

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Vliv odporu rotorové klece na provozní parametry  
asynchronního motoru**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2015/2016

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Václav FIALA**  
Osobní číslo: **E13B0016P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Vliv odporu rotorové klece na provozní parametry 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. Stanovte parametry náhradního schématu a sestrojte fázorový diagram asynchronního motoru s hliníkovou klecí.
2. Stanovte hodnoty nakrátko, naprázdno, spouštěcí výkon, výkonovou a momentovou přetížitelnost, jmenovitý bod je dán výkonem.
3. Nahrďte v daném stroji hliníkovou klec, klecí mosaznou a stanovte jmenovité hodnoty, hodnoty nakrátko, naprázdno, spouštěcí výkon, výkonovou a momentovou přetížitelnost, jmenovitý bod je dán výkonem.
4. Posuďte vliv na základě všech hodnot a z průběhů charakteristik záměny klece na provozní vlastnosti motoru.

Parametry motoru:  $P_2=3\text{kW}$ ,  $U=400/230\text{V}$ ,  $I=7,1/12,3\text{A}$ ,  $f=50\text{Hz}$ ,  $n=935\text{ot/min}$

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Nasar, S. A., Bolera, I.: The induction machine handbook, CRC Press, 2002, ISBN 0-8493-0004-5.
2. Kopylov, I. P., kol.: Stavba elektrických strojů. Praha, STNL/MIR, 1988.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Roman Pechánek, Ph.D.

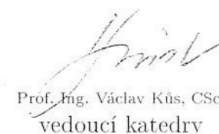
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2015

Termín odevzdání bakalářské práce: 2. června 2016



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



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

## **Abstrakt**

Předložená bakalářská práce se zabývá provozními parametry asynchronního stroje s kotvou nakrátko v závislosti na použitém materiálu rotorové klece. Práce představuje řešení materiálové náhrady, pomocí vlastního měření stroje a teoretických výpočtů. Z naměřených a vypočtených hodnot, byly sestrojeny kružnicové digramy, podle kterých byla materiálová náhrada posuzována. Provedenou analýzou stroje byly zjištěny parametry nutné k posouzení provozních vlastností stroje. Jedná se o momentovou a výkonovou přetížitelnost, dále pak o účinnost a proudy v závislosti na rostoucím skluzu. Výsledky této práce umožňují porovnat výhody a nevýhodu stroje s hliníkovou kotvou oproti stroji s kotvou mosaznou.

## **Klíčová slova**

Asynchronní stroj, kotva nakrátko, hliník, mosaz, kružnicový diagram, nakrátko, naprázdno, rotor, stator, odpor, náhradní schéma.

## **Abstract**

The bachelor thesis deals with the operational parameters of asynchronous machine with squirrel cage depending on the material the rotor cage. The thesis presents solutions to material compensation, using the measurement tools and theoretical calculations. The measured and calculated values were constructed a circular diagrams, according to which the material compensation assessed. Performed analysis tools were identified parameters needed to assess the operational characteristics of the machine. It is a torque and power overload, then the effectiveness and current in accordance with increasing slip. The results of this study make it possible to compare the advantages and disadvantages of the machine with aluminium squirrel-cage machine compared with brass squirrel-cage machine.

## **Key words**

Asynchronous machine, squirrel cage, aluminium, brass, circular diagram, short circuit, open circuit, rotor, stator, resistance, equivalent scheme.

## **Prohlášení**

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 23.5.2016

Václav Fiala

## **Poděkování**

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

## Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	9
ÚVOD .....	12
1 TEORETICKÝ ROZBOR.....	13
1.1 Obecné poznatky .....	13
1.2 Moment asynchronního stroje .....	13
1.3 Rozběh a spouštění asynchronního stroje.....	14
1.4 Konstrukční uspořádání motoru s kotvou nakrátko.....	16
1.4.1 Speciální klece .....	16
1.5 Popis měřeného stroje.....	18
1.5.1 Výpočet odporu hliníkové klece.....	21
1.5.2 Výpočet odporu mosazné klece .....	22
2 MĚŘENÍ.....	22
2.1 Měření naprázdno .....	22
2.1.1 Rozbor měření naprázdno.....	22
2.1.2 Postup a výsledky měření naprázdno .....	24
2.1.3 Výpočty z měření naprázdno .....	27
2.1.4 Grafy měření naprázdno .....	28
2.2 Měření nakrátko.....	30
2.2.1 Rozbor stroje nakrátko.....	30
2.2.2 Postup a výsledky měření stroje nakrátko .....	31
2.2.3 Výpočty z měření nakrátko.....	31
2.2.4 Grafy měření nakrátko .....	32
2.3 Náhradní schéma a určení jeho parametrů.....	34
3 NÁHRADA ROTOROVÉ KLECE.....	36
3.1 Popis kružnicového diagramu .....	36
3.1.1 Konstrukce kružnicového diagramu pro stroj s hliníkovou klecí nakrátko.....	37
3.1.2 Odečet z kružnicového diagramu pro hliníkovou klec.....	39
3.2 Konstrukce kružnicového diagramu pro stroj s mosaznou klecí nakrátko.....	45
3.2.1 Odečet z kružnicového diagramu pro mosaznou klec .....	48
3.3 Porovnání hliníkové a mosazné klece .....	52
3.4 Porovnání vlivu záměny klece na provozní vlastnosti stroje .....	54
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	59



## Seznam symbolů a zkratek

$\cos \phi_k$ .....	Účinnost nakrátko
$\cos \phi_0$ .....	Účinnost naprázdno
$D_k$ .....	Střední průměr kruhu
$I_{Fe}$ .....	Proud nutný k pokrytí ztrát v železe
$I_k$ .....	Proud nakrátko
$I_0$ .....	Proud naprázdno
$I_\mu$ .....	Magnetizační proud
$J$ .....	Moment setrvačnosti
$k_a$ .....	Konstanta ampérmetru
$k_m$ .....	Činitel spouštění
$k_p$ .....	Konstanta měřicího transformátoru
$k_v$ .....	Činitel vinutí
$k_w$ .....	Konstanta wattmetru
$m$ .....	Počet fází
$M$ .....	Moment stroje
$M_a$ .....	Akcelerační moment
$m_i$ .....	Měřítka proudu
$M_i$ .....	Vnitřní moment
$m_m$ .....	Měřítka momentu
$M_n$ .....	Jmenovitý moment
$m_p$ .....	Měřítka výkonu

$M_p$ .....	<i>Momentová přetížitelnost</i>
$M_z$ .....	<i>Záběrný moment</i>
$n$ .....	<i>Otáčky stroje</i>
$N$ .....	<i>Počet závitů</i>
$n_n$ .....	<i>Jmenovité otáčky stroje</i>
$n_s$ .....	<i>Synchronní otáčky</i>
$p$ .....	<i>Převodní konstanta</i>
$P$ .....	<i>Výkon stroje</i>
$P_{max}$ .....	<i>Maximální výkon</i>
$P_n$ .....	<i>Jmenovitý výkon</i>
$P_p$ .....	<i>Výkonová přetížitelnost</i>
$P_s$ .....	<i>Spouštěcí výkon</i>
$P_0$ .....	<i>Výkon naprázdno</i>
$P_\delta$ .....	<i>Výkon přenesený přes vzduchovou mezeru</i>
$R_k$ .....	<i>Odpor nakrátko</i>
$R_s$ .....	<i>Spouštěcí odpor</i>
$R_1$ .....	<i>Odpor statoru</i>
$R_2$ .....	<i>Opor rotoru</i>
$R_2'$ .....	<i>Odpor rotoru přepočtený na stator</i>
$R_{2dr}$ .....	<i>Odpor drážky</i>
$R_{2kr}$ .....	<i>Odpor kruhu</i>
$s$ .....	<i>Skluž stroje</i>
$S_k$ .....	<i>Obsah kruhu</i>

$s_n$ .....	<i>Jmenovitý skluz stroje</i>
$T_r$ .....	<i>Doba rozběhu</i>
$U$ .....	<i>Napětí</i>
$U_k$ .....	<i>Napětí nakrátko</i>
$U_n$ .....	<i>Jmenovité napětí</i>
$W_1$ .....	<i>energie na statoru</i>
$W_2$ .....	<i>energie na rotoru</i>
$X$ .....	<i>Reaktance</i>
$X_k$ .....	<i>Reaktance nakrátko</i>
$X_\sigma$ .....	<i>Rozptylová reaktance</i>
$Z_s$ .....	<i>Spouštěcí reaktance</i>
$\Delta P_d$ .....	<i>Přídavné ztráty</i>
$\Delta P_{Fe}$ .....	<i>Ztráty v železe</i>
$\Delta P_{jo}$ .....	<i>Jouleovy ztráty naprázdno</i>
$\Delta P_{mech}$ .....	<i>Mechanické ztráty</i>
$\eta$ .....	<i>Účinnost</i>
$\lambda$ .....	<i>Účíník</i>
$\omega$ .....	<i>Úhlová rychlost stroje</i>
$\omega_s$ .....	<i>Synchronní úhlová rychlost stroje</i>
$\phi_k$ .....	<i>Fázový posuv nakrátko</i>
$\phi_0$ .....	<i>Fázový posuv naprázdno</i>
$\rho_{Al}$ .....	<i>Rezistivita hliníku</i>
$\rho_{Cu-Zn}$ .....	<i>Rezistivita mosazi</i>

## Úvod

Cílem práce je zjistit, jakým způsobem se projeví změna materiálu klece na chování a vlastnostech stroje. Celá náhrada spočívá ve změně parametrů materiálu klece, a tím dojde k teoretické náhradě, kde se vliv zkoumá pomocí kružnicového diagramu a teoretických výpočtů, nikoliv k náhradě konstrukční. Nejprve jsou provedeny výpočty odporů a potřebné provozní výpočty, následně byl stroj změřen ve stavu naprázdno a nakrátko. Ze získaných dat je sestaven kružnicový diagram pro stroj s hliníkovým rotorem a pak provedena náhrada hliníku mosazí.

Měření a náhrada je prováděna na stroji s klecovým rotorem. Pro konstrukci klece se využívá čistý hliník, který je vlitý do svazku rotorových plechů a na obou stranách obvodu rotoru je klec spojena kruhy dokrátka. Pro zlepšení vlastností stroje lze při tavení do čistého hliníku přidat silumin. Mimo hliník se pro rotorové tyče využívá například měď nebo mosaz v případě odporových klecí.

Předpokládám, že výsledkem náhrady hliníkové kotvy za mosaznou bude výrazné zlepšení záběrného momentu a snížení spouštěcího výkonu vlivem poklesu proudu. Maximální moment se nezmění, protože momentová přímka zůstává pro mosaznou klec stejná, dojde pouze k posuvu bodu rozdělení přímky odporů vlivem změny poměru odporů. Momentová charakteristika stroje s mosaznou klecí bude měkčí, ale amplituda charakteristiky bude stejná jako v případě hliníkové klece. Jedná se prakticky o náhradu odporovou klecí a výsledkem by mělo být i zmenšení záběrného proudu a zhoršení účinnosti. Při porovnávání budu vycházet ze čtyř hlavních ukazatelů, kterými jsou momentová přetížitelnost, výkonová přetížitelnost, průběh proudu v závislosti na skluzu a spouštěcí výkon.

Práce je rozdělena do tří hlavních částí. V první části se jedná o souhrn teoretických poznatků týkajících se řešené náhrady a provozních stavů stroje, kde by teoreticky mohlo dojít ke zlepšení vlastností. Druhá část popisuje všechna potřebná měření, včetně použitých metod a přístrojů. Ve třetí části je uvedeno, jak náhrada probíhá a zhodnocen celkový stav stroje po náhradě, včetně porovnání obou variant materiálu klecí.

# 1 Teoretický rozbor

## 1.1 Obecné poznatky

Asynchronní stroj je v dnešní době často využíván jako motor, a to zejména díky dnes už jeho snadné regulaci a údržbě.[1] Z historického hlediska postupně nahrazoval starší, stejnosměrný stroj, který je naopak od asynchronního teoreticky značně jednodušší, ale konstrukčně složitější. Asynchronní stroj se dělí na dvě základní části. Na rotor a stator, které jsou od sebe odděleny vzduchovou mezerou (běžně  $\pm 0,1$  mm). Stator se skládá ze tří cívek uložených v drážkách statorových plechů a pootočených vzájemně o  $120^\circ$ . [2] Stator připojíme na zdroj střídavého napětí. Vzniká točivé (kruhové) magnetické pole, které má synchronní otáčky. Točivé pole indukuje do rotoru napětí. Rotorovým vinutím začne procházet proud a rotor se roztáčí ve směru točivého pole buzeného statorem. [3] [4] Skutečné otáčky rotoru jsou menší než synchronní otáčky točivého pole statoru, jsou asynchronní. Na štítku se pak uvádějí jmenovité otáčky, otáčky při jmenovitém zatížení. [1]

## 1.2 Moment asynchronního stroje

Vztah mezi mechanickým výkonem na hřídeli a točivým momentem popisuje rovnice:

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{\frac{2\pi n}{60}} = 9,55 \cdot \frac{P}{n} \quad (1.1)$$

Otáčky rotoru  $n$  jsou menší než synchronní vlivem skluzu:

$$n = n_s \cdot (1 - s) \quad (1.2)$$

Rovnice pro moment:

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{\frac{2\pi n}{60}} = 9,55 \cdot \frac{P}{n_s \cdot (1-s)} \quad (1.3)$$

Pro samotný mechanický výkon platí rovnice:

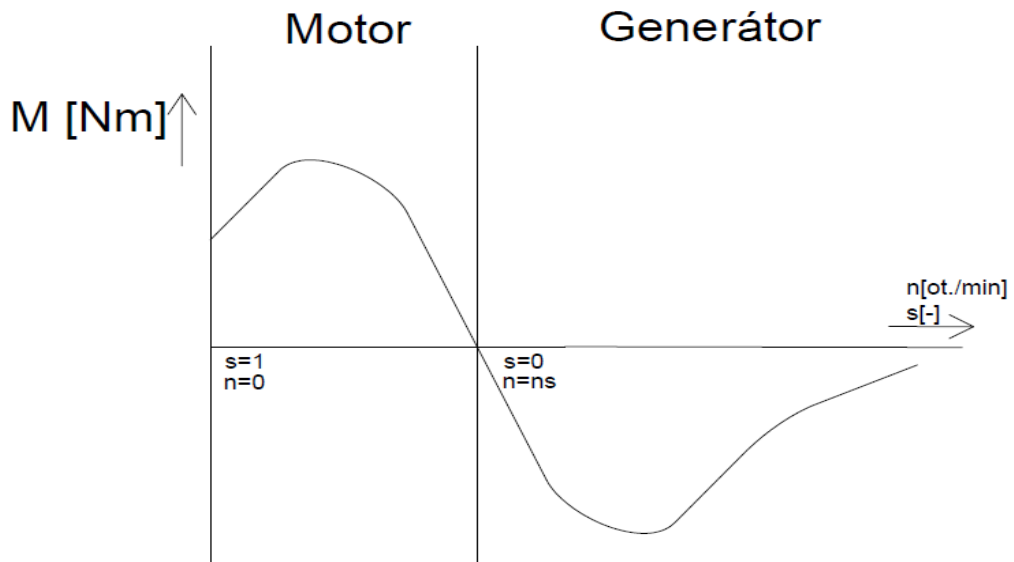
$$P = (1 - s) \cdot P_\delta \quad (1.4)$$

Vlivem skluzu dochází k rozdělování rotorových ztrát a výkonu na hřídeli v poměru závislejícím na skluzu. Můžeme tvrdit, že skluz je úměrný ztrátám v rotoru, a tím pádem i rotorovému odporu při zanedbání rozptylu. Z této úvahy vyplývá, že skluz motoru je přímo úměrný velikosti odporu rotoru. [4] [1]

Při porovnání rovnic (1.4) a (1.3) dostáváme:

$$M = 9,55 \cdot \frac{P_{\delta}}{n_s} \quad (1.5)$$

Pro úplné posouzení vlastností motoru slouží momentová charakteristika. Jedná se o graf znázorňující závislost momentu na skluzu nebo otáčkách (obr. 1.1). [5]



Obr. 1.1. Momentová charakteristika asynchronního stroje [5]

Při náhradě hliníkové klece za mosaznou bude momentová a výkonová charakteristika jedním z hlavních ukazatelů vlivu na provozní parametry. Zejména porovnání momentové přetížitelnosti, která je dána vztahem:

$$M_p = \frac{M_{\max}}{M_n} \quad (1.6)$$

Dalším parametrem je výkonová přetížitelnost, která lze určit obdobně jako momentová:

$$P_p = \frac{P_{\max}}{P_n} \quad (1.7)$$

### 1.3 Rozběh a spouštění asynchronního stroje

Rozběh je popsán rovnicí momentů:

$$M_a = M_i - M_z = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (1.8)$$

Stroj se rozbíhá tak dlouho, dokud není  $M_a=0$ . Tento stav nastane v případě, že se elektromagnetický moment  $M_i$  rovná momentu zátěžnému  $M_z$ . [3] Z toho vyplývá, že dobu

rozběhu lze určit z rovnice:

$$t_r = J \cdot \int_{\omega_a}^{\omega_b} \frac{d\omega}{M_a} \quad (1.9)$$

Na rotoru vzniká při rozběhu teplo:

$$W_2 = 3 \cdot \int_{t_a}^{t_b} R_2' i_2^2 dt \quad (1.10)$$

Teplo vzniká současně i ve statorovém vinutí:

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{3 \cdot R_1 \int_{t_a}^{t_b} i_1^2 dt}{3 \cdot R_2' \int_{t_a}^{t_b} i_2^2 dt} \approx \frac{R_1}{R_2} \quad (1.11)$$

Velikost  $W_1$ , stejně jako velikost  $W_2$  lze určit z výše uvedeného vztahu. Ovšem pro stroje se speciální klecí se bude odpor  $R_2'$  měnit se skluzem (otáčkami). Ztráty při rozběhu nezávisí na typu rotoru. [4] [5]

Velkým problémem asynchronních strojů je právě spouštění, hlavně kvůli velkému záběrnému proudu. Záběrný proud může dosahovat hodnoty (6-8)\* $I_n$ . Snažíme se omezit záběrný proud alespoň na pětinasobek proudu  $I_n$ . [5] Takto velký záběrný proud má za následek značné elektromagnetické síly (motor se může poškodit), nárůst teploty vinutí a pokles napětí vlivem záběrného proudu. Požadavky na spouštění jsou protichůdné. Snažíme se dosáhnout co nejvyššího záběrného momentu, ale při co nejnižším záběrném proudu. [1] Mezi důležité ukazatele patří také plynulost spouštění. Tento parametr je zásadní především pro zařízení, kde je požadován plynulý rozběh, jakými třeba jsou různá transportní zařízení. Problém spouštění se týká především motorů o výkonu vyšším než 3 kW. [2] Další výjimka se týká spotřebitelů s vlastním transformátorem, kde jsou krátkodobé poklesy problémem odběratele, nikoli skupiny odběratelů. Výhodou přímého připojení na síť je jednoduchost, ale je třeba vzít v úvahu velikost výkonu stroje, nebo výkon vlastního transformátoru. [4] Důležitým parametrem je spouštěcí výkon  $P_s$ . Určíme ho z rovnice:

$$P_s = 3 \cdot U_n \cdot I_s \quad (1.12)$$

Spouštěcí výkon se liší při změně odporu rotoru, a proto bude dalším z ukazatelů vlivu záměny hliníkové kotvy za mosaznou.

