

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrických pohonů a trakce



Bc. Jan Stejskal

Měření momentové charakteristiky asynchronního motoru

Measurement of torque characteristics of asynchronous motor

diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektrické stroje, přístroje a pohony

Vedoucí práce: Ing. Vít Hlinovský, CSc.

Praha 2019

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: **Elektrické stroje, přístroje a pohony**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Měření momentové charakteristiky asynchronního motoru

Název diplomové práce anglicky:

Measurement of torque characteristics of asynchronous motor

Pokyny pro vypracování:

- 1) Momentová charakteristika asynchronního motoru.
- 2) Měření momentové charakteristiky v ustáleném a dynamickém stavu motoru.
- 3) Měřicí prostředky pro měření momentové charakteristiky.
- 4) Porovnání jednotlivých způsobů měření momentové charakteristiky a jejich ověření na reálném stroji v laboratorním prostředí.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Elektrické stroje MĚŘIČKA, J., HAMATA, V., VOŽENÍLEK, P. Praha: ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02109-2
- [2] Meranie a modelovanie elektrických strojov HRABOVCOVÁ, V., RAFAJDUS, P., FRANKO, M a HUDÁK, P. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2009. ISBN 978-80-8070-924-2
- [3] Analýza elektrických strojov Valéria Hrabovcová; Pavol Rafajdus; Pavol Makyš, Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2017. ISBN 978-80-5541-323-5

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **12.02.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **24.05.2019**

Platnost zadání diplomové práce: **20.09.2020**

Ing. Vít Hlinovský, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové 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 zázemí nezbytného pro splnění všech požadavků.

Anotace

Tato práce je rozšířením bakalářské práce Jana Stejskala - Automatizace měření malých asynchronních motorů (2017). Cílem diplomové práce je objasnit účel měření momentových charakteristik a provést podrobný rozbor momentové charakteristiky asynchronního motoru. Na základě tohoto rozboru poté uvést způsoby jejího měření a prostředky k tomu potřebné. Problematika je řešena na základě norem ČSN 35 0010 (350010) a ČSN EN 60034-2-1 ed. 2. Poznatky získané z těchto norem jsou následně aplikovány v laboratorním prostředí na asynchronní motory různých výkonů. Na základě takto získaných dat je v závěru práce provedena validace jednotlivých měřicích metod.

Klíčová slova

Asynchronní motor, momentová charakteristika, statický a dynamický přístup, automatizace měření

Annotation

This diploma thesis is an extension of the bachelor thesis of Jan Stejskal - Automation of Measurement of Small Asynchronous Motors (2017). Its objective is to clarify the purpose of measuring torque characteristics and to perform a detailed analysis of the torque characteristics of the asynchronous motor. Then, based on this analysis, indicate the methods of its measurement and the means needed to do so. The issue is solved on the basis of standards ČSN 35 0010 (350010) and ČSN EN 60034-2-1 ed. 2. The knowledge gained from these standards is then applied in a laboratory environment to asynchronous motors of different powers. At the end of the project, there is a validation of used measuring methods based upon the obtained data.

Keywords

Asynchronous motor, torque characteristic, static and dynamic approach, measurement automation

Obsah

1. Úvod	12
2. Pohony s asynchronními motory	13
2.1. Návrh neřízeného pohonu s asynchronním motorem	13
2.2. Pohybová rovnice	14
2.3. Moment setrvačnosti	15
2.3.1. Experimentální měření momentu setrvačnosti	16
2.4. Statická stabilita pohonu	17
3. Momentová charakteristika asynchronního motoru	20
3.1. Výkonová bilance	20
3.2. Průběh momentové charakteristiky	22
3.3. Rozbor motorické oblasti momentové charakteristiky	24
3.4. Synchronní a asynchronní sedla	26
3.4.1. Asynchronní sedla	27
3.4.2. Synchronní sedla	27
3.5. Vliv parametrů na momentovou charakteristiku	28
3.6. Statické měření momentové charakteristiky	30
3.7. Dynamické měření momentové charakteristiky	31
4. Měřicí systémy pro sběr dat z měření momentových charakteristik	33
4.1. Měření krouticího momentu	33
4.1.1. Elektromagnetický dynamometr	33
4.1.2. Elektrické snímače momentu	35
4.2. Měření otáček	35
4.2.1. Tachodynamo	36
4.2.2. Mechanické a optické senzory	37
4.2.3. Elektromagnetické senzory	37
4.3. Měření elektrických veličin	38
4.4. Měření teploty	39
4.5. Prostředky využívané k automatizaci měření	40

5.	Měření provedená v laboratorním prostředí	42
5.1.	Motor se jmenovitým výkonem 45 kW	42
5.1.1.	Měření naprázdno	43
5.1.2.	Měření statické momentové charakteristiky	45
5.1.3.	Měření dobehové charakteristiky	46
5.1.4.	Měření rozběhu z protiběhu	47
5.1.5.	Porovnání statického a dynamického přístupu u velkého motoru.....	49
5.2.	Motor se jmenovitým výkonem 5.5 kW	51
5.2.1.	Měření naprázdno	51
5.2.2.	Měření statické momentové charakteristiky	53
5.2.3.	Měření dobehové charakteristiky	54
5.2.4.	Měření rozběhu z protiběhu	55
5.2.5.	Porovnání statického a dynamického přístupu u středního motoru ..	57
5.3.	Motor se jmenovitým výkonem 370 W	59
5.3.1.	Měření naprázdno	59
5.3.2.	Měření statické momentové charakteristiky	61
5.3.3.	Měření dobehové charakteristiky	62
5.3.4.	Měření rozběhu z protiběhu	63
5.3.5.	Porovnání statického a dynamického přístupu u malého motoru	65
5.4.	Zhodnocení validity jednotlivých měřicích metod	67
5.4.1.	Porovnání štítkových hodnot motorů s naměřenými průběhy	67
5.4.2.	Vliv automatizace na naměřené výsledky	68
5.4.3.	Vliv výkonu na naměřené výsledky	69
5.4.4.	Závěrečné zhodnocení výsledků měření	69
6.	Závěr	71
7.	Seznam literatury	72

Seznam použitých obrázků, grafů a schémat

Obrázek 1 – Rozbor doběhové charakteristiky.....	17
Obrázek 2 – Možné situace při rozběhu pohonu	18
Obrázek 3 – Definice statické stability pohonu.....	19
Obrázek 4 – Momentová charakteristika asynchronního motoru.....	23
Obrázek 5 – Rozbor momentové charakteristiky	24
Obrázek 6 – Parazitní momenty	26
Obrázek 7 – Vliv synchronního sedla na rozběh motoru	28
Obrázek 8 – Vliv rotorového odporu na momentovou charakteristiku.....	29
Obrázek 9 – Elektromagnetický dynamometr	34
Obrázek 10 – Tachodynamo buzené permanentními magnety	36
Obrázek 11 – Magnetoelektrický a elektromagnetický ampérmetr.....	39
Obrázek 12 – PXI modulární systém.....	41
Obrázek 13 – Štítkové hodnoty velkého motoru	42
Obrázek 14 – Schéma zapojení pro měření statických charakteristik VM.....	43
Obrázek 15 – Graf závislosti příkonu naprázdno velkého motoru.....	44
Obrázek 16 – Statická momentová charakteristika velkého motoru	45
Obrázek 17 – Schéma zapojení pro měření dynamických charakteristik VM	46
Obrázek 18 – Doběhová charakteristika velkého motoru	47
Obrázek 19 – Oscilogram měření z protiběhu velkého motoru.....	48
Obrázek 20 – Dynamická momentová charakteristika velkého motoru.....	49
Obrázek 21 – Porovnání získaných momentových charakteristika velkého motoru.....	49
Obrázek 22 – Porovnání získaných průběhů statorového proudu velkého motoru.....	50
Obrázek 23 – Štítkové hodnoty středního motoru.....	51
Obrázek 24 – Schéma zapojení pro měření statických charakteristik SM	52
Obrázek 25 – Graf závislosti příkonu naprázdno středního motoru.....	53
Obrázek 26 – Statická momentová charakteristika středního motoru.....	54
Obrázek 27 – Doběhová charakteristika středního motoru	55
Obrázek 28 – Schéma zapojení pro měření dynamických charakteristik SM.....	55
Obrázek 29 – Oscilogram měření z protiběhu středního motoru	56
Obrázek 30 – Dynamická momentová charakteristika středního motoru	57
Obrázek 31 – Porovnání získaných momentových charakteristika středního motoru ...	57
Obrázek 32 – Porovnání získaných průběhů statorového proudu středního motoru.....	58

