



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrických pohonů a trakce

Automatizace měření asynchronního motoru

Automation measuring of induction motor

bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

Vedoucí práce: Ing. Vít Hlinovský, CSc.

Stanislav Dupal

Praha 2016

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrických pohonů a trakce

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Stanislav Dupal**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Název tématu: **Automatizace měření asynchronního motoru**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Rozbor typové zkoušky – výběr vhodných měření pro automatizaci
- 2) Přenos dat z měřicího přístroje do PC po sběrnici GPIB, USB, RS232
- 3) Automatizace měření v prostředí LabWindows
- 4) Experimentální ověření měření na asynchronním motoru Siemens

Seznam odborné literatury:

- [1] HRABOVCOVÁ, V., RAFAJDUS, P., FRANKO, M a HUDÁK, P. Meranie a modelovanie elektrických strojov. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 2009. ISBN 978-80-8070-924-2.
[2] MĚŘIČKA, J., HAMATA, V., VOŽENÍLEK, P. Elektrické stroje. Praha: ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02109-2.
[3] KONSTANTINOVICH, G.: Zkoušení elektrických strojů v průmyslu ,SNTL:1954

Vedoucí: Ing. Vít Hlinovský, CSc.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2016/2017



Ing. Jan Bauer, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 1. 4. 2016

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....
Jméno a příjmení

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Vítu Hlinovskému, CSc. za odborný dohled, vedení práce a poskytnutí softwaru k potřebného k řešení práce.

Klíčová slova

Asynchronní motor, Norma D4000, automatizace měření, LabWindows

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je provést rozbor zkoušek prováděných na asynchronním motoru. Tyto zkoušky poté za pomoci výkonového analyzátoru Norma D4000 a programu vytvořeným v prostředí LabWindows vyzkoušet na motoru Siemens. Změřená data, shromážděná v MS Excel poté graficky zpracovat a vyhodnotit.

Keywords

Induction motor, Norma D4000, automatization measuring, LabWindows

Abstract

The objective of this bachelor's degree project is analyzing test methods of induction motor. After these test are performed on Siemens motor by using power analyzer Norma D4000 and a program created in a development environment of LabWindows. The measured data collected in MS Excel process graphically and evaluate

Obsah

Seznam obrázků	7
1. Úvod	8
2. Asynchronní motor.....	8
2.1. Konstrukce.....	8
2.2. Princip činnosti	9
2.2.1 Náhradní schéma.....	9
2.2.2 Výkonová bilance.....	11
2.2.2 Moment asynchronního motoru	12
2.3. Provozní stavy.....	14
2.2.1. Chod naprázdno	14
2.2.2. Chod nakrátko	14
3. Typové zkoušky	14
3.1. Měření odporu vinutí	14
3.2. Měření naprázdno	16
3.2.1. Zpracování výsledků měření naprázdno.....	17
3.3. Měření nakrátko	18
3.3.1. Zpracování výsledků měření nakrátko	18
3.4. Měření pracovních charakteristik	19
3.4.1 Zpracování výsledků měření pracovních charakteristik	20
3.5. Měření momentové charakteristiky.....	21
3.5.1. Zpracování výsledků měření momentové charakteristiky	21
4. Automatizace měření	23
4.1. Výkonový analyzátor Norma D4000.....	23
4.1.1 Připojení měřených objektů k výkonnému analyzátoru	23
4.2. Rozhraní RS-232	24
4.3. NI USB-9215.....	25
4.4. Program v LabWindows.....	25
5. Měření na motoru Siemens.....	27
5.1. Motor Siemens řady 1LA7	27
5.2. Schéma zapojení.....	28
5.3. Použité stroje.....	28
5.4 Postup měření	29
5.4.1. Měření nakrátko.....	29
5.4.2. Měření momentové charakteristiky.....	29
5.5 Výsledky měření	30

5.5.1. Výsledky měření naprázdno	30
5.5.2. Výsledky měření momentové charakteristiky	31
6. Závěr	32
7. Seznam literatury	33
8. Přílohy	34

Seznam obrázků

Obrázek 1 Zapojení statorového vinutí – zdroj [7]	8
Obrázek 2 Klecové rotorové vinutí – zdroj[2]	9
Obrázek 3 Náhradní schéma AS motoru- zdroj [2]	11
Obrázek 4 Výkonová bilance AS motoru - zdroj	12
Obrázek 5 Upravené náhradní schéma pro výpočet	13
Obrázek 6 Odhad průběhu momentové charakteristiky – zdroj [2]	13
Obrázek 7 Schéma zapojení měření odporu jedné fáze – zdroj [1]	15
Obrázek 8 Schéma měření odporu vinutí při zapojení do Y – zdroj [1]	15
Obrázek 9 Schéma měření odporu vinutí pro zapojení do Δ – zdroj [1]	16
Obrázek 10 Schéma zapojení motoru při měření na prázdno – zdroj [1]	16
Obrázek 11 Charakteristika naprázdno AS motoru- – zdroj [1]	18
Obrázek 12 Charakteristika nakrátko AS motoru – zdroj [1]	19
Obrázek 13 Schéma zapojení pro měření pracovních charakteristik – zdroj [1]	20
Obrázek 14 Pracovní charakteristiky AS motoru- – zdroj [1]	21
Obrázek 15 Momentová charakteristika AS motoru – zdroj [1]	22
Obrázek 16 Výkonový analyzátor Norma D4000 – zdroj [4]	23
Obrázek 17 Zadní strana výkonového analyzátoru s vývody pro připojení do obvodu – zdroj [4]	24
Obrázek 18 Rozhraní RS-232 – zdroj[9]	25
Obrázek 19 Měřicí karta NI USB-9215 – zdroj [6]	25
Obrázek 20 Blokové schéma ovládacího programu	26
Obrázek 21 Ovládací panel programu a tabulka Excel s šablonou	26
Obrázek 22 Asynchronní motor Siemens 1LA7 – zdroj [5]	27
Obrázek 23 Schéma zapojení měřené úlohy	28
Obrázek 24 Štítek AS motoru Siemens 1LA7	28
Obrázek 25 Naměřená závislost $P_p=f(U)$ a $\Delta P_0=f(U)$	30
Obrázek 26 Naměřená závislost $I=f(U)$ a $\cos\varphi=f(U)$	31
Obrázek 27 Naměřená závislost $M=f(n)$ a $I=f(n)$	31

1. Úvod

V minulosti se měření provádělo pomocí klasických ručkových přístrojů, ze kterých se naměřené hodnoty odečítaly manuálně, a každý přístroj měřil pouze jednu specifickou veličinu. Tento způsob vizuálního odečtu veličin, byl závislý na individuální přesnosti odečtu hodnoty zpracovatelem. A docházelo tak k častým chybám a nepřesnostem. Postupem času došlo k vývoji a využívání digitálních multimetrů při měření. Tyto přístroje umí měřit více veličin. Zároveň došlo k potlačení chyby odečtu hodnot, nicméně stále bylo potřebné údaje manuálně zpracovávat, což je možný zdroj chyb. S rozšířením a vývojem výpočetní techniky, vznikla možnost jejího využití při měření a sběru naměřených dat. Moderní měřicí přístroje umožňují měření několika veličin současně a zároveň pomocí některého z rozhraní přenášet tyto hodnoty do PC. Tomuto stavu, kdy není potřeba, aby do procesu měření a sběru zasahoval člověk, říkáme automatizace. V případě této práce bude automatizace měření využita pro měření na asynchronním motoru.

Tato bakalářská práce je členěna do čtyř částí. V první části je teoreticky rozebrán princip funkce a konstrukce asynchronního stroje. V další části jsou popsány typové zkoušky, které se na asynchronním motoru provádí. Předposlední část obsahuje popis hardwaru a softwaru, jenž byl použit při automatizaci měření. Nakonec byla provedena experimentální zkouška na motoru značky Siemens.

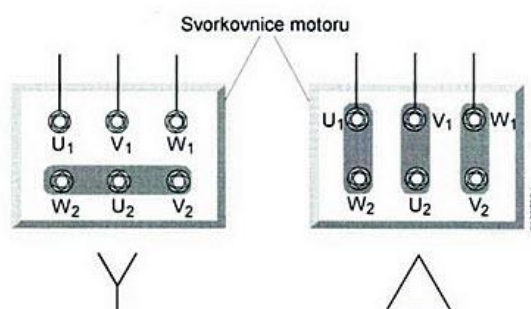
2. Asynchronní motor

Asynchronní stroje se nejčastěji využívají jako motory, kdy přeměňují elektrickou energii na mechanickou. Asynchronní motory jsou nejrozšířenější elektromotory vůbec a to zejména kvůli jejich jednoduchosti v porovnání s ostatními, ceně, spolehlivosti a nízké potřeby údržby. Asynchronní motory ale mají i několik nevýhod. Mezi největší patří špatná regulace rychlosti. Z tohoto důvodu se nejčastěji užívají v zařízeních, která pracují v konstantních rychlostech. Další nevýhodou je velký proudový náraz při spouštění a indukční účinník $\cos \varphi$, který se zhoršuje s klesajícím zatížením motoru a způsobuje jalové zatížení napájecí sítě

2.1. Konstrukce

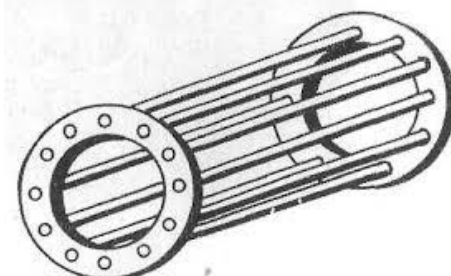
Asynchronní motor se skládá ze dvou základních částí statoru a rotoru.

Stator je pevná část motoru tvořena z nosné části motoru, elektrotechnických plechů, statorového vinutí, svorkovnice a ložiskových štítů. Elektrotechnické plechy jsou připevněny na kostře motoru a jsou drážkovány. Drážky jsou otevřené a polo zavřené. V těchto drážkách je uloženo vinutí, která je od plechů izolována. Začátky a konce vinutí jsou vyvedeny na svorkovnici, která je uspořádaná tak, aby bylo možné zapojit vinutí u třífázového motoru do hvězdy nebo trojúhelníku.



Obrázek 1 Zapojení statorového vinutí – zdroj [7]

Rotor je otočná část motoru skládající se z hřídele, na které jsou nalisovány elektrotechnické plechy. Do těchto plechů jsou pak v závislosti na typu motoru vloženo klecové vinutí, tzv. s kotvou nakrátko nebo třífázové vinutí, které je vyvedeno na kroužky. Na tyto kroužky jsou poté přes sběrací kartáče připojeny odporové spouštěče.



Obrázek 2 Klecové rotorové vinutí – zdroj[2]

2.2. Princip činnosti

Asynchronní stroj je založen na indukci napětí a proudů na rotorovém vinutí motoru proto se o něm můžeme doslechnout jako o stroji indukčním. Při připojení statorového vinutí ke střídavému zdroji začne tímto vinutím procházet střídavý proud. To způsobí vznik točivého magnetického pole, které začne indukovat na rotorovém vinutí napětí, které vyvolá v uzavřeném obvodu rotoru proudy. Toto napětí a proudy se mohou indukovat pouze při rychlosti rotoru odlišné od rychlosti točivého magnetického pole, tedy při asynchronní rychlosti. Vzájemným působením těchto proudů s magnetickým polem statoru vznikne podle Lenzova pravidla moment, který působí proti změně, která ho vyvolala. Rotor se tedy začne pohybovat ve směru magnetického pole statoru. Tím dochází k přeměně elektrické energie na mechanickou a stroj pracuje jako motor. Jelikož i při nezatíženém stavu motoru vznikají na hřídeli mechanické ztráty, které způsobí zatěžovací moment, nemůže nikdy rychlost rotoru dosáhnout rychlosti točivého magnetického pole statoru a tedy synchronní rychlosti, při níž by byl moment roven nule. V případě, že začneme asynchronní stroj mechanicky pohánět a dosáhneme toho, že rychlost otáčení bude vyšší než synchronní, dostaneme stroj do generátorického režimu. V tomto režimu dochází k přeměně mechanické energie na elektrickou. Pokud ovšem poháníme stroj proti smyslu otáčení magnetického pole a otáčky jsou v opačném směru. Pracuje asynchronní stroj jako brzda, neboť moment stroje působí proti vnějšímu mechanickému momentu.