## 1.4 Konstrukční uspořádání motoru s kotvou nakrátko

Jedná se o nejjednodušší typ rotoru. Rotor je tvořen rotorovými plechy, do kterých je vlitý hliník, popřípadě jiný materiál (mosaz, měď, slitiny hliníku). Problematický je návrh počtu tyčí. [7]



Obr. 1.2. Rotorová klec

### 1.4.1 Speciální klece

Jedna z možností zlepšení záběrného momentu je náhrada klecového rotoru jinak konstrukčně uspořádanou klecí, popřípadě změnou materiálu.

- **Oporová klec**

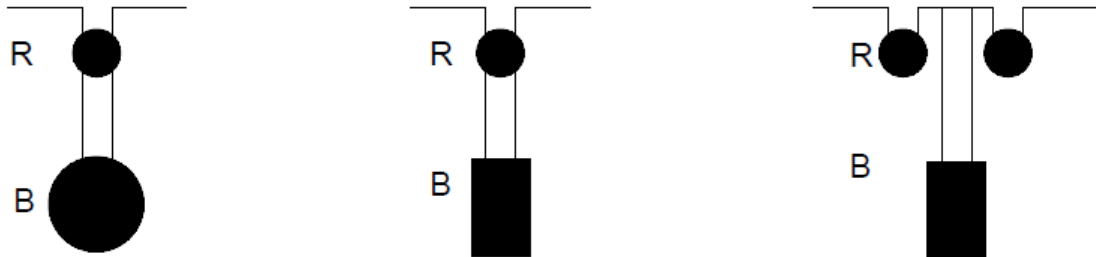
Jedná se o náhradu klasické hliníkové klece klecí z jiného materiálu, který má větší měrný odpor. V praxi se používá mosaz nebo silumin. Náhradou získáme větší záběrný moment, ale za cenu zhoršení účinnosti motoru vlivem většího skluzu. [6] Klece tohoto typu mají menší spouštěcí výkon oproti hliníkovým klecím. Používají se u jeřábových či výtahových motoru, kde je velký záběrný moment důležitější než zhoršená účinnost. Při zvolení vhodného materiálu, lze dosáhnout vysokého záběrného momentu. Je možné dosáhnout až momentu maximálního. [4] [5]

- **Dvojitá klec**

Také nazývaná Boucherotova klec, je dnes jen k vidění zřídka. Princip této klece je založen na skinefektu. [1] Jedná se o spojení výhod odporové klece a hliníkové. Rotor je sestaven ze dvou klecí, rozběhové a hluboko pod ní pracovní. [7] Rozběhová klec má mnohem větší odpor než pracovní a uzavírá se přes ni jen část magnetického toku. Po rozběhu



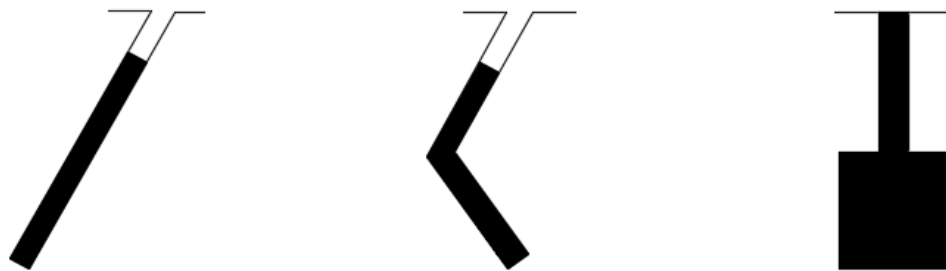
je proud rozdělen nepřímo úměrně odporům a stroj vykazuje vlastnosti klasického motoru s hliníkovou klecí nakrátko. [4] Výsledkem je, že se motor rozbíhá s malým záběrným proudem a velkým momentem. [5] [6]



Obr. 1.9. Dvojitá klec [6]

- **Vírová klec**

Princip vírové klece je podobný kleci dvojité. Zúžení profilu horní částí má za následek zvětšení odporu při rozběhu. [4] Opět je uplatňuje skinefekt, ale nelze dosáhnout tak vysokého záběrného momentu jako v případě dvojité klece. Tyče vírové klece jsou uloženy v hlubokých drážkách. [5] Rozptylový magnetický tok je v drážce nerovnoměrně rozložen a dolní část tyče je spřažena s větší částí rozptylového toku. To má za následek vyšší reaktanci a klec se chová jako odporová. [6] Po rozběhu se proud rozloží rovnoměrně a stroj opět vykazuje vlastnosti motoru s hliníkovou klecí nakrátko.



Obr. 1.9. Vírová klec [4]

Motory s vírovou klecí se používají v aplikacích s požadavkem na větší výkon. Tvary tyčí se mohou lišit podle použití motoru. Například klínové se hodí pro rychloběžné stroje, kvůli větší odolnosti proti odstředivým silám. [7]

## 1.5 Popis měřeného stroje

Jedná se o stroj 3kW od firmy MEZ Mohelnice. Stroj byl připojen přes transformátor na jmenovité napětí 400/230 V. Měřený motor má jako většina motorů s výkonem do 3 kW při zapojení do trojúhelníka jmenovité napětí 230 V a při zapojení do hvězdy 400 V. Měření je třeba navrhnout s ohledem na jmenovitý proud, aby nedošlo k poškození měřeného stroje, které v tomto případě je 7,1 / 12,3 A. Jedná se o stroj se čtyřmi póly se jmenovitými otáčkami 935 ot./min. Frekvence sítě je 50 Hz.



Obr. 1.10. Štítek stroje

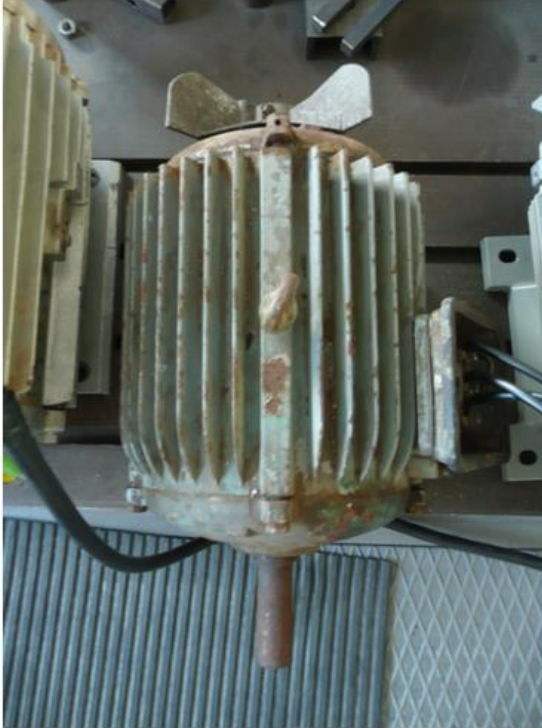
<b>MEZ MOHELNICE</b> Národní podnik <b>MOHELNICE</b>				
MOT 3~	<b>TYP</b>	AF 44/6A	/11	
IP/44	<b>TVAR</b>	H0	č.	25048/3
3,0 KW			50	Hz
Y/Δ	380/220	V	935	ot./min
	7,1/12,3	A	<b>IZOL</b>	E
	60	kg	1966	

Tab. 1.1. Štítek stroje

Svorkovnice motoru byla zapojena v konfiguraci hvězda (podrobněji v kapitole měření). Pokud by motor byl zapojen nejprve do trojúhelníka, mohlo by dojít k jeho poškození vlivem přepětí. Motor je třeba zapojit s ohledem na štítek a konfiguraci sítě. Plný výkon motoru lze

dosáhnout, pokud se bude otáčet jmenovitými otáčkami při jmenovitém proudu. Reverzace motoru lze provést pomocí přepínače, nebo prohozením dvou fází na svorkovnici.

### Měřený motor



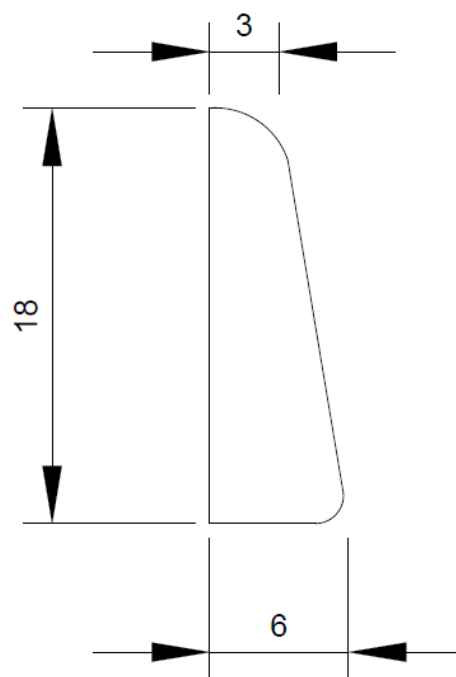
### Stroj pro konstrukční měření



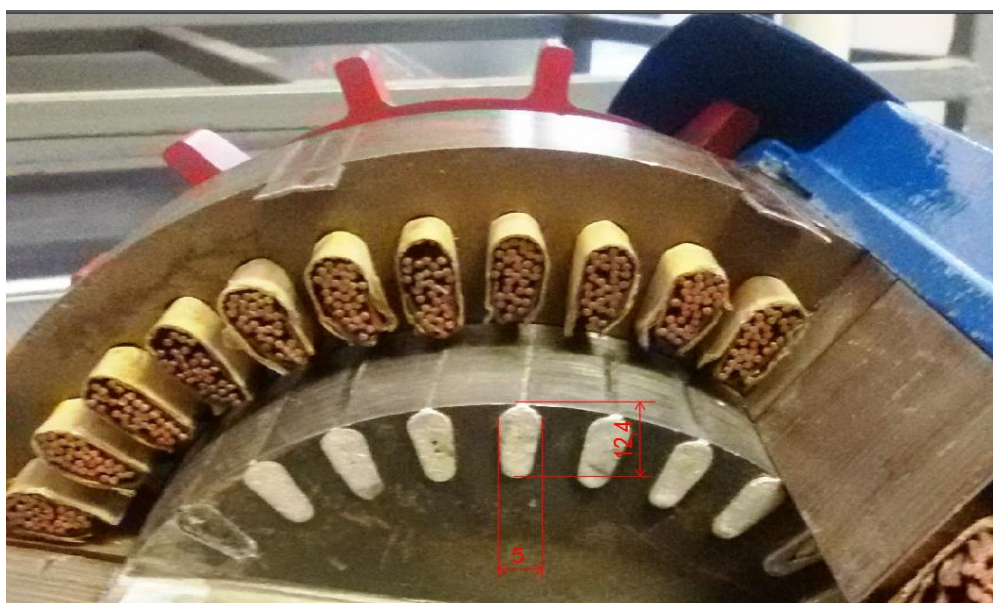
Obr. 2.1. Stroj pro konstrukční měření a měřený motor

Měření rozměrů a parametrů stroje, proběhlo na stroji stejného typu. Ale aby bylo možné rozměry a parametry změřit, je nutné stroj rozebrat. Proto byla konstrukční měření provedena na jiném stroji se stejnými parametry.

Posuvným měřítkem byly naměřeny rozměry tyče kvůli výpočtu odporu a vytvoření modelu klece. Model klece byl zhotoven i kvůli možnosti porovnání fyzikálních parametrů při materiálové náhradě hliníku mosazí. Stroj má na statoru 36 drážek a 34 vodičů. Klec rotoru se skládá z 30 drážek, kde jsou uloženy vodiče o délce 156 mm, výšce 12,4 mm a šířce 5 mm. Vodiče jsou spojeny kruhy o průměru 122 mm. Kruh ale není po celém obvodu stejný, proto bylo potřeba jej změřit a zohlednit při vytváření modelu.



Obr. 2.1. Výkres kruhu



Obr. 2.1. Rozměr tyče

Tab. 2.1 Rozměry rotoru

Rotor	
Počet drážek [-]	30,0
Výška tyče [mm]	12,4
Délka tyče [mm]	156,0
Šířka tyče [mm]	5,0

Tab. 2.2. Parametry statoru

Stator	
Počet drážek [-]	36
Počet vodičů [-]	34
Krok [-]	6

### 1.5.1 Výpočet odporu hliníkové klece

Nejprve je nutné určit odpory rotoru a statoru. Odpor statoru lze snadno změřit, ale při určování odporu klece se neobejdeme bez výpočtu.

Pro výpočet odporu klece se uvažují nejen vodiče samotné, ale také spojovací kruhy nakrátko, které svým průměrem dosahují velikosti téměř jednoho vodiče, a jejich zanedbáním vznikne značná nepřesnost.

Pro určení odporu drážky se vychází z rovnice:

$$R_{2\text{ dr}} = \rho_{Al} \cdot \frac{l_{pak}}{h \cdot b} = 0,028 \cdot \frac{0,156}{12,4 \cdot 5} = 7,045 \cdot 10^{-5} \frac{\Omega \cdot m}{mm^2} \quad (1.13)$$

Kde  $l_{pak}$  je délka paketu,  $S_{dr}$  obsahu kruhu,  $h$  výška tyče a  $b$  šířka tyče  $\rho_{Al}$ , měrná vodivost mědi.

Odpor kruhu se určí z obdobné rovnice:

$$R_{2\text{ kr}} = \rho_{Al} \cdot \frac{\pi \cdot D_k}{S_k} = 0,028 \cdot \frac{\pi \cdot 0,05}{85} = 1,725 \cdot 10^{-6} \frac{\Omega \cdot m}{mm^2} \quad (1.14)$$

Kde  $S_k$  je plocha kruhu,  $D_k$  vnitřní průměr kruhu a  $Q$  počet drážek rotoru.

Celkový odpor rotoru je součtem odporu kruhů a vodičů:

$$R_2 = R_{2\text{ dr}} + 2 \cdot R_{2\text{ kr}} = 7,045 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot (1,725 \cdot 10^{-6}) = 7,39 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (1.15)$$

Pro samotnou konstrukci kružnicového diagramu je zapotřebí hodnotu odporu rotoru přepočítat na stator. Pro tento přepočet je nutné nejdříve určit převodní konstantu:

$$p^2 = 4 \cdot m_1 \cdot \frac{(N_1 \cdot k_{v1})^2}{Q_2} \quad (1.16)$$

Chybějící hodnota počtu závitů statoru  $N_1$ , se určí z rovnice:

$$N_1 = \frac{V_d \cdot Q_1}{2 \cdot a \cdot m_1} = \frac{36 \cdot 34}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 204 \quad (1.17)$$

Převodní konstanta:

$$p^2 = 4 \cdot m_1 \cdot \frac{(N_1 \cdot k_v)^2}{Q_2} = 4 \cdot 3 \cdot \frac{(204 \cdot 0,95)^2}{30} = 15023,38 \quad (1.18)$$

Činitel  $k_v$  je uvažován 0,95. Maximálně může dosahovat až hodnoty 0,96.

Přepočtený odpor na stator:

$$R'_2 = R_2 \cdot p^2 = 7,39 \cdot 10^{-5} \cdot 15023,38 = 1,13 \, \Omega \quad (1.19)$$

## 1.5.2 Výpočet odporu mosazné klece

Stejným způsobem, jakým byla určena velikost odporu hliníkové klece, bude stanovena i velikost odporu klece mosazné. Rozdíl bude v použité měrné rezistivitě materiálu. Rezistivita mosazi je 2,68krát vyšší než hliníku.

Nejprve je stanoven odpor drážky:

$$R_{2 \text{ dr}} = \rho_{\text{Cu-Zn}} \cdot \frac{l_{\text{pak}}}{h \cdot b} = 0,075 \cdot \frac{0,156}{5 \cdot 12,4} = 1,89 \cdot 10^{-4} \, \Omega \quad (1.20)$$

Kde  $\rho_{\text{Cu-Zn}}$  je rezistivita mosazi.

Pro celkový odpor rotoru je zapotřebí zná také odpor kruhů:

$$R_{2 \text{ kr}} = \rho_{\text{Cu-Zn}} \cdot \frac{\pi D_k}{S_k} = 0,075 \cdot \frac{0,05 \cdot \pi}{85} = 4,62 \cdot 10^{-6} \, \Omega \quad (1.21)$$

Součtem obojího dostaneme odpor rotoru:

$$R_2 = R_{2 \text{ dr}} + 2 \cdot R_{2 \text{ kr}} = 1,89 \cdot 10^{-4} + 2 \cdot 4,62 \cdot 10^{-6} = 1,9824 \cdot 10^{-4} \, \Omega \quad (1.22)$$

Od hliníkového rotoru se mosazný nebude lišit činitelem vinutí, počtem tyčí, fází, paralelních větví, ani počtem vodičů, a tím pádem ani převodní konstantou. Přepočtem hodnoty rotorového odporu na stator získáme hodnotu:

$$R'_2 = R_2 \cdot p^2 = 15023,38 \cdot 1,9824 \cdot 10^{-4} = 2,978 \, \Omega \quad (1.23)$$

## 2 Měření

### 2.1 Měření naprázdno

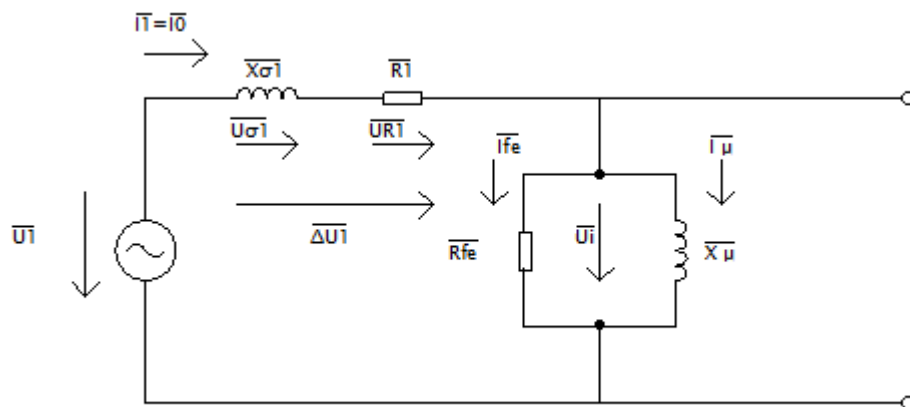
#### 2.1.1 Rozbor měření naprázdno

Při určování parametrů náhradního schématu a konstrukci kružnicového diagramu je nutné znát hodnoty motoru naprázdno. [2] V chodu naprázdno je stroj připojen na síť a na hřídeli není mechanická zátěž. Pokud běží stroj naprázdno lze zanedbat skluz a otáčky se tak

budou rovnat synchronním. Při stavu naprázdno se stroj chová podobně jako transformátor, jak vyplývá z fázorového diagramu. Rotorový proud bude velmi malý a závisí na velikosti stroje a počtu pólů. Ztrátový proud je malý, ale problém nastává při provozu stroje naprázdno, vzhledem k vlivům na síť. Fázový posuv je téměř  $90^\circ$  a může dojít ke zhoršení účinníku sítě. [2] [5]

- **Náhradní schéma a fázorový diagram**

Náhradní schéma slouží k matematickému popisu stroje při daném stavu (naprázdno, nakrátko, při zatížení). [1] Ze schématu vycházíme při konstrukci fázorového diagramu:



Obr. 2.3 – Náhradní schéma naprázdno [4]

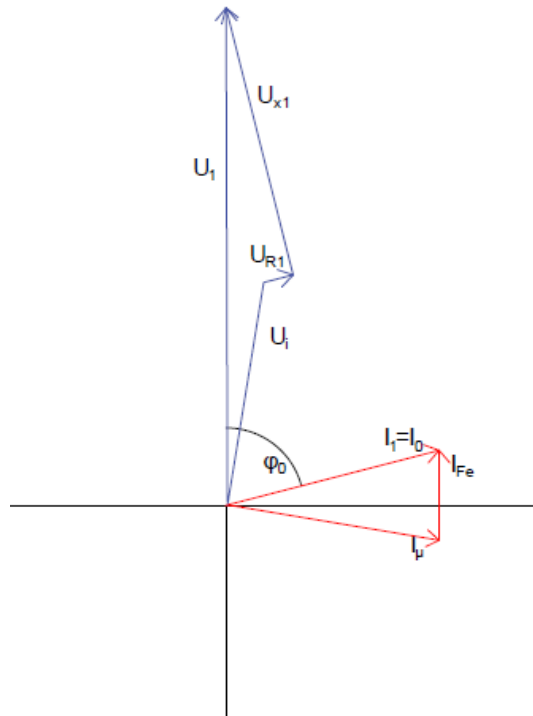
Před kreslením fázorového diagramu je nutné pomocí Kirchhoffových zákonů určit velikosti proudů a napětí. Napětí na vstupu lze určit z rovnice:

$$\overline{U}_1 = \overline{R}_1 \cdot \overline{I}_1 + j\overline{X}_{\sigma 1} \cdot \overline{I}_1 + \overline{U}_1 \quad (2.1)$$

Proud v uzlu lze vyjádřit takto:

$$\overline{I}_0 = \overline{I}_{Fe} + \overline{I}_\mu \quad (2.2)$$





Obr. 2.3. - Fázorový diagram stroje naprázdno [4]

### 2.1.2 Postup a výsledky měření naprázdno

Měření naprázdno jsme provedli dvěma způsoby. Prvním způsobem bylo měření pomocí analyzáru HIOKI 3166 a současně pomocí analogových přístrojů v Aronové zapojení. Nejprve jsme spojily svorkovnici motoru do hvězdy a poté byla vedena přes transformátor až k měřicímu stolu.

