

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Kružnicový diagram asynchronního stroje s vinutou
kotvou**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin RADOŠ**
Osobní číslo: **E16N0023K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Kružnicový diagram asynchronního stroje s vinutou kotvou**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Popište postup konstrukce a způsob odečítání parametrů z kružnicového diagramu asynchronního stroje s vinutou kotvou.
2. Vytvořte skript pro vykreslení kružnicového diagramu a momentové charakteristiky na základě vstupních údajů. Těmi jsou proud a účinník naprázdno a nakrátko, převod a odpory vinutí.
3. Správné fungování skriptu ověřte měřením dvou strojů a konstrukcí kružnicového diagramu v libovolném CAD softwaru.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**

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

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jan Šobra

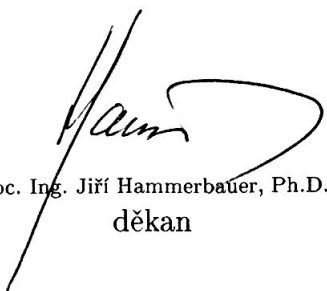
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

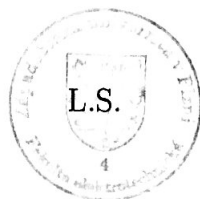
Datum zadání diplomové práce:


10. října 2017

Termín odevzdání diplomové práce:

24. května 2018


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




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

Anotace

Diplomová práce se zabývá náhradním schéma asynchronního motoru a následnému postupu při zjišťování jednotlivých parametrů a převodu schéma T – článku na Γ – článek. Následně zjišťuje postup při měření stroje naprázdno, nakrátko a při převodu stroje. Informace jsou poté použity při měření dvou strojů s vinutou kotvou. Další část se zabývá zjednodušenou konstrukcí kružnicového diagramu a konstrukcí pomocí kruhové inverze. Úkolem bylo vytvořit skript, který bude automaticky vykreslovat kružnicový diagram. V práci procházím nejdůležitější body programu. Nakonec je nutné ověřit spočítané veličiny vytvořením kružnicového diagramu v CAD softwaru a porovnat vypočítané a naměřené hodnoty.

Klíčová slova

Asynchronní motor s vinutou kovou, kružnicový diagram, kruhový diagram, kruhová inverze, parametry náhradního schéma, proud, skluz, moment, výkon, charakteristika, skript, Matlab, CAD

Abstract

The master thesis deals with parameters of induction motor and process of finding individual parameters, also transferring the T – scheme to the Γ – scheme. Then the thesis finds out the measuring procedure the induction motor in the state of short circuit, open circuit and machine conversion. The findings are then used for measuring of two wound rotor induction machines. The next part deals with simple construction of circular diagram and construction with circular inversion. The purpose of the thesis is to make a script, which will automatically draw a circle diagram. The thesis goes through the main parts of the program. Finally, the thesis verifies the results by making the circle diagram in CAD software and compares the measured values.

Key words

wound rotor induction motor, circular diagram, circular inversion, parameters of induction motor, current, slip, torque characteristic, power characteristic, script, Matlab, CAD

Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou 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 diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 22.5.2018

.....
Martin Radoš

Obsah

OBSAH	6
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	7
ÚVOD.....	9
1 KRUŽNICOVÝ DIAGRAM ASYNCHRONNÍHO STROJE	10
1.1 NÁHRADNÍ SCHÉMA ASYNCHRONNÍHO MOTORU	10
1.1.1 Převody z rotoru na stator pro $m_1 \neq m_2$	11
1.1.2 Náhradní schéma	11
1.1.3 Úprava náhradního schéma T – tvaru na Γ – tvar	13
1.1.4 Momentová charakteristika	14
1.2 MĚŘENÍ CHARAKTERISTIK ASYNCHRONNÍHO STROJE	15
1.2.1 Měření naprázdno.....	15
1.2.2 Měření odporů vinutí	16
1.2.3 Měření nakrátko.....	17
1.2.4 Převod stroje.....	18
2 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ ASYNCHRONNÍCH STROJŮ	20
2.1 MĚŘENÍ STROJE 1	21
2.2 MĚŘENÍ STROJE 2	24
3 KRUŽNICOVÝ DIAGRAM.....	28
3.1 ZJEDNODUŠENÁ KONSTRUKCE.....	28
3.1.1 Odečítání hodnot z kružnicového diagramu	32
3.2 KRUŽNICOVÝ DIAGRAM POMOCÍ KRUHOVÉ INVERZE	34
3.3 SKRIPT PRO VYTVOŘENÍ KRUŽNICOVÉHO DIAGRAMU	38
3.4 KRUŽNICOVÝ DIAGRAM POMOCÍ CAD SOFTWARE	47
3.5 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ.....	48
4 ZÁVĚR.....	52
5 LITERATURA.....	54
6 PŘÍLOHY	55

Seznam symbolů a zkratk

c_1	komplexní činitel
$\cos \phi$	účinník
f	frekvence
I	proud
I'_2	přepočtený proud rotorem
I_k	proud nakrátko
I_{kn}	proud nakrátko jmenovitý
k	převod
k_u	činitel převodu napětí
k_v	činitel vinutí
k_z	převod impedancí
k_{\sim}	součinitel zvýšení ztrát průchodem střídavého proudu
M	moment
m	počet fází
$m_{i,p,M}$	měřítko proudu, výkonu, momentu
n_s	synchronní otáčky stroje
N_s	počet závitů v sérii
P	mechanický výkon stroje
P_{δ}	výkon přenesený přes vzduchovou mezeru
Q_k	fázový jalový výkon
Q_0	fázový jalový výkon
Q_{μ}	jalový výkon magnetizační indukčnosti
Q_{σ}	úbytek jalového výkonu
r	poloměr
R_f	odpor jedné fáze
R_{Fe}	odpor modelující ztráty v železe
R_k	součet odporů vinutí
R_1	odpor statorového vinutí
R_2	odpor rotorového vinutí
R'_2	přepočtený odpor rotorového vinutí
s	skluz

S_0 zdánlivý výkon naprázdno
 U napětí
 U'_2 přepočtené napětí rotoru
 U_f fázové napětí
 U_i indukované napětí
 U_{kn} napětí nakrátko jmenovité
 $X'_{2\sigma}$ přepočtená rozptylová reaktance rotoru
 X reaktance
 $X_{1\sigma}$ rozptylová reaktance statoru
 $X_{2\sigma}$ rozptylová reaktance rotoru
 X_μ magnetizační reaktance
 X_σ rozptylová reaktance
 Z_{1h} impedance příčné větve
 Z_k impedance nakrátko

Řecká abeceda

ΔP_d ztráty přídavné
 ΔP_{Fe} ztráty v železe
 ΔP_{FeUk} ztráty v železe nakrátko
 ΔP_j Joulovy ztráty
 ΔP_m ztráty mechanické
 ΔU úbytek napětí
 Φ_h magnetický tok
 ω_1 úhlová rychlost
 ω_s synchronní úhlová rychlost

Obecné indexy

1 stator
 2 rotor
 k nakrátko
 0 naprázdno
 n jmenovitý
 max maximální

Úvod

Elektrické točivé stroje nejsou podle obecně známých vlastností nijak složitá zařízení. Základní podmínkou je vždy existence magnetického pole, které interaguje s druhým polem tvořeným průchodem proudu vinutím. V závislosti na způsobu a typu na sebe působících magnetických polí se stroje dělí na druhy: synchronní, asynchronní a stejnosměrné. Základní vlastnosti strojů se dají jednoduše přenést na základní konstrukci. Vinutím (nejčastěji třífázovým) prochází proud, který vyvolá požadované magnetické pole. Tím ale jednoduchost ve strojích končí. Dle požadavků zákazníka na velikost stroje, umístění stroje či možnosti chlazení stroje, se mění jejich velikost a délka, což pozměňuje vnitřní parametry stroje. Jednotlivé cívky jsou vždy jinak dlouhé, což má vliv na velikosti odporů a reaktancí vinutí. Dovolená vzdálenost mezi rotorem a statorem ovlivňuje vzniklé magnetické toky přenesené přes vzduchovou mezeru.

Při prvních návrzích stroje se proto nelze spoléhat jen na veličiny měřitelné zvenku. Prakticky není ani možné sledovat většinu v online režimu. Přesto je potřeba vědět, jak se budou jednotlivé veličiny uvnitř stroje měnit při různém zatížení. Zde k pomoci přichází kružnicový diagram stroje. Jedná se o grafické znázornění veličin uvnitř stroje, které jsou závislé na vnitřních parametrech. Jeho vytvořením lze tak relativně přesně odhadovat změny proudů přímo úměrné na změně zátěže.

Cílem této práce je seznámení se s různými variantami tvorby kružnicového diagramu, a to obnáší také rozbor vnitřních parametrů stroje. Následným měřením dvou reálných asynchronních strojů je potřeba ověřit získané teoretické znalosti. Součástí práce je také vytvoření skriptu pro výpočet kružnicového diagramu s vinutou kotvou na základě známých hodnot proudu nakrátko, $\cos \varphi$ nakrátko, proudu naprázdno, $\cos \varphi$ naprázdno a převodu stroje pro rychlé ověření aktuálního stavu stroje. Správnost skriptu bude ověřena vytvořením kružnicového diagramu v CAD softwaru.

1 Kružnicový diagram asynchronního stroje

Označením kružnicový diagram asynchronního stroje se značí křivka v komplexní rovině, která opisuje koncový bod fázoru primárního nebo sekundárního proudu při proměnném skluzu. [1] Na kružnici vede diagram jen u strojů s kotvou vinutou. Stroje s kotvou nakrátko tvoří pouze přibližnou kružnici. Stroje s kotvou vírovou, dvojitou (Boucherotovou), se kružnici nepodobají. Diagram pro ně platí pouze v lineární části momentové charakteristiky. Kružnicový diagram je důležitý u velkých strojů, které se nedají zatížit, nebo je vhodný pro porovnání parametrů různých strojů – účinník, přetížitelnost, záběrný moment a proud. [3] Vychází se z náhradního schéma stroje a výsledný tvar i konstrukce diagramu na něm závisí.

1.1 Náhradní schéma asynchronního motoru

Náhradní schéma asynchronního motoru je pomocné zobrazení vnitřních parametrů stroje. Při jeho tvorbě vycházíme z analogie mezi transformátorem nakrátko a asynchronním strojem. Hlavním odlišností je pohyblivá část u asynchronního stroje, která způsobuje následující rozdíly:

1. Kmitočty na statoru a rotoru jsou rozdílné. Lze je ale popsat rovnicí:

$$f_2 = s * f_1 \quad (1)$$

2. Počet fází statoru m_1 a rotoru je u strojů s klecovou kotvou obvykle rozdílný ($m_1 \neq m_2$). Stroje s vinutou kotvou mají $m_2 = 3$
3. U asynchronních strojů v každém případě existuje vzduchová mezera mezi státorem a rotorem, tzn. mezi primárem a sekundárem. To způsobuje zvětšení magnetického odporu na cestě hlavního magnetického toku a růst magnetizačního proudu. Z toho důvodu nezanedbáváme příčnou (magnetizační) větev náhradního schéma, jak to lze provést u transformátoru nakrátko.

Další odlišností, zapříčiněnou konstrukcí, je rozdílný převod oproti transformátoru. Točivé stroje mají převod $k \neq 1$. Přepočítávání veličiny z rotoru na stator je stejné, musíme však vzít v úvahu rozdílnost počtu fází statoru a rotoru. [1] V následujících podkapitolách zmíním pouze nejdůležitější rovnice, ze kterých se vychází, a poté konečnou podobu rovnic. V případě zájmu lze podrobný rozbor nalézt např. v literatuře [1].

1.1.1 Převody z rotoru na stator pro $m_1 \neq m_2$

Činitel převodu napětí je

$$k_u = \frac{U_{i1}}{U_{i20}} \quad (2)$$

Dosažením rovnic

$$U_{i1} = 4,44N_{s1}k_{v1}\Phi_h f_1 \quad (3)$$

$$U_{i20} = 4,44N_{s2}k_{v2}\Phi_h f_1$$

Získáme převodní činitel ve tvaru

$$k_u = \frac{N_{s1}k_{v1}}{N_{s2}k_{v2}} \quad (4)$$

kde k_{v1} je převodní činitel pro stator, k_{v2} pro rotor. Výsledná podoba vzorce pro převod má tvar:

$$k_z = \frac{m_1 N_{s1}^2 k_{v1}^2}{m_2 N_{s2}^2 k_{v2}^2} = \frac{m_1}{m_2} k_U^2 \quad (5)$$

1.1.2 Náhradní schéma

Základní rovnice pro asynchronní stroje vypadají:

$$\bar{U}_1 = (R_1 + jX_{1\sigma})\bar{I}_1 + \bar{U}_{i1} \quad (6)$$

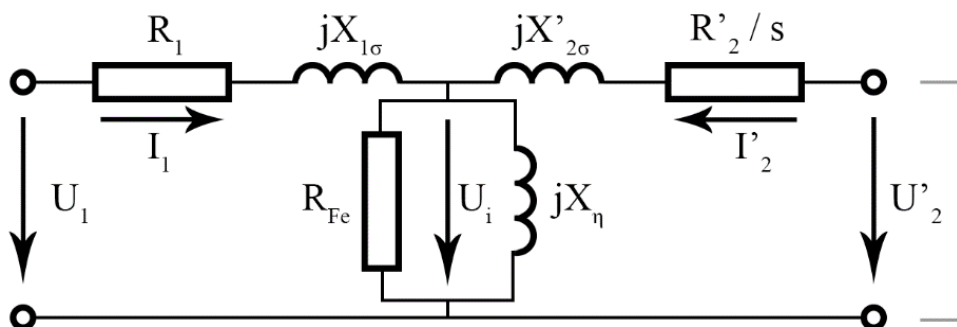
$$\bar{U}_2 = (R_2 + jsX_{2\sigma})\bar{I}_2 + \bar{U}_{i2}$$

Dalšími úpravami rovnice pro U_1 zůstává stejná, protože se jedná o stator, kde nedochází k mechanickému pohybu. Mění se rovnice pro rotor – U_2 , kde musíme aplikovat vliv skluzu.

Výsledné rovnice pro náhradní schéma T článku se napíší jako:

$$\bar{U}_1 = (R_1 + jX_{1\sigma})\bar{I}_1 + \bar{U}_{i1} \quad (7)$$

$$0 = \left(\frac{R'_2}{s} + jX'_{2\sigma} \right) \bar{I}'_2 + \bar{U}_{i1}$$



Obr. 1 T – typ náhradního schéma asynchronního stroje [Zpracováno dle 4]

V tomto modelu je zahrnutý mechanický výkon Joulových ztrát rotoru, které můžeme napsat:

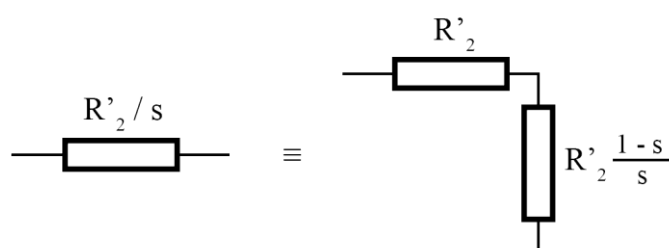
$$\Delta P_{j2} = m_2 R_2 I_2^2 = m_2 R'_2 I_2'^2 \quad (8)$$

Vyjádřením Joulových ztrát z náhradního schéma dostaneme výkon přenesený přes vzduchovou mezeru

$$P_\delta = m_1 U_{i1} I_2' \cos \varphi_2 = m_1 \frac{R'_2}{s} I_2'^2 \quad (9)$$

Po vyjádření Joulových ztrát dostaneme

$$P_\delta = m_2 R'_2 I_2'^2 + m_1 R'_2 \frac{1-s}{s} I_2'^2 = \Delta P_{j2} + P \quad (10)$$



Obr. 2. Rozdělení rotorového odporu [Zpracováno dle 4]

P je mechanický výkon stroje a rovná se

$$P = M\omega = m_1 R'_2 I_2'^2 \quad (11)$$

A výkon přenesený přes vzduchovou mezeru může být

$$P_\delta = M\omega_1 \quad (12)$$

Z rovnic T článku (7) lze určit proudy statoru, rotoru, velikost točivého momentu a další provozní charakteristiky. Tvar T je ovšem nevýhodný v případech, kde může být problém proměnný proud I_0 v příčné větvi. Z toho důvodu se často používá převedení na tvar Γ . [1,4]

1.1.3 Úprava náhradního schéma T – tvaru na Γ – tvar

Využijeme náhradního schéma tvaru T a sekundární stranu spojíme do krátka.

Dostaneme rovnici

$$\begin{aligned}\overline{U}_1 &= (R_1 + jX_{1\sigma} + \overline{Z}_{1h})\overline{I}_1 + \overline{Z}_{1h}\overline{I}'_2 \\ 0 &= \overline{Z}_{1h}\overline{I}_1 + \left(\frac{R'_2}{s} + jX_{2\sigma} + \overline{Z}_{1h}\right)\overline{I}'_2\end{aligned}\quad (13)$$

Důležité je v následujících úpravách zmínit zavedení komplexního činitele c_1 , který je potřebný právě kvůli převedení schéma T na schéma Γ . Statorový proud má rovnici:

$$\overline{I}_1 = \frac{\overline{U}_1}{\overline{Z}_1} - \frac{\overline{Z}_{1h}}{\overline{Z}_1}\overline{I}'_2\quad (14)$$

Sekundární proud I'_2

$$\overline{I}'_2 = \frac{-\overline{U}_1\overline{Z}_{1h}}{\overline{Z}_1\overline{Z}'_2 - \overline{Z}_{1h}^2}\quad (15)$$

Zavedením komplexního činitele

$$\overline{c}_1 = \frac{\overline{Z}_1}{\overline{Z}_{1h}} = \frac{\overline{Z}_{1h} + R_1 + jX_{1\sigma}}{\overline{Z}_{1h}} = 1 + \frac{R_1 + jX_{1\sigma}}{\overline{Z}_{1h}}\quad (16)$$

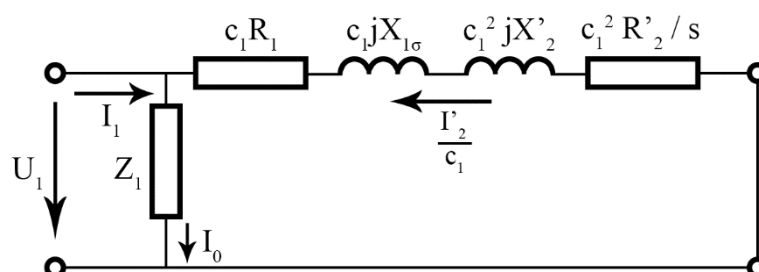
Následnými úpravami mají rovnice pro proud statoru tvar:

$$\overline{I}_1 = \frac{\overline{U}_1}{\overline{Z}_1} + \frac{\overline{U}_1}{\overline{c}_1(R_1 + jX_{1\sigma}) + \overline{c}_1^2\left(\frac{R'_2}{s} + jX'_{2\sigma}\right)}\quad (17)$$

Proud rotoru je

$$\frac{\overline{I}'_2}{\overline{c}_1} = \frac{-\overline{U}_1}{\overline{c}_1(R_1 + jX_{1\sigma}) + \overline{c}_1^2\left(\frac{R'_2}{s} + jX'_{2\sigma}\right)}\quad (18)$$

Tvary rovnic již platí pro náhradní schéma Γ tvaru (Obr. 3).



Obr. 3. Náhradní schéma asynchronního motoru ve tvaru Γ dvojbranu [Zpracováno dle 4]

Dochází ale k malým změnám parametrů. Sekundární proud má změněné měřítko a jiný fázový posuv. S činitelem c_1 se změnily i parametry náhradního schéma z důvodu. Z čeho

je komplexní činitel vyjádřen lze vidět v rovnici (16). Původně reálné odpory mají i imaginární složku a imaginární reaktance mají i složku reálnou.

1.1.4 Momentová charakteristika

Momentová charakteristika stroje je závislost momentu na zatížení. Nejčastěji se používá určení momentu jako funkce skluzu $M = M(s)$. Vycházíme z náhradního schématu z (Obr. 3) a dle vztahu (9) se napíše rovnice pro výkon přenesený přes vzduchovou mezeru.

Momentová rovnice má tvar:

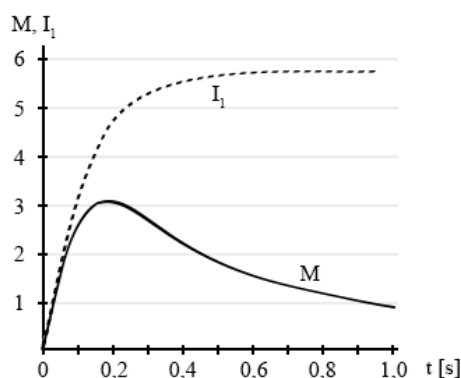
$$M(s) = \frac{pm_1 R'_2}{\omega_1 s} \frac{U_1^2}{\left(R_1 + c_1 \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_\sigma^2} \quad (19)$$

Úpravami této rovnice lze získat vztah pro výpočet maximálního momentu:

$$M_{max} = \pm \frac{pm_1}{2\omega_1 c_1} \frac{U_1^2}{R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_\sigma^2}} \quad (20)$$

Z této rovnice můžeme odvodit následující:

1. Moment stroje je závislý na U_1^2 – nevýhodné v případě poklesu napájecího napětí.
2. Charakteristika pro motor a generátor není zcela symetrická kvůli vlivu odporu R_l .
3. Vliv statorového odporu R_l na charakteristiku stroje klesá s rostoucím výkonem.



Obr.4 Moment a proud statoru (stroj 155kW) [Zpracováno dle 4]

Z obrázku Obr.4 lze vypočítat, že maximální moment je limitován velikostí rozptylové reaktance X_σ . Kvůli konstrukci nelze libovolně zmenšovat a ani to není žádoucí, protože to vede k nárůstu záběrného proudu. Maximální velikost záběrného proudu je přednější oproti záběrnému momentu.

1.2 Měření charakteristik asynchronního stroje

1.2.1 Měření naprázdno

Měřením se určuje proud naprázdno I_0 , ztráty, odpor modelující ztráty v železe R_{Fe} a mechanické ztráty. Během měření je stroj mechanicky odpojený od zátěže a hřídel se točí naprázdno. Měření se provádí v rozsahu $130 \div 30$ % napájecího napětí U_n . Je nutné ho provádět za konstantní otáčivé rychlosti stroje. Moment stroje je úměrný U^2 , proto dosáhne-li se malých napájecích napětí, může dojít až k zastavení stroje. Veškerý dostupný moment pokrývá mechanické ztráty stroje. Z toho důvodu se měří i otáčky stroje a při skluzu okolo 1 % se měření ukončuje. Měřicí přístroje zapojíme mezi říditelný napájecí zdroj a svorky asynchronního stroje (U, V, W). V případě měření naprázdno je důležitá symetrie napájecího zdroje, proto je dobré každou fázi obsadit shodnými měřicími přístroji.

Ze získaných hodnot se vynese charakteristika naprázdno. Jedná se o závislost indukovaného napětí na budícím proudu. Tím je proud odebíraný ze zdroje I_0 a obsahuje i činnou složku nutnou na krytí ztrát. Místo indukovaného napětí se často používá napětí svorkové. Charakteristika naprázdno lze pak popsat rovnicí

$$U = f(I_0) \quad (21)$$

Do téhož grafu se zanesou i účinník naprázdno. Naměřené ztráty jsou součtem Joulových ztrát, způsobených proudem naprázdno, ztrát v železe magnetického obvodu statoru a ztrát mechanických. Rovnici ztrát zapíšeme jako:

$$\Delta P_0 = \Delta P_{j0} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_m \quad (22)$$

Pro rotorové ztráty lze zanedbat magnetické – jsou velmi malé vzhledem k nízkému skluzu během měření. Zároveň jsou i Joulovy ztráty nulové, protože rotorové proudy jsou malé. Pro stroj s vinutým rotorem je možné měřit i rotorové proudy a poté dopočítat Joulovy ztráty, případně využít převodu stroje. Po výpočtu Joulových ztrát ΔP_{j0} se odečtou od ztrát naměřených ΔP_0 a dostaneme ztráty mechanické a v železe.

