroj má možnost nainstalovat vysokorychlostní čtyřkanálový analogový výstup. [8]

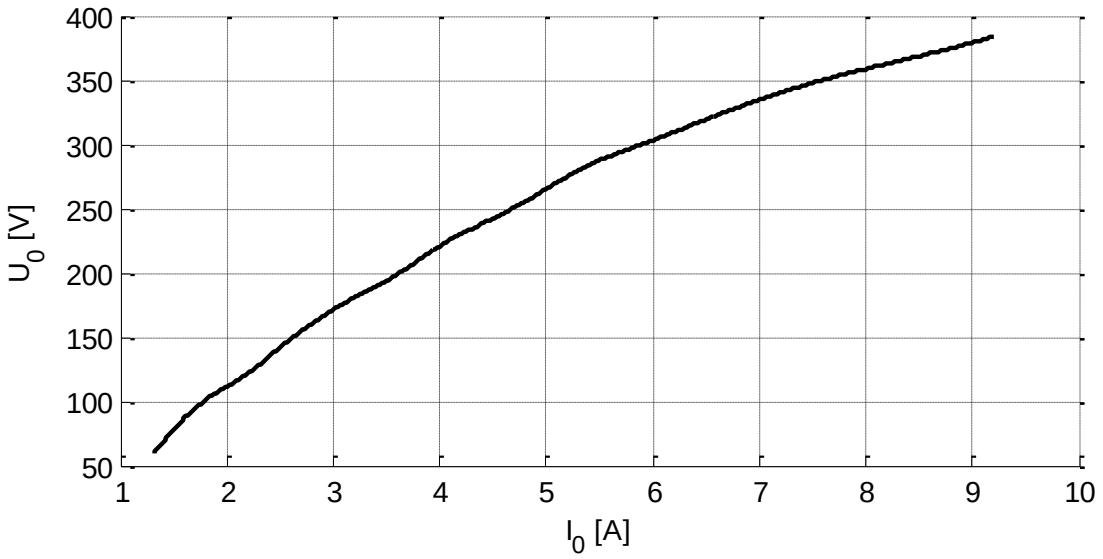
2.3 Měření naprázdno

Měřením naprázdno rozumíme, že asynchronní motor není zatížen a točí se téměř synchronní rychlostí. Při měření se napájecí napětí mění většinou v rozmezí 110 % až 30 % U_N. Dále je důležité měření realizovat při konstantních otáčkách motoru. Moment je úměrný kvadrátu napětí, a proto při snižování napájecího napětí nastává pokles otáček a tím se motor dostane do labilní části momentové charakteristiky. V nejhorším může dojít i k zastavení motoru. Z výše uvedených důvodů je zapotřebí měřit otáčky motoru a při skluzu okolo jednoho procenta bychom měli měření ukončit. Při měření odečítáme proud naprázdno, napětí naprázdno a příkon naprázdno. [9]



Obr. 2.2: Schéma při měření naprázdno. [9]

Z provedeného měření jsem vytvořil charakteristiku naprázdno, což je závislost $I_0 = f(U_0)$. [9]



Obr. 2.3: Voltampérová charakteristika.

Ztráty naprázdno ΔP_0 můžeme vyjádřit součtem Joulových ztrát (zapříčiněné proudem naprázdno I_0), ztrát v železe a mechanických ztrát. [9]

$$\Delta P_0 = \Delta P_{j0} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_m \tag{2.1}$$

Joulovy ztráty v rotoru můžeme zanedbat z důvodu malých rotorových proudů v chodu naprázdno. Kvůli nízkému skluzu jsou ztráty v magnetickém obvodu rotoru velmi malé. Díky tomuto tvrzení lze tyto ztráty zanedbat. [9]

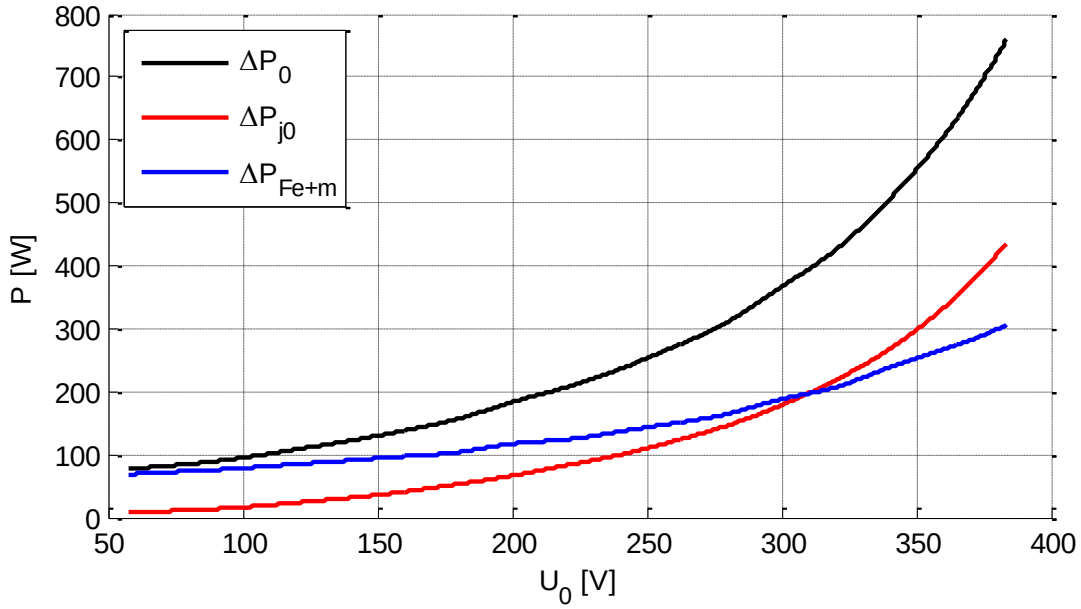
Joulovy ztráty ΔP_{j0} vypočteme pomocí vztahu:

$$\Delta P_{j0} = 3 \cdot I_0^2 \cdot R_1 . \text{ [9]} \tag{2.2}$$

Poté Joulovy ztráty, které získáme ze vztahu (2.2), odečteme od ztrát naprázdno ΔP_0 a dostaneme ztráty v železe magnetického obvodu a ztráty mechanické. [9]

$$\Delta P_0 - \Delta P_{j0} = \Delta P_{Fe} + \Delta P_m \tag{2.3}$$

Provedl jsem grafické znázornění jednotlivých ztrát v chodu naprázdno.

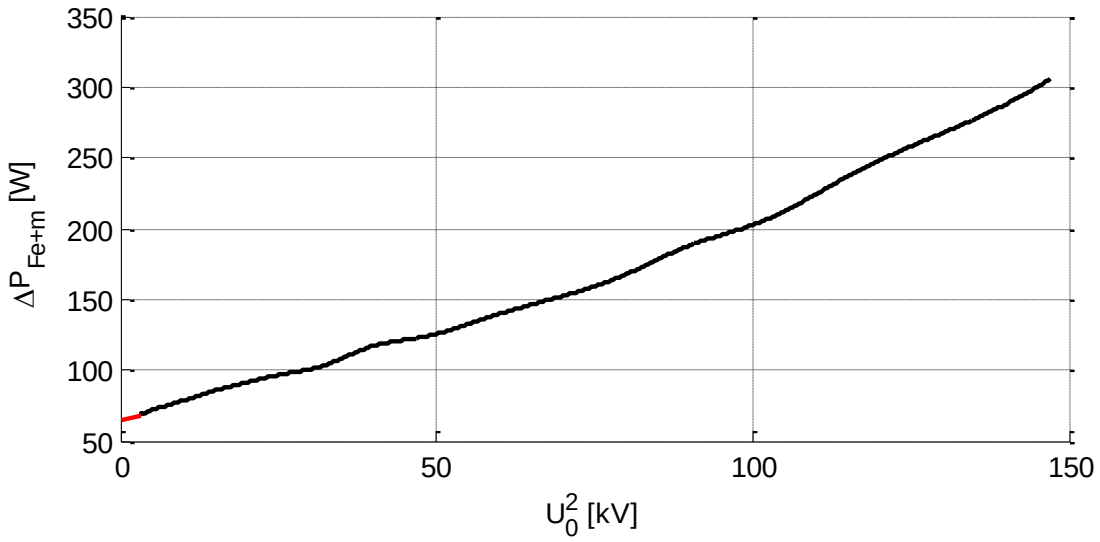


Obr. 2.4: Ztráty v chodu naprázdno.

K získání mechanických ztrát a ztrát v železe statoru použijeme kvadratickou stupnici napětí, pomocí které se závislost $\Delta P_{Fe} + \Delta P_m = f(U_0^2)$ znázorní přibližně jako přímka. Extrapolací přímky do nulového napětí určíme průsečík s osou ztrát. Hodnota vzniklého průsečíku je shodná s mechanickými ztrátami. Následně lze určit ztráty v železe jako:

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Fe+m} - \Delta P_m. \text{ [9]} \tag{2.4}$$

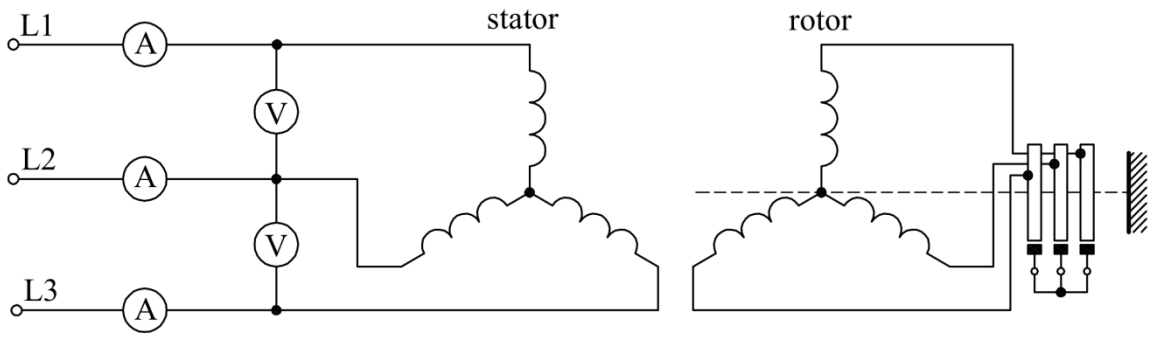
V mém případě mechanické ztráty vyšly přibližně 65 W.



Obr. 2.5: Graf k určení mechanických ztrát a ztrát v železe.