K popsání výše uvedeného principu fungování asynchronního stroje, můžeme použít některé základní vzorce. Úhlová rychlost točivého pole statoru se vypočítá jako:

$$\omega_s = \frac{2\pi f_s}{p}, \quad (1)$$

kde f_s je napájecí frekvence statoru a p je počet pólových dvojic.

Další důležitý vztah je pro výpočet skluzu asynchronního motoru, který má tvar:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2)$$

2.2.1 Náhradní schéma

Asynchronní motor je v mnoha ohledech podobný transformátoru. Statorové a rotorové vinutí jsou vázány magnetickým obvodem se vzduchovou mezerou. Při nepohybujícím se rotoru jsou

napětové rovnice analogické, jako u jednofázového transformátoru. V okamžiku kdy se rotor začne otáčet, začne se měnit jeho úhlová rychlost, což při konstantní úhlové rychlosti statoru zapříčiní změnu skluzu, kmitočtu proudu a skluzové úhlové rychlosti. Tyto změny se projeví pouze u napětové rovnice pro rotor a pro motory s kotvou nakrátko, kde je napětí na rotoru rovno nule dostaneme tyto napětové rovnice:

$$\hat{U}_s = R_s \hat{I}_s + j X_{s\sigma} \hat{I}_s + \hat{U}_{is} \quad (3)$$

$$\hat{U}_{ir} = \frac{R_r}{s} \hat{I}_r + j X_{r\sigma} \hat{I}_r = R_r \hat{I}_r + j X_{r\sigma} \hat{I}_r + \frac{1-s}{s} R_r \hat{I}_r \quad (4)$$

Nyní tyto napětové rovnice můžeme použít k odvození náhradního schématu, které bude analogické náhradnímu schématu transformátoru. Odlišnosti jsou respektovány při přepočtu rotorových veličin a parametrů.

Přepočet se provádí podobně jako u transformátorů a musí být splněny tyto 3 podmínky:

- Rotorové vinutí se nahradí vinutím, které má stejný počet závitů N jako statorové, stejný počet fází m a stejný činitel vinutí k_v
- Energetické poměry ve stroji se nesmí změnit
- Přepočet nesmí mít vliv na statorovou část stroje

Tyto podmínky budou splněny za předpokladu, že nedojde ke změně magnetického toku ϕ , který se nezmění, nezmění-li se magnetomotorické napětí F_m . Z těchto podmínek vyplývá, že přepočtené magnetomotorické napětí F_r' , vytvářené průchodem přepočteného proudu I_r' , se musí rovnat nepřepočtenému magnetomotorickému napětí, a tudíž platí rovnice

$$0,45 * m_s \frac{N_s I_r' k_{sv}}{p} = 0,45 * m_r \frac{N_r I_r k_{rv}}{p} \quad (5)$$

z toho vyplývá vztah pro přepočet proudu

$$I_r' = I_r \frac{N_r m_r k_{rv}}{N_s m_s k_{sv}} \quad (6)$$

Napětí přepočteme z předpokladu, že indukované napětí na statoru je rovno přepočtenému indukovanému napětí rotoru

$$U_{is} = U_{ir}' = U_{ir} \frac{N_s k_{sv}}{N_r k_{rv}} \quad (7)$$

Činný odpor přepočteme z požadovaných rovností Joulových ztrát ve vinutí rotoru před a po přepočtu

$$m_s R_r' I_r'^2 = m_r R_r I_r^2 \quad (8)$$

$$R_r' = R_r \frac{m_s N_s^2 k_{sv}^2}{m_r N_r^2 k_{rv}^2} \quad (9)$$

U přepočtu rozptylových reaktancí využijeme podmínky, že přepočet nesmí mít vliv na statorovou část stroje. Z toho vyplývá, že musí zůstat zachovány poměry činných a jalových složek impedance a vztah pro přepočet je následující

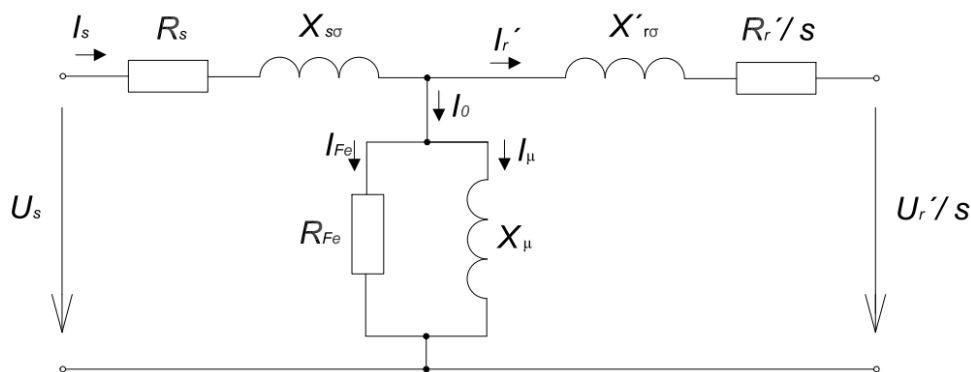
$$X'_{r\sigma} = X_{r\sigma} \frac{m_s N_s^2 k_{sv}^2}{m_r N_r^2 k_{rv}^2} \quad (10)$$

Přepočtené napěťové rovnice mají tedy tvar

$$\hat{U}_s = R_s \hat{I}_s + j X_{s\sigma} \hat{I}_s + \hat{U}_{is} \quad (11)$$

$$\hat{U}'_{ir} = \frac{R'_r}{s} \hat{I}'_r + j X'_{r\sigma} \hat{I}'_r = R'_r \hat{I}'_r + j X'_{r\sigma} \hat{I}'_r + \frac{1-s}{s} R'_r \hat{I}'_r \quad (12)$$

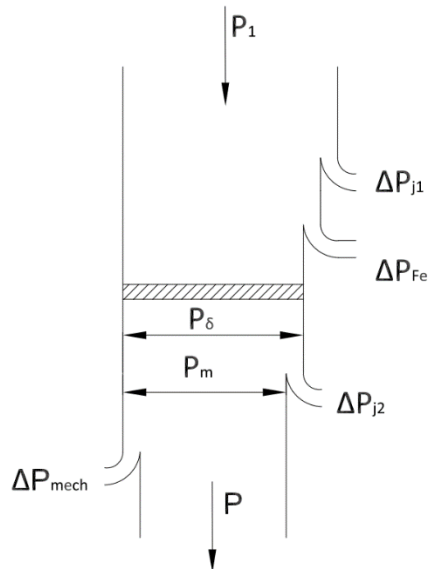
Pomocí rovnic je možné nakreslit náhradní schéma. Pro asynchronní stroje s kotvou nakrátko je napětí na rotoru U_r rovno nule a náhradní schéma je spojeno také spojeno nakrátko.



Obrázek 3 Náhradní schéma AS motoru- zdroj [2]

2.2.2 Výkonová bilance

Na statorové vinutí je přiveden příkon P_1 , jehož část hradí ztráty ve statorovém vinutí P_{j1} a část na ztráty v železe statoru P_{Fe} . Zbývá část příkonu je odváděna ze statoru na rotor přes vzduchovou mezeru jako výkon ve vzduchové mezeře P_{δ} . Část tohoto výkonu hradí ztráty ve vinutí rotoru P_{j2} , zbývající část představuje celkový mechanický výkon P_m , přeměněný z elektrické energie na mechanickou. Skutečný výkon na hřídeli motoru P je pak oproti výkonu P_m snížen o mechanické ztráty P_m .



Obrázek 4 Výkonová bilance AS motoru - zdroj

2.2.2 Moment asynchronního motoru

Za předpokladu, že rotor asynchronního stroje je spojen nakrátko, můžeme pro vnitřní elektromechanický moment využít vztah

$$M = \frac{m_s P_\delta}{\omega_s} = \frac{3 * m_s R_r' I_r'^2}{\omega_s s} \quad (13)$$

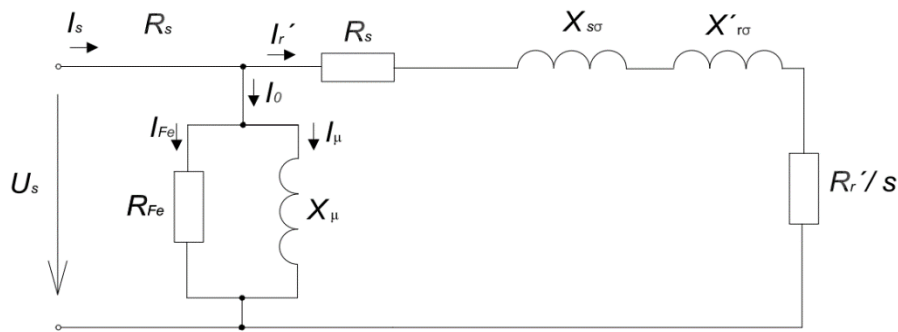
Přepočtený proud rotoru se určí ze zjednodušeného náhradního schématu, kde je příčná větev posunuta na svorky statorového napětí U_s . Z takto pozměněného schématu pak můžeme s přihlédnutím, že komplexní činitel, který respektuje změnu příčné impedance je číslo velmi blízké jedné napsat tuto rovnici

$$I_r' = \frac{U_s}{\sqrt{(R_s + \frac{R_r'}{s})^2 + (X_{s\sigma} + X_{r\sigma}')^2}} \quad (14)$$

Po dosazení do rovnice dostaneme vztah pro moment asynchronního stroje

$$M = \frac{3 * m_s R_r'}{\omega_s s} * \frac{U_s^2}{(R_s + \frac{R_r'}{s})^2 + (X_{s\sigma} + X_{r\sigma}')^2} \quad (15)$$

Z rovnice vyplývá základní poznatek, že moment je úměrný druhé mocnině napájecího napětí U_s .



Obrázek 5 Upravené náhradní schéma pro výpočet

Při sestavování přibližného průběhu závislosti momentu na skluzu asynchronního stroje, budeme vycházet z poznatků, že pro skluzu blízké jedné, změny momentu ovlivňuje hlavně člen R_r'/s , který se v rovnici nachází s čitateli. Proto lze vztah zjednodušeně psát jako

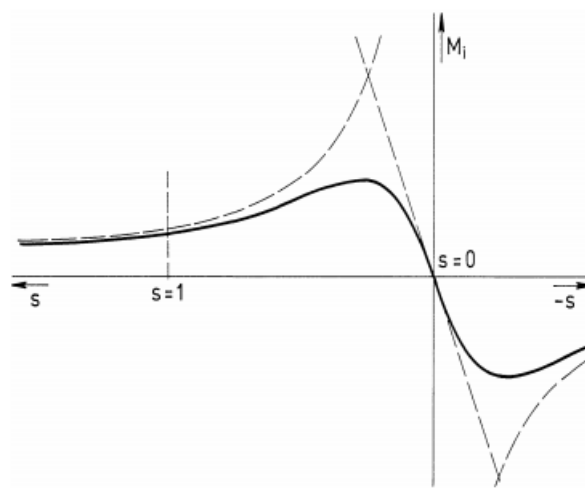
$$M = \frac{3 \cdot m_s R_r'}{\omega_s s} * \frac{U_s^2}{(R_s)^2 + (X_{s\sigma} + X'_{r\sigma})^2} = k_1 \frac{R_r'}{s} \quad (16)$$

Z tohoto zjednodušeného tvaru vyplývá, že pro skluzu blízké jedné má závislost tvar rovnoosé hyperboly.