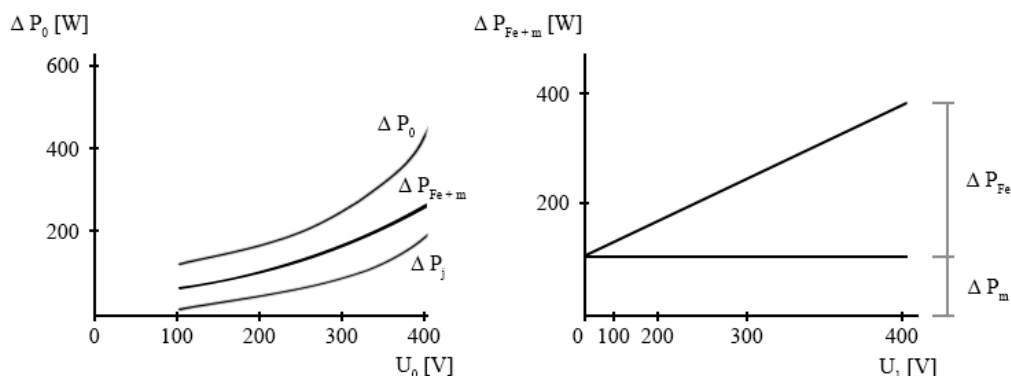
$$\Delta P_{j0} = 3R_1 I_{10}^2 \quad (23)$$

$$\Delta P_0 - \Delta P_{j0} = \Delta P_{Fe} + \Delta P_m \quad (24)$$

$$\Delta P_0 - 3R_1 I_{10}^2 = \Delta P_{Fe} + \Delta P_m \quad (25)$$

Ztráty mechanické a v železe se vynesou do grafu s kvadratickou stupnicí. V tom případě vznikne přímka. Pro malé hodnoty napětí a tedy i skluzu může dojít k malému prohnutí závislosti, ta se však neuvažuje. Extrapolací do nulové hodnoty napětí vznikne průsečík s osou ztrát. Tato hodnota odpovídá mechanickým ztrátám, které jsou při měření konstantní,

protože byla i konstantní otáčivá rychlost stroje. Lze tedy graf rozdělit na dvě části pro ztráty mechanické ΔP_m a ztráty v železe ΔP_{Fe} . [3,6]



Obr. 5 Průběh jednotlivých složek ztrát a určení ztrát mechanických. [Zpracováno dle 3]

1.2.2 Měření odporů vinutí

Měření odporů vinutí statoru je stejné jako v případě měření na transformátoru. Používá se Ohmova metoda pro měření malých odporů. Měření probíhá na svorkách stroje. Měříme na všech kombinacích UV , VW , UW . Kvůli zvyšující se teplotě vinutí se měří do 20 % I_n . Měření odporu probíhá na primární i sekundární straně a při dvou různých hodnotách proudu. Jelikož se napájí stejnosměrným napětím, je třeba kvůli indukčnosti počkat na ustálení proudu ve stroji a až poté měřit. Při spojení vinutí do hvězdy se tak změří odpor dvou vinutí spojených do série $R_1 = R_u + R_v$. Za předpokladu stejných odporů ve všech fázích primáru a sekundáru (statoru a rotoru) jde o dvounásobnou hodnotu. Odpor jedné fáze R_f je proto poloviční než naměřený odpor R_1 .

$$R_f = R_u = R_v = \frac{R_1}{2} \quad (26)$$

Jinak se použije

$$R_f = \frac{R_u + R_v + R_w}{3} \quad (27)$$

Odporů vinutého rotoru se měří přes kartáče a při odpojeném spouštěcím odporu. Kvůli vyloučení přechodového odporu na kluzném kontaktu, tedy na rozmezí kartáč – kroužek, se měří úbytky napětí přímo na kroužcích. Měří se také všechny kombinace uv , vw , uw a „sdružený“ odpor se určí pomocí jejich střední hodnoty. [3] Je-li to možné, doporučuje se měření odporů každé fáze zvlášť – $U0$, $V0$, $u0$ atd. [4]

1.2.3 Měření nakrátko

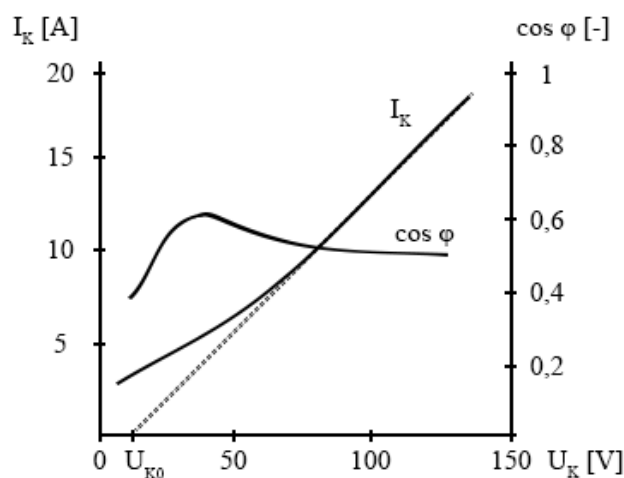
Měřením stroje určíme charakteristiku nakrátko, průběh ztrát nakrátko a účinník nakrátko. Na rozdíl od měření stroje naprázdno, musí být při měření nakrátko rotor stroje mechanicky zabrzděn. Stroj se nesmí ani při náhodném připojení na U_n rozběhnout. Vinutí statoru je během měření napájené střídavým napětím o jmenovitém kmitočtu. V prvním kroku se motor připojí na napětí rovné $15 \div 20 \% U_n$. Následuje rychlé zvýšení napětí na požadovanou hodnotu a změří se napětí, proud, příkon a moment. Odečítání hodnot by nemělo trvat déle než 10 sekund a poté se stroj ihned vypne. Pro další hodnoty se postup opakuje. Měření musí probíhat velmi rychle, aby došlo k co nejmenšímu ohřevu stroje, a tím k malému zkreslení hodnot. [6] Optimální je použití digitální techniky s přenosem do PC nebo alespoň funkcí HOLD. Odečet hodnot je pak velmi rychlý a bezchybný. [3]

Charakteristika nakrátko je závislost

$$I_k = f(U_k) \quad (28)$$

Ve stroji neexistuje hlavní tok a železo není syceno, proto by charakteristika měla být přímková. Ve skutečnosti se ale její průběh trochu liší. Způsobuje to sycení zubů statoru a hlav rotorových zubů rozptylovými toky ve stroji. Úplné nasycení zubů se projevuje jako zvětšení vzduchové mezery, a proto se derivace charakteristiky nakrátko neustále zvyšuje. Po nasycení je charakteristika již přímková. Z toho důvodu se musí použít vztahu pro výpočet proudu na krátko pro jmenovité napětí (lineární extrapolace)

$$I_{kn} = \frac{U_n - U_{k0}}{U_k - U_{k0}} I_k \quad (29)$$



Obr. 6 Charakteristika nakrátko a odečet napětí U_{k0} [Zpracováno dle 3]

Ztráty nakrátko tvoří ztráty Joulovy a přídavné

$$\Delta P_k = \Delta P_{jk} + \Delta P_d \quad (30)$$

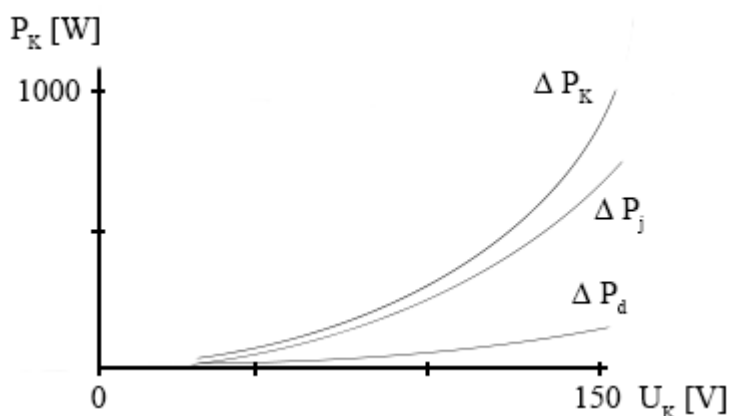
Ztráty v železe se zanedbají (kromě zubové vrstvy sycené rozptylovými toky). Joulovy ztráty se určí z odporů vinutí a převodu stroje k .

$$\Delta P_{jk} = \frac{3}{2} I_1^2 (R_1 + k^2 R_2) \quad (31)$$

Tento výraz určuje ztráty ve vinutí bez ohledu na jeho zapojení. Odečtením Joulových ztrát od celkových získáme ztráty přídavné

$$\Delta P_d = \Delta P_k - \Delta P_{jk} - \Delta P_{FeU_k} \quad (32)$$

kde ztráty ΔP_{FeU_k} jsou ztráty v zubové vrstvě a odpovídají napájecímu napětí U_k v chodu nakrátko, které jsem při následném měření zanedbal. [3]

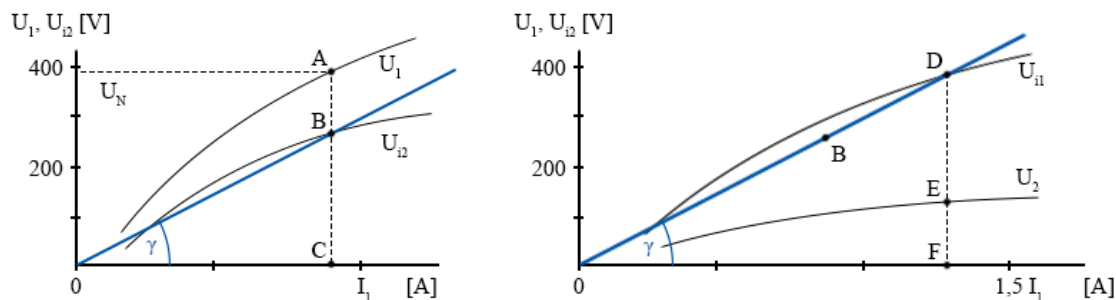


Obr. 7 Průběh ztrát nakrátko, Joulových a přídavných [Zpracováno dle 3]

1.2.4 Převod stroje

Převod stroje znamená poměr indukovaných napětí statoru a rotoru. Na statoru lze měřit jen svorkové napětí, které se může velmi lišit od indukovaného. Oproti transformátoru se musí na asynchronních stojích uvažovat úbytek na rozptylové reaktanci. Ta je kvůli vzduchové mezeře nezanedbatelná. Stejně tak je i hlavní reaktance X_h . Převod stroje se určuje pro jmenovité sycení – pro jmenovité napájecí napětí. Pro stroje kroužkové se měří převod následovně.

Při prvním měření se napájí stator a měří se indukované napětí rotoru. Poté je napájen rotor a měří se indukované napětí statoru. Je možnost, že se rotor začne pro vyšší hodnoty napětí otáčet, způsobují to ztráty v železe. Tento jev ale může způsobit pokles frekvence a pokles indukovaného napětí. Z toho důvodu musí být rotor zabrzděn.



Obr. 8 Průběh napětí a indukovaných napětí v závislosti na proudu [Zpracováno dle 3]

Napájením statoru pro jmenovité napětí se určí vnitřní indukované napětí rotoru (bod B). Směrnice přímky spojující počátek a bod B lze spočítat jako

$$\tan \gamma \approx \frac{U_{i2}}{I_1} = X_{12} \quad (33)$$

Protože platí, že vzájemná reaktance musí být stejná i při měření z opačné strany, lze provést tyto operace. Druhý graf se nakreslí ve stejném měřítku a zakreslí se přímka procházející počátkem. Mezi ní a proudovou osou je úhel γ . Průsečík s křivkou U_{i1} je značen bodem D. Zde je stejné nasycení jako při napájení ze strany statoru. Tak se získají indukovaná napětí příslušná pro stejné sycení. Převod stroje je

$$k = \frac{U_{i1}}{U_{i2}} = \frac{DF}{BC} \quad (34)$$

Koeficient celkového rozptylu σ se určí obecně vztahem

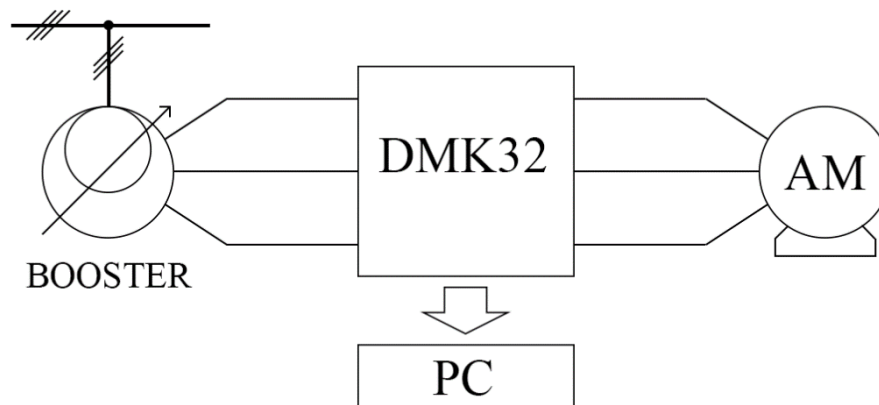
$$\sigma = 1 - \frac{X_{12}^2}{X_1 X_2} \quad (35)$$

Tato rovnice lze rozepsat jako

$$\sigma = 1 - \frac{X_{12}^2}{X_1 X_2} = 1 - \frac{(DF)(BC)}{(EF)(AC)} \quad (36)$$

2 Praktické měření asynchronních strojů

Úkolem diplomové práce je proměření dvou asynchronních motorů s vinutou kotvou nacházejících se na fakultě a následné určení kružnicového diagramu. Stroje mají vlastní kódové označení, ale pro lepší přehlednost je v práci nazývám jako Stroj 1, který se v době měření nacházel v laboratořích v prvním patře, a Stroj 2, který byl umístěn v laboratořích v přízemí. Stroje jsem měřil stejným způsobem dle schéma (Obr. 9). Oba byly napájeny přes laboratorní booster, na kterém se zvyšovalo napětí. Fáze byly připojeny přes digitální měřič DMK 32, který zobrazoval přesnější hodnoty pro jednotlivé fáze, navíc i hodnoty činného a jalového výkonu. Výhoda měřiče je možnost zapojení přes sběrnici do PC a automatické ukládání veličin do programu za předem definovaný časový úsek. Při měření tak odpadá nutnost ručního zaznamenávání a proměřování stroje tak může probíhat rychleji. Rychlost proměřování je důležitá, prochází-li vinutím motoru velký proud, který způsobuje nežádoucí ohřev vinutí, protože zkresluje naměřené výsledky. Zároveň je to i jednodušší pro kontrolu velikosti proudu ve vinutí, které nesmí překročit dovolené hodnoty. Dále bylo nutné dát pozor na převod měřicí transformátor proudu, který je zabudován v digitálním analyzátoru



Obr. 9 Schéma zapojení při měření asynchronních strojů.

sítě. Konstanta byla 6 a všechny zobrazované veličiny byly ve skutečnosti šestkrát vyšší. Při měření převodu stroje bylo nutné zajistit rotor proti otáčení. Poté jsem stroj napájel nejdříve na straně statoru a ručním multimetrem měřil napětí na rotoru. Stejně měření jsem provedl i pro napájení rotoru. Neprováděl jsem měření odporů vinutí, protože na strojích byly umístěny štítky s aktuálními hodnotami. Výsledné hodnoty jsem zpracoval do tabulek a grafů a dopočítal případné další potřebné hodnoty pro náhradní schéma asynchronního motoru.

2.1 Měření stroje 1

MEZ BRUMOV, ASYNCHRONNÍ MOTOR, 3f		
Typ	H112L04	
Číslo	114045	
S, f	4 kW, 50 Hz	
Otáčky	1390 ot/s	
Stator - Y	380 V	11 A
Rotor - Y	145 V	18 A

Tabulka 1 Šítkové hodnoty stroje 1 a odpory vinutí

Odpory vinutí

Stator – R ₁			
	Na 2 fáze	Na 1 fázi	Průměr na 1 fázi
R _{uv} = R _{vw} = R _{wz}	2,4 Ω	1,2 Ω	1,2 Ω

Tabulka 2 Odpory vinutí statoru

Rotor – R ₂			
	Na 2 fáze	Na 1 fázi	Průměr na 1 fázi
R _{xy}	0,5 Ω	0,25 Ω	0,293 Ω
R _{yz}	0,67 Ω	0,335 Ω	
R _{xz}	0,59 Ω	0,295 Ω	

Tabulka 3 Odpory vinutí rotoru

Určení převodu stroje

Nejprve se vynesou do grafu všechny naměřené hodnoty. Poté jsem našel hodnotu proudu pro jmenovité napětí při napájení statoru (bod A). Vytvořil jsem svislici a vznikl průsečík s průběhem U_{i2} (bod B). Vytvořením polopřímky z počátku bodem B se hledá průsečík s U_{i1} (bod D). Výsledné závislosti při napájení do rotoru je nutné proložit křivkou co nejpodobnější průběhu funkce, a poté prodloužit, aby bylo možné nalézt průsečík. V bodě D je stejné sycení jako při napájení ze strany statoru. Nyní lze určit převod stroje k nebo rozptyl σ .

Výpočet převodu stroje

Bod D: Hledám průsečík křivek $\rightarrow y_1 = y_2$

$$y_1 = 134 \ln(x) - 40,79$$

$$y_2 = 18,26x$$

$$134 \ln(x) - 40,79 = 18,26x$$

$$x = 19,59$$

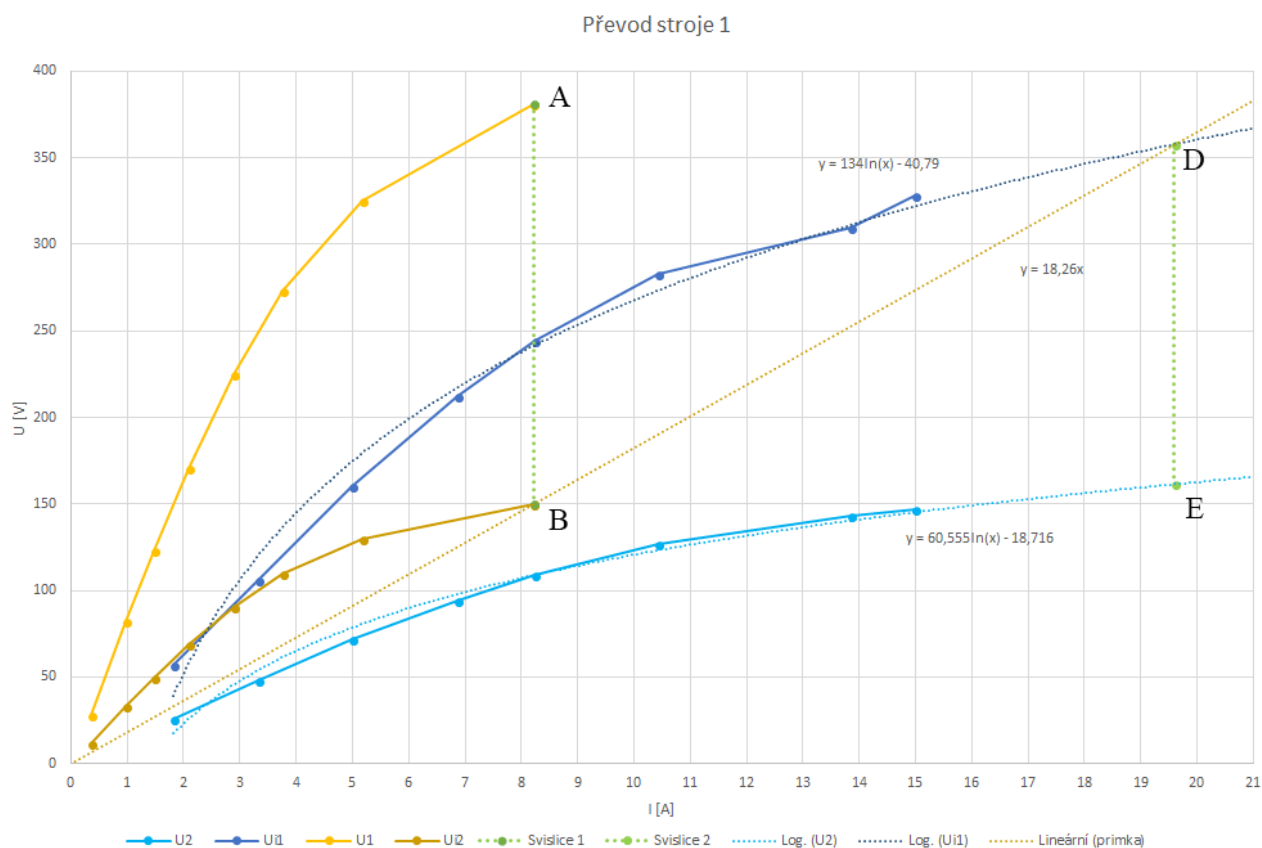
(37)

Dosadím vypočtené x do rovnice y_1

$$y_1 = 134 \ln(19,95) - 40,79 = 357,8 \text{ V} = U_{i1} \quad (38)$$

Převod stroje

$$k = \frac{U_{i1}}{U_{i2}} = \frac{357,8 \text{ V}}{150,1 \text{ V}} = 2,384 \quad (39)$$



Měření nakrátko

	U_k [V]	I_k [A]	P_k [W]	$\cos \varphi$
Naměřené	89,67	10,90	1122,00	0,6628
Dopočítáno pro I_n	90,49	11,0	1159,8	0,6628

Tabulka 4 Změřené a dopočtené jmenovité hodnoty z měření nakrátko stroje

$$U_{kn} = \frac{I_n}{I_k} U_k = \frac{11}{10,90} \cdot 89,67 = 90,49 \text{ V} \quad (40)$$

$$\cos \phi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3} U_{kn} I_k} = \frac{1159,8}{\sqrt{3} \cdot 90,49 \cdot 11} = 0,6628 \quad (41)$$

$$I_{kn} = \frac{U_n - U_{k0}}{U_k - U_{k0}} I_k = \frac{380 - 5,96}{90,49 - 5,96} \cdot 11 = 48,6737 \text{ A} \quad (42)$$

Měření naprázdno

	U_0 [V]	I_0 [A]	P_0 [W]	P_j [W]	dP_{fe+m} [W]	$\cos \varphi$
Naměřené	377,67	7,80	906,00	219,02	686,98	0,1776

Tabulka 5 Významné naměřené a dopočtené jmenovité hodnoty z měření naprázdno

$$\Delta P_j = \frac{3}{2} R_{uv_{2f}} I_0^2 = \frac{3}{2} \cdot 2,4 \cdot 7,8^2 = 219,024 \text{ W} \quad (43)$$

$$\Delta P_{Fe+m} = P_0 - P_j = 906,00 - 219,024 = 686,98 \text{ W} \quad (44)$$

Výpočty parametrů náhradního schéma motoru

$$Z_k = \frac{U_{kn}}{I_k} = \frac{90,49}{11} = 4,706 \ \Omega \quad (45)$$

$$Q_k = \sqrt{S_k^2 - \Delta P_k^2} = \sqrt{\left(\frac{90,49}{\sqrt{3}} \cdot 11\right)^2 - 374,00^2} = 425,207 \text{ VAR} \quad (46)$$

$$\sin(\varphi) = \frac{Q_k}{S_k} = \frac{425,207}{\frac{90,49}{\sqrt{3}} \cdot 11} = 0,740 \quad (47)$$

$$X_\sigma = Z_k \cdot \sin(\varphi) = 4,706 \cdot 0,740 = 3,514 \ \Omega \quad (48)$$

$$X_{1\sigma} = \frac{R_1}{R_1 + R_2 k^2} \cdot X_\sigma = \frac{1,2}{1,2 + 0,293 \cdot 2,384^2} \cdot 3,514 = 1,471 \ \Omega \quad (49)$$

$$X'_{2\sigma} = \frac{R_2 k^2}{R_1 + R_2 k^2} \cdot X_\sigma = \frac{0,293 \cdot 2,384^2}{1,2 + 0,293 \cdot 2,384^2} \cdot 3,514 = 2,043 \ \Omega \quad (50)$$

$$R_k = \sqrt{Z_k^2 - X_\sigma^2} = \sqrt{4,706^2 + 3,514^2} = 3,195 \ \Omega \quad (51)$$

$$k_\sim = \frac{R_k}{R_1 + R_2'} = \frac{3,195}{1,2 + 1,667} = 1,114 \quad (52)$$

$$\begin{aligned} \Delta u &= \sqrt{(R_1 \cdot I_0)^2 + (X_{1\sigma} \cdot I_0)^2} = \sqrt{(1,2 \cdot 7,8)^2 + (1,471 \cdot 7,8)^2} \\ &= 14,805 \text{ V} \end{aligned} \quad (53)$$

$$U_i = U_f - \Delta u = \frac{380}{\sqrt{3}} - 14,805 = 204,588 \text{ V} \quad (54)$$