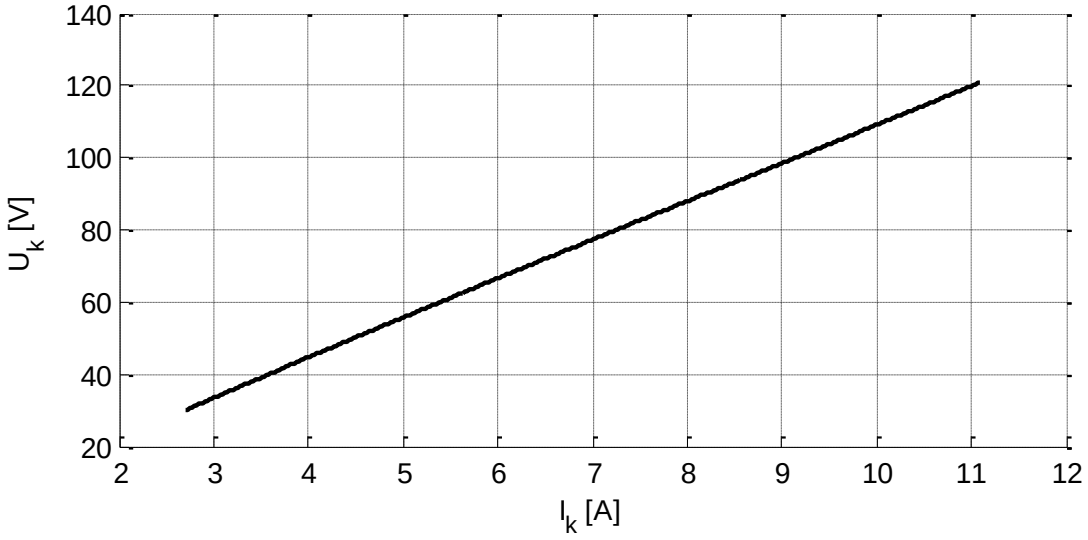
2.4 Měření nakrátko

Stavem nakrátko asynchronního motoru rozumíme ustálený stav poměrů ve statorovém vinutí při rotorovém vinutí spojeného nakrátko a mechanicky zablokovaném rotoru. [13] Musíme zajistit, aby blokování rotoru bylo dostatečně odolné a nedošlo tak k roztočení motoru, ani při omylném připojení na jmenovité napájecí napětí. Vzhledem k tomu, že motor v zablokovaném stavu nevětrá, dojde k rychlému zvýšení jeho teploty. Z tohoto důvodu musíme měření vykonat co nejrychleji, abychom předešli zkreslení výsledků vlivem ohřevu vinutí stroje. V krajním případě by mohlo dojít i ke zničení vinutí stroje. Při měření nakrátko odečítáme napětí nakrátko, proud nakrátko a příkon nakrátko. [9]



Obr. 2.6: Schéma při měření nakrátko.[9]

Z provedeného měření jsem vytvořil charakteristiku nakrátko, což je závislost $I_k = f(U_k)$.



Obr. 2.7: Voltampérová charakteristika.

Voltampérová charakteristika nakrátko je přímková, protože v chodu nakrátko se prosazují pouze rozptylové indukčnosti, které nemají vliv na sycení motoru. [1]

Ztráty nakrátko ΔP_k můžeme vyjádřit jako součet Joulových ztrát (statoru i rotoru) a přídavných ztrát. V chodu nakrátko jsou ztráty v železe zanedbatelné. [9]

$$\Delta P_k = \Delta P_{jk} + \Delta P_d \tag{2.5}$$

Joulovy ztráty ve statoru a rotoru lze vystihnout vztahy:

$$\Delta P_{j1} = 3 \cdot I_k^2 \cdot R_1, \tag{2.6}$$

$$\Delta P_{j2} = 3 \cdot I_k^2 \cdot R_2 \cdot k^2. \text{ [9]} \tag{2.7}$$

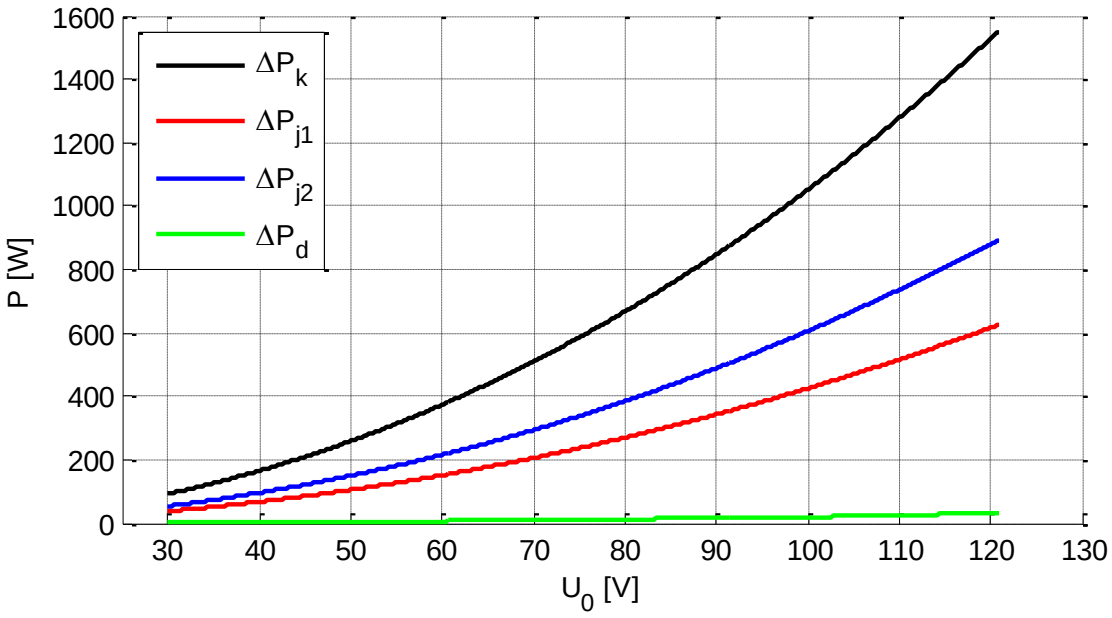
Součtem Joulových ztrát ve statoru a rotoru získáme celkové Joulovy ztráty. [9]

$$\Delta P_{jk} = \Delta P_{j1} + \Delta P_{j2} \tag{2.8}$$

Přídavných ztrát dosáhneme tím, že od celkových ztrát nakrátko, které jsme zjistili měřením, odečteme Joulovy ztráty. [9]

$$\Delta P_d = \Delta P_k - \Delta P_{jk} \tag{2.9}$$

Po výpočtu těchto ztrát jsem provedl grafické znázornění.



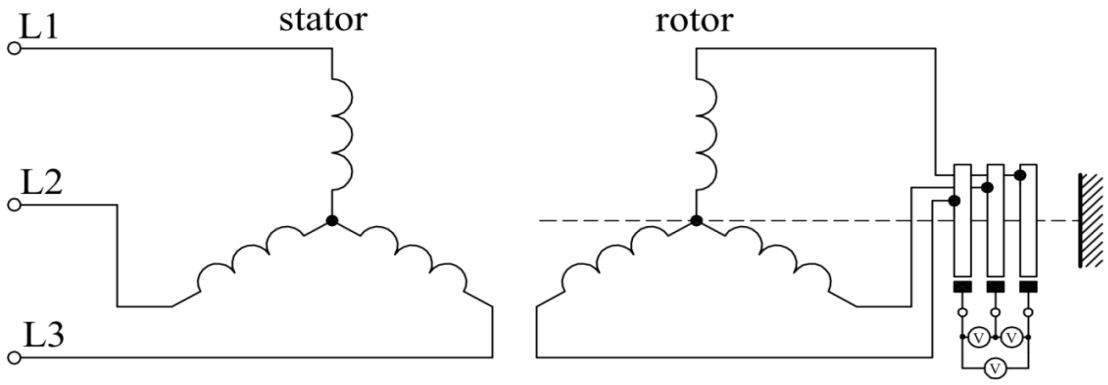
Obr. 2.8: Ztráty v chodu nakrátko.

2.5 Měření převodu stroje

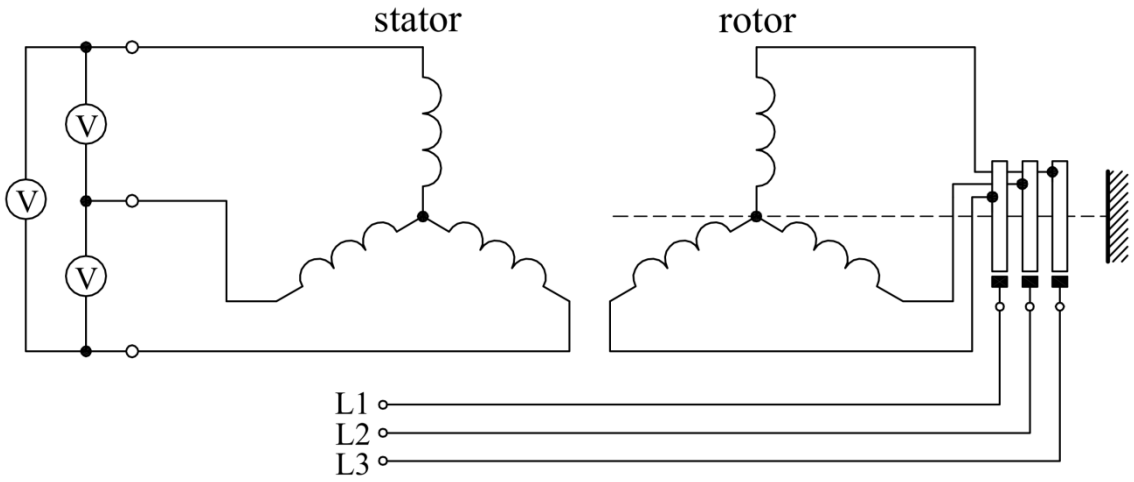
Dáme-li do poměru indukované napětí statoru a rotoru získáme převod stroje. Na statoru je možné změřit pouze svorkové napájecí napětí, které může být dosti rozdílné od indukovaného napětí. U asynchronního motoru je kvůli vzduchové mezeře značný úbytek napětí na rozptylové reaktanci X_σ, a proto ji nemůžeme zanedbat. Naopak magnetizační reaktance X_μ je poměrné nízká. Dále nesmíme zapomenout na vliv sycení železa. Převod k se stanoví pro jmenovité sycení, což je pro jmenovité napájecí napětí. [9]

2.5.1 Postup určení převodu pro motor s vinutou kotvou

V prvním fázi měření napájíme stator a změříme napětí indukované do rotoru (Obr. 2.9). Ve druhé fázi probíhá měření opačně, tj. napájíme rotor a změříme napětí indukované do statoru (Obr. 2.10). [9]

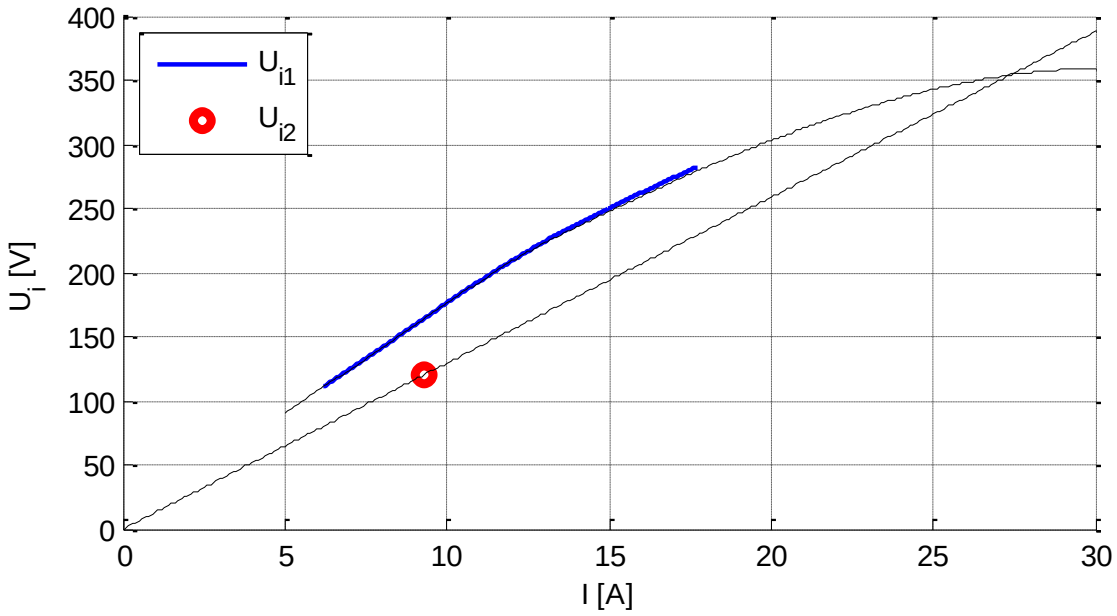


Obr. 2.9: Schéma pro měření převodu − napájíme stator. [9]



Obr. 2.10: Schéma pro měření převodu − napájíme rotor. [9]

Výsledkem měření jsou křivky, které jsem znázornil na následujícím obrázku.



