



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektrických pohonů a trakce

**Automatizace měření malých asynchronních motorů**

**Automatization of the measurement of small asynchronous motors**

bakalářská práce

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

Vedoucí práce: Ing. Vít Hlinovský, CSc.

**Jan Stejskal**

Praha 2017

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Stejskal** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **434846**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrických pohonů a trakce**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Automatizace měření malých asynchronních motorů**

Název bakalářské práce anglicky:

**Automatization of the measurement of small asynchronous motors**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Popište předepsané zkoušky asynchronních motorů
- 2) Popište měřicí systém pro automatizaci
- 3) Popište sběr dat z výkonového analyzátoru NORMA D4000
- 4) Implementujte měření základních zkoušek s výstupem do Excelu a jejich zpracování

Seznam doporučené literatury:

- [1] ČSN 35 0010 (350010) Točivé elektrické stroje. Zkoušky
- [2] Rozbor ztrát malých asynchronních motorů - bakalářská práce autor práce David Šišák BRNO 2015
- [3] Hrabovcová V., Janoušek L., Rafajdus P., Ličko M., Moderné elektrické stroje, Zilina, 2001

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Vít Hlinovský CSc., katedra elektrických pohonů a trakce FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **05.05.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.06.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.  
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## **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 .....

Podpis .....

## **Poděkování**

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

## **Abstrakt**

Tato práce navazuje na bakalářskou práci Stanislava Dupala - Automatizace měření asynchronního motoru (2016). Jejím cílem je provést rozbor zkoušek prováděných na asynchronním motoru, následně zdokonalit automatizaci sběru dat pomocí výkonového analyzátoru Norma D4000 a rozšířit zkoušky o měření nakrátko a měření odporů statorového vinutí. Na motoru od firmy Siemens pak provést testovací měření. Data naměřená pomocí programu napsaného v prostředí LabWindows™/CVI a uložená do tabulkového procesoru Microsoft Excel poté graficky zpracovat a vyhodnotit.

## **Klíčová slova**

Asynchronní motor, Norma D4000, automatizace měření, zkoušky, LabWindows™/CVI, Microsoft Excel

## **Abstract**

This bachelor's degree project builds on bachelor's degree project of Stanislav Dupal - Automation measuring of induction motor (2016). The objective is make the analysis of the tests carried out on asynchronous motor, then improve data acquisition automation using the power analyzer Norma D4000 and extend it by blocked rotor test and the measurement of the resistance of the stator winding. On the engine from the Siemens company then perform testing measurement. The data measured by a program written in the environment LabWindows™/CVI and stored in a Microsoft Excel spreadsheet, then graphically processed and evaluated.

## **Keywords**

Asynchronous motor, Norma D4000, automatization measuring, tests, LabWindows™/CVI, Microsoft Excel

## Obsah

1.	Úvod.....	11
2.	Asynchronní motor .....	12
2.1.	Konstrukční uspořádání .....	12
2.2.	Princip činnosti .....	13
2.3.	Náhradní schéma.....	15
2.4.	Výkonová bilance .....	18
2.5.	Moment asynchronního motoru.....	19
3.	Předepsané zkoušky asynchronních motorů .....	21
3.1.	Měření činného odporu vinutí.....	21
3.2.	Měření izolačního odporu a zkouška elektrické odolnosti .....	22
3.3.	Měření naprázdno .....	23
3.4.	Měření nakrátko .....	25
3.5.	Měření charakteristik při zatížení .....	26
3.5.1.	Zatěžovací charakteristiky.....	27
3.5.2.	Momentová charakteristika .....	27
3.6.	Doplňkové zkoušky .....	28
3.6.1.	Zkoušky přetížitelnosti .....	28
3.6.2.	Zkoušky říditelných vlastností .....	29
3.6.3.	Oteplovací zkouška .....	29
3.6.4.	Určení účinnosti.....	29
3.6.5.	Rozběhové zkoušky.....	29
4.	Měřicí systém pro automatizaci.....	30
4.1.	Měřicí systém před provedením pokročilejší automatizace .....	30
4.1.1.	Zapojení měřícího systému.....	30
4.1.2.	Řídící jednotka.....	31
4.2.	Měřicí systém po provedením pokročilejší automatizace.....	31

4.2.1.	Zapojení rozšířeného měřicího systému .....	32
4.2.2.	Princip spínání elektromagnetických relé .....	33
4.3.	Použité přístroje .....	34
4.3.1.	Norma D 4000 Power Analyzer .....	34
4.3.2.	Měřicí modul NI USB-9215 .....	35
4.3.3.	A/D převodník NI USB-6008.....	35
4.4.	Měřicí program .....	36
5.	Testování motoru firmy Siemens.....	37
5.1.1.	Měření činného odporu statorového vinutí.....	38
5.1.2.	Měření naprázdno .....	39
5.1.3.	Měření nakrátko.....	40
5.1.4.	Měření zatěžovacích charakteristik .....	42
5.1.5.	Měření momentové charakteristiky .....	43
6.	Závěr .....	44
7.	Seznam literatury .....	45

## Seznam použitých obrázků a schémat

Obrázek 1 – Konstrukční uspořádání asynchronního motoru - zdroj [4] .....	13
Obrázek 2 – Náhradní schéma asynchronního motoru .....	17
Obrázek 3 – Výkonová bilance asynchronního motoru - zdroj [4] .....	18
Obrázek 4 – Zjednodušené náhradní schéma asynchronního motoru .....	19
Obrázek 5 – Momentová charakteristika asynchronního motoru .....	20
Obrázek 6 – Náhradní schéma asynchronního motoru pro měření naprázdno .....	24
Obrázek 7 – Náhradní schéma asynchronního motoru pro měření nakrátko .....	26
Obrázek 8 – Schéma zapojení základního měřicího systému .....	30
Obrázek 9 – Schéma zapojení měřicího systému po přidání stykačů .....	32
Obrázek 10 – Elektromagnetické relé .....	33
Obrázek 11 – NI USB-6008 s polovodičovými relé .....	33
Obrázek 12 – Norma D 4000 Power Analyzer .....	34
Obrázek 13 – Měřicí modul NI USB-9215 .....	35
Obrázek 14 – NI USB-6008 .....	36
Obrázek 15 – Měřicí program .....	36
Obrázek 16 – Štítkové údaje měřeného asynchronního motoru - zdroj [1] .....	37
Obrázek 17 – Schéma zapojení pro měření odporu vinutí .....	38
Obrázek 18 – Graf závislosti proudu na napětí při měření naprázdno .....	39
Obrázek 19 – Graf závislosti příkonu a účinnosti na napětí při měření naprázdno .....	40
Obrázek 20 – Graf závislosti proudu na napětí při měření nakrátko .....	41
Obrázek 21 – Graf závislosti příkonu a účinnosti na napětí při měření nakrátko .....	41
Obrázek 22 – Graf závislosti proudu a účinnosti na výkonu motoru při zatěžování .....	42
Obrázek 23 – Graf příkonu a účinnosti v závislosti na výkonu motoru při zatěžování ..	42
Obrázek 24 – Graf závislosti momentu a proudu na otáčkách při jmenovitém napětí ...	43
Obrázek 25 – Část zdrojového kódu sloužící k inicializaci NI USB-6008 .....	46
Obrázek 26 – Část zdrojového kódu sloužící ke spínání stykače S4 .....	46
Obrázek 27 – Fotografie testovaného motoru připojeného na dynamometr .....	49
Obrázek 28 – Fotografie boxu, ve kterém je uložen měřicí systém .....	49



## Seznam tabulek

Tabulka 1 – Naměřené a vypočítané hodnoty při měření činného odporu.....	39
Tabulka 2 – Naměřené a vypočítané hodnoty při měření naprázdno .....	47
Tabulka 3 – Naměřené a vypočítané hodnoty při měření nakrátko .....	47
Tabulka 4 – Naměřené a vypočítané hodnoty při měření zatěžovacích charakteristik ..	48
Tabulka 5 – Naměřené a vypočítané hodnoty při měření momentové charakteristiky ..	48

## Seznam příloh

Příloha A – Ukázky zdrojového kódu.....	46
Příloha B – Tabulky naměřených hodnot .....	47
Příloha C – Fotografie.....	49

## Seznam použitých zkratk a symbolů

$\eta$	[%]	Účinnost motoru
$s$	[-]	Skluz
$p_p$	[-]	Počet pól párů
$N_S$	[-]	Počet závitů statorového vinutí
$N_R$	[-]	Počet závitů rotorového vinutí
$k_{vS}$	[-]	Činitel statorového vinutí
$k_{vR}$	[-]	Činitel rotorového vinutí
$m_S$	[-]	Počet fází statorového vinutí
$m_R$	[-]	Počet fází rotorového vinutí
$\cos \varphi_k$	[-]	Účinník nakrátko
$\cos \varphi_{kN}$	[-]	Účinník nakrátko při jmenovitém proudu
$\cos \varphi_0$	[-]	Účinník naprázdno
$\cos \varphi_{0N}$	[-]	Účinník naprázdno při jmenovitém napětí
$\cos \varphi$	[-]	Účinník motoru při zatížení
$I$	[A]	Elektrický proud
$\hat{I}_S$	[A]	Fázor proudu statorem
$\hat{I}_R$	[A]	Fázor proudu rotorem
$\hat{I}_R^*$	[A]	Přepočtený fázor proudu rotorem
$I_0$	[A]	Proud naprázdno
$I_{0N}$	[A]	Proud naprázdno při jmenovitém napětí
$I_\mu$	[A]	Jalová složka proudu v příčné větvi náhradního schématu
$I_{Fe}$	[A]	Činná složka proudu v příčné větvi náhradního schématu
$I_k$	[A]	Proud nakrátko
$I_{kN}$	[A]	Proud nakrátko při jmenovitém napětí
$I_\downarrow$	[A]	Proud při sníženém napětí
$F_{mS}$	[A]	Magnetomotorické napětí statoru

$F_{mR}$	[A]	Magnetomotorické napětí rotoru
$F_{mc}$	[A]	Celkové magnetomotorické napětí
$f_1$	[Hz]	Frekvence napájecího napětí
$f_s$	[Hz]	Skluzová frekvence proudů a napětí v rotoru
$l$	[m]	Délka vodiče
$n_1$	[min <sup>-1</sup> ]	Počet otáček otáčivého pole statoru
$n$	[min <sup>-1</sup> ]	Počet otáček rotoru
$n_s$	[min <sup>-1</sup> ]	Synchronní otáčky rotoru
$F$	[N]	Síla působící na vodiče v rotoru
$M_z$	[Nm]	Zátěžný moment
$M_{z\downarrow}$	[Nm]	Zátěžný moment při sníženém napětí
$M_i$	[Nm]	Vnitřní moment asynchronního motoru
$M$	[Nm]	Hnací moment motoru
$\omega_1$	[s <sup>-1</sup> ]	Úhlová rychlost točivého pole
$\omega$	[s <sup>-1</sup> ]	Úhlová rychlost rotoru
$\omega_s$	[s <sup>-1</sup> ]	Skluzová úhlová rychlost proudů a napětí v rotoru
$B$	[T]	Magnetické indukce
$\hat{U}_S$	[V]	Fázor napětí na statoru
$\hat{U}_{iS}$	[V]	Fázor indukovaného napětí do statoru
$\hat{U}_{iR}$	[V]	Fázor indukovaného napětí do rotoru
$\hat{U}_{iR}^*$	[V]	Přepočtený fázor indukovaného napětí do rotoru
$U_{\downarrow}$	[V]	Snížené napětí při měření momentové charakteristiky
$U_N$	[V]	Jmenovité napětí motoru
$P_p$	[W]	Příkon motoru
$P_{JS}$	[W]	Jouleovy ztráty ve statoru
$P_{FeS}$	[W]	Ztráty v železe ve statoru
$P_{\delta}$	[W]	Výkon ve vzduchové mezeře
$P_{JR}$	[W]	Jouleovy ztráty v rotoru
$P_m$	[W]	Mechanický výkon
$P_{mech}$	[W]	Mechanické ztráty v motoru
$P$	[W]	Výkon na hřídeli
$P_0$	[W]	Příkon naprázdno
$P_{0N}$	[W]	Příkon naprázdno při jmenovitém napětí
$P_k$	[W]	Příkon nakrátko
$P_{kN}$	[W]	Příkon nakrátko při jmenovitém proudu
$\Phi_{\mu}$	[Wb]	Celkový hlavní magnetický indukční tok
$R_S$	[ $\Omega$ ]	Odpor statorového vinutí
$R_R$	[ $\Omega$ ]	Odpor rotorového vinutí
$R_R^*$	[ $\Omega$ ]	Přepočtený odpor rotorového vinutí
$R_f$	[ $\Omega$ ]	Odpor vinutí jedné fáze
$R_{sv}$	[ $\Omega$ ]	Svorkový odpor vinutí
$X_{\sigma S}$	[ $\Omega$ ]	Rozptylová reaktance statorového vinutí
$X_{\sigma R}$	[ $\Omega$ ]	Rozptylová reaktance rotorového vinutí
$X_{\sigma R}^*$	[ $\Omega$ ]	Přepočtená rozptylová reaktance rotorového vinutí

# 1. Úvod

Nepostradatelnou součástí uvedení motoru do provozu je měření jeho parametrů. V dřívějších dobách bylo toto měření prováděno pomocí ručkových přístrojů a zaznamenáváno a následně vyhodnocováno ručně. S rozvojem polovodičových technologií a následně mikroprocesorové techniky docházelo k postupnému nahrazování těchto metod metodami přesnějšími a proces sběru dat se tak mnohonásobně zjednodušil a zrychlil. Celému tomuto procesu se říká proces automatizace.

Automatizace snižuje potřebu přítomnosti člověka při vykonávání určité činnosti a zvyšuje komfort práce se zařízeními. S rostoucími požadavky na zjednodušování ovládání technologických zařízení roste zájem o rozsáhlejší automatizaci. V důsledku zvyšování kvality výpočetní techniky to je možné uskutečnit v čím dál větší míře. Celý proces směřuje k vytvoření takové automatizace, při které by teoreticky došlo k úplnému vyloučení lidského faktoru.

Tato bakalářská práce je rozdělena do čtyř základních celků. V prvním celku je obsažen základní rozbor asynchronního motoru, jeho stavba a funkce. V druhém celku jsou popsány zkoušky, které se provádějí na asynchronních motorech, a způsoby, jakými jsou prováděny. V třetím celku je rozebrán způsob, jakým bylo provedeno zdokonalení automatizace měřicího systému na sběr dat z asynchronního motoru, a následně ve čtvrtém celku byly na motoru od firmy Siemens provedeny některé ze zkoušek uvedených v druhé části této práce.

## 2. Asynchronní motor

Asynchronní motory jsou nejrozšířenějším druhem elektrických motorů, za což může jejich jednoduchá konstrukce, vysoká účinnost a dlouhá doba života. Pro jejich napájení také obvykle postačí běžná třífázová střídavá síť. Tyto výhody vedou k častému využívání asynchronních motorů v různých aplikacích. Velká poptávka vedla k zavedení hromadné a velkosériové výroby těchto motorů, čímž došlo k dalšímu snížení jejich ceny.