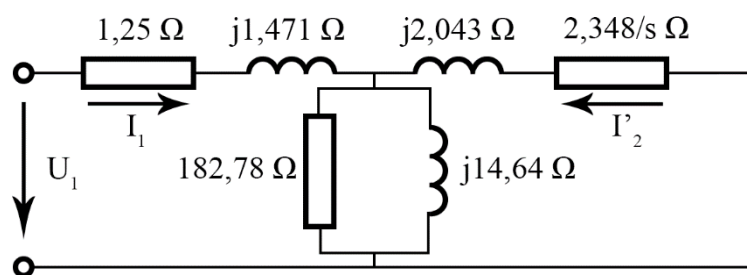
$$R_{Fe} = \frac{3 \cdot U_i^2}{\frac{\Delta P_{Fe+m}}{3}} = \frac{3 \cdot 204,588^2}{\frac{228,99}{3}} = 182,78 \Omega \quad (55)$$

$$Q_0 = \sqrt{S_0^2 - \left(\frac{\Delta P_0}{3}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{380}{\sqrt{3}} \cdot 7,8\right)^2 - 302^2} = 2948,575 \text{ VAr} \quad (56)$$

$$Q_\sigma = X_{1\sigma} \cdot I_0^2 = 1,471 \cdot 7,8^2 = 87,475 \text{ VAr} \quad (57)$$

$$Q_\mu = Q_0 - Q_\sigma = 2948,575 - 89,475 = 2859,100 \text{ VAr} \quad (58)$$

$$X_\mu = \frac{U_i^2}{Q_\mu} = \frac{204,588^2}{2860,591} = 14,640 \Omega \quad (59)$$



Obr. 10 Ukázka náhradního schéma T-článku stroje 1 doplněné o dopočítané hodnoty

2.2 Měření stroje 2

MEZ BRUMOV, ASYNCHRONNÍ MOTOR, 3f		
Typ	H112L06	
Číslo	123950	
S, f	3 kW, 50 Hz	
Otáčky	910 ot/s	
Stator - Y	380 V	10,5 A
Rotor - Y	120 V	18 A

Tabulka 6 Šítkové hodnoty stroje 1 a odpory vinutí

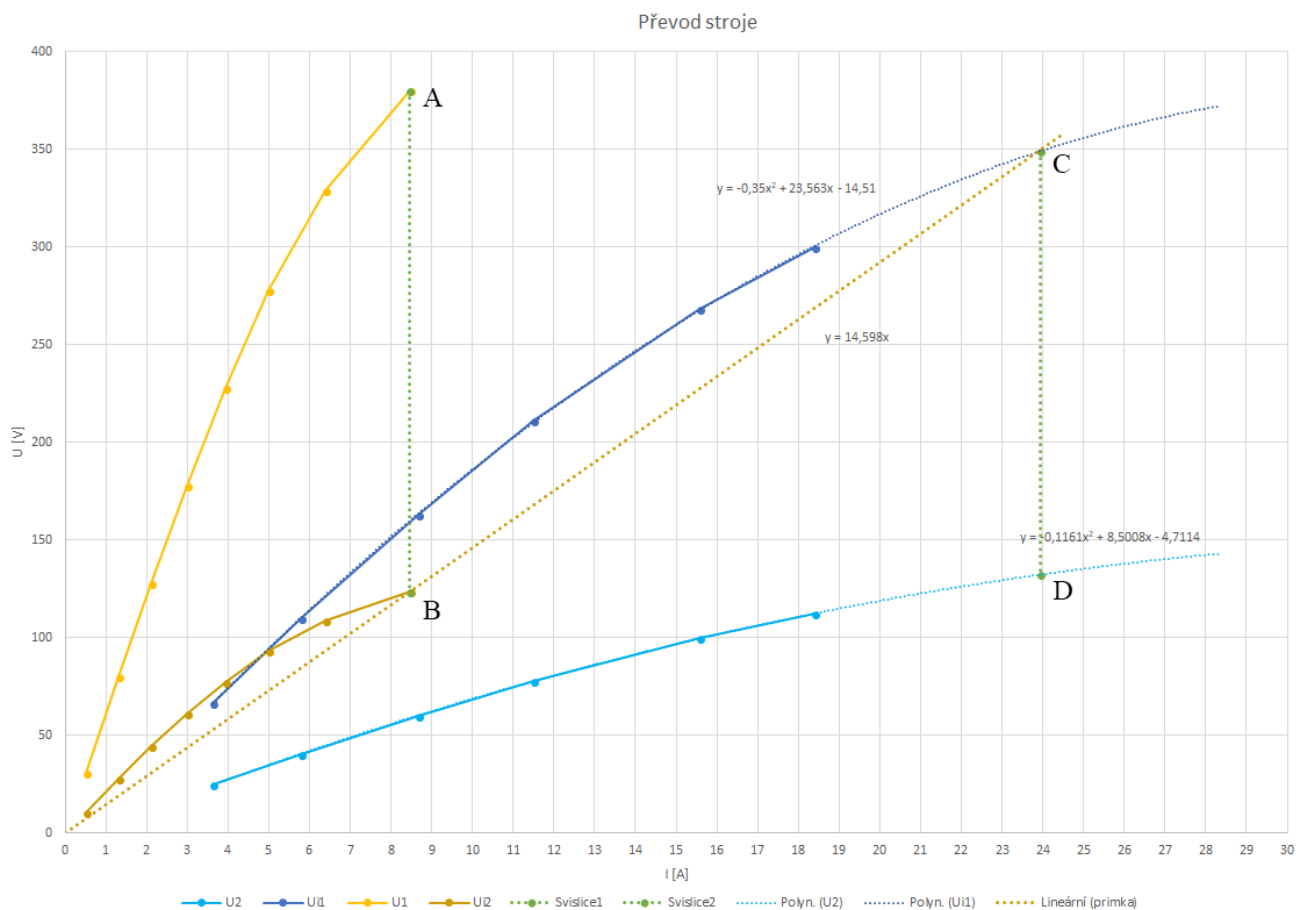
Odpory vinutí

Stator – R ₁			
	Na 2 fáze	Na 1 fázi	Průměr na 1 fázi
R _{uv} = R _{vw} = R _{wz}	3,25 Ω	1,625 Ω	1,625 Ω

Tabulka 7 Odpory vinutí statoru

Rotor – R ₂			
	Na 2 fáze	Na 1 fázi	Průměr na 1 fázi
R _{xy} = R _{yz} = R _{xz}	0,51 Ω	0,255 Ω	0,255 Ω

Tabulka 8 Odpory vinutí rotoru



Graf 2 Určení převodu stroje 2 z naměřených hodnot

Výpočet převodu stroje

Bod D: Hledám průsečík křivek $\rightarrow y_1 = y_2$

$$x = 23,95 \quad (60)$$

Dosadím vypočtené x do rovnice y_1

$$U_{i1} = 349,06 \text{ V} \quad (61)$$

Převod stroje

$$k = \frac{U_{i1}}{U_{i2}} = \frac{349,06 \text{ V}}{132,28 \text{ V}} = 2,826 \quad (62)$$

Měření nakrátko

	U_k [V]	I_k [A]	P_k	$\cos(\phi_i)$
Naměřené	116,00	10,28	1362,00	0,6594
Dopočítáno pro I_n	118,48	10,50	1415,08	0,6594

Tabulka 9 Naměřené a dopočítané jmenovité hodnoty z měření nakrátko stroje 2

$$U_{kn} = \frac{I_n}{I_k} U_k = \frac{10,5}{10,28} \cdot 116,00 = 118,48 \text{ V} \quad (63)$$

$$\cos \phi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3} U_{kn} I_k} = \frac{1362}{\sqrt{3} \cdot 118,48 \cdot 10,5} = 0,6594 \quad (64)$$

$$I_{kn} = \frac{U_n - U_{k0}}{U_k - U_{k0}} I_k = \frac{380 - 0,50}{118,48 - 0,50} \cdot 10,5 = 33,7744 \text{ A} \quad (65)$$

Měření naprázdno

U_0 [V]	I_0 [A]	P_0 [W]	P_j [W]	dP_{fe+m} [W]	$\cos \varphi$
379,00	1,36	882,00	340,71	541,29	0,1607

Tabulka 10 Významné naměřené a dopočtené jmenovité hodnoty z měření naprázdno stroje 2

$$\Delta P_j = \frac{3}{2} R_{uv,2f} I_0^2 = \frac{3}{2} \cdot 3,25 \cdot 7,8^2 = 219,024 \text{ W} \quad (66)$$

$$\Delta P_{Fe+m} = P_0 - P_j = 906,00 - 219,024 = 686,98 \text{ W} \quad (67)$$

Výpočty parametrů náhradního schéma motoru

$$Z_k = \frac{U_{kn}}{I_k} = \frac{118,48}{10,5} = 6,515 \Omega \quad (68)$$

$$Q_k = \sqrt{S_k^2 - \Delta P_k^2} = \sqrt{\left(\frac{118,48}{\sqrt{3}} \cdot 10,5\right)^2 - 471,695^2} = 541,668 \text{ VAr} \quad (69)$$

$$\sin(\varphi) = \frac{Q_k}{S_k} = \frac{541,668}{\frac{118,48}{\sqrt{3}} \cdot 10,5} = 0,754 \quad (70)$$

$$X_\sigma = Z_k \cdot \sin(\varphi) = 6,515 \cdot 0,754 = 4,193 \Omega \quad (71)$$

$$X_{1\sigma} = \frac{R_1}{R_1 + R_2 k^2} \cdot X_\sigma = \frac{1,625}{1,625 + 0,255 \cdot 2,826^2} \cdot 3,456 = 2,180 \Omega \quad (72)$$

$$X'_{2\sigma} = \frac{R_2 k^2}{R_1 + R_2 k^2} \cdot X_\sigma = \frac{0,255 \cdot 2,826^2}{1,625 + 0,255 \cdot 2,826^2} \cdot 3,456 = 2,733 \Omega \quad (73)$$

$$R_k = \sqrt{Z_k^2 - X_\sigma^2} = \sqrt{6,515^2 + 4,193^2} = 4,278 \Omega \quad (74)$$

$$k_\sim = \frac{R_k}{R_1 + R_2'} = \frac{4,278}{1,625 + 2,037} = 1,168 \quad (75)$$

$$\Delta u = \sqrt{(R_1 \cdot I_0)^2 + (X_{1\sigma} \cdot I_0)^2} = \sqrt{(1,625 \cdot 8,36)^2 + (2,18 \cdot 8,36)^2} = 22,732 \text{ V} \quad (76)$$

$$U_i = U_f - \Delta u = \frac{380}{\sqrt{3}} - 22,732 = 196,661 \text{ V} \quad (77)$$

$$R_{Fe} = \frac{3 \cdot U_i^2}{\frac{\Delta P_{Fe+m}}{3}} = \frac{3 \cdot 196,661^2}{\frac{180,43}{3}} = 214,354 \Omega \quad (78)$$

$$Q_0 = \sqrt{S_0^2 - \left(\frac{\Delta P_0}{3}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{380}{\sqrt{3}} \cdot 8,36\right)^2 - 294^2} = 3163,166 \text{ VAr} \quad (79)$$

$$Q_\sigma = X_{1\sigma} \cdot I_0^2 = 2,180 \cdot 8,36^2 = 152,366 \text{ VAr} \quad (80)$$

$$Q_\mu = Q_0 - Q_\sigma = 2948,578 - 152,366 = 3010,800 \text{ VAr} \quad (81)$$

$$X_\mu = \frac{U_i^2}{Q_\mu} = \frac{196,661^2}{3010,800} = 12,846 \Omega \quad (82)$$

Hodnoty strojů použité pro výpočet ve skriptu

	stroj 1	stroj 2
l_{kn}	48,6737	33,7744
$\cos \phi_k$	0,662788	0,65942
l_0	7,8	8,36
$\cos \phi_0$	0,177568	0,16072
k	2,38416	2,82642
R_1	1,2	1,625
R_2	0,29333	0,255
U_n	380	380
n_s	1500	1000
n_r	1390	910

Tabulka 11 Hodnoty strojů použité pro výpočet ve skriptu a vykreslení v AutoCADu

3 Kružnicový diagram

3.1 Zjednodušená konstrukce

Nejjednodušším způsobem vytváření kružnicového diagramu je postupné vynášení úseček a hledání specifických průsečíků pomocných přímk. Kružnicový diagram je vytvářen pro konstantní hodnoty napětí U_n , impedancí X_μ , X_k a odpory R_l a R_2 . V reálných podmínkách jsou však tyto veličiny během zatěžování funkcí proudu, napětí a skluzu.

$$X_\mu, X_k, R_1, R_2 = f(U_1, I_1, s) \quad (83)$$

Pro vytvoření kružnicového diagramu asynchronního stroje potřebujeme znát tyto hodnoty

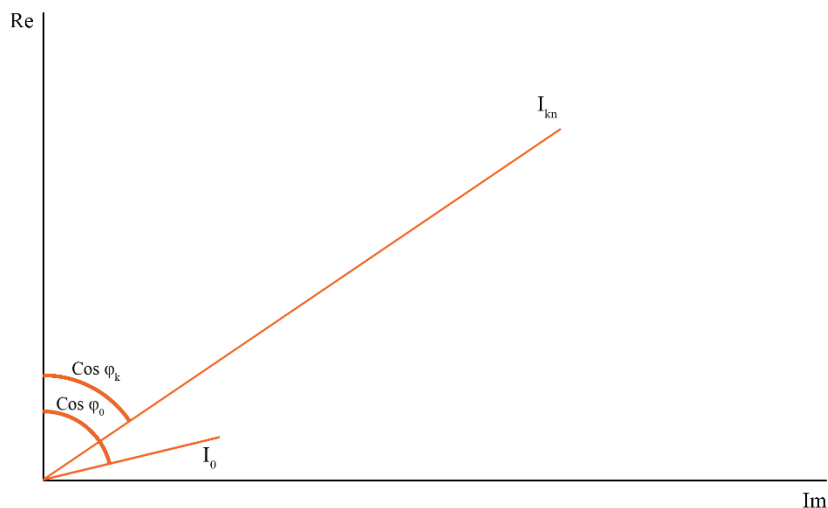
- Proud naprázdno I_0 a účinník naprázdno $\cos\varphi_0$ při jmenovitém napětí U_n
- Proud nakrátko I_k a účinník nakrátko $\cos\varphi_k$. Při měření ale nemůžeme získat maximální hodnotu I_k , protože měříme při sníženém napětí. Proto jej dopočteme na hodnotu I_{kn} . Účinník předpokládáme konstantní i pro hodnotu proudu při jmenovitém napětí.

$$I_{kn} = \frac{U_n}{U_k I_k} \quad (84)$$

- Odpory R_l statorového a R_2 rotorového vinutí
- Převod stroje k

Nyní již samotný postup konstrukce:

- 1) Při vytváření na papír je nutné si zvolit vhodné měřítko proudu m_I [A/mm]
- 2) Určíme osy – pro nejznámější zobrazení značí osa X imaginární složky, osa Y je velikost reálných složek. [3] Vůči imaginární ose poté odečítáme příkony stroje a tuto osu také nazýváme jako osu příkonů PP. [5]
- 3) Zakreslíme známé fázory proudů I_0 a I_{kn} svírající úhly φ_0 a φ_k s reálnou osou.



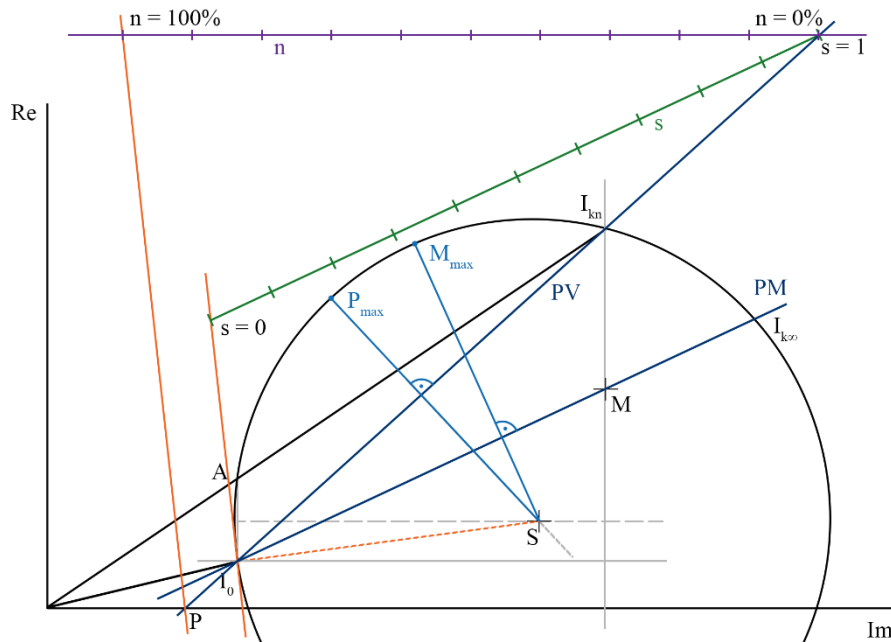
Obr. 11 Zakreslení proudu nakrátko a naprázdno [Zpracováno dle 5]

- 4) Nyní je potřeba vyhledat střed kružnice. Nejjednodušším způsobem je nalézt jej přibližně. Vytvoříme úsečku, jejíž krajní body jsou hodnoty I_0 a I_{kn} a vyrobíme kolmici v ose této úsečky. Poté vytvoříme rovnoběžku s reálnou osou, která prochází bodem I_0 a tvoří průsečík s fázorem I_{kn} – vznikne bod A a zároveň úsečka $|I_0, A|$. V ose nově vzniklé úsečky opět vytvoříme kolmici. V průsečíku obou os vznikne bod S , který je středem pro kružnici.

Teoreticky přesnější je ale postup s vytvořením pomocné polopřímky, která vychází z bodu O a svírá úhel ξ s imaginární osou. Tato přímka a osa úsečky $|I_0, I_{kn}|$ vytvoří také bod S . Pro úhel ξ platí rovnice:

$$\tan \xi = \frac{2R_1}{(1+\sigma)X_1} = \frac{2 \tan \alpha}{1+\sigma}, X_1 = \frac{R_1}{\tan \alpha}, \alpha = \frac{\pi}{2} - \varphi_0 \quad (85)$$

Nicméně vzhledem k vlastnostem vstupních parametrů nemusí použití těchto vztahů vést ke zlepšení přesnosti polohy středu kružnice.



Obr. 15. Sestrojení přímky skluzu a přímky účinnosti [Zpracováno dle 5]

V této fázi je kružnicový diagram hotov a obsahuje všechny potřebné křivky pro následující odečítání hodnot. V případě kreslení diagramu na papír je potřeba určení stupnic jednotlivých složek. Např. přímka výkonu ohraničena I_0 a I_{kn} a mezi nimi je lineárně rozložený celý výkon stroje. Měřitko výkonu lze tedy pak spočítat jako

$$m_p = \sqrt{3}U_s m_I \quad (87)$$

Měřitko momentu poté vypočítáme rovnicí

$$m_M = \frac{m_p}{2\pi \frac{n_s}{60}} \quad (88)$$

Kde n_s jsou synchronní otáčky stroje. Jmenovatel tohoto výrazu je synchronní úhlová rychlost stroje ω_s . [1,4]

$$\omega_s = \frac{\pi * n_s}{30} \quad (89)$$

3.1.1 Odečítání hodnot z kružnicového diagramu

Odečítání proudů

Sestrojením diagramu se získají základní křivky pro možné odečítání veličin. Můžeme do grafu zanést zjišťovaný stav stroje. Např. skluz o hodnotě $s = 0,4$. Vytvořením spojnice počátku a s bodem přímky skluzu pro 0,4 vznikne průsečík s kružnicí označen jako $I_{0,4}$.

Vzdálenost od počátku do průsečíku odpovídá statorovému proudu I_1 pro daný skluz. $\cos \varphi$ je pak úhel mezi reálnou osou a statorovým proudem.

Spojením průsečíku a I_0 se získá proud rotorem I_2 . Tento proud je ale fázově pootočen a hlavně má i jiné měřítko než proud I_1 . Je potřeba brát v úvahu komplexní činitel. Výsledný proud má tedy hodnotu $\frac{I'_2}{c_1}$. [1]

Odečítání výkonů a ztrát

Obecně se používá způsob, kdy se vytvoří rovnoběžka s reálnou osou, která prochází bodem $I_{0,4}$, dojde k protnutí přímky výkonu (bod F), přímky momentu (bod E), přímky příkonu (bod D) a imaginární osy (bod C). Další možností je vytvoření kolmice na polopřímku z bodu I_0 procházející středem kružnice. Průsečíky s jednotlivými křivkami se označí stejně. Výsledky mezi těmito způsoby jsou minimální a jsou úměrné. Druhý postup jsem zvolil při vytváření mého skriptu, jelikož docházelo k přesnějším výsledkům pro hodnoty malých skluzů. Pomocí těchto vytvořených bodů lze dopočítat jednotlivé veličiny.

- Příkon lze vypočítat úsečkou $|I_{0,4}C| \cdot m_p$
- Moment se spočítá jako $|I_{0,4}E| \cdot m_m$
- Výkon přenesený přes vzduchovou mezeru je $P_\delta = |I_{0,4}E| \cdot m_p$
- Výkon stroje je dán jako $|I_{0,4}F| \cdot m_p$
- Ztráty naprázdno jsou $|CD| \cdot m_p$
- Joulovy ztráty statoru se vypočtou pomocí $|DE| \cdot m_p$
- Joulovy ztráty rotoru jsou $|EF| \cdot m_p$

Odečítání účinnosti stroje

Prodloužením fázoru proudu pro skluz 0,4 až do průsečíku s přímkou účinnosti vzniká bod, který určí aktuální účinnost stroje. Účinnost se poté vypočítá přímo poměrem délky úsečky od počátku do průsečíku ku celkové délce úsečky účinnosti.