Obr. 2.11: Průběh indukovaného napětí na proudu.

Při napájení statoru se pro jmenovité napětí odečte indukované napětí v rotoru U_{i2}. Směrnice přímky, která je dána vztahem $tg\gamma = \frac{U_{i2}}{I}$, prochází počátkem a hodnotou odečteného indukovaného napětí. Do grafu se zakreslí křivka $U_{i1} = f(I)$. Její extrapolací se dosáhne průsečíku se směrnicí přímky. Ve vniklém průsečíku je shodné sycení jako při napájení ze strany statoru. Nyní jsme získali indukované napětí ve statoru U_{i1}, které má stejné sycení jako indukované napětí v rotoru U_{i2}. Nyní můžeme vypočítat převod k podle vztahu:

$$k = \frac{U_{i1}}{U_{i2}}. \text{ [9]} \tag{2.10}$$

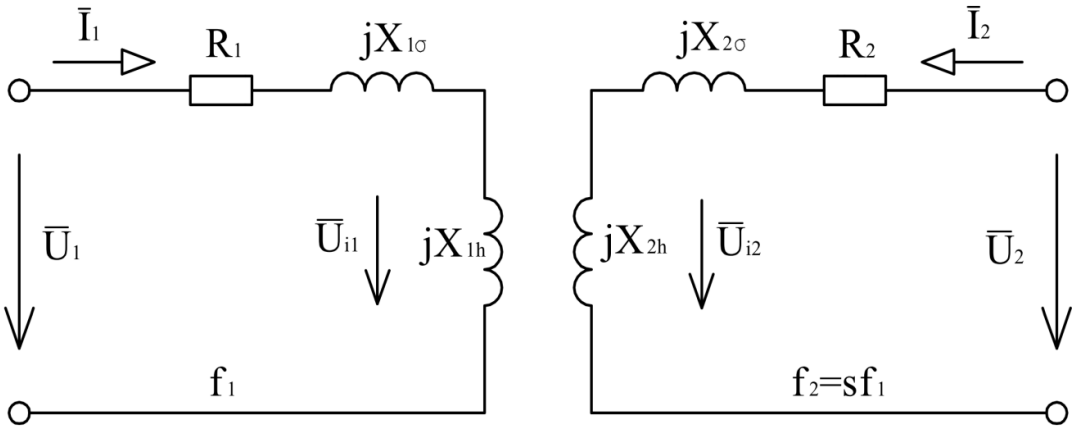
3 Metody pro výpočet provozních charakteristik

3.1 Náhradní schéma asynchronního motoru

Pro analýzu asynchronního motoru má velký význam náhradní schéma, které umožňuje určit závislosti mezi veličinami, charakterizujícími jednotlivé stavy motoru. Náhradní schéma usnadňuje i studium kružnicového diagramu. [10]

Odvození náhradního schématu asynchronního motoru vychází, díky principiální podobnosti, z náhradního schématu transformátoru. Náhradní schéma asynchronního motoru však musí respektovat určité rozdíly:

- Kmitočet statoru je odlišný od kmitočtu rotoru ($f_2 = s \cdot f_1$).
- Počet fází statoru a rotoru je stejný pouze u motorů s vinutou kotvou. Pro motory s klecovou kotvou platí, že počet fází rotoru je vyšší, jelikož každá tyč představuje jednu fázi.
- Asynchronní motor má oproti transformátoru malou vzduchovou mezeru. To má za následek, že magnetický odpor je mnohem větší a tím je větší i magnetizační proud.
- Mechanický výkon na hřídeli musíme respektovat vhodným elektrickým výkonem. [2]



Obr. 3.1: Výchozí náhradní schéma.[11]

Pro toto náhradní schéma platí následující rovnice:

$$\bar{U}_1 = (R_1 + jX_{1\sigma}) \cdot \bar{I}_1 + \bar{\mathrm{U}}_{i1} \tag{3.1}$$

$$\bar{U}_2 = (R_2 + jsX_{2\sigma}) \cdot \bar{I}_2 + \bar{U}_{i2} \tag{3.2}$$

$$\bar{U}_{i2} = s\bar{U}_{i20}. \tag{3.3}$$

Rozdílné kmitočty rotoru a statoru převedeme na shodné kmitočty tak, že vydělíme druhou rovnici skluzem a tím získáme

$$\frac{\bar{U}_2}{s} = \left(\frac{R_2}{s} + jX_{2\sigma}\right) \cdot \bar{I}_2 + \bar{U}_{i20}. \tag{3.4}$$

V dalším kroku zavedeme převod ($k = \frac{U_{i1}}{U_{i2}}$) veličin z rotorových na statorové. Veličiny převádíme na statorové, protože stator je napájen a v případě potřeby lze na něm i měřit. [11]

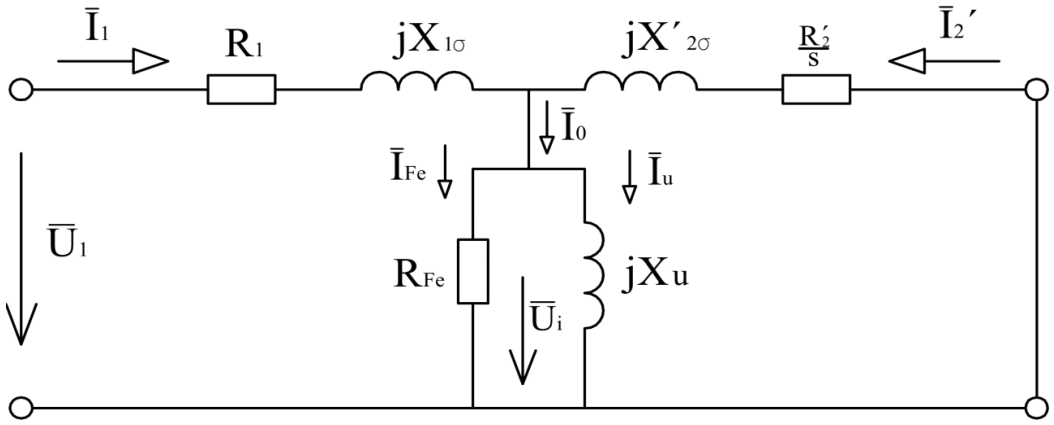
$$R_2^{'} = k^2 \cdot R_2 \text{ , } \bar{I}_2^{'} = \frac{\bar{I}_2}{k} \text{ , } \bar{U}_2^{'} = k \cdot \bar{U}_2 \text{ a také } \bar{\mathrm{U}}_{\mathrm{i20}} = \bar{U}_{i1}. \tag{3.5}$$

Rotorové vinutí je spojeno dokrátka, proto je $U_2 = 0$. Získáme soustavu rovnic, která odpovídá náhradnímu schématu ve tvaru dvojbranu typu T. Pro paralelní spojení R_{Fe} a jX_μ zavedeme impedanci $\bar{Z}_3$. [3; 11]

$$\bar{Z}_3 = \frac{jX_\mu \cdot R_{Fe}}{j_{X\mu} + R_{Fe}} \tag{3.5}$$

Pomocí vztahu (3.5) vyjádříme společné vnitřní indukované napětí. [3; 11]

$$\bar{U}_{i1} = \bar{Z}_3 \cdot \bar{I}_0 = \bar{Z}_3 \cdot (\bar{I}_1 \cdot \bar{I}_2^{'}) \tag{3.6}$$



Obr. 3.2: Náhradní schéma T typu. [11]

Výsledné rovnice tohoto náhradního schématu jsou:

$$\bar{U}_1 = (R_1 + jX_{1\sigma}) \cdot \bar{I}_1 + \bar{U}_{i1}$$

$$0 = \left(\frac{R_2^{'}}{s} + jX_{2\sigma}^{'}\right) \cdot \bar{I}_2^{'} + \bar{U}_{i1}. \text{ [11]} \qquad (3.7)$$

V této kapitole se objevují čárkové hodnoty neboli fázory. Fázor je komplexní veličina popisující velikost proudu nebo napětí a udávající i fázový posun sinusového průběhu.

3.1.1 Parametry náhradního schématu

R_1 − Odpor statorového vinutí

$jX_{1\sigma}$ − rozptylová reaktance rotorového vinutí

jX_{μ} − magnetizační reaktance stroje

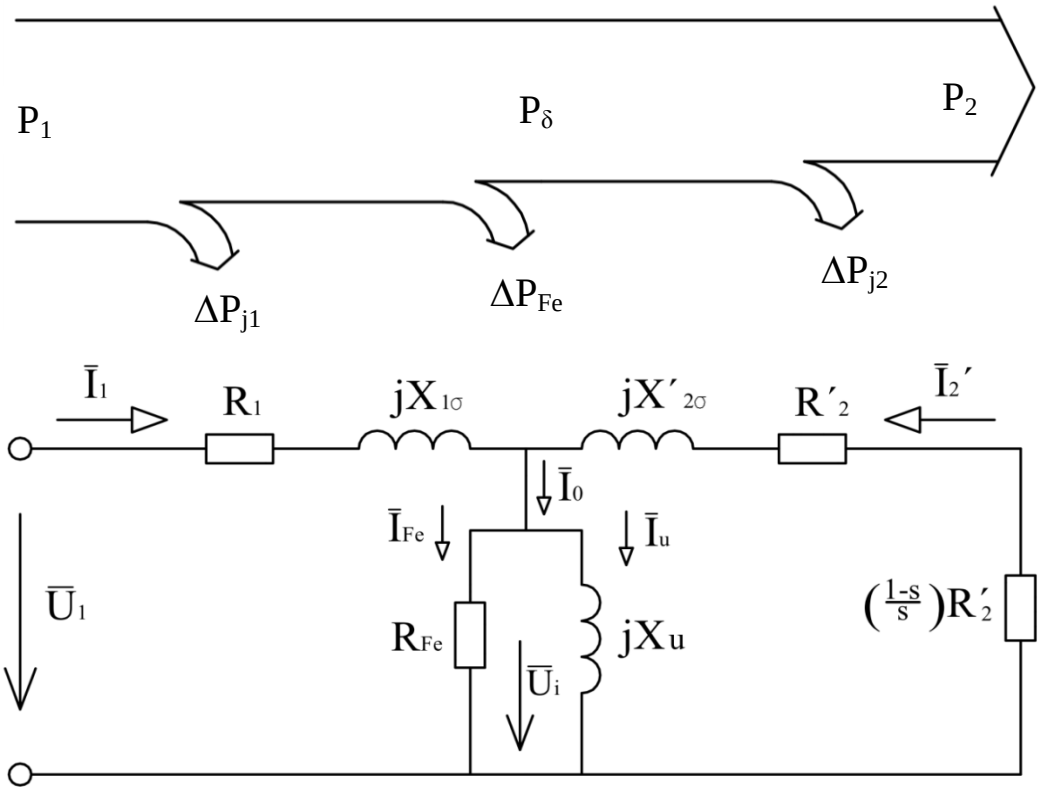
R_{Fe} − odpor, symbolizující ztráty vznikající v magnetickém obvodu stroje