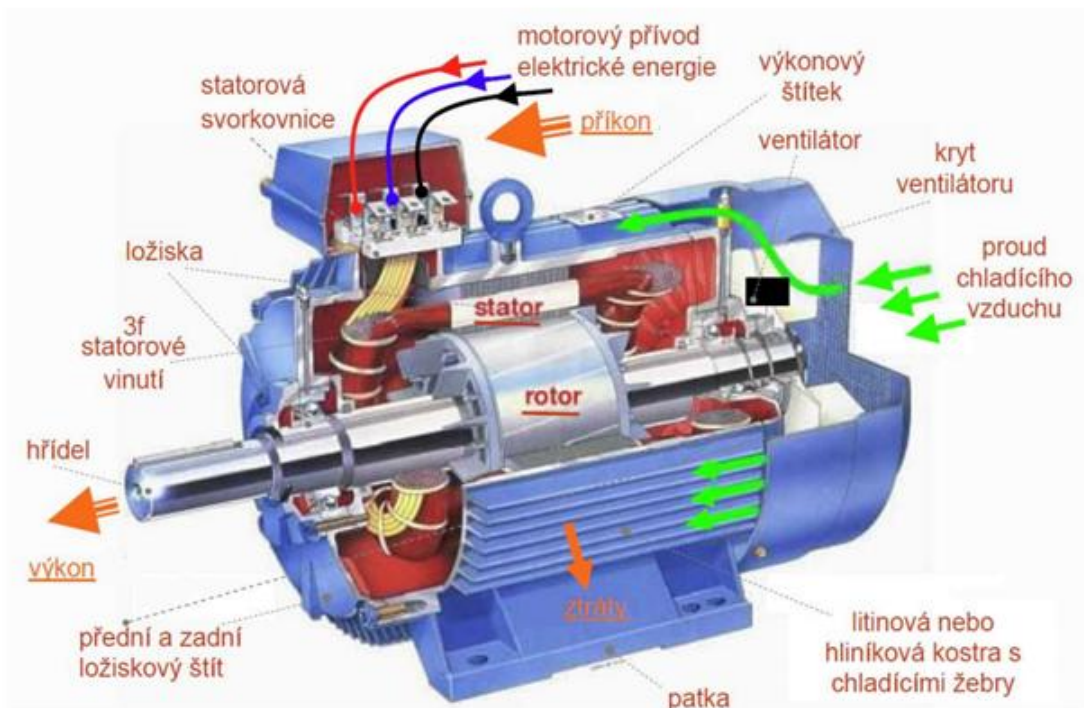
Indukční motor, jak se občas také asynchronnímu motoru říká, má však i několik nevýhod. Základní nevýhodou je problematické řízení otáček, asynchronní motory se tedy využívají nejvíce v aplikacích, které nevyžadují jejich regulaci. Mezi takové aplikace patří například ventilátory, čerpadla, pásové dopravníky, jeřáby a podobně. S rozšířením využíváním polovodičových měničů, konkrétně frekvenčního měniče, dochází k využití asynchronního motoru i v aplikacích, kde to dříve nebylo možné, například v trakci. Další nevýhodou je fakt, že asynchronní motor trvale zatěžuje síť jalovým výkonem, jelikož se jeho indukční účinník pohybuje okolo 0,8 až 0,9. Z tohoto důvodu nedošlo k velkému rozšíření asynchronních generátorů.

### 2.1. Konstrukční uspořádání

Každý asynchronní motor se skládá ze dvou hlavních částí - statoru a rotoru. Tyto části jsou uzavřeny v litinové nebo hliníkové kostře. Kostra je chlazená proudem vzduchu například pomocí ventilátorů. U motorů větších výkonů můžeme nalézt i speciální druhy chlazení, jako například chlazení kapalinové. Výkon získáváme pomocí hřídele, která je spojena s otáčivou částí motoru.

Stator asynchronního stroje, který je ve většině případů pevnou částí motoru, se skládá z plechů z oceli pro elektrotechniku tloušťky přibližně 0,5 mm. Na vnitřní straně těchto plechů jsou drážky sloužící k uchycení statorového vinutí. Konce těchto vinutí jsou vyvedeny do svorkovnice, do které přivádíme napětí. Konce vinutí mohou být ve svorkovnici zapojeny dvěma způsoby, a to buď do hvězdy, nebo do trojúhelníku. Svorkovnice je navrhována tak, aby mohlo dojít k snadnému přepojení vinutí na námi požadovaný způsob zapojení.

Rotor asynchronního stroje, který je většinou otočnou částí motoru, je rovněž složen z plechů z oceli pro elektrotechniku. V dnešní době se v rotoru využívá převážně klecového vinutí, kterému se také říká kotva nakrátko. Občas můžeme však i narazit na vinutí trojfázové vyvedené na kroužky. Kotva nakrátko bývá vyrobena z měděných, mosazných nebo hliníkových tyčí svařených na obou koncích nakrátko. V sériové výrobě se nejvíce využívá technologie, při níž bývá celá klec odstříknuta z hliníku. V dnešní době již existují i firmy, které jsou díky pokroku v technologiích schopné odstříknout klec z mědi.



Obrázek 1 – Konstrukční uspořádání asynchronního motoru - zdroj [4]

## 2.2. Princip činnosti

Základem principu asynchronního motoru je vytvoření točivého magnetického pole. Točivé magnetické pole v motoru vznikne v důsledku prostorového natočení alespoň dvou statorových vinutí, která jsou napájena střídavými a vzájemně časově posunutými napětími. Toto pole tedy v asynchronním motoru vytvoříme přivedením třífázového střídavého napětí na jeho svorky. V důsledku točivého magnetického pole dojde díky elektromagnetické indukci k indukovaní napětí do kotvy. Z tohoto důvodu se také často asynchronnímu motoru říká motor indukční. Indukované napětí vyvolá v kotvě uzavřené nakrátko proud. Tento proud začne interagovat s točivým magnetickým polem, čímž vzniká moment, který dle Lenzova zákona působí proti

příčině svého vzniku. Díky tomu tento moment roztáčí rotor ve směru otáčení magnetického pole statoru, čímž dojde k snižování indukovaného napětí a proudů v rotoru. Pokud bychom chtěli znát sílu, která působí na rotor, můžeme ji spočítat ze známého vztahu:

$$F = BIl \text{ [N]}, \quad (1)$$

kde  $B$  je magnetická indukce statoru,  $I$  je proud protékající rotorem a  $l$  je délka vodiče v rotoru.

Z tohoto popisu je jasné, že se motor musí otáčet takzvanou asynchronní rychlostí, tedy rychlost rotoru musí být odlišná od rychlosti točivého pole. Pokud by rychlost byla stejná, tedy synchronní, nedocházelo by k indukování napětí do rotoru, netekl by jím žádný proud, díky čemuž by vznikala nulový moment.

Obecný asynchronní stroj může pracovat ve třech režimech, které rozlišujeme například pomocí porovnání synchronních otáček a otáček rotoru. K tomuto porovnání slouží takzvaný skluz. Nejdříve si nadefinujeme úhlovou rychlost točivého pole, jejíž velikost lze vypočítat jako:

$$\omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p_p} = \frac{\pi n_1}{30} \text{ [s}^{-1}\text{]}, \quad (2)$$

kde  $f_1$  je frekvence napájecího napětí přivedeného na stator,  $p_p$  je počet pól párů statoru a  $n_1$  je počet otáček statorového točivého pole za minutu. Z této rychlosti již můžeme nadefinovat skluz jako:

$$s = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} = \frac{n_1 - n}{n_1} \text{ [-]}, \quad (3)$$

kde  $\omega$  je úhlová rychlost rotoru a  $n$  je počet otáček rotoru za minutu.

Pokud pro skluz platí, že  $1 > s > 0$ , poté stroj pracuje jako motor, tedy dodáváme elektrickou energii do statoru a odebíráme mechanickou energii z hřídele. Pokud je skluz větší než jedna, tedy  $1 < s$ , stroj pracuje jako brzda. Znamená to, že je rotor mechanicky urychlován proti působení točivého pole a dochází k brzdění. Konečně pokud je skluz menší než nula, tedy  $s < 0$ , asynchronní stroj funguje jako generátor. Rotor je v tomto případě urychlován ve směru točení pole nad synchronní otáčky a stroj dodává elektrickou energii do sítě.

### 2.3. Náhradní schéma

Abychom mohli sestavit náhradní schéma asynchronního motoru, musíme se nejdříve podrobněji podívat na děje uvnitř stroje. Z principu činnosti již víme, že pokud je napájeno statorové vinutí a rotor stojí, dochází k indukování napětí do rotoru. Toto napětí má stejnou frekvenci jako napětí napájecí, tedy frekvenci  $f_1$ . Z tohoto poznatku můžeme sestavit napěťové rovnice pro asynchronní motor. Jelikož je statorové a rotorové vinutí navzájem magneticky svázáno, lze tyto rovnice sestavit pomocí analogie s napěťovými rovnicemi transformátoru, přičemž hlavním rozdílem mezi nimi je přítomnost vzduchové mezery v magnetickém obvodu asynchronního stroje.

Pro zjednodušení budeme uvažovat trojfázový, souměrný motor s kotvou nakrátko. Napěťové rovnice pro stator a rotor pak jsou:

$$\hat{U}_S = R_S \hat{I}_S + jX_{\sigma S} \hat{I}_S + \hat{U}_{iS} \text{ [V]}, \quad (4)$$

$$\hat{U}_{iR} = R_R \hat{I}_R + jX_{\sigma R} \hat{I}_R \text{ [V]}, \quad (5)$$

kde  $\hat{U}_S$  je napětí přivedené na stator,  $R_S$  je odpor statorového vinutí,  $\hat{I}_S$  je proud procházející statorovým vinutím,  $X_{\sigma S}$  představuje rozptylovou reaktanci statorového vinutí a  $\hat{U}_{iS}$  je indukované napětí ve statorovém vinutí. Analogickým způsobem lze definovat veličiny v druhé rovnici. Velikosti indukovaných napětí v těchto rovnicích můžeme spočítat ze vztahů:

$$U_{iS} = 4,44 \Phi_\mu f_1 N_S k_{vS} \text{ [V]}, \quad (6)$$

$$U_{iR} = 4,44 \Phi_\mu f_1 N_R k_{vR} \text{ [V]}, \quad (7)$$

kde  $\Phi_\mu$  je celkový hlavní magnetický tok,  $N_S$  je počet závitů statorového vinutí a  $k_{vS}$  je činitel statorového vinutí. Analogicky pak lze definovat veličiny v rovnici pro indukované napětí v rotoru.

Napěťová rovnice (5) však platí pouze při rotoru, který se neotáčí. Ve chvíli, kdy se rotor začne roztáčet, mění se jeho úhlová rychlost  $\omega$  a za předpokladu neměnné úhlové rychlosti točivého pole  $\omega_1$  se začne měnit skluz. Změna skluzu se projeví změnou frekvence indukovaného napětí do rotoru. Velikost skluzové úhlové rychlosti a skluzové frekvence rotoru vypočteme ze vztahů:

$$\omega_s = s \omega_1 \text{ [s}^{-1}\text{]}, \quad (8)$$

$$f_s = s f_1 \text{ [Hz]}. \quad (9)$$

Změna frekvence se projeví v rotorové napěťové rovnici změnou indukovaného napětí, které je dle vztahu (7) na frekvenci závislé, a ve změně rozptylové reaktance, která je obecně závislá na úhlové rychlosti. Napěťová rovnice (5) poté přechází do tvaru:

$$s\hat{U}_{iR} = R_R \hat{I}_R + j s X_{\sigma R} \hat{I}_R \text{ [V]}, \quad (10)$$

$$\hat{U}_{iR} = \frac{1}{s} R_R \hat{I}_R + j X_{\sigma R} \hat{I}_R = R_R \hat{I}_R + \frac{1-s}{s} R_R \hat{I}_R + j X_{\sigma R} \hat{I}_R \text{ [V]}. \quad (11)$$

Nyní již máme obě napěťové rovnice ve vhodném tvaru. Nakreslení náhradního schématu však ještě není možné, protože abychom mohli spojit rotor i stator do jednoho schématu, musí být shodné  $\hat{U}_{iR}$  a  $\hat{U}_{iS}$ . Toho docílíme například přepočtem parametrů rotoru na stator. Z teorie elektromagnetického pole lze zjistit, že abychom tento přepočet mohli korektně provést, musí platit, že se nezmění magnetomotorické napětí ve vinutích. Na základě této úvahy platí tyto podmínky přepočtu:

- a) Nahradíme rotorové vinutí vinutím, které má stejný počet závitů  $N$ , stejný počet fází  $m$  a stejný činitel vinutí  $k$  jako vinutí statorové.
- b) Přepočtem se nesmí změnit úhly mezi fázory veličin na statorové straně.
- c) Přepočet nesmí mít vliv na výkonovou bilanci motoru.

Musíme přepočítat všechny rotorové veličiny tedy  $\hat{I}_R$ ,  $\hat{U}_{iR}$ ,  $R_R$ ,  $X_{\sigma R}$ . Pro značení přepočtených hodnot budeme využívat hvězdičku.

Magnetomotorické napětí je závislé na uspořádání vinutí a proudu jím tekoucího. Přepočtený proud rotorem získáme z úvahy, že nesmí-li se změnit celkové magnetomotorické napětí  $F_{mc} = F_{mS} + F_{mR}$ , musí pro přepočtené magnetomotorické napětí rotoru platit  $F_{mR}^* = F_{mR}$ . Dle teorie elektromagnetického pole a podmínky a) sestavíme rovnice pro magnetoelektrická napětí, ze kterých následně vyjádříme přepočtený proud rotorem:

$$0,45 m_S \frac{N_S \hat{I}_R^* k_{vS}}{p} = 0,45 m_R \frac{N_R \hat{I}_R k_{vR}}{p} \text{ [A]}, \quad (12)$$

$$\hat{I}_R^* = \hat{I}_R \frac{m_R N_R k_{vR}}{m_S N_S k_{vS}} \text{ [A]}. \quad (13)$$

Jak již bylo řečeno, pro sestavení náhradního schématu musí platit  $\hat{U}_{iR}^* = \hat{U}_{iS}$ . Dle rovnic (6) a (7) tedy platí:



$$\hat{U}_{iR}^* = \hat{U}_{iR} \frac{N_S k_{vS}}{N_R k_{vR}} \text{ [V]}. \quad (14)$$

Přepočty odporu a rozptylové reaktance jsou odvozeny od podmínky c). Musí platit, že se nezmění Jouleovy ztráty v rotoru ani poměry mezi činnou a jalovou složkou impedance rotoru. Uvažujeme-li Jouleovy ztráty jako  $P_{jR} = R_R I_R^2$  a bereme-li je v  $m_R$  fázích, pak platí:

$$P_{jR}^* = P_{jR} = m_S R_R^* (\hat{I}_R^*)^2 = m_R R_R \hat{I}_R^2 \text{ [W]}, \quad (15)$$

$$R_R^* = R_R \frac{m_R}{m_S} \left( \frac{\hat{I}_R}{\hat{I}_R^*} \right)^2 = R_R \frac{m_S}{m_R} \left( \frac{N_S k_{vS}}{N_R k_{vR}} \right)^2 \text{ [\Omega]}. \quad (16)$$

Aby zůstaly zachovány poměry impedancí, musí se stejným způsobem, jakým se změnil odpor, změnit i rozptylová reaktance. Bude tedy platit:

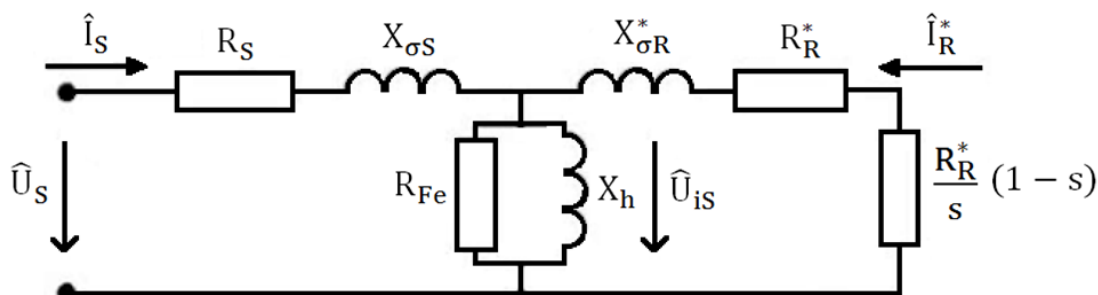
$$X_{\sigma R}^* = X_{\sigma R} \frac{m_R}{m_S} \left( \frac{\hat{I}_R}{\hat{I}_R^*} \right)^2 = X_{\sigma R} \frac{m_S}{m_R} \left( \frac{N_S k_{vS}}{N_R k_{vR}} \right)^2 \text{ [\Omega]}. \quad (17)$$

Výsledné napěťové rovnice po přepočtu, ze kterých již můžeme sestavit náhradní schéma, tedy vypadají:

$$\hat{U}_S = R_S \hat{I}_S + jX_{\sigma S} \hat{I}_S + \hat{U}_{iS} \text{ [V]}, \quad (18)$$

$$\hat{U}_{iR}^* = \hat{U}_{iS} = R_R^* \hat{I}_R^* + \frac{1-s}{s} R_R^* \hat{I}_R^* + jX_{\sigma R}^* \hat{I}_R^* \text{ [V]}. \quad (19)$$

Z rovnic (18) a (19) již snadno nakreslíme náhradní schéma asynchronního motoru s kotvou nakrátko. V tomto schématu se ještě navíc oproti napěťovým rovnicím objevuje odpor  $R_{Fe}$  respektující ztráty v železe a reaktance  $X_h$  respektující hlavní reaktanci obvodu.