Obrázek 33 – Štítkové hodnoty malého motoru	59
Obrázek 34 – Schéma zapojení pro měření statických charakteristik MM.....	60
Obrázek 35 – Graf závislosti příkonu naprázdno malého motoru.....	60
Obrázek 36 – Statická momentová charakteristika malého motoru	61
Obrázek 37 – Schéma zapojení pro měření dynamických charakteristik MM.....	62
Obrázek 38 – Doběhová charakteristika malého motoru	63
Obrázek 39 – Oscilogram měření z protiběhu malého motoru	64
Obrázek 40 – Dynamická momentová charakteristika malého motoru	65
Obrázek 41 – Porovnání získaných momentových charakteristika malého motoru	65
Obrázek 42 – Porovnání získaných průběhů statorového proudu malého motoru.....	66
Obrázek 43 – Ukázka části skriptu na zpracování dat z měření z protiběhu.....	I
Obrázek 44 – Část zdrojového kódu sloužící k vyvolání šablony pro ukládání dat.....	I
Obrázek 45 – Ukázka pracoviště pro měření dynamických charakteristik	VIII
Obrázek 46 – Motor malého výkonu s dynamometrem	VIII
Obrázek 47 – Motor středního výkonu s dynamometrem	IX
Obrázek 48 – Motor velkého výkonu s dynamometrem	IX

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Porovnání výsledků momentových charakteristik velkého motoru	51
Tabulka 2 – Porovnání výsledků momentových charakteristik středního motoru	58
Tabulka 3 – Porovnání výsledků momentových charakteristik malého motoru	66
Tabulka 4 – Naměřené a vypočítané hodnoty při měření naprázdno VM	II
Tabulka 5 – Naměřené a vypočítané hodnoty při měření momentové charakteristiky VM1.....	III
Tabulka 6 – Naměřené a vypočítané hodnoty při měření momentové charakteristiky VM2.....	IV
Tabulka 7 – Naměřené a vypočítané hodnoty při měření naprázdno SM	V
Tabulka 8 – Naměřené a vypočítané hodnoty při měření naprázdno MM.....	V
Tabulka 9 – Naměřené a vypočítané hodnoty při měření momentové charakteristiky SM	VI
Tabulka 10 – Naměřené a vypočítané hodnoty při měření momentové charakteristiky MM....	VII

Seznam použitých zkratk a symbolů

α	(K ⁻¹)	Teplotní součinitel odporu
ρ	(kg · m ⁻³)	Měrná hmotnost
ν	(-)	Řád vyšší harmonické
Φ_d	(Wb)	Budící tok tachodynamu
Ω	(s ⁻¹)	Úhlová rychlost rotujícího tělesa
Ω_0	(s ⁻¹)	Úhlová rychlost v doběhové charakteristice (s. 15)
Ω_{1m}	(s ⁻¹)	Mechanická úhlová rychlost točivého pole
Ω_N	(s ⁻¹)	Jmenovitá úhlová rychlost motoru
Ω_{ZV}	(s ⁻¹)	Úhlová rychlost zvratu
c	(-)	Konstrukční konstanta tachodynamu
$\cos \varphi_{10}$	(-)	Účinník motoru naprázdno
f	(Hz)	Frekvence napájecího napětí
I_{10}	(A)	Proud naprázdno motoru
I_N	(A)	Jmenovitý statorový proud motoru
I_s	(A)	Statorový proud
$I_{s\downarrow}$	(A)	Snížený statorový proud
I_{sd}	(A)	Statorový proud (z dynamického měření)
I_{ss}	(A)	Statorový proud (ze statického měření)
I_{za}	(A)	Záběrný statorový proud motoru
J	(kg · m ²)	Moment setrvačnosti rotujícího tělesa
k	(-)	Derivace hnacího momentu v daném bodě
k_Z	(-)	Derivace zátěžného momentu v daném bodě
l	(m)	Délka dutého válce
m	(kg)	Hmotnost rotujícího tělesa
m_i	(kg)	Hmotnost hmotného bodu
m_{AM}	(-)	Počet fází asynchronního motoru
M_{\downarrow}	(Nm)	Snížený moment při měření momentové charakteristiky
M	(Nm)	Moment rotujícího tělesa
M_d	(Nm)	Dynamický moment
M_H	(Nm)	Moment hnacího ústrojí

M_{Hd}	(Nm)	Hnací moment (ze statického měření)
M_{Hs}	(Nm)	Hnací moment (z dynamického měření)
M_i	(Nm)	Vnitřní moment asynchronního motoru
M_{mech}	(Nm)	Ztrátový mechanický moment
M_N	(Nm)	Jmenovitý moment motoru
M_Z	(Nm)	Zátěžný moment
M_{Za}	(Nm)	Záběrný moment motoru
M_{ZV}	(Nm)	Moment zvratu
n	(min^{-1})	Rychlost otáčení
n_{ZV}	(min^{-1})	Otáčky zvratu
N	(-)	Počet hmotných bodů
p_p	(-)	Počet pólpárů asynchronního motoru
P	(W)	Výkon rotujícího tělesa
P_{10}	(W)	Celkové ztráty při měření naprázdno
P_h	(W)	Hysterezní ztráty
P_{Fe}	(W)	Ztráty v železe
P_H	(W)	Výkon hnacího ústrojí
P_{J0}	(W)	Jouleovy ztráty při měření naprázdno
P_{JR}	(W)	Jouleovy ztráty v rotorové kleci
P_{JS}	(W)	Jouleovy ztráty v statorovém vinutí
P_{mech}	(W)	Ztrátový mechanický výkon
P_p	(W)	Příkon motoru
P_v	(W)	Ztráty vířivými proudy
P_z	(W)	Přídavné magnetické ztráty
P_Z	(W)	Výkon, kterým je zatěžováno ústrojí
P_{10Z}	(W)	Zátěžný výkon při měření naprázdno
r_1	(m)	Vnitřní poloměr dutého válce
r_2	(m)	Vnější poloměr dutého válce
r_i	(m)	Vzdálenost hmotného bodu od osy otáčení
R	(Ω)	Velikost odporu
R_0	(Ω)	Velikost odporu při referenční teplotě
R_S	(Ω)	Odpor statorového vinutí
R_R^*	(Ω)	Přepočtený odpor rotorového vinutí
s	(-)	Skluz
s_{ZV}	(-)	Skluz zvratu
t	(s)	Doba trvání daného děje
t_1	(s)	Časový okamžik v doběhové charakteristice (s. 15)
t_2	(s)	Časový okamžik v doběhové charakteristice (s. 15)
ΔT	(K)	Rozdíl aktuální teploty a teploty referenční
U_\downarrow	(V)	Snížené napětí při měření momentové charakteristiky
U_s	(V)	Napětí přiložené na svorky motoru
U_{sd}	(V)	Napětí na svorkách tachodynamu
$X_{\sigma S}$	(Ω)	Rozptylová reaktance statorového vinutí
$X_{\sigma R}^*$	(Ω)	Přepočtená rozptylová reaktance rotorového vinutí

1. Úvod

Každý z nás se denně setkává s množstvím pohonů. Ať už si to uvědomujeme nebo ne, jsou všude kolem nás. Od nejmenších pohonů, které můžeme nalézt v dětských autíčkách až po obrovské pohony vyrábějící elektrickou energii v elektrárnách. Bez těchto komplexních zařízení by lidská společnost, tak jak ji dnes známe, nemohla existovat.