$R_2^{'}$ − odpor rotorového vinutí přepočtený na stator

$jX_{2\sigma}^{'}$ − rozptylová reaktance rotorového vinutí přepočtená na stator [12]

Odpory motoru R_1 a $R_2^{'}$ se mění s teplotou vinutí. Reaktance $X_{1\sigma}$ a $X_{2\sigma}^{'}$ jsou závislé na proudech statoru a rotoru. Při nárůstu proudu vzroste sycení cest, po kterých se uzavírají rozptylové toky, a to má za následek zmenšení reaktance $X_{1\sigma}$ a $X_{2\sigma}^{'}$. Při změně skluzu se mění i kmitočet rotorového proudu, což má opět za následek změnu reaktance $X_{1\sigma}$ a $X_{2\sigma}^{'}$. [10]

3.1.2 Energetická bilance asynchronního motoru



Obr. 3.3: Energetická bilance. [3]

V náhradním schématu se pro lepší znázornění výkonů rozdělí odpor $\frac{R_2^{'}}{s}$ na dva sériově řazené odpory. Odpor $R_2^{'}$ je přepočtená hodnota rotorového odporu a vznikají na něm Joulovy ztráty. Odpor $R_2^{'} \cdot \frac{1-s}{s}$ odpovídá mechanickému zatížení motoru. [1; 3]

Asynchronní motor odebírá ze sítě elektrický příkon

$$P_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot cos\varphi_1. \tag{3.8}$$

Na odporu statorového vinutí vznikají při průchodu statorového proudu Joulovy ztráty dány vztahem (2.2). V železném magnetickém obvodu vznikají ztráty v železe, které lze vypočítat ze vzorce (2.4). Po odečtení těchto ztrát od P_1 získáme výkon P_δ, což je výkon ve vzduchové mezeře, který se přenáší na rotor. Při průchodu proudu rotorovým vinutím, vznikají na odporu $R_2^{'}$ Joulovy ztráty získané ze vzorce (2.7). Nakonec zbývá mechanický výkon

$$P_2 = 3 \cdot I_2^{'2} \cdot R_2^{'} \cdot \frac{1-s}{s}. \text{ [1; 3]} \tag{3.9}$$

3.1.3 Výpočet parametrů náhradního schématu z měření naprázdno a nakrátko

Stav naprázdno

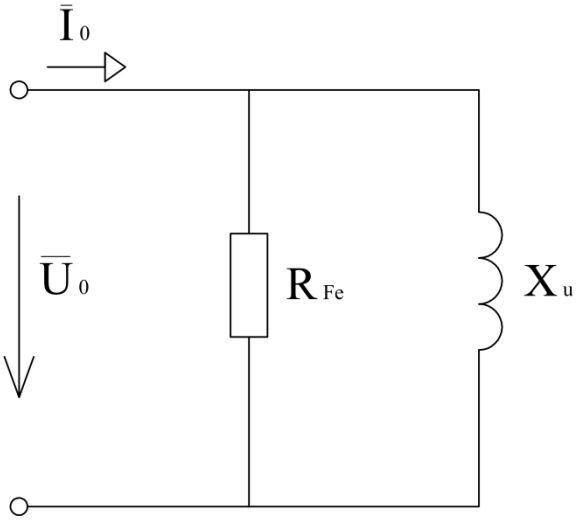
Při nulovém skluzu v ideálním stavu naprázdno se rotorová impedance v náhradním schématu blíží nekonečnu. Impedance statorového obvodu je vůči impedanci magnetizační větve zanedbatelná, a proto se nám náhradní schéma zjednoduší do tvaru podle Obr. 3.4. Díky tomuto zjednodušení lze z jedné fáze vypočítat parametry X_μ a R_{Fe}. [1; 3]

$$I_{Fe} = \frac{\Delta P_{Fe+m}}{3 \cdot U_1} = \frac{325{,}2}{3*230} = 0{,}47\ A \tag{3.10}$$

$$I_\mu = I_0 - I_{Fe} = 9{,}2 - 0{,}47 = 8{,}73\ A \tag{3.11}$$

$$X_\mu = \frac{U_i}{I_\mu} = \frac{194{,}1}{8{,}73} = 22{,}2\ \Omega \tag{3.12}$$

$$R_{Fe} = \frac{U_i^2}{\Delta P_{Fe+m}} = \frac{194{,}1^2}{325{,}2} = 115{,}9\ \Omega \tag{3.13}$$



Obr. 3.4: Zjednodušené náhradní schéma. [1]

Stav nakrátko

Ve stavu nakrátko při jednotkovém skluzu prochází proud nakrátko I_k, který je 2-8 násobek jmenovitého proudu I_N. Z tohoto důvodu můžeme magnetizační větev s proudem naprázdno zanedbat, a tím dojde ke zjednodušení náhradního schématu. Díky tomuto zjednodušení je možné z měření nakrátko vypočítat parametry $R_2^{'}$, $X_{1\sigma}$, $X_{2\sigma}^{'}$. [1]

$$U_{fk} = \frac{U_k}{\sqrt{3}} = \frac{120,9}{\sqrt{3}} = 69,8\ V \tag{3.14}$$

$$Z_k = \frac{U_{fk}}{I_k} = \frac{69,8}{11,1} = 6,3\ \Omega \tag{3.15}$$

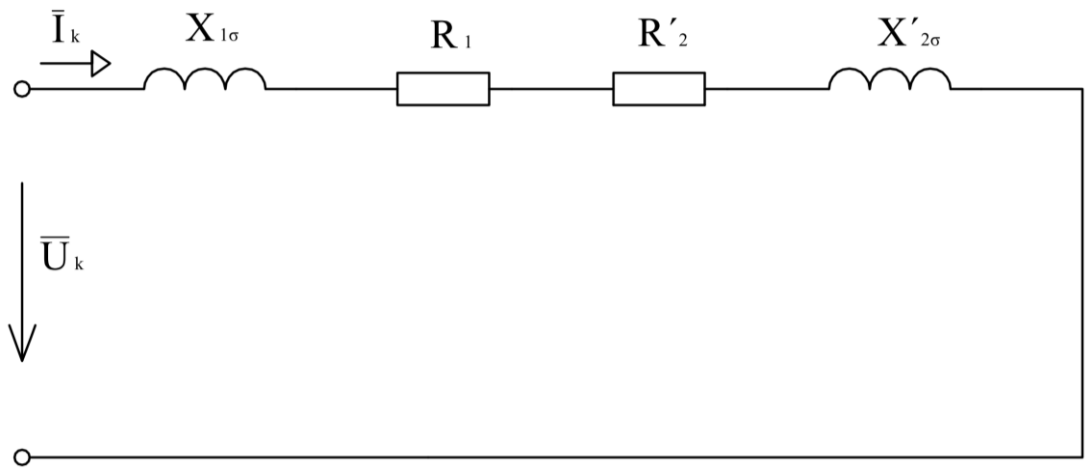
$$R_k = Z_k \cdot cos\ \varphi_k = 6,3 \cdot 0,636 = 4,01\ \Omega \tag{3.16}$$

$$X_k = Z_k \cdot sin\ \varphi_k = 6,3 \cdot 0,77 = 4,87\ \Omega \tag{3.17}$$

$$X_{1\sigma} = X_{2\sigma}^{'} = \frac{jX_k}{2} = \frac{4,87}{2} = 2,43\ \Omega \tag{3.18}$$

$$R_1 = 1,7\ \Omega \tag{3.19}$$

$$\mathrm{R}_2^{'} = R_k - R_1 = 4,01 - 1,7 = 2,31\ \Omega \tag{3.20}$$



Obr. 3.5: Zjednodušené náhradní schéma. [1]

Shrnutí výsledných parametrů náhradního schématu

Tab. 3.1: Parametry náhradního schématu.

R_1 [Ω]	R_2' [Ω]	$X_{1\sigma}$ [Ω]	$X_{2\sigma}'$ [Ω]	R_{Fe} [Ω]	X_μ [Ω]
1,7	2,31	2,43	2,43	115,9	22,2

3.2 Kružnicový diagram asynchronního motoru

Kružnicový diagram dostatečně popisuje provozní vlastnosti motoru a lze z něho zjistit s dobrou přesností všechny provozní charakteristiky. [13] Ke zkonstruování kružnicového diagramu je zapotřebí znalost hodnot, které lze zjistit měřením ve stavu naprázdno a nakrátko. [1]

Kružnicový diagram platí spíše pro motory s vinutou kotvou, protože koncový bod fázoru statorového proudu se pohybuje přesně po kružnici, kdežto u motorů s kotvou nakrátko se koncový bod fázoru pohybuje pouze přibližně po kružnici. Hovoříme-li o strojích s vírovými či dvojitými kotvami, nejedná se o kružnici, jelikož kružnice přechází na křivky vyšších řádů. [9; 14]

3.2.1 Konstrukce kružnicového diagramu

Konstrukce kružnicového diagramu vychází z hodnot získaných měřením asynchronního stroje naprázdno a nakrátko, a také ze znalosti odporů statoru R_1 a rotoru R_2'. [14]

Tab. 3.2: Naměřené hodnoty.

naprázdno	nakrátko	odpor
$I_0 = 9{,}2\ A$	$I_k = 11{,}1\ A$	$R_1 = 1{,}7\ \Omega$
$\varphi_0 = 82{,}93\ °$	$\varphi_k = 50{,}5\ °$	$R_2' = 2{,}31\ \Omega$

Před samotnou konstrukcí je nutné přepočítat proud nakrátko na jmenovité napětí, protože konstrukce kružnicového diagramu vychází z toho, že napětí je konstantní. [14]

$$I_{kN} = \frac{U_N}{U_k \cdot I_k} = \frac{380}{120{,}9 \cdot 11{,}1} = 34{,}8\ A \tag{3.21}$$

Na začátku si zvolíme komplexní rovinu, v níž budeme kružnicový diagram konstruovat. Reálná osa komplexní roviny směřuje vzhůru a imaginární osa komplexní roviny směřuje vpravo. Proti imaginární ose se odečítají příkony, a proto se jedná o tzv. přímku příkonů PP. [14]

Nyní se zakreslí fázor proudu naprázdno, který je dán velikostí proudu naprázdno I_0 a účiníkem ve stavu naprázdno $\cos\varphi_0$. Dále se zakreslí fázor proudu nakrátko, který je dán velikostí proudu nakrátko I_{kN} a účiníkem ve stavu nakrátko $\cos\varphi_k$. [1]

Další krok je, že narýsujeme spojnici bodů I_0 a I_k. Zkonstruujeme její osu (o_1). Na této ose se nachází střed kružnice, po které se pohybují proudy. [14]

Druhá osa (o_2), na které se nachází střed kružnice je osa úsečky, která je rovnoběžná s reálnou osou a vymezená bodem I_0 a fázorem $\bar{I}_k$. [14]