Pro skluzu blízké nule dosahuje člen R_r'/s vysokých hodnot a je tedy možné zanedbat ostatní hodnoty odporů a reaktancí ve jmenovateli. Dostaneme rovnici

$$M = \frac{3 \cdot m_s s U_s^2}{\omega_s R_r} = k_2 \frac{s}{R_r} \quad (17)$$

Závislost tedy bude mít tvar přímky a bude procházet počátkem. Podle těchto předpokladů můžeme odhadovaný průběh závislosti momentu na skluzu nakreslit graficky.



Obrázek 6 Odhad průběhu momentové charakteristiky – zdroj [2]

2.3. Provozní stavy

2.2.1. Chod naprázdno

Chod naprázdno je stav, při němž je motor nezatížený. Otáčky motoru se blíží otáčkám synchronním. Mechanický výkon na hřídeli je roven nule a mechanické ztráty jsou minimální. Příkon naprázdno je roven součtem ztrát na vinutí motoru, ztrát v železe a mechanických ztrát

$$\Delta P_{10} = \Delta P_{j10} + \Delta P_{Fe10} + \Delta P_{mech} \quad (18)$$

Na rozdíl od transformátorů statorový proud není zanedbatelný a musíme tedy se ztráty ve vinutí statoru počítat. Vlivem vzduchové mezery je proud naprázdno podstatně větší než u transformátoru a má velikost 0,25-0,8 proudu jmenovité. Účinnost naprázdno bývá velice malý a pohybuje se v hodnotách mezi 0,1 až 0,25.

2.2.2. Chod nakrátko

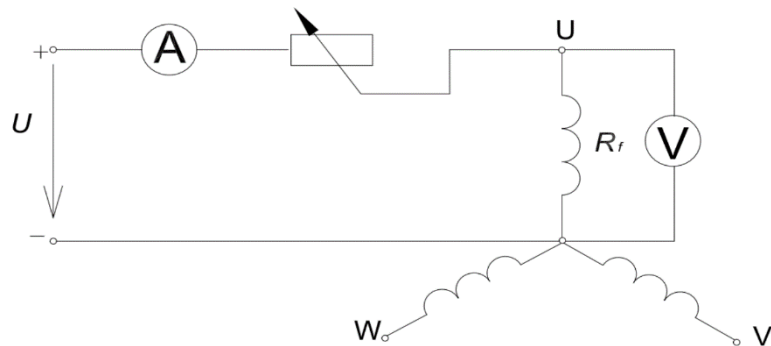
Chod nakrátko je stav, při němž se rotor neotáčí a stator je napájen ze sítě. Náhradní schéma tohoto stavu je stejné s náhradním schématem transformátoru. Poměrná impedance nakrátko je ovšem o 15%-25% větší než u transformátorů. Z tohoto vyplývá, že proud nakrátko je při jmenovitém napětí nižší než u transformátoru. Impedance nakrátko u asynchronních strojů není na rozdíl od transformátorů konstantní, což je způsobeno magnetickým nasycováním motoru, tvarem a geometrickými rozměry drážek. To způsobuje, že závislost proudu nakrátko na napětí není lineární. U transformátorů považujeme chod nakrátko za poruchový stav, u asynchronních motorů s kotvou na krátko je to pracovní stav při spouštění. A hodnoty proudu a momentu nakrátko můžeme označit jako záběrné hodnoty.

3. Typové zkoušky

3.1. Měření odporu vinutí

Měření odporu vinutí asynchronního motoru se provádí Ohmovou metodou na studeném stroji při nepohybujícím se rotoru. Pokud není možné přímo změřit teplotu vinutí, uvažujeme ji stejnou jako je teplota okolí, pokud byl nezahřátý motor o výkonu do 10kW v klidu v daném prostředí alespoň 5 hodin. Měření se provádí alespoň pro tři různé velikosti proudu, které nesmí ohřívat měřené vinutí. Zpravidla hodnoty proudu při měření bývají 0,1 jmenovitého proudu měřeného motoru. Výsledný odpor vinutí vypočteme jako aritmetický průměr změřených odporů vinutí.

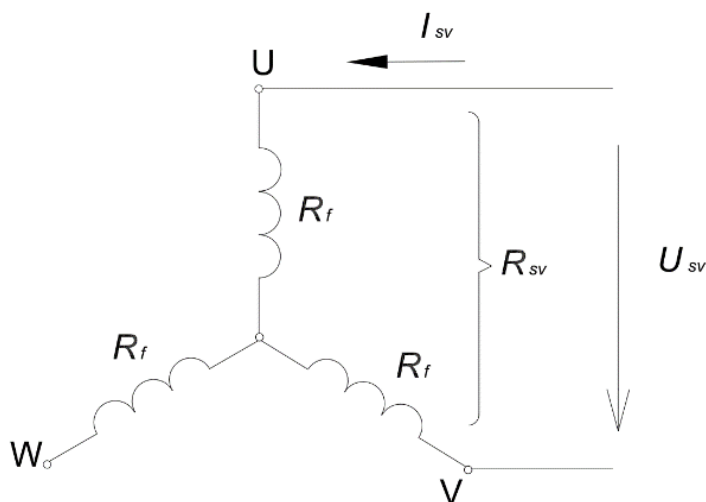
Na strojích, které mají vyvedené začátky a konce vinutí jednotlivých fází, měříme odpory jednotlivých fází zvlášť.



Obrázek 7 Schéma zapojení měření odporu jedné fáze – zdroj [1]

V případě trvalého zapojení vinutí do trojúhelníka či hvězdy měříme odpor mezi vyvedenými svorkami a odpor jednotlivých fází poté dopočtem. Při zapojení do hvězdy vypočteme odpor jedné fáze R_f ze vztahu

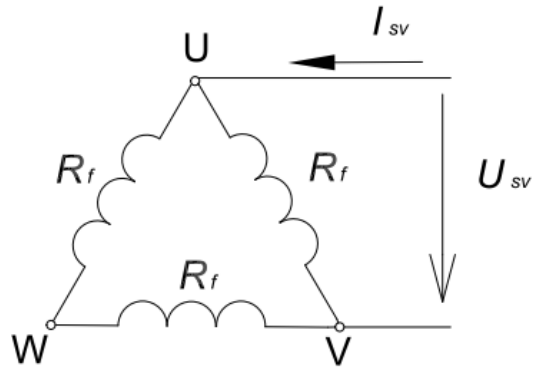
$$R_f = \frac{1}{2} R_{sv} \quad (19)$$



Obrázek 8 Schéma měření odporu vinutí při zapojení do Y – zdroj [1]

Při zapojení vinutí do trojúhelníka platí rovnice

$$R_f = \frac{3}{2} R_{sv} \quad (20)$$



Obrázek 9 Schéma měření odporu vinutí pro zapojení do Δ – zdroj [1]

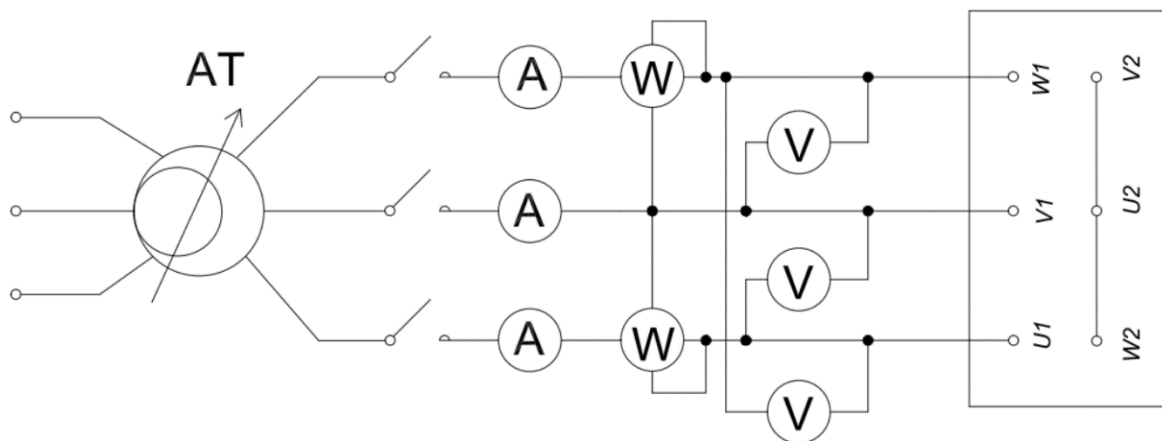
Za pomoci odporu mezi svorkami R_{sv} můžeme vypočítat ztráty ve vinutí i když neznáme vnitřní zapojení stroje, protože tyto ztráty se v obou případech vypočítají ze vzorce

$$\Delta P_{js} = 1,5 * R_{sv} I_{sv}^2 \quad (21)$$

Odpor vinutí rotoru se měří pouze u motorů s kroužkovou kotvou, a provádí se přímo na kroužkách. U motorů s kotvou nakrátko se měření neprovádí.

3.2. Měření naprázdno

Měření naprázdno se provádí pro zjištění proudu naprázdno, účinníku naprázdno, ztrát naprázdno a popřípadě k výpočtu prvků příčné větve náhradního schématu asynchronního motoru. Měření probíhá na nezátíženém stroji, kdy se rychlost otáčení blíží synchronní rychlosti. Motor je napájen z regulovatelného zdroje napětí se stálým kmitočtem. Před zahájením samotného měření je potřeba nechat motor zaběhnout, aby se ustálila teplota ve všech částech motoru a nedocházelo k nežádoucím ztrátám v ložiskách motoru. Měření začínáme při zvýšeném napájecím napětí, asi $1,2U_n$ a toto napětí postupně snižujeme. Z měřících přístrojů odečítáme proudy ve všech fázích motoru, sdružená napětí a příkon naprázdno. Takto změříme asi 7-10 bodů charakteristiky, přičemž nejnižší hodnota napětí, při které se provádí měření je ta, při které dojde k růstu satorového proudu motoru. Po skončení zkoušky naprázdno je potřeba změřit odpor satorového vinutí R_{sf} , pomocí nějž vypočteme ztráty ve vinutí satoru ΔP_{js} .



Obrázek 10 Schéma zapojení motoru při měření na prázdno – zdroj [1]

3.2.1. Zpracování výsledků měření naprázdno

Výsledná hodnota proudu se vypočte jako aritmetický průměr proudů jednotlivých fází. Napětí se vypočte jako aritmetický průměr změřených sdružených napětí. Příkon naprázdno P_0 spočítáme jako součet údajů dvou wattmetrů v Aronovo zapojení.

Ztráty naprázdno ΔP_0 vypočteme ze vzorce

$$\Delta P_0 = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} = P_0 - \Delta P_{js} \quad (22)$$

kde ΔP_{Fe} jsou ztráty v železe, ΔP_{mech} jsou mechanické ztráty a ΔP_{js} jsou ztráty ve vinutí statoru.

Ztráty ve vinutí statoru ΔP_{js} vypočteme ze vzorce

$$\Delta P_{js} = 3 * R_{sf} I_0^2 \quad (23)$$

kde R_{sf} je odpor statorového vinutí fáze a I_0 je proud naprázdno.

Účinník naprázdno $\cos\phi_0$ vypočteme ze vzorce

$$\cos\phi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_0 I_0} \quad (24)$$

kde P_0 je příkon naprázdno, U_0 je sdružené napětí naprázdno a I_0 je proud naprázdno.