Obecný pohon se skládá z mnoha částí. Všeobecně platí, že jeho základem je motor, který zprostředkovává elektromechanickou přeměnu energie. Tento motor bývá obvykle připojen k měniči, který slouží k transformaci elektrické energie. Aby pohon pracoval dle požadavků, je jeho běh monitorován a řízen logickou jednotkou. Je jasné, že díky své složité struktuře mohou pohony nabývat velice odlišných podob a jejich obecný popis je více než komplikovaný. V následujícím textu se tedy zaměříme pouze na úzkou skupinu pohonů – pohony s asynchronními motory.

První otázkou, kterou si musíme položit, chceme-li navrhovat pohon, je, jaký motor chceme použít a proč. Tato otázka se velice zjednoduší, omezíme-li se pouze na asynchronní motory. Jak ale poznat, že námi zvolený motor bude pro daný pohon dostatečný a přitom nebude zbytečně předimenzovaný? Odpověď na tuto otázku lze nalézt v následujícím textu.

Tato práce je rozdělena do čtyř základních celků. V prvním celku je objasněno, co si lze představit pod pohony s asynchronními motory a jakou roli mají momentové charakteristiky při jejich návrhu. Druhý celek obsahuje informace o momentové charakteristice asynchronního motoru a o tom, jaké způsoby měření této charakteristiky uvádí příslušné normy. Třetí celek se zabývá vybavením, které je potřeba, abychom mohli úspěšně tyto charakteristiky měřit. V závěrečném celku je pak rozebráno, jaké výsledky přináší jednotlivé metody aplikované na asynchronní motory různých výkonů a jakým způsobem je možné posuzovat jejich validitu.

2. Pohony s asynchronními motory

Pohony s asynchronními motory jsou jedny z nejrozšířenějších. Lze se s nimi setkat například v kompresorech, cirkulárkách nebo eskalátorech. Výhodou takových pohonů je, že ve své nejjednodušší formě ke svému běhu nepotřebují žádný měnič ani řídicí techniku. Jakožto zdroj energie pro jejich chod navíc často postačí obyčejné síťové napětí. Takový pohon je však neřízený. Po přiložení napětí na svorky motoru dojde k jeho rozběhu do oblasti jmenovitých otáček a jejich následné řízení je neekonomické. Množství aplikací řízení otáček však vyžaduje. V takovém případě musíme pohon doplnit například měničem umožňujícím regulaci vstupního napětí a jeho frekvence. To však značně zvedá pořizovací cenu pohonu.

V této práci je pro zjednodušení pracováno s pohony neřízenými, jejichž pohonnou jednotkou je asynchronní motor s kotvou nakrátko. Veškeré uvedené úvahy by však mohly být rozšířeny i pro obecný pohon.

2.1. Návrh neřízeného pohonu s asynchronním motorem

Základním předpokladem návrhu pohonu je, že pohon dodává takové množství výkonu, jaké poháněný mechanismus spotřebovává. Tento předpoklad vyplývá ze zákona zachování energie. Stav, ve kterém platí tato rovnováha, se nazývá pracovní bod. Abychom zajistili co nejvyšší ekonomičnost pohonu, je zapotřebí, aby jmenovité parametry pohonu odpovídaly tomuto pracovnímu bodu. Nezbytnou součástí návrhu pohonu je tedy jeho dimenzování.

Pokud chceme správně navrhnout pohon dané aplikace, musíme do svých úvah zahrnout množství faktorů. První otázkou, kterou je nutno si položit, je, kde bude pohon vykonávat svoji činnost. V závislosti na tomto místě pak musí být provedena opatření zajišťující bezproblémový a hlavně bezpečný chod pohonu. Jednotlivá prostředí a podmínky pohonů v nich operujících jsou popsány v direktivě Evropské unie 94/9/ES nebo 2014/34/EU. Tyto direktivy lze také nalézt pod označením ATEX.

Charakteristika napájecí sítě v místě připojení patří bezpochyby mezi jeden z velice důležitých faktorů. Tato síť musí být schopna dodat požadované napětí o požadovaném kmitočtu. U pohonů vysokých výkonů nesmíme ani opomenout zkontrolovat, jaký zkratový výkon je soustava schopna dodat, popřípadě jaký úbytek napětí při rozběhu pohonu je ještě přípustný.

Hlavním účelem pohonu je uvést do pohybu požadovanou zátěž. Tuto zátěž je proto nutné vhodně popsat. Hlavní součástí takového popisu je závislost momentu zátěže na úhlové rychlosti ústrojí. Této charakteristice se často říká průběh protimomentu. Vhodné je rovněž znát moment setrvačnosti zátěže a s tím související požadavky na dynamiku celého pohonu.

Na základě těchto informací je již možné přejít k výběru motoru. Tento motor musí výkonově odpovídat zátěži a zároveň musí být dimenzován na tepelné namáhání vznikající v důsledku jeho práce. Jakožto základní prostředek k ověření, zdali motor splňuje výkonové požadavky pohonu, slouží momentová charakteristika. Tato charakteristika a její využití jsou podrobněji rozebírány v následujících kapitolách. Tepelné namáhání motoru je závislé na časovém diagramu jeho chodu a vzniká v důsledku ztrátových mechanismů. Je tedy třeba si uvědomit, jak často bude probíhat rozběh motoru a po jakou dobu bude následně v chodu.

2.2. Pohybová rovnice

Aby bylo možné správně vyhodnotit výkonové požadavky motoru, je potřeba nejprve provést několik úvah. Tyto úvahy vycházejí ze základního vztahu pro výkon obecného rotačního systému, který zní:

$$P = M \cdot \Omega \quad (\text{W}), \quad (1)$$

kde M je točivý moment a Ω je úhlová rychlost rotujícího tělesa. Jestliže je motor se zátěží propojen pevnou spojkou, celý systém se otáčí stejnou úhlovou rychlostí Ω . Na základě tohoto předpokladu, vztahu (1) a výše uvedené úvahy o rovnosti výkonů systému pak platí, že pracovní bod odpovídá také rovnosti momentů. Z této rovnosti následně vyplývá pohybová rovnice:

$$M_H = M_Z + M_d \quad (\text{Nm}), \quad (2)$$

kde M_H je hnací moment motoru daný jeho momentovou charakteristikou, M_Z je moment zátěže daný průběhem protimomentu a M_d je moment dynamický.

Dynamický moment obecně vyjadřuje snahu systému bránit se mechanickým změnám v něm. Tento moment se tedy uplatňuje při přechodových dějích. Z obecné mechaniky pro něho lze odvodit vztah:

$$M_d = \frac{d}{dt}(J \cdot \Omega) \quad (\text{Nm}), \quad (3)$$

kde J je moment setrvačnosti rotačních těles. Tento vztah uvažuje kromě změny otáček i se změnou momentu setrvačnosti. To je vhodné například u pohonů míchaček. Většinou však s dostatečnou přesností postačí brát moment setrvačnosti jako konstantu. Pohybová rovnice se za tohoto předpokladu dá zapsat jako:

$$M_H = M_Z + J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{Nm}). \quad (4)$$

Pohybová rovnice má nezastupitelný význam při návrhu pohonu, jelikož se podle ní dají mimo jiné velice přesně simulovat přechodové děje. Lze z ní tak například získat dobu rozběhu pohonu na požadovanou úhlovou rychlost. V ustáleném stavu pohybová rovnice přechází do tvaru:

$$M_H - M_Z = 0 \quad (\text{Nm}), \quad (5)$$

jelikož platí, že změna otáček je nulová, a tedy dynamický moment je roven nule. Pracovní bod pohonu v ustáleném stavu lze tedy získat z průsečíku průběhu protimomentu a momentové charakteristiky motoru (Hrabovcová et al: 2017).