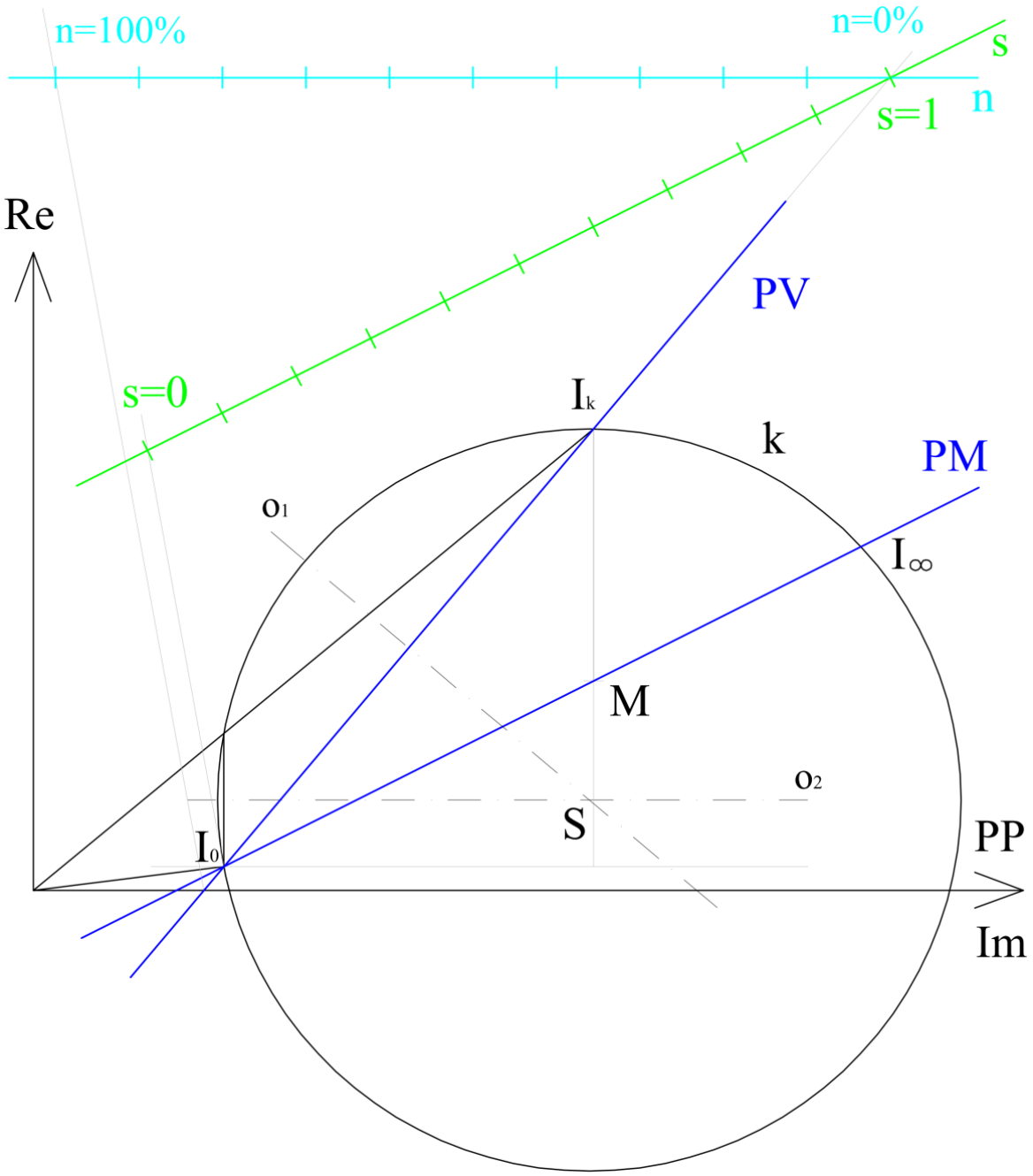
Střed hledané kružnice S je dán průsečíkem os o_1 a o_2. Poloměr kružnice je dán vzdáleností středu kružnice od koncových bodů fázorů $\bar{I}_k$ a $\bar{I}_0$. Nyní zakreslíme kružnici k. [14]

Nyní provedeme konstrukci vedoucí k nalezení stupnice skluzu, jenž bude v lineárním měřítku. Vyneseme pomocnou přímku, která prochází bodem I_0 a je rovnoběžná s imaginární osou. Vzdálenost mezi pomocnou přímkou a imaginární osou udává ztráty naprázdno. Předpokládáme, že tyto ztráty jsou konstantní pro všechny provozní stavy stroje. [14]

Dalším krokem bude sestrojení přímky momentů. Pro sestrojení této přímky potřebujeme pomocný bod M. Tento bod leží na úsečce, která je rovnoběžná s reálnou osou, kde jeden koncový bod je v bodě I_k a druhý koncový bod je průsečík s pomocnou přímkou vynesenou v předchozím kroku. Bod M rozděluje úsečku v poměru velikostí odporů R_1 a $R_2^{'}$, přičemž část odpovídající odporu R_1 je v dolní části a naopak. Nyní sestrojíme přímku procházející body M a I_0. Tato přímka se nazýváme přímka momentů PM. Průsečík přímky PM a kružnice je označen bodem I_∞. Tento bod je koncovým bodem fázoru proudu, který by strojem procházel při připojení k síti a nekonečných otáčkách rotoru. [14]

Díky vytvořené přímce momentů PM můžeme sestrojit stupnici skluzů s, která je s PM rovnoběžná. Z důvodu přehlednosti se stupnice vynáší mimo kružnicový diagram. Na stupnici skluzů musíme najít body pro skluz $s = 0$ a $s = 1$. Mezi těmito body je stupnice lineární. Bod pro skluz $s = 0$ se nachází v průsečíku tečny ke kružnici v bodě I_0 s přímkou skluzů. Bod pro skluz $s = 1$ se nachází v průsečíku přímky procházející body I_0 a I_k s přímkou skluzů. Přímka procházející body I_0 a I_k se nazývá přímka výkonů PV. [14]

Další přímka, kterou sestrojíme, je přímka účinností. Tato přímka je rovnoběžná s imaginární osou a kříží se se stupnicí skluzů v bodě $s = 1$. V tomto průsečíku má stroj nulovou účinnost ($\eta = 0$ %). Bod $\eta = 100$ % získáme tím, že protáhneme přímku výkonů do průsečíku s imaginární osou. Ve vzniklém průsečíku uděláme rovnoběžku s tečnou ke kružnici. V místě, kde se tato rovnoběžka protne s přímkou účinnosti má stroj účinnosti $\eta = 100$ %. Stupnice je stejně jako u skluzu lineární. [14]



Obr. 3.6: Sestrojený kružnicový diagram.

4 Provozní charakteristiky asynchronního stroje

4.1 Momentová charakteristika

Momentová charakteristika je závislost momentu na skluzu $M = f(s)$ a lze ji odhadnout z tzv. Klossova vztahu. [3; 15]

$$M = \frac{2 \cdot M_{max}}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}} \tag{4.1}$$

Skluz s_m je skluz při maximálním momentu M_{max}. Pro oblast malých skluzů ($s \ll s_m$) má průběh momentu tvar přímky: $M = \frac{2 \cdot M_{max} \cdot s}{s_m}$. V přídě, že $s = s_m$, tak moment odpovídá maximálnímu momentu ($M = M_{max}$). Pro oblast velkých skluzů ($s \gg s_m$) má průběh momentu tvar hyperboly: $M = \frac{2 \cdot M_{max} \cdot s_m}{s}$. [3; 15]

Stroj se nachází v motorickém režimu, pokud je skluz 0 až 1. Pokud je skluz větší než 1, tak se stroj chová jako elektrická brzda. V případě, že skluz je menší než 0, tak je stroj v generátorickém režimu a dodává energii do sítě. [3]

Pro skluzy $s = 0 \div s_m$ je motor ve stabilním stavu. Z tohoto důvodu provozujeme motor vždy v této oblasti. Pro skluz $s = s_m \div 1$ se motor nachází v nestabilním stavu. V tomto stavu se motor nachází pouze při rozběhu. Motor nesmí být v tomto stavu provozován z důvodu velkého proudu, a také by mohlo dojít k zastavení motoru. [10]

Vliv parametrů na momentovou charakteristiku:

Moment závisí na napájecím napětí kvadraticky. Při dvojnásobném zmenšení napětí se hodnota momentu zmenší čtyřikrát. [11]

Vlivem statorového odporu R_1 není momentová charakteristika pro motor a generátor zcela symetrická. S rostoucím výkonem klesá vliv odporu R_1 na momentovou charakteristiku. [11]

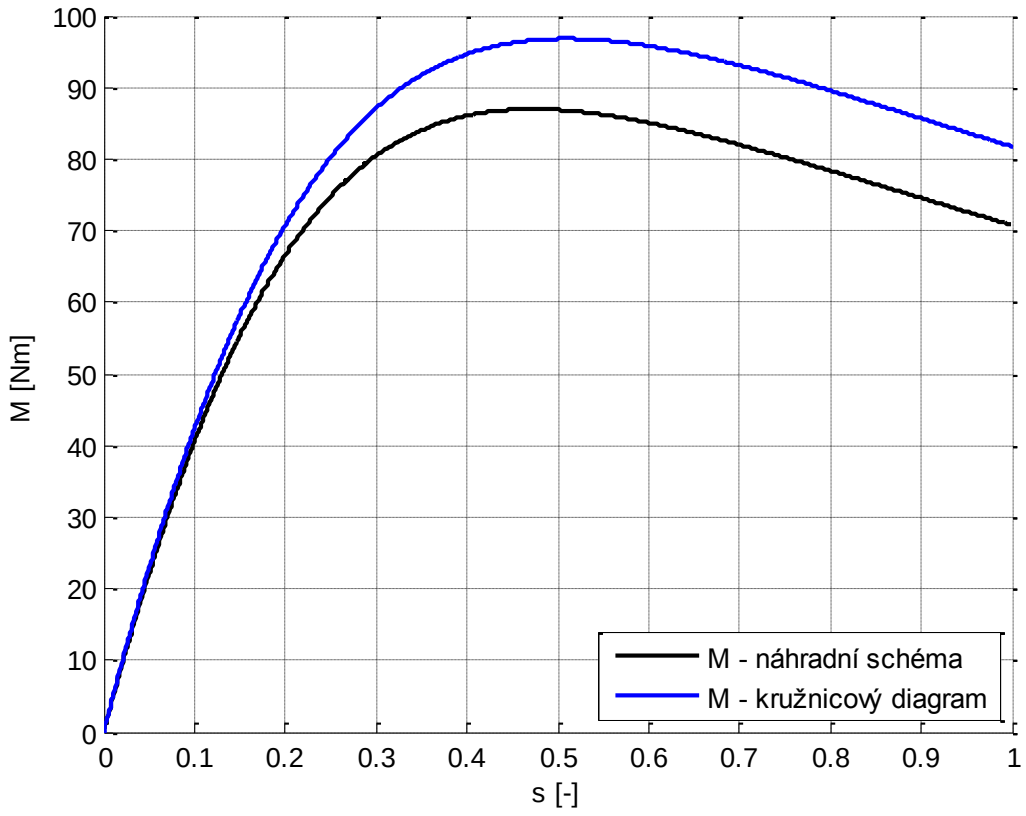
Při změně rotorového odporu $R_2^{'}$ zůstává maximální moment konstantní, ale mění se skluz zvratu (s_m). Skluz zvratu lze vyjádřit pomocí rovnice:

$$s_m = \pm \frac{R_2^{'}}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}}. \; [1; 11] \tag{4.2}$$