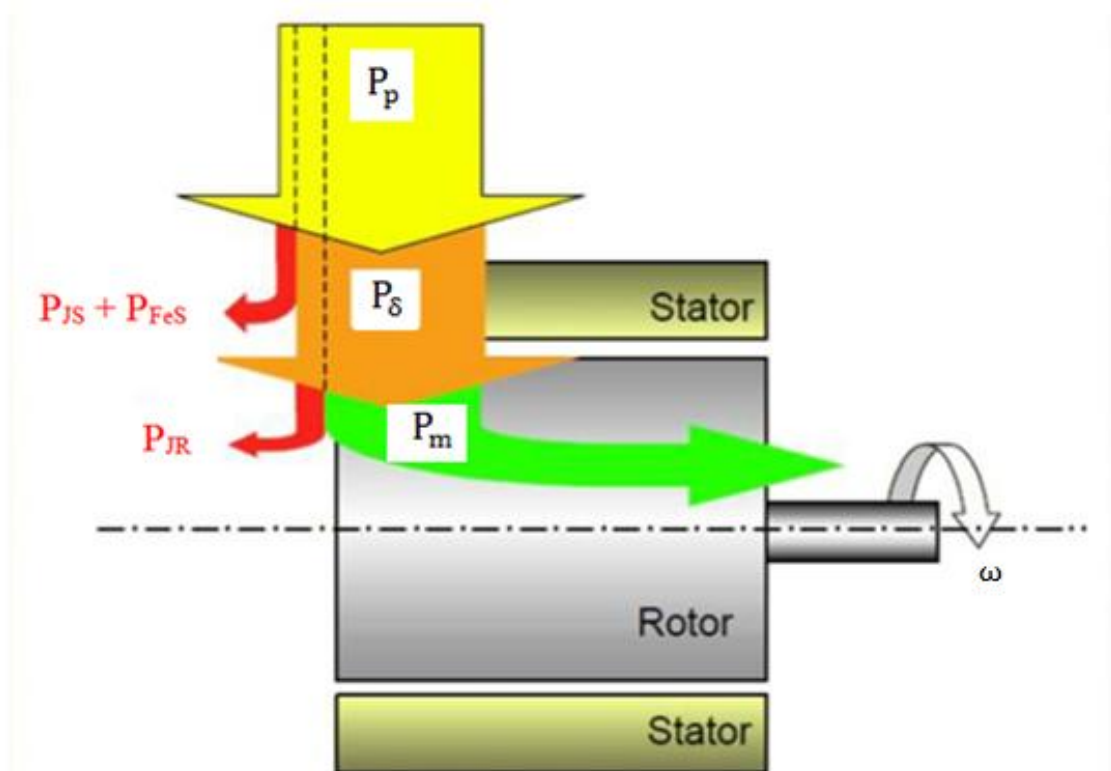


Obrázek 2 – Náhradní schéma asynchronního motoru

## 2.4. Výkonová bilance

Připnutím zdroje napětí na svorky začneme do asynchronního motoru dodávat elektrický výkon  $P_p$ . Část tohoto výkonu se ve statorovém vinutí změní na teplo ve formě tzv. Jouleových ztrát  $P_{JS}$  a další část se spotřebuje na tzv. ztráty v železe  $P_{FeJ}$ . Jouleovy ztráty jsou závislé na druhé mocnině protékajícího proudu a způsobují oteplování motoru. Z tohoto důvodu je motor nutno chladit. Ztráty v železe představují nezanedbatelnou složku ztrát závislou na napájecí frekvenci. Jejich vliv se snižuje skládáním statoru a rotoru z plechů z oceli pro elektrotechniku, přičemž platí, že čím tenčí plechy využijeme, tím vyšší frekvence lze dosáhnout.

Výkon snížený o  $P_{JS}$  a  $P_{FeJ}$  poté vstupuje do vzduchové mezery. Výkon ve vzduchové mezeře  $P_\delta$  se poté dělí na Jouleovy ztráty v rotoru  $P_{JR}$  a vlastní mechanický výkon  $P_m$  přenášený na hřídel motoru. Mechanický výkon  $P_m$  je ještě částečně snížený o mechanické ztráty  $P_{mech}$  například v ložiskách.



Obrázek 3 – Výkonová bilance asynchronního motoru - zdroj [4]

## 2.5. Moment asynchronního motoru

Při určování momentu asynchronního motoru budeme vycházet ze základního vztahu pro výkon  $P = M\omega$ . Z tohoto vzorce a z poznatků uvedených v předchozích kapitolách nadefinujeme vnitřní moment asynchronního motoru jako:

$$M_i = \frac{P_\delta}{\omega_1} \text{ [Nm]}. \quad (20)$$

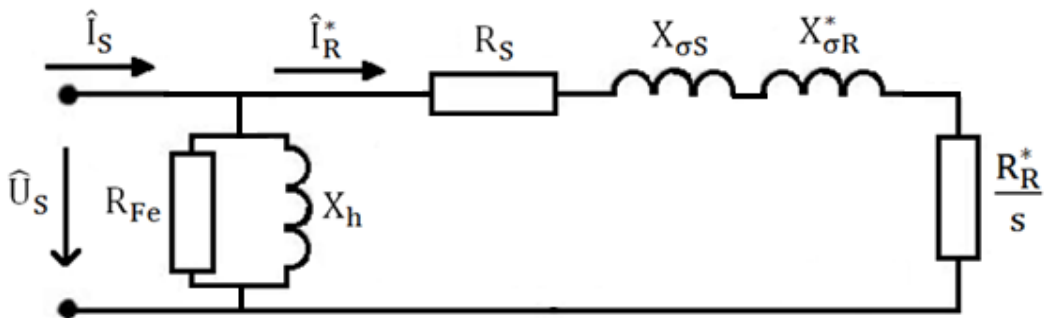
Abychom mohli provést rozbor tohoto momentu, musíme se podrobněji podívat na výkon ve vzduchové mezeře  $P_\delta$ . Tento výkon můžeme definovat také pomocí Jouleových ztrát v rotoru. Víme, že proud indukující se v rotoru má skluzovou úhlovou rychlost. Jouleovy ztráty v rotoru jsou závislé na kvadrátu tohoto proudu. Můžeme tedy říci, že tento ztrátový výkon je definován skluzovou složkou výkonu ve vzduchové mezeře. Budeme-li brát v úvahu již přepočtené hodnoty veličin statoru, platí vztahy:

$$P_{JR}^* = m_s R_R^* (\hat{I}_R^*)^2 \text{ [W]}, \quad (21)$$

$$P_{JR}^* = s P_\delta \text{ [W]}. \quad (22)$$

Dalším krokem v určení vnitřního momentu asynchronního motoru je rozbor proudu  $\hat{I}_R^*$ . Pro tento rozbor se využívá zjednodušené náhradní schéma asynchronního motoru, toto schéma můžeme vidět na obrázku 4. Převedením náhradního schématu do tohoto tvaru se dopouštíme jisté nepřesnosti, ale tato nepřesnost je malá, a proto se většinou zanedbává. Z tohoto schématu pak můžeme snadno odvodit vzorec pro proud rotorem:

$$\hat{I}_R^* = \frac{\hat{U}_S}{\sqrt{\left(R_S + \frac{R_R^*}{s}\right)^2 + (X_{\sigma S} + X_{\sigma R}^*)^2}} \text{ [A]}. \quad (23)$$



Obrázek 4 – Zjednodušené náhradní schéma asynchronního motoru

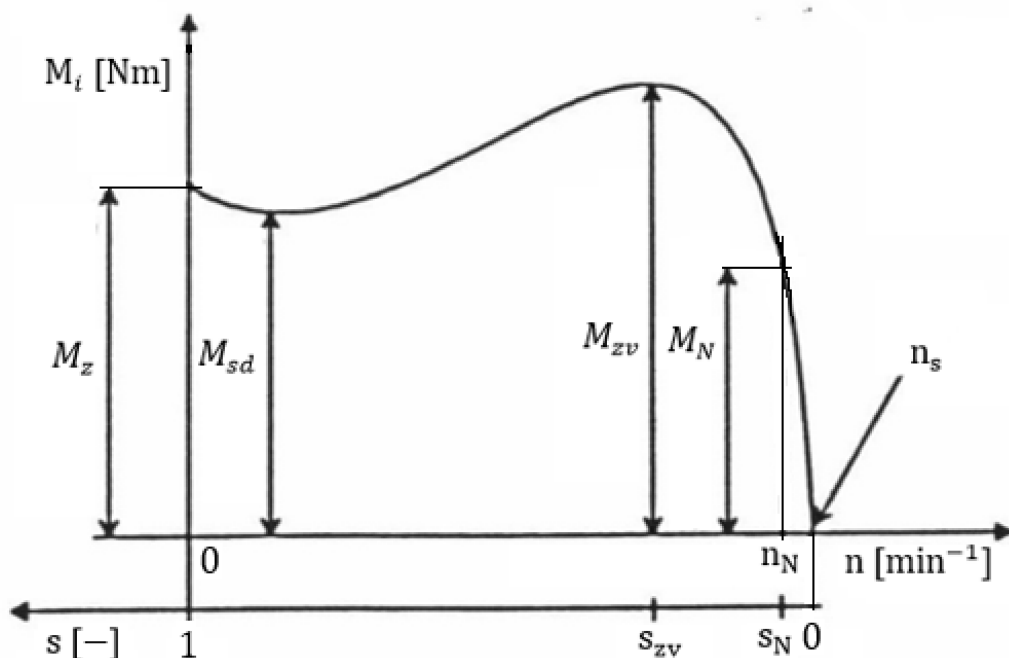
Spojením rovnic (20), (21), (22) a (23) dostaneme výsledný vztah pro vnitřní moment asynchronního motoru:

$$M_i = \frac{m_S R_R^*}{s \omega_1} \frac{\hat{U}_S^2}{\left(R_S + \frac{R_R^*}{s}\right)^2 + (X_{\sigma S} + X_{\sigma R}^*)^2} \quad [\text{Nm}]. \quad (24)$$

Z rovnice (24) vidíme, že moment asynchronního motoru je závislý na druhé mocnině vstupního napětí, frekvenci tohoto napětí a skluzu. Těchto poznatků poté můžeme využít například při rozběhu či regulaci těchto motorů.

Podrobnějším rozбором rovnice (24), například pomocí výpočetní techniky, dostáváme momentovou charakteristiku asynchronního motoru. Jeden z možných průběhů této charakteristiky můžeme vidět na obrázku 5.

V obrázku 5 jsou také označeny důležité body v této závislosti. Tyto body jsou:  $M_z$  - Záběrný moment,  $M_s$  - Sedlový moment,  $M_{zv}$  a  $s_{zv}$  - Moment zvratu při skluzu zvratu,  $M_N$ ,  $n_N$  a  $s_N$  - Jmenovitý moment při jmenovitých otáčkách a jmenovitém skluzu,  $n_s$  - Synchronní otáčky.



Obrázek 5 – Momentová charakteristika asynchronního motoru

### 3. Předepsané zkoušky asynchronních motorů

Povinnými zkouškami prováděnými na elektrických točivých strojích se zabývá norma ČSN 35 0010 (350010). Tato norma stanovuje jednotlivé zkoušky, postupy měření a podmínky, při jakých se provádějí. Konkrétně se jedná o tyto základní elektrické zkoušky:

- a) Měření činného odporu vinutí
- b) Měření izolačního odporu
- c) Zkouška elektrické odolnosti vinutí přiloženým napětím
- d) Měření naprázdno
- e) Měření nakrátko
- f) Měření charakteristik při zatížení
- g) Zkouška přetížitelnosti
- h) Zkouška komutace
- i) Zkoušky říditelných vlastností
- j) Oteplovací zkouška
- k) Určení účinnosti
- l) Rozběhové zkoušky

Na asynchronních motorech se provádějí kromě zkoušky komutace všechny výše uvedené zkoušky, některé však nejsou povinné a provádějí se pouze na vyžádání. Takovou zkouškou je například zkouška říditelných vlastností.

#### 3.1. Měření činného odporu vinutí

Tímto měřením zjistíme odpor jednotlivých vinutí asynchronního motoru. Následným vyhodnocením výsledků se dá zjistit množství závad, jako například mezizávitový zkrat. Tento zkrat totiž způsobí, že jedno vinutí bude mít menší odpor než vinutí zbylá.

Měření můžeme provádět vhodným můstkem, ohmmetrem nebo ohmovou metodou, přičemž teplota vinutí se musí při měření rovnat teplotě okolí. Tuto podmínku splňuje stroj, jestliže se nachází v daném prostředí alespoň 8 hodin v klidu a výkyv teploty okolí není vyšší než 5 °C. Naměřený odpor  $R$  při teplotě  $\theta$  poté přepočítáváme na teplotu 20 °C dle vzorce:

$$R_{20} = R \frac{235 + 20}{235 + \theta} [\Omega]. \quad (25)$$

Pro měření použijeme stejnosměrný proud o velikost 10 až 20% jmenovitého proudu motoru. Tento proud získáme buď z baterie, nebo ze stabilizovaného zdroje proudu. Stejnosměrný proud volíme, abychom vyloučili vliv indukčností vinutí. Při měření musíme také vyloučit přechodové odpory. Měření provádíme třikrát a výsledek získáme jejich aritmetickým průměrem.

Pokud jsou vyvedeny začátky i konce vinutí, měříme všechna vinutí zvlášť. Tímto získáme fázový odpor vinutí  $R_f$ . Pokud jsou vinutí ve svorkovnici trvale zapojena buď do trojúhelníku, nebo do hvězdy, měříme odpor svorkový  $R_{sv}$ . Dále pak platí:

$$R_f = \frac{1}{2} R_{sv} [\Omega], \quad (26)$$

$$R_f = \frac{3}{2} R_{sv} [\Omega], \quad (27)$$

přičemž pro zapojení do hvězdy platí vztah (26) a při zapojení do trojúhelníku vztah (27). V případě rotoru vyvedeného na kroužky měříme odpor jak statorového tak rotorového vinutí, v případě kotvy nakrátko se měří pouze odpor statorového vinutí.

### 3.2. Měření izolačního odporu a zkouška elektrické odolnosti

Před zkouškou elektrické odolnosti musí být provedena zkouška izolačního odporu. V této zkoušce se zjišťuje velikost odporu izolace mezi jednotlivými vinutími nebo mezi vinutími a kostrou. Velikost izolačního odporu musí dosáhnout minimálně hodnoty, která se zjišťuje výpočtem. Vzorec pro tento výpočet lze nalézt v normě ČSN 35 0000. V této zkoušce se může také zjišťovat například závislost izolačního odporu na době měření, na velikosti měřicího napětí a podobně.

Jestliže stroj splňuje podmínku minimálního izolačního odporu, lze provést zkoušku elektrické odolnosti vinutí přiloženým napětím. Touto zkouškou musí projít každý vyrobený točivý stroj.

Zkušebním napětím bývá obvykle střídavé napětí a podle druhu asynchronního motoru dochází ke zkoušce izolace mezi vinutími statoru i rotoru, mezi vinutími statoru nebo rotoru a kostrou, popřípadě izolace svorek a sběracích kroužků.

### 3.3. Měření naprázdno

Měření naprázdno provádíme na motoru v chodu naprázdno. Chodem naprázdno rozumíme stav motoru, kdy je napájen jmenovitým napětím, které má jmenovitou frekvenci, a zároveň je v případě kroužkových motorů rotorové vinutí zkratováno. Motor je nezatížený a otáčí se tedy téměř synchronní rychlostí. Z této podmínky vyplývá, že je moment na hřídeli nulový a odebíraný příkon motoru se tedy musí přeměňovat pouze na ztráty v něm, konkrétně na ztráty v železe, ztráty Jouleovy a ztráty mechanické.

Při měření naprázdno zjišťujeme proud naprázdno, účinník naprázdno, ztrátové výkony a prvky příčné větve náhradního schématu  $R_{Fe}$  a  $X_H$ . Abychom tyto hodnoty mohli zjistit, provádí se měření závislosti proudu statoru na jeho napětí, tzv. charakteristika naprázdno, a závislosti ztrátového výkonu na stejném napětí. Kromě těchto hlavních zkoušek se při měření naprázdno mohou dělat i dodatkové zkoušky, jako jsou zkoušky závitové izolace, obsah vyšších harmonických proudů a napětí, souměrnost napětí ve fázích, měření hluku a kmitání nebo kontrola označení svorek motoru.