\bar{w} . Kružnice, která prochází bodem $\bar{z} = 0$ je zobrazena jako přímka roviny \bar{w} a opačně – přímka roviny \bar{z} neprocházející počátkem se zobrazí jako kružnice roviny \bar{w} , která prochází bodem $\bar{w} = 0$. Rovnice (90) lze částečným dělením přepsat na tvar:

$$\bar{w} = \frac{\bar{a}}{\bar{c}} + \frac{\bar{b}\bar{c} - \bar{a}\bar{d}}{\bar{c}(\bar{c}\bar{z} + \bar{d})} = \bar{e} + \frac{\bar{f}}{\bar{c}\bar{z} + \bar{d}} \quad (92)$$

Tuto rovnici můžeme přepsat jako

$$\bar{w} = \bar{e} - \frac{\bar{f}}{\xi(\bar{z})} \quad (93)$$

Tím se inverzní zobrazení redukuje na konstantní posuv \bar{e} a inverzní vztah. Druhá část rovnice (92) je kružnicí procházející počátkem, je obrazem přímky, která neprochází počátkem. V případě, že bude U_1 konstantní a skluz s proměnný, můžeme vyjádřit fázor proudu I_1 jako součet dvou fázorů.

$$I_1 = I_{1(0)} + I_2 \quad (94)$$

Pro stálý skluz lze napsat rovnici

$$I_{1(0)} = \frac{U_1}{Z_1 + Z_0} \quad (95)$$

a pro proměnný závislý na skluzu s

$$-\frac{I'_2}{c_1} = I''_2 = \frac{U_1}{c_1^2 Z'_{2k} + c_1^2 R'_2 \frac{1-s}{s}} \quad (96)$$

Lze vyčíst formální shoda se vztahem (93). Tvořená kružnice sekundárních proudů I'_2/c_1 prochází skrz počátek a tím se určování diagramu redukuje na inverzní vztah. Platí rovnice

$$-\frac{I'_2}{c_1} = I''_2 = \frac{U_1}{Z(s)} \quad (97)$$

A máme-li $Z(s)$ jako impedanci, která je funkcí skluzu, pak lze admitanci zapsat

$$\bar{Y}(s) = \frac{1}{\bar{Z}(s)} \quad (98)$$

Ve skutečnosti je inverze geometrická závislost mezi třemi body na jedné přímce, ze kterých se jeden označí jako 0 a je považován za střed inverze. Pak platí rovnice

$$\overline{0A_1} \cdot \overline{0A_2} = \rho^2 \rightarrow \overline{0A_1} = \frac{\rho^2}{\overline{0A_2}} \quad (99)$$

Upravením vztahu na komplexní rovinu lze ke každé křivce najít inverzní. V komplexní rovině netvoří impedance $\bar{Z}(s)$ přímku, která prochází počátkem, a lze na ni zjistit konstrukci inverze. Pro jeden bod $\bar{Z}(s)$ můžeme napsat

$$\bar{Z}(s_1) = \bar{Z}_1 = |\bar{Z}_1|e^{j\varphi_1}, \bar{Y}(s_1) = \bar{Y}_1 = |\bar{Y}_1|e^{j\varphi_2} \quad (100)$$

Inverzní vztah je pak reálné číslo

$$\bar{Z}_1 \cdot \bar{Y}_1 = \rho^2 \quad (101)$$

A proto musí platit:

$$Y_1 Z_1 e^{j\varphi_1} e^{j\varphi_2} = Y_1 Z_1 e^{j(\varphi_1 + \varphi_2)} = \rho^2 \quad (102)$$

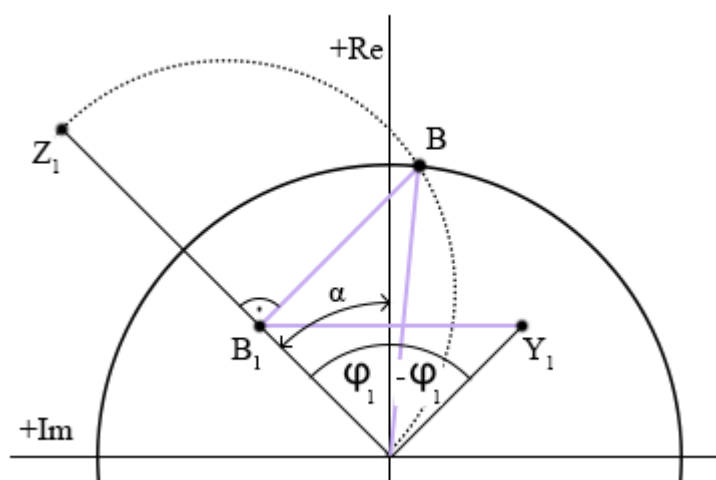
Kvůli reálnosti součinu v rovnici (101) musí platit $\varphi_1 = -\varphi_2$ a inverze pro reální čísla $Z_1 \cdot Y_1 = \rho^2$. Konstrukce inverzního bod k Y_1 a Z_1 vychází z podobnosti trojúhelníku tvořeného body 0, B, B_1 a trojúhelníku z bodů 0, B, Z_1 . Popíšeme je rovnicemi

$$\cos\alpha = \frac{\overline{0B_1}}{\rho} = \frac{\rho}{\overline{0Z_1}} \rightarrow \overline{0B_1} \cdot \overline{0Z_1} = \rho^2 \quad (103)$$

Vznikne

$$Z_1 Y_1 = \rho^2, \bar{Y}_1 = \overline{0B_1} \quad (104)$$

Tímto postupem je konstrukce pomocí inverzní křivky dokázána.



Obr. 17 Konstrukce inverzního vztahu v komplexní rovině
[Zpracováno dle 1]

Vyjádřením impedance $\bar{Z}(s)$ z náhradních schématu typu Γ vznikne:

$$\bar{Z}(s) = \bar{c}_1(R_1 + jX_{1\sigma} + jc_1X_{2\sigma}) + \bar{c}_1^2 \frac{R'_2}{s}; \quad \bar{c}_1 = c_1 e^{j\sigma}; \quad \delta < 0 \quad (105)$$

Tato rovnice představuje přímku v komplexní rovině při proměnném nepřímém reálném parametru s , která se v případě inverzního vztahu zobrazí do admitanční kružnice procházející počátkem. Impedanční přímku a kružnici lze zkonstruovat pomocí Obr. 17. Při tvorbě kružnice již vycházíme ze znalosti impedanční přímky. Nejdůležitější je při hledání bod D. Právě na středu výsledné úsečky $|0, D|$ leží střed kružnice a vzdálenost krajních bodů určuje průměr kružnice. Úsečka leží na normále kolmé k přímce $\bar{Z}(s)$. Dále je možné získat charakteristické body pro krajní hodnoty skluzu – Y_1 pro $s = 1$, Y_∞ pro $s = 0$ a bod Y_0 leží v počátku souřadnic. Nakonec je nutné kružnici přesunout o velikost proudu I_0 dle rovnice

$$\bar{I}_0 = \frac{\bar{U}_1}{\bar{Z}_1} = I_0 e^{j\varphi_1} \quad (106)$$

Pro určení proudu I_2'' musíme využít opět vztah (18). V případě $s = 0$ vyjde proud $I_{20}'' = 0$. Pro $s = 1$ platí rovnice:

$$(I_2'')_{s=1} = I_{2k}'' = \frac{U_1}{c_1(R_1 + jX_{1\sigma} + jc_1X_{2\sigma}') + c_1^2 R_2'} = \frac{U_1}{Z_{2k}} \quad (107)$$

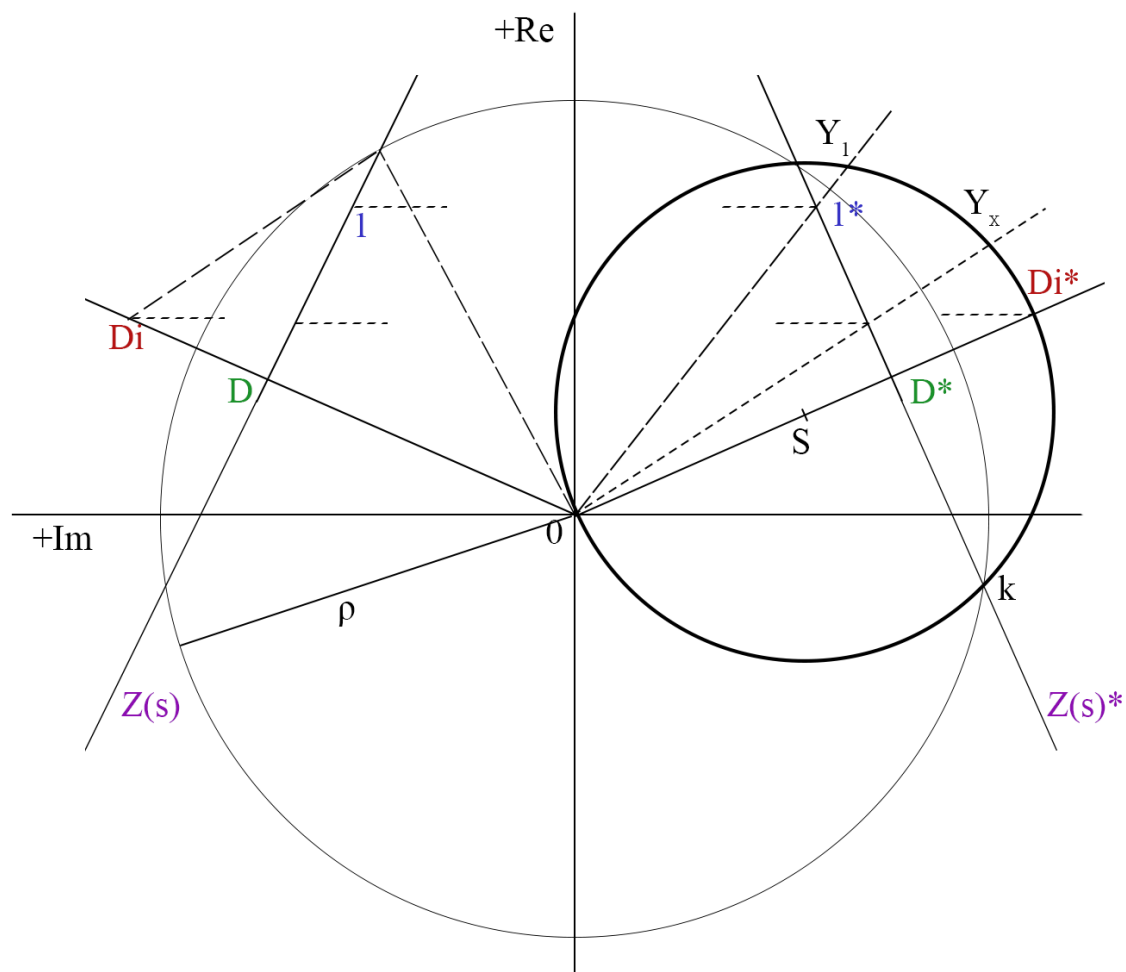
V případě $s = \infty$

$$(I_2'')_{s=\infty} = I_{2\infty}'' = \frac{U_1}{c_1(R_1 + jX_{1\sigma}) + c_1^2 jX_{2\sigma}''} = \frac{U_1}{Z_{2\infty}} = \frac{U_1}{Z_{2k} - c_1^2 R_2'} \quad (108)$$

Proud $I_{2\infty}''$ je nezávislý na R_2' . Kružnicový diagram je těmito body jednoznačně určen. Provedením derivace v bodě $s = 0$

$$\left(\frac{dI_2''}{ds} \right)_{s=0} = \frac{U_1}{c_1^2 R_2'} = \frac{U_1}{R_2'} \left| \frac{1}{c_1^2} \right| e^{-2j\delta} \quad (109)$$

se získá směrnice tečny v bodě Y_0 . Čísla U_1 a R_2' jsou reálná, tečna se dotýká kružnice v bodě Y_0 a směr je dán úhlem δ , který je nezávislý na R_2' . Její průměr leží na kolmici k tečně počátkem a je rovněž nezávislý na R_2' a proto ani průměr kružnice na R_2' nezávisí. [1]



Obr. 18 Kružnicový diagram sestavený inverzí impedanční přímky [Zpracováno dle 1]

3.3 Skript pro vytvoření kružnicového diagramu

Skript jsem napsal pomocí programu Matlab a má za úkol vykreslit kružnicový diagram asynchronního stroje na základě vložení vstupních hodnot. Těmi jsou proud naprázdno, účinník naprázdno, proud nakrátko, účinník nakrátko, převod stroje a odpory statorového a odporového vinutí. Následně se dopočítávají další potřebné veličiny. Program je konstruován pouze pro rozmezí skluzu mezi 0 a 1. Skript umí počítat i pro hodnoty mimo toto rozmezí, ale není tomu přizpůsobené vykreslování v kružnicovém diagramu. Optimální je použití full HD monitoru, a to i z důvodu vyvolání grafů na určitou pozici. Program je vytvořený pro uživatele znalého problematiky a předpokládá se vkládání hodnot blízkých realitě. Zadávání vstupních hodnot je proto opatřeno jen základními funkcemi proti chybnému vložení. Základní vlastností programu je možnost zkoušení zadávání jiných hodnot, jelikož běží ve smyčce, než dojde k příkazu pro ukončení. Není proto nutné neustálé

spouštění skriptu pro nový stroj nebo v případě, když chce uživatel vykreslit do stejného kružnicového diagramu hodnoty pro změněný určitý skluz a porovnat výsledky. Výhodou programu je také možnost následného uložení dopočítaných hodnot do textového souboru pro jejich další zpracování. Program disponuje jednoduchým menu pro snadnější ovládání programu.

Kružnicový diagram se postupně dopočítává, jak kdyby byl rýsován na papír. Při výpočtech se tedy snažím hledat určité body, které jsou poté rozloženy na hodnoty v reálné a imaginární ose. Zde ale přichází první specifikum programu. Je respektováno obecné zobrazování kružnicové diagramu a osa X je osou imaginární a osa Y je osou reálnou (dále bude používáno osa imaginární – IM, osa reálná – RE). Oproti zažitým zvyklostem, kdy je osa X reálná a osa Y imaginární, se nemusí z počátku dařit v programu orientovat. První pokus byl zkusit využít schopnost Matlabu počítat s komplexními čísly. Pro přehlednost je to trochu lepší a vypočítané hodnoty odráží reálné hodnoty složek. Měl jsem ale neustálé problémy v dalším postupu i při vykreslování do grafu a následné překlápění imaginární a reálné osy. Proto jsem tento postup opustil a zvolil velmi základní. Všechny přímky a úsečky jsou rozpočítávány na reálné a imaginární souřadnice a poté se s nimi provádí další výpočty. Tento postup prakticky kopíruje postup vytváření kružnicového diagramu pomocí rýsování případně tvorbou v CAD softwaru.

Nyní již k samotnému programu, kde se zaměřím na důležité body výpočtů. Celý program si lze prohlédnout v příloze. V úvodu jsou jen zadávány základní hodnoty pro následující smyčky a definice specifických barev, které jsou používány. Je zde také přiřazena proměnná *krok*, která určuje, s jakou přesností jsou počítány charakteristiky. Defaultně se vypočítá 100 hodnot. Poté se vstupuje do nekonečné smyčky, která trvá, než je zadán příkaz *brake* (uživatel si nepřeje již měnit data). Následují smyčky, které částečně kontrolují zadané vstupní hodnoty. Neřeší např. je-li proud naprázdno větší než proud nakrátko. V další části kódu se již věnuji tvorbě kružnicového diagramu. Nejprve jsou vstupní hodnoty rozpočítány na reálné a imaginární.

```
nakrRE=Ikn*cos(FiK_rad);  
nakrIM=Ikn*sin(FiK_rad);  
naprRE=I0*cos(Fi0_rad);  
naprIM=I0*sin(Fi0_rad);
```


Následuje vytvoření nového grafu s pojmenováním os a zadáním dalších pomocných parametrů. Poté jsou zakresleny proudy naprázdno a nakrátko. Vykreslování probíhá jednoduše zadáním koncových bodů úsečky do příslušného příkazu.

```
plot([0,nakrIM],[0,nakrRE],'color',pomoc);           %vykreslení proudu nakrátko Ik
plot([0,naprIM],[0,naprRE],'color',pomoc);         %vykreslení proudu naprázdno I0
```

Postup přechází na hledání přímky výkonů. Rovnice úsečky má obecný tvar:

$$y = Ax + B \quad (110)$$

V mém případě tedy:

$$RE = A \cdot IM + B \quad (111)$$

Bod A označuje směrnici přímky (jak rychle přímka stoupá), bod B označuje konstantu přímky (jak vysoko bude přímka položena). Využívám příkazu polyfit, který proloží zadané body polynomem určitého stupně. Vložím koncové body proudu naprázdno a proudu nakrátko a proložím je polynomem prvního stupně – přímkou. Tím získám hodnoty A a B, které jsou následně z výsledku zvlášť vybrány. V případě, že chceme znát průsečík se jednoduše dosadí za RE=0 a získáme hodnotu přímky protínající IM osu.

```
PVX=[naprRE,nakrRE];           %přímka výkonů, souřadnice x
PVY=[naprIM,nakrIM];          %přímka výkonů, souřadnice y
Primkavyk=polyfit(PVY,PVX,1);   %proložení bodů lineární funkcí, výsledek
rovnice je rovník Ax+B
smernice_PV=Primkavyk(1);       %smernice primky mezi Ikn a I0, hodnota u x (A)
konst_PV=Primkavyk(2);          %posuv primky, konstanta, prusecik s Y (B)
plot([nakrIM,naprIM],[nakrRE,naprRE],'color',modra); %vykreslení přímky výkonu
prusecVYK= -konst_PV/smernice_PV; %průsečík výkonu s imag osou
```

Poté jsem potřeboval vyhledat střed přímky výkonů, na kterou jsem vytvořil kolmici. Také jsem našel přímku rovnoběžnou s IM osou, která je v poloviční vzdálenosti mezi koncovým bodem proudu naprázdno a úsečky proudu nakrátko. Do rovnice proudu nakrátko jsem vložil IM souřadnici proudu nakrátko a byl získán druhý bod. Získanou konstantu, která reprezentuje rovnoběžku s IM osou, jsem vložil do rovnice kolmice (normály) na přímku výkonů. Dostal jsem souřadnice středu kružnice, které v dalším kroku přiřazuji jedné proměnné.

```

Stred_PRIMKA1_RE1=(nacrRE+naprRE)/2;           %střed Přímky výkonů pro reálné
Stred_PRIMKA1_IM1=(nacrIM+naprIM)/2;           %střed Přímky výkonů pro imaginární
Stred_PRIMKA1_IM2=(smernice_PV*Stred_PRIMKA1_RE1+Stred_PRIMKA1_IM1);           %průsečík
normálového vektoru s imaginární osou
PVKX=[Stred_PRIMKA1_RE1,0];
PVKY=[Stred_PRIMKA1_IM1,Stred_PRIMKA1_IM2];
kon=polymfit(PVKY,PVKX,1);                       %lineární proložení bodů
PV_norm_smernice=kon(1);                          %směrnice vektoru
p9=plot(PVKY,PVKX,'--','Color',pomoc);           %První spojnice na střed, kolmice na přímku výkonu
set(p9,'Tag','pomoc9');
%kolmice v bodě I0 a přímka proudů
SP_IM=(nacrRE/nacrIM)*naprIM;                    %zjišťuji průsečík kolmice na imaginární osu,
která prochází bodem I0, rychlost růstu Ik * koncová hodnota I0 v y souřadnicích
SPX=[naprRE;SP_IM];                              %body kolmice v reálné ose
SPY=[naprIM,naprIM];                             %body kolmice v imaginární ose
Stred_PRIMKA2_RE=(naprRE+SP_IM)/2;
Stred_PRIMKA2_IM1=(naprIM);
Stred_PRIMKA2_IM2=(Stred_PRIMKA1_IM2+Stred_PRIMKA2_RE/PV_norm_smernice);           %průsečík
normály PV a přímky proudů

```

Poloměr zjišťuji s body středu kružnice a proudu naprázdno a využívám k tomu Pythagorovu větu. Pro vykreslení kružnice musím vypočítat IM a RE souřadnice bodů pro úhel UhelFI, který je 2π .

```

Stred_KR=[Stred_PRIMKA2_RE;Stred_PRIMKA2_IM2];
polomer=sqrt((Stred_PRIMKA2_IM2-Stred_PRIMKA2_IM1)^2+(Stred_PRIMKA2_RE-naprRE)^2);
UhelFI=linspace(0,2*pi);                          %vytvoření pole, ze kterého se dopočítávají
jednotlivé body kružnice, defaultně 100 bodů
IM_KR=polomer*sin(UhelFI)+Stred_KR(2);           %poloha bodů na imaginární ose
RE_KR=polomer*cos(UhelFI)+Stred_KR(1);           %poloha bodů na reálné ose

```

Pro přímku momentů je důležitý bod M, který rozděluje svislici z koncového bodu proudu nakrátko ve vypočítaném poměru.

```

R2_car=R2*k^2;
Bod_M2_R1=((nacrRE-naprRE)*(R1/(R1+R2_car)));
Bod_M2_R2=(nacrRE-naprRE)*R2_car/(R1+R2_car);
Bod_M(1)=nacrRE-Bod_M2_R2;                       %výška bodu M (vzdálenost proudu naprátko nacrRE)

```

Obecná rovnice přímky skluzů je pouze převzatá rovnice přímky momentů, která je zvýšena o určitou konstantu. Já jsem zvolil hodnotu poloměru, což zajišťuje dostatečné zvýšení nad kružnici. Koncové body přímky skluzů jsou určeny pomocí průsečíku dvou přímek. Jednoduše se tato rovnice dá rozepsat jako:

$$\begin{aligned}
 y &= Ax + B ; y = Cx + D \\
 Ax + B &= Cx + D \\
 x &= \frac{D - B}{A - C}
 \end{aligned}
 \tag{112}$$

Tento postup je využíván často k hledání průsečíků. Dalším důležitým krokem je výpočet hodnot pro skluz, ať už pro jednu hodnotu vybranou uživatelem, nebo obecně pro všechny při vypočítávání charakteristik. Určitý skluz např. 0.3 je vyhledán tak, že zjistím šířku a výšku úsečky skluzu – PS_Sirka a PS_Vyska. Každá hodnota je poté vynásobena skluzem a dostanu vzdálenost bodu od počátku. Počátek je poté zvolen jako bod $s = 0$. Je tedy potřeba k oběma hodnotám přičíst IM nebo RE souřadnice počátku (BodS_IM, BodS_RE). Vznikne důležitý bod na přímce skluzů. Tímto bodem a bodem proudu naprázdno proložím přímkou označenou jako Skluz_vybrany.

```
PS_Sirka=PrusPV_PS_IM-TEC_IM;           %potřebuji znát šířku přímky (šířku v
imaginárních souřadnicích)
PS_Vyska=PrusPV_PS_RE-Primka_Sk_RE;     %potřebuji znát výšku přímky (výšku v reálných
souřadnicích)
%začátek přímky skluzu +celková šířka IM * smernice přímky skluzů * skluz
%počítám v podstatě vzdálenost bodu od počátku přímky skluzů, skluz je prakticky zadán
přímo v procentech, proto není nutný další přepočet
BodS_IM=(TEC_IM+(PS_Sirka*skluz_v));
BodS_RE=(Primka_Sk_RE+(PS_Vyska*skluz_v));
Skluz_vybrany=polynomial([naprIM,BodS_IM],[naprRE,BodS_RE],1);
Smernice_SV=Skluz_vybrany(1);
konst_SV=Skluz_vybrany(2);
```

Nyní potřebuji najít souřadnice průsečíku přímky Skluz_vybrany a kružnice – bod P [P_IM,P_RE]. Teoreticky se jednoduše nalezne průsečík kružnice a přímky, v praxi musím ale problém odvodit matematicky. Musím vložit do obecné rovnice kružnice (113) za jednu proměnou obecnou rovnici přímky. Odvození pro vyhledání x souřadnic (v mém případě souřadnic IM) je následující. Napíši obecnou rovnici kružnice, která nemá střed v 0:

$$(x + M)^2 + (y + N)^2 = r^2 \quad (113)$$

Rovnici roznásobím a poloměr převedu na druhou stranu, vznikne:

$$x^2 + y^2 + 2Mx + 2Ny + M^2 + N^2 + r^2 = 0 \quad (114)$$

Nyní dosadím za y rovnici (110).

$$x^2 + (Ax + B)^2 + 2Mx + 2N(Ax + B) + M^2 + N^2 + r^2 = 0 \quad (115)$$

Rožnásobením s úpravou pro vytknutí stejných proměnných získám rovnici:

$$x^2(1 + A^2) + x(2AB + 2M + 2NA) + B^2 + 2NB + M^2 + N^2 + r^2 = 0 \quad (116)$$

Pro názornost sloučím více konstant jedné proměnné pod jednu konstantu a lépe vidím, že vyšla kvadratická rovnice.

$$x^2R + xS + T = 0 \quad (117)$$

Vyhledání kořenů probíhá pomocí diskriminantu.