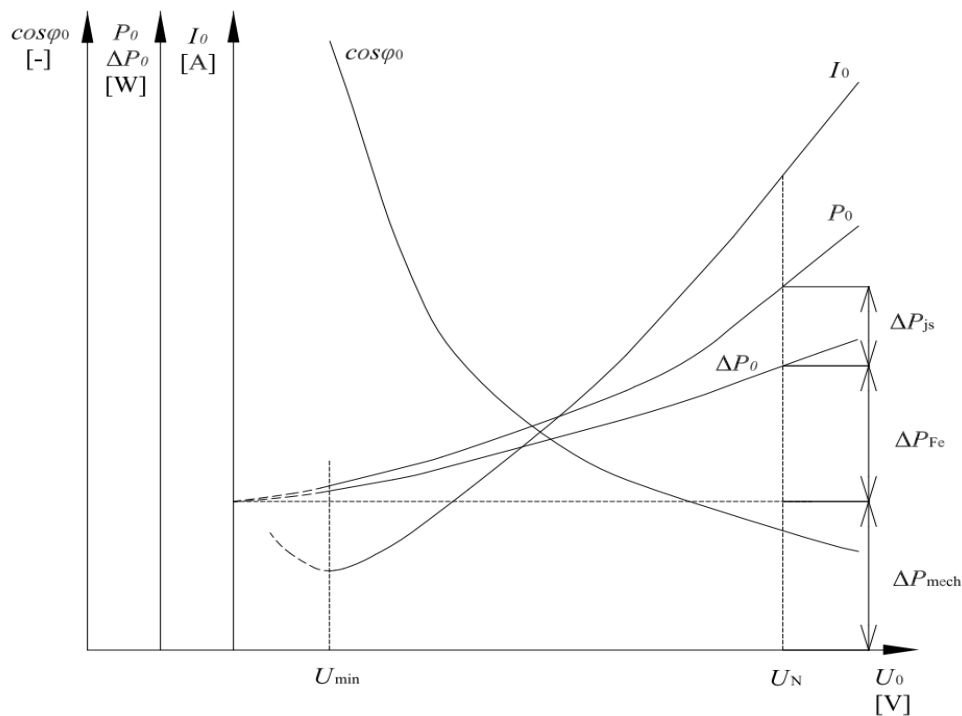
Magnetizační proud I_μ , který tvoří jalovou složku proudu naprázdno, vypočteme podle

$$I_\mu = I_0 \sin\phi_0 \quad (25)$$

,kde

$$\sin\phi_0 = \sqrt{1 - \cos^2\phi_0} \quad (26)$$

Výsledky zkoušky se zpracovávají graficky jako tzv. charakteristika naprázdno, kde vyneseme v závislosti na napětí U_0 hodnoty proudu naprázdno I_0 , příkonu naprázdno P_0 , ztráty naprázdno ΔP_0 a účinník naprázdno $\cos\phi_0$. Ztráty na železe ΔP_{Fe} , které jsou nezávislé na hodnotě napětí U_0 , získáme extrapolací křivky ΔP_0 do osy ztrát při nulovém napětí.



Obrázek 11 Charakteristika naprázdno AS motoru- – zdroj [1]

3.3. Měření nakrátko

Měření nakrátko se provádí za účelem zjištění proudu nakrátko, ztrát nakrátko, účinníku nakrátko a výpočtu prvků podélné větve náhradního schématu. Měření se provádí na zabrzděném motoru s rotorem spojeným nakrátko a při ustáleném stavu poměrů na statorovém vinutí. Tento stav vzniká také při spouštění asynchronního motoru připojením k síti. Z tohoto důvodu lze při této zkoušce zjistit hodnoty záběrného proudu a momentu při spouštění motoru. Při přivedení jmenovitého napětí na svorky motoru začne vinutím procházet několikanásobně větší proud než je jmenovitý a mechanický výkon motoru je nulový, veškerá takto dodávaná energie se formou ztrát mění v motoru na teplo, což způsobuje velice rychle se zvyšující teplotu vinutí a hrozí reálné nebezpečí poškození izolace vinutí. Z tohoto důvodu se zkouška provádí při sníženém napětí, při kterém proud nakrátko nepřesáhne jmenovitý proud motoru. Odečítání hodnot musí probíhat dostatečně rychle, aby se co nejméně projevila chyba způsobená změnou odporu vinutí v důsledku jeho zahřívání. Samotné měření probíhá tak, že na statorové vinutí, přivedeme snížené napětí, které zvýšíme na námi požadovanou hodnotu a poté motor odpojíme. Takto se změří i další body charakteristiky při různých hodnotách napětí, přičemž se začíná napětím nejvyšším. Schéma zapojení je stejné jako při měření naprázdno.

3.3.1. Zpracování výsledků měření nakrátko

Při zpracovávání naměřených hodnot bereme jako hodnotu napětí naprázdno U_k aritmetický průměr změřených sdružených napětí. Výslednou hodnotu proud nakrátko I_k vy počteme jako aritmetický průměr proudů v jednotlivých fázích. Příkon nakrátko P_k vypočteme jako součet hodnot obou wattmetrů v Aronovo zapojení.

Účinník nakrátko $\cos\phi_k$ vypočteme ze vztahu

$$\cos\phi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3}U_k I_k} \quad (27)$$

Ztráty ve vinutí statoru ΔP_{jsk} vypočteme podle vzorce

$$\Delta P_{jsk} = 3 * R_{sfx} I_k^2 , \quad (28)$$

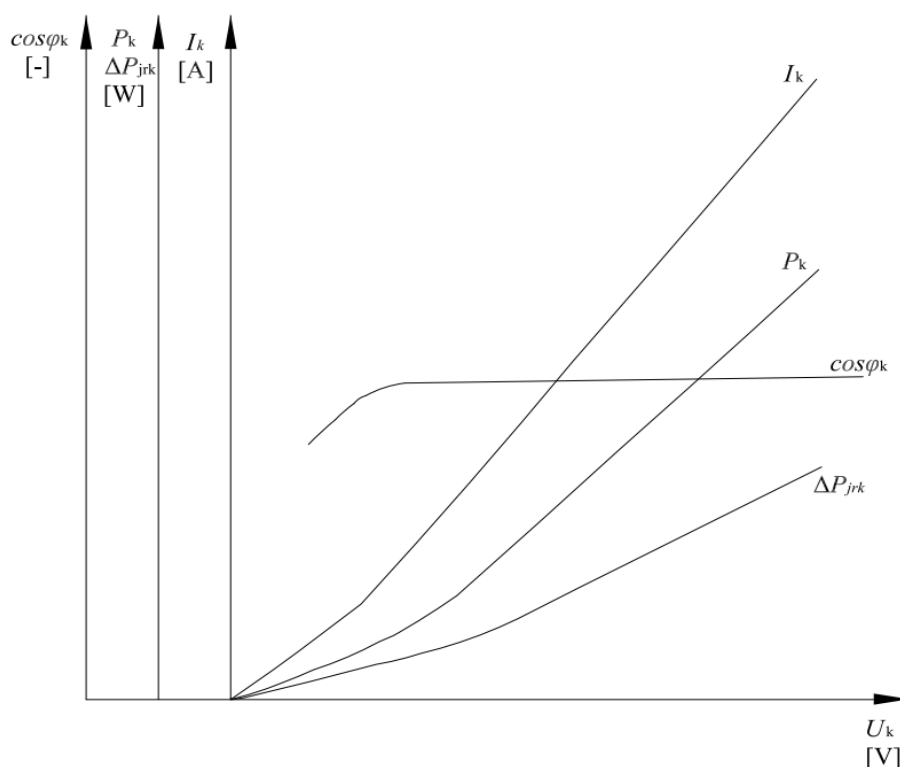
kde R_{sfx} je odpor vinutí jedné fáze při provozní teplotě vinutí v závislosti na třídě izolace.

Ztráty ve vinutí rotoru ΔP_{jrk} získáme z rovnice

$$\Delta P_{jrk} = P_k - \Delta P_{jsk} - \Delta P_{Fe} , \quad (29)$$

kde ΔP_{Fe} jsou ztráty v železe, získané při měření naprázdno při napětí $U_0=U_k$.

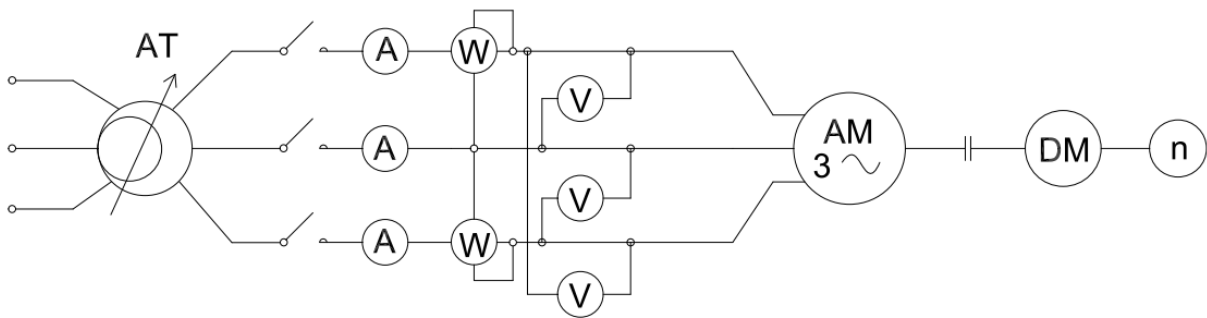
Výsledky zkoušky se zpracovávají graficky jako tzv. charakteristika nakrátko, kde vyneseme v závislosti na napětí U_k hodnoty proudu nakrátko I_k , příkonu nakrátko P_k , ztráty v rotorovém vinutí ΔP_{jrk} a účinník nakrátko $\cos\phi_k$.



Obrázek 12 Charakteristika nakrátko AS motoru – zdroj [1]

3.4. Měření pracovních charakteristik

Pracovní charakteristiky asynchronního stroje vyjadřují závislost příkonu, proudu, skluzu, účinníku a účinnosti na výkonu při konstantním napájecím napětí a frekvenci. Měření se provádí postupnou změnou zatížení motoru, od určitého přetížení až k chodu naprázdno. Motor je potřeba před začátkem měření zahřát do ustáleného provozního stavu, tak aby nedocházelo v průběhu měření ke změnám teplot vinutí. Motory malých a středních výkonů zatěžujeme obvykle elektrickým dynamometrem nebo brzdou, velké asynchronní motory dynamem popřípadě synchronním nebo asynchronním generátorem.



Obrázek 13 Schéma zapojení pro měření pracovních charakteristik – zdroj [1]

3.4.1 Zpracování výsledků měření pracovních charakteristik

Při tomto měření měříme hodnoty vstupního napětí U , jako aritmetický průměr tří naměřených hodnot sdruženého napětí. Vstupní proud I vypočteme jako aritmetický průměr naměřených hodnot proudu. Příkon P_p vypočteme jako součet hodnot obou wattmetrů v Aronovo zapojení. Zatěžovací moment M [Nm] odečteme ze stupnice dynamometru.

Z naměřených hodnot spočítáme účinník $\cos\phi$ jako

$$\cos\phi = \frac{P_p}{\sqrt{3}UI} \quad (30)$$

Rychlost otáčení n [min⁻¹] snímána za pomoci otáčkoměru.

Skluz s vypočteme ze vzorce

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} * 100 [\%], \quad (31)$$

kde n_s je synchronní rychlost, která se vypočítá jako

$$n_s = \frac{60 * f}{p}, \quad (32)$$

kde p je počet pólových dvojic.