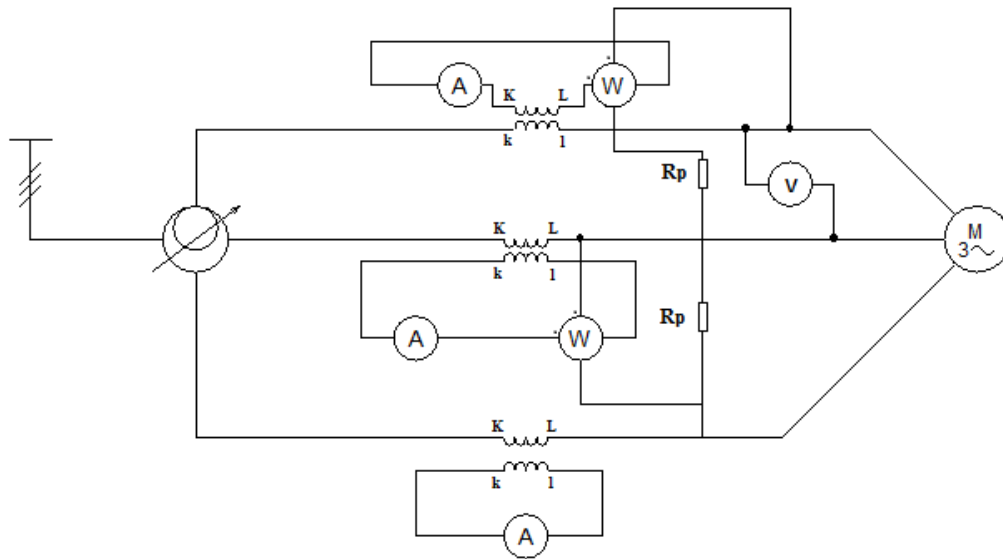


Obr. 2.4 – Zapojení svorkovnice motoru a transformátoru

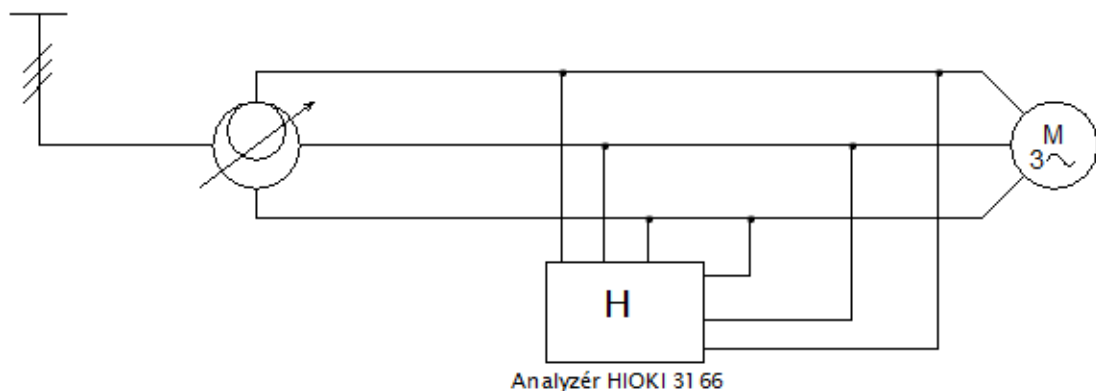
Po připojení k měřicímu stolu jsme přes měřící transformátory připojili wattmetry a podle



příslušných cívek i ampérmetry a voltmetr.



Obr. 2.5 – Schéma zapojení měření naprázdno: Aronovo zapojení [2]



Obr. 2.5 – Schéma zapojení měření naprázdno analyzérem

Naměřené hodnoty analogovými přístroji a analyzérem se zpravidla moc nelišily, odchylka se pohybovala přibližně okolo 1 %. Měření analyzérem sloužilo spíše pro kontrolu naměřených hodnot kvůli jednoduššímu odečtu a vyšší přesnosti. Kvůli účinníku nižšímu než 0,5, je třeba zohlednit opačné znaménko wattmetru. Odpor  $R_1$  byl změřen multimetrem na svorkách motoru.

Tab. 2.3. Hodnoty odporů stroje s hliníkovou klecí

$R_1[\Omega]$	1,6
$R_2'[\Omega]$	1,13
$p^2$	13831,1

Tab. 2.4. Měření naprázdno analyzárem

$U_{of}[V]$	$I_o[A]$	$P[kW]$	$Q[kVar]$	$S[Kva]$	$\lambda$
233,10	4,07	0,34	2,82	2,84	0,12
211,39	3,48	0,28	2,19	2,20	0,13
186,28	2,92	0,25	1,61	1,63	0,16
164,07	2,48	0,21	1,20	1,22	0,17
139,45	2,01	0,14	0,83	0,85	0,17
116,49	1,66	0,12	0,57	0,58	0,21
92,90	1,33	0,09	0,36	0,37	0,25
70,16	1,04	0,08	0,20	0,22	0,36
46,77	0,81	0,06	0,10	0,11	0,11

Tab. 2.5. Měření naprázdno analogovými přístroji

$U_f[V]$	$I[A]$	$k_a[-]$	$k_w[-]$	$k_p[-]$	$P_1[W]$	$P_2[W]$	$P_o[W]$
219,39	3,97	1,00	2,50	8,00	860,00	-520,00	340,00
207,85	3,37	1,00	2,50	8,00	760,00	-440,00	320,00
184,75	2,80	1,00	2,50	8,00	580,00	-320,00	260,00
161,66	2,40	1,00	2,50	8,00	440,00	-240,00	200,00
138,56	2,00	1,00	2,50	4,00	330,00	-160,00	170,00
115,47	1,80	0,40	2,50	4,00	224,00	-88,00	136,00
92,38	1,33	0,40	2,50	4,00	152,00	-48,00	104,00
69,28	1,01	0,40	2,50	4,00	100,00	-20,00	80,00
46,19	0,79	0,20	2,50	4,00	62,00	4,00	66,00

$\Delta P_j[W]$	$\Delta P_{Fe+mech}[W]$	$\Delta P_{mech}[W]$	$\Delta P_{Fe}[W]$	$\cos \phi_0$	$\phi_0$	$\sin \phi_0$
75,53	264,47	42,88	201,47	0,13	82,50	0,99
54,41	265,59	42,88	202,59	0,15	81,37	0,99
37,63	222,37	42,88	159,37	0,17	80,20	0,99
27,65	172,35	42,88	109,35	0,17	80,20	0,98
19,20	150,80	42,88	87,80	0,20	78,46	0,98
15,55	120,45	42,88	57,45	0,22	77,29	0,98
8,53	95,47	42,88	32,47	0,28	73,74	0,96
4,93	75,07	42,88	12,07	0,38	67,66	0,92
2,97	63,03	42,88	0,03	0,61	52,40	0,79

### 2.1.3 Výpočty z měření naprázdno

Po naměření hodnot napětí a proudu jsem se zaměřil na výpočet celkových ztrát naprázdno z rovnice:

$$\Delta P_0 = \Delta P_{j0} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_m \quad (2.3)$$

Součtem naměřených výkonů dostáváme celkový výkon  $P_0$

$$P_0 = P_1 + P_2 = 860 - 520 = 340 \text{ W}$$

Výpočet ztrát bude vycházet z hodnoty výkonů. Nejprve jsem určil hodnotu  $\Delta P_{j0}$ :

$$\Delta P_{j0} = 3 \cdot R_1 \cdot I^2 \quad (2.4)$$

$$\Delta P_{j0} = 3 \cdot 1,6 \cdot 3,97^2 = 75,53 \text{ W}$$

Mechanické ztráty a ztráty v železe určíme:

$$\Delta P_{Fe+mech} = P_0 - \Delta P_{j0} \quad (2.5)$$

$$\Delta P_{Fe+mech} = 340 - 75,53 = 264,47 \text{ W}$$

Mechanické ztráty jsou konstantní. Závisí na otáčivé rychlosti stroje, ale ta se v průběhu měření nemění. Lze je odečíst z charakteristiky ztrátových poměrů.[1] [4] Ztráty v železe budou poté rozdílem odečtených mechanických ztrát  $\Delta P_{mech}$  a vypočtených ztrát  $\Delta P_{Fe+mech}$ :

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Fe+mech} - \Delta P_{mech} \quad (2.6)$$

$$\Delta P_{Fe} = 264,47 - 42,88 = 221,59 \text{ W}$$

Mechanické ztráty:

Dosazením do rovnice za  $x=0$  jsou zjištěny mechanické ztráty.

$$\Delta P_{mech} = 42,875e^{0,0087x} = 42,88 \text{ W} \quad (2.7)$$

Zbývá určit z naměřených hodnot napětí proudu a výkonu  $\cos \varphi_0$ :

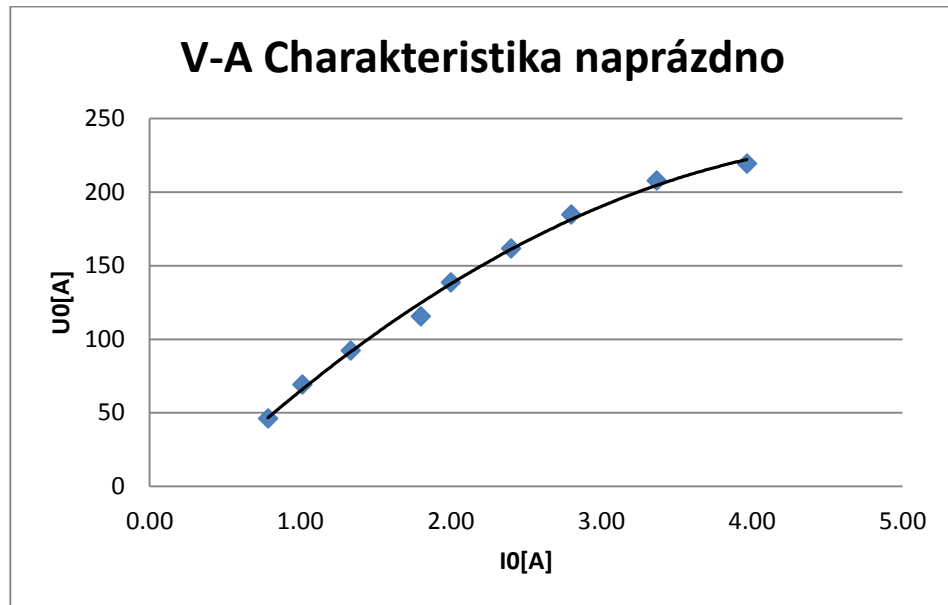
$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{3 \cdot U_f \cdot I_k} \quad (2.8)$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{340}{3 \cdot 230 \cdot 3,97} = 0,13 [-]$$

Výpočty byly provedeny z hodnot naměřených analogovými přístroji.

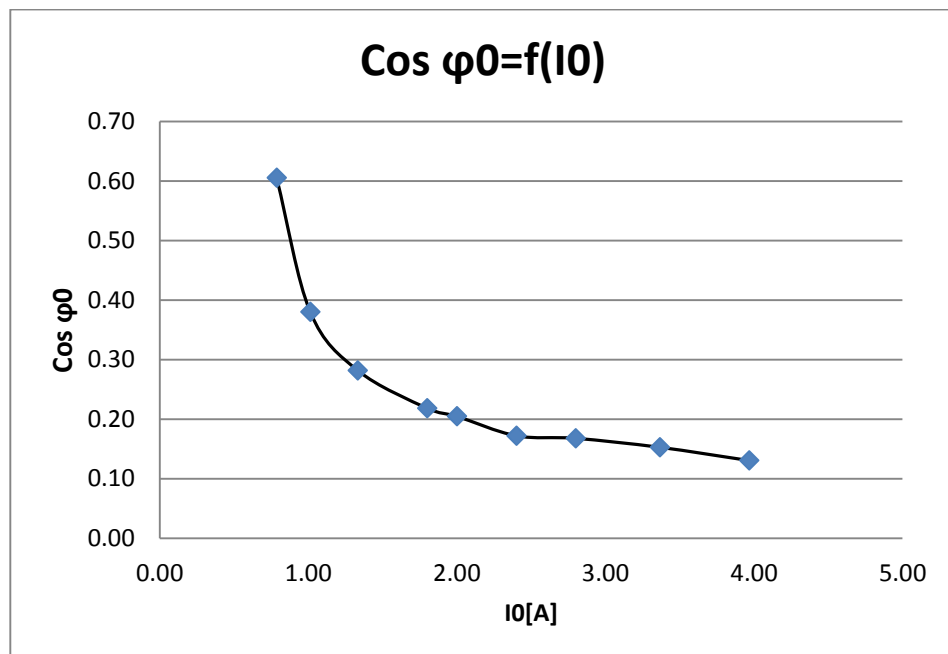
#### 2.1.4 Grafy měření naprázdno

Závislost napětí a proudu při stavu naprázdno je téměř lineární.



Obr. 2.5 – V-A charakteristika naprázdno

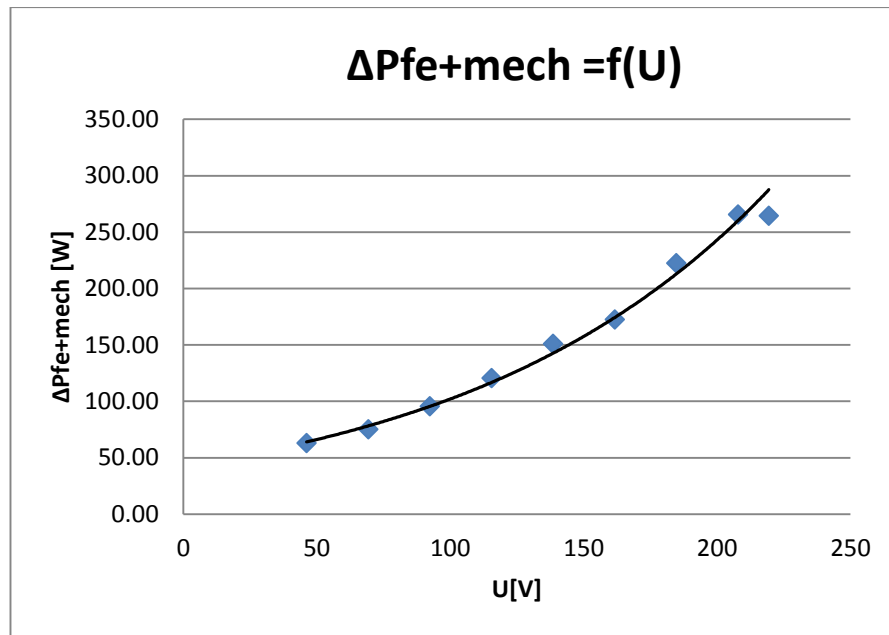
S rostoucím proudem klesá účinník stroje.



Obr. 2.6 – Závislost účinníku a proudu naprázdno

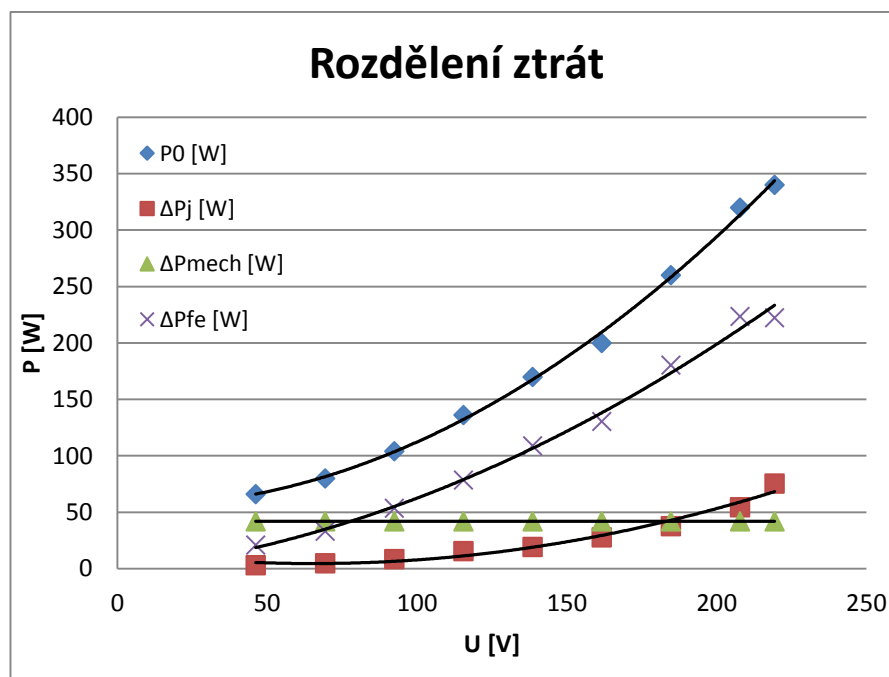
Ztráty v železe jsou úměrné velikosti napětí. V grafu jsou zobrazeny společně s mechanickými. Z tohoto grafu je možné odečíst hodnotu mechanických ztrát stroje, protože

mechanické ztráty způsobují posuv charakteristiky od nuly.