$$x_{1,2} = \frac{-S \pm \sqrt{S^2 - 4RT}}{2R} \quad (118)$$

Stačí už jen dosadit zpětně za konstanty. Rovnice má dvě řešení, ale jedno z nich vím, že je zbytečné, protože prochází bodem proudu naprázdno. Potřebné řešení určím navíc pomocí hodnoty vstupující směrnice přímky Skluz_vybrany. Ve skriptu je směrnice označená jako Smernice_SV. V případě, že je směrnice záporná, odmocnina se odečítá, v opačném případě se odmocnina přičítá. Směrnice mění znaménko v případě hodně malých skluzů, kdy se zpřímky stává kolmice na IM osu a začíná se „překlápět“.

```

if Smernice_SV<0 ;                               %výpočet průsečíku PS a kružnice pro imaginární
souřadnice, dle znaménka směrnice se počítá s + nebo - odmocinou
    P_IM=(-(2*(Smernice_SV*konst_SV-Smernice_SV*Stred_PRIMKA2_RE-Stred_PRIMKA2_IM2))-
sqrt((2*(Smernice_SV*konst_SV-Smernice_SV*Stred_PRIMKA2_RE-Stred_PRIMKA2_IM2))^2-
4*(Smernice_SV^2+1)*(Stred_PRIMKA2_RE^2-polomer^2+Stred_PRIMKA2_IM2^2-
2*konst_SV*Stred_PRIMKA2_RE+konst_SV^2)))/(2*(Smernice_SV^2+1));
else
    P_IM=(-(2*(Smernice_SV*konst_SV-Smernice_SV*Stred_PRIMKA2_RE-
Stred_PRIMKA2_IM2))+sqrt((2*(Smernice_SV*konst_SV-Smernice_SV*Stred_PRIMKA2_RE-
Stred_PRIMKA2_IM2))^2-4*(Smernice_SV^2+1)*(Stred_PRIMKA2_RE^2-
polomer^2+Stred_PRIMKA2_IM2^2-
2*konst_SV*Stred_PRIMKA2_RE+konst_SV^2)))/(2*(Smernice_SV^2+1));
end
P_RE=P_IM*Smernice_SV+konst_SV;                   %výpočet průsečíku PS a kružnice pro reálné
souřadnice
P=[P_IM,P_RE];
KOL_PRUS_S=-1/smernice_TEC_pom*P_IM-konst_TEC_pom-P_RE;
KOL_prumer=-1/smernice_TEC_pom*P_IM+(konst_TEC_pom-KOL_PRUS_S);           %kolmice na
průměr, přímku procházející středem
smernice_KOL=-1/smernice_TEC_pom;
konst_KOL=(konst_TEC_pom-KOL_PRUS_S);

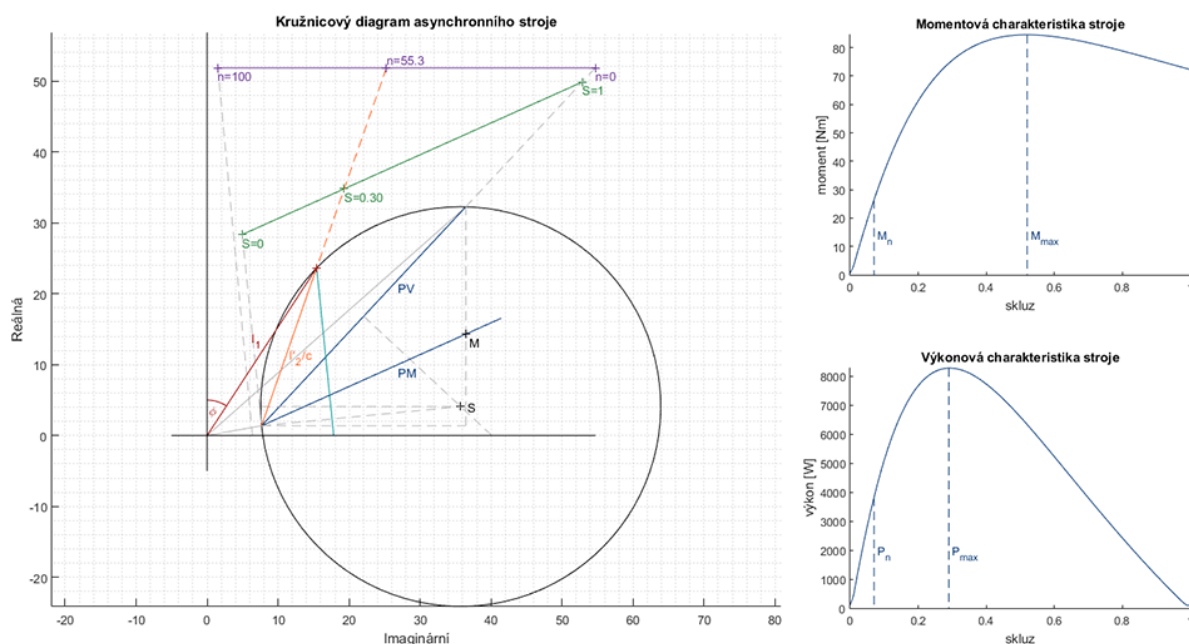
bod_E_IM2_V(R)=(konst_PM-konst_KOL)/(smernice_KOL-smernice_PM);
bod_E_RE2_V(R)=smernice_PM*bod_E_IM2_V(R)+konst_PM;           %hledání bodu E reálných souřadnic
vyska_BOD_E_V(R)=(hypot([bod_E_IM2_V(R)-P_IM],[P_RE-bod_E_RE2_V(R)])); %délka úsečky
bod_F_IM2_V(R)=(konst_PV-konst_KOL)/(smernice_KOL-smernice_PV);
bod_F_RE2_V(R)=smernice_PV*bod_F_IM2_V(R)+konst_PV;
vyska_BOD_F_V(R)=(hypot([bod_F_IM2_V(R)-P_IM],[P_RE-bod_F_RE2_V(R)]));

```

Rovnou hledám kolmici na průměr kružnice, která prochází vypočítaným bodem. Průsečík kolmice s přímkou výkonů a momentů vytvoří body E, F atd. Dopočítávám i vzdálenost od průsečíku kružnice a daného bodu. Vzdálenost později vynásobím příslušnou konstantou (měřítkem) a vyjdou mi hodnoty pro momenty, výkony a ztráty. Pomocí bodu P

mohu také spočítat velikost proudu ve statoru a v rotoru. Průsečík přímky $S_{kluz_vybrany}$ a přímky účinnosti zjistím účinnost ve stroji. Stejný postup aplikuji pro výpočet charakteristik s tím rozdílem, že nepočítám pro jednu hodnotu, ale v rozmezí celého skluzu od 0 do 1 s krokem zadaným v úvodu programu (výchozí 0.01). Postupným skládáním hodnot do příslušných proměnných vytvářím vektory o 100 hodnotách. Jednotlivé vektory zapisuji po sloupcích do jedné matice pro další použití.

V této fázi mám již spočítané všechny potřebné hodnoty a vykresluji kružnicový diagram. Lze si všimnout, že graf se zavře a opět otevře. To je způsobeno příkazy, které se aplikovaly, aby se mohla nastavovat viditelnost pomocných přímek. Nechám vyvolat druhé okno s grafy, kde se vykreslí momentová a výkonová charakteristika. Vyvolání grafů do dvou oken je pouze z důvodu pohody pro uživatele. Předpokládám, že uživatel bude prohlížet hlavně kružnicový diagram a v případě zvětšení okna na celou obrazovku by momentové charakteristiky zabíraly zbytečně místo. Dále jsou grafy umístěny přímo na určitou pozici na obrazovce. Tento příkaz je přidán z důvodu, aby se vyvolané grafy nepřekrývaly a není tak nutné hned okna s grafy přesouvat.



Obr. 19 Kružnicový diagram a charakteristiky vytvořené programem. Zadané hodnoty jsou pro první měřený stroj.

Ve vytvořené matici výkonů hledám maximální hodnotu a její pozici v matici – příkaz MAX. Pomocí pozice vyhledám v matici se skluzu, která hodnota skluzu odpovídá pozici v matici – tedy maximum. Počítám i hodnotu jmenovitého skluzu ze štítkových hodnot stroje. Následně se snažím vyhledat jmenovitý skluz v matici skluzů a jeho pozici. Nyní obráceně

dle pozice skluzu vyhledávám hodnotu v matici výkonu nebo momentu, následně vykreslím. U výpočtu jmenovitého skluzu jsem ale musel dát pozor, aby daný jmenovitý skluz bylo vůbec možné vyhledat. V případě, že jmenovitý skluz vyjde např. 0,073, by program v matici nenašel odpovídající hodnotu, jelikož jsou spočítány pouze hodnoty 0,07 a 0,08. Proto nejdříve zjišťuji do proměnné *desetina* množství desetinných míst, která jsou v proměnné *krok*. Následně výpočet jmenovitého skluzu zaokrouhluji na stejný počet desetinných míst. Dovolím si to z důvodu, že kružnicové diagramy obecně nemají velikou přesnost a zároveň se pohybují ve velmi malých odchylkách vstupních hodnot, proto rozdíl mezi výsledkem skluzu 0,07 a 0,073 je zanedbatelný. Nicméně v případě, že chce uživatel zjistit i hodnotu v tomto skluzu, může si ji zadat do části, kde se vypočítávají hodnoty pro uživatelem vybraný skluz. Zde se hodnota vypočítá.

```
desetina=round(log10(1/krok));
sn=round(((n_stat-n_rot)/n_stat),desetina);      %jmenovitý moment stroje
JMEN=find(skluz==sn);                          %pozice jmenovité hodnoty
figure(2)                                       %nové okno s grafy
subplot(2,1,1);                                %tvorba prvního grafu v okně
hold on
set(gcf, 'Position', [1100, 100, 500, 800]);
plot(skluz,vyska_BOD_E,'Color',modra);
axis([0 1 0 inf]);                             %úprava zobrazení os
[MaxVal,MaxIndex]=max(vyska_BOD_E);            %zjišťování max hodnoty a pozice této hodnoty v
matici pro bod E (moment)
fprintf('Maximální moment je %.2f Nm při skluzu %.2f \n',MaxVal,skluz(MaxIndex))
plot([skluz(MaxIndex),skluz(MaxIndex)], [MaxVal,0], '--', 'Color',modra);
title('Momentová charakteristika stroje');      %titulek
plot([skluz(JMEN),skluz(JMEN)], [vyska_BOD_E(JMEN),0], '--', 'Color',modra);
popis=sprintf('M_{max}',skluz_V);
```

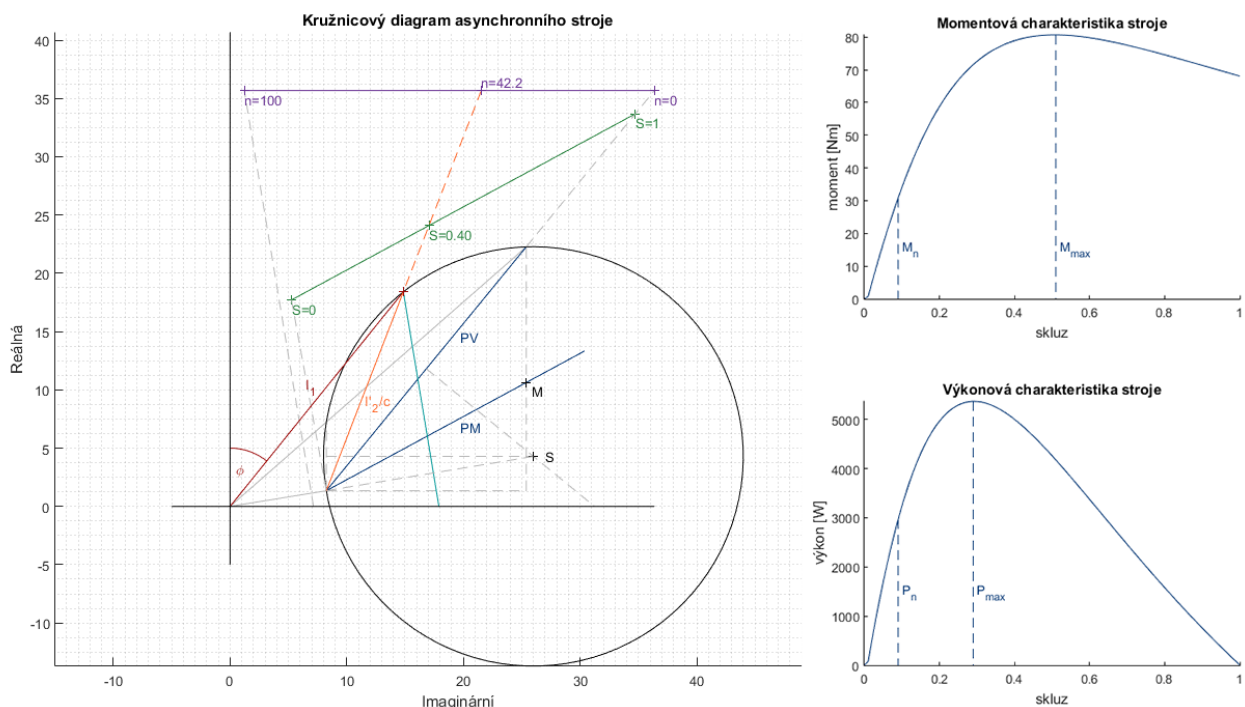
V poslední části programu jsem vytvořil jednoduché menu pro další postup uživatele. První smyčka se věnuje výstupu všech vypsaných a spočítaných hodnot do souboru. Zapiší se postupně data, která zadal uživatel, všechny výpočty, které byly zobrazeny během smyčky programu a také vypočítaná data všech hodnot skluzů pro případné budoucí použití. V případě opakování programu v další smyčce a volby nových hodnot je možné zapsat data do nového souboru. Ukázka vytvořeného souboru se nachází v příloze. V další části je možné schovat nebo zobrazit pomocné přímky. Pro zobrazování a vypínání pomocných přímek jsem použil nekonečnou smyčku z důvodu, kdyby uživatel např. kontroloval více strojů za sebou a v jednom kroku si vypnul pomocné přímky. Při kontrole následujícího stroje by chtěl jen tyto přímky zkontrolovat, má tedy možnost je zapnout a hned vypnout. Není nutné pro opětovné vypnutí přímek přepočítávat celý diagram znovu.

Třetí oddíl zjišťuje, které hodnoty chce uživatel pro další smyčku změnit. Zadáání je rozděleno do čtyř bloků. Lze zvolit úpravu vstupních hodnot stroje, změnu odporů a převodu, nastavení nových štítkových hodnot a vypočítání určitého skluzu. Smyčkou je zajištěno, že uživatel může zvolit nastavení jednoho či dvou a více bloků.

Poslední oddíl se zabývá zavřením oken s grafy. Uživatel může vykreslit nově spočtená data do nového grafu nebo do stejného. To se hodí hlavně v případě pouhé změny volby zobrazení určitého skluzu. Dají se tak lépe porovnávat změny, ke kterým došlo.

Program se potýká ovšem s jedním problémem a tím je správný výpočet charakteristik při skluzu velmi blízkému 0 zejména 0.01. Ve vícenásobném průsečíku kružnice s přímkou výkonu, přímkou momentu, průměru kružnice, ze kterého se počítají charakteristiky, a proudu naprázdno dochází k problému při zjišťování vzdáleností, případně jsou vzdálenosti prakticky nulové. Tento problém občas způsobuje viditelný skok ve vykreslených charakteristikách. Zvýšení jemnosti kroku nepomůže k dosažení lepších výsledků.

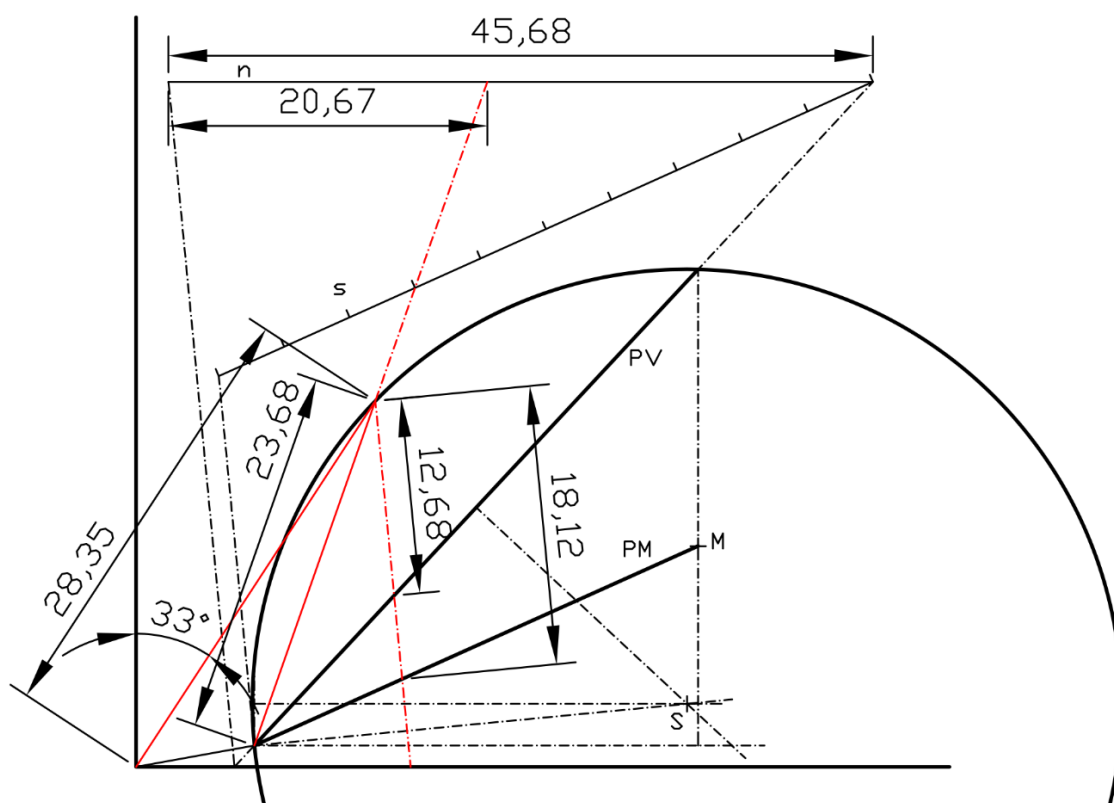
Na první pohled nemusí být jednoduché vyznat se v kódu programu a postup počítání se může zdát zbytečně rozkouskovaný. Také jsem chtěl původně počítání hodnot pro určité skluzu vyvolávat jednou vytvořenou funkcí. Jenomže funkce by musela obsahovat spoustu vstupních a výstupních proměnných a kontrola byla složitá. Část je použita pouze dvakrát, a proto jsem ji nechal rozdělenou. I přes to program funguje rychle a neobsahuje žádné smyčky zbytečně protahující výpočet.



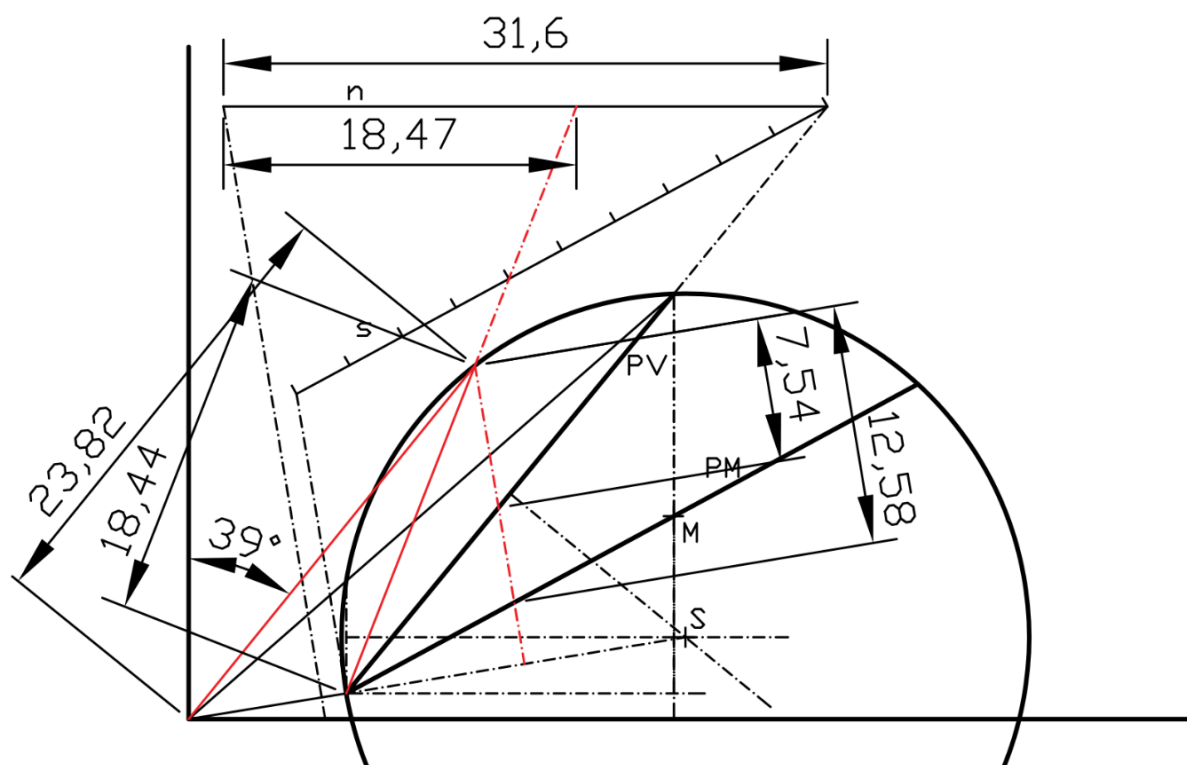
Obr. 20 Kružnicový diagram a charakteristiky vytvořené programem. Zadané hodnoty jsou pro druhý měřený stroj.

3.4 Kružnicový diagram pomocí CAD softwaru

Napsaný program je třeba ověřit reálným nakreslením kružnicového diagramu. Pro tvorbu jsem zvolil program AutoCAD, jelikož je v něm jednoduché pracovat a výstupy jsou kvalitní. Rýsování probíhalo stejným postupem jako v teoretickém úvodu a prakticky kopírovalo i postup tvoření diagramu pomocí skriptu. Nejprve jsem nakreslil kružnicový diagram, poté jsem zvolil určitý skluz a našel průsečík s kružnicí. Vynesl jsem kolmici na průměr kružnice, abych mohl odečítat vzdálenosti od momentové a výkonové charakteristiky.



Obr. 21 Kružnicový diagram prvního stroje pomocí AutoCAD. Skluz je zvolen 0.3.



Obr. 22 Kružnicový diagram druhého stroje pomocí AutoCAD. Skluz je zvolen 0.4.

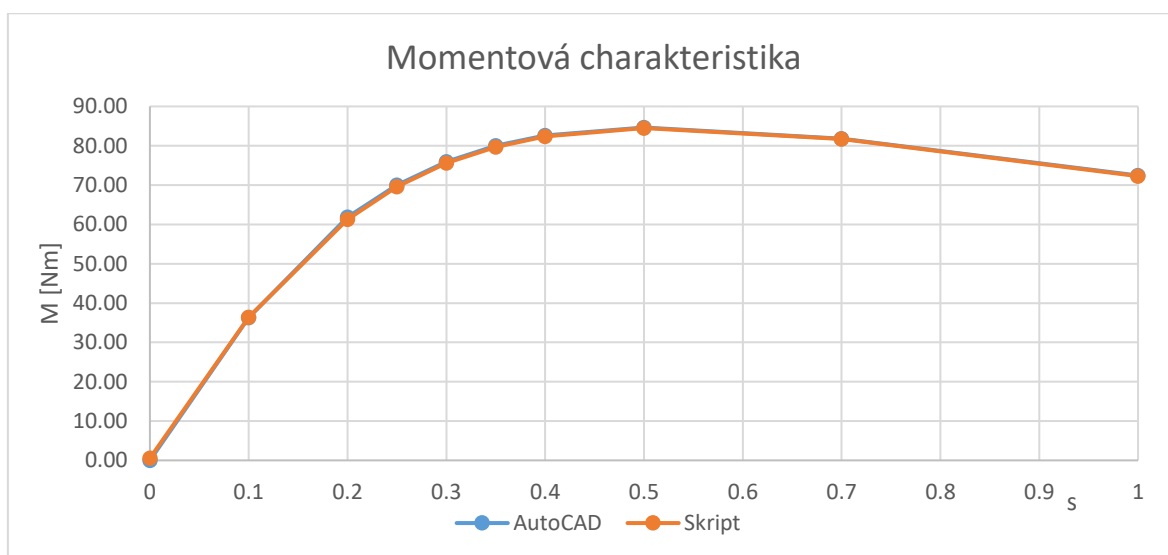
3.5 Porovnání výsledků

Pro porovnání kružnicových diagramů vypočítaných ve skriptu jsem v AutoCADu odměřil hodnoty pro více skluzů. Hodnoty jsem poté vložil do tabulky v excelu, dopočítal hodnoty pro výkony a následně vložil do grafu. Body jsem volil tak, abych mohl porovnat diagramy co nejpřesněji. Proto jsem změřil více hodnot kolem předpokládaného maxima výkonu jednotlivých strojů. Zde jsem předpokládal, že budou nejpatrnější rozdíly mezi diagramy. Pro porovnání jsem vybral vypočítané hodnoty ze skriptu pro stejné skluzy a vynesl do stejného grafu.