Vlastní měření naprázdno provádíme za neměnné jmenovité frekvence vstupního napětí. Regulovatelným zdrojem napětí snižujeme napájecí napětí motoru od hodnoty odpovídající 110 až 120 % jmenovitého napětí. Bude platit, že se snižujícím se napájecím napětím klesá proud protékající statorem. Při určité hodnotě napětí se začne značně zvětšovat hodnota skluzu a motor se při dalším snižování napětí zastaví. S růstem skluzu se zvyšuje proud indukovaný do rotoru a jeho zpětnou reakcí i proud, který protéká statorovým vinutím. Díky tomuto jevu se statorový proud začne od určité hodnoty napájecího napětí zvětšovat. Body ovlivněné tímto jevem již nejsou součástí měření naprázdno, proto spodní hranici napětí pro tuto zkoušku tvoří poslední hodnota, při které se tento jev ještě neuplatní. Toto napětí odpovídá přibližně 30% jmenovité hodnoty.

Při zkoušce zaznamenáváme sdružené napájecí napětí  $U_0$ , proud protékající v jednotlivých fázích  $I_0$ , příkon motoru  $P_0$  a hlídáme, zdali se nemění frekvence. Z těchto hodnot poté můžeme určit účinník naprázdno pomocí vzorce:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_0I_0} [-]. \quad (28)$$

Jouleovy ztráty pak určíme pomocí vztahu:

$$P_{JS} = 3R_f I_0^2 \text{ [W]}. \quad (29)$$

Mechanické ztráty nejsou závislé na napájecím napětí a získáme je graficky ze závislosti příkonu na napájecím napětí. Extrapolací prodloužíme tuto křivku do hodnoty nulového napětí a tím získáme hodnotu těchto ztrát  $P_{mech}$ . Ztráty v železe již pak snadno spočítáme ze vzorce, který vyplývá z předpokladů měření:

$$P_{Fe} = P_0 - P_{JS} - P_{mech} \text{ [W]}. \quad (30)$$

Výstupem tohoto měření jsou pak hodnoty jednotlivých veličin při jmenovitém napětí motoru. Jedná se o:  $I_{0N}$ ,  $P_{0N}$ ,  $\cos \varphi_{0N}$ ,  $P_{JSN}$ ,  $P_{FeN}$  a  $P_{mech}$ .

Při této zkoušce můžeme také obvodovou analýzou náhradního schématu zjistit prvky příčné větve. Nejčastěji se zjišťuje magnetizační proud  $I_\mu$ . Tento proud odpovídá jalové složce proudu naprázdno a lze tedy vypočítat ze vztahu:

$$I_\mu = I_{0N} \sin \varphi_{0N} \text{ [A]}. \quad (31)$$

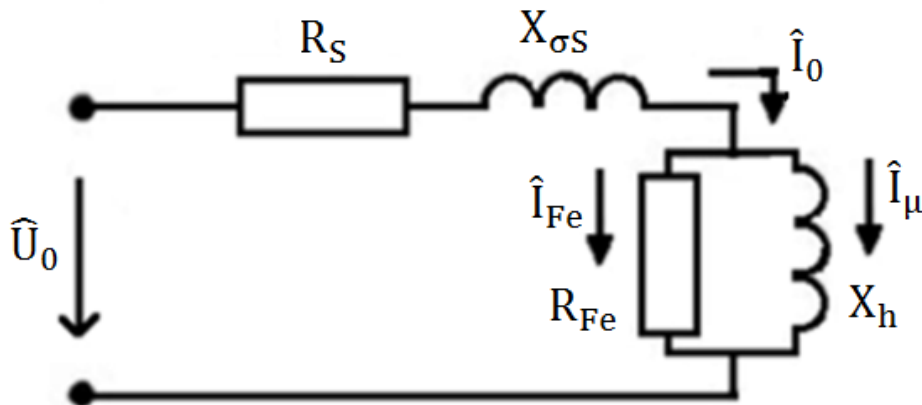
Podobným způsobem bychom mohli určit proud  $I_{Fe}$ :

$$I_{Fe} = I_{0N} \cos \varphi_{0N} \text{ [A]}, \quad (32)$$

kteřý odpovídá činné složce proudu naprázdno. Pomocí těchto proudů a napětí  $U_0$  lze již pak snadno určit ztráty v železe  $R_{Fe}$  a hlavní reaktanci  $X_h$ :

$$R_{Fe} = \frac{U_{0N}}{I_{Fe}} \text{ [\Omega]}, \quad (33)$$

$$X_h = \frac{U_{0N}}{I_\mu} \text{ [\Omega]}. \quad (34)$$



Obrázek 6 – Náhradní schéma asynchronního motoru pro měření naprázdno



### 3.4. Měření nakrátko

Měření nakrátko provádíme na motoru v chodu nakrátko. Chodem nakrátko rozumíme stav, kdy je motor napájen napětím, které má jmenovitou frekvenci, zároveň je zkratováno rotorové vinutí v případě rotoru vyvedeného na kroužky a rotor motoru se neotáčí. Z těchto podmínek vyplývá, že veškerý příkon odebíraný motorem se přeměňuje na ztráty v železe a ztráty Jouleovy, tedy na teplo. Motor se nachází v chodu nakrátko například při rozběhu přímým připojením na síť.

Při měření nakrátko zjišťujeme proud nakrátko, účinník nakrátko, ztráty nakrátko a prvky podélné větve náhradního schématu  $R$  a  $X_{\sigma}$ . Abychom tyto hodnoty mohli zjistit, provádí se měření závislosti proudu protékajícího státorem na napájecím napětí, popřípadě závislosti příkonu motoru na napájecím napětí.

Vlastní měření nakrátko provádíme za konstantní jmenovité frekvence vstupního napětí. Regulovatelným zdrojem napětí zvyšujeme vstupní napětí od nulové hodnoty. Jelikož je při této zkoušce zabrzděný rotor, tedy  $s = 1$ , odebírá motor při jmenovitém napětí proud, který je několikanásobně vyšší než jmenovitý proud motoru. Z tohoto důvodu se zkouška neprovádí až do jmenovitého napětí, ale pouze do napětí, při kterém motor dosahuje přibližně jmenovitého proudu. Jelikož se celý příkon mění v teplo, je nutné provádět měření velice rychle, aby nedošlo k poškození izolace motoru a zároveň aby došlo k co nejmenší chybě měření v důsledku teplotní změny odporu vinutí.

Při zkoušce zaznamenáváme sdružené napájecí napětí  $U_k$ , proud protékající v jednotlivých fázích  $I_k$ , příkon motoru  $P_k$  a hlídáme, zdali se nemění frekvence a zdali proud nepřesáhl jmenovitou hodnotu. Z těchto hodnot poté můžeme určit účinník nakrátko pomocí vzorce:

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3}U_k I_k} [-]. \quad (35)$$

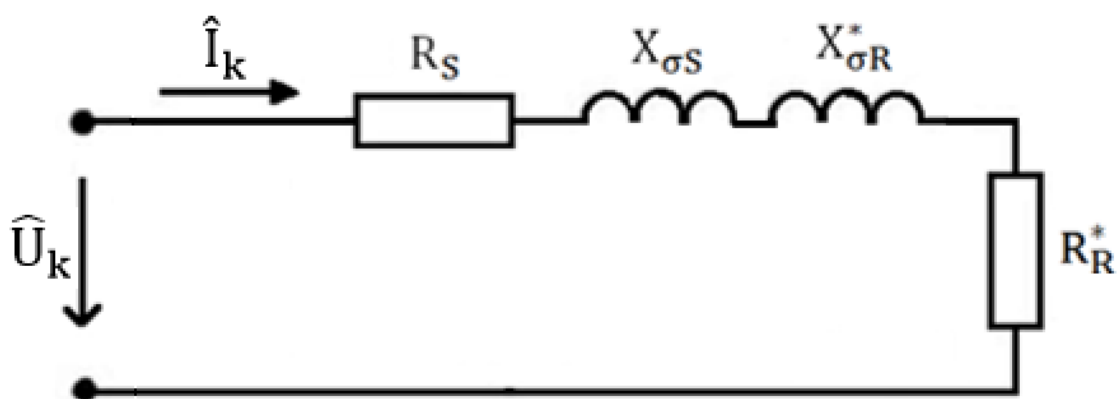
Abychom zjistili proud nakrátko při jmenovitém napětí, musíme přepočítat naměřené hodnoty proudu při sníženém napětí do napětí jmenovitého. Toho docílíme extrapolací naměřené závislosti statorového proudu na napájecím napětí. Jelikož je tato závislost v okolí jmenovitého napětí lineární, provádíme tuto extrapolaci pomocí přímky.

Výstupem tohoto měření je poté hodnota proudu nakrátko při jmenovitém napětí  $I_{kN}$ , ztrát nakrátko při jmenovitém proudu  $P_{kN}$  a zkratového účinníku při jmenovitém proudu  $\cos \varphi_{kN}$ .

Při této zkoušce můžeme také obvodovou analýzou náhradního schématu zjistit prvky podélné větve. Jelikož známe všechny potřebné veličiny, můžeme zjistit, jakou hodnotu má sériová kombinace odporů a sériová kombinace reaktancí dle vztahů:

$$R_S + R_R^* = \frac{U_{kN} \cos \varphi_{kN}}{I_{kN}} [\Omega], \quad (36)$$

$$X_{\sigma S} + X_{\sigma R}^* = \frac{U_{kN} \sin \varphi_{kN}}{I_{kN}} [\Omega]. \quad (37)$$



Obrázek 7 – Náhradní schéma asynchronního motoru pro měření nakrátko

### 3.5. Měření charakteristik při zatížení

Při tomto měření se zjišťuje, jakým způsobem se motor chová při zatížení, a jeho výsledky se využívají v mnoha dalších zkouškách. Jedná se o soubor pracovních charakteristik a o otáčkovou charakteristiku. Pracovní charakteristiky popisují závislost různých veličin motoru na jeho výkonu. Měřenými veličinami mohou být statorový proud, skluz, příkon, účinník nebo účinnost. Otáčková charakteristika vyjadřuje nejčastěji závislost otáček motoru na zátěžném momentu. Často se místo této charakteristiky používá charakteristika momentová, která je k ní inverzní. Jde tedy o závislosti zátěžného momentu na otáčkách motoru. Všechny závislosti se uvádějí při konstantním jmenovitém napájecím napětí, které má po celý průběh měření konstantní frekvenci, a při provozní teplotě stroje.

### 3.5.1. Zatěžovací charakteristiky

Měření zatěžovacích charakteristik provádíme postupnou změnou zátěže od přetížení odpovídajícího přibližně 110 % jmenovitého výkonu motoru až po chod naprázdno. U malých a středních motorů používáme jako zátěž dynamometry nebo brzdy, u velkých motorů zatěžujeme nejčastěji pomocí dynama, popřípadě pomocí střídavých generátorů.

Při zkoušce zaznamenáváme sdružené napájecí napětí  $U$ , proud protékající v jednotlivých fázích  $I$  a příkon motoru  $P_p$ . Z dynamometru pak snímáme zátěžný moment  $M_z$  a otáčkoměrem měříme otáčky motoru  $n$ . Při celém průběhu měření hlídáme, zdali se nemění vstupní napětí a jeho frekvence. Z těchto hodnot poté můžeme určit skluz, výkon na hřídeli, účinnost a účiník pomocí vzorců:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} [-], \quad (38)$$

$$P = M_z \frac{2\pi n}{60} [W], \quad (39)$$

$$\eta = \frac{P}{P_p} 100 [\%], \quad (40)$$

$$\cos \varphi = \frac{P_p}{\sqrt{3}UI} [-], \quad (41)$$

kde  $n_s = n_1$  zjistíme z rovnice (2). Naměřené výsledky poté zpracujeme graficky.

### 3.5.2. Momentová charakteristika

Momentovou charakteristiku můžeme měřit dvěma rozdílnými způsoby. Prvním je statické měření, při kterém postupně zvyšujeme brzdny moment a měříme charakteristiky bod po bodě. Druhým je dynamické měření, při kterém se využívá přechodného děje při rozběhu motoru. Nezatížený motor je při něm rozbíhán přímým připojením na síť. Měří se buď přímo průběh momentu, nebo se měří průběh rychlosti, který se následně derivuje. Tento postup zde nebude podrobněji popisován.

Statickou momentovou charakteristiku měříme v celém rozmezí rychlostí motoru. Z tohoto důvodu se provádí její měření při sníženém napětí, abychom mohli proměřit i oblasti blízké chodu nakrátko. Obvykle se volí napětí odpovídající 50 % jmenovité hodnoty. Jelikož však musí být výsledná charakteristika uvedena

při jmenovitém napětí, musí se naměřené hodnoty přepočítávat. Zatěžování pak provádíme stejným způsobem jako při měření zatěžovacích charakteristik.

V průběhu zkoušky zaznamenáváme snížené sdružené napájecí napětí  $U_{\downarrow}$  a proud protékající v jednotlivých fázích  $I_{\downarrow}$ . Z dynamometru pak snímáme zátěžný moment  $M_{z\downarrow}$  a otáčkoměrem měříme otáčky motoru  $n$ . Při celém průběhu měření hlídáme, zdali se nemění vstupní napětí a jeho frekvence.

Po proměření celého otáčkového rozsahu musíme přepočítat hodnoty proudu  $I_{\downarrow}$  a momentu  $M_{z\downarrow}$  na jmenovité napětí  $U_N$ . Pro tento přepočet využijeme vztah (24). Z tohoto vztahu vyplývá, že moment je závislý na kvadrátu napětí, proud je pak závislý na napětí lineárně. Z těchto úvah pak můžeme psát rovnice přepočtu:

$$M = M_{z\downarrow} \left( \frac{U_N}{U_{\downarrow}} \right)^2 \text{ [Nm]}, \quad (42)$$

$$I = I_{\downarrow} \frac{U_N}{U_{\downarrow}} \text{ [A]}. \quad (43)$$

Při momentové charakteristice se obvykle kromě závislosti momentu na otáčkách uvádí i závislost statorového proudu na otáčkách. Tento průběh se pak dále využívá při následujících zkouškách.

### 3.6. Doplnkové zkoušky

Tyto zkoušky se často provádějí současně s některými již dříve uvedenými zkouškami a slouží k doplnění informací o daném motoru.

#### 3.6.1. Zkoušky přetížitelnosti

Při těchto zkouškách se zjišťují elektrické a mechanické přetížitelnosti motoru bez zřetele k oteplení. Jedná se o tři zkoušky, a to o zkoušku proudového přetížení, momentového přetížení a napět'ového přetížení.

Zkouška proudového přetížení se provádí při měření charakteristik při zatížení. K jejímu vyhodnocení lze využít závislost proudu na otáčkách naměřeného při měření momentové charakteristiky.

Zkouška momentové přetížitelnosti se rovněž provádí při měření momentové charakteristiky. Nalezneme-li moment zvratu  $M_{zv}$  v naměřené závislosti momentu na otáčkách, můžeme momentovou přetížitelnost určit z poměru  $\frac{M_{zv}}{M_N}$ , kde  $M_N$  je jmenovitý moment motoru.

Zkouška napětového přetížení se provádí při zkoušce naprázdno. Při této zkoušce se zkoumá, při jakém napájecím napětí již dochází k poškození stroje.

### **3.6.2. Zkoušky říditelných vlastností**

Při těchto zkouškách se zjišťuje, jakým způsobem reaguje motor na ruční či samočinné řízení. Jedná se například o kontrolu správné funkce řídicího mechanismu, jeho reakční dobu a podobně. Pokud je to vyžadováno, měří se při této zkoušce také přechodné jevy při řízení. Všechny tyto zkoušky se provádějí při měření charakteristik při zatížení.

### **3.6.3. Oteplovací zkouška**

Při této zkoušce se provádí dlouhodobý průzkum oteplení stroje při konstantním výkonu. Měření teploty probíhá v časových intervalech na několika místech motoru. Trvání zkoušky může být od desítek minut až po jednotky hodin. Na konci zkoušky se provede vyhodnocení změřeného oteplení. Součástí oteplovací zkoušky může být i měření tepelné změny odporu vinutí.

### **3.6.4. Určení účinnosti**

Aby mohl být motor uveden do provozu, musí splňovat požadavky na energetickou účinnost. Tato účinnost se nově vyhodnocuje podle normy IEC 60034-30-1, která rozlišuje čtyři třídy účinnosti IE1, IE2, IE3 a IE4. Zkouška účinnosti se provádí při měření zatěžovacích charakteristik.