Obr. 2.6 – Závislost  $\Delta P_{fe+mech}$  a napětí

Ve stavu naprázdno převládají ztráty v železe. Proud rotorem ve stavu naprázdno bude malý, proto se Jouleovy ztráty téměř neuplatní a celkové ztráty jsou přibližně shodné se součtem mechanických ztrát a ztrát v železe.

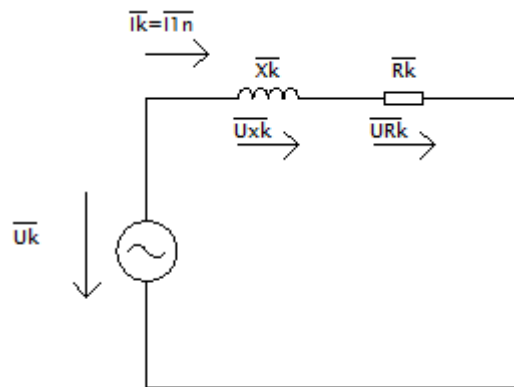


Obr. 2.7 – Rozdělení ztrát

## 2.2 Měření nakrátko

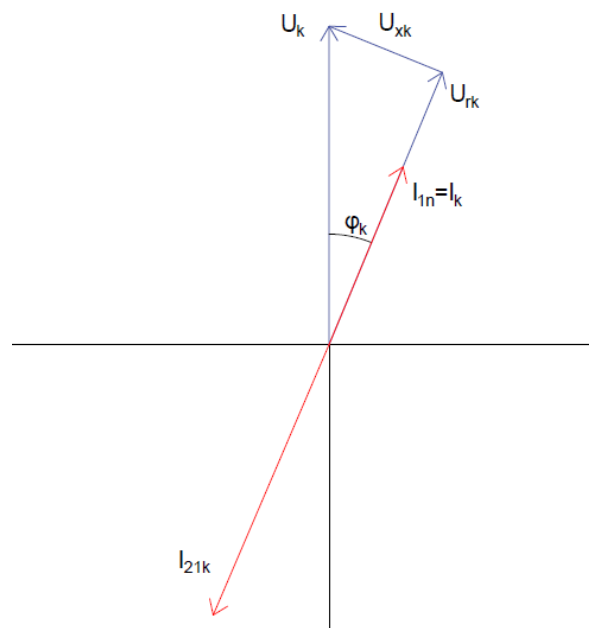
### 2.2.1 Rozbor stroje nakrátko

Ve stavu nakrátko se stroj nachází v případě  $s = 1$  a  $n = 0$ . Tento stav nastává při rozběhu, při zastavení způsobené přetížením, nebo pokud je stroj zabrzděn. [3] Při stavu nakrátko protéká velký zkratový proud a při zvyšování proudu může dojít ke zničení stroje. [5] Kvůli značně vysokému proudu převládají ztráty Jouleovy. Náhradní schéma lze uvažovat složené ze dvou prvků  $X_k$  a  $R_k$ , které reprezentují odpor a reaktanci nakrátko. [4]



Obr. 2.7 – Náhradní schéma stroje nakrátko [4]

Proud statoru a rotoru je v protifázi. Měření provádíme při sníženém napětí  $U_k$ . Jedná se o napětí, při kterých prochází strojem jmenovitý proud.



Obr. 2.7 – Fázorový diagram stroje nakrátko [4]

## 2.2.2 Postup a výsledky měření stroje nakrátko

Schéma měření nakrátko a naprázdno se téměř neliší. Nejprve je nutné určit směr otáčení stroje, kvůli správnému umístění mechanické brzdy. Poté co je stroj zabrzděn, probíhá měření při sníženém napětí až do jmenovité hodnoty proudu. [2] Zpravidla se měří do nižší hodnoty než jmenovité. Opět byla provedena dvě měření. První pomocí analyzáru a druhé analogovými přístroji. V tomto případě se měření analyzerem neosvědčilo. Při nižších hodnotách nebylo možné změřit výkony a účinník, protože jsme se dostali pod možný rozsah analyzáru.

Tab. 2.6. Měření nakrátko analyzárem

$U_f$ [V]	$I$ [A]	$P$ [kW]	$Q$ [kVar]	$S$ [Kva]	$\lambda$
16,19	1,84	-	-	-	-
19,35	2,22	0,04	0,12	0,13	0,39
28,49	3,27	0,11	0,26	0,28	0,39
37,29	4,29	0,19	0,45	0,48	0,39
45,06	5,02	0,26	0,61	0,66	0,39

Tab. 2.7. Měření analogovými přístroji nakrátko

$U_f$ [V]	$I_k$ [A]	$P_1$ [W]	$P_2$ [W]	$P_k$ [W]	$\Delta P_{jk}$ [W]	$\Delta P_d$ [W]	$\cos \phi_k$	$\phi_k$	$\sin \phi_k$
17,32	1,70	37,50	-2,50	35,00	23,67	11,33	0,40	66,42	0,92
23,10	2,13	42,50	-2,50	40,00	37,27	2,73	0,27	74,34	0,96
28,87	3,20	112,50	-10,00	102,50	83,87	18,63	0,37	68,28	0,93
38,68	4,20	205,00	-10,00	195,00	144,47	50,53	0,40	66,42	0,92
45,03	4,60	275,00	-12,50	262,50	173,30	89,20	0,42	65,17	0,90

## 2.2.3 Výpočty z měření nakrátko

Výpočty se budou týkat obdobně jako u měření nakrátko ztrát a účinníku. Odpadají mechanické ztráty, protože stroj je zabrzděn. Z naměřeného výkonu nejprve určím jouleovy ztráty z rovnice:

$$\Delta P_{jk} = 3I_k^2 \cdot (R_1 + R_2) \quad (2.9)$$

$$\Delta P_{jk} = 3 \cdot 1,7^2 \cdot (1,6 + 1,13) = 23,67 \text{ W}$$

Celkový výkon  $P_k$  je určen jako součet naměřených hodnot  $P_1$  a  $P_2$ :

$$P_k = P_1 + P_2 = 275 - 12,5 = 262,5 \text{ W} \quad (2.10)$$

Přídavné ztráty budou jen výsledkem rozdílu ztrát celkových a Joulových:

$$\Delta P_d = P_k - \Delta P_{jk} \quad (2.11)$$

$$\Delta P_d = 35 - 23,67 = 11,13 \text{ W}$$

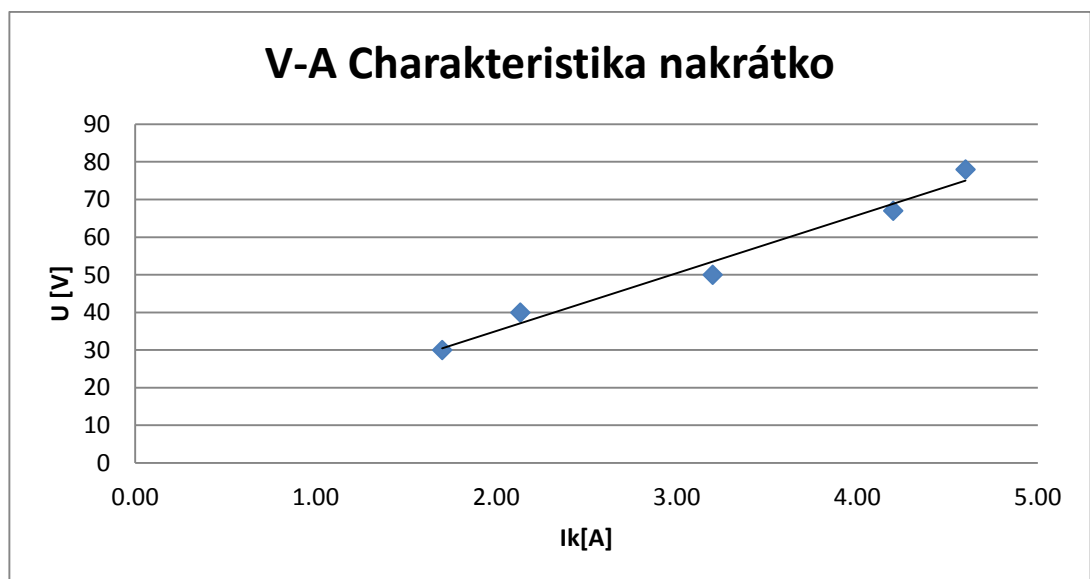
Účinník lze určit jako podíl činné a jalové složky impedance motoru. Z měření se určuje obdobným způsobem jako v případě měření naprázdno:

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{3 \cdot U_k \cdot I_k} \quad (2.12)$$

$$\cos \varphi_k = \frac{262,2}{3 \cdot 45,03 \cdot 4,6} = 0,4$$

## 2.2.4 Grafy měření nakrátko

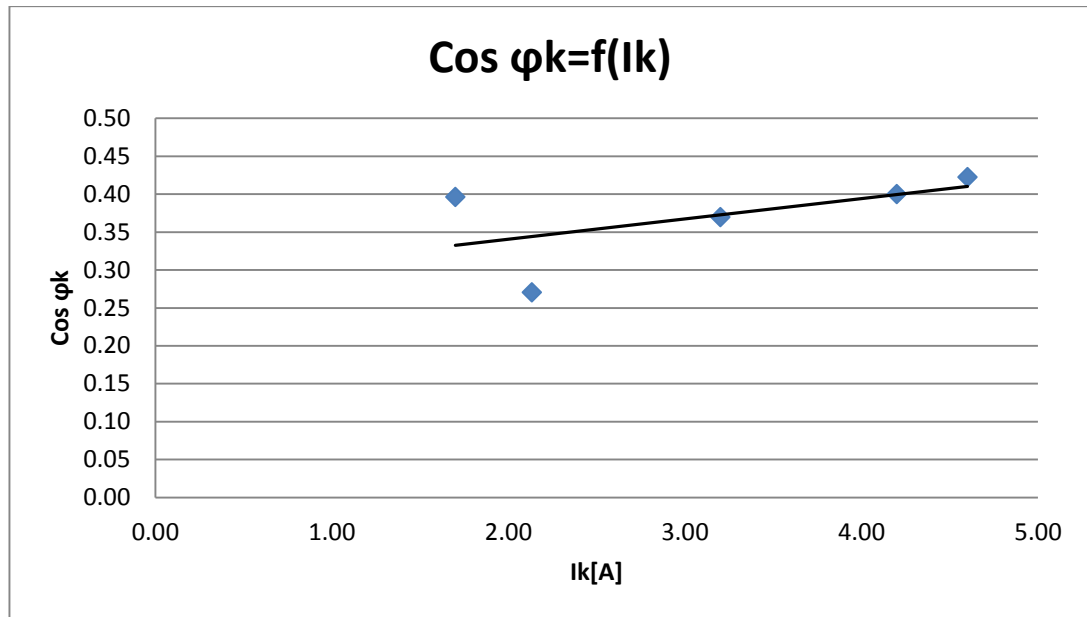
Průběh V-A charakteristiky se blíží lineární rostoucí funkci. Velikost proudu nakrátko bude nepřímo úměrná velikosti impedance motoru a napětí sítě. [5] Při výpočtech je možné považovat závislost proudu a napětí za lineární.



Obr. 2.8 – V-A charakteristika nakrátko

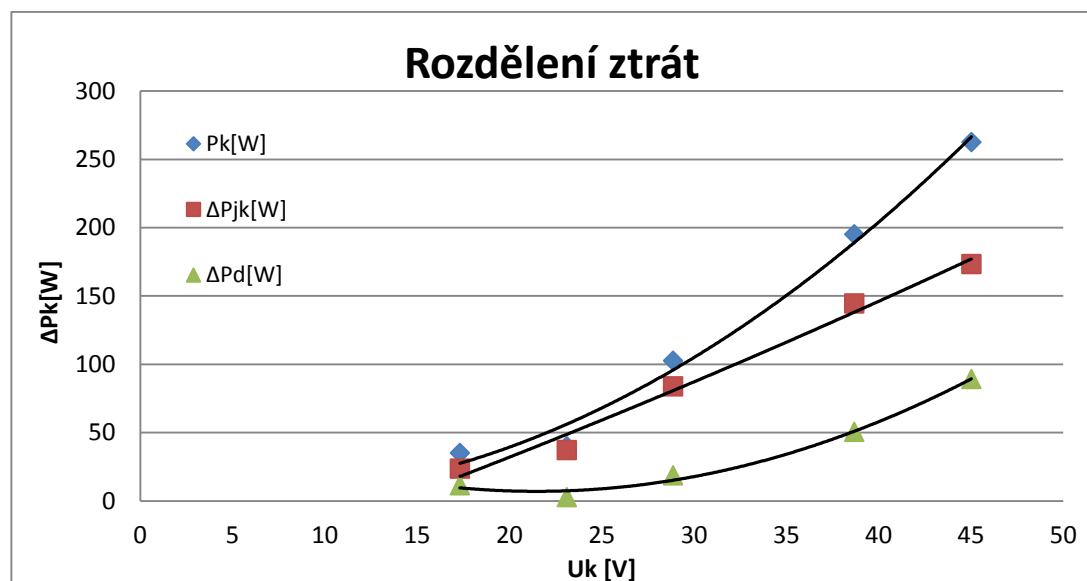
Účinník  $\cos \varphi_0$  na rozdíl od stavu naprázdno nebude rostoucí lineární, ale bude se blížit konstantnímu průběhu.





Obr. 2.9 – Závislost účinníku a proudu nakrátko

Ztráty nakrátko jsou nejvíce ovlivněny odporem rotoru. Zvětšením odporu klesne proud a úměrně by měly klesnout jouleovy ztráty. Křivka Joulových ztrát se svým průběhem blíží křivce ztrát celkových.[2]

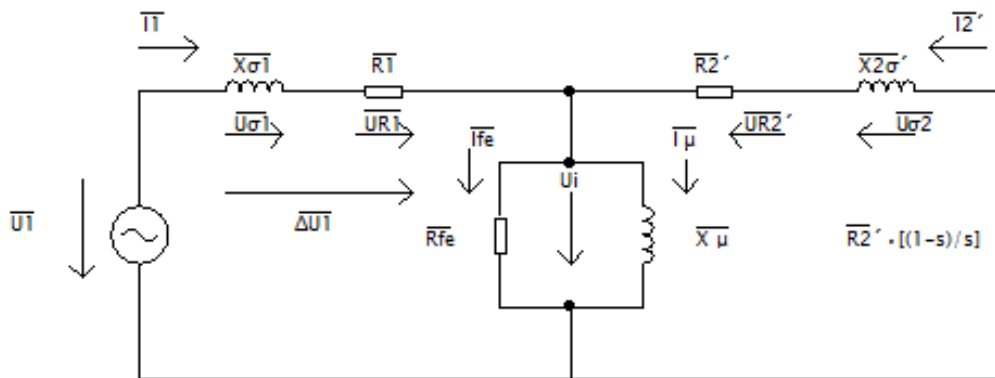


Obr. 2.10 – Rozdělení ztrát nakrátko

Měření nakrátko proběhlo pouze do 64 % jmenovitého proudu z důvodu bezpečnosti. Běžné měření probíhá do 80 %, ale měřený stroj nebyl dlouho provozován a při velkém proudovém nárazu by mohlo dojít k poškození.

### 2.3 Náhradní schéma a určení jeho parametrů

Náhradní schéma slouží pro matematický popis zkoumaného stroje. Náhradní schéma asynchronního stroje se stanovuje formou T-článku (popřípadě  $\Gamma$ -článku). [5] V případě asynchronního stroje je nutné zohlednit vliv skluzu na frekvenci rotoru, která bude přímo úměrná součinu skluzu a frekvence statoru. [4] Nejprve je nutné stanovit elektrický výkon, který bude odpovídat mechanickému výkonu na hřídeli. Při výpočtech je nezbytné respektovat rozptyl magnetického toku. S rostoucím zatížením rostou také rozptylové toky, protože jsou vybudeny proudy, které se mění se zatížením. Ve skutečnosti se magnetický tok ve vzduchové mezeře liší při různém zatížení a s tím souvisí i jiné napětí indukované ve vinutí. Vzhledem ke zjednodušení výpočtů je možné zavést předpoklad stejného magnetického toku a indukovaného napětí. Vliv rozptylových toků lze nahradit rozptylovými reaktancemi  $X_{1\sigma}$  a  $X_{2\sigma}$ . [2] [4]



Obr. 2.11 – Náhradní schéma asynchronního stroje [4]

Parametry náhradního schéma jsou určeny ze jmenovitých fázových hodnot v ustáleném stavu. Při určování parametrů vycházíme z měření naprázdno a nakrátko. [4] Při výpočtech je uvažován stroj s hliníkovou klecí, náhrada mosaznou klecí by se projevila zvýšením odporu.

Celková impedance nakrátko se určí z Ohmova zákona. Lze určit jako podíl naměřeného napětí a proudu nakrátko, nebo podílem jmenovitého napětí a proudu nakrátko při tomto napětí.