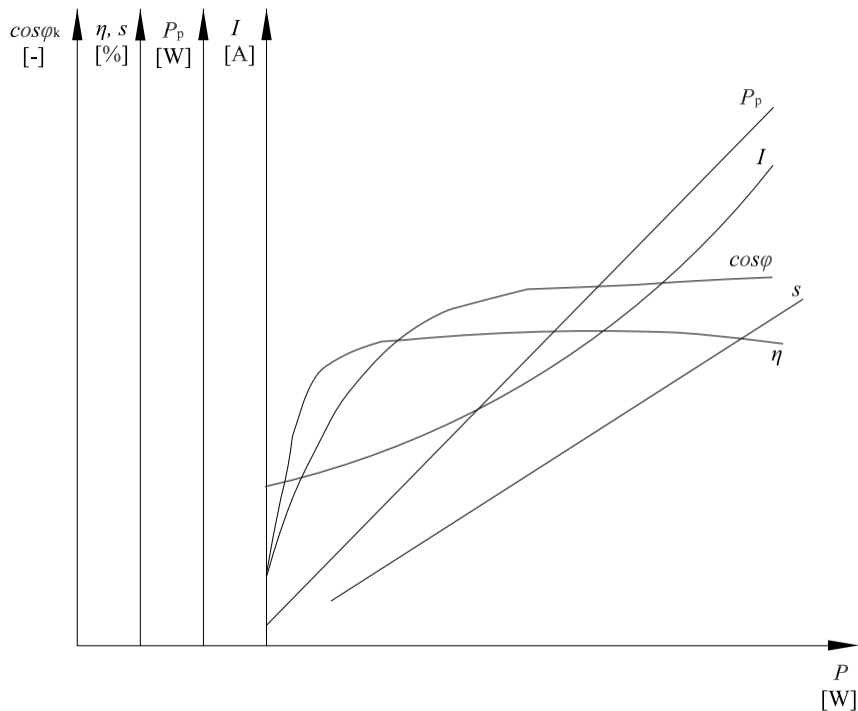
Výkon na hřídeli P vypočteme pomocí momentu na hřídeli a rychlosti její otáčení takto:

$$P = M\Omega = M \frac{2\pi n}{60} \quad (33)$$

Účinnost motoru η poté získáme dosazením do vzorce

$$\eta = \frac{P}{P_p} * 100[\%] \quad (34)$$

Takto naměřené a vypočtené hodnoty poté zpracujeme graficky jako tzv. pracovní charakteristiky.



Obrázek 14 Pracovní charakteristiky AS motoru – zdroj [1]

3.5. Měření momentové charakteristiky

Momentová charakteristika udává závislost elektromagnetického momentu točivého pole na otáčkách nebo skluzu. Skutečný měřitelný moment na hřídeli je menší o moment mechanických ztrát a o část přídavných ztrát. Momentovou charakteristiku můžeme měřit dvěma způsoby.

První způsob je statický, kdy měříme moment v ustáleném stavu pomocí změny brzdného momentu M_{br} . Druhý způsob je dynamický, která zachycuje přechodné děje při rozběhu motoru a lze měřit přímým měřením momentu nebo derivací rychlosti. Dynamická momentová charakteristika se může od statické značně lišit, zvláště u malých motorů s rychlým rozběhem a malou setrvačností.

Statické měření momentové charakteristiky se provádí při sníženém napětí $U_s \approx 0,5 U_{sN}$. Toto napětí udržujeme po celou dobu měření konstantní. Motor nejprve zatížíme dynamometrem až do stavu blízkému stavu nakrátko, kdy se motor točí velice pomalu a odečteme hodnoty statorové proudu I' , momentu M' a otáček n . Dále postupným zvyšováním otáček dynamometru motor odlehčujeme a odečítáme hodnoty n , I' a M' . Takto postupuje do okamžiku, kdy motor dosáhne za pomoci dynamometru synchronních otáček a je v ideálním stavu chodu naprázdno. V tento moment motor odebírá pouze magnetizační proud, ztráty v železe ΔP_{Fe} jsou kryty dynamometrem. Při dalším zvyšování otáček soustrojí, přejde asynchronní stroj do generátorického stavu. V případě, že máme možnost měřit i při jmenovitém napětí, změříme si pro kontrolu tímto způsobem pár bodů charakteristiky pro ověření výsledků.

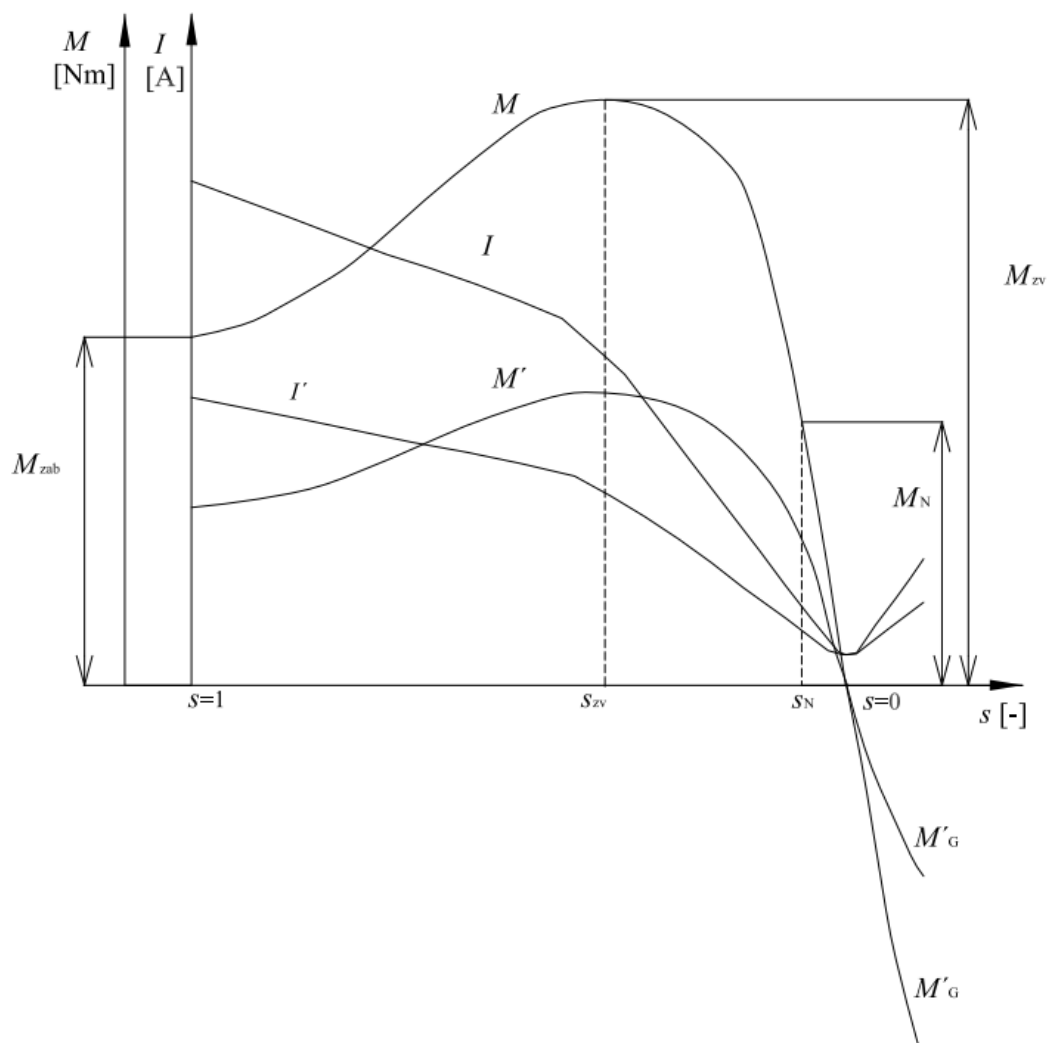
3.5.1. Zpracování výsledků měření momentové charakteristiky

Jelikož se měření provádí při sníženém napětí U_s , změřené hodnoty se přepočítávají na hodnoty při jmenovitém napětí U_N . Za předpokladu, že uvažujeme, že moment asynchronního motoru je úměrný kvadrátu napětí a proud je lineárně úměrný, přepočtené hodnoty dostane z těchto rovnic

$$\frac{M}{M'} = \frac{U_N^2}{U_s^2} \Rightarrow M = M' \frac{U_N^2}{U_s^2} \quad (35)$$

$$\frac{I}{I'} = \frac{U_N}{U_s} \Rightarrow I = I' \frac{U_N}{U_s} \quad (36)$$

Naměřené a vypočtené hodnoty proudů I , I' a momentů M , M' poté vyneseme jako závislost na skluzu motoru s nebo otáčkách n . Z grafu můžeme odečíst hodnotu záběrného momentu M_{zab} , a záběrného proudu I_{zab} , který by se měl shodovat s hodnotou proudu na krátko. Dále z grafu lze vyčíst moment zvratu M_{zv} , s jehož pomocí můžeme vypočítat momentovou přetížitelnost, která je definována jako poměr momentu zvratu a jmenovitého momentu a bývá v rozmezí od 1,7 až do 2,2.



Obrázek 15 Momentová charakteristika AS motoru – zdroj [1]

4. Automatizace měření

4.1. Výkonový analyzátor Norma D4000



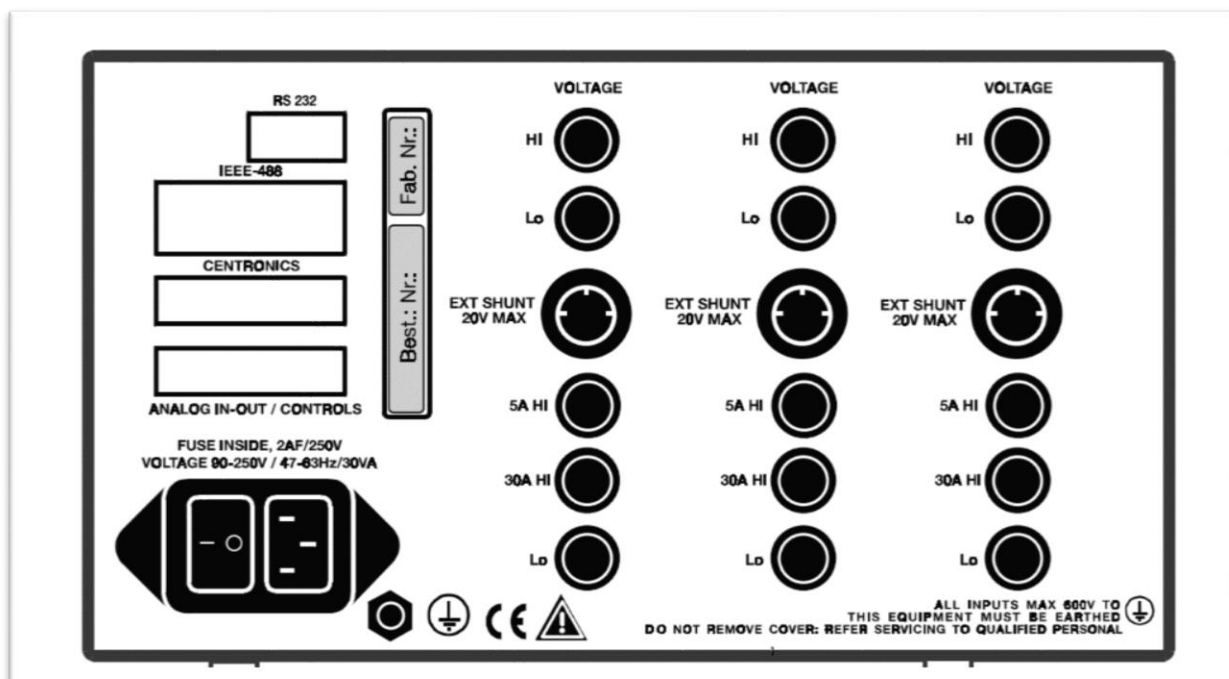
Obrázek 16 Výkonový analyzátor Norma D4000 – zdroj [4]

Výkonový analyzátor Norma 4000 od firmy LEM je velmi přesný přístroj měřící napětí, proudy a vypočítávající činný, jalový a zdánlivý výkon a mnoho dalších odvozených veličin. Přesnost měření je nezávislá ve velmi širokém rozsahu na tvaru, frekvenci a fázové poloze vlny. Na obrazovce můžeme vizualizovat křivku funkce naměřené hodnoty. Měření můžeme provádět do napětí 1000V a proudu 30A, díky integrovaným děličům napětí a bočníkům. Alternativně lze připojit i vnější bočníky nebo měřící kleště pro zvýšení rozsahů. Analyzátor umožňuje měření hodnot stejnosměrných a střídavých od frekvence 0,1Hz do 300kHz. V krátkých časových intervalech přístroj automaticky porovnává nulu a referenční napětí a tím dochází ke kalibraci přístroje a zvýšení přesnosti. Všechny napěťové a proudové kanály jsou galvanicky odděleny. Analyzátor je vybaven rozhraním RS232, který umožňuje komunikace s počítačem.