### **3.6.5. Rozběhové zkoušky**

Při těchto zkouškách se zjišťuje například doba rozběhu motoru na jmenovité otáčky, průběh nárůstu proudu, napětí, otáček a výkonu. Tuto zkoušku lze tedy využít pro dynamické měření momentové charakteristiky. Kromě této zkoušky se může provádět i zkouška doběhová, při které sledujeme stejné veličiny a díky níž se dá určit moment setrvačnosti motoru.

## 4. Měřicí systém pro automatizaci

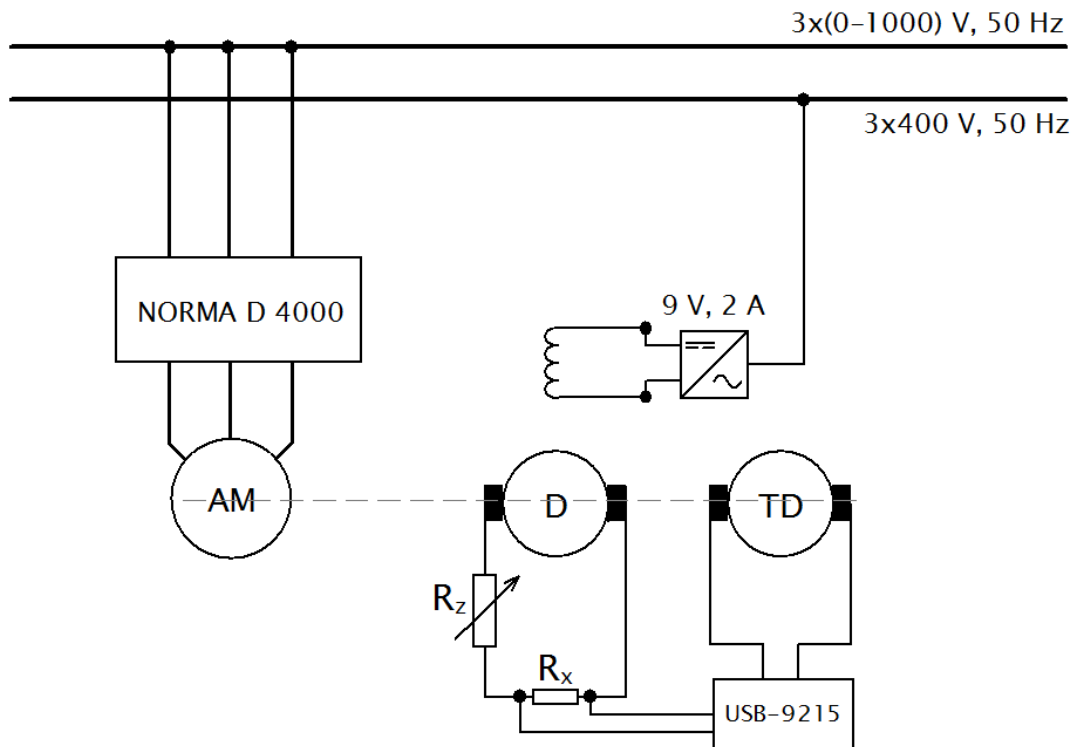
Jedná se o soubor měřicích, ovládacích a bezpečnostních prvků ovládaných přes program v centrálním počítači. Tento soubor má za úkol automatický sběr a následné vyhodnocení měřených veličin při zkouškách prováděných na asynchronních motorech. Naměřené hodnoty jsou poté v počítači dále zpracovány.

### 4.1. Měřicí systém před provedením pokročilejší automatizace

Tento systém byl vytvořen v rámci bakalářské práce Stanislava Dupala - Automatizace měření asynchronního motoru (2016). Jedná se o základní koncept sběru dat pomocí výkonového analyzátoru Norma D 4000 a měřicího modulu NI USB-9215.

#### 4.1.1. Zapojení měřicího systému

Měřený třífázový asynchronní motor, který je napájen ze zdroje proměnného napětí, je společnou hřídelí propojen s dynamometrem a tachodynamem. Jedná se o dva stejnosměrné cize buzené stroje se společným buzením. Toto buzení je zprostředkováno ze střídavé sítě pomocí usměrňovače 9 V, 2 A.



Obrázek 8 – Schéma zapojení základního měřicího systému

Zatěžování asynchronního motoru je umožněno potenciometry  $R_z$  připojenými do kotevního obvodu dynamometru. Zvýšením odporu v tomto obvodu dojde ke snížení proudu protékajícího kotvou a tedy ke snížení zátěžného momentu. Jelikož moment hnací asynchronního motoru je v ustáleném stavu roven momentu zátěžnému, lze tímto způsobem snadno moment motoru regulovat.

Měřicí systém měří celkem sedm elektrických veličin. Pomocí výkonového analyzátoru Norma D 4000 je měřeno napájecí napětí a proud asynchronního motoru ve všech fázích a jejich frekvence, dále pak příkon motoru a účinník. Pomocí měřicího modulu NI USB-9215 je pak snímáno napětí na etalonu odporu umístěného v kotvě dynamometru a napětí na kotvě tachodynamu.

#### **4.1.2. Řídicí jednotka**

Řízení měřicího systému je prováděno pomocí programu napsaného ve vývojovém prostředí LabWindows™/CVI od firmy National Instruments. Tento program běží na stolním počítači, ke kterému jsou připojeny výkonový analyzátor Norma D 4000 a měřicí modul NI USB-9215. Komunikace probíhá v případě výkonového analyzátoru po sériové lince, v případě měřicího modulu USB portem.

Řídicí program zajišťuje nejen komunikaci mezi přístroji a počítačem, ale také zpracování a následný zápis naměřených dat. Napětí naměřená pomocí NI USB-9215 se zde přepočítávají na moment a otáčky. Moment získáme z úbytku napětí na etalonu odporu  $R_x$ . Z tohoto úbytku můžeme spočítat proud protékající kotvou dynamometru a z něho pak zátěžný moment. Otáčky získáme vynásobením napětí získaného na kotvě tachodynamu konstantou, kterou lze získat jeho oceňováním. Program dále počítá z těchto hodnot výkon na hřídeli a účinnost motoru.

Veličiny naměřené Normou a vypočítané programem se následně exportují do tabulkového procesoru Microsoft Excel, ve kterém se provádí následné grafické zpracování a vyhodnocení výsledků dle požadovaných zkoušek.

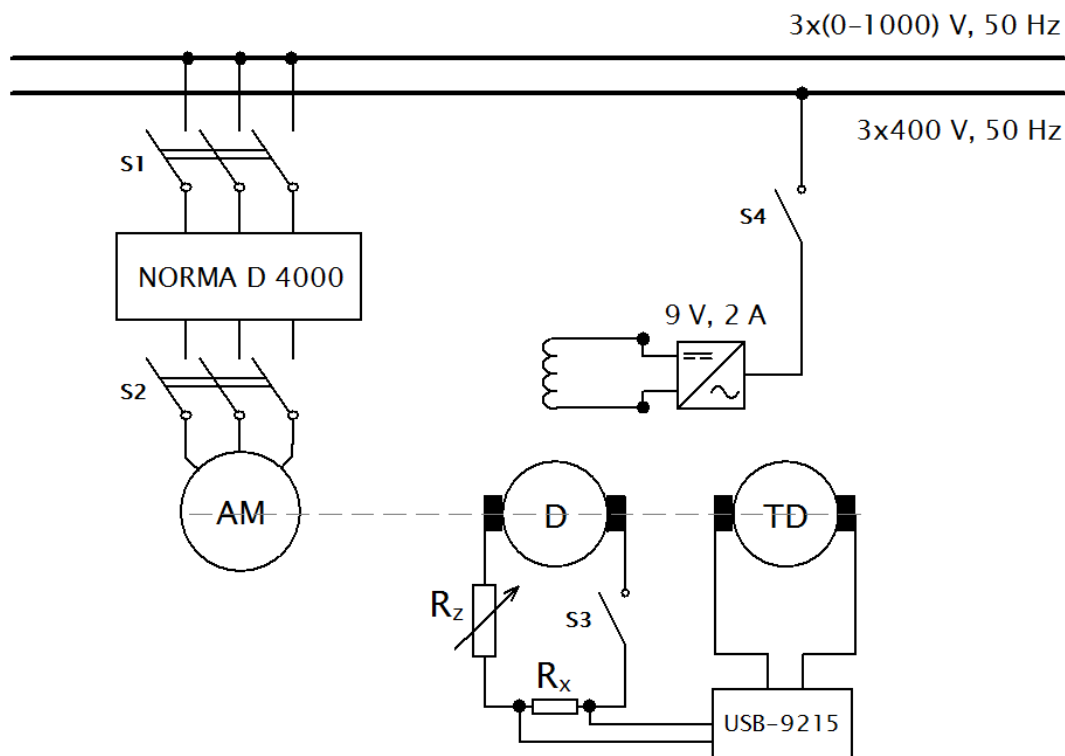
## **4.2. Měřicí systém po provedení pokročilejší automatizace**

Základní koncept sběru dat pomocí výkonového analyzátoru Norma D 4000 je zde zachován, je však rozšířen o další možnosti díky vhodně umístěným stykačům.

Zároveň byl celý měřicí systém uložen do boxu, který zajišťuje bezpečnější manipulaci s měřicími zařízeními v průběhu měření.

#### 4.2.1. Zapojení rozšířeného měřicího systému

Princip zapojení asynchronního motoru a měřicích jednotek zůstává stejný jako v původním návrhu, je však obohacen o čtyři stykače. První z těchto stykačů S1 je umístěn mezi zdroj proměnného napětí a vstupní svorky výkonového analyzátoru Norma D 4000, druhý S2 pak mezi jeho výstupní svorky a vstupní svorky asynchronního motoru. Třetí stykač S3 je umístěn do kotevního obvodu dynamometru a slouží k připnutí zátěže a čtvrtý S4 je umístěn do budicího obvodu dynamometru.



Obrázek 9 – Schéma zapojení měřicího systému po přidání stykačů

Stykače od dodavatele SPRECHER+SCHUH typu CA4-9-10-120-NO s maximálním možným spínaným proudem 20 A, jsou ovládány pomocí A/D převodníku NI USB-6008. Tento převodník je poté přes USB port připojen k počítači. Program napsaný ve vývojovém prostředí LabWindows™/CVI pak umožňuje ovládat stykače podle požadavků obsluhy.



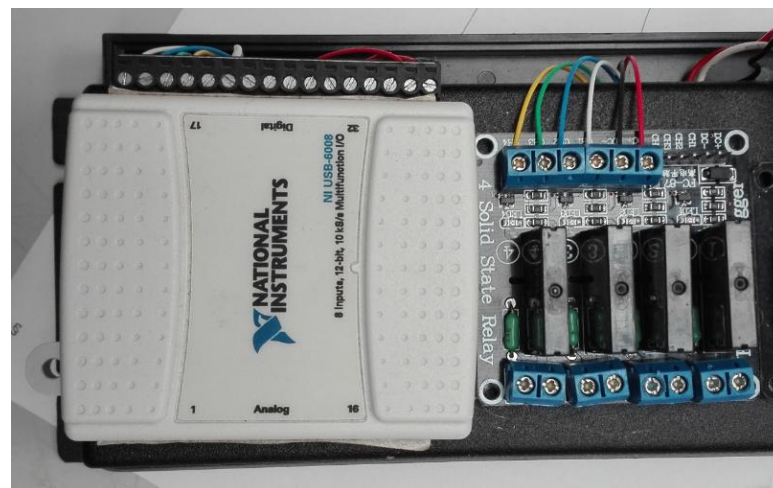
#### 4.2.2. Princip spínání elektromagnetických relé

Základem tohoto principu je zápis 1 nebo 0 na digitální výstupy A/D převodníku. Zápisem na tyto výstupy řídíme polovodičová relé. V našem případě je využit SSR relé 240 V/ 2 A od firmy Arduino, pro který platí, že 0 až 1,5 V znamená sepnutý stav a 2,5 až 5 V stav vypnutý. Z tohoto důvodu je možné tato relé spínat pomocí digitální jedničky nebo nuly. Těmito polovodičovými relé pak spínáme stykače.



Obrázek 10 – Elektromagnetické relé

Polovodičové relé je polovodičový spínací prvek, který oproti stykačům či elektromagnetickým relé neobsahuje pohyblivé části. Vnitřně jsou realizována pomocí různých druhů tyristorů nebo moderními IGBT tranzistory. Jejich výhodou jsou malé rozměry, ovládání malým napětím a vysoké frekvence spínání. Jelikož nejsou ovládána cívkou, ale elektronikou, nedochází při jejich spínání k přepětí, které u jiných stykačů nebo relé musíme regulovat. Hlavní nevýhodou je však vysoké ztrátové teplo, které musíme vhodně odvádět, nejčastěji pomocí chladičů.



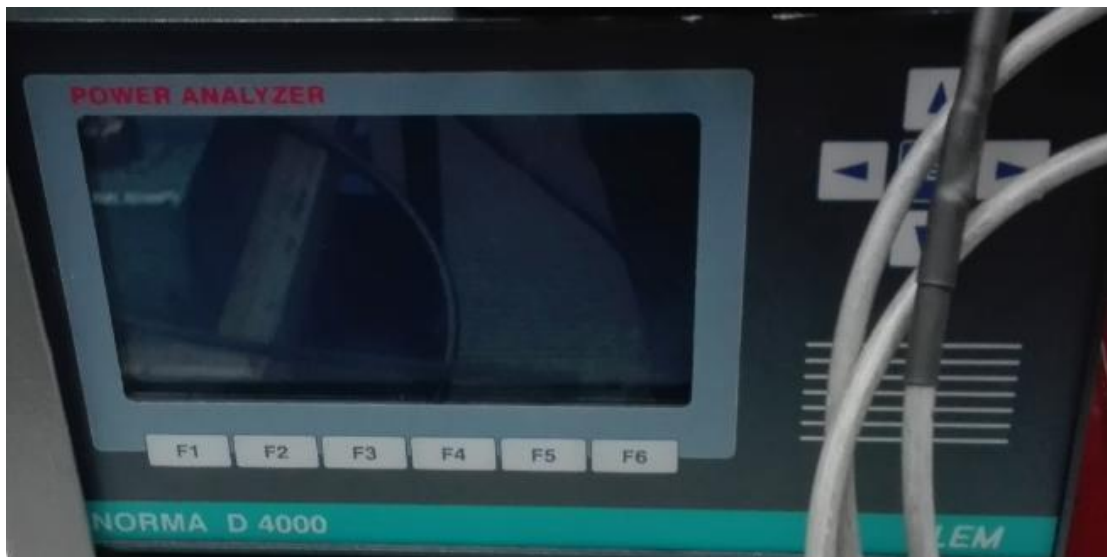
Obrázek 11 – NI USB-6008 s polovodičovými relé

### 4.3. Použité přístroje

Srdcem celého měřicího systému je výkonový analyzátor Norma D 4000. Dále je v měřicím systému využit měřicí modul NI USB-9215 a ke spínání stykačů je použit A/D převodník NI USB-6008.

#### 4.3.1. Norma D 4000 Power Analyzer

Tento výkonový analyzátor od firmy LEM umožňuje měření proudů a napětí, z kterých následně počítá množství dalších veličin jako je například činný, jalový a zdánlivý výkon, účinník, účinnost a mnoho dalších. Jelikož se jeho maximální chyba pohybuje okolo desetiny procenta, jedná se o velice přesný měřicí přístroj. Tato chyba také není v rámci frekvenčního rozsahu přístroje závislá na tvaru průběhu, frekvenci a fázi vstupních veličin.



Obrázek 12 – Norma D 4000 Power Analyzer

Normu D 4000 lze použít od stejnosměrného napětí až po střídavé napětí hodnoty 1000 V a je možné s ním měřit proudy až do hodnoty okolo 24 A. Tyto rozsahy lze pak v případě potřeby ještě rozšířit například pomocí dodatečných bočníků. Frekvenční rozsah přístroje se pohybuje od stejnosměrného napětí až po jednotky MHz. Měření lze provádět jak jednofázově tak třífázově s možností průměrování hodnot či omezení proudových a napěťových rozsahů. Analyzátor umožňuje měřit zároveň až 6 kanálů.

Na zadní straně přístroje můžeme najít vyvedené vstupní a výstupní napěťové a proudové svorky, díky kterým si můžeme zvolit mezi proudovým rozsahem

5 nebo 30 A. Tyto kanály jsou navzájem galvanicky odděleny. Na této straně přístroje můžeme také nalézt komunikační rozhraní. S výkonovým analyzátozem je možné komunikovat přes seriovou linku RS-232 nebo GPIB. Napájení měřicího přístroje je zajištěno z běžné střídavé sítě.