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k} = \frac{45,03}{4,6} = 9,79 \Omega \quad (2.13)$$

Činná složka impedance nakrátko je součinem celkové impedance nakrátko a  $\cos \varphi_k$ :

$$R_k = \cos \varphi_k \cdot Z_k = 0,42 \cdot 15,12 = 6,38 \, \Omega \quad (2.14)$$

$Z \cos \varphi_k$  lze určit  $\varphi_k$  jako:

$$\varphi_k = \cos \varphi_k^{-1} = \cos^{-1} 0,42 = 65,17^\circ \quad (2.15)$$

Jalová složka impedance nakrátko bude naopak součinem celkové impedance nakrátko a  $\sin \varphi_k$ :

$$X_{\sigma c} = \sin \varphi_k \cdot Z_k = 0,9 \cdot 15,12 = 13,59 \, \Omega \quad (2.16)$$

Reaktance  $X_1$  a  $X_2$  se rozdělí v poměru k odporům  $R_1$  a  $R_2'$ . Pro jednodušší vyjádření je možné při podobných velikostech odporů rozdělit reaktance na půlku s nepřesností.

$$X_{\sigma 1} = X_{\sigma c} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 13,59 \cdot \frac{1,6}{1,6 + 1,13} = 7,95 \, \Omega \quad (2.17)$$

$$X_{\sigma 2} = X_{\sigma c} \cdot \frac{R_2'}{R_1 + R_2} = 13,59 \cdot \frac{1,13}{1,6 + 1,13} = 5,64 \, \Omega \quad (2.18)$$

Pro určení indukovaného napětí je třeba znát celkovou impedanci statoru, ze které lze pomocí Ohmova zákona určit úbytek napětí. Nejprve se určí impedance statoru z činné a jalové složky:

$$Z_1 = \sqrt{(R_1^2 + X_{1\sigma}^2)} = \sqrt{(1,6^2 + 7,95^2)} = 12,72 \, \Omega \quad (2.19)$$

Úbytek lze určit jako součin celkové impedance statoru a proudu naprázdno (při fázové jmenovité hodnotě):

$$\Delta U_1 = Z_1 \cdot I_0 = 12,72 \cdot 3,97 = 50,49 \, \text{V} \quad (2.20)$$

Z rozdílu fázového napětí statoru a úbytku napětí na impedanci se získá indukované napětí stroje:

$$U_i = U_{1f} - \Delta U_1 = 219,39 - 50,49 = 168,93 \, \text{V} \quad (2.21)$$

Proud  $I_\mu$  se součinem proudu na prázdno při jmenovitém napětí a  $\sin \varphi_0$ :

$$I_\mu = I_{10} \cdot \sin \varphi_0 = 3,97 \cdot 0,99 = 3,93 \, \text{A} \quad (2.22)$$

Proud  $I_{Fe}$  je určen z měření nakrátko, jako součin proudu nakrátko a  $\sin \varphi_k$ :

$$I_{Fe} = I_k \cdot \sin \varphi_k = 0,92 \cdot 4,6 = 4,23 \, \text{A} \quad (2.23)$$

Z hodnoty indukovaného napětí  $U_i$  a proudu  $I_\mu$ , se určí reaktance příčné větve  $X_\mu$  z Ohmova zákona:

$$X_\mu = \frac{U_i}{I_\mu} = \frac{168,93}{3,93} = 42,98 \Omega \quad (2.24)$$

Nakonec se určí i činná složka příčné větve, odpor  $R_{Fe}$ , ze ztrát v železe a jmenovitého napětí  $U_n$ :

$$R_{Fe} = \frac{U_n^2}{P_{Fe}} = \frac{219,39^2}{201,47} = 238,9 \Omega \quad (2.25)$$

### 3 Náhrada rotorové klece

#### 3.1 Popis kružnicového diagramu

K posouzení vlastností asynchronního stroje slouží kružnicový diagram. Jedná se o fázorový diagram v komplexní rovině. [2] Kružnice vzniká tak, že koncový bod fázoru proudu se pohybuje po křivce, která reprezentuje proměnný skluz. V případě, že se uvažují konstantní parametry stroje, tak křivka, kterou opisuje koncový bod fázoru proudu, je právě kružnice. [4] Kružnicový diagram zpravidla vychází z náhradního schématu asynchronního stroje, ovšem existuje hned několik metod jeho konstrukce. Jedna z nejpřesnějších metod konstrukce kružnicového diagramu je metoda inverze, která je popsána v knize G. N. Petrova [8]. Tato metoda předpokládá všechny hodnoty statoru a rotoru konstantní při změně skluzu.

Kružnicový diagram ovšem neplatí pro každý stroj. Nejpřesnější použití je pro motory s vinutým rotorem. [4] Pro motory s kotvou klecovou platí diagram také, ale je třeba uvažovat částečnou nepřesnost. Pro stroje se speciální klecí nakrátko, jako je například klec vírová nebo dvojitá, nelze kružnicový diagram použít v celém rozsahu momentové charakteristiky. Použitelný je pouze v lineární části, která se přibližně shoduje s průběhem charakteristiky pro stroj s klecí nakrátko. [9]

Obecně konstrukce kružnicového diagramu vychází z náhradního schématu a jeho parametry úzce souvisí s kružnicovým diagramem. Zvolená metoda konstrukce kružnicového diagramu pro náhradu klece rotoru je metoda konstrukce z měření naprázdno a nakrátko. Zde je patrná vazba na náhradní schéma, které bylo konstruováno z hodnot stejného měření. Kružnicový diagram se konstruuje pro konstantní jmenovité napětí.

### 3.1.1 Konstrukce kružnicového diagramu pro stroj s hliníkovou klecí nakrátko

Kružnicový diagram platí pro hodnoty jmenovitého konstantního napětí, proto je třeba převést hodnotu proudu nakrátko  $I_k$  na hodnotu  $I_{kn}$  tohoto napětí:

$$I_{kn} = \frac{I_k U_n}{U_k} = \frac{4,6 \cdot 230}{45,03} = 23,5 \text{ A} \quad (3.1)$$

Před samotnou konstrukcí je potřeba určit si měřítko. Zvolené měřítko je v tomto případě 0,1 A na mm.

Tab. 2.8. Hodnoty pro konstrukci kružnicového diagramu

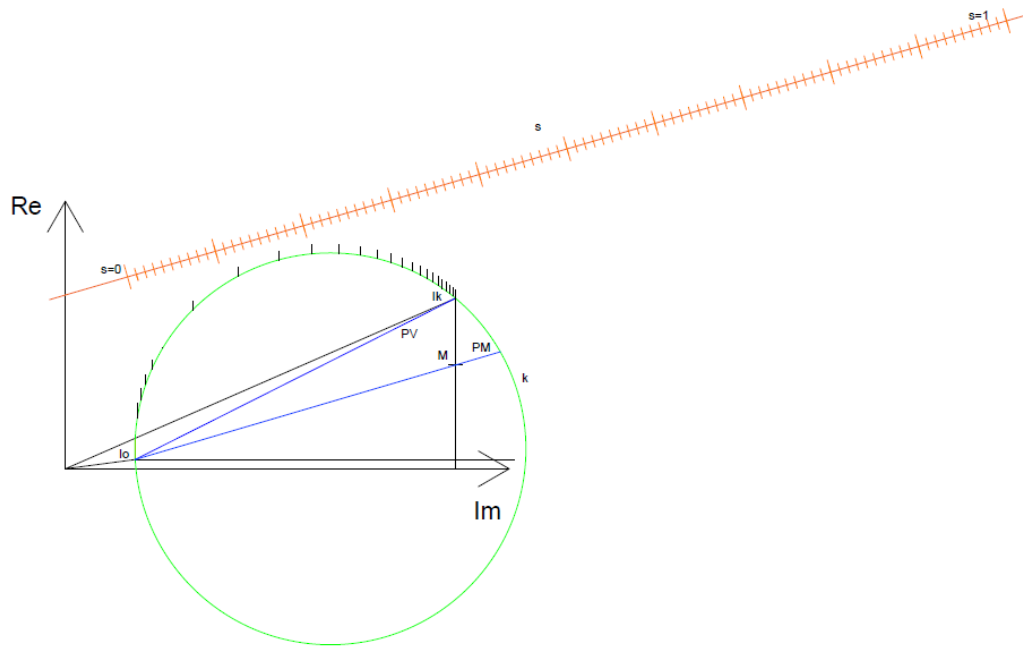
Naprázdko	Nakrátko	Odpory
$I_0 = 3,97 \text{ A}$	$I_k = 23,5 \text{ A}$	$R_1 = 1,6 \Omega$
$\phi_0 = 82,5^\circ$	$\phi_k = 66,42^\circ$	$R_2' = 1,13 \Omega$

Velikosti uvedené v postupu se týkají této konkrétní prováděné náhrady.

- Nejprve se určí komplexní rovina. Vertikálně leží reálná osa a horizontálně imaginární osa, která představuje přímku příkonů.
- Do komplexní roviny se vynese naměřený proud naprázdno  $I_0$  a přepočtený proud nakrátko  $I_{kn}$  pod úhlem stanoveným výpočtem (viz tabulkové hodnoty výše).
- Dalším krokem bude sestrojení samotné kružnice, ale nejdříve je zapotřebí nalézt střed. Spojí se tedy koncové body proudů  $I_0$ ,  $I_{kn}$ . Ve středu této spojnice povede osa kolmá na spojnici. Další osa bude vycházet kolmo z koncového bodu  $I_0$  jako rovnoběžka k reálné ose.
- V průsečíku os leží střed kružnice. Narýsuje se kružnice, na které musí ležet koncové body proudů.
- Z koncového bodu  $I_0$ , povede rovnoběžka k imaginární ose. Vychází se z předpokladů konstantních ztrát naprázdno.
- Dalších několik kroků bude věnováno konstrukci momentové přímky. Z koncového bodu  $I_{kn}$ , povede kolmice na přímku rovnoběžnou s imaginární osou. Tato přímka bude později představovat ztráty stroje, proto je třeba ji rozdělit v poměru odporů, aby bylo možné určit jednak bod, kterým bude procházet přímka momentů, ale také aby se daly rozlišit jouleovy ztráty vznikající na rotoru a statoru.
- Přímka se rozdělí v poměru odporů podle rovnice:

$$k = \frac{R_2'}{R_1 + R_2'} = \frac{1,13}{1,6 + 1,13} = 0,414 \quad (3.2)$$

- Celá přímka je dlouhá 90,88 mm a po vynásobení konstantou  $k$ , bude odpor  $R_2'$  představovat 37,6 mm přímky. Tímto bodem bude procházet přímka momentů.
- Na základě přímky momentů je možné vynést stupnici skluzu. Stupnice skluzu je zkonstruována jako rovnoběžka k přímce momentů. Nezáleží na vzdálenosti od přímky momentů, ale není výhodné ji vynést v kružnici, nebo naopak příliš daleko. Ideální umístění je několik centimetrů nad kružnicí.
- Je třeba určit přímku výkonů, díky které je následně možné odečítat výkon stroje při proměnném skluzu v rozsahu celé skluzové stupnice. Přímka výkonů je spojnice mezi koncovými body proudů.
- Stupnici skluzu je na rozdíl od přímky výkonů a momentů nutné ocejchovat. Přímka se musí nejdříve rozdělit mezi dva krajní body. Prvním bodem bude  $s = 1$ . Tento bod se určí prodloužením spojnice koncových bodů proudů. V místě, kde spojnice protne stupnici skluzu se spojnicí, se nachází bod  $s = 1$  (tímto odkazují na momentovou charakteristiku uvedenou v teoretické části). Dalším krajním bodem je bod  $s = 0$ . Tento bod se určí spojením tečné přímky vycházející z koncového bodu  $I_0$  se stupnicí skluzu.
- Celá délka stupnice skluzu mezi body  $s = 1$  a  $s = 0$  je 515,56 mm. Stupnice je dále rozdělena po 51,556 mm se zvýrazněnými body po 51,556 mm (10% stupnice).
- Je možné vynést i přímku účinnosti rovnoběžně k imaginární ose z bodu  $s = 1$ , kde bude účinnost rovna 0 % (otáčky jsou nulové) až k bodu, kde účinnost dosahuje 100 %. Tento bod je určen přímkou, která má počátek v průsečíku prodloužené přímky výkonů a imaginární osy. Z tohoto průsečíku je vedena rovnoběžka k přímce určující na skluzové stupnici bod  $s = 0$ .
- Pro jednodušší odečet z kružnicového digramu je výhodné označit si body na kružnici, odpovídající rostoucí hodnotě skluzu, jako spojnicí koncového bodu  $I_0$  a stupnice skluzu. V tomto konkrétním případě byla kružnice rozdělena po 25,77 cm (hodnota odpovídající 5 % skluzové stupnice).



Obr. 2.12 – Kružnicový diagram stroje s hliníkovou kotvou[9]

V tomto případě nebyla stupnice výkonu použita. Účinnost stroje byla odečítána jiným způsobem popsáním v odečtu z kružnicového diagramu.

### 3.1.2 Odečet z kružnicového diagramu pro hliníkovou klec

Před samotným odečtem je zapotřebí určit si měřítko. Měřítka proudu je dané poměrem, ve kterém je diagram zakreslován (v tomto případě  $m_i = 0,1 \text{ A/mm}$ ). Z měřítka proudů vychází právě měřítko výkonu, které je určeno jako:

$$m_p = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot m_i = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,1 = 69,28 \quad (3.3)$$

Dalším měřítkem je měřítko momentů. Pro určení tohoto měřítka je zapotřebí nejdříve znát synchronní úhlovou rychlost měřeného stroje. Ta je určena rovnicí:

$$\omega_s = \frac{\pi \cdot n_s}{30} = \frac{\pi \cdot 1000}{30} = 104,72 \text{ rad/s} \quad (3.4)$$

Měřítka momentů je přímo úměrné měřítku výkonu a nabývá hodnoty:

$$m_m = \frac{m_p}{\omega_s} = \frac{69,28}{104,72} = 0,662 \text{ Nm/mm} \quad (3.5)$$

Odečet jednotlivých hodnot momentů a výkonu stroje se provádí pro konkrétní hodnotu skluzu. Pro posouzení chování stroje při proměnném skluzu je však zapotřebí proměřit charakteristiku při zvětšující se hodnotě skluzu a ze získaných výsledků pak vyhotovit výkonovou a momentovou charakteristiku. Odečet hodnot výkonu a momentu probíhá ve dvou krocích. Nejprve se spojí koncový bod proudu naprázdno s požadovanou hodnotou skluzu na skluzové stupnici. Pak se vynesí kolmice na přímkou momentu a výkonu. Velikost přímkou od kružnice k výkonové přímce je velikost výkonu a od kružnice k momentové přímce je velikost momentu. Ještě je nutné vynásobit odečtenou velikost příslušnou konstantou. [4] [9]

Pro posouzení stroje z hlediska výkonové a momentové přetížitelnosti je třeba určit maximální moment a maximální výkon z kružnicového diagramu a stanovit jmenovitou hodnotu momentu.

Nejprve je určen jmenovitý skluz. Určuje se buď výpočtem, nebo odečtem z kružnicového diagramu. Na výkonové přímce je nalezena hodnota odpovídající velikosti jmenovitého výkonu  $P_n$  po přepočtu pro použité měřítko. Bod na kružnici, kterým povede přímka, je určena podílem  $P_n$  a  $m_p$ , přímka je dále protažena ke skluzové stupnici, kde protne hodnotu jmenovitého skluzu  $s_n$ . [2] [9] Velikost  $s_n$  je stanovena na 0,0453.

Ze znalosti jmenovitých otáček  $n_n$  a jmenovitého výkonu lze vypočítat jmenovitý moment stroje. Jmenovitý výkon  $P_n$  je 3kW.

$$M_n = \frac{P_n}{\frac{2\pi \cdot n_n}{60}} = \frac{3000}{\frac{2\pi \cdot 935}{60}} = 30,64 \text{ Nm} \quad (3.6)$$

Postup odečtu maximálního momentu z kružnicového diagramu je následující. Ze středu kružnice je vedena kolmice na momentovou přímkou, která v bodě, kde protne kružnici, stanoví bod, ze kterého se následně maximální moment odečítá. Spojením tohoto bodu s koncovým bodem proudu naprázdno je určena hodnota skluzu při maximálním momentu stroje. Stejný postup se uplatňuje při hledání maximálního výkonu pouze s tím rozdílem, že kolmice se nevynáší na přímkou momentů, ale výkonů. [2]

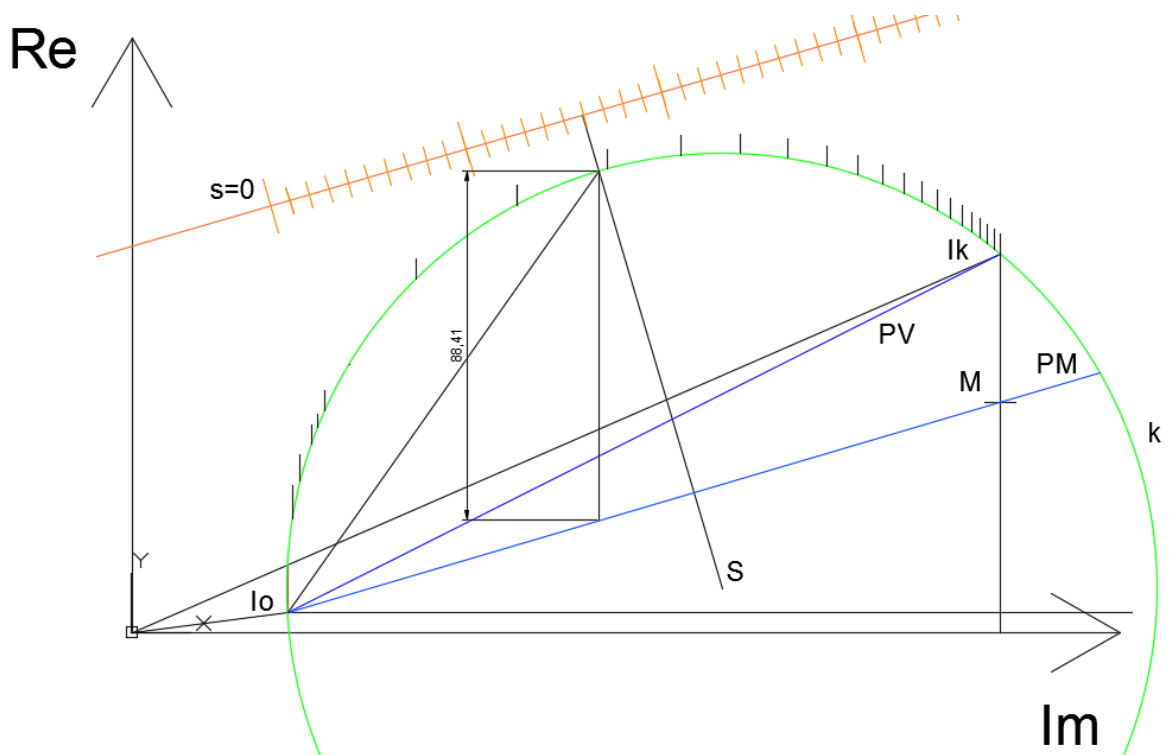


Tab. 2.9 Maximální výkon a moment stroje s hliníkovou kotvou v závislosti na skluzu

$M_{\max}[\text{Nm}]$	58,35
$s$	0,195
$P_{\max}[\text{W}]$	5 126,81
$s$	0,155

Tab. 2.10 Jmenovitý výkon a moment stroje s hliníkovou kotvou v závislosti na skluzu

$M_n[\text{Nm}]$	30,64
$P_n[\text{W}]$	3 000
$s_n$	0,0453



Obr. 2.13. – Odečet maximálního momentu stroje s hliníkovou kotvou [9]