2.3. Moment setrvačnosti

Tato fyzikální veličina vyjadřuje míru setrvačnosti systému při otáčivém pohybu. Z obecné mechaniky se pro diskrétní rozložení hmoty odvozuje vztah:

$$J = \sum_{i=1}^N m_i r_i^2 \quad (\text{Nm} \cdot \text{m}^2), \quad (6)$$

kde m_i je hmotnost hmotného bodu rotujícího ve vzdálenosti r_i od osy otáčení. Pro kontinuální rozložení hmoty se pak uvádí vztah:

$$J = \int_0^m r_i^2 \cdot dm \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^2). \quad (7)$$

Moment setrvačnosti motoru je udáván v jeho technické dokumentaci. V případě, že tato dokumentace není k dispozici, existují dva možné přístupy jak tento

moment získat. První je založen na výpočtu vycházejícím ze vztahu (7) a druhý na experimentálním měření.

U obecného motoru platí, že jeho hřídel má válcový tvar s dutinou uvnitř. Jestliže hmotnost tohoto tělesa vyjádříme pomocí měrné hmotnosti ρ a jeho objemu, lze vztah (7) přepsat do tvaru (Kobrlé, Pavelka 2016: str. 19) :

$$J = \frac{\pi}{2} \rho l (r_2^4 - r_1^4) \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^2), \quad (8)$$

kde l je délka hřídele, r_2 je jeho vnější poloměr a r_1 jeho vnitřní poloměr. V případě, že jsou známy potřebné rozměry, lze na základě tohoto vztahu určit výsledný moment setrvačnosti. Tato metoda se tedy používá zejména při návrhu nového motoru. V případě, že se jedná o pohon složený z mnoha celků, je nutné rozdělit celý komplet na vhodné části, u nichž se určí jednotlivé dílčí momenty setrvačnosti. Celkový moment setrvačnosti je pak dán součtem těchto dílčích momentů.

2.3.1. Experimentální měření momentu setrvačnosti

V případě, že je motor již v provozu, je vhodnější zjistit moment setrvačnosti pomocí experimentálního měření. Tento experiment je založen na pohybové rovnici (4), kterou lze dle vztahu (1) přepsat do tvaru pro výkony:

$$P_H = P_Z + J \frac{d\Omega}{dt} \Omega \quad (\text{W}), \quad (9)$$

Moment setrvačnosti lze následně určit z doběhové charakteristiky motoru $\Omega = f(t)$. Je-li motor odpojen od napájecího napětí, začne volnoběhem dobíhat. V takovém případě platí, že P_H je rovno nule. Dále pak lze derivaci otáček aproximovat pomocí tečny v požadovaném bodě. Z rovnice (9) pak lze vyjádřit moment setrvačnosti jako:

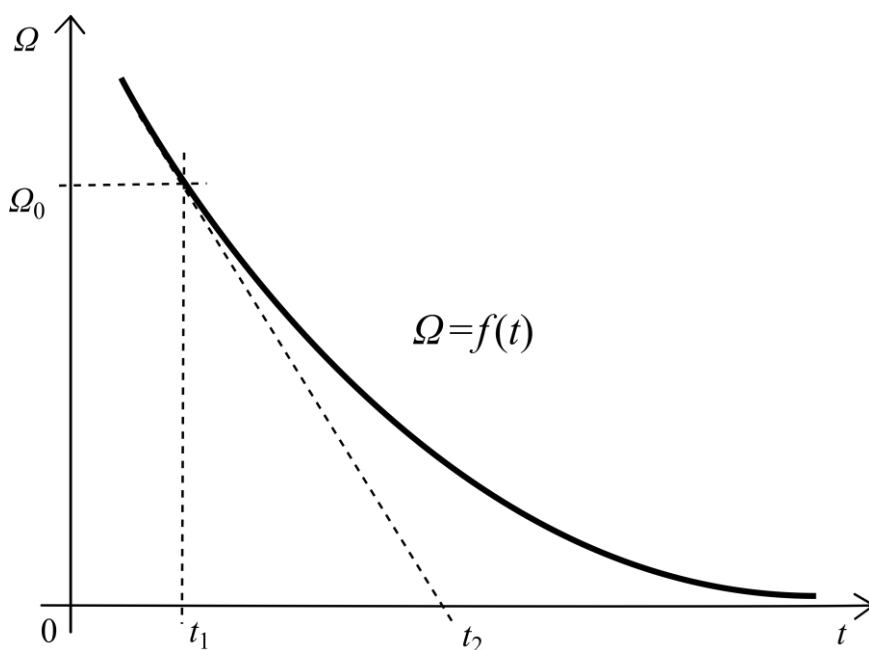
$$J = \frac{-P_Z}{\Omega_0 \frac{0 - \Omega_0}{t_2 - t_1}} = \frac{P_Z (t_2 - t_1)}{\Omega_0^2} \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^2), \quad (10)$$

kde Ω_0 je úhlová rychlost v požadovaném bodě, t_1 je okamžik, kdy požadovaný bod nastal, a t_2 vyjadřuje tečnu k danému bodu. Význam těchto veličin je zřejmý z obrázku 1.

Následně jsou potřeba provést dvě měření. První je měření příkonu P_H při dané rychlosti Ω_0 . V ustáleném stavu totiž tento příkon dle vztahu (5) a (1) odpovídá

zátěžnému výkonu P_Z . Druhé měření je již vlastní měření doběhové charakteristiky. Obecně platí, že je motor roztočen na vyšší úhlovou rychlost, než je Ω_0 , odpojí se od zdroje napájení a sejme se časový průběh otáček. Z něho lze poté dle obrázku 1 odečíst požadované hodnoty.

V případě neřízeného asynchronního pohonu lze pro určení P_Z s výhodou využít výsledků z měření naprázdno¹. Při doběhové charakteristice je nezatížený motor odpojen od zdroje napájení a v takovém případě se uplatňují pouze mechanické ztráty P_{mech} , které motor brzdí. Platí tedy, že $P_Z = P_{\text{mech}}$. Jelikož u tohoto druhu pohonu není možné řídit úhlovou rychlost motoru, doběhová charakteristika je provedena ze jmenovité úhlové rychlosti a bod pro určení momentu setrvačnosti se stanoví až dodatečně v oblasti blízké jmenovité úhlové rychlosti.



Obrázek 1 – Rozbor doběhové charakteristiky

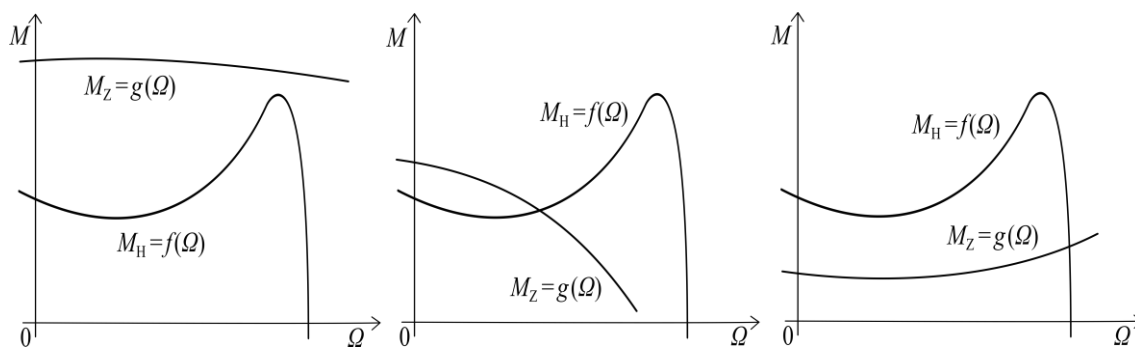
2.4. Statická stabilita pohonu

Uvažujme nyní, že je k dispozici neřízený asynchronní pohon a je znám průběh momentové charakteristiky a protimomentu. Nezatížený asynchronní motor se rozběhne na jmenovitou úhlovou rychlost v případě, že je na jeho svorky přivedeno dostatečné napětí. Pokud je však tento motor součástí pohonu a je pevně spojen se zátěží, nemusí

¹ Rozbor proveden v kapitole 3.1.

tomu tak vždy být. Přechodný děj, který v takovém případě nastává, je popsán pohybovou rovnicí (4).