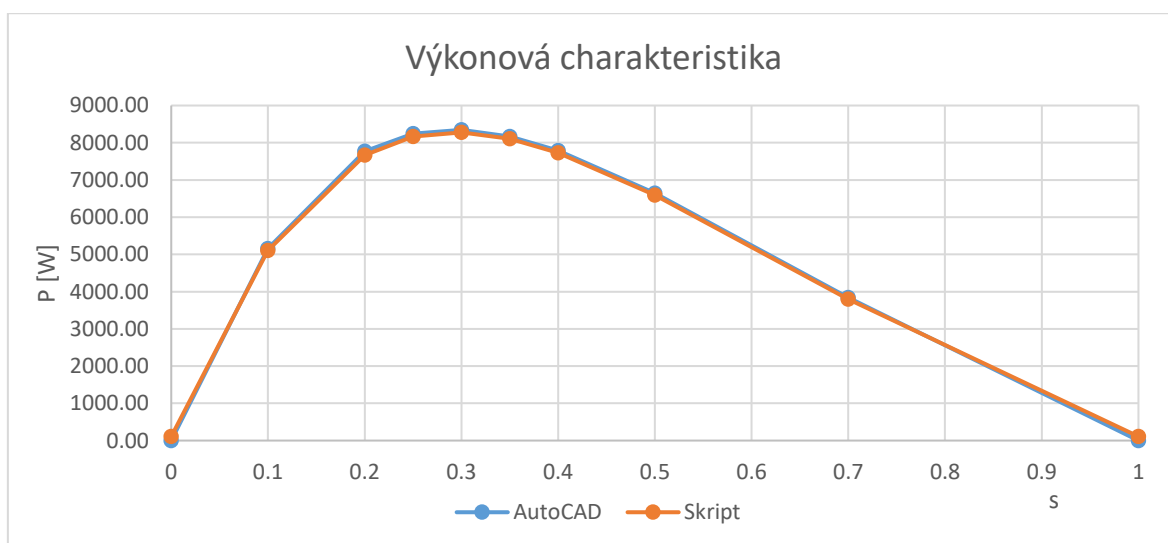
První stroj

s	I ₁		I ₂ '		M [Nm]		P [W]	
	CAD	Skript	CAD	Skript	CAD	Skript	CAD	Skript
0	7,80	7,80	0,00	0,00	0,00	0,55	0,00	0,00
0,1	13,54	13,60	9,32	9,38	36,33	36,36	5153,54	5104,77
0,2	21,70	21,54	17,45	17,31	61,89	61,31	7773,10	7672,52
0,25	25,21	25,07	20,76	20,63	70,02	69,58	8246,99	8165,19
0,3	28,35	28,24	23,68	23,57	75,92	75,58	8345,71	8277,31
0,35	31,14	31,05	26,25	26,16	79,99	79,72	8168,01	8104,95
0,4	33,62	33,53	28,52	28,44	82,59	82,38	7786,26	7727,52
0,5	37,74	37,68	32,28	32,23	84,64	84,50	6647,61	6594,70
0,7	43,56	43,52	37,56	37,53	81,83	81,75	3843,77	3798,25
1	48,67	48,67	42,20	42,20	72,40	72,27	0,00	0,00

Tabulka 12 Porovnání nejdůležitějších hodnot ze skriptu a z AutoCADu pro první stroj



Graf 3 Vynesené hodnoty momentů pro vybrané skluzy prvního stroje



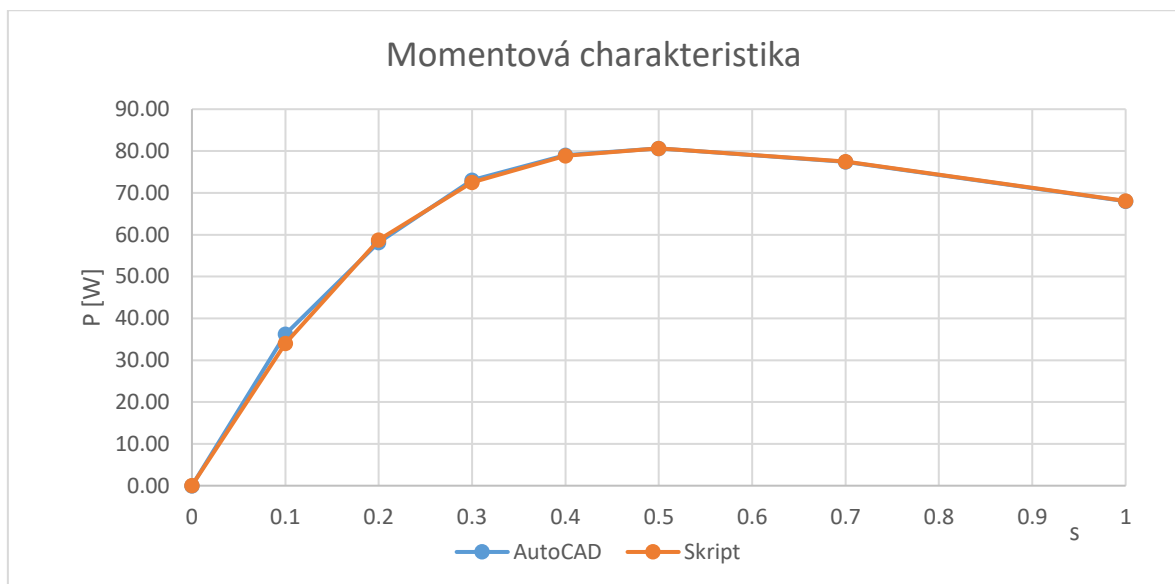
Graf 4 Vynesené hodnoty výkonů pro vybrané skluzy prvního stroje

Výsledky mezi hodnotami vypočítanými skriptem a hodnotami změřenými v AutoCADu jsou pro první stroj téměř totožné. Hodnoty proudů se liší maximálně do dvou desetín. Potvrdil se můj původní předpoklad, že k viditelným změnám dojde při počítání hodnot kolem maximálních výkonů, kde jsem v AutoCADu odečítal více hodnot. Až na přepočítávaných hodnotách je v grafech viditelný rozdíl. Maximální vypočítaný rozdíl je 68 W. Vzhledem k tomu, v jakých se pohybujeme hodnotách, se ale jedná o rozdíl v řádech setin procent. To považuji za zanedbatelný rozdíl.

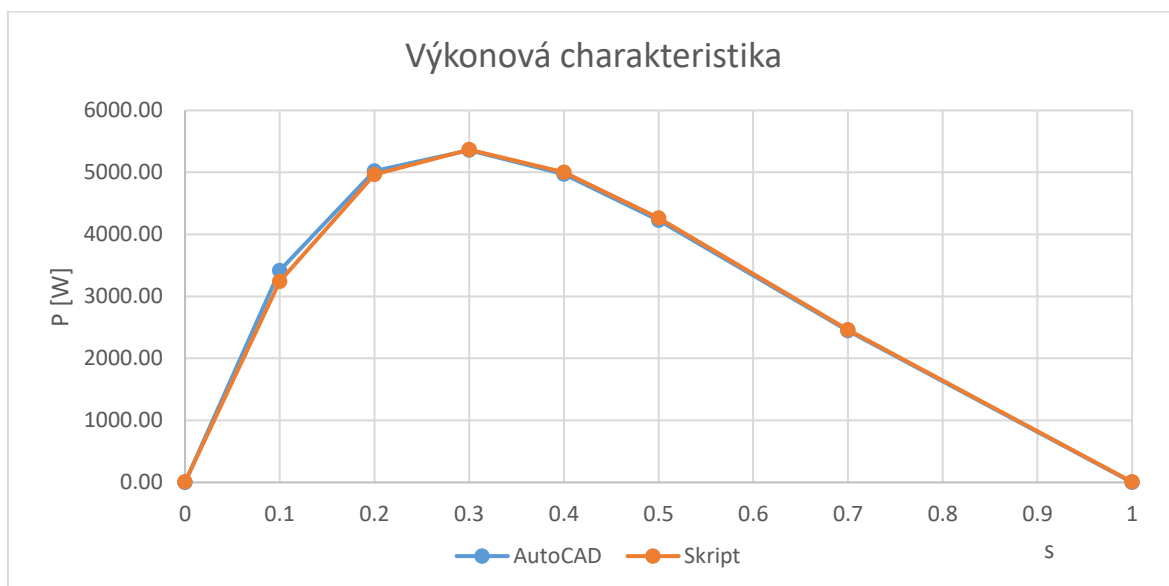
Druhý stroj

s	I ₁		I _{2'}		M [Nm]		P [W]	
	CAD	Skript	CAD	Skript	CAD	Skript	CAD	Skript
0	8,36	8,36	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	7,60
0,1	11,25	10,91	6,24	5,82	36,27	34,05	3415,95	3239,62
0,2	16,05	15,75	11,34	11,05	58,14	58,75	5021,91	4966,88
0,3	20,34	20,13	15,33	15,15	73,03	72,55	5357,58	5366,99
0,4	23,79	23,66	18,42	18,30	79,02	78,89	4971,36	5002,18
0,5	26,51	26,43	20,80	20,73	80,64	80,64	4225,51	4261,76
0,7	30,35	23,66	24,12	18,30	77,43	77,51	2444,48	2459,89
1	33,77	26,43	27,05	20,73	68,01	68,07	0,00	7,60

Tabulka 13 Porovnání nejdůležitějších hodnot ze skriptu a z AutoCADu pro druhý stroj



Graf 5 Vynesené hodnoty momentů pro vybrané skluzы druhého stroje



Graf 6 Vynesené hodnoty výkonů pro vybrané skluzy druhého stroje

Výsledky pro druhý stroj jsou již trochu odlišné. Lze si všimnout viditelného rozdílu v hodnotě skluzu 0.1, kde se vyskytuje jmenovitý skluz. Chyba nastává v místech s největší změnou hodnot na 1 mm. Tedy v místech, kde průsečík s kružnicí tvoří kolmice k imaginární ose. Pro statorový proud I_1 je chyba 0,34 A (3%), pro rotorový proud je rozdíl 0,42 A (7%). Chyba není velká a přiřadil bych ji dle zkušeností spíše programu, ale pro jistotu by bylo potřeba změřit více strojů.

4 Závěr

V úvodní části jsem se věnoval parametrům náhradního schéma asynchronního motoru. Vyhledal jsem, jakými rovnicemi se lze dopracovat k náhradnímu schéma asynchronního motoru v případě T – článku i Γ – článku. Také jakými rovnicemi se lze následně dopočítat veličin při určitém skluzu jako je proud v rotoru, proud ve statoru, ztráty nebo výkon a moment. Poté jsem proměřil dva asynchronní stroje s vinutou kotvou umístěné na Fakultě elektrotechnické. Proměřoval jsem charakteristiky naprázdno a nakrátko a poté potřebná napětí pro převod stroje. Výsledky měření jsem zpracoval, vybral správné hodnoty a následně jsem vypočítal velikosti jednotlivých parametrů náhradního schéma.

Další část se zabývá kružnicovým diagramem. Zejména se věnuje zjednodušené konstrukci, tedy jako kdyby byl rýsován na papír. V principu se jedná o hledání správných průsečíků přímek a kružnice. Tento manuální princip je přepracován do skriptu v programu Matlab. Slouží k rychlému vykreslení kružnicového diagramu po zadání vstupních hodnot, kterými jsou proud a $\cos\varphi$ naprázdno, proud a $\cos\varphi$ nakrátko, převod stroje a odpory statorového a odporového vinutí. Pro vykreslení momentové a výkonové charakteristiky je nutné zadat napětí na statoru, pro zobrazení jmenovitého momentu a výkonu rychlost pole statoru a otáčky rotoru. Dojde k rychlému vykreslení kružnicového diagramu, jehož data je následně možné uložit do souboru. Skript má menší problémy se správným určením v těsné blízkosti skluzu 0. Vzdálenosti se mu nedaří počítat správně a vychází téměř nulové. Jedná se především o skluz 0,01. S hodnotami pro ostatní skluzu nemá problém.

Správnost výpočtu kružnicového diagramu jsem provedl pomocí narýsování diagramu v programu AutoCAD. Změřil jsem vzdálenosti dle předem určených skluzů a případně vynásobil měřítky, abych dostal hodnoty momentů a výkonů. Data z programu AutoCAD jsem porovnal se skriptem. Jelikož se jednalo prakticky o stejný postup vytvoření kružnicového diagramu, vyšla data stejná. Pro první stroj se jednalo o rozdíl v řádu setin procent. Pro druhý stroj jsem zaznamenal maximální rozdíl pro skluz 0.1 pro hodnotu proudu rotorem I'_2 , která je přibližně 7 %, proud statorem vychází s rozdílem 3 %. Maximální momenty a výkony ale vyšly již s minimálním rozdílem. Tuto chybu přiřazuji spíše napsanému skriptu. K této chybě bude zřejmě docházet v případě, kdy je rotorový proud fázorově „kolmý“ k imaginární ose, kdy má pouze reálnou hodnotu. Počítání průsečíku není stoprocentní a myslím si, že zrovna v tomto případě dochází k nasčítání chyb. Výsledná chyba ale není větší než 10 % a jen v okolí tohoto určitého bodu. Porovnáním výsledků jsem tak dospěl k závěru, že skript funguje správně. Vzhledem k obecnému faktu, že kružnicové

diagramy se používají zejména jako orientační především ke zjišťování přibližných velikostí veličin, a že je skript jen pro stroje s vinutým rotorem, je možné tento program a jím vytvořené grafy brát jako vhodný nástroj pro použití při měření reálných strojů.

5 Literatura

- [1] BARTOŠ, Václav. *Elektrické stroje I,II*. 1. vyd. Plzeň: VŠSE, 1986. skripta 240 s.
- [2] BARTOŠ, Václav. *Teorie a měření elektrických strojů: Laboratorní cvičení-měření*. 3. uprav. vyd. Plzeň: VŠSE, 1984. 155 s.
- [3] BARTOŠ, Václav a SKALA, Bohumil. *Měření na elektrických strojích*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. 109 s. ISBN 80-7043-447-3.
- [4] BARTOŠ, Václav. *Teorie elektrických strojů*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. 230 s. ISBN 80-7043-509-7.
- [5] HRUŠKA, Karel, *Kružnicový diagram asynchronního stroje*, dostupné na adrese <http://home.zcu.cz/~khruska/cz/diagram.html> ke dni 22.4.2018
- [6] PETROV, Georgij Nikolajevič. *Elektrické stroje 2: asynchronní stroje – synchronní stroje*. Vyd. 1. Praha: Academia, 1982. 728 s.
- [7] CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1958. 714 s.
- [8] BAŠTA, Jan, CHLÁDEK, Jaroslav a MAYER, Imrich. *Teorie elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1968. 582 s.

6 Přílohy

Příloha 1 - Skript pro výpočet kružnicového diagramu napsaný v programu Matlab

```

%Program sloužící k výpočtu a k vykreslení kružnicového diagramu po zadání určitých
vstupních parametrů v rozmezí skluzu 0-1
%a výpočtu a vykreslení momentové a výkonové charakteristiky
clear;
clc;
pomoc=[0.72 0.72 0.72]; %zadání hodnoty barvy pro budoucí
aplikaci na úsečky
modra=[0.0 0.2 0.45];
T=1; ukoncit=1;
g11=0;g22=0;g33=0;g44=0;
krok=0.01; %při moc velkém kroku (např 0.5) se nemusí podařit najít
jmenovitý skluz

while 1 %začátek opakování celého programu, smyčka běží donekonečna než přijde
příkaz brake
while g11==0;
disp 'Zadejte hodnoty proudu nakrátko:' %zadávání vstupních hodnot
g1=0;
while g1==0;
Ikn=input('Zadejte velikost proudu: ');
if Ikn<=0;
disp 'Číslo musí být větší než 0'; %čísla musí být kladná
g1=0;
else
g1=1;
end;
end;
g1=0;
while g1==0;
cosFik=input('Zadejte účinník nakrátko: ');
if cosFik<0 || cosFik>1; %čísla musí být mezi 1 a 0
disp 'Číslo musí být mezi 0 a 1'; %ošetření velikosti zadaných
vstupních hodnot
g1=0;
else
g1=1;
end;
end;
% Zadávání hodnot
g1=0;
if g1==0;
disp 'Zadejte hodnoty proudu naprázdno:'
end;
while g1==0;
I0=input('Zadejte velikost proudu: ');
if I0<=0;
disp 'Číslo musí být větší než 0';
g1=0;
else
g1=1;
end;
end;

```



```
end;
g1=0;
while g1==0;
    cosFi0=input('Zadejte účinník naprázdno: ');
    if cosFi0<0 || cosFi0>1;
        disp('Číslo musí být mezi 0 a 1');
        g1=0;
    else
        g1=1;
    end;
end;
g11=1;
end
while g22==0;
    g2=0;
    while g2==0;
        k=input('Zadejte hodnotu převodu: ');
        if k<=0;
            disp('Číslo musí být větší než 0');
            g2=0;
        else
            g2=1;
        end;
    end;
    g2=0;
    while g2==0;
        R1=input('Zadejte odpor statorového vinutí R1: ');
        if R1<=0;
            disp('Číslo musí být větší než 0');
            g2=0;
        else
            g2=1;
        end;
    end;
    g2=0;
    while g2==0;
        R2=input('Zadejte odpor rotorového vinutí R2: ');
        if R2<=0;
            disp('Číslo musí být větší než 0');
            g2=0;
        else
            g2=1;
        end;
    end;
    g22=1;
end;
end;
while g33==0;
    disp('Pro výpočet momentové a výkonové charakteristiky zadejte následující štičkové
hodnoty stroje');
    g3=0;
    while g3==0;
        Un=input('Zadejte napětí statoru: ');
        if Un<=0;
            disp('Číslo musí být větší než 0');
            g3=0;
        else
            g3=1;
        end;
    end;
end;
```

```

end;
g3=0;
while g3==0;
    n_stat=input('Zadejte otáčky statoru: ');
    if n_stat<=0;
        disp 'Číslo musí být větší než 0';
        g3=0;
    else
        g3=1;
    end;
end;
g3=0;
while g3==0;
    n_rot=input('Zadejte otáčky rotoru: ');
    if n_rot<=0;
        disp 'Číslo musí být větší než 0';
        g3=0;
    else
        g3=1;
    end;
end;
g33=1;
end;
while g44==0;
    skluz_v=input('Zadejte pro jaký jeden specifický skluz se mají zobrazit hodnoty: ');
    g4=0;
    if skluz_v<0 || skluz_v>1;
        disp 'Číslo musí být mezi 0 a 1';
        g4=0;
    else
        g4=1;
    end;
end;
g44=1;
end;

FiK_rad=acos(cosFiK);
Fi0_rad=acos(cosFi0);
fiK_deg=acosd(cosFiK);
fi0_deg=acosd(cosFi0);
% zjišťování konečných bodů X a Y souřadnic proudů Ikn a IO
nacrRE=Ikn*cos(FiK_rad);
nacrIM=Ikn*sin(FiK_rad);
nacrRE=IO*cos(Fi0_rad);
nacrIM=IO*sin(Fi0_rad);
% vykreslování do grafů
figure(1)
hold on
do stejného grafu
title('Kružnicový diagram asynchronního stroje');
xlabel('Imaginární');
ylabel('Reálná');
axis on;
axis equal;
ve stejném poměru (1:1)
ax = gca;
ax.YMinorGrid = 'on';
ax.XMinorGrid = 'on';
set(gcf, 'Position', [100, 100, 1000, 800]);

```

```

plot([0,nakrIM],[0,nakrRE],'color',pomoc); %vykreslení proudu nakrátko Ik
plot([0,naprIM],[0,naprRE],'color',pomoc); %vykreslení proudu naprázdno I0
% vytváření přímky výkonů
PVX=[naprRE,nakrRE]; %přímka výkonů, souřadnice X
PVY=[naprIM,nakrIM]; %přímka výkonů, souřadnice Y
Primkavyk=polyfit(PVY,PVX,1); %proložení bodů lineární funkcí,
výsledek rovnice je rovnic Ax+B
smernice_PV=Primkavyk(1); %smernice primky mezi Ikn a I0,
hodnota u x (A)
konst_PV=Primkavyk(2); %posuv primky, konstanta, prusecik s Y
(B)
plot([nakrIM,naprIM],[nakrRE,naprRE],'color',modra); %vykreslení přímky výkonu
prusecvyk= -konst_PV/smernice_PV; %průsečík výkonu s imag osou
text(naprIM+(nakrIM-naprIM)/1.5,naprRE+(nakrRE-
naprRE)/1.5,'PV','color',modra,'verticalAlignment','top'); %úprava a příkaz pro správné
umístění popisu
% první spojnice na střed, normála na přímku výkonů mezi Ikn a I0
Stred_PRIMKA1_RE1=(nakrRE+naprRE)/2; %střed Přímky výkonů pro reálné
Stred_PRIMKA1_IM1=(nakrIM+naprIM)/2; %střed Primky výkonů pro
imaginární
Stred_PRIMKA1_IM2=(smernice_PV*Stred_PRIMKA1_RE1+Stred_PRIMKA1_IM1); %průsečík
normálového vektoru s imaginární osou
PVKX=[Stred_PRIMKA1_RE1,0]; %určení bodů pro vykreslení
kolmice
PVKY=[Stred_PRIMKA1_IM1,Stred_PRIMKA1_IM2]; %od středu PV do průsečíku s IM
osou
kon=polyfit(PVKY,PVKX,1); %lineární proložení bodů
PV_norm_smernice=kon(1); %smernice kolmého vektoru
p9=plot(PVKY,PVKX,'--','color',pomoc); %První spojnice na střed, kolmice
na přímku výkonu
set(p9,'Tag','pomoc9');
%kolmice v bodě I0 a přímka proudů
SP_IM=(nakrRE/nakrIM)*naprIM; %zjišťuji průsečík kolmice na
imaginární osu, která prochází bodem I0, rychlost růstu Ik * koncová hodnota I0 v y
souřadnicích
SPX=[naprRE;SP_IM]; %body kolmice v reálné ose
SPY=[naprIM,naprIM]; %body kolmice v imaginární ose
Stred_PRIMKA2_RE=(naprRE+SP_IM)/2;
Stred_PRIMKA2_IM1=(naprIM);
Stred_PRIMKA2_IM2=(Stred_PRIMKA1_IM2+Stred_PRIMKA2_RE/PV_norm_smernice); %průsečík
normály PV a přímky proudů
%Spojnice proudů - body
SP_STRX=[Stred_PRIMKA2_RE,Stred_PRIMKA2_RE];
SP_STRY=[Stred_PRIMKA2_IM1,Stred_PRIMKA2_IM2];
p1=plot(SP_STRY,SP_STRX,'--','color',pomoc); %kolmice na imaginární osu,
procházející bodem I0
set(p1,'Tag','pomoc1');
p2=plot(SPY,SPX,'--','color',pomoc); %Druhá spojnice na střed
set(p2,'Tag','pomoc2');
% Střed kružnice
Stred_KR=[Stred_PRIMKA2_RE;Stred_PRIMKA2_IM2];
polomer=sqrt((Stred_PRIMKA2_IM2-Stred_PRIMKA2_IM1)^2+(Stred_PRIMKA2_RE-naprRE)^2); %poloměr
kružnice
UheIFI=linspace(0,2*pi); %vytvoření pole, ze kterého se dopočítávají
jednotlivé body kružnice, defaultně 100 bodů
IM_KR=polomer*sin(UheIFI)+Stred_KR(2); %poloha bodů na imaginární ose
RE_KR=polomer*cos(UheIFI)+Stred_KR(1); %poloha bodů na reálné ose
plot(IM_KR,RE_KR,'k'); %vykreslení kružnice