Momentová přetížitelnost je určena rovnicí:

$$M_p = \frac{M_{\max}}{M_n} = \frac{58,35}{30,64} = 1,9 \quad (3.7)$$

Výkonová přetížitelnost:

$$P_p = \frac{P_{\max}}{P_n} = \frac{5126,81}{3000} = 1,71 \quad (3.8)$$

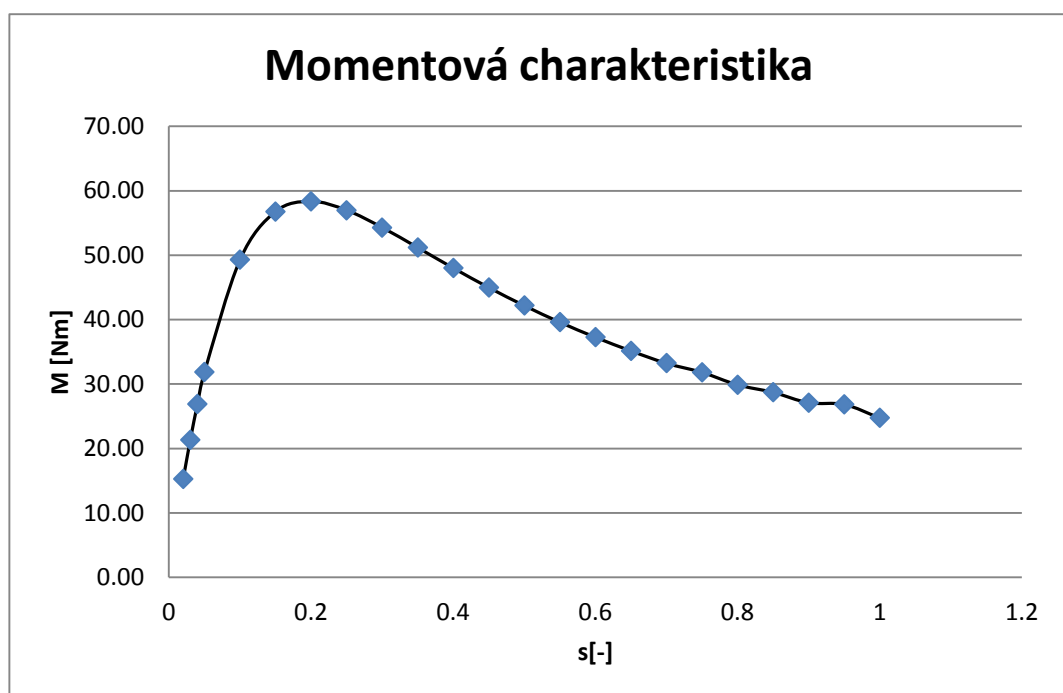
Zásadním ukazatelem při náhradě je spouštěcí výkon. Při náhradě dojde ke snížení záběrného proudu a úměrně s ním by měl klesnout i záběrný proud. Hodnota záběrného proudu se odečítá z kružnicového diagramu.[9]

Velikost spouštěcího výkonu je určena rovnicí:

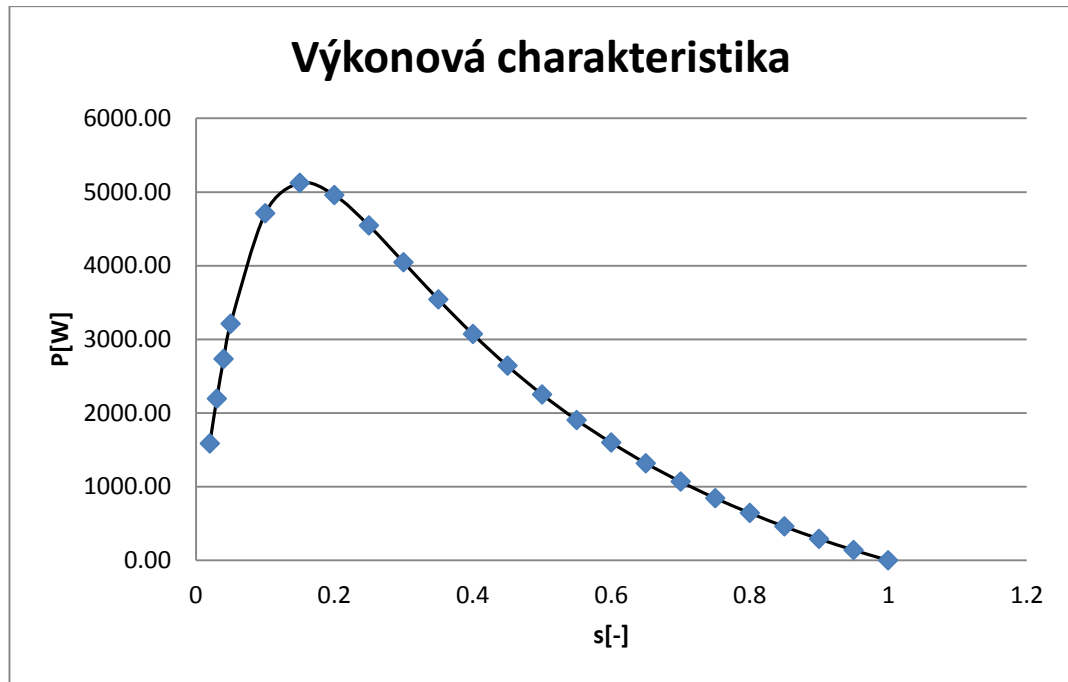
$$P_s = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{kn} = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 23,5 = 16\,281,3 \text{ W} \quad (3.9)$$

Z odečtených hodnot byla stanovena momentová a výkonová charakteristika.

Tab. 2.11 Hodnoty momentu a výkonu odečtené z kružnicového diagramu pro hliníkovou klec



Obr. 2.14. – Momentová charakteristika stroje s hliníkovou kotvou



Obr. 2.14. – Výkonová charakteristika stroje s hliníkovou kotvou

Při náhradě dojde ke změně účinnosti, proto je posuzována i změna účinnosti vzhledem k proměnnému skluzu. Z kružnicového diagramu jsou odečteny hodnoty příkonu a výkonu při stejných hodnotách skluzu jako při odečtech výkonu a momentu. [2]

Tab. 2.12 Hodnoty výkonů a účinnosti při jmenovitém skluzu stroje s hliníkovou klecí

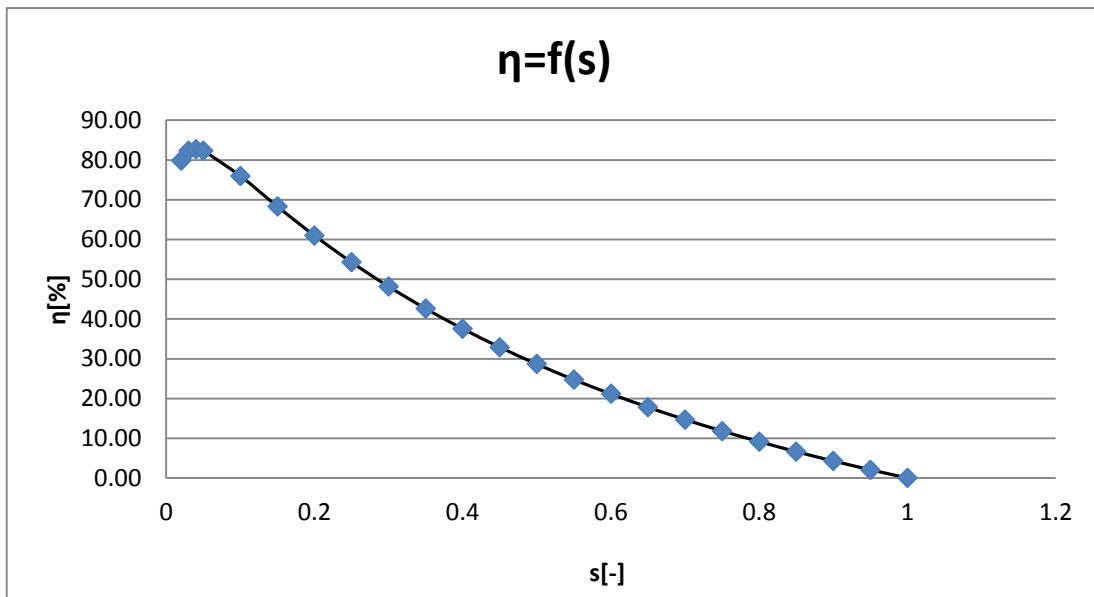
$s_n$ [-]	0,0453
$P_p$ [W]	3 607,10
$P$ [W]	3 000
$\eta$ [%]	83,17

Tab. 2.13 Odečtené hodnoty pro stroj s hliníkovou klecí

$s$ [-]	0,02	0,03	0,04	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
$I$ [A]	4,92	5,69	6,54	7,40	11,42	14,51	16,75	18,36
$M$ [Nm]	15,29	21,34	26,87	31,86	49,30	56,76	58,34	56,96
$P_2$ [W]	1 989,60	2 665,97	3 304,22	3 899,51	6 200,96	7 502,42	8 133,74	8 372,13
$P_1$ [W]	1 587,66	2 193,35	2 733,89	3 209,98	4 711,01	5 123,35	4 960,49	4 544,69
$\eta$ [%]	79,80	82,27	82,74	82,32	75,97	68,29	60,99	54,28

0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70
19,55	20,44	21,13	21,66	22,09	22,44	22,72	22,96	23,17
54,29	51,16	48,00	44,97	42,17	39,59	37,26	35,15	33,22
8399,85	8 318,08	8 183,64	8 027,02	7 864,16	7 704,08	7 552,31	7 406,78	7 272,34
4046,43	3 544,00	3 072,07	2 641,02	2 252,94	1 905,75	1 598,06	1 318,09	1 069,30
48,17	42,61	37,54	32,90	28,65	24,74	21,16	17,80	14,70

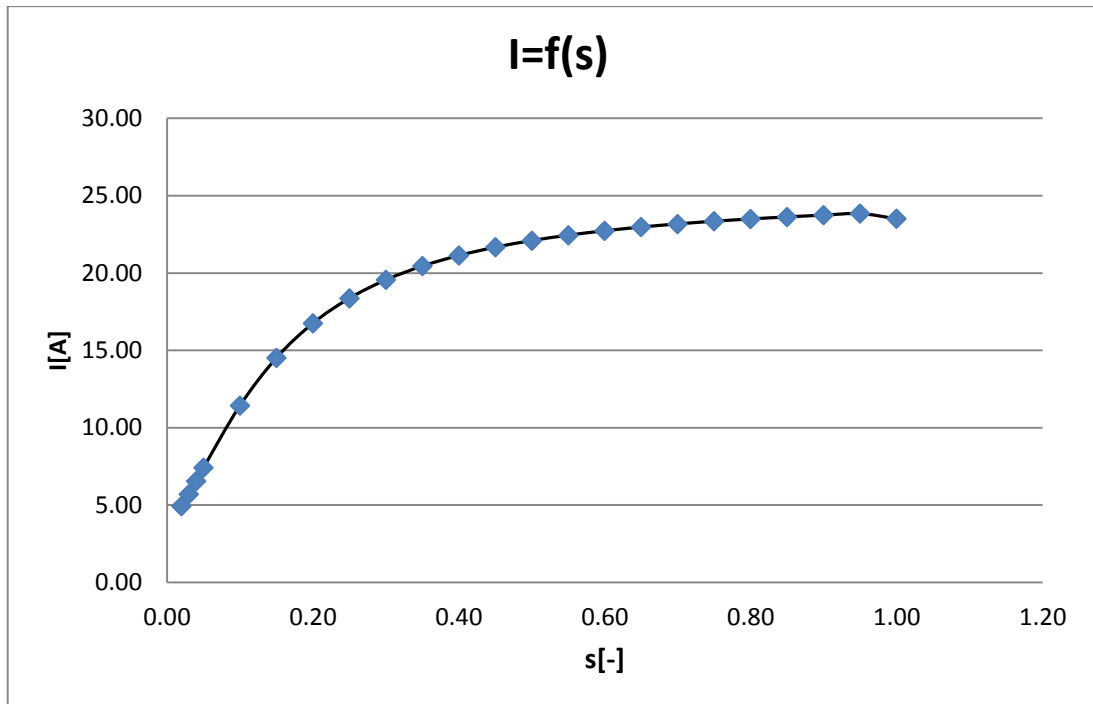
0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
23,34	23,49	23,62	23,73	23,83	23,50
31,81	29,88	28,72	27,11	26,84	24,75
7 146,91	7 031,87	6 922,38	6 822,59	6 729,72	6 643,10
844,77	643,80	458,77	291,75	139,29	0,00
11,82	9,16	6,63	4,28	2,07	0,00



Obr. 2.14. – Závislost účinnosti na skluzu stroje s hliníkovou kotvou

Účinnost stroje je rostoucí až do hodnoty jmenovitého skluzu. Se zvětšujícím se skluzem klesají otáčky a účinnost k nule. Charakteristiky stroje s hliníkovou kotvou jsou poměrně tvrdé na rozdíl od stroje s kotvou mosaznou a záběrný výkon vlivem záběrného proudu je značný.

Proud bude narůstat se zvětšujícím se skluzem. Důležitá je oblast kolem jmenovitého skluzu, kde je stroj provozován a při rozběhu kdy je skluz roven nule

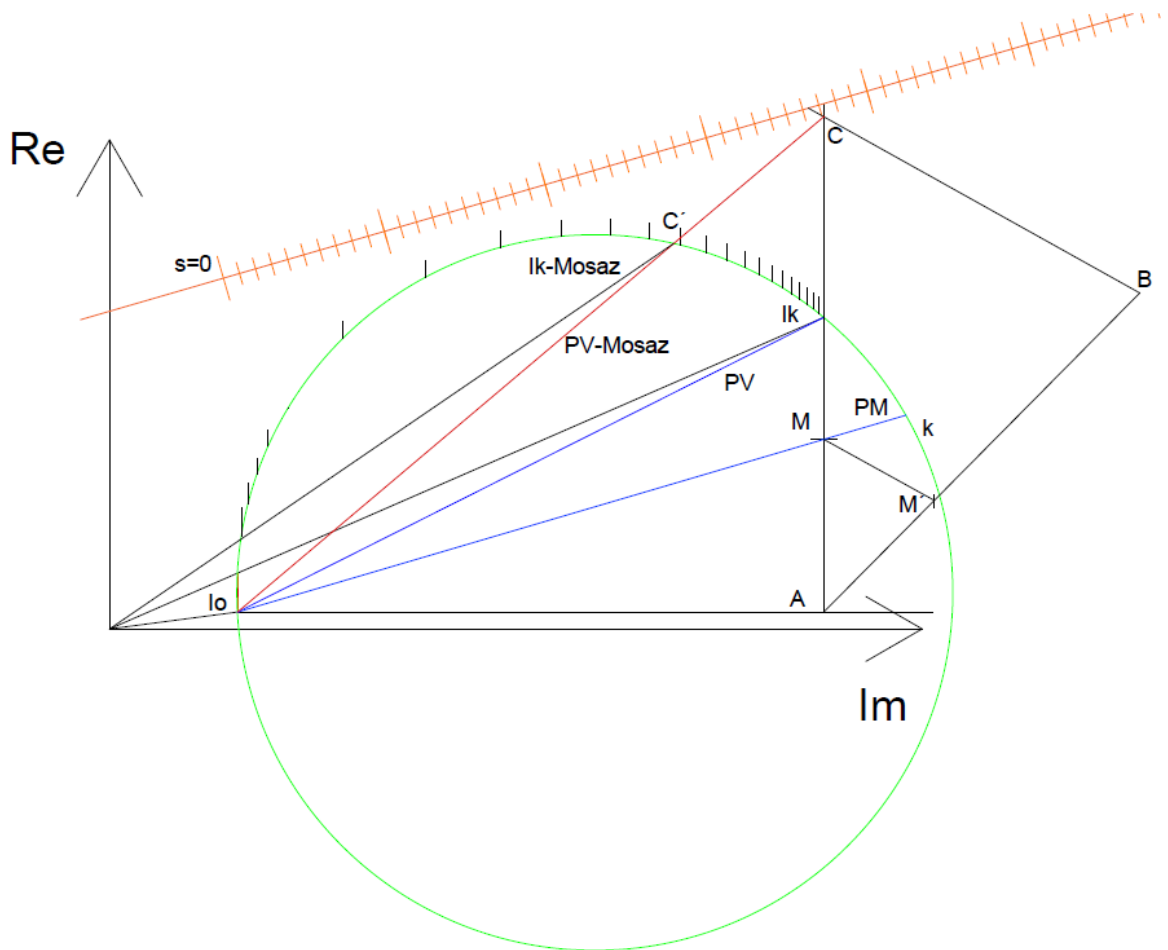


Obr. 2.14. – Průběh proudu

### 3.2 Konstrukce kružnicového diagramu pro stroj s mosaznou klecí nakrátko

Touto náhradou by se mělo docílit snížení záběrného proudu za cenu snížení účinnosti stroje.

Při náhradě klece jiným materiálem je nutné, vedle stanovení nového rozdělení přímky určující ztráty stroje, také uvažovat změnu spouštěcího proudu a tím posun přímky výkonů. Přímka momentů zůstane stejná, pouze dojde k posunu bodu  $M$  určující poměr rozdělení odporů. Postup konstrukce náhrady, se dá popsat v několika bodech, jako konstrukce trojúhelníku s vrcholy A, B, C.



Obr. 2.14. – Postup konstrukce kružnicového diagramu pro mosaznou klec

- Nejprve je vedena přímka z bodu A do libovolného koncového bodu B. Tato přímka může mít libovolný úhel v rozpětí od  $0^\circ$  do  $90^\circ$ , ale není vhodné volit tyto krajní hodnoty. Nezáleží ani na délce úsečky  $\langle A, B \rangle$ , ale je výhodné volit délku přibližně stejnou, jako délku úsečky od bodu A do koncového bodu fázoru  $I_k$  (dále odporová přímka).