Přístroj lze ovládat manuálně, kdy k ovládání používáme tlačítka a šipky na přední straně přístroje a měřené veličiny se nám ukazují na obrazovce. Nebo lze přístroj ovládat pomocí sériové linky RS-232C, jako tomu je v našem případě.

4.1.1 Připojení měřených objektů k výkonnému analyzátoru

Pro připojení výkonového analyzátoru k měřenému objektu jsou na zadní straně přístroje vyvedeny proudové a napěťové svorky. Dvě vrchní svorky slouží pro měření napětí. Proudové svorky se nacházejí ve spodní části a můžeme je připojit na rozsah 5A nebo 30A. V levé části zadního panelu se nachází síťový vypínač, zdířka pro přivedení napájecího napětí a rozhraní pro připojení k počítači.

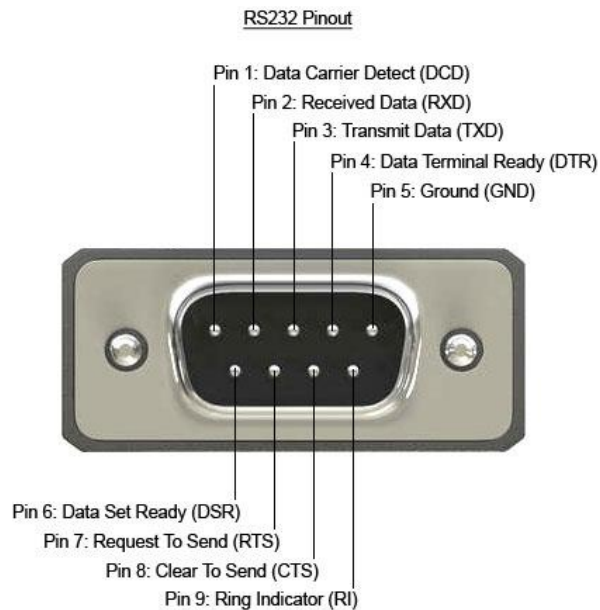


Obrázek 17 Zadní strana výkonového analyzátoru s vývody pro připojení do obvodu – zdroj [4]

4.2. Rozhraní RS-232

RS-232 je komunikační rozhraní původně určené pro komunikaci dvou zařízení do vzdálenosti 20m. Jednotlivé bity přenášených dat jsou vysílány po lince za sebou tzv. v sérii, a proto se pro toto rozhraní také používá název „sériová linka“. Přenos datových bitů probíhá v pořadí od nejméně důležitých (LSB) po nejdůležitější (MSB). Logický stav přenášeného bitu reprezentován pomocí úrovně napětí. Pro logickou jedničku je napětí záporné, pro logickou nulu kladné. Napěťové úrovně pro vysílání dat bývají pro logickou jedničku v rozmezí -5V až -15V, pro logickou nulu jsou tyto úrovně v rozmezí 5V až 15V.

V dnešní době již bylo rozhraní RS-232 ve většině případů nahrazeno rozhraním USB, nicméně v průmyslu se tento trend nepotvrdil a sériová linka je v něm nadále v různých modifikacích hojně používána.



Obrázek 18 Rozhraní RS-232 – zdroj[9]

4.3. NI USB-9215

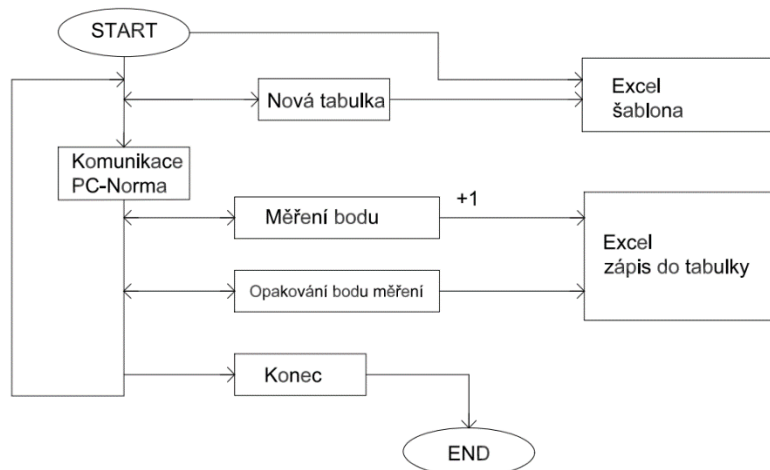
Přípravek NI-USB 9215 je měřící karta od společnosti National Instrument. Modul nabízí 4 kanály pro sběr dat s 16bitovým rozlišením. Komunikace s počítačem je přes rozhraní USB 2.0, která nabízí přenosovou rychlost až 60 MB/s. V našem případě byla karta používána pro měření napětí na definovaném odporu v obvodu kotvy dynamometru a napětí na tachodynamu.



Obrázek 19 Měřící karta NI USB-9215 – zdroj [6]

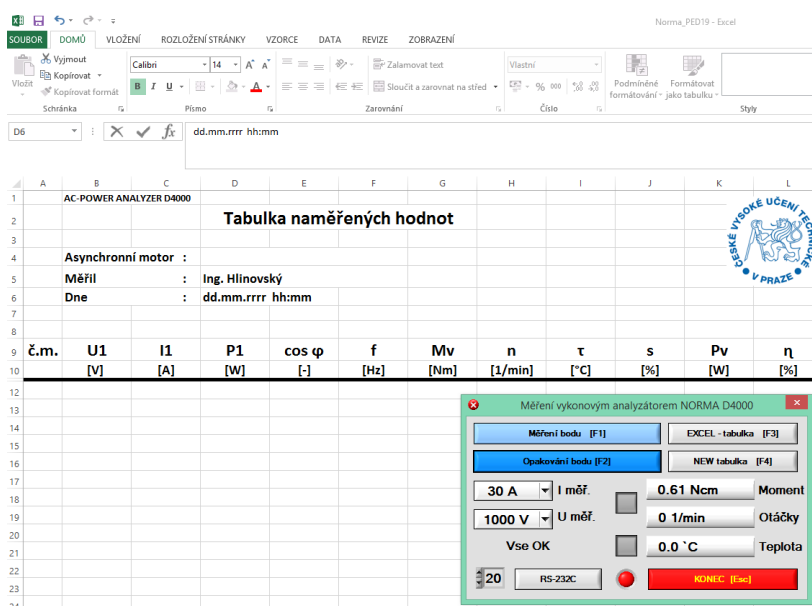
4.4. Program v LabWindows

Program pro automatizaci měření byl vytvořen ve vývojovém prostředí LabWindows/CVI a je napsán v jazyce C. Blokové schéma funkce tohoto programu je na obrázku. Při spuštění programu dojde k otevření ovládacího okna pro výkonový analyzátor Norma D4000 a zároveň dojde k otevření okna Microsoft Excel s předpřipravenou šablonou. Poté co počítač naváže komunikaci s analyzátelem, můžeme pomocí tlačítka „Měření bodu“ zapsat měřené hodnoty do tabulky v Excelu. Tato volba vždy přidá jeden nový řádek s hodnotami do tabulky. Naproti tomu tlačítko „Opakování měření bodu“ přepisuje hodnoty posledního měření novými.



Obrázek 20 Blokové schéma ovládacího programu

V ovládacím programu, jsou dále volby pro nastavení měřených napětí a proudů. V případě napětí to jsou rozsahy 100V-300V-1000V. V případě proud 5A-30A a zkratové proudy 100A a 1400A. Dále v případě připojení měřící karty USB-9215 můžeme nastavit měření momentu a otáček. Při připojení teplotní sondy můžeme měřit i teplotu.



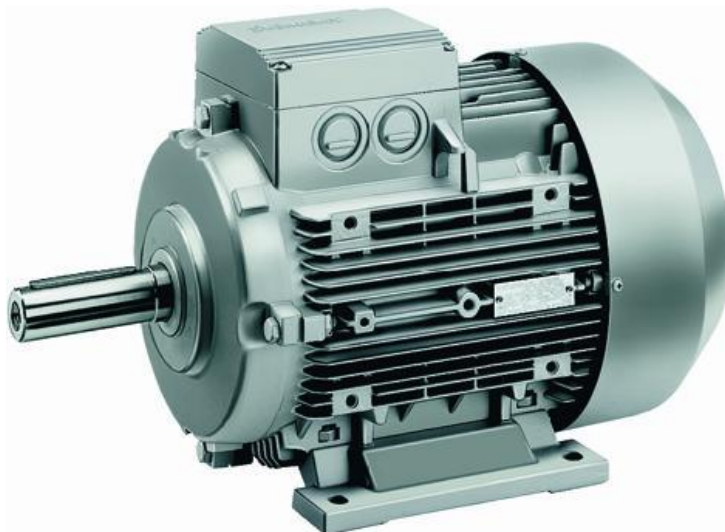
Obrázek 21 Ovládací panel programu a tabulka Excel s šablonou

5. Měření na motoru Siemens

Měření probíhalo v halové laboratoři H26, kde byla provedena zkouška naprázdno a změřena momentová charakteristika asynchronního motoru.