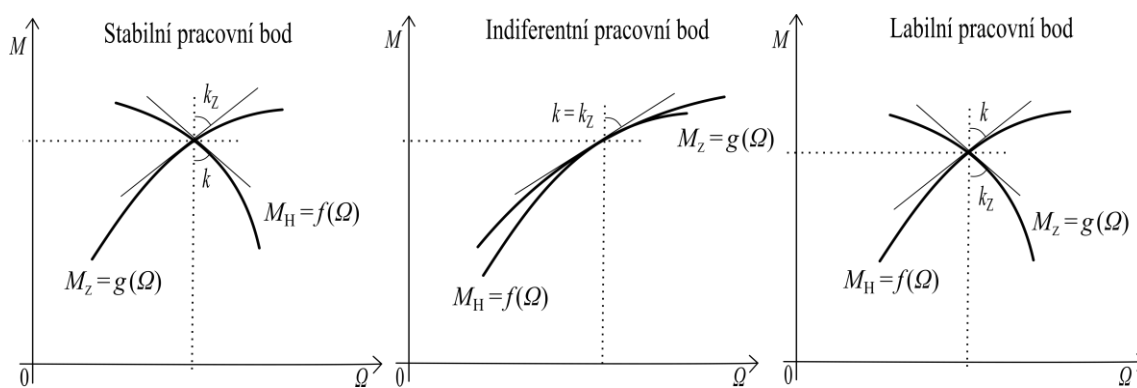
Jednotlivé možné situace jsou názorně rozebrány na základě obrázku 2. V případě, že momentová charakteristika a průběh protimomentu nemají společný průsečík, je jediným možným řešením pohybové rovnice nulový bod a pohon se tedy vůbec nerozběhne. Další možností je, že společný průsečík mají, nicméně zátěžný moment dosahuje při nulové úhlové rychlosti vyšších hodnot než moment hnací. V takovém případě nabývá dynamický moment záporných hodnot a pohon se opět vůbec nerozběhne. V poslední řadě pak mají obě charakteristiky společný průsečík a hnací moment je při nulové úhlové rychlosti větší než moment zátěžný. Dynamický moment nabývá kladných hodnot, urychluje pohon a dochází tedy k jeho rozběhu. Tento dynamický děj následně končí ustálením v pracovním bodě.



Obrázek 2 – Možné situace při rozběhu pohonu

Podobné úvahy lze aplikovat i na již běžící motor. Pokud je pohon vychýlen z pracovního bodu, dojde k vyvolání dynamického momentu. Je-li tento moment kladný, dochází k urychlování pohonu, je-li záporný, vede ke zpomalování. Na základě tohoto rozboru je možné definovat statickou stabilitu pohonu.

Z pohybové rovnice lze odvodit, že chování pohonu v tomto případě závisí na derivaci zátěžného a hnacího momentu v daném pracovním bodě (Kobrlé, Pavelka 2016: str. 24-25). Definujme tyto derivace jako k_z u zátěžného momentu a jako k u momentu hnacího. Obrázek 3 pak ukazuje jednotlivé možnosti, které mohou nastat.



Obrázek 3 – Definice statické stability pohonu

První graf v obrázku 3 znázorňuje situaci, kde $k_Z > k$. V případě, že dojde k urychlení pohonu z tohoto bodu, dynamický moment je záporný a pohon se zpomalí. V případě, že dojde ke zpomalení pohonu, dynamický moment je kladný a pohon se urychlí. Pracovní bod, pro který toto platí, definujeme jako stabilní.

V případě druhého grafu platí, že $k_Z = k$. Jakmile dojde k urychlení nebo zpomalení pohonu, moment zátěžný se stále rovná momentu hnacímu. Není tedy možné jasně definovat ustálenou rychlost pohonu. Takovýto pracovní bod definujeme jako indiferentní.

Poslední graf představuje pracovní bod pohonu, kdy platí, že $k_Z < k$. Pokud dojde k urychlení pohonu, dynamický moment je kladný a dochází k dalšímu urychlování. Pokud dojde ke zpomalení pohonu, dynamický moment je záporný a pohon se dále zpomaluje. Takovýto stav definujeme jako labilní pracovní bod.

Ze všech výše uvedených poznatků lze vyvodit závěr, že při návrhu pohonu je nutné brát ohled na vzájemnou polohu momentové charakteristiky hnacího motoru a průběhu protimomentu. Při rozběhu musí být hnací moment větší než moment zátěžný, v ustáleném stavu je pak požadováno, aby daný pracovní bod byl stabilní. Pro zvýšení ekonomičnosti chodu pohonu je navíc nutné, aby se tento pracovní bod nacházel ve jmenovité oblasti momentové charakteristiky. Nejen z těchto důvodů je tedy nezbytné mít prostředky a metodologii k měření momentových charakteristik.

3. Momentová charakteristika asynchronního motoru

Jak již bylo mnohokrát výše uvedeno, jedná se o závislost momentu na úhlové rychlosti ústrojí. Může ji však vyjadřovat i závislost momentu na skluzu. V teorii elektromechanických měničů představuje základní charakteristiku popisující běh asynchronního motoru. V teorii pohonů se však více používá charakteristika mechanická. Jedná se o invertovanou momentovou charakteristiku, tedy o závislost otáček ústrojí na momentu, popřípadě skluzu na momentu.

S momentovou charakteristikou se pojí i další pomocné charakteristiky. Převedením momentu pomocí vztahu (1) dostaneme výkonovou charakteristiku. Často se také uvádí závislost statorového proudu na úhlové rychlosti ústrojí. Z této závislosti lze určit například oteplení motoru, nebo jaký zkratový výkon musí být schopná poskytnout napájecí síť.

3.1. Výkonová bilance

Aby bylo možné provést analýzu průběhu momentové charakteristiky, je nejprve potřeba si uvědomit, jaké činitele se na jejím tvaru podílí. Určení těchto činitelů vychází z výkonové bilance asynchronního motoru, ve které lze nalézt tři hlavní ztrátové mechanismy.

Prvním z nich jsou ztráty Jouleovy, jinak známé také jako ztráty tepelné. Tyto ztráty mají své uplatnění jak v statorovém vinutí, tak v rotorové kleci. Pro výpočet Jouleových ztrát ve statorovém vinutí platí vztah:

$$P_{JS} = \frac{1}{2} m_{AM} R_S I_s^2 \quad (W), \quad (11)$$

kde m_{AM} vyjadřuje počet fází, R_S odpor statorového vinutí a I_s je statorový proud. Tyto ztráty lze určit ze zatěžovací charakteristiky pro jednotlivé naměřené body. Jouleovy ztráty v rotorové kleci lze následně určit analogicky. Jelikož však měření veličin v rotorové kleci není prakticky možné, norma ČSN EN 60034-2-1 ed. 2 (2015: str. 24) udává pro jejich výpočet vztah:

$$P_{JR} = (P_p - P_{JS} - P_{Fe}) \cdot s \quad (W), \quad (12)$$

kde P_p udává příkon motoru, P_{Fe} zastupuje ztráty v železe a s je skluz.

Druhým ztrátovým mechanismem jsou ztráty v železe. Tyto ztráty mají magnetickou podstatu a dají se rozložit do tří složek:

$$P_{\text{Fe}} = P_{\text{h}} + P_{\text{v}} + P_{\text{z}} \quad (\text{W}), \quad (13)$$

kde P_{h} jsou ztráty hysterezní, P_{v} jsou ztráty vířivými proudy a P_{z} jsou ztráty přídavné. Hysterezní ztráty vznikají v důsledku přemagnetování magnetického materiálu a jsou definované pomocí plochy hysterezní smyčky. Vířivé ztráty vznikají v důsledku průchodu indukovaného proudu magnetickým materiálem, přičemž platí, že jsou přibližně závislé na kvadrátu frekvence napájecího napětí.