```

```

plot(Stred_KR(2),Stred_KR(1),'+k');
text(Stred_KR(2)+1,Stred_KR(1),'S');
% Přímka momentů
PM_ImagX=[naprRE,naprRE]; %Pomocná Imag přímka
PM_ImagY=[naprIM,nakrIM];
PM_Rea1X=[naprRE,nakrRE]; %Pomocná Reálná přímka
PM_Rea1Y=[nakrIM,nakrIM];
% hledání bodu M poměrem odporů
R2_car=R2*k^2;
Bod_M2_R1=((nakrRE-naprRE)*(R1/(R1+R2_car)));
Bod_M2_R2=(nakrRE-naprRE)*R2_car/(R1+R2_car);
Bod_M(1)=nakrRE-Bod_M2_R2;
Bod_M(2)=nakrIM;
p3=plot(PM_ImagY,PM_ImagX,'--','color',pomoc); %pomocná přímka pro PM, rovnoběžná s
Imag osou, prochází bodem I0
set(p3,'Tag','pomoc3');
p4=plot(PM_Rea1Y,PM_Rea1X,'--','color',pomoc); %pomocná přímka pro PM, rovnoběžná s
Reálnou osou, prochází bodem Ik
set(p4,'Tag','pomoc4');
Bod_MX=[naprRE Bod_M(1)]; %x souřadnice
Bod_MY=[naprIM Bod_M(2)]; %y souřadnice
PrimkaMom_obec=polyfit(Bod_MY,Bod_MX,1); %proložení bodů lineární funkcí,
výsledek rovnice je rovnic Ax+B
smernice_PM=PrimkaMom_obec(1); %smernice primky mezi Ikn a I0, hodnota
u x (A)
konst_PM=PrimkaMom_obec(2); %posuv primky, konstanta, prusecik s Y
(B)
Bod_M_dal(1)=smernice_PM*(Bod_M(2)+5)+konst_PM;
Bod_M_dal(2)=Bod_M(2)+5;
plot([naprIM Bod_M_dal(2)],[naprRE Bod_M_dal(1)],'color',modra); %přímka momentů
text(naprIM+(Bod_M(2)-naprIM)/1.5,naprRE+(Bod_M(1)-
naprRE)/1.5,'PM','color',modra,'verticalAlignment','top'); %úprava a příkaz pro správné
umístění popisu
plot(Bod_M(2),Bod_M(1),'+k');
text(Bod_M(2)+0.5,Bod_M(1),'M','verticalAlignment','top');
% Přímka skluzů
%Vytvoření rovnoběžky s PM, hodnoty imag jsou stejné, k reálným se přičte
%libovolná konstanta - způsobí posun nahoru
zvyseni=polomer; %posun nahoru
POM_P SX=Bod_MX+zvyseni; %navýšení reálných souřadnic o konstantu
POM_P SY=Bod_MY; %body imaginární zůstávají stejné
Primka_Skluz_obec=polyfit(POM_P SY,POM_P SX,1); %proložení body přímkou
smernice_PS_obec=Primka_Skluz_obec(1); %obecná směrnic primky skluzů
konst_PS=Primka_Skluz_obec(2); %posuv primky skluzů

%obecná tečna v bodě I0
%Úsečka střed - I0
TEC1=[naprRE,Stred_KR(1)]; %body pomocné tečny pro souřadnice X
TEC2=[naprIM,Stred_KR(2)]; %body pomocné tečny pro souřadnice Y
Primka_Tecna_obec=polyfit(TEC2,TEC1,1); %obecná tečna pro zjištění směrnic
smernice_TEC_pom=Primka_Tecna_obec(1);
konst_TEC_pom=Primka_Tecna_obec(2);
TEC_IM=naprIM-(zvyseni*smernice_TEC_pom); %pomocný výpočet imaginární souřadnice pro
tečnu
TEC_X=[POM_P SX(1), TEC_IM]; %souřadnice tečny
TEC_Y=[naprRE,naprIM]; %souřadnice tečny

%Průsečík primky výkonů a primky skluzů

```

```

PrusPV_PS_IM=(konst_PV-konst_PS)/(smernice_PS_obec-smernice_PV);      %výpočet průsečíku
dvou přímk imaginární souřadnice
PrusPV_PS_RE=PrusPV_PS_IM*smernice_PS_obec+konst_PS;                %výpočet průsečíku
dvou přímk reálné souřadnice

%Přímka skluzů
Primka_Sk_RE=POM_PSX(1)-(naprIM-TEC_IM)*smernice_PS_obec;
Primka_SkluzuIM=[TEC_IM,PrusPV_PS_IM];
Primka_SkluzuRE=[Primka_Sk_RE,PrusPV_PS_RE];
Primka_Skluz=polyfit(Primka_SkluzuIM,Primka_SkluzuRE,1);             %proložení body přímkou
plot(Primka_SkluzuIM,Primka_SkluzuRE,'color',[0.15 0.51 0.24]);     %vykreslení přímky
skluzu v celém rozsahu
plot(TEC_IM,Primka_Sk_RE,'+','color',[0.15 0.51 0.24]);
text(TEC_IM,Primka_Sk_RE,'s=0','color',[0.15 0.51 0.24],'verticalAlignment','top');
plot(PrusPV_PS_IM,PrusPV_PS_RE,'+','color',[0.15 0.51 0.24]);
text(PrusPV_PS_IM,PrusPV_PS_RE,'s=1','color',[0.15 0.51 0.24],'verticalAlignment','top');
% Tečna ke kružnici v bodě I0
TECNA_X=[Primka_Sk_RE,naprRE];                                       %body tečny pro souřadnice X
TECNA_Y=[TEC_IM,naprIM];                                             %body tečny pro souřadnice Y
Tecna=polyfit(TECNA_Y,TECNA_X,1);                                    %proložení body přímkou
smernice_TEC=Primka_Skluz(1);                                        %obecná směrnice přímky skluzů
konst_TEC=Primka_Skluz(2);
p5=plot(TECNA_Y,TECNA_X,'--','color',pomoc);
set(p5,'Tag','pomoc5');
Protnuti=konst_TEC/smernice_TEC;                                     %prusečík tečny s osou y

%Přímka účinnosti
Vyska=PrusPV_PS_RE+2;                                               %úřčení výšky přímky účinnosti - vodorovná s imag
osou, jen navýšení od průsečíku PV a PS
PrimkaUC_RE=[Vyska,vyska];                                          %hodnoty pro reálnou osu
KOL_PRUS_S=-1/smernice_TEC_pom*prusecVYK-konst_TEC_pom;           %dopočet vzdálenosti posunu,aby
kolmice pro N100 procházela průsečíkem
N100=-smernice_TEC_pom*(Vyska-konst_TEC_pom+KOL_PRUS_S);          %bod přímky účinnosti 100
N00=(Vyska-konst_PV)/smernice_PV;                                   %bod přímky účinnosti 0
PrimkaUC_IM=[N100,N00];
TEC_PU_RE=[0,Vyska];
TEC_PU_IM=[prusecVYK,N100];
p6=plot(TEC_PU_IM,TEC_PU_RE,'--','color',pomoc);
set(p6,'Tag','pomoc6');
plot(PrimkaUC_IM,PrimkaUC_RE,'color',[0.4 0.18 0.57]);
p7=plot([naprIM,N00],[naprRE,vyska],'--','color',pomoc);          %prodloužení přímky výkonů z
Ikn
set(p7,'Tag','pomoc7');
plot(N100,vyska,'+','color',[0.4 0.18 0.57]);
text(N100,vyska,'n=100','color',[0.4 0.18 0.57],'verticalAlignment','top');
plot(N00,vyska,'+','color',[0.4 0.18 0.57]);
text(N00,vyska,'n=0','color',[0.4 0.18 0.57],'verticalAlignment','top');
% přímka skluzu samotna
PS_Sirka=PrusPV_PS_IM-TEC_IM;                                       %potřebuji znát šířku přímky (šířku v
imaginárních souřadnicích)
PS_Vyska=PrusPV_PS_RE-Primka_Sk_RE;                                 %potřebuji znát výšku přímky (výšku v reálných
souřadnicích)
%začátek přímky skluzu +celková šířka IM * smernice přímky skluzů * skluz
%počítám v podstatě vzdálenost bodu od počátku přímky skluzů, skluz je prakticky zadán
přímo v procentech, proto není nutný další přepočet
BodS_IM=(TEC_IM+(PS_Sirka*skluz_V));
BodS_RE=(Primka_Sk_RE+(PS_Vyska*skluz_V));
skluz_vybrany=polyfit([naprIM,BodS_IM],[naprRE,BodS_RE],1);

```

```

Smernice_SV=skluz_vybrany(1);
konst_SV=skluz_vybrany(2);
plot(BodS_IM,BodS_RE,'+', 'Color',[0.15 0.51 0.24]);
popis=sprintf('S=%.2f',skluz_V);
t=text(BodS_IM,BodS_RE,popis, 'Color',[0.15 0.51 0.24], 'VerticalAlignment','top');

% Výpočet pro určitý skluz
%hledám průsečík obecné přímky skluzu pro zvolenou hodnotu a kružnice
%do obecné rovnice středové kružnice je dosazena
%upravená rovnice přímky -> následují úpravy, poté vznikne kvadratická rovnice, ze které
dostaneme rovnici pro
%výpočet diskriminantu, platné může být jenom jedno číslo, proto v
%závislosti na znaménku u směrnice se přičítá nebo odečítá odmocnina, druhý
%kořen nemá smysl zvažovat
R=1;
if Smernice_SV<0 ; %výpočet průsečíku PS a kružnice pro imaginární
souřadnice, dle znaménka směrnice se počítá s + nebo - odmocninou
    P_IM=(-(2*(Smernice_SV*konst_SV-Smernice_SV*Stred_PRIMKA2_RE-Stred_PRIMKA2_IM2))-
sqrt((2*(Smernice_SV*konst_SV-Smernice_SV*Stred_PRIMKA2_RE-Stred_PRIMKA2_IM2))^2-
4*(Smernice_SV^2+1)*(Stred_PRIMKA2_RE^2-polomer^2+Stred_PRIMKA2_IM2^2-
2*konst_SV*Stred_PRIMKA2_RE+konst_SV^2)))/(2*(Smernice_SV^2+1));
else
    P_IM=(-(2*(Smernice_SV*konst_SV-Smernice_SV*Stred_PRIMKA2_RE-
Stred_PRIMKA2_IM2))+sqrt((2*(Smernice_SV*konst_SV-Smernice_SV*Stred_PRIMKA2_RE-
Stred_PRIMKA2_IM2))^2-4*(Smernice_SV^2+1)*(Stred_PRIMKA2_RE^2-
polomer^2+Stred_PRIMKA2_IM2^2-
2*konst_SV*Stred_PRIMKA2_RE+konst_SV^2)))/(2*(Smernice_SV^2+1));
end
P_RE=P_IM*Smernice_SV+konst_SV; %výpočet průsečíku PS a kružnice pro reálné
souřadnice

KOL_PRUS_S=-1/smernice_TEC_pom*P_IM-konst_TEC_pom-P_RE;
KOL_prumer=-1/smernice_TEC_pom*P_IM+(konst_TEC_pom-KOL_PRUS_S); %kolmice na
průměr, přímku procházející středem
smernice_KOL=-1/smernice_TEC_pom;
konst_KOL=(konst_TEC_pom-KOL_PRUS_S);

bod_E_IM2_V(R)=(konst_PM-konst_KOL)/(smernice_KOL-smernice_PM); %hledání bodu E
imag. souřadnic
bod_E_RE2_V(R)=smernice_PM*bod_E_IM2_V(R)+konst_PM; %hledání bodu E
reálných souřadnic
vyska_BOD_E_V(R)=(hypot([bod_E_IM2_V(R)-P_IM],[P_RE-bod_E_RE2_V(R)])); %počítání délky
úsečky
bod_F_IM2_V(R)=(konst_PV-konst_KOL)/(smernice_KOL-smernice_PV);
bod_F_RE2_V(R)=smernice_PV*bod_F_IM2_V(R)+konst_PV;
vyska_BOD_F_V(R)=(hypot([bod_F_IM2_V(R)-P_IM],[P_RE-bod_F_RE2_V(R)]));
bod_C_IM2_V(R)=-konst_KOL/smernice_KOL;
bod_C_RE2_V(R)=0;
vyska_BOD_C_V(R)=(hypot([bod_C_IM2_V(R)-P_IM],[P_RE-bod_C_RE2_V(R)]));
bod_D_IM2_V(R)=(naprRE-konst_KOL)/(smernice_KOL);
bod_D_RE2_V(R)=naprRE;
vyska_BOD_D_V(R)=(hypot([bod_D_IM2_V(R)-P_IM],[P_RE-bod_D_RE2_V(R)]));

fprintf('\n Při skluzu %.2f má stroj následující hodnoty:\n',skluz_V);
p10=plot([bod_C_IM2_V,R,P_IM],[0,P_RE], 'Color',[0 0.6 0.6]); %vykreslení
kolmice na průměr kružnice procházející bodem I o zadaném skluzu
set(p10, 'Tag', 'pomoc10');
p8=plot([naprIM,Stred_KR(2)],[naprRE,Stred_KR(1)], '--', 'Color',[pomoc]);

```

```

set(p8,'Tag','pomoc8');
% proud statorem při zadaném skluzu
Proud_stat=hypot(P_IM,P_RE); %velikost proudu statorem I1
CosFi_ST=P_RE/Proud_stat; %účinník proudu pro zadaný skluz
Fi_deg=acosd(CosFi_ST); %převod účinníku na úhel ve stupních
Fi_rad=acos(CosFi_ST);

%převod účinníku na úhel v radiánech
polomer2=5;
UhelFI=linspace(0,Fi_rad,10); %vytvoření pole, ze kterého se dopočítávají
jednotlivé body kružnice, defaultně 100 bodů
IM_KR=polomer2*sin(UhelFI); %poloha bodů na imaginární ose
RE_KR=polomer2*cos(UhelFI); %poloha bodů na reálné ose
plot(IM_KR,RE_KR,'color',[0.62 0.04 0.04]);
text((IM_KR(end)/3.5),(polomer2/2),'phi','color',[0.62 0.04
0.04],'verticalAlignment','bottom','horizontalAlignment','center');
fprintf('Proud statorem má hodnotu %.2f A\n',Proud_stat);
plot([P_IM,0],[P_RE,0],'color',[0.62 0.04 0.04]);
fprintf('Cos(fi) proudu statorem je %.4f, což je %.2f stupňů \n',CosFi_ST,Fi_deg);

% Proud rotorem I^2
Proud_rot=hypot(P_IM-naprIM,P_RE-naprRE); %velikost proudu rotorem I^2
fprintf('Proud rotorem má hodnotu %.2f A\n',Proud_rot);
plot([P_IM,naprIM],[P_RE,naprRE],'color',[1.0 0.4 0.15])
% přímka účinnosti
PU_Sirka=N00-N100; %celková šířka přímky
Ucinnost_IM=-(Skluz_vybrany(2)-vyska)/Skluz_vybrany(1); %bod účinnosti stroje pro
vybraný skluz
plot([Ucinnost_IM,P_IM],[Vyska,P_RE],'--','color',[1.0 0.4 0.15]); %prodloužení
přímky procházející vybraným skluzem
Ucinnost=(1-((Ucinnost_IM-N100)/PU_Sirka))*100; %výpočet účinnosti stroje v
procentech
fprintf('Účinnost stroje je %.1f procent\n',Ucinnost); %zobrazení vypočtené hodnoty
zaokrouhlené na 2 desetinná místa
popis=sprintf('n=%.1f',Ucinnost);
plot(Ucinnost_IM,vyska,'+','color',[0.4 0.18 0.57]);
text(Ucinnost_IM,vyska,popis,'color',[0.4 0.18 0.57],'verticalAlignment','bottom');
plot(P_IM,P_RE,'+','color',[0.62 0.04 0.04]);
popis=sprintf('I_{1}');
text((P_IM/2),(P_RE/2),popis,'color',[0.62 0.04
0.04],'horizontalAlignment','right','verticalAlignment','bottom');
popis=sprintf('I_{2}/c');
text(naprIM+(P_IM-naprIM)/2,naprRE+(P_RE-naprRE)/2,popis,'color',[1.0 0.4
0.15],'verticalAlignment','top','horizontalAlignment','left');
osaX=[N00,0]; %příkazy pro vykreslení úseček jako os X a Y
osaY=[Vyska,0];
plot([-5,N00],[0,0],'k');
plot([0,0],[Vyska+5,-5],'k');
% výpočet hodnot z grafu
mi=1; %měřítko proudů
mp=sqrt(3)*Un*mi; %měřítko výkonů
ws=pi()*n_stat/30; %synchronní otáčky
mm=mp/ws; %měřítko momentů
Pricon=vyska_BOD_C_V*mp; %výpočet příkonu stroje
Moment=vyska_BOD_E_V*mm; %výpočet momentu stroje
Vykon_pres_mezeru=vyska_BOD_E_V*mp; %výpočet výkonu přeneseného přes
vzduchovou mezeru
Vykon_stroje=(vyska_BOD_F_V)*mp; %výpočet výkonu stroje

```

```

Ztraty_rot=(vyska_BOD_E_V-vyska_BOD_F_V)*mp;           %výpočet ztrát v rotoru
Ztraty_stat=(vyska_BOD_D_V-vyska_BOD_E_V)*mp;         %výpočet ztrát ve statoru
Ztraty_P0=(vyska_BOD_C_V-vyska_BOD_D_V)*mp;          %výpočet ztrát naprázdno

% výpočet bodů pro momentovou charakteristiku
R=1;           %pomocná konstanta následně určující pozice prvků v matici
S=1;           %pomocná konstanta následně určující pozice prvků v matici
skluzu=(0:krok:1);
for s=skluzu;           %výpočet pro více skluzů
    skluz(R)=s;           %tvorba matice, s každou smyčkou se
    zapisuje hodnota skluzu na R-tou pozici
    BodS_IM=(TEC_IM+(PS_Sirka*skluz(R)));           %stejná část programu jako dříve, jen
    upravená pro tvorbu matice
    BodS_RE=(Primka_Sk_RE+(PS_Vyska*skluz(R)));
    skluz_vybrany=polyfit([naprIM,BodS_IM],[naprRE,BodS_RE],1);
    Smernice_SV=skluz_vybrany(1);
    konst_SV=skluz_vybrany(2);
    if Smernice_SV<0 ;           %výpočet průsečíku PS a kružnice pro
    imaginární souřadnice, dle znaménka směrnice se počítá s + nebo - odmocinou
        P_IM=(-(2*(Smernice_SV*konst_SV-Smernice_SV*Stred_PRIMKA2_RE-Stred_PRIMKA2_IM2))-
sqrt((2*(Smernice_SV*konst_SV-Smernice_SV*Stred_PRIMKA2_RE-Stred_PRIMKA2_IM2))^2-
4*(Smernice_SV^2+1)*(Stred_PRIMKA2_RE^2-polomer^2+Stred_PRIMKA2_IM2^2-
2*konst_SV*Stred_PRIMKA2_RE+konst_SV^2)))/(2*(Smernice_SV^2+1));
    else
        P_IM=(-(2*(Smernice_SV*konst_SV-Smernice_SV*Stred_PRIMKA2_RE-
Stred_PRIMKA2_IM2))+sqrt((2*(Smernice_SV*konst_SV-Smernice_SV*Stred_PRIMKA2_RE-
Stred_PRIMKA2_IM2))^2-4*(Smernice_SV^2+1)*(Stred_PRIMKA2_RE^2-
polomer^2+Stred_PRIMKA2_IM2^2-
2*konst_SV*Stred_PRIMKA2_RE+konst_SV^2)))/(2*(Smernice_SV^2+1));
    end
    P_RE=P_IM*Smernice_SV+konst_SV;           %výpočet průsečíku PS a kružnice pro reálné
    souřadnice

    %kolmice na usečku procházející středem kružnice, a která prochází bodem zvoleného
    skluzu
    KOL_PRUS_S=-1/smernice_TEC_pom*P_IM-konst_TEC_pom-P_RE;
    KOL_prumer=-1/smernice_TEC_pom*P_IM+(konst_TEC_pom-KOL_PRUS_S);           %kolmice na
    průměr, přímkou procházející středem
    smernice_KOL=-1/smernice_TEC_pom;
    konst_KOL=(konst_TEC_pom-KOL_PRUS_S);

    bod_E_IM2(R)=(konst_PM-konst_KOL)/(smernice_KOL-smernice_PM);
    bod_E_RE2(R)=smernice_PM*bod_E_IM2(R)+konst_PM;
    vyska_BOD_E(R)=(hypot([bod_E_IM2(R)-P_IM],[P_RE-bod_E_RE2(R)]))*mm;
    bod_F_IM2(R)=(konst_PV-konst_KOL)/(smernice_KOL-smernice_PV);
    bod_F_RE2(R)=smernice_PV*bod_F_IM2(R)+konst_PV;
    vyska_BOD_F(R)=(hypot([bod_F_IM2(R)-P_IM],[P_RE-bod_F_RE2(R)]))*mp;
    bod_C_IM2(R)=-konst_KOL/smernice_KOL;
    bod_C_RE2(R)=0;
    vyska_BOD_C(R)=(hypot([bod_C_IM2(R)-P_IM],[P_RE-bod_C_RE2(R)]));
    bod_D_IM2(R)=(naprRE-konst_KOL)/(smernice_KOL);
    bod_D_RE2(R)=naprRE;
    vyska_BOD_D(R)=(hypot([bod_D_IM2(R)-P_IM],[P_RE-bod_D_RE2(R)]));
    %
    %% plot([P_IM],[P_RE]),'g')
    % plot([bod_E_IM2(R),P_IM],[bod_E_RE2(R),P_RE],'b')
    % plot([bod_F_IM2(R),P_IM],[bod_F_RE2(R),P_RE],'c')