U velkých motorů lze zanedbat statorový odpor R_1 a vztah lze rovnici napsat:

$$s_m = \pm \frac{R_2^{'}}{X_k}. \; [1; 11] \tag{4.3}$$

Při změně frekvence se mění synchronní otáčky. Pokud je napájecí napětí konstantní, tak se mění i maximální moment M_{max}, ale pokud se napětí mění úměrně s frekvencí ($\frac{U}{f} = konst.$), tak se maximální moment nemění. [11]



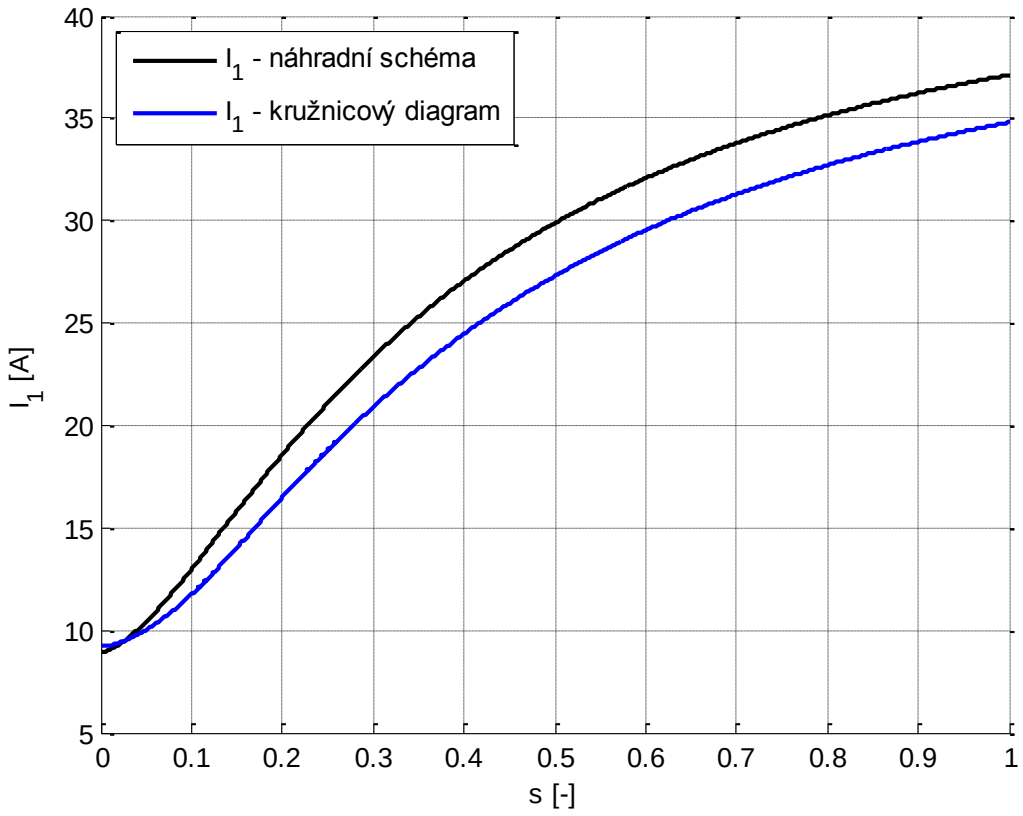
Obr. 4.1: Momentová charakteristika získaná z náhradního schématu a z kružnicového diagramu.

4.2 Proudová charakteristika

Proudová charakteristika je závislost proudu motoru na skluzu $I_1 = f(s)$.

Při rozběhu motoru ($s = 1$) je motor ve stavu nakrátko, a tudíž jím protéká proud nakrátko (záběrný proud). Z náhradního schématu vyplývá, že tento proud je omezen jen malou impedancí. Záběrný proud je u běžných motorů pěti až desetinásobek jmenovitého proudu. Z tohoto důvodu můžeme využít rozběh přímým připojením na síť pouze u motorů se jmenovitým výkonem do 5 kW. Pro větší motory máme různé možnosti rozběhu: snížením vstupního napětí (přepínání Y-D, spouštěcí autotransformátor, Soft start,...), kmitočtový rozběh, rozběh změnou odporu rotoru. [1]

Při skluzu $s \to 0$ je asynchronní motor ve stavu naprázdno a odebírá ze sítě proud naprázdno.



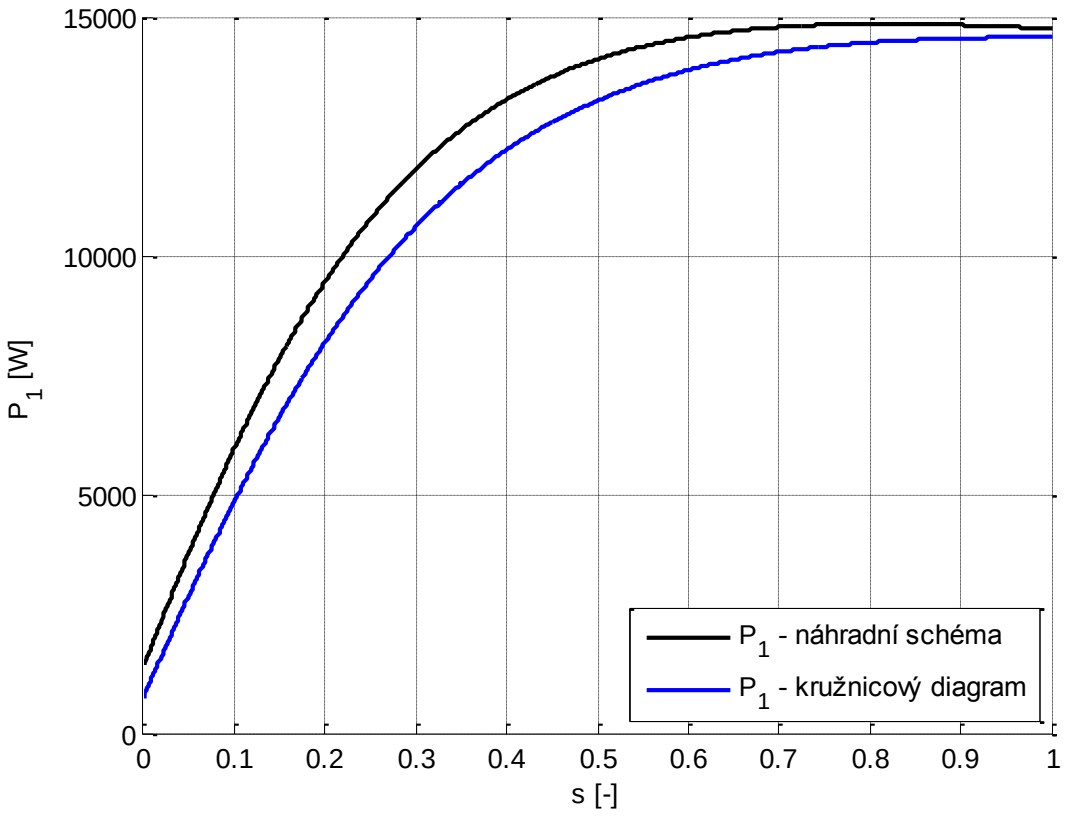
Obr. 4.2: Proudová charakteristika získaná z náhradního schématu a z kružnicového diagramu.

4.3 Příkonová charakteristika

Příkonová charakteristika je závislost činného elektrického příkonu na skluzu $P_1 = f(s)$.

V motorickém režimu vstupuje do statorového obvodu motoru činný elektrický příkon, který je možné vypočítat ze vztahu (3.8).

Při rozběhu motoru ($s = 1$) je činný elektrický příkon, který motor odebírá ze sítě, nejvyšší a s postupně rostoucími otáčkami (skluz klesá k 0) se činný elektrický příkon snižuje.



Obr. 4.3: Příkonová charakteristika získaná z náhradního schématu a z kružnicového diagramu.

4.4 Výkonová charakteristika

Výkonová charakteristika je závislost mechanického výkonu na skluzu $P_2 = f(s)$.

Mechanický výkon na hřídeli lze vypočítat ze vztahu (3.9).

Další možnost pro získání mechanického výkonu na hřídeli je, že odečteme všechny ztráty od činného elektrického příkonu. Vyjádřeno vztahem:

$$P_2 = P_1 - \Delta P_{j1} - \Delta P_{Fe} - \Delta P_{j2} - \Delta P_m. \text{ [1]} \tag{4.4}$$

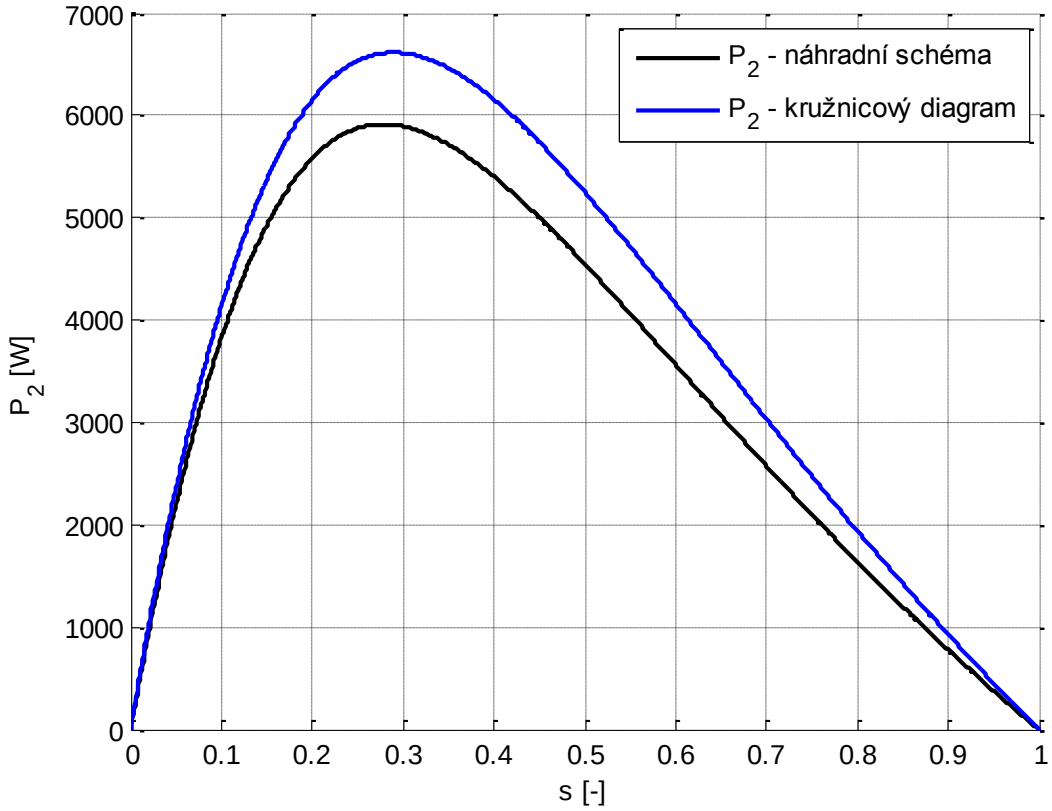
Při rozběhu motoru lze mechanický výkon omezit například pomocí přepínače Y/D. Po sepnutí motoru do hvězdy je na každé fázi fázové napětí a vinutím prochází stejný proud jako přívodními kabely. Výkon motoru při zapojení do hvězdy se vypočte ze vztahu:

$$P_Y = 3 \cdot U_f \cdot I_f. \text{ [2]} \tag{4.5}$$

Vztah (4.7) si vyjádříme pomocí sdruženého napětí:

$$P_Y = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot I_f. \text{ [2]} \tag{4.6}$$