#### 4.3.2. Měřicí modul NI USB-9215

Tento měřicí modul od společnosti National Instrument obsahuje čtyři měřicí kanály. Tyto kanály dovolují současné měření až čtyř napěťových signálů s 16 bitovou přesností, přičemž A/D převodník v tomto modulu pracuje na principu postupných aproximací. Vzorkovací rychlost jednoho kanálu je 100 kS/s. Maximální napětí možné tímto modulem měřit je  $\pm 10$  V. Toto napětí je na měřicí modul přivedeno BNC konektorem, komunikaci s počítačem pak zajišťuje USB port. Tento modul také obsahuje  $250V_{RMS}$  izolaci kanál-země pro zajištění větší bezpečnosti.



Obrázek 13 – Měřicí modul NI USB-9215

#### 4.3.3. A/D převodník NI USB-6008

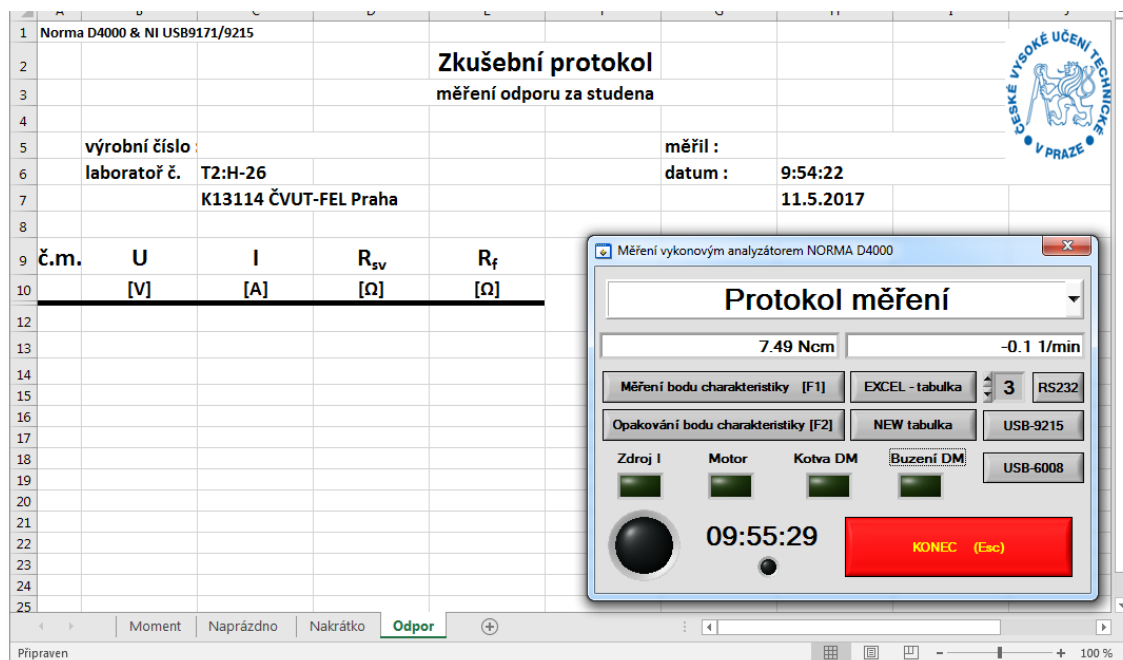
Jedná se o multifunkční A/D převodník poskytující až 8 analogových vstupů, 2 analogové výstupy, 12 digitálních vstupů/výstupů a 32 bitový čítač. Rozlišení vstupního analogového signálu je 12 bitů a jeho vzorkovací frekvence je 10 kS/s, neumožňuje však souběžné vzorkování více průběhů. Pomocí nezávislých analogových výstupů můžeme generovat napětí 0 až 5 V. Digitální vstupy, popřípadě výstupy v závislosti na konfiguraci lze použít na ovládání vnějších aplikací. Tento A/D převodník lze také využít jako zdroj napětí, který může dodávat napětí 5 V a proud 500 mA k napájení externích komponent.



Obrázek 14 – NI USB-6008

#### 4.4. Měřicí program

Pomocí základního programu napsaného ve vývojovém prostředí LabWindows™/CVI bylo možné provádět měření naprázdno a měření charakteristik při zatížení. Tento program automaticky navazoval komunikace s měřicími přístroji, které bylo možné v případě problému restartovat. Dále pak umožňoval práci s tabulkou vytvořenou v programu Microsoft Excel. Ve chvíli, kdy přišel příkaz k provedení odměry, program odebral hodnoty veličin z měřících přístrojů, dopočítal zbývající a všechny poté exportoval do přiložené tabulky.



Obrázek 15 – Měřicí program

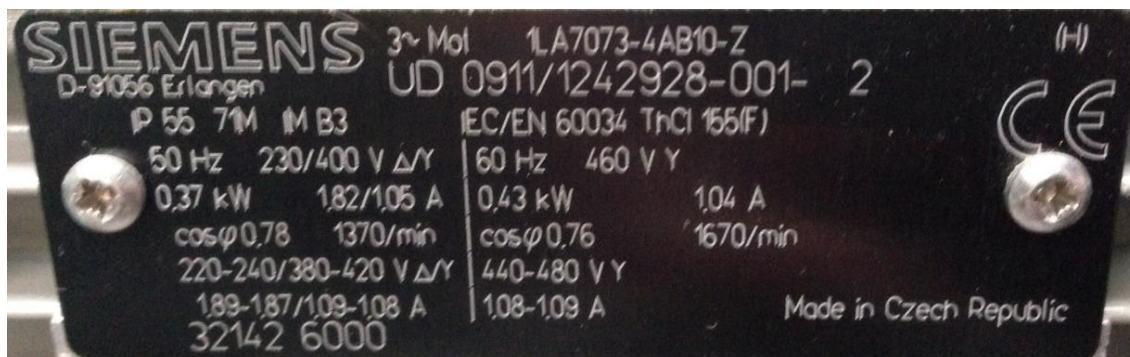
Jádro programu zůstalo i po rozšíření automatizace stejné. V jeho důsledku však bylo nutno tento program rozšířit o možnost ovládání A/D převodníku NI USB-6008 umožňujícího spínání stykačů. Díky tomuto systému bylo možné rozšířit prováděné zkoušky o měření nakrátko a měření činného odporu vinutí, což vedlo k celkové modifikaci programu.

Po spuštění programu dojde k vyvolání ovládací lišty a zároveň k vyvolání přednastavené šablony vytvořené v programu Microsoft Excel. V této šabloně jsou již přednastavené tabulky pro jednotlivé zkoušky. Ve vlastním programu si pak nejdříve vybereme, jakou zkoušku chceme provádět. Po jejím zvolení dojde k automatickému přepnutí na odpovídající tabulku a zároveň k základnímu nastavení stykačů a parametrů Normy D 4000. Následně již můžeme začít měření pomocí sepnutí příslušných stykačů. Ve chvíli, kdy je měřicí systém v požadovaném bodě charakteristiky, provedeme odměr a dojde k uložení naměřených hodnot do tabulky. Tento postup opakujeme, dokud nenaměříme všechny potřebné body.

## 5. Testování motoru firmy Siemens

Funkčnost měřicího systému byla odzkoušena na motoru SIEMENS 1LA7073 4AB10-Z. Na tomto motoru bylo provedeno měření činného odporu, měření naprázdno a nakrátko a měření charakteristik při zatížení.

Jedná se o třífázový asynchronní motor s kotvou nakrátko odštěpnou z hliníku. Měděná statorová vinutí jsou vyvedena do svorkovnice a zapojena do hvězdy. Motor má tepelnou izolaci třídy B a může být využit například jako pohon čerpadla nebo ventilátoru.



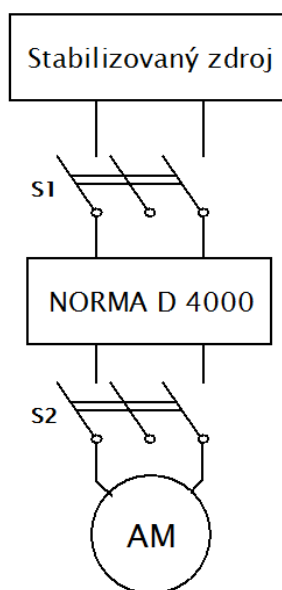
Obrázek 16 – Štítkové údaje měřeného asynchronního motoru - zdroj [1]

Jako zdroj proměnného napájecího napětí byl využit třífázový natáčivý transformátor označený jako indukční regulátor. Stejnoseměrným zdrojem pro měření

činného odporu vinutí byl stabilizovaný zdroj napětí, dodávající do odvodu 24 V. Dále bylo použito tachodynamo s maximální měřenou rychlostí  $5000 \text{ min}^{-1}$  a konstantou převodu  $2 \text{ V} / 1000 \text{ min}^{-1}$  a dynamometr s rozsahem 90 Ncm. Parametry jejich buzení pak byly 8 V a 2 A.

### 5.1.1. Měření činného odporu statorového vinutí

Zapojení bylo provedeno dle obrázku 16. Jako napájecí zdroj byl použit stabilizovaný zdroj napětí. Poté byly sepnuty stykače S1 a S2 a pomocí programu sejmuty hodnoty proudů a napětí. Z těchto hodnot poté program vypočítal hodnotu odporu. Jelikož má motor statorové vinutí zapojeno do hvězdy, jedná se o svorkový odpor, tento odpor byl tedy ještě přepočítán na odpor fázový. Odměr byl proveden pouze pro jednu kombinaci fází, u ostatních kombinací byla provedena pouze kontrola totožnosti hodnot napětí a proudů. Měření bylo provedeno třikrát pro vyloučení chyby přechodných odporů, z těchto hodnot byl pak vytvořen aritmetický průměr.



Obrázek 17 – Schéma zapojení pro měření odporu vinutí

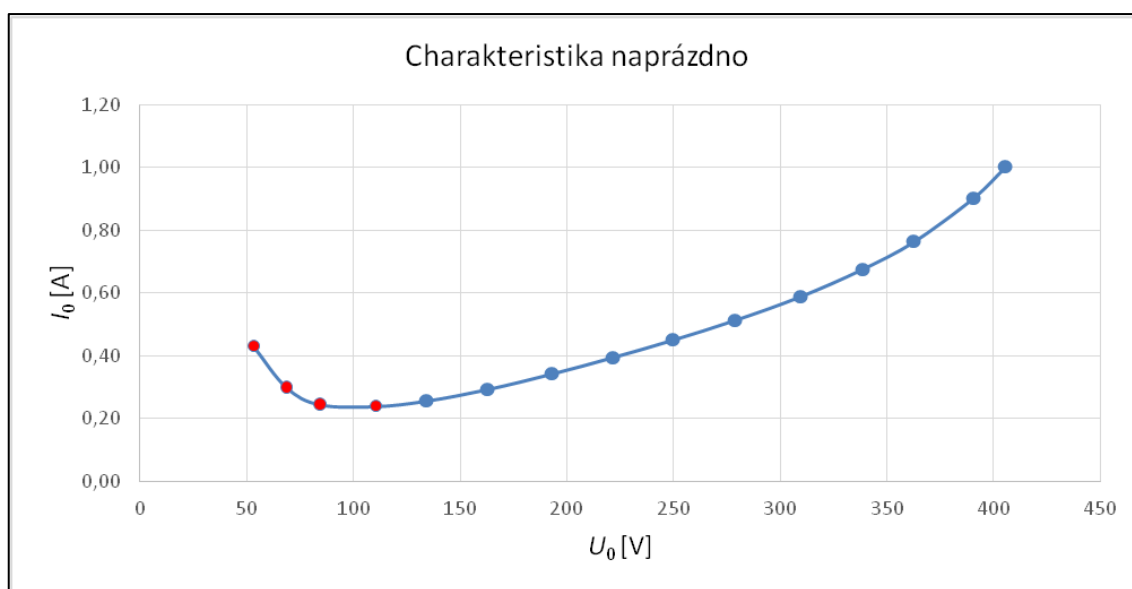
Z naměřených výsledků lze zjistit, že průměrná hodnota svorkového odporu vinutí motoru je  $R_{sv} = 28,3 \Omega$  a hodnota fázového odporu vinutí je  $R_f = 14,2 \Omega$ . Tuto hodnotu pak můžeme využít při výpočtech prováděných u měření naprázdno.

Číslo měření	$U$	$I$	$R_{sv}$	$R_f$
	[V]	[A]	[ $\Omega$ ]	[ $\Omega$ ]
1	12,0	0,43	28,3	14,1
2	12,0	0,43	28,3	14,2
3	12,0	0,42	28,4	14,2

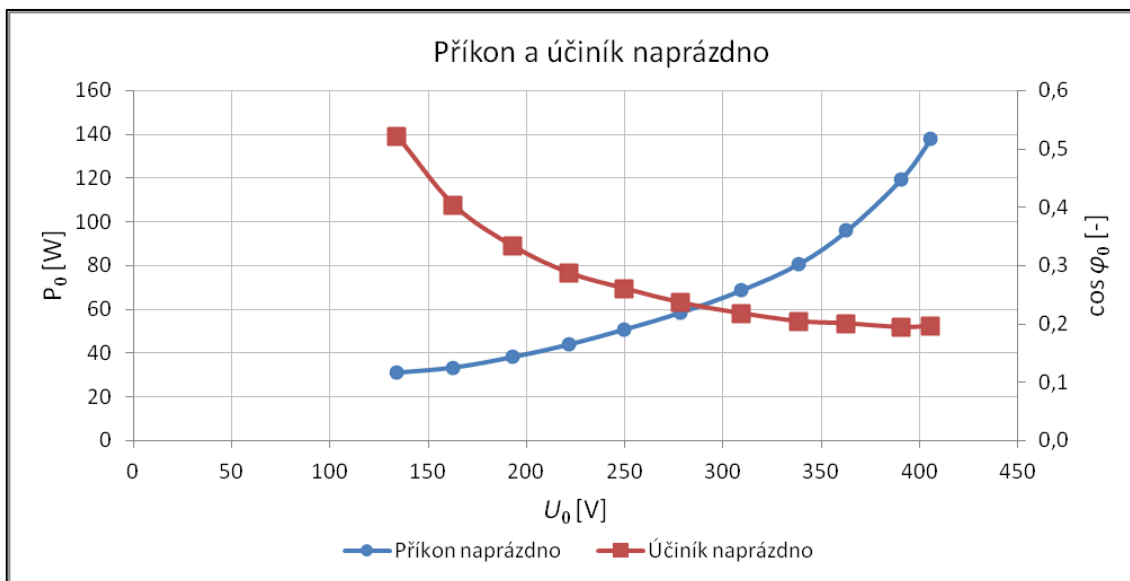
Tabulka 1 – Naměřené a vypočítané hodnoty při měření činného odporu

### 5.1.2. Měření naprázdno

Zapojení bylo provedeno dle obrázku 9. Jako napájecí zdroj byl použit indukční regulátor. Po sepnutí stykače S1 došlo k nastavení napětí nad jmenovitou hodnotu motoru. Poté byl sepnut stykač S2. Poté co se ustálil běh motoru, byly odměřeny hodnoty napětí a proudu a z nich pomocí vzorců uvedených v kapitole 3.3 dopočítány hodnoty zbývající. Na indukčním regulátoru bylo poté nastaveno nižší napětí a postup se opakoval. Po skončení měření pak byly dopočítány jednotlivé ztrátové výkony. Pro názornost bylo měření provedeno i pro několik hodnot pod minimální mez napětí. Tyto hodnoty jsou v tabulce 2 zvýrazněny červeně, stejně tak v grafu v obrázku 17. Z tohoto obrázku je pak dobře patrná tendence nárůstu proudu. Graf v obrázku 18 je již vytvořen pouze z hodnot odpovídajících požadavkům měření naprázdno.