Posledním ztrátovým mechanismem jsou mechanické ztráty. Tyto ztráty vznikají v důsledku rotačního pohybu motoru a lze je rozdělit na ztráty třecí a ztráty ventilační. Ztráty třecí vznikají v ložiskách motoru v důsledku tření a ventilační ztráty vznikají u motorů s ventilátory v rámci působení odporu prostředí. Mechanické ztráty tedy velmi závisí na konstrukčním provedení motoru a na jeho fyzickém stavu. Souhrnně lze však říci, že platí (Pokorný, 1983):

$$P_{\text{mech}} \approx \Omega^2 \quad (\text{W}), \quad (14)$$

Jelikož exaktní výpočet ztrát v železe a mechanických ztrát v reálném motoru není prakticky možný, zjišťují se experimentálně z měření naprázdno, přičemž platí:

$$P_{10} = P_{\text{J0}} + P_{\text{Fe}} + P_{\text{mech}} \quad (\text{W}), \quad (15)$$

kde P_{10} je měřený příkon naprázdno a P_{J0} jsou Jouleovy ztráty naprázdno, které lze určit analogicky jako Jouleovy ztráty statorového vinutí. Extrapolací závislosti příkonu naprázdno na napětí do nuly lze určit P_{mech} . Dle normy ČSN EN 60034-2-1 ed. 2 (2015: str. 26) pak takto získané mechanické ztráty odpovídají mechanickým ztrátám přibližně při synchronní úhlové rychlosti. Tyto ztráty jsou navíc prakticky nezávislé na napájecím napětí. Za těchto předpokladů je již možné určit závislost P_{Fe} na vstupním napětí.

Všechny výše uvedené ztráty patří mezi ztráty statické, které se v ustáleném stavu nemění. Kromě těchto ztrát se však mohou objevit i ztráty dodatkové, které se mohou měnit i v ustáleném stavu. Mezi tyto ztráty patří například ztráty v povrchových vrstvách hlav statorových a rotorových zubů způsobených nerovnoměrným rozložením magnetické vodivosti vzduchové mezery. Nerovnoměrný magnetický tok poté v těchto

zubech způsobuje tzv. ztráty pulzační (Pokorný, 1983). Zajímavé jsou také ztráty způsobené přítomností prostorových vyšších harmonických magnetického toku. Jejich účinku je věnována kapitola 3.4.

3.2. Průběh momentové charakteristiky

Na základě výkonové bilance lze již definovat vnitřní moment motoru. Tento moment se definuje z výkonu přenášeného vzduchovou mezerou za předpokladu nulových ztrát v železe v rotorové kleci. Odvození bylo podrobně popsáno v bakalářské práci (Stejskal 2017: kap. 2) a nebude zde znovu prováděno. Výsledný vztah pro velikost vnitřního momentu zní:

$$M_i = \frac{m_{AM} R_R^*}{s \Omega_{1m}} \frac{U_s^2}{\left(R_S + \frac{R_R^*}{s}\right)^2 + (X_{\sigma S} + X_{\sigma R}^*)^2} \quad (\text{Nm}), \quad (16)$$

kde R_R^* je odpor rotorové klece přepočtený na stator, Ω_{m1} je mechanická úhlová rychlost točivého pole², U_s je napětí přiložené na svorky motoru, $X_{\sigma S}$ je rozptylová reaktance statorového vinutí a $X_{\sigma R}^*$ je rozptylová reaktance rotorové klece přepočtená na stator. Tento vztah vyjadřuje závislost momentu na skluzu, lze ho však převést na závislost momentu na úhlové rychlosti pomocí definice skluzu:

$$s = \frac{\Omega_{1m} - \Omega}{\Omega_{1m}} \quad (\text{s}^{-1}), \quad (17)$$

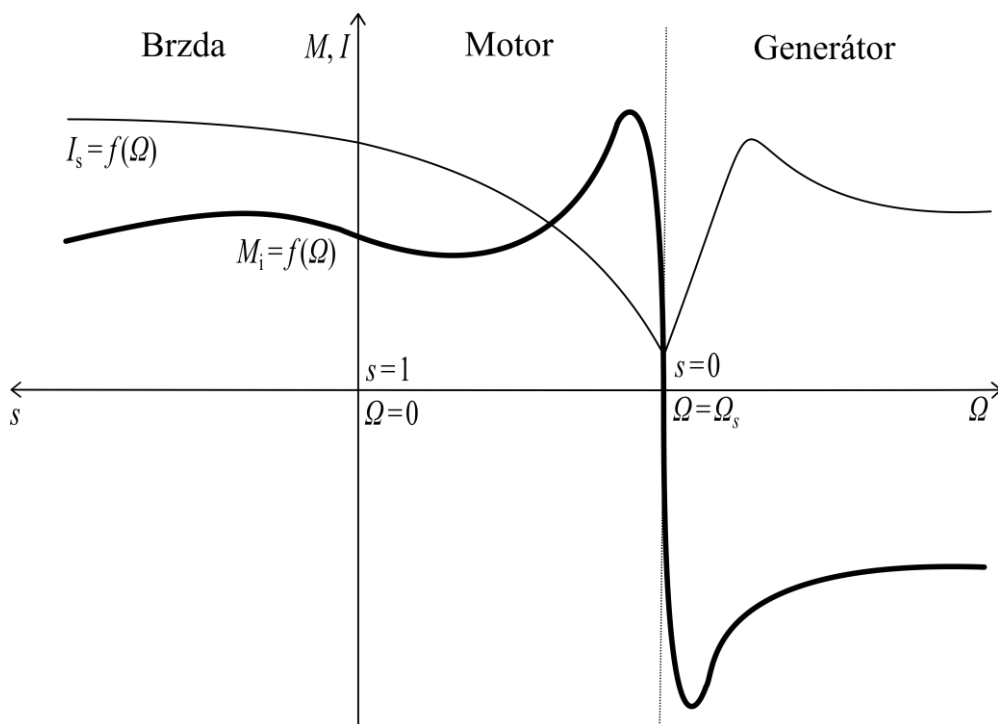
Pro účely návrhu pohonu je však potřeba znát moment na hřídeli motoru. Z výše uvedených poznatků výkonové bilance lze snadno vyvodit, že vnitřní moment je potřeba ještě snížit o moment mechanických ztrát. O tomto ztrátovém momentu lze podle vztahů (1) a (14) říci, že platí:

$$M_{\text{mech}} \approx \frac{P_{\text{mech}}}{\Omega} \approx \Omega \quad (\text{Nm}). \quad (18)$$

Navíc se zde ještě uplatňují ztrátové momenty vyvolané dodatkovými ztrátami, které mohou značně deformovat jinak hladký průběh vnitřního momentu. Mezi takové parazitní momenty patří například momenty tepavé, torzní, popřípadě tzv. synchronní a asynchronní sedla (Bašta et al. 1962: kap. 12).

² Úhlová rychlost pole daná frekvencí vstupního napětí, vztahovaná na počet pólů.

V důsledku těchto doplňkových momentů je exaktní určení momentu na hřídeli prakticky nemožné. Vztah (16) je na druhou stranu pro první přiblížení dostatečný a zároveň je vhodný pro grafické zpracování. Za předpokladu konstantního napětí na svorkách motoru a konstantní teploty všech komponent se ve vztahu (16) vyskytuje pouze jediná proměnná, a to skluz. Příklad průběhu takto definované momentové charakteristiky lze vidět na obrázku 4.