Po přepnutí motoru do trojúhelníka je na každé fázi stroje sdružené napětí. Proud procházející fází statorového vinutí bude o $\sqrt{3}$ krát vyšší. Mechanický výkon vzroste na trojnásobek. [2]



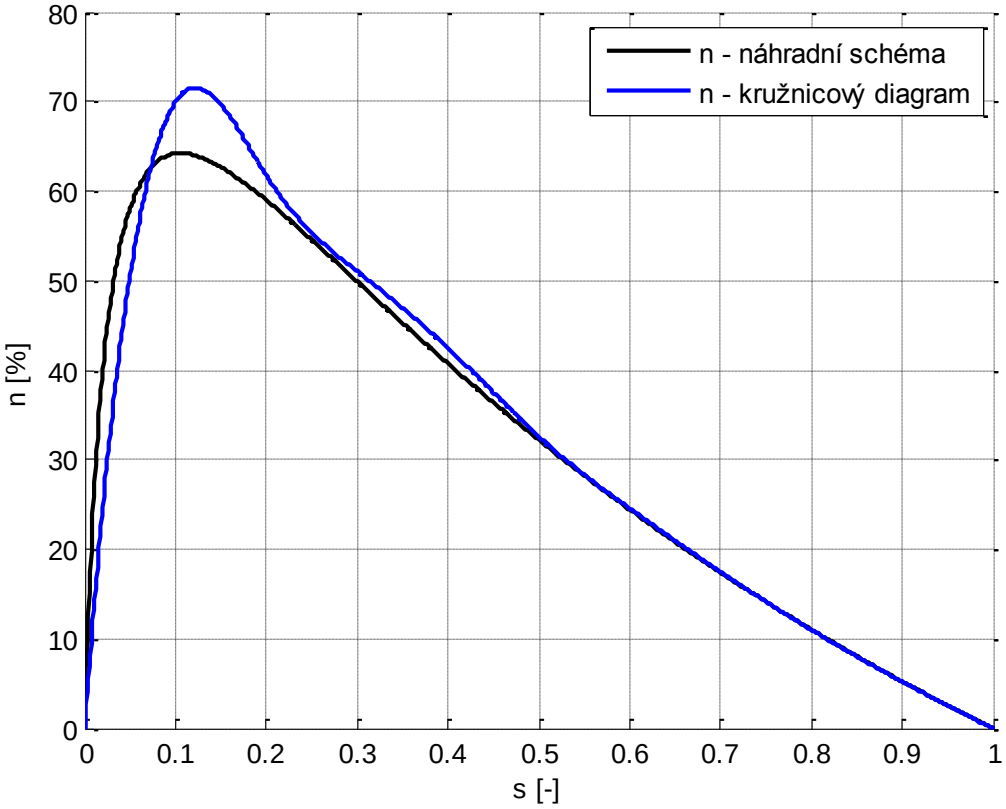
Obr. 4.4: Výkonová charakteristika získaná z náhradního schématu a z kružnicového diagramu.

4.5 Účinnost

Motor odebírá ze sítě elektrický příkon P_1, ve statorovém odporu vznikají Joulovy ztráty ΔP_{j1}, v magnetickém obvodu vznikají ztráty v železe ΔP_{Fe} (hysterezní ztráty a ztráty vířivými proudy), v rotorovém odporu vznikají Joulovy ztráty ΔP_{j2}. Nyní po odečtení ztrát od příkonu dostaneme celkový mechanický výkon na hřídeli. Část tohoto výkonu se spotřebuje na krytí mechanických ztrát ΔP_m (ztráty v ložiskách a ventilační ztráty). Výsledný výkon P_2 je užitečný mechanický výkon na hřídeli. Účinnost motoru je dána poměrem užitečného mechanického výkonu P_2 a činného elektrického příkonu P_1. Účinnost lze tedy vypočítat ze vztahu:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2+\Delta P_{j1}+\Delta P_{Fe}+\Delta P_{j2}+\Delta P_m}. \text{ [1]} \qquad (4.7)$$

Účinnost motoru je při jmenovitém zatížení poměrně vysoká. Účinnost se pohybuje od 60 % u nejmenších motorů až nad 95 % u motorů pro velké výkony. Asynchronní motor však nemá maximální účinnost při jmenovitém zatížení, ale při zatížení o zhruba 10 % menším. [1]



Obr. 4.5: Závislost účinnosti na skluzu získaná z náhradního schématu a z kružnicového diagramu.

4.6 Vyhodnocení grafů

V každém grafu se vždy nachází dvě charakteristiky získané různými přístupy. Jeden z přístupů, který jsem použil, je metoda náhradního schématu. Této metodě odpovídá černá křivka. Jako druhý přístup jsem zvolil metodu kružnicového diagramu, které odpovídá modrá křivka.

4.6.1 Postup pro získání křivky metodou náhradního schématu:

Ve všech vztazích jsem za hodnotu skluzu dosazoval tisíc hodnot v intervalu od 0 do 1. Nejdříve jsem si z hodnot, získaných z měření naprázdno a nakrátko, vypočítal parametry náhradního schématu (Tab. 3.1). Spočtené parametry jsem následně použil pro další potřebné výpočty: $\bar{Z}_1 = R_1 + jX_{1\sigma}$, $\bar{Z}_2 = \frac{R_{Fe} \cdot jX_\mu}{R_{Fe} + jX_\mu}$, $\bar{Z}_3 = \frac{R_2'}{s} + jX_{2\sigma}'$, $\bar{Z}_{23} = \frac{\bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_3}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_3}$, $\bar{Z}_c = \bar{Z}_1 + \bar{Z}_{23}$, $\bar{U}_i = U_1 \cdot \frac{\bar{Z}_{23}}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_{23}}$.

Momentová charakteristika

Pro výpočet momentu je potřeba znát výkon P_2 a úhlovou rychlost ω. Výkon jsem získal ze vztahu (3.9) a úhlovou rychlost jsem zjistil pomocí vztahu:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot f \cdot (1-s)}{p_p}, \tag{4.8}$$

kde $f = 50\ Hz$ a $p_p = 3$.

Následně se moment spočítá ze vztahu:

$$M = \frac{P_2}{\omega}. \tag{4.9}$$

Proudová charakteristika

Výsledný statorový proud jsem vypočítal ze vztahu:

$$\bar{I}_1 = \frac{U_1}{\bar{Z}_c}, \tag{4.10}$$

kde napájecí napětí U_1 je konstantní hodnota 380 V.

Příkonová charakteristika

Pro výpočet příkonu je nutná znalost komplexně sdruženého statorového proudu $\bar{I}_1^*$. Poté lze určit příkon jako reálnou část ze vzorce:

$$P_1 = \mathrm{Re}\,\{3 \cdot U_1 \cdot \bar{I}_1^*\}. \tag{4.11}$$

Výkonová charakteristika

Vztah pro výpočet výkonu P_2 je dán vztahem (3.9). K určení výkonu je zapotřebí znát rotorový proud $\bar{I}_2$, který jsem vypočítal jako:

$$\bar{I}_2^{'} = \frac{\bar{U}_i}{\bar{Z}_3}. \tag{4.12}$$

Účinnost

Výpočet účinnosti se zjistí podílem výkonu a příkonu, který se vynásobí stem tak, aby výsledek vyšel v procentech:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100. \tag{4.13}$$

4.6.2 Postup pro získání křivky pomocí metody kružnicového diagramu:

Nejdříve jsem si pomocí hodnot, získaných z měření naprázdno a nakrátko, sestrojil kružnicový diagram (postup je popsaný v bodu 3.2.1). Výsledný kružnicový diagram je na Obr. 3.6.

Momentová charakteristika

Velikost momentu se z kružnicového diagramu odečítá vždy pro konkrétní skluz. Podle zvoleného skluzu vznikne různě velký fázor proudu, který má koncový bod na kružnici. Pro odečet momentu je potřeba určit vzdálenost koncového bodu fázoru od průsečíku rovnoběžky s reálnou osou s přímkou momentů. Výslednou vzdálenost jsem vynásobil měřítkem momentu m_m, které jsem spočítal pomocí vztahu: $m_m = \frac{m_p}{\omega_s} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot m_i}{\frac{\pi \cdot n_s}{30}}$. Tento postup jsem provedl celkem pro 11 hodnot skluzů v intervalu od 0 do 1. Výsledné momentové charakteristiky jsem dosáhl pomocí matematického proložení těchto bodů.

Proudová charakteristika

Podle zvoleného skluzu vznikne různě velký fázor proudu, který má koncový bod na kružnici. Dále jsem spojil koncový bod fázoru proudu s počátkem soustavy. Velikost proudu jsem získal vynásobením vzniklé úsečky měřítkem proudů m_i. Měřítko proudů se volí libovolně (já jsem zvolil: $m_i = 0{,}25\ A/mm$). Tento postup jsem uskutečnil celkem pro 11 hodnot skluzů v intervalu od 0 do 1. Výslednou proudovou charakteristiku jsem získal matematickým proložením těchto bodů.

Příkonová a výkonová charakteristika

Podle zvoleného skluzu vznikne různě velký fázor proudu, který má koncový bod na kružnici. V dalším kroku jsem sestrojil rovnoběžku s reálnou osou, která prochází koncovým bodem fázoru proudu. Pro odečet příkonu je nezbytné určit vzdálenost koncového bodu fázoru proudu od průsečíku rovnoběžky s imaginární osou. Pro odečet výkonu je důležité stanovit vzdálenost koncového bodu fázoru proudu od průsečíku sestrojené rovnoběžky s přímkou výkonů. Hodnotu příkonu i výkonu pro daný skluz jsem získal vynásobením změřených vzdáleností měřítkem výkonů m_p. Tento postup jsem provedl celkem pro 11 hodnot skluzů v intervalu od 0 do 1. Matematickým proložením 11 získaných bodů jsem dosáhl výsledné příkonové a výkonové charakteristiky.

Účinnost

Podle zvoleného skluzu vznikne různě velký fázor proudu, který má koncový bod na kružnici. Nyní jsem sestrojil přímku, která prochází průsečíkem přímky výkonů s imaginární osou a koncovým bodem fázoru proudu. Tato přímka také protne i stupnici účinnosti. Výslednou účinnost jsem určil jako poměr vzdálenosti průsečíku přímky se stupnicí od počátku stupnice ku celkové velikosti stupnice. Tento postup jsem realizoval celkem pro 11 hodnot skluzů v intervalu od 0 do 1. Získané body jsem proložil křivkou, která udává výslednou účinnost stroje.

4.6.3 Příčiny rozdílů

Rozdíl by mohl být zapříčiněn tím, že každá z použitých metod je založena na zcela odlišném postupu, ze kterého lze provozní charakteristiky získat.

Metoda náhradního schématu je čistě početní. Nejdříve se vypočítaly hodnoty parametrů náhradního schématu a poté se tyto hodnoty použily pro výpočet momentu, proudu, příkonu, výkonu a účinnosti. Tudíž při velkém množství provedených výpočtů mohlo dojít k určitým nepřesnostem vlivem zaokrouhlování výsledků. V některých výpočtech došlo i k zanedbání méně významných parametrů, což mohlo být další příčinou odchylky.