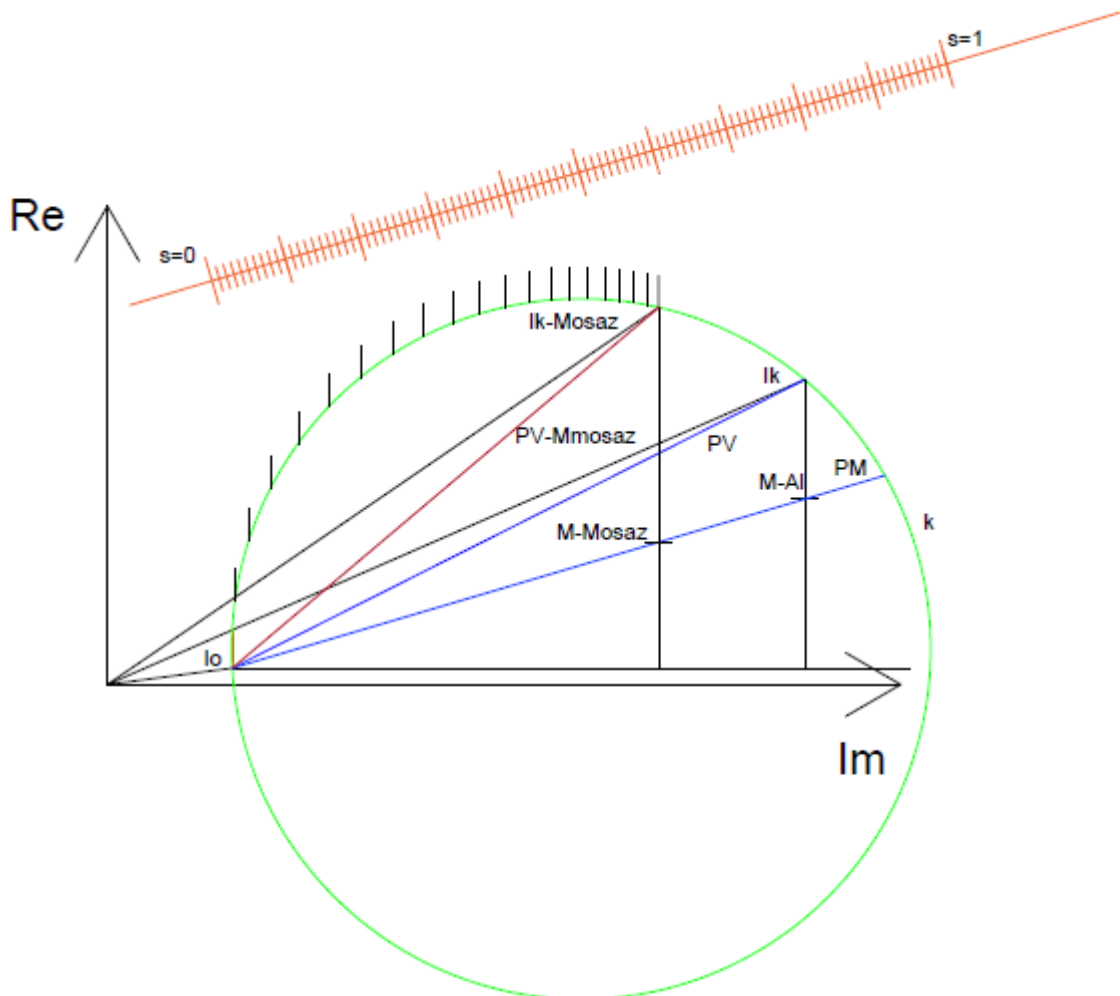
- Zvolená úsečka  $\langle A, B \rangle$ , je rozdělena v poměru odporů prostřednictvím stanovené konstanty:

$$k = \frac{R_2'}{R_1 + R_2} = \frac{2,978}{1,6 + 2,978} = 0,651 \quad (3.10)$$

- Vzniklý bod  $M'$  vlivem rozdělení úsečky  $\langle A, B \rangle$  se následně spojí s bodem M na odporové přímce

- V bodě B je vedena přímka rovnoběžná s úsečkou  $\langle M, M' \rangle$ , která vznikla spojením bodů rozdělení v poměru odporů.

- Odporová přímka pro hliník je protažena kolmo směrem ke stupnici skluzu, kde protne rovnoběžku vynesenu v předchozím kroku a tím je stanoven bod C. Spojením tohoto bodu s počátkem souřadné soustavy (bod  $\langle 0,0 \rangle$ ), je získán bod C', který leží na průsečíku kružnice se spojnicí bodu C a bodu  $\langle 0,0 \rangle$ .
- Spojením bodu C' s koncovým bodem proudu naprázdno  $I_0$ , je získána přímka výkonů pro mosaznou klec. Spojením zmíněného bodu a počátku souřadné soustavy je získán proud  $I_{kn}$  pro mosaznou klec.
- Sklon skluzové stupnice se nemění, ale je zapotřebí znovu označit krajní body  $s = 1$  a  $s = 0$ , poněvadž přímka je výrazně kratší. Ocejchování stupnice proběhne stejným způsobem jako v případě konstrukce kružnicového diagramu pro hliníkovou klec.



Obr. 2.15. – Kružnicový diagram stroje s mosaznou kotvou

### 3.2.1 Odečet z kružnicového diagramu pro mosaznou klec

Vlastnosti stroje s mosaznou klecí jsou posuzovány podle stejných kritérií jako u stroje s kotvou hliníkovou. Zpočátku je zapotřebí určit jmenovitý skluz. Tento odečet je proveden stejným způsobem jako v předešlém případě. Hodnota  $s_n$  je stanovena na 13,5 %. Jmenovitý výkon je stále uvažován jako 3 kW, proto i délka přímky určující bod, kterým povede spojnice se stupnicí skluzu, bude mít stejnou velikost.

Následné určení otáček je provedeno podle rovnice:

$$n_n = n_s - \frac{s_n \cdot n_s}{100} = 1000 - \frac{13,5 \cdot 1000}{100} = 865 \text{ ot./min} \quad (3.11)$$

Nyní je možné určit jmenovitý moment z rovnice:

$$M_n = \frac{P_n}{\frac{2\pi \cdot n_n}{60}} = \frac{3000}{\frac{2\pi \cdot 865}{60}} = 33,12 \text{ Nm} \quad (3.12)$$

Následuje odečet maximálních hodnot. Maximální moment bude stejný jako v případě hliníkové klece. Maximální výkon bude rovněž odečítán obdobně, ale vlivem zmenšení proudu dojde ke zmenšení maximálního výkonu.

Tab. 2.15 Maximální výkon a moment stroje s mosaznou kotvou v závislosti na skluzu

$M_{\max}[\text{Nm}]$	58,35
s	0,505
$P_{\max}[\text{W}]$	3 970,2
s	0,295

Tab. 2.16 Jmenovitý výkon a moment stroje s mosaznou kotvou v závislosti na skluzu

$M_n[\text{Nm}]$	33,12
$P_n[\text{W}]$	3 000
$s_n$	0,135

Velikost momentové přetížitelnosti je určena jako:

$$M_p = \frac{M_{\max}}{M_n} = \frac{58,35}{33,12} = 1,76 \quad (3.13)$$

Velikost výkonové přetížitelnosti:

$$P_p = \frac{P_{\max}}{P_n} = \frac{3970,2}{3000} = 1,32 \quad (3.14)$$



Pozitivní vliv náhrady se projeví na spouštěcím výkonu. Proud  $I_s$  je odečten z kružnicového diagramu. Spouštěcí výkon určíme ze stejné rovnice jako v případě hliníkové klece.

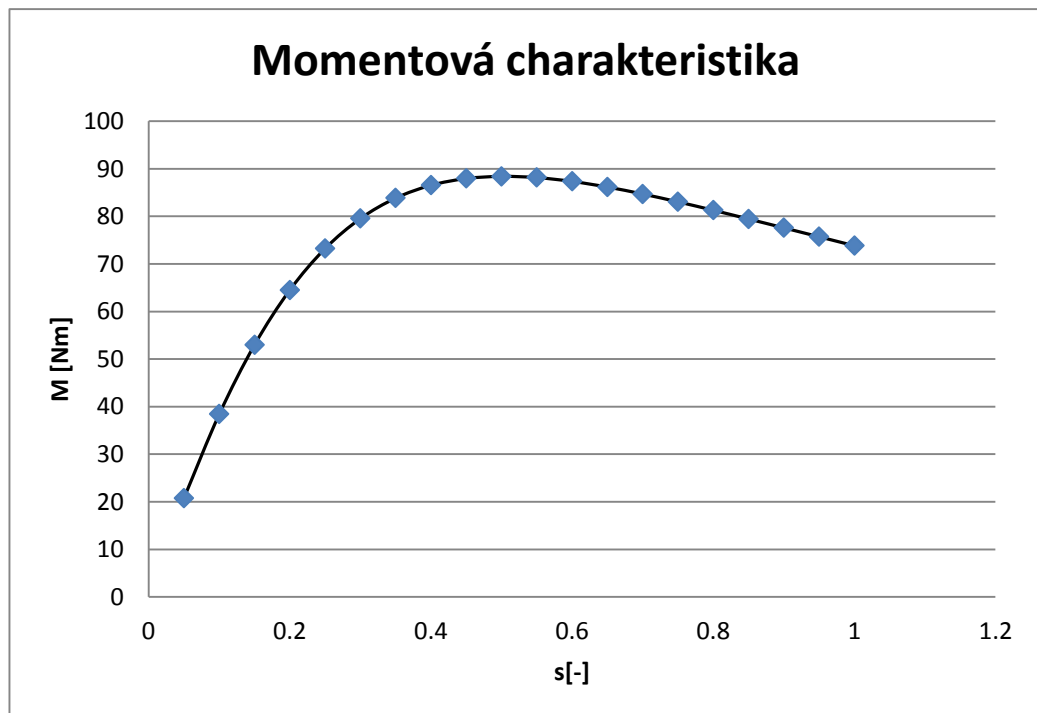
$$P_s = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_s = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 21,03 = 14\,570,01 \text{ W} \quad (3.15)$$

Ze stanovených hodnot byly sestrojeny charakteristiky momentové a výkonové

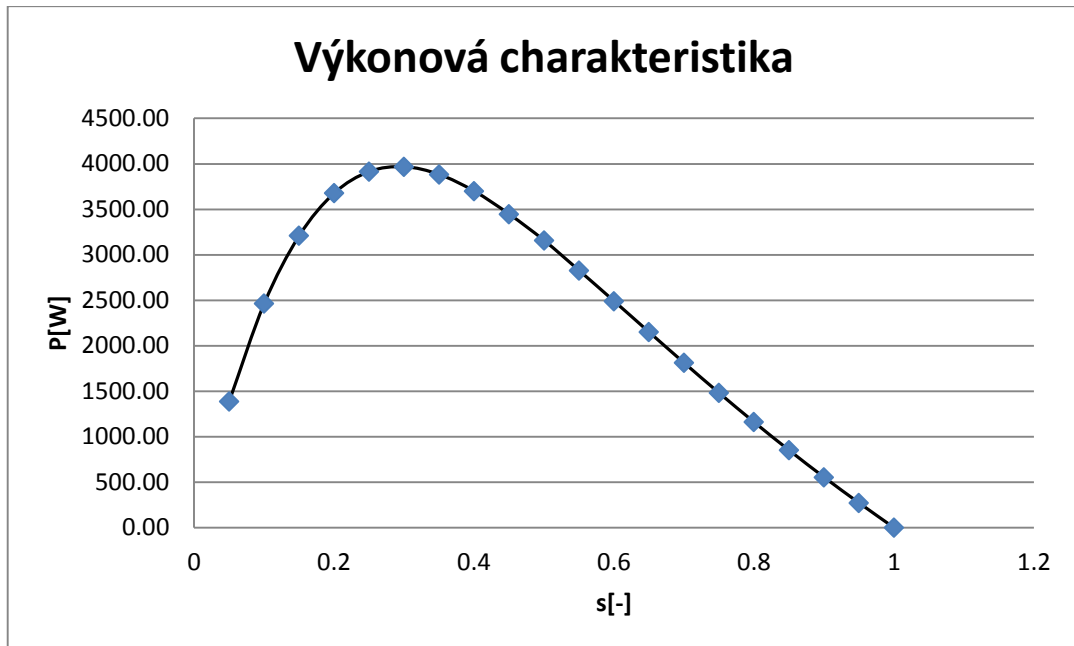
Tab. 2.17 Odečtené hodnoty pro stroj s mosaznou klecí

s[-]	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
I[A]	4,80	6,34	8,04	9,68	11,17	12,54	13,74	14,80	15,73	16,55
M [Nm]	13,71	25,35	34,97	42,57	48,33	52,49	55,33	57,10	58,04	58,34
P2[W]	1816,35	3126,82	4278,58	5254,33	6056,13	6698,54	7200,96	7585,58	7872,48	8080,38
P1[W]	1388,08	2463,62	3209,28	3677,75	3914,76	3968,12	3883,57	3699,93	3447,68	3158,00
$\eta$ [%]	76,42	78,79	75,01	69,99	64,64	59,24	53,93	48,78	43,79	39,08

0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
17,27	17,91	18,47	18,97	19,41	19,81	20,16	20,48	20,72	21,03
58,17	57,64	56,86	55,90	54,81	53,64	52,43	51,20	49,96	48,72
8225,91	8320,85	8376,98	8402,63	8405,40	8389,46	8359,66	8319,47	8271,65	8217,59
2827,44	2490,64	2150,38	1812,20	1481,63	1160,78	851,70	555,09	272,35	0,00
34,37	29,93	25,67	21,57	17,63	13,84	10,19	6,67	3,29	0,00



Obr. 2.16. – Momentová charakteristika stroje s mosaznou kotvou

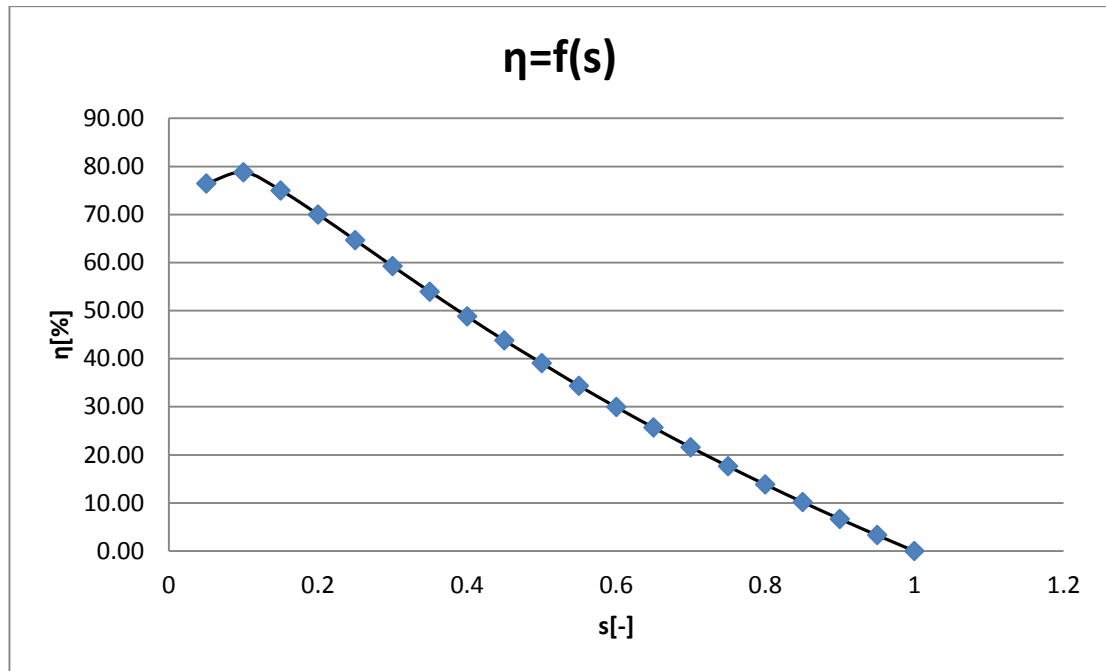


Obr. 2.16. – Výkonová charakteristika stroje s mosaznou kotvou

Zásadní bude kromě spouštěcího výkonu také změna účinnosti. Odečet účinnosti proběhne opět obdobně. Hlavní rozdíl bude ve změně velikosti stupnice skluzu a sklonu přímky výkonu. Tato změna se projeví například na tvrdosti charakteristiky a velikosti účinnosti při hodnotě jmenovitého skluzu.

Tab. 2.18 Hodnoty při jmenovitém skluzu stroje s mosaznou klecí

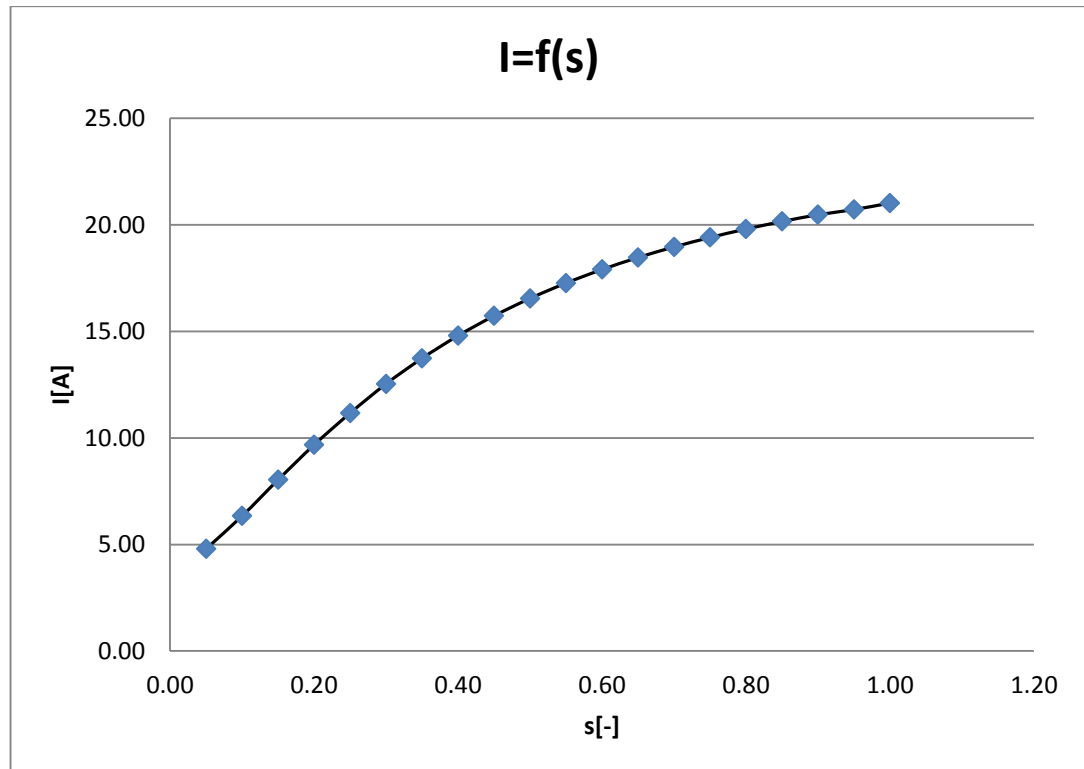
$s_n$ [-]	0,135
$P_p$ [W]	3 931,4
$P$ [W]	3 000
$\eta$ [%]	76,31



Obr. 2.16. – Závislost účinnosti na skluzu stroje s mosaznou kotvou

Pokles účinnosti není tak měkký jako v předchozím případě. Vlivem většího odporu je i účinnost při jmenovitém skluzu menší. Porovnání bude podrobně provedeno v následujících kapitolách.

Tvar křivky proudu v závislosti na skluzu má přibližně stejný průběh, zásadní rozdíl je ale ve velikosti v bodě  $s = 1$  kdy se motor rozbíhá a  $s = s_n$  kdy motor pracuje. V těchto bodech jsou hodnoty proudu nižší, jak je patrné v podkapitole 3.4.



Obr. 2.16. – Závislost proudu na skluzu pro stroj s mosaznou kotvou

### 3.3 Porovnání hliníkové a mosazné klece

Při návrhu a výrobě stroje je zapotřebí vzít v úvahu budoucí využití stroje, a tím i použitý materiál. Pro stroje s klecí nakrátko je nejpoužívanějším materiálem hliník.

Hliník je tvárný a především lehký kov s dobrou tepelnou a elektrickou vodivostí. Vyrábí se elektrolytickým rozkladem oxidu hlinitého. V elektrotechnice se také často využívá slitiny hliníku a křemíku zvané silumin.

Kromě hliníku je v elektrotechnice často používaným materiálem měď a její slitiny, a to především kvůli lepší vodivosti a pevnosti. Nevýhodou je vyšší cena. Mosaz je slitinou zinku a mědi. Právě podíl mědi udává použití slitiny. Pro konstrukční aplikace se používá mosaz s podílem vyšším než 55 % mědi. V případě slévání se využívá mosaz s podílem menším než 50 % mědi. Tato slitina má výrazně vyšší pevnost než měď. [7]

Rozměry jsou stejné v případě hliníku i mosazi.