Obrázek 18 – Graf závislosti proudu na napětí při měření naprázdno



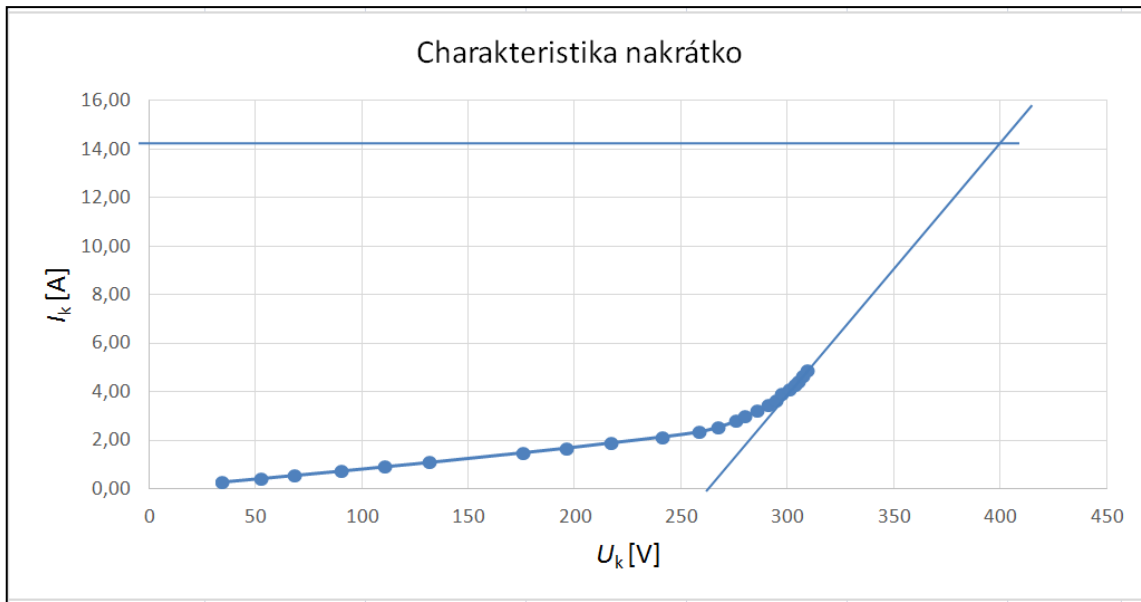
Obrázek 19 – Graf závislosti příkonu a účinníku na napětí při měření naprázdno

Z naměřených hodnot a vytvořených grafů je možno snadno určit výstupní veličiny zkoušky. Proud naprázdno při jmenovitém napětí byl  $I_{0N} = 0,96$  A, příkon naprázdno při jmenovitém napětí byl  $P_{0N} = 131$  W a účinník naprázdno při jmenovitém napětí byl  $\cos \varphi_{0N} = 0,2$ . Ze ztrátových výkonů pak mechanické ztráty nezávislé na napětí vyšly  $P_{\text{mech}} = 28$  W, Jouleovy ztráty při jmenovitém napětí byly  $P_{\text{JS}} = 39,4$  W a ztráty v železe při jmenovitém napětí byly  $P_{\text{Fe}} = 63,6$  W.

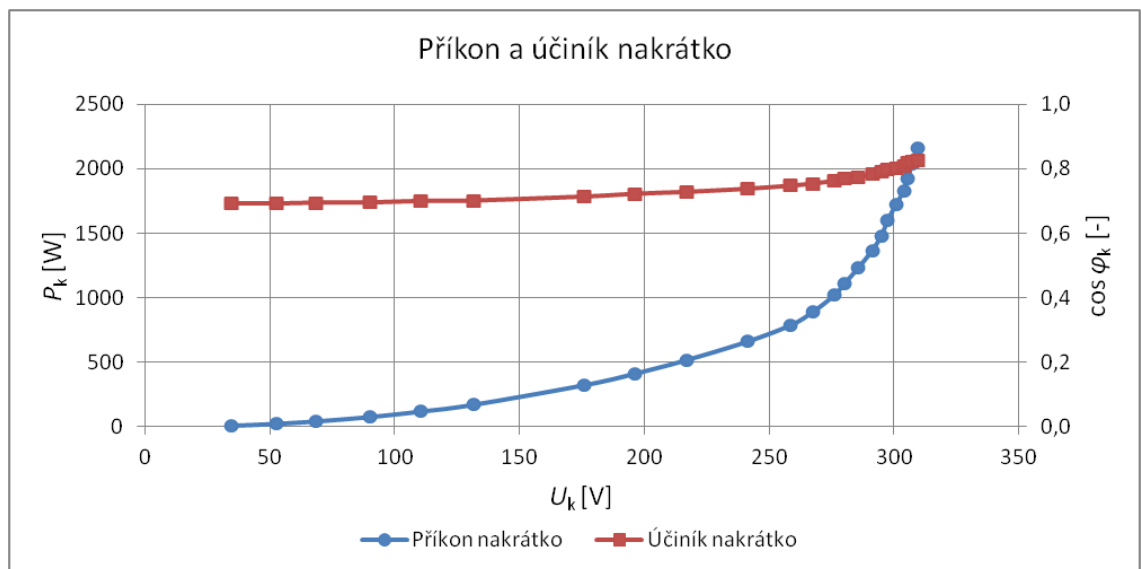
### 5.1.3. Měření nakrátko

Zapojení bylo provedeno dle obrázku 9. Jako napájecí zdroj byl použit indukční regulátor a hřídel motoru byla zablokována. Po sepnutí stykače S1 došlo k nastavení napětí na hodnotu přibližně 30 V a byl proveden první odměr. Při požadavku odměru program sám sepne stykač S2 na dobu 2,5 s a poté tento stykač vypne. Tato doba je dostatečná na ustálení elektrických veličin a zároveň nedochází k nežádanému přetěžování motoru. Poté následovalo zvýšení hodnoty vstupního napětí a postup se opakoval až do dosažení proudu hodnoty 5 A.





Obrázek 20 – Graf závislosti proudu na napětí při měření nakrátko

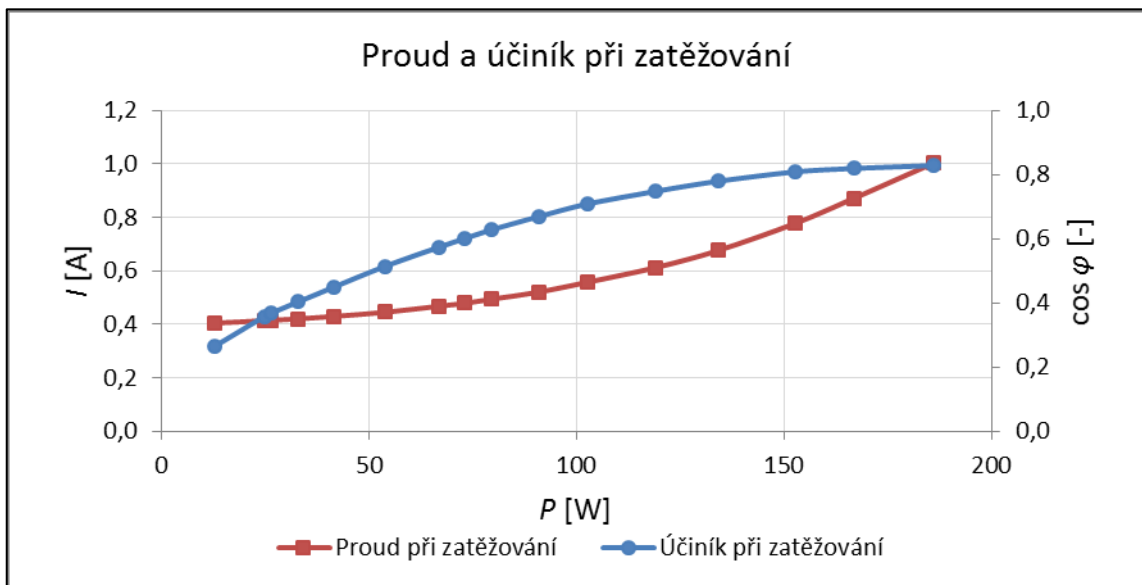


Obrázek 21 – Graf závislosti příkonu a účinníku na napětí při měření nakrátko

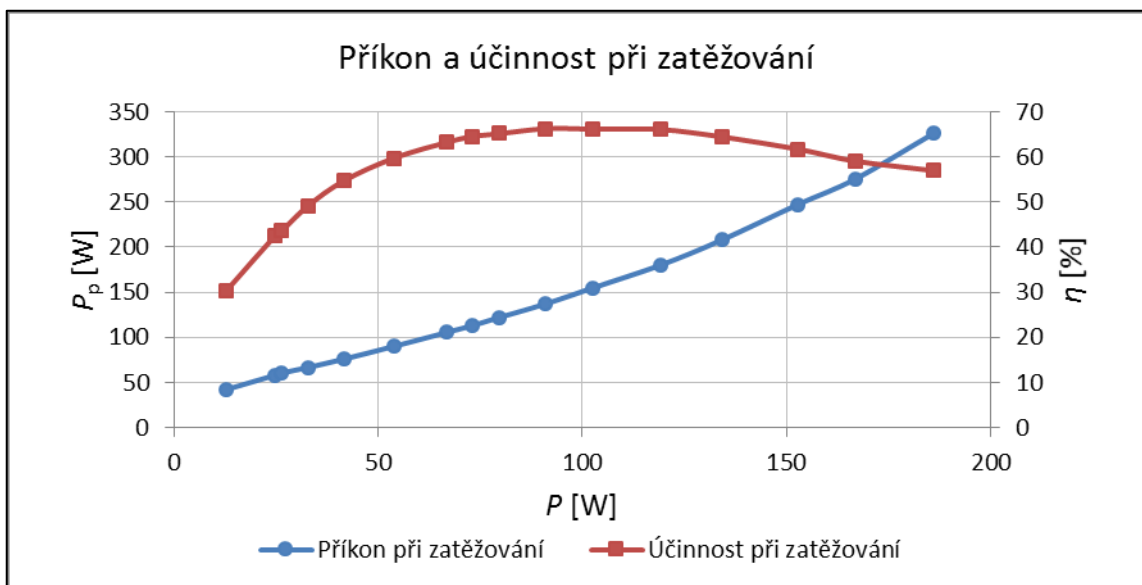
Z naměřených hodnot a vytvořených grafů je možno snadno určit výstupní veličiny zkoušky. Proud nakrátko při jmenovitém napětí byl  $I_{kN} = 14,3$  A. Abychom mohli z grafu na Obrázku 20 určit příkon nakrátko a účinník nakrátko, musíme nejprve zjistit, při jakém napětí dosahuje proud jmenovité hodnoty. Této hodnoty proud dosahuje při napětí  $U_k = 209,5$  V. Příkon nakrátko při jmenovitém proudu byl tedy  $P_{kN} = 481,6$  W a účinník nakrátko při jmenovitém proudu byl  $\cos \varphi_{kN} = 0,73$ .

#### 5.1.4. Měření zatěžovacích charakteristik

Zapojení bylo provedeno dle obrázku 9 a jako napájecí zdroj byl použit indukční regulátor. Na tomto regulátoru byla nastavena hodnota 230 V a potenciometry připojené do kotevního obvodu dynamometru byly nastaveny na nejnižší zátěž. Následně byly postupně sepnuty stykače S1, S3 a S2 a došlo k odměru prvního bodu. Poté došlo k sepnutí stykače S4, čímž došlo k nabuzení dynamometru a motor se začal zatěžovat. Následně byla provedena serie odměrů za postupného zvyšování zátěže.



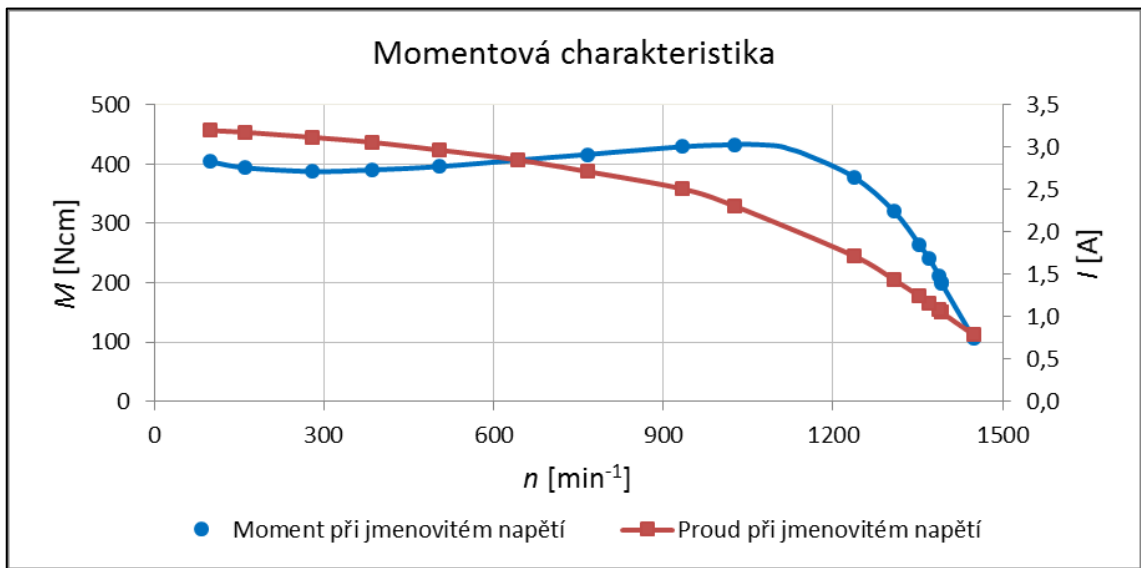
Obrázek 22 – Graf závislosti proudu a účinníku na výkonu motoru při zatěžování



Obrázek 23 – Graf příkonu a účinnosti v závislosti na výkonu motoru při zatěžování

### 5.1.5. Měření momentové charakteristiky

Toto měření probíhalo téměř totožně s měřením zatěžovacích charakteristik. Zapojení bylo provedeno dle obrázku 9 a jako napájecí zdroj byl použit indukční regulátor. Na tomto regulátoru byla nastavena hodnota 110 V a potenciometry připojené do kotevního obvodu dynamometru byly nastaveny na nejnižší zátěž. Následně byly postupně sepnuty stykače S1, S3 a S2 a došlo k odměru prvního bodu. Poté došlo k sepnutí stykače S4, čímž došlo k nabuzení dynamometru a motor se začal zatěžovat. Následně byla provedena serie odměrů za postupného zvyšování zátěže.



Obrázek 24 – Graf závislosti momentu a proudu na otáčkách při jmenovitém napětí

Z naměřených a dopočítaných hodnot proudů a momentů při sníženém napětí byly následně dle vztahů (42) a (43) určeny proudy a momenty při napětí jmenovitém. Tyto hodnoty byly poté vyneseny do grafů. Pokud porovnáme naměřené hodnoty proudů odměřené blízko chodu na krátko z tohoto měření a hodnoty proudů z měření nakrátko při napětí 110 V, zjistíme, že se tato napětí prakticky rovnají. Po přepočtu však dochází k velké odchylce těchto hodnot. Problém je způsobem nelineárním průběhem charakteristiky nakrátko a pravděpodobně nepřesnou extrapolací této křivky.

## 6. Závěr

Tématem této bakalářské práce byly zkoušky asynchronních motorů a jejich automatizace. První část pojednává o konstrukci a funkci asynchronního motoru obecně, na ni pak již navazují jednotlivé prováděné zkoušky a jejich popisy. Hlavní podstatou práce bylo zdokonalení systému pro sběr dat při těchto zkouškách, který byl vytvořen v rámci bakalářské práce Stanislava Dupala - Automatizace měření asynchronního motoru.

Měřicí systém byl zdokonalen pomocí stykačů vhodně umístěných do obvodu. Pomocí těchto stykačů pak mohlo dojít k rozšíření prováděných zkoušek o měření odporu za studena a měření nakrátko. Pro zvýšení bezpečnosti a komfortu práce při měření byl také celý měřicí systém uložen do boxu. Zároveň byl také zdokonalen řídicí program napsaný ve vývojovém prostředí LabWindows™/CVI od firmy National Instruments.

Funkčnost celého měřicího systému byla odzkoušena na asynchronním motoru od firmy Siemens. Na tomto motoru byla provedena měření činného odporu za studena, naprázdno, nakrátko, zátěžových charakteristik a charakteristiky momentové. Postupy měření, výsledky a jejich zpracování lze najít v kapitole 5, v příloze B jsou pak obsaženy tabulky naměřených hodnot.

Hlavní nevýhodou měřicího systému je nutnost ručního ovládání zdroje proměnného napětí napájecího asynchronního motoru. Automatizace ovládání tohoto zdroje by tedy mohla být dalším krokem ke zdokonalení pracoviště. Další možnosti zdokonalení měření by mohla být například optimalizace měřicího programu nebo schopnost systému provádět celé zkoušky samostatně bez vnějšího zásahu.