Obrázek 4 – Momentová charakteristika asynchronního motoru

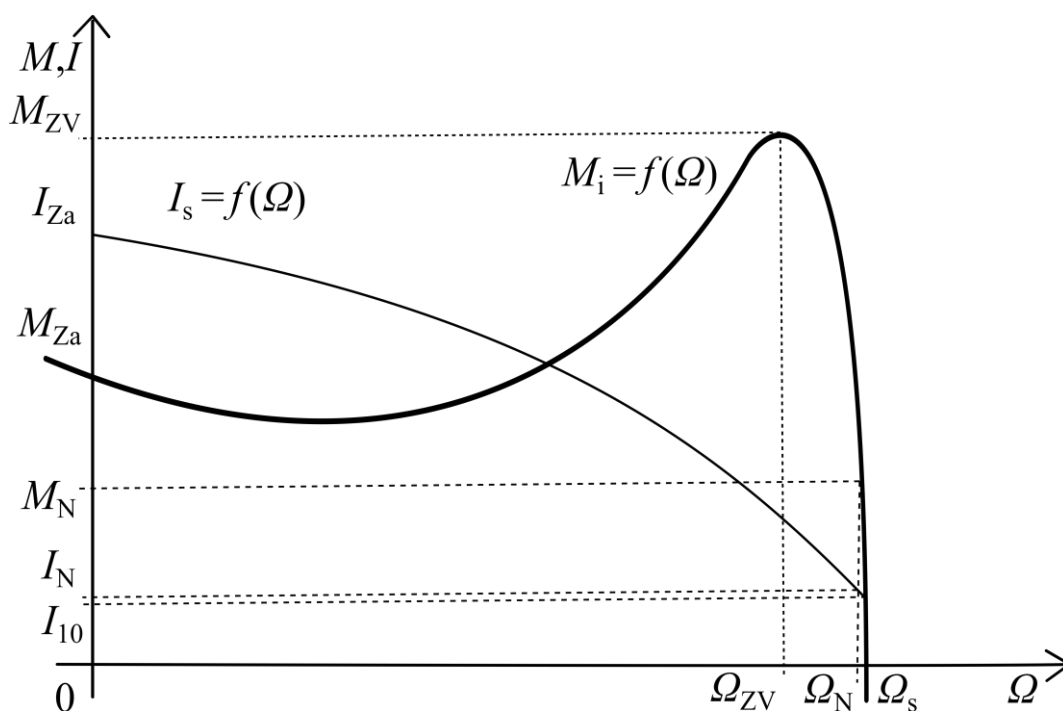
Obrázek 4 zachycuje i množství dalších informací o asynchronních motorech. Kromě momentové charakteristiky je v něm možné vidět i závislost statorového proudu na úhlové rychlosti. Obecně platí, že asynchronní motor může pracovat ve třech kvadrantech. V prvním kvadrantu jako brzda, v druhém kvadrantu jako motor a ve čtvrtém kvadrantu jako generátor. V případě brzděné oblasti má motor zápornou úhlovou rychlost a skluz větší než 1. Brzděné proudy dosahují vysokých hodnot a motor se tak značně zahřívá. Motorická oblast je zásadní pro účely pohonů a bude se jí proto podrobně věnováno v následujících kapitolách. Aby motor začal pracovat jako generátor, je potřeba ho roztočit nad synchronní úhlovou rychlost. Tuto úhlovou rychlost lze definovat jako:

$$\Omega_s = \frac{2\pi \cdot f}{p_p} \quad (\text{s}^{-1}), \quad (19)$$

kde p_p je počet pólparů a f je frekvence napájecího napětí. Při této úhlové rychlosti také statorový proud dosahuje nejnižších hodnot. Skluz roven nule poté vyjadřuje fakt, že úhlová rychlost motoru je při této rychlosti shodná s úhlovou rychlostí otáčení pole. Z tohoto důvodu motor ani generátor nemůže při této rychlosti pracovat a je potřeba se pohybovat v jeho okolí (Hrabovcová et al. 2009).

3.3. Rozbor motorické oblasti momentové charakteristiky

Zaměříme se nyní podrobněji na samotnou motorickou oblast. Obrázek 5 zobrazuje tuto část momentové charakteristiky s označením důležitých bodů.



Obrázek 5 – Rozbor momentové charakteristiky

Při rozběhu motoru z nulových otáček hrají důležitou roli parametry I_{Za} a M_{Za} . Jedná se o záběrný moment a záběrný proud. Záběrný proud asynchronního motoru může nabývat čtyř až sedminásobku jmenovitého proudu I_N . Na takto vysoké proudy musí být dimenzována nejen napájecí síť, ale i jednotlivé ochrany. Záběrný moment následně definuje, zda se motor v daném pohonu dokáže rozběhnout, viz kapitola 2.4.

Záběrný moment lze orientačně určit ze vztahu (16) dosazením $s = 1$. Jelikož je však v praxi tento moment ovlivněn množstvím aspektů, je výhodnější zjišťovat tento moment experimentálně. Norma ČSN 35 0010 umožňuje hned několik možností jeho měření, závislých na měřeném motoru a výbavě zkušebny. Nejčastější z těchto možností

je určení záběrného momentu z momentové charakteristiky naměřené použitím dynamometru. K jeho určení se však dají využít i výsledky z měření nakrátko. Jelikož však při tomto postupu je nutné záběrný moment kalkulovat a není snadné definovat chybu dané kalkulace, je tento postup používán jen tehdy, pokud není jiná možnost. Taková situace může nastat v případě motorů velkých výkonů. Při každé metodě je vždy vhodné provést několik měření a jako výsledný záběrný moment je poté označen ten nejmenší změřený.

Bod nejvyššího momentu dané charakteristiky se nazývá moment zvratu M_{ZV} a nastává při zvrátové úhlové rychlosti Ω_{ZV} resp. při skluzu zvratu s_{ZV} . Tato úhlová rychlost rozděluje momentovou charakteristiku na dvě oblasti. Oblast nalevo od úhlové rychlosti zvratu obsahuje dle definice uvedené v kapitole 2.4 pouze nestabilní pracovní body. Oblast napravo od úhlové rychlosti zvratu pak obsahuje pouze stabilní pracovní body. Této oblasti se proto říká oblast pracovní a nachází se v ní jmenovitý moment motoru M_N .

Moment zvratu lze orientačně určit ze vztahu (16). Nejprve je potřeba provést parciální derivaci tohoto výrazu podle skluzu, položit ji rovnou nule a vyjádřit skluz. Takto získaný vztah se následně zpátky dosadí do vztahu (16). Experimentálně je možné ho určit z momentové charakteristiky naměřené použitím dynamometru. Výrobci motorů často místo momentu zvratu udávají tzv. momentovou přetížitelnost motoru. Ta je definována jako poměr jmenovitého momentu a momentu zvratu. S touto problematikou je také spojen tzv. Klossův vztah, který v zjednodušené formě zní:

$$\frac{M_i(s)}{M_{ZV}} \cong \frac{2}{\frac{s}{s_{ZV}} + \frac{s_{ZV}}{s}} \quad (-). \quad (20)$$

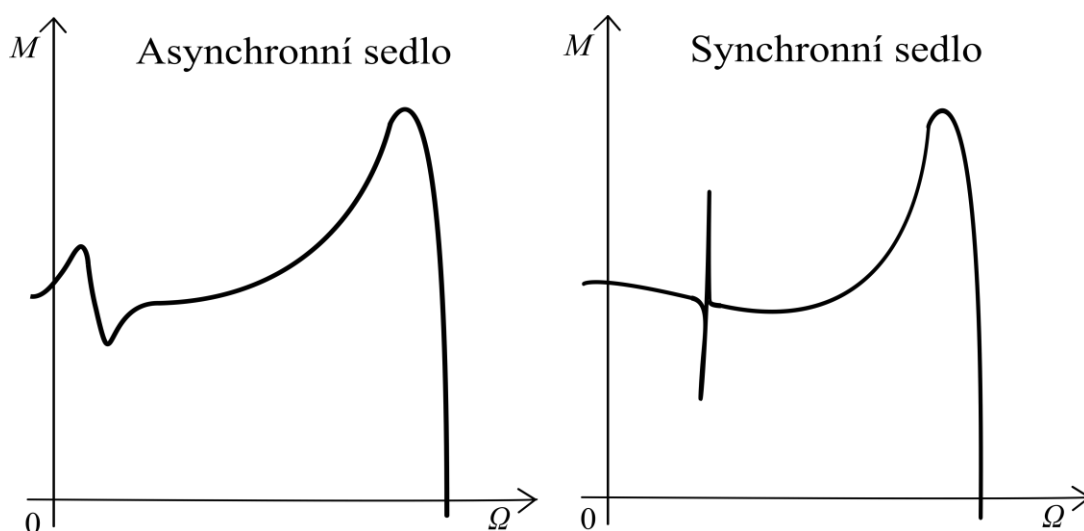
Tento vztah může být s výhodou využit při orientačním dopočítávání momentu v případě, že neznáme průběh momentové charakteristiky, ale známe moment a skluz zvratu.