Metoda kružnicového diagramu je spíše grafická. Z hodnot získaných při měření se sestrojil kružnicový diagram a následně se z něho odečítaly výsledky. Odečítání výsledků probíhalo tak, že daná vzdálenost se násobila příslušným měřítkem. U této metody mohlo dojít k nepřesnostem například při konstrukci diagramu. Další malé nepřesnosti mohly opět vzniknout při zaokrouhlení výsledků.

Níže jsem uvedl tabulky, které znázorňují procentuální rozdíly obou metod.

Tab. 4.1: Procentuální rozdíl momentové charakteristiky

s [-]	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
rozdíl [%]	0,0	4,1	5,9	7,6	9,1	10,3	11,2	11,9	12,5	13,0	13,3

Tab. 4.2: Procentuální rozdíl proudové charakteristiky

s [-]	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
rozdíl [%]	3,1	9,6	11,2	10,5	9,5	8,7	8,0	7,4	6,9	6,5	6,2

Tab. 4.3: Procentuální rozdíl příkonové charakteristiky

s [-]	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
rozdíl [%]	36,4	18,5	13,4	10,2	7,9	6,2	4,7	3,5	2,6	1,9	1,2

Tab. 4.4: Procentuální rozdíl výkonové charakteristiky

s [-]	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
rozdíl [%]	0,0	8,2	10,2	12,2	13,9	15,4	16,7	17,6	18,2	19,1	0,0

Tab. 4.5: Procentuální rozdíl účinnosti

s [-]	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
rozdíl [%]	0,0	8,9	4,5	2,5	4,3	1,1	0,5	0,3	0,2	0,8	0,0

Závěr

První kapitolu jsem věnoval principu a konstrukci asynchronního stroje. V principu je podrobně vylíčeno chování stroje pro různé režimy chodu. V konstrukci jsou zahrnuty jednotlivé části motoru, které tvoří stator a rotor.

V druhé kapitole jsem se zaobíral měřením provedeným na asynchronním motoru. K měření jsem použil měřicí přístroj Hioki 3166, který umožňuje současně měřit: napětí, proud, výkon (činný, jalový, zdánlivý), účiník a frekvenci. Na motoru bylo provedeno měření naprázdno, měření nakrátko a měření převodu. Z měření naprázdno a nakrátko jsem graficky vyjádřil voltampérovou charakteristiku a ztráty. Hodnoty získané z měření převodu vedly k výpočtu převodu stroje s výsledkem 2,8.

Třetí kapitola nás seznamuje s náhradním schématem a s kružnicovým diagramem. Součástí této kapitoly je určení parametrů náhradního schématu. Při chodu motoru naprázdno lze zjednodušit náhradní schéma a následně určit parametry X_μ a R_{Fe}. Je-li motor v chodu nakrátko, dojde k zjednodušení náhradního schématu, ze kterého lze vypočítat parametry $R_2^{'}$, $X_{1\sigma}$, $X_{2\sigma}^{'}$. Dále tato kapitola obsahuje obrázek a postup konstrukce sestrojeného kružnicového diagramu (Obr. 3.6).

Ve čtvrté kapitole jsem se zabýval pěti vybranými provozními charakteristikami. V každé charakteristice se nachází dvě křivky, kde černá křivka představuje metodu náhradního schématu a naopak modrá křivka označuje metodu kružnicového diagramu. Metoda náhradního schématu je založena na řadě výpočtů, které vedou k získání provozních charakteristik. Přesnost této metody je poměrně vysoká, neboť k odchylce mohlo dojít pouze vlivem zaokrouhlování výsledků nebo zanedbáním málo významných parametrů. Metoda kružnicového diagramu je převážně grafická, nicméně i v této metodě je nutné použít několik výpočtů. Zde mohla odchylka vzniknout nepřesnostmi v rýsování diagramu, ale i v následném odečtu potřebných hodnot. Pokud bych měl porovnat pracnost obou přístupů, řekl bych, že pracněji se získají charakteristiky pomocí metody kružnicového diagramu, neboť odečet jednotlivých hodnot je velmi zdlouhavý. Dále jsem uvedl tabulky s procentuálním rozdílem obou metod, přičemž tento rozdíl je pro každou charakteristiku mírně odlišný. Hlavním zjištěním této práce je, že obě metody se mezi sebou odlišují v průměru o 8 %.

Seznam literatury a informačních zdrojů

[1] UHLÍŘ, Ivan. *Elektrické stroje a pohony.* 1. vyd. Praha: ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03730-0.

[2] BARTOŠ, Václav, Josef ČERVENÝ, Josef HRUŠKA, Anna KOTLANOVÁ a Bohumil SKALA. *Elektrické stroje.* 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. 140s. ISBN 80-7043-444-9.

[3] BAŠTA, Jan, Jaroslav CHLÁDEK a Imrich MAYER. *Teorie elektrických strojů.* 1. vyd. Praha: SNTL/ALFA, 1968. 584 s. DT 621.313.01.

[4] MĚŘIČKA, Jiří, Václav HAMAT a Petr VOŽENÍLEK. *Elektrické stroje.* 2. vyd. Praha: ČVUT, 2000. 311 s. ISBN 80-01-02109-2.

[5] MRAVEC, Rudolf. *Elektrické stroje a přístroje: I. Elektrické stroje.* 1. vyd. Praha: SNTL/ALFA, 1982. 432 s. DT 621.314.2.

[6] ROUBÍČEK, Ota. *Elektrické motory a pohony.* 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2004. 192 s. ISBN 80-7300-092-X.

[7] Profi elektronika. Motor s kroužkovým rotorem [online]. 2008 [cit. 2016-04-11]. Dostupné z: http://elektrika.cz/data/clanky/motor-s-krouzkovym-rotorem

[8] Hioki. 3166 CLAMP ON POWER HiTESTER [online]. 2001 [cit. 2016-04-11]. Dostupné z: https://www.hioki.cn/discon/pdf/power/3166E4-17E-03K_web.pdf

[9] BARTOŠ, Václav a Bohumil SKALA. *Měření na elektrických strojích*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. 110 s. ISBN 80-7043-447-3.

[10] PETROV, Georgij N. *Elektrické stroje 2: asynchronní stroje - synchronní stroje*. 1. vyd. Praha: Academia, 1982. 732 s.

[11] BARTOŠ, Václav. *Teorie elektrických strojů*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. 230 s. ISBN 80-7043-509-7.

[12] HRUŠKA, Karel. *Určení parametrů náhradního schématu asynchronního stroje v programu FEMM* [online]. Plzeň: Západočeská univerzita, 2008, , 4 [cit. 2016-04-11]. ISSN 1802-4564. Dostupné z: https://dspace.zcu.cz/bitstream/handle/11025/502/hruska.pdf?sequence=1

[13] BAŠTA, Jan, Vojtěch KULDA a František PAVLÁSEK. *Měření na elektrických strojích: 4. Měření na indukčních strojích.* 1. vyd. Praha: SNTL, 1962. 312 s. DT 621.317.2.

[14] HRUŠKA, Karel. *Kružnicový diagram asynchronního stroje* [online]. 2013 [cit. 2016-04-11]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~khruska/cz/diagram.html

[15] VAVŘIŇÁK, Petr. *Elektrické stroje a přístroje* [online]. 2006 [cit. 2016-04-21]. Dostupné z: http://www.sse-najizdarne.cz/dokumenty/studijni_materialy/elektricke_stroje_a_pristroje.pdf

[16] Asynchronní motor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Asynchronn%C3%AD_motor

Přílohy

Program v Matlabu pro výpočet a vygenerování provozních charakteristik.

```
clc,clear,close all
%hodnoty z měření naprázdno a nakrátko
Uk=120.9;
Ik=11.1;
cosfik=0.636;
sinfik=sin(acos(cosfik));
I0=9.2;
Uf0=221.39;
dP0=325.2;
U1=(380./sqrt(3));
R1=1.7;

%parametry-výpočet
Ufk=Uk./sqrt(3)
Zk=Ufk./Ik
Rk=Zk.*cosfik
Xk=Zk.*sinfik
X1s=Xk./2
X2s=X1s
R2=Rk-R1
Z10=abs(R1+i*X1s)
dU1=Z10*I0
Ui0=Uf0-dU1
Rfe=Ui0.^2./dP0
Ife=dP0./(3.*U1)
Iu=I0-Ife
Xu=Ui0./Iu


%náhradní schéma
s=linspace(0.001,1,1000);
f=50;
p=3;

Z1=R1+i*X1s;
Z2=(Rfe*i*Xu)/(Rfe+i*Xu);
Z3=R2./s+i*X2s;
Z23=Z2.*Z3./(Z2+Z3);
Zc=Z1+Z23;
Ui=U1.*Z23./(Z1+Z23);

I1=U1./Zc;

I2=Ui./Z3;
P2=3.*R2.*((1-s)./s).*abs(I2).^2;

w=(1-s).*2.*pi.*f./p;
M=P2./w;
```

```
P1=real(3.*U1.*conj(I1));
n=P2./P1*100;


%kružnicový diagram
s_k=[0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1];
I_k=[9.2, 11.73, 16.48, 20.87, 24.45, 27.28, 29.52, 31.28,
32.7, 33.85, 34.8];
P1_k=[0.745, 4.86, 8.19, 10.6, 12.21, 13.24, 13.88, 14.26,
14.46 14.55, 14.57]*1000;
P2_k=[0, 4.14,  6.15, 6.61, 6.16, 5.25, 4.16, 3.03, 1.94,
0.93, 0]*1000;
M_k=[0, 42.36, 70.79, 87.03, 94.62, 96.78, 95.8, 93.11,
89.58, 85.69, 81.76];
cosfi_k=[0.12, 0.63, 0.76, 0.77, 0.76, 0.74, 0.71, 0.69,
0.67, 0.65, 0.64];
n_k=[0, 69.92, 61.68, 51.08, 42.52, 32.6, 24.6, 17.48, 11.03,
5.23, 0];

s1=[0:0.001:1];

figure(1)
hold on, grid on
plot(s,n,'k', 'Linewidth',2)
plot(s1,spline(s_k,n_k,s1),'b', 'Linewidth',2)
legend('n - náhradní schéma','n - kružnicový diagram',1)
xlabel('s [-]');
ylabel('n [%]');

figure(2)
hold on, grid on
plot(s,P1,'k', 'Linewidth',2)
plot(s1,spline(s_k,P1_k,s1),'b', 'Linewidth',2)
legend('P_1 - náhradní schéma','P_1 - kružnicový diagram',4)
xlabel('s [-]');
ylabel('P_1 [W]');

figure(3)
hold on, grid on
plot(s,P2,'k', 'Linewidth',2)
plot(s1,spline(s_k,P2_k,s1),'b', 'Linewidth',2)
legend('P_2 - náhradní schéma','P_2 - kružnicový diagram',1)
xlabel('s [-]');
ylabel('P_2 [W]');

figure(4)
hold on, grid on
plot(s,abs(I1),'k', 'Linewidth',2)
plot(s1,spline(s_k,I_k,s1),'b', 'Linewidth',2)
legend('I_1 - náhradní schéma','I_1 - kružnicový diagram',2)
```

```
xlabel('s [-]');
ylabel('I_1 [A]');

figure(5)
hold on, grid on
plot(s,M,'k', 'Linewidth',2)
plot(s1,spline(s_k,M_k,s1),'b', 'Linewidth',2)
legend('M - náhradní schéma','M - kružnicový diagram',4)
xlabel('s [-]');
ylabel('M [Nm]');
```