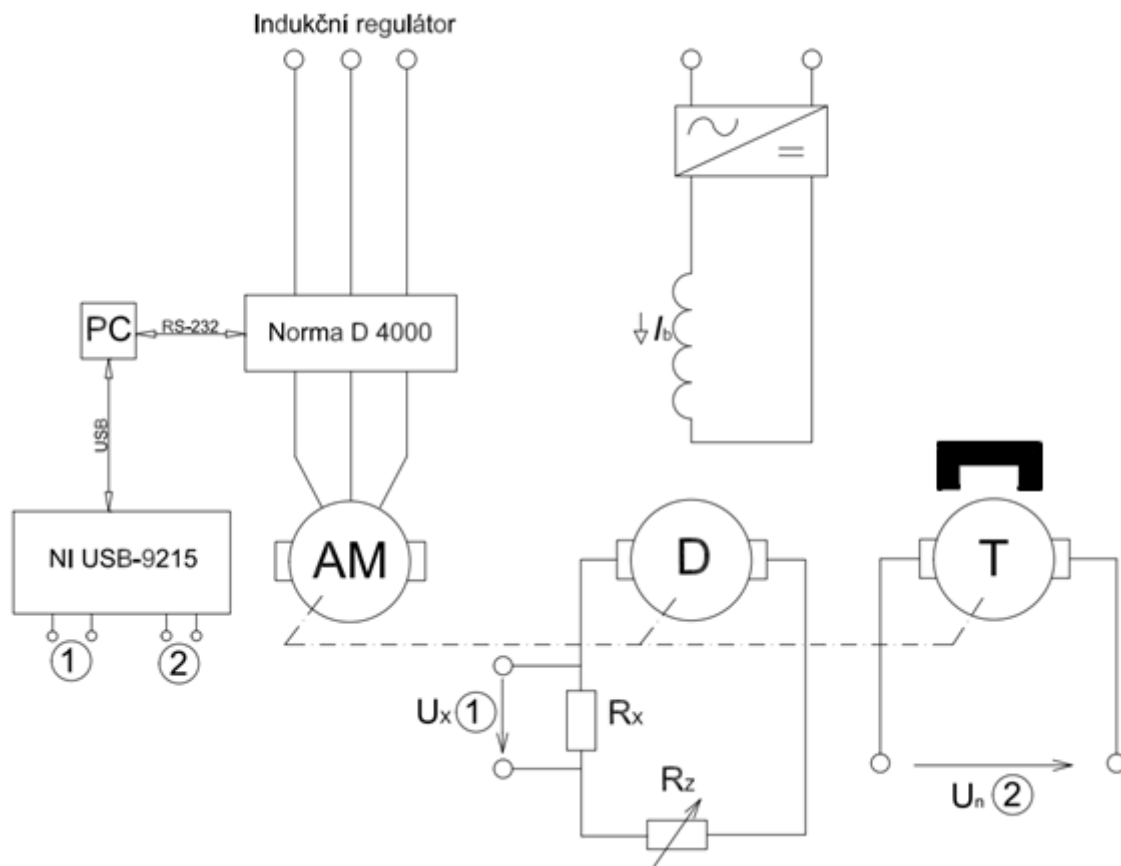
5.1. Motor Siemens řady 1LA7

Motory Siemens řady 1LA7 jsou nízkonapěťové trojfázové asynchronní motory s kotvou nakrátko. Tyto motory jsou určeny k pohonu průmyslových zařízení, jako jsou čerpadla, ventilátory, obráběcí stroje atd. Motor se vyrábí v hliníkové kostře se svorkovnicí nahoře a jedním koncem válcové hřídele. Statorové vinutí je měděné. Rotorová klec je odlita z hliníku. Svazek rotoru je nalisován na hřídel a uložen v kuličkových ložiscích. Izolace je provedena v tepelné třídě 130(B). Motor má radiální ventilátor, který chladí nezávisle na směru otáčení.



Obrázek 22 Asynchronní motor Siemens 1LA7 – zdroj [5]

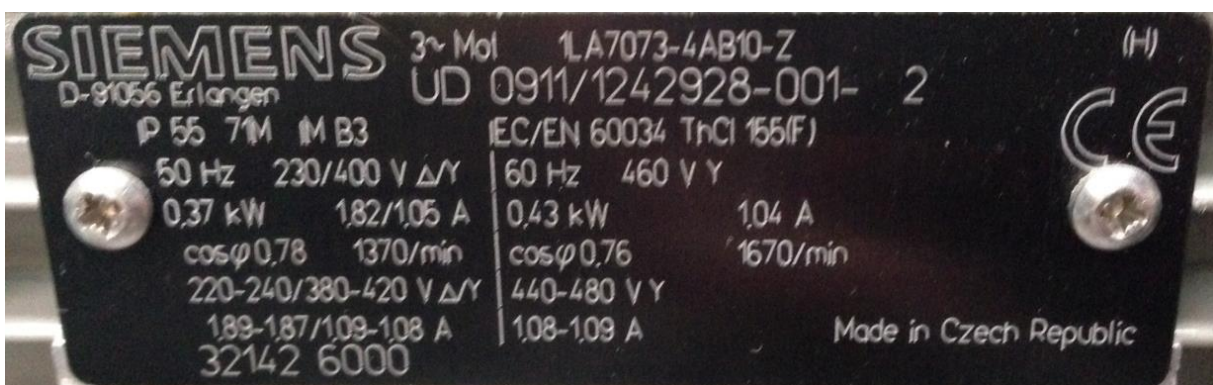
5.2. Schéma zapojení



Obrázek 23 Schéma zapojení měřené úlohy

5.3. Použité stroje

Asynchronní motor Siemens 1LA7073 - statorové vinutí zapojeno do hvězd a šítkové hodnoty dle obrázku:



Obrázek 24 Štítek AS motoru Siemens 1LA7

Dynamometr - stejnosměrný cize buzený motor s parametry buzení $U_{bN}=8V$ a $I_{bN}=2A$, napětím na kotvě $U_{kot}=110V$ a proudem $I_{kot}=2A$ a maximálním momentem $M_{max}=90Ncm$

Tachodynamo- max. otáčky $n_{max}=5000ot/min$ a konstanta převodu $2V/1000ot/min$

5.4 Postup měření

5.4.1. Měření nakrátko

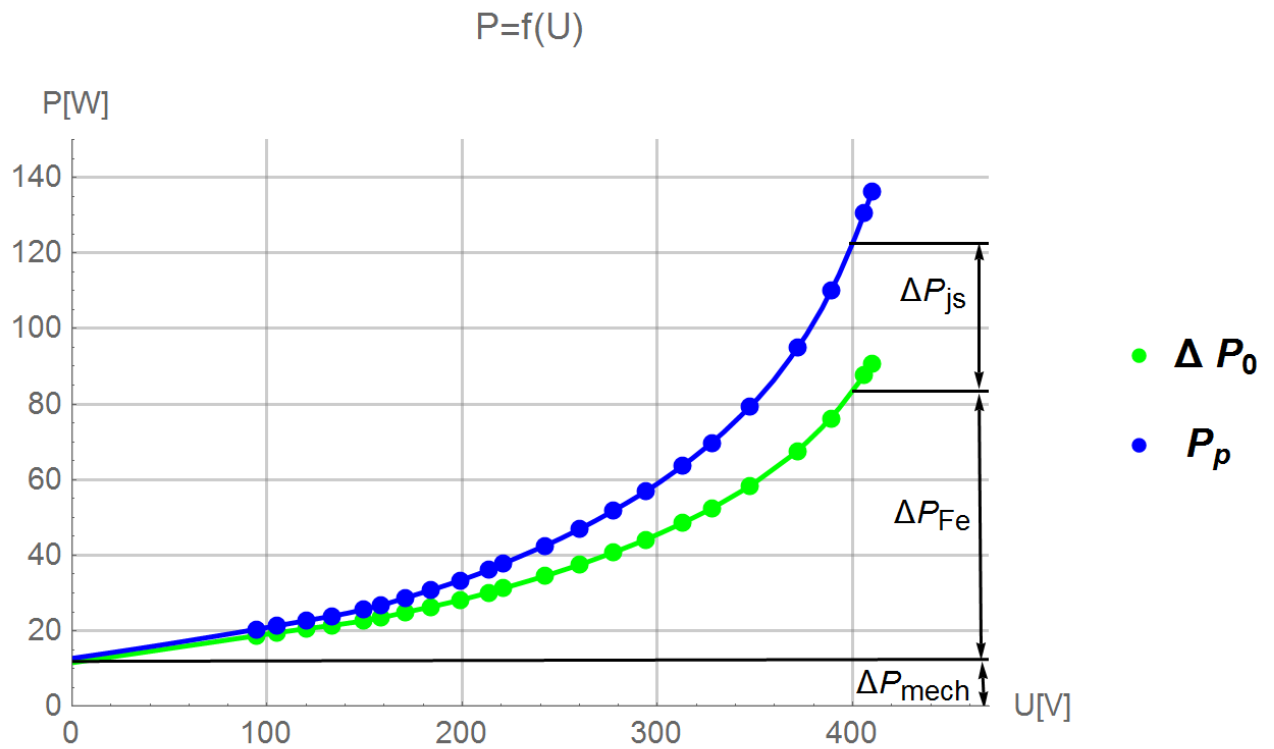
Zapojení provedeme podle schématu (obr. 23). Na výkonovém analyzátoru použijeme proudové svorky s rozsahem 5A. Výkonový analyzátor připojíme pomocí rozhraní RS-232 k PC a na počítači spustíme aplikaci pro měření. Zkontrolujeme, že analyzátor komunikuje s počítačem a nastavíme požadované proudové a napěťové rozsahy. Na indukčním regulátoru nastavíme hodnotu napětí kolem 150V a připneme k němu asynchronní motor. Poté indukčním regulátorem zvýšíme napětí na hodnotu $1,1-1,2 U_n$. Nyní můžeme sejmout první bod charakteristiky naprázdno. Poté snížíme napětí a sejmeme další bod. Takto pokračujeme v pravidelných intervalech až do bodu, kdy dojde k nárůstu statorového proudu. Motor odpojíme od sítě a necháme doběhnout. Naměřené body graficky zpracujeme.

5.4.2. Měření momentové charakteristiky

Toto měření budeme provádět při sníženém napětí, které bude asi 33% U_n . Dynamometr nabudíme jmenovitým budícím proudem I_{bN} a na reostatu ve vinutí kotvy dynamometru nastavíme nejvyšší možný odpor. Poté k indukčnímu regulátoru připojíme měřený asynchronní motor a tím uvedeme soustrojí do provozu. Poté zkontrolujeme, zda výkonový analyzátor komunikuje s počítačem a jsou na něm správně nastavené rozsahy. Zároveň zkontrolujeme, jestli s počítačem komunikuje správně i měřící karta, která snímá napětí na tachodynamu a na odporu v kotvě dynamometru. Poté zatížíme motor, tím že snížíme odpor v kotvě dynamometru a sejmeme první hodnotu. Postupně rovnoměrně zvyšujeme odpor v obvodu kotvy dynamometru a snímáme další hodnoty. Až dojdeme s hodnotou odporu na maximum, můžeme odepnout asynchronní motor od sítě, vypnout buzení a ukončit měření. Naměřené hodnoty momentu a proudu poté přepočteme podle vztahů (35) a (36) a zpracujeme graficky, jako závislost na otáčkách nebo skluzu.