Ze znalosti rozměrů kruhů a tyče byly vyhotoveny modely rotorové klece.



Obr. 2.16. – Model hliníkové a mosazné klece

Stanovené hodnoty vlastností pro použité materiály:

Tab. 2.18 Parametry hliníkové a mosazné klece

<b>Hliník</b>		<b>Mosaz</b>	
Hmotnost [g]	1162,31	Hmotnost [g]	3306,29
Objem [mm <sup>3</sup> ]	428897,8	Objem [mm <sup>3</sup> ]	388974,97
Plošný obsah[mm <sup>2</sup> ]	228170,43	Plošný obsah[mm <sup>2</sup> ]	203932,86

Při porovnávání, mezi směrodatné faktory patří fyzikální vlastnosti, technologická náročnost výroby a cena. Velkou výhodou hliníku je jeho malá hmotnost. Je žádoucí, aby stroj měl co nejmenší hmotnost, a použití mosazi způsobí váhový přírůstek více než trojnásobný. Z hlediska technologické náročnosti výroby znamená použití hliníku snazší odlévání, protože hliník má nižší teplotu tání. Při výrobě se z důvodu zlepšení kvality odděluje tavení od části udržování roztaveného hliníku na lici teplotě. V praxi se tento způsob realizuje přeléváním tekutého hliníku do udržovacích pecí umístěných u jednotlivých licích strojů. Použití mosazi by znamenalo zvýšení udržovací teploty ze zhruba 660,32 °C na 850 °C. Hliník má na rozdíl od mosazi vyšší tepelnou a elektrickou vodivost. To znamená sice vyšší maximální výkon, ale zároveň i vyšší spouštěcí výkon a záběrný proud, který se správe snažíme zmenšit použitím mosazi. Rozhodujícím faktorem mnohdy bývá cena a ta je

v případě hliníkových klecí nižší než u mosazných. Nejdražší jsou klece měděné a právě od podílu mědi se odvíjí cena mosazných klecí. Při porovnání všech těchto faktorů se hliníková klec jeví jako výhodnější a je důležité předem důkladně rozhodnout, zda je zapotřebí použít mosaznou klec místo hliníkové. [4] [7]

### 3.4 Porovnání vlivu záměny klece na provozní vlastnosti stroje

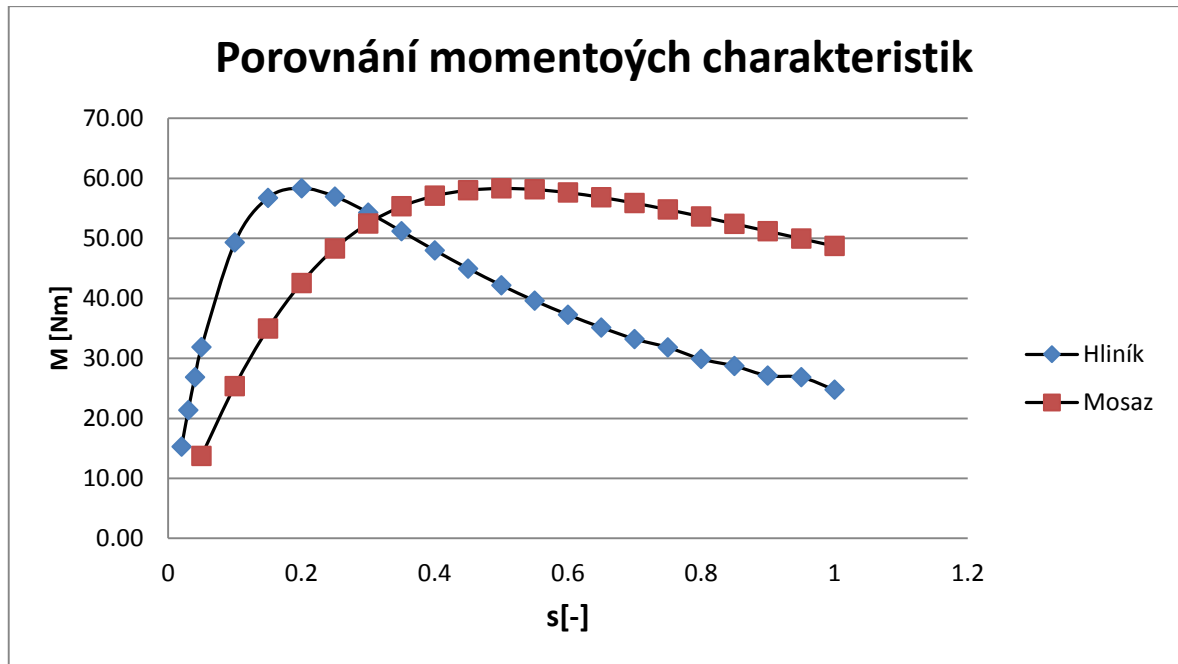
Po provedení všech měření a sestavení příslušných diagramů z naměřených hodnot bude stroj posuzován podle následujících kritérií. Prvním, nejdůležitějším kritériem je změna záběrného proudu, jeho snížení je podstatou celé náhrady. Dalším kritériem je posouzení změny jmenovitého skluzu, jelikož jednou z velkých nevýhod náhrady je zhoršení účinnosti při jmenovitém skluzu. Materiálová náhrada je také posuzována z průběhu momentové a výkonové charakteristiky, a tím i z hodnot momentové a výkonové přetížitelnosti. Při porovnávání průběhů momentových charakteristik je patrná změna strmosti poklesu momentu s velikostí skluzu u stroje s mosaznou klecí. Charakteristika stroje s mosaznou klecí je mnohem měkčí vzhledem ke vzrůstajícímu skluzu. Jedná se o jeden z důsledků zvětšení odporu. Maximální moment se nezmění. Momentová přímka v kružnicovém diagramu má stejný sklon pro stroj s hliníkovou i mosaznou kotvou.

#### Momentová přetížitelnost

Tab. 2.22 Momentová přetíženosť stroje

Hliník	1,90
Mosaz	1,76

Při náhradě mosaznou klecí dojde ke zvýšení jmenovitého skluzu. Důsledkem toho je pokles otáček. Jmenovité otáčky stroje s mosaznou kotvou při  $s_n = 0,135$  budou mít velikost  $n_n = 865$ . Tomu odpovídá nárůst jmenovitého momentu zhruba o 11 % na hodnotu  $M_n = 33,12$  Nm. Maximální moment je stejný z důvodu odečtu z totožné přímky.



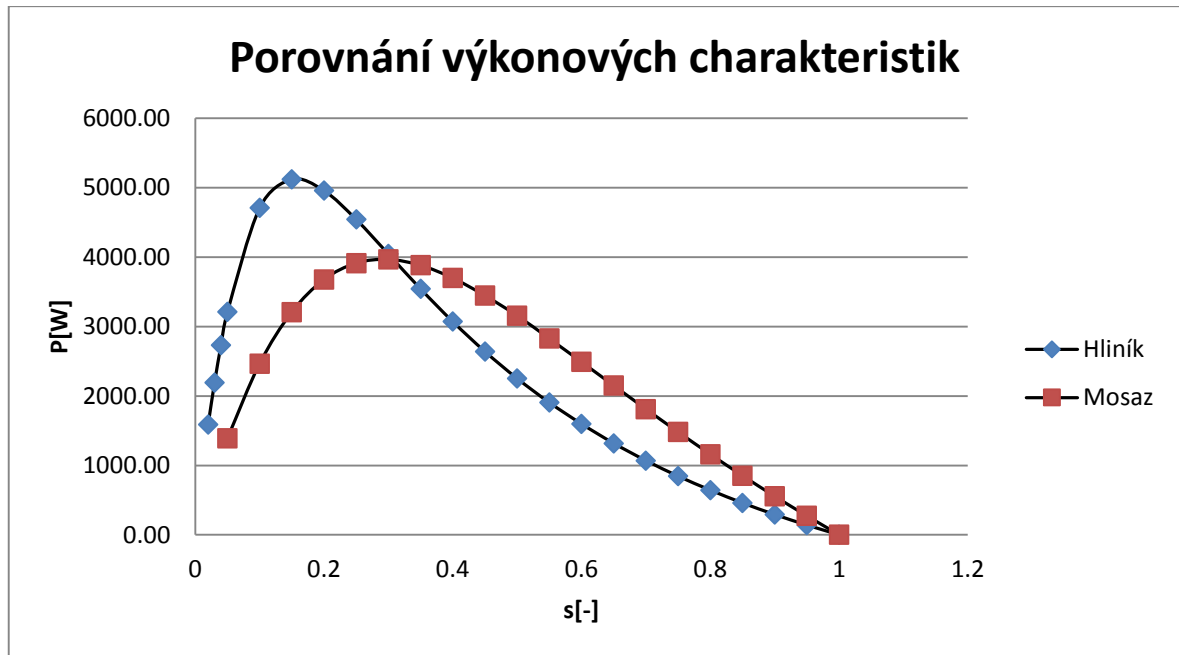
Obr. 2.17. – Porovnání momentových charakteristik

### Výkonová přetížitelnost

Tab. 2.23 Výkonová přetížitelnost stroje

Hliník	1,71
Mosaz	1,32

Zvětšením odporu při náhradě dojde také ke snížení proudu, a tím i k poklesu výkonu. Záměnou klece došlo ke snížení proudu  $I_{kn} = 24 \text{ A}$  na  $I_{kn} = 21,03 \text{ A}$ , a tím k poklesu spouštěcího výkonu o 12,4 %. Jmenovitý výkon se nezmění, zůstává 3 kW. Dojde ke snížení maximálního výkonu. Důsledkem snížení maximálního výkonu při stejném výkonu jmenovitém dojde i ke snížení výkonové přetížitelnosti u stroje s mosaznou kotvou, přibližně o 22,81 %. Při porovnávání strmosti charakteristik se charakteristika stroje s mosaznou klecí jeví opět měkčí se stoupajícím skluzem jako v případě momentové charakteristiky.

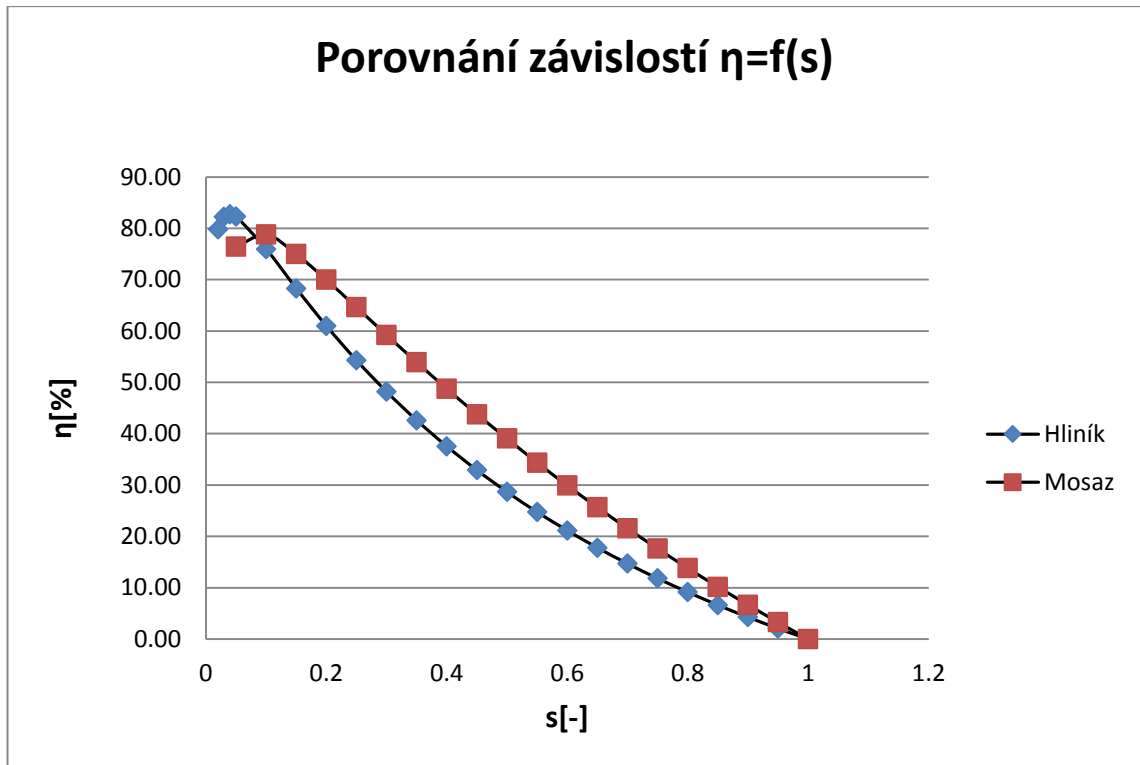


Obr. 2.18. – Porovnání výkonových charakteristik

Při náhradě materiálem s vyšším odporem dojde ke zvětšení ztrát, a tím se sníží účinnost stroje při jmenovitém skluzu. Stroj s hliníkovou klecí má při jmenovitém skluzu vyšší účinnost než stroj s klecí mosaznou, ale účinnost v závislosti na rostoucím skluzu klesá výrazněji, než je tomu v případě mosazné klece. Zásadní je ale účinnost v oblasti jmenovitého skluzu, protože v této oblasti je stroj provozován, protože s narůstajícím skluzem stoupají ztráty.

Vzhledem k použití odporové klece, jak je uvedeno v teoretickém rozboru, není snížení účinnosti při jmenovitém skluzu problém. Hlavním účelem náhrady je snížení záběrného proudu.

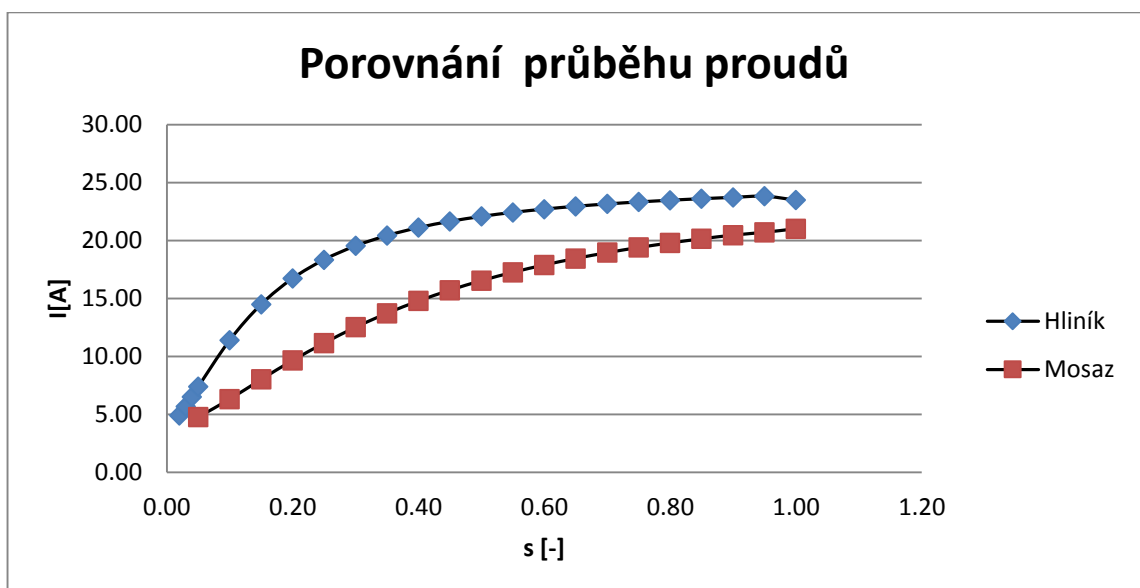




Obr. 2.19. – Porovnání účinností obou klecí při rostoucím skluzu

### Porovnání průběhů proudů

Vlivem vyššího odporu materiálu došlo ke snížení proudu v celém rozmezí od hodnoty skluzu  $s=0$  až do  $s=1$ . Zásadní se snížení proudu při rozběhu, kdy je skluz  $s=1$ . Snížení proudu v okolí jmenovitého skluzu je důvodem nižší účinnosti a výkonu.



## Závěr

Při posouzení všech kladů a záporů plynoucích z měření a analýzy stroje lze zaznamenat kladný vliv na vlastnosti stroje při spouštění. Zlepšení vlastností při rozběhu ovšem není tak výrazné. Pokud vezmeme v potaz i výkon stroje, procentní zlepšení spouštěcího výkonu je stanoveno na 12,4 %. V dnešní době je náhrada odporovou klecí stále využívanou metodou, o tom svědčí i skutečnost, že tyto stroje stále vyrábí firma Howden ČKD Compressors s.r.o. Problematikou zlepšení vlastností stroje materiálovou náhradou klece nakrátko se v dnešní době zabývá firma Siemens, která vyvíjí stroj s hliníkovou klecí nakrátko, do které jsou vsazeny části mědi. Dojde tím ke kombinaci výhod obou typů klecí. Problémem zůstává náročná výroba, konkrétně problematické lití klece. Při analýze stroje vznikla chyba  $\pm 2$  %, která se projevila zejména při určování jmenovitého skluzu. Chyba je způsobena nepřesnostmi při měření a volbou konstant při určování odporu rotorové klece. Tato chyba však nezkreslila výsledky natolik, aby nebylo možné posoudit vlastnosti při náhradě materiálu s dostatečnou přesností. Byly použity programy Solid Works pro model rotoru a tyčí, ProfiCAD pro kreslení schémat a AutoCAD pro kreslení kružnicového diagramu, speciálních klecí a charakteristik v teoretickém rozboru.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] BARTOŠ, Václav. *Elektrické stroje I, II*. Plzeň : Vysoká škola strojní a elektrotechnická, 1986
- [2] BARTOŠ, Václav, a kol. *Teorie a měření elektrických strojů*. Plzeň: Vysoká škola strojní a elektrotechnická, 1984.
- [3] BARTOŠ, Václav. *Teorie elektrických strojů*. Plzeň : Západočeská univerzita, 2009. ISBN 978-80-7043-59-0.
- [4] MRAVEC, Rudolf. *Elektrické stroje a přístroje*. Praha : SNTL, 1979. str. 432. Sv. I.
- [5] BARTOŠ, Václav, a kol. *Elektrické stroje*. Plzeň : Západočeská univerzita, 2006. ISBN 80-7043-444-9.
- [6] PETROV, G. N. *Elektrické stroje 2. II*. Praha : Academia, 1982. ISBN 21-055-80.
- [7] DESORT, František. *Elektrotechnologie*. Praha : SNTL, 1980.
- [8] CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů*. Praha : SNTL, 1958.
- [9] BARTOŠ, Václav, SKALA, Bohumil. *Měření na elektrických strojích*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. ISBN 80-7043-447-3.
- [10] HLUCHÝ, Miroslav, KOLOUCH, Jan. *Strojírenská technologie 1, 1.díl – Nauka o materiálu*. Praha : Scientia, 1996. str. 216. ISBN 80-7183-017-8.
- [11] VONDRÁŠEK, František. *Výkonová elektronika, Měniče s vlastní komutací a bez komutace*. Plzeň : Západočeská univerzita, 2003. Sv. III. ISBN 80-7082-980-X.