## 7. Seznam literatury

- [1] DUPAL, Stanislav. *Automatizace měření asynchronního motoru. bakalářská práce*. Praha. 2016 [online]. Dostupné z:  
<https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/64846/F3-BP-2016-Dupal-Stanislav-Automatizace%20mereni%20asynchroniho%20motoru.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- [2] VOŽENÍLEK, Petr, Pavel MINDL a Vladimír NOVOTNÝ. *Elektromechanické měniče*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2015. ISBN 80-01-03387-2.
- [3] KOBRLE, Pavel a Jiří PAVELKA. *Elektrické pohony a jejich řízení*. 3. přepracované vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-06007-0.
- [4] HLINOVSKÝ, Vít, *Elektrické pohony pro automatizaci a robotiku - Asynchronní vícefázový klecový motor - V.*, přednáška předmětu A3B14EPR, ČVUT FEL, Praha, 2015
- [5] 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.
- [6] ČSN 35 0010 (350010), *Točivé elektrické stroje. Zkoušky*, Praha: Český normalizační institut, 1. 8. 1992
- [7] *Nové třídy účinnosti motorů*. [online]. © 2014 [cit. 2017-05-2]. Dostupné z:  
[http://stest1.etnetera.cz/ad/current/content/data\\_files/reseni/uspore-energie/brochure\\_energeticky-efektivni-motory\\_2010\\_cz.pdf](http://stest1.etnetera.cz/ad/current/content/data_files/reseni/uspore-energie/brochure_energeticky-efektivni-motory_2010_cz.pdf)
- [8] *Manual LEM Norma D 4000*, Rakousko, 1999.
- [9] *Katalog K02- 1004 CZ*, Siemens
- [10] *Portable USB-Based DAQ with Simultaneous Sampling – Data Sheet*. National Instruments. [online]. © 2014 [cit. 2017-05-5]. Dostupné z:  
<http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-322>

## Příloha A – Ukázky zdrojového kódu

```
184
185 //----- Init přístroje NI USB-6008 1 -----
186 SetBreakOnLibraryErrors (0);
187
188 DAQmxCreateTask ("USB-6008", &USB_device);
189
190
191 DAQmxCreateDOChan (USB_device, "Dev2/port0/line0", "Output_00", DAQmx_Val_ChanPerLine);
192 DAQmxCreateDOChan (USB_device, "Dev2/port0/line1", "Output_01", DAQmx_Val_ChanPerLine);
193 DAQmxCreateDOChan (USB_device, "Dev2/port0/line2", "Output_02", DAQmx_Val_ChanPerLine);
194 DAQmxCreateDOChan (USB_device, "Dev2/port0/line3", "Output_03", DAQmx_Val_ChanPerLine);
195 DAQmxCreateDOChan (USB_device, "Dev2/port0/line4", "Output_04", DAQmx_Val_ChanPerLine);
196 DAQmxCreateDOChan (USB_device, "Dev2/port0/line5", "Output_05", DAQmx_Val_ChanPerLine);
197 DAQmxCreateDOChan (USB_device, "Dev2/port0/line6", "Output_06", DAQmx_Val_ChanPerLine);
198 DAQmxCreateDOChan (USB_device, "Dev2/port0/line7", "Output_07", DAQmx_Val_ChanPerLine);
199
200 DAQmxStartTask (USB_device);
201
202
203 Array_8_OFF[0] = 0;
204 Array_8_OFF[1] = 0;
205 Array_8_OFF[2] = 0;
206 Array_8_OFF[3] = 0;
207 Array_8_OFF[4] = 0;
208 Array_8_OFF[5] = 0;
209 Array_8_OFF[6] = 0;
210 Array_8_OFF[7] = 0;
211
212 DAQmxWriteDigitalLines (USB_device, Sampl_channel, 1, 10.0,
213 DAQmx_Val_GroupByChannel, Array_8_OFF, &Sampl, 0);
214
215
216 Mereni_analog ();
217
218 HidePanel (Uvody);
219
220 SetBreakOnLibraryErrors (1);
221
222
```

Obrázek 25 – Část zdrojového kódu sloužící k inicializaci NI USB-6008

```
343
344 //-----
345 int CVICALLBACK Switch_buzeni(int panel, int control, int event, void *callbackData,
346 int eventData1, int eventData2)
347 { switch (event) {
348
349 case EVENT_COMMIT:
350 SetBreakOnLibraryErrors (0);
351
352 DAQmxReadDigitalLines (USB_device, DAQmx_Val_Auto, 10.0,
353 DAQmx_Val_GroupByChannel, Array_8_SCAN, 8, &Sampl, &Bytes, 0);
354
355 if(Array_8_SCAN[3]){
356 Array_8_SCAN[3] = 0;
357 }
358 else{
359 Array_8_SCAN[3] = 1;
360 }
361
362 Array_8_ON[0] = Array_8_SCAN[0];
363 Array_8_ON[1] = Array_8_SCAN[1];
364 Array_8_ON[2] = Array_8_SCAN[2];
365 Array_8_ON[3] = Array_8_SCAN[3];
366
367 DAQmxWriteDigitalLines (USB_device, Sampl_channel, 1, 10.0,
368 DAQmx_Val_GroupByChannel, Array_8_ON, &Sampl, 0);
369
370 status = SetCtrlVal (Norma_excel, PANEL_LED_STOP, 0);
371
372 SetBreakOnLibraryErrors (1);
373
374 break; }
375 return 0; }
376 //-----
377
```

Obrázek 26 – Část zdrojového kódu sloužící ke spínání stykače S4

## Příloha B – Tabulky naměřených hodnot

Číslo měření	$U_0$ [V]	$I_0$ [A]	$P_0$ [W]	$\cos \varphi_0$ [-]	$f$ [Hz]	$P_{\text{mech}}$ [W]	$P_{\text{JS}}$ [W]	$P_{\text{Fe}}$ [W]
1	53,3	0,43	27,8	0,70	50	28,0	7,8	-8,0
2	68,5	0,30	29,5	0,82	50	28,0	3,8	-2,3
3	84,3	0,24	27,9	0,78	50	28,0	2,5	-2,7
4	110,4	0,24	29,4	0,92	50	28,0	2,4	-1,0
5	134,3	0,26	31,0	0,52	50	28,0	2,8	0,2
6	162,8	0,29	33,3	0,40	50	28,0	3,6	1,7
7	193,1	0,34	38,2	0,33	50	28,0	5,0	5,2
8	221,6	0,40	43,9	0,29	50	28,0	6,6	9,3
9	249,8	0,45	50,8	0,26	50	28,0	8,6	14,2
10	278,8	0,51	58,6	0,24	50	28,0	11,2	19,5
11	309,5	0,59	68,7	0,22	50	28,0	14,7	26,1
12	338,7	0,68	80,8	0,20	50	28,0	19,3	33,5
13	362,8	0,76	95,9	0,20	50	28,0	24,7	43,3
14	390,5	0,90	119,5	0,19	50	28,0	34,4	57,1
15	405,8	1,00	138,1	0,20	50	28,0	42,5	67,7

Tabulka 2 – Naměřené a vypočítané hodnoty při měření naprázdno

Číslo měření	$U_k$ [V]	$I_k$ [A]	$P_k$ [W]	$\cos \varphi_k$ [-]	$f$ [Hz]
1	34,7	0,29	11,9	0,69	50
2	52,8	0,43	27,4	0,69	50
3	68,7	0,56	46,5	0,69	50
4	90,3	0,74	80,5	0,70	50
5	110,8	0,91	122,4	0,70	50
6	131,8	1,09	175,4	0,70	50
7	175,9	1,49	325,3	0,71	50
8	196,2	1,68	413,8	0,72	50
9	217,1	1,90	520,4	0,73	50
10	241,4	2,15	662,9	0,74	50
11	258,7	2,35	789,8	0,75	50
12	267,6	2,55	892,1	0,75	50
13	276,1	2,79	1020,6	0,76	50
14	280,3	2,98	1113,6	0,77	50
15	285,8	3,21	1235,1	0,78	50
16	291,3	3,46	1368,2	0,78	50
17	295,0	3,67	1481,1	0,79	50
18	297,6	3,91	1605,8	0,80	50
19	300,9	4,11	1721,9	0,80	50
20	304,0	4,30	1832,9	0,81	50
21	305,3	4,45	1924,4	0,82	50
22	307,4	4,65	2036,6	0,82	50
23	309,5	4,89	2165,7	0,83	50

Tabulka 3 – Naměřené a vypočítané hodnoty při měření nakrátko

Číslo měření	$U$ [V]	$I$ [A]	$P_p$ [W]	$\cos \varphi$ [-]	$M$ [Ncm]	$n$ [1/min]	$P$ [W]	$\eta$ [%]
1	227,1	0,40	42,2	0,26	8,2	1490	12,8	30,4
2	227,3	0,41	58,2	0,36	16,0	1484	24,8	42,6
3	227,8	0,41	60,4	0,37	17,0	1479	26,4	43,7
4	227,6	0,42	66,7	0,40	21,3	1474	32,9	49,2
5	227,8	0,43	75,9	0,45	27,1	1467	41,6	54,7
6	227,5	0,44	90,1	0,51	35,3	1458	53,9	59,8
7	227,7	0,47	105,6	0,57	44,2	1446	66,8	63,3
8	227,4	0,48	113,1	0,60	48,3	1442	73,0	64,6
9	227,4	0,49	122,2	0,63	53,1	1432	79,7	65,2
10	227,1	0,52	137,1	0,67	60,9	1426	90,9	66,3
11	226,6	0,56	154,9	0,71	69,6	1408	102,6	66,2
12	227,7	0,61	180,3	0,75	81,8	1392	119,2	66,1
13	227,7	0,68	208,0	0,78	93,8	1366	134,1	64,5
14	227,2	0,78	247,3	0,81	110,0	1327	152,7	61,8
15	226,7	0,87	275,9	0,82	123,0	1297	166,9	59,1
16	226,9	1,00	326,7	0,83	145,6	1221	186,2	57,0

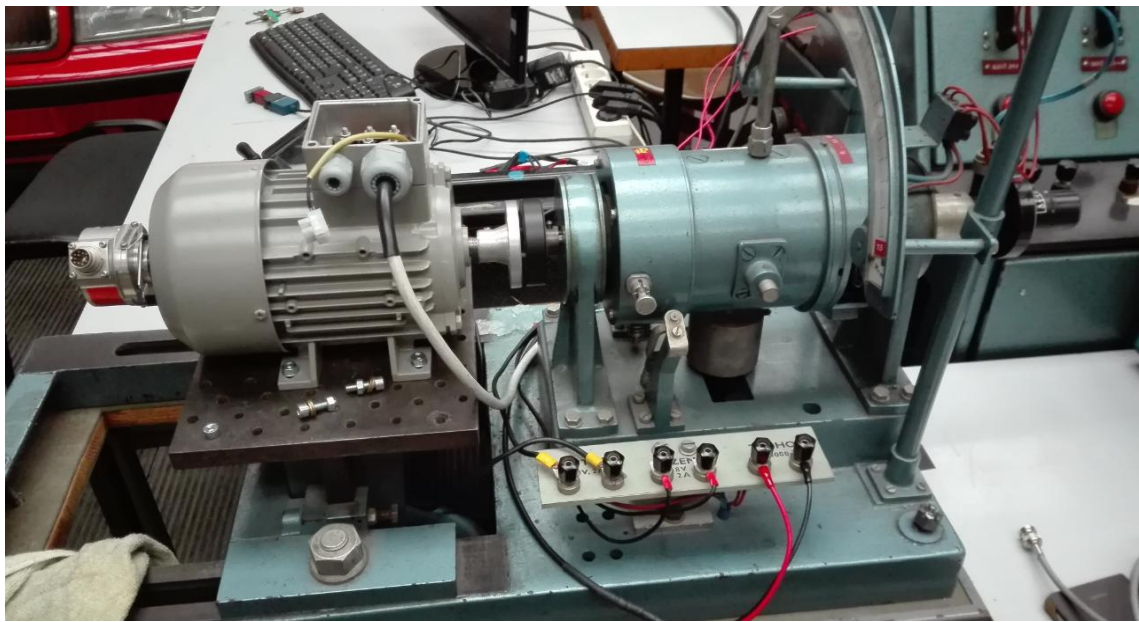
Tabulka 4 – Naměřené a vypočítané hodnoty při měření zatěžovacích charakteristik

Číslo měření	$U_{\downarrow}$ [V]	$I_{\downarrow}$ [A]	$P_{\downarrow}$ [W]	$\cos \varphi_{\downarrow}$ [-]	$M_{\downarrow}$ [Ncm]	$n$ [min <sup>-1</sup> ]	$M$ [Ncm]	$I$ [A]
1	111,1	0,22	23,5	0,56	8,2	1449	106,2	0,79
2	111,2	0,29	42,2	0,75	15,4	1392	199,9	1,05
3	111,0	0,29	42,2	0,75	15,5	1393	201,7	1,05
4	111,0	0,30	44,0	0,76	16,3	1388	212,1	1,08
5	110,7	0,32	48,2	0,78	18,4	1370	239,9	1,16
6	110,5	0,34	52,1	0,79	20,2	1353	264,4	1,24
7	110,6	0,40	62,3	0,81	24,6	1307	321,1	1,44
8	110,5	0,47	74,9	0,82	28,9	1237	378,5	1,72
9	110,5	0,64	97,9	0,80	33,0	1026	432,8	2,31
10	110,7	0,69	104,2	0,78	32,9	935	429,4	2,51
11	110,8	0,75	110,3	0,76	31,9	767	416,5	2,71
12	110,9	0,79	113,7	0,75	31,2	642	406,8	2,85
13	110,7	0,82	115,7	0,73	30,3	505	396,1	2,97
14	110,8	0,85	118,1	0,73	30,0	386	390,2	3,06
15	110,6	0,86	118,7	0,72	29,6	280	387,6	3,12
16	110,4	0,88	119,7	0,71	30,0	162	393,9	3,17
17	110,6	0,88	120,4	0,71	30,9	99	404,0	3,20

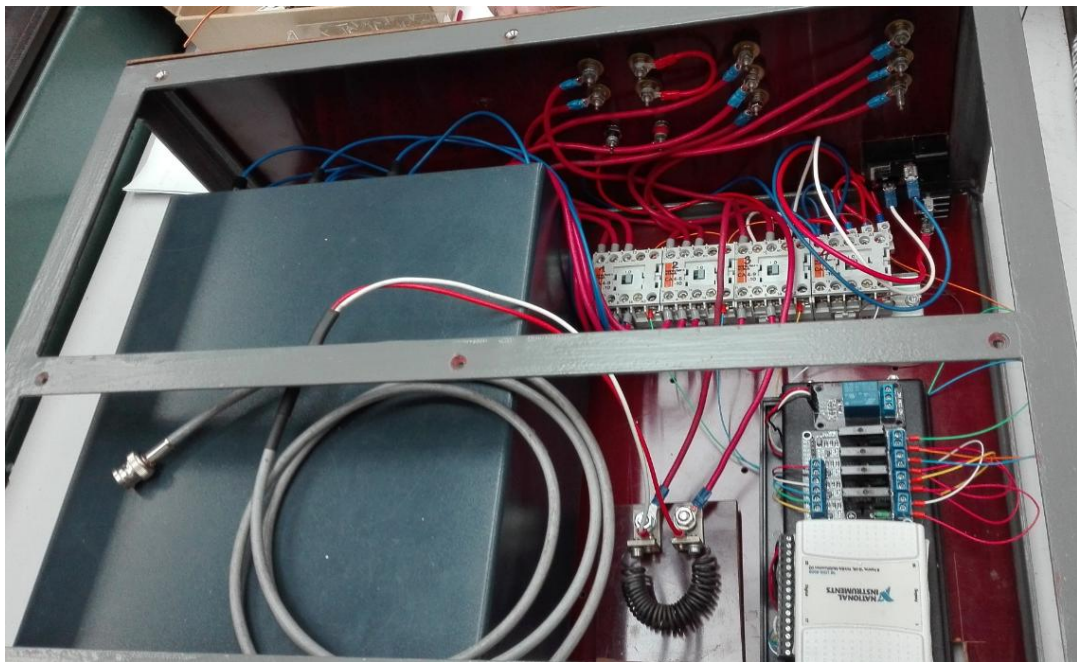
Tabulka 5 – Naměřené a vypočítané hodnoty při měření momentové charakteristiky



## Příloha C – Fotografie



Obrázek 27 – Fotografie testovaného motoru připojeného na dynamometr



Obrázek 28 – Fotografie boxu, ve kterém je uložen měřicí systém