5.5 Výsledky měření

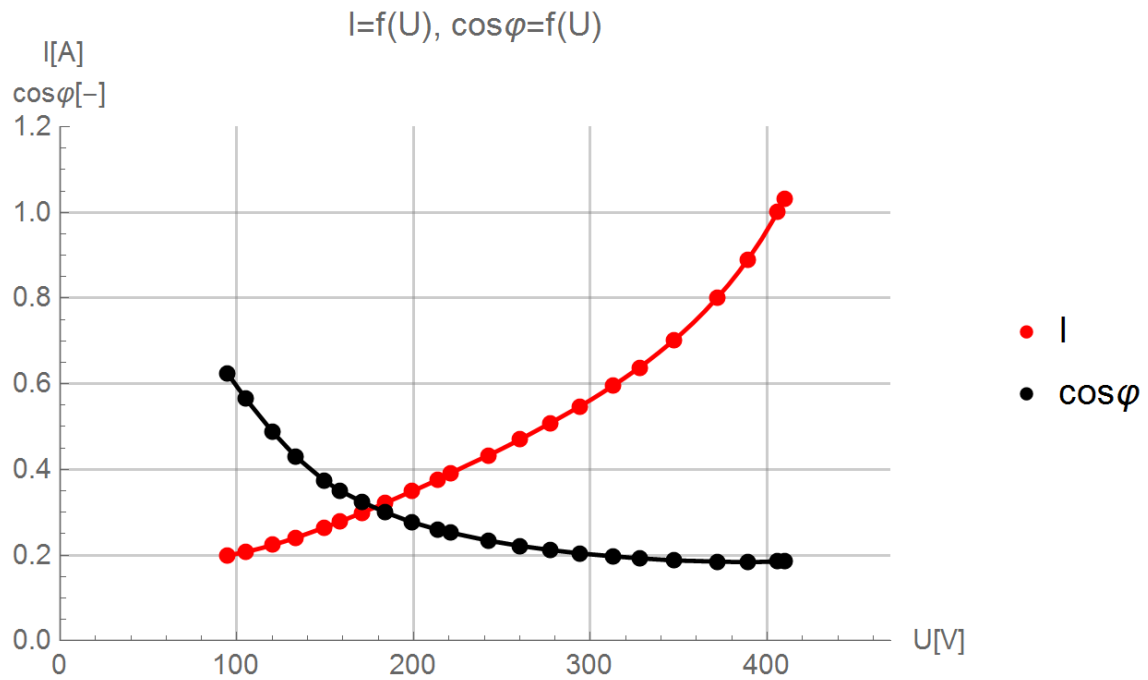
5.5.1. Výsledky měření naprázdno



Obrázek 25 Naměřená závislost $P_p=f(U)$ a $\Delta P_0=f(U)$

Tabulka 1 Naměřené hodnoty ztrát naprázdno při U_n

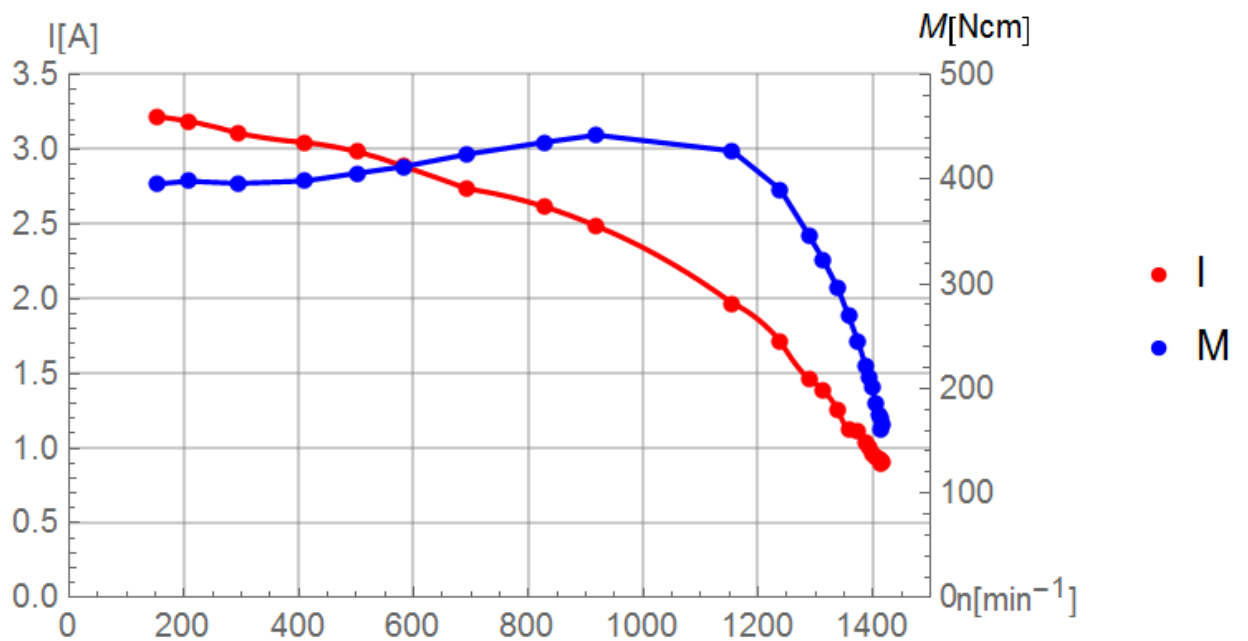
	[W]
ΔP_0	83
ΔP_{js}	38
ΔP_{mech}	13
ΔP_{Fe}	70



Obrázek 26 Naměřená závislost $I=f(U)$ a $\cos\varphi=f(U)$

5.5.2. Výsledky měření momentové charakteristiky

$I=f(n) \quad M=f(n)$



Obrázek 27 Naměřená závislost $M=f(n)$ a $I=f(n)$

6. Závěr

V této bakalářské práci jsme se seznámili s možnostmi automatizace měření asynchronního motoru za pomoci výkonového analyzátoru Norma D4000. Komunikace analyzátoru s počítačem byla zajištěna pomocí rozhraní RS-232. Ovládání tohoto analyzátoru, bylo prováděno pomocí programu vytvořeného ve vývojovém prostředí LabWindows, který mi poskytl Ing. Vít Hlinovský CSc. Naším úkolem bylo se podrobněji seznámit s funkcí tohoto programu a poté jej využít při samotném měření motoru. Měření motoru bylo prováděno v halové laboratoři H26. Z typových zkoušek, jejichž způsob provedení nalezneme v kapitole číslo 3, jsme na motoru Siemens provedli zkoušku naprázdno a změřili jeho momentovou charakteristiku. Naměřené a přepočtené veličiny jsme poté zpracovali do grafů. Závislost $\Delta P_0=f(U)$ jsme extrapolovali až do osy ztrát při nulovém napětí a tak získali mechanické ztráty motoru. Všechny graficky zpracované výsledky se podobají očekávaným teoretickým průběhům. Tímto měřením jsme si ukázali využití procesu automatizace měření v praxi, a ověřili si tak její pozitivní vliv, jednak na jednoduchost a rychlost měření, a jednak na možnosti jednoduchého zpracování naměřených dat, které byly rovnou převáděny do tabulek v MS Excel.

7. Seznam literatury

- [1] HRABCOVCOVÁ, V., RAFAJDUS,P., FRANKO, M. A HUDÁK, P. Jiří, Meranie a modelovanie elektrických strojov. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 2009. ISBN 978-80-8070-924-2.
- [2] MĚŘIČKA, Jiří, Václav HAMATA a Petr VOŽENÍLEK. Elektrické stroje. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02109-2.
- [3] PAVELKA, Jiří a Jiří ZDĚNEK. *Elektrické pohony a jejich řízení*. 2. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2015. ISBN 978-80-01-05785-8.
- [4] Manual LEM Norma D4000, Rakousko, 1999
- [5] Katalog K02- 1004 CZ, Siemens
- [6] Portable USB-Based DAQ with Simultaneous Sampling – Data Sheet. *National Instruments*. [online]. © 2014 [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-322>
- [7] DOLENSKÝ, Milan. Měření impedance poruchové smyčky. *Elektrika.cz, portál o silnoproudé elektrotechnice, elektroinstalace, vyhlášky, schémata zapojení*. [online]. 4.2.2015 [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/data/clanky/mereni-impedance-poruchove-smycky/view>
- [8] KOREN. D. Protocols and Computer Networks. RS-232. [online]. [1995] [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <http://www2.rad.com/networks/1995/rs232/rs232.htm>
- [9] RS232 Pinout I DB9 Pinout. *USconverters*. [online]. © 2006 – 2016 [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: http://www.usconverters.com/index.php?main_page=page&id=61

8. Přílohy

Tabulka 2 Naměřené hodnoty při měření nakrátko

č.m.	U1	I1	P1	cosφ	f	Pj1	ΔPm	ΔPfe	Imi
	[V]	[A]	[W]	[-]	[Hz]	[W]	[W]	[W]	[A]
1	409,9	1,033	136,25	0,186	50,0	45,58	13,00	77,67	1,015
2	406,0	1,002	130,59	0,185	50,0	42,93	13,00	74,66	0,985
3	388,9	0,890	109,97	0,183	50,0	33,84	13,00	63,13	0,875
4	371,6	0,800	94,86	0,185	50,0	27,39	13,00	54,46	0,787
5	347,4	0,703	79,39	0,188	50,0	21,11	13,00	45,28	0,690
6	327,7	0,638	69,74	0,193	50,0	17,40	13,00	39,34	0,626
7	313,0	0,596	63,75	0,197	50,0	15,19	13,00	35,55	0,584
8	294,0	0,547	56,89	0,204	50,0	12,80	13,00	31,09	0,536
9	277,3	0,508	51,77	0,212	50,0	11,05	13,00	27,72	0,497
10	260,1	0,470	46,91	0,222	50,0	9,44	13,00	24,47	0,458
11	242,4	0,433	42,50	0,234	50,0	8,01	13,00	21,49	0,421
12	220,8	0,391	37,75	0,252	50,0	6,53	13,00	18,22	0,378
13	213,5	0,376	36,12	0,260	50,0	6,04	13,00	17,08	0,363
14	199,0	0,349	33,34	0,277	50,0	5,21	13,00	15,12	0,336
15	184,0	0,322	30,78	0,300	50,0	4,43	13,00	13,35	0,307
16	170,8	0,299	28,72	0,324	50,0	3,83	13,00	11,90	0,283
17	158,3	0,278	26,74	0,350	50,0	3,31	13,00	10,43	0,261
18	149,6	0,265	25,63	0,374	50,0	2,99	13,00	9,63	0,245
19	133,2	0,240	23,88	0,430	50,0	2,47	13,00	8,40	0,217
20	120,3	0,224	22,72	0,487	50,0	2,14	13,00	7,58	0,195
21	104,9	0,207	21,31	0,566	50,0	1,84	13,00	6,47	0,171

Tabulka 3 Naměřené hodnoty při měření momentové charakteristiky

č.m	U1	I1	P1	cosφ	f	Mv	n	Pv	s	Mn	In
	[V]	[A]	[W]	[-]	[Hz]	[Ncm]	[min ⁻¹]	[W]	[%]	[Ncm]	[A]
1	140,5	0,316	51,65	0,673	49,8	19,671	1413,9	29,13	5,45	160,58	0,90
2	140,3	0,318	52,52	0,679	50,0	20,308	1416,3	30,12	5,66	165,78	0,91
3	140,3	0,321	53,43	0,684	50,0	21,005	1412,2	31,06	5,91	171,47	0,92
4	140,1	0,325	54,54	0,692	49,9	21,495	1410,4	31,75	5,83	175,47	0,93
5	139,9	0,329	55,87	0,700	50,0	22,815	1404,8	33,56	6,39	186,25	0,94
6	140,0	0,338	58,47	0,713	50,0	24,640	1398,1	36,08	6,78	201,14	0,97
7	140,1	0,353	62,80	0,733	50,0	25,839	1392,1	37,67	7,26	210,93	1,01
8	140,1	0,364	65,69	0,744	50,0	27,139	1387,2	39,42	7,61	221,55	1,04
9	140,4	0,391	72,90	0,767	50,0	29,991	1374,3	43,16	8,35	244,83	1,11
10	140,5	0,395	74,01	0,770	50,0	33,008	1357,5	46,92	9,51	269,45	1,12
11	140,5	0,442	85,58	0,796	50,0	36,202	1339,2	50,77	10,76	295,53	1,26
12	140,0	0,485	95,46	0,811	50,0	39,550	1313,5	54,40	12,44	322,86	1,39
13	140,0	0,512	101,32	0,817	50,0	42,455	1288,4	57,28	14,06	346,57	1,46
14	140,1	0,601	120,27	0,824	49,9	47,787	1238,8	61,99	17,28	390,10	1,72
15	140,2	0,690	137,48	0,820	49,9	52,313	1155,2	63,28	22,86	427,05	1,97
16	140,1	0,871	166,80	0,789	50,0	54,175	918,5	52,11	38,71	442,25	2,49
17	140,1	0,917	173,09	0,778	49,9	53,327	827,3	46,20	44,79	435,32	2,62
18	140,1	0,959	178,59	0,767	50,0	51,920	692,4	37,65	53,82	423,83	2,74
19	140,0	1,011	184,48	0,753	50,0	50,468	581,5	30,73	61,22	411,99	2,89
20	139,9	1,044	188,07	0,743	50,0	49,707	502,1	26,14	66,50	405,77	2,98
21	139,9	1,065	190,22	0,737	50,0	48,801	410,6	20,98	72,61	398,37	3,05
22	139,9	1,087	192,44	0,731	50,0	48,504	293,7	14,92	80,40	395,95	3,11
23	139,8	1,114	195,13	0,723	50,0	48,781	207,9	10,62	86,13	398,21	3,19
24	139,6	1,124	195,67	0,720	50,0	48,435	151,7	7,69	89,88	395,39	3,22