```



```

Proud_stat(R)=hypot(P_IM,P_RE); %velikost proudu statorem I1
CosFi_ST(R)=P_RE/Proud_stat(R); %účinník proudu pro zadaný skluz
Fi_deg(R)=acosd(CosFi_ST(R)); %převod účinníku na úhel ve
stupník
Fi_rad(R)=acos(CosFi_ST(R)); %převod účinníku na úhel v
radiánech
Proud_rot(R)=hypot(P_IM-naprIM,P_RE-naprRE); %velikost proudu rotorem I'2
Ucinnost_IM=- (Skluz_vybrany(2)-vyska)/Skluz_vybrany(1); %bod účinnosti stroje pro
vybraný skluz
Ucinnost(R)=(1-((Ucinnost_IM-N100)/PU_Sirka))*100;
zapsat(R,:)= [skluz(R) Proud_stat(R) CosFi_ST(R) Proud_rot(R) vyska_BOD_E(R)
vyska_BOD_F(R) Ucinnost(R)];
R=R+1;
end
% Vypsání hodnot stroje
fprintf('Příkon stroje %.2f W\n',Prikon);
fprintf('Moment stroje %.2f Nm\n',Moment);
fprintf('výkon stroje přes vzduchovou mezeru %.2f W\n',vykon_pres_mezeru);
fprintf('výkon stroje %.2f W\n',vykon_stroje);
fprintf('velikost ztrát v rotoru %.2f W\n',Ztraty_rot);
fprintf('velikost ztrát ve statoru %.2f W\n',Ztraty_stat);
fprintf('velikost ztrát v železe %.2f W\n',Ztraty_PO);
savefig('MyPlot.fig');
close(gcf)
% Hledání maxima
desetina=round(log10(1/krok)); %pomocný výpočet na kolik desetinych míst
se má skluz zaokrouhlit, vychází ze zvolené jemnosti kroku
sn=round(((n_stat-n_rot)/n_stat),desetina); %jmenovitý moment stroje
JMEN=find(skluz==sn); %pozice jmenovité hodnoty
figure(2) %nové okno s grafy
subplot(2,1,1); %tvorba prvního grafu v okně
hold on
set(gcf, 'Position', [1100, 100, 500, 800]);
plot(skluz,vyska_BOD_E,'Color',modra);
axis([0 1 0 inf]); %úprava zobrazení os
[MaxVal,MaxIndex]=max(vyska_BOD_E); %zjišťování max hodnoty a pozice této hodnoty v
matici pro bod E (moment)
maxskluz=sprintf('Maximální moment je %.2f Nm při skluzu %.2f
\r\n',MaxVal,skluz(MaxIndex));
fprintf('Maximální moment je %.2f Nm při skluzu %.2f \n',MaxVal,skluz(MaxIndex));
plot([skluz(MaxIndex),skluz(MaxIndex)], [MaxVal,0], '--', 'Color',modra);
title('Momentová charakteristika stroje'); %titulek
plot([skluz(JMEN),skluz(JMEN)], [vyska_BOD_E(JMEN),0], '--', 'Color',modra);
popis=sprintf('M_{max}',skluz_V);
text([skluz(MaxIndex)+0.01], [vyska_BOD_E(JMEN)/2], 'M_{max}', 'Color',modra, 'HorizontalAlignm
ent', 'left');
text([skluz(JMEN)+0.01], [vyska_BOD_E(JMEN)/2], 'M_{n}', 'Color',modra, 'HorizontalAlignment', '
left');
xlabel('skluz'); %popis os
ylabel('moment [Nm]');
hold off
subplot(2,1,2) %tvorba druhého grafu ve stejném okně
hold on
plot(skluz,vyska_BOD_F,'Color',modra);
axis([0 1 0 inf]);
[MaxVal,MaxIndex]=max(vyska_BOD_F);
fprintf('Maximální výkon je %.2f W při skluzu %.2f \n',MaxVal,skluz(MaxIndex));
plot([skluz(MaxIndex),skluz(MaxIndex)], [MaxVal,0], '--', 'Color',modra);

```

```

plot([skluz(JMEN),skluz(JMEN)], [vyska_BOD_F(JMEN),0], '--', 'color',modra);
fprintf('Při jmenovitém skluzu %.2f je výkon je %.2f W a moment %.2f Nm
\n',skluz(JMEN),vyska_BOD_F(JMEN),vyska_BOD_E(JMEN))
title('výkonová charakteristika stroje'); %titulek
text([skluz(MaxIndex)+0.01],[vyska_BOD_F(JMEN)/2], 'P_{max}','color',modra);
text([skluz(JMEN)+0.01],[vyska_BOD_F(JMEN)/2], 'P_{n}','color',modra);
xlabel('skluz'); %popis os
ylabel('výkon [W]');
hold off
% vypsání hodnot do souboru

fig = openfig('MyPlot.fig'); %opětovné otevření grafu s nastavením
parametrů pro jednotlivé přímky
axesObjs = get(fig, 'Children');
dataObjs = get(axesObjs, 'Children');
zapis=input('Chcete spočítaná data zapsat do souboru? (1=ANO,0=NE)\n');
switch zapis;
case 1 %v případě že chce uživatel zapsat data
navez=sprintf('Data_stroje%.0f.txt',T); %tvorba proměnné, kde je vložen měnicí se
název, aby v případě další smyčky nedošlo k přepsání vytvořeného souboru ke změně dat
fid=fopen(navez,'w'); %vytvoření souboru
fprintf(fid, 'Vstupní data stroje:\r\n')
fprintf(fid, 'I0 %.2f \r\ncos(fi0) %.4f \r\nIk %.2f \r\ncos(fik) %.4f \r\nprevod
%.4f \r\nR1 %.4f \r\nR2 %.4f \r\nUn %.2f \r\nn_stat %.2f \r\nn_rot %.2f \r\n', I0, cosfi0,
Ikn, cosfik, k, R1, R2, Un, n_stat, n_rot);
fprintf(fid, '\r\nPro vybraný skluz %.2f byla vypočítána data\r\n',skluz_v);
fprintf(fid, 'Příkon stroje %.2f W\r\n',Prikon);
fprintf(fid, 'Moment stroje %.2f Nm\r\n',Moment);
fprintf(fid, 'výkon stroje přes vzduchovou mezeru %.2f W\r\n',vykon_pres_mezeru);
fprintf(fid, 'výkon stroje %.2f W\r\n',vykon_stroje);
fprintf(fid, 'velikost ztrát v rotoru %.2f W\r\n',Ztraty_rot);
fprintf(fid, 'velikost ztrát ve statoru %.2f W\r\n',Ztraty_stat);
fprintf(fid, 'velikost ztrát v železe %.2f W\r\n',Ztraty_P0);
fprintf(fid, maxskluz);
fprintf(fid, 'Maximální výkon je %.2f W při skluzu %.2f
\r\n',MaxVal,skluz(MaxIndex));
fprintf(fid, 'Při jmenovitém skluzu %.2f je výkon je %.2f W a moment %.2f Nm
\r\n',skluz(JMEN),vyska_BOD_F(JMEN),vyska_BOD_E(JMEN));
fprintf(fid, '\r\ns\tI1\tcos(fi)\tI2\tM\tP\tucinnost\r\n');

for ii = 1:size(zapsat,1) %pomocná smyčka pro zápis hodnot z
matice pro všechny vypočítané skluzu
fprintf(fid, '%.2f\t',zapsat(ii,:));
fprintf(fid, '\r\n');
end
fclose(fid);
T=T+1;
case 0
end;

po=0;
while po==0; %smyčka pro volbu videlnosti pomocných
přímek (čárkovaných)
pomocne=input('Chcete schovat nebo zobrazit pomocné přímky?\n0=NIC A
POKRAČOVAT\n1=ZOBRAZIT\n2=SCHOVAT\n');
switch pomocne
case 2

```

```

set(findobj(dataObjs, 'Tag', 'pomoc1'), 'visible', 'off');
set(findobj(dataObjs, 'Tag', 'pomoc2'), 'visible', 'off');
set(findobj(dataObjs, 'Tag', 'pomoc3'), 'visible', 'off');
set(findobj(dataObjs, 'Tag', 'pomoc4'), 'visible', 'off');
set(findobj(dataObjs, 'Tag', 'pomoc5'), 'visible', 'off');
set(findobj(dataObjs, 'Tag', 'pomoc6'), 'visible', 'off');
set(findobj(dataObjs, 'Tag', 'pomoc7'), 'visible', 'off');
set(findobj(dataObjs, 'Tag', 'pomoc8'), 'visible', 'off');
set(findobj(dataObjs, 'Tag', 'pomoc9'), 'visible', 'off');
set(findobj(dataObjs, 'Tag', 'pomoc10'), 'visible', 'off');
case 1
set(findobj(dataObjs, 'Tag', 'pomoc1'), 'visible', 'on');
set(findobj(dataObjs, 'Tag', 'pomoc2'), 'visible', 'on');
set(findobj(dataObjs, 'Tag', 'pomoc3'), 'visible', 'on');
set(findobj(dataObjs, 'Tag', 'pomoc4'), 'visible', 'on');
set(findobj(dataObjs, 'Tag', 'pomoc5'), 'visible', 'on');
set(findobj(dataObjs, 'Tag', 'pomoc6'), 'visible', 'on');
set(findobj(dataObjs, 'Tag', 'pomoc7'), 'visible', 'on');
set(findobj(dataObjs, 'Tag', 'pomoc8'), 'visible', 'on');
set(findobj(dataObjs, 'Tag', 'pomoc9'), 'visible', 'on');
set(findobj(dataObjs, 'Tag', 'pomoc10'), 'visible', 'on');
case 0
po=1;
end;
end;
%dotaz, chce li uživatel zkusit program znovu s jinými hodnotami, v
%případě odpovědi 0=NE ukončení programu
ukoncit=input('Chcete změnit vstupní hodnoty? (1=ANO,0=NE)\n');
if ukoncit==0;
break;
else
disp('Jaké hodnoty chcete změnit?');
disp('1 - pouze určitý skluz')
disp('2 - proudy stroje')
disp('3 - štítkové hodnoty stroje')
disp('4 - odpory, převod')
disp('5 - všechno')
disp('6 - už nic')
key=0;
cnt=0;
while key==0;
cnt=cnt+1;
zmena_glob=input('Vaše volba: ');
switch zmena_glob
case 1
g44=0;
case 2
g11=0;
case 3
g22=0;
case 4
g33=0;
case 5
g11=0;g22=0;g33=0;g44=0;
key=1;
case 6
key=1;
end;
end;

```

```
    if cnt==10
        disp('To už by stačilo! (>.<)');
        key=1;
    end;
end;
end;
vymaz=input('Chcete vytvořit nové grafy nebo ponechat staré? (nové=1, ponechat=0)\n');
%zavře vytvořené grafy
if vymaz==1;
    close all;
else
    end;
end;
```

Příloha 2 - Ukázka obsahu výstupního souboru programu

Vstupní data stroje:

I_0 7.80

$\cos(\varphi_0)$ 0.1776

I_k 48.67

$\cos(\varphi_k)$ 0.6628

prevod 2.3842

R_1 1.2000

R_2 0.2933

U_n 380.00

n_{stat} 1500.00

n_{rot} 1390.00

Pro vybraný skluz 0.30 byla vypočítána data

Příkon stroje 15642.35 W

Moment stroje 75.58 Nm

Výkon stroje přes vzduchovou mezeru 11871.82 W

Výkon stroje 8277.31 W

Velikost ztrát v rotoru 3594.51 W

Velikost ztrát ve statoru 2854.71 W

Velikost ztrát v železe 915.81 W

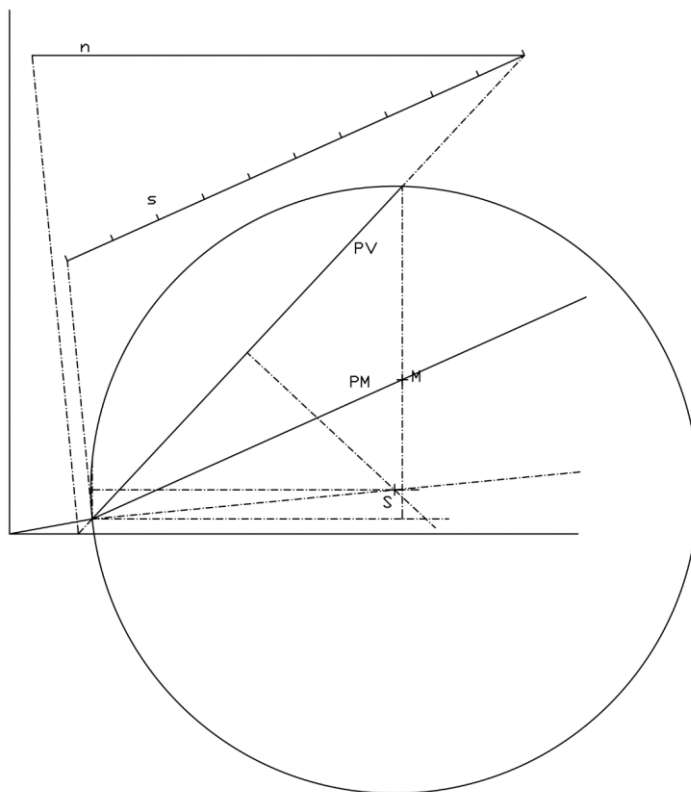
Maximální moment je 84.55 Nm při skluzu 0.52

Maximální výkon je 8280.49 W při skluzu 0.29

Při jmenovitém skluzu 0.07 je výkon je 3821.69 W a moment 26.42 Nm

s	I1	cos(fi)	I2	M	P	ucinnost
0.00	7.80	0.18	0.00	0.55	108.81	97.97
0.01	7.91	0.27	0.79	3.14	446.01	96.22
0.02	8.20	0.39	1.80	7.31	1082.45	94.50
0.03	8.63	0.49	2.80	11.37	1691.30	92.81
0.04	9.17	0.56	3.79	15.32	2269.79	91.14
...						
0.31	28.83	0.84	24.12	76.54	8262.81	54.20
0.32	29.40	0.83	24.65	77.44	8237.67	53.07
....						
0.98	48.42	0.67	41.97	72.93	177.85	1.10
0.99	48.55	0.66	42.09	72.60	91.88	0.55
1.00	48.67	0.66	42.20	72.27	108.81	-0.00

Příloha 3 - Kružnicový diagram vytvořený pomocí AutoCAD, stroj 1

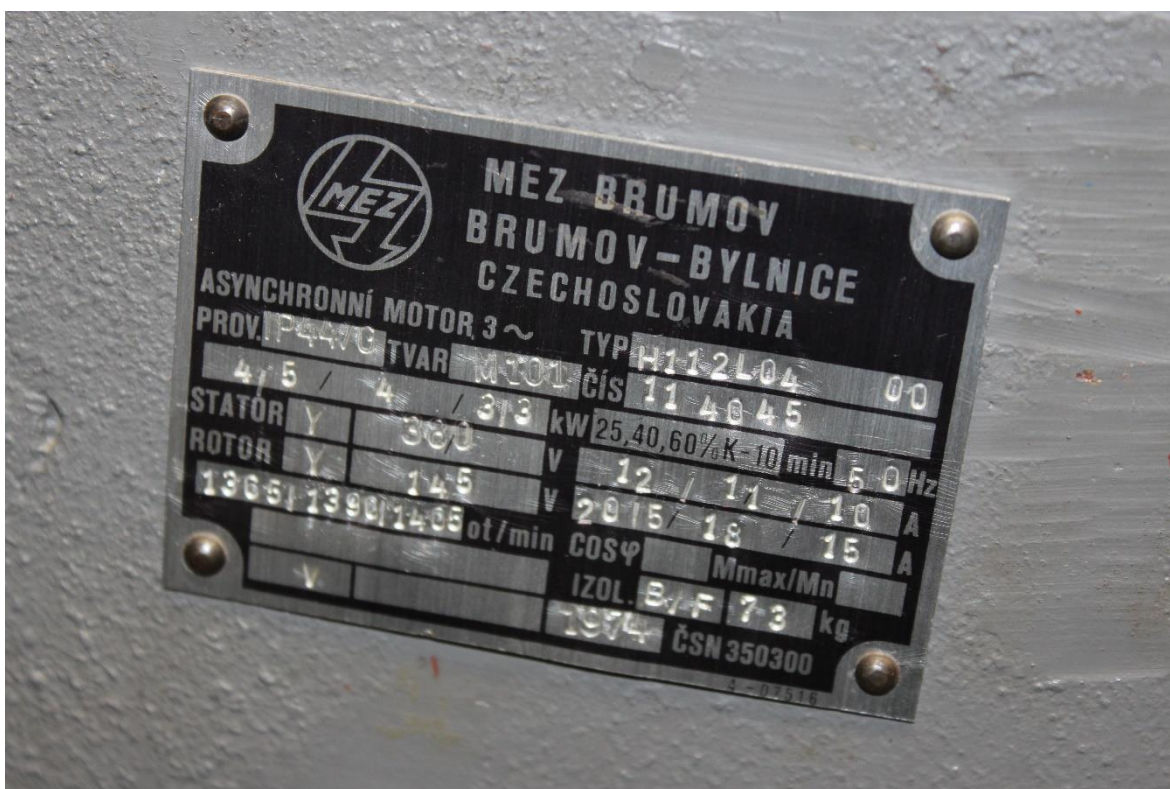


Příloha 4 - Fotografie z měření strojů

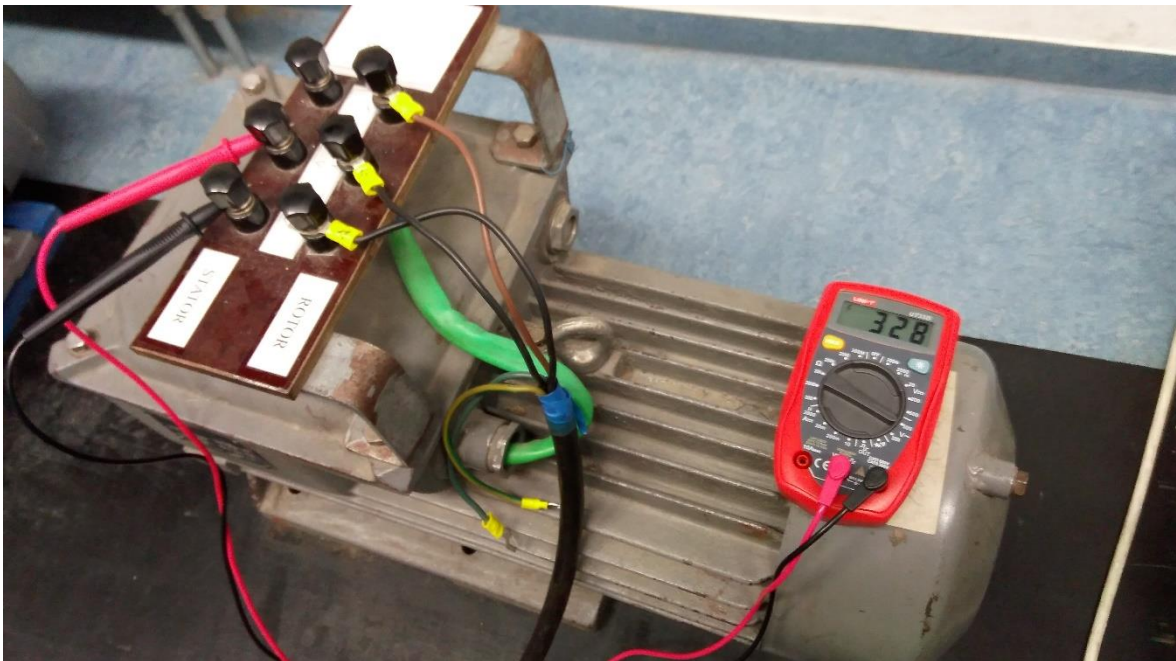
Stroj 1



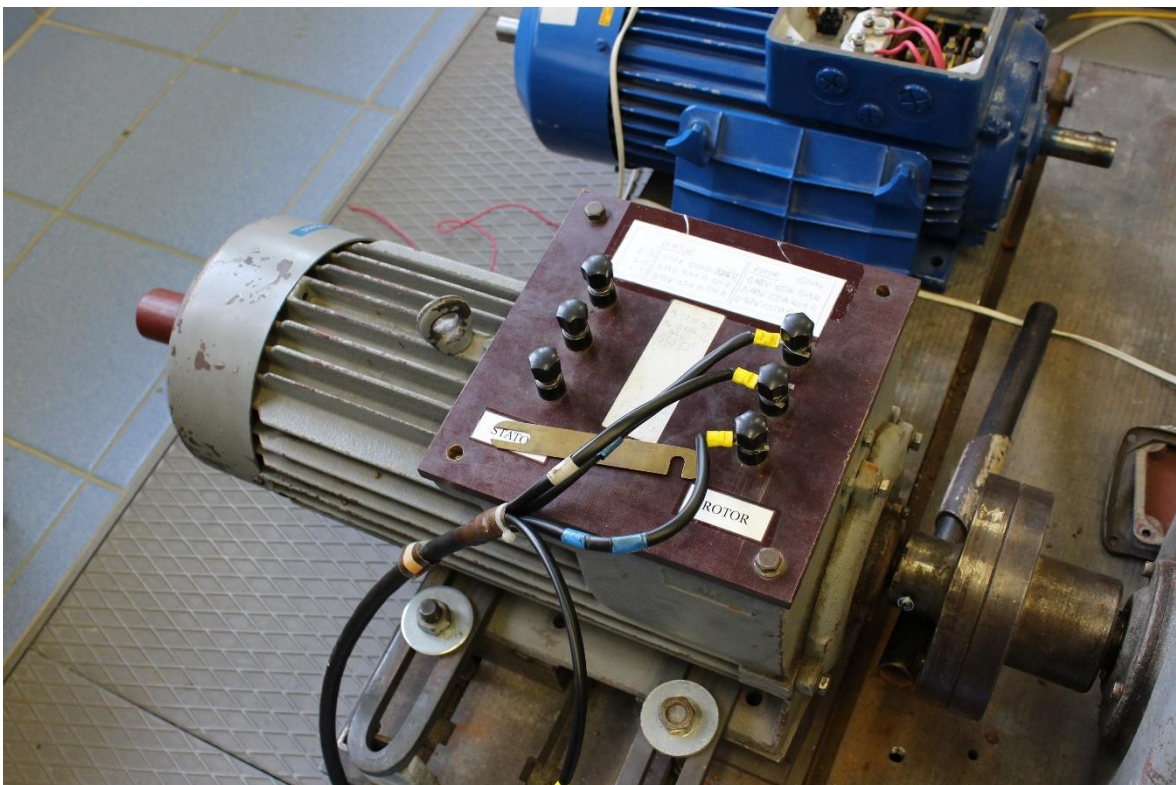
Štítek stroje 1



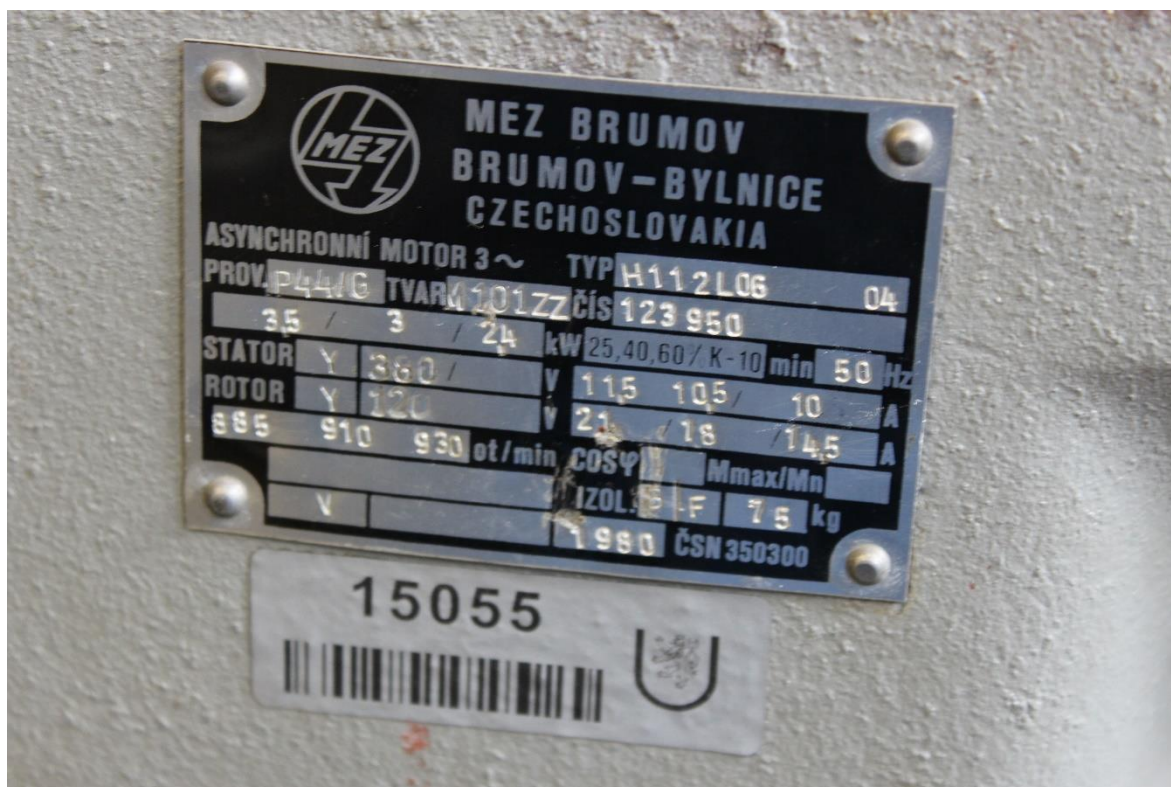
Měření převodu



Stroj 2



Štítek stroje 2



Měření převodů