Kromě již uvedených lze na momentové charakteristice nalézt ještě další dva podstatné body. Prvním takovým je proud naprázdno I_{10} , který určuje nejmenší možný satorový proud motoru. Tento proud odpovídá synchronní úhlové rychlosti a jeho hodnotu lze zjistit z měření naprázdno motoru. Druhým podstatným bodem je pak minimální moment v průběhu spouštění motoru, často označovaný jako moment sedlový. Jeho určení je opět možné z momentové charakteristiky naměřené použitím

dynamometru. Problémem takového měření jsou však parazitní momenty, které se vyskytují právě v daných oblastech a mohou značně ovlivnit měření i výsledky. Rozumnější je proto využití regulovatelné zátěže se známým průběhem protimomentu. Zátěž se připojí k motoru a provede se rozběh. Pokud rozběh proběhl úspěšně, zátěž je zvednuta a rozběh se opakuje. Sedlový moment je pak určen z případu, kdy se již motor není schopen úspěšně rozběhnout.

3.4. Synchronní a asynchronní sedla

Jak již bylo uvedeno výše, synchronní a asynchronní sedla patří mezi parazitní momenty, značně měnící momentovou charakteristiku. Jejich vznik je svázán s vyššími harmonickými magnetického pole.



Obrázek 6 – Parazitní momenty

Uvažujme nyní rovnoměrné rozložení vzduchové mezery motoru. V takovém případě bude magnetické pole vzduchové mezery odpovídat magnetomotorickému napětí, které jej vyvolává. Reálné motory však rovnoměrné rozložení vzduchové mezery nemají. Následkem toho dochází k deformaci magnetického pole ve vzduchové mezeře a vzniku vyšších harmonických (Petrov 1982: str. 209-216).

Obecně lze říci, že i v případě prochází-li statorovým vinutím pohybujícího se motoru harmonický proud, vznikají ve vzduchové mezeře složité řady točivých magnetických polí. Každé harmonické magnetomotorické napětí totiž budí své vlastní pole. Tato pole následně budí proudy v rotoru, které vytvářejí svoje vlastní magnetomotorická napětí a tím pádem svoje vlastní magnetická pole vyšších

harmonických, která působí zpět na stator. Jednotlivá pole se pak svými účinky superponují.

Obrázek 6 zobrazuje možné průběhy momentových charakteristik ovlivněných prostorovými vyššími harmonickými magnetického pole.

3.4.1. Asynchronní sedla

Fourierovou analýzou lze dokázat, že točivá pole jsou tvořena prostorovými harmonickými řádu:

$$\nu = 6c \pm 1 \quad (-), \quad (21)$$

kde c je celé číslo. U těchto vyšších harmonických zároveň platí, že se na pole, která generují, vztahuje počet pólů $\nu \cdot p_p$ (Voženílek et al 2015: str. 96).

Asynchronní sedla vznikají, jestliže proud statoru vytvoří vyšší harmonickou pole a to následně vybudí v rotoru stejnou vyšší harmonickou proud. Tyto vyšší harmonické spolu poté vytvoří asynchronní moment fiktivního motoru o $\nu \cdot p_p$ pólů, jehož průběh se nápadně podobá průběhu momentové charakteristiky vybudené první harmonickou. Oba tyto momenty se poté superponují.

Nejvýznamnější vliv mají 5. a 7. vyšší harmonická, vyšší řády již nemají praktický význam, neboť s rostoucím řádem klesá jejich amplituda. Účinek sedmé harmonické lze pozorovat na obrázku 6. Tento parazitní moment se vytváří v motorické oblasti momentové charakteristiky a nepřívětivě působí na rozběh motoru. Účinek páté harmonické spadá do oblasti brzděné a není na obrázku zobrazen.

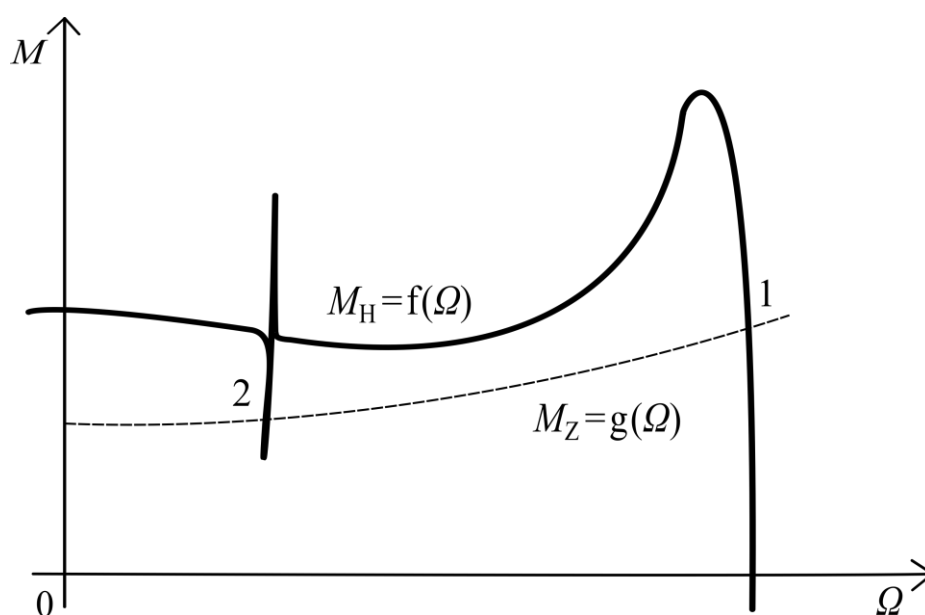
Asynchronní sedla lze potlačit potlačením příslušných vyšších harmonických polí. Toho lze dosáhnout například vhodným cívkovým krokem, popřípadě vhodným počtem drážek na pól a fázi.

3.4.2. Synchronní sedla

Synchronní sedla vznikají v důsledku působení dvou synchronně se točících vyšších harmonických polí stejného řádu, která jsou na sobě nezávislá. Tento případ nastává, otáčí-li se vyšší harmonické zubové pole statoru synchronně s vyšším harmonickým zubovým polem rotoru. Synchronní sedla se tedy projevují pouze při otáčkách odpovídajících synchronnímu otáčení daných vyšších harmonických.

Množství takových sedel a jejich poloha závisí na konstrukčním uspořádání stroje. Tato sedla opět negativně ovlivňují rozběh motoru. Příklad takové situace ukazuje obrázek 7. Dle záběrného momentu by se měl motor bez problémů rozběhnout a ustálit v pracovním bodě 1, nicméně v důsledku působení synchronního sedla se motor ustálí v pracovním bodě 2. V tomto bodě bude však pracovat s velkým skluzem, velkými ztrátami, a tudíž i špatnou účinností. V případě, že se synchronní sedlo vytvoří poblíž nulové úhlové rychlosti, motor tzv. lepí a není schopen se rozběhnout.

Synchronních sedel se dá prakticky úplně vyvarovat správnou volbou počtu drážek statoru a rotoru a jejich natočením.



Obrázek 7 – Vliv synchronního sedla na rozběh motoru

3.5. Vliv parametrů na momentovou charakteristiku

V praxi je často potřeba mít možnost regulovat momentovou charakteristiku³. Toho je možné dosáhnout změnou parametrů vyskytujících se ve vztahu (16), konkrétně se jedná o velikost napájecího napětí U_s , počet fází m_{AM} , počet pólpárů p_p a odpor rotorové klece R_R^* a statorového vinutí R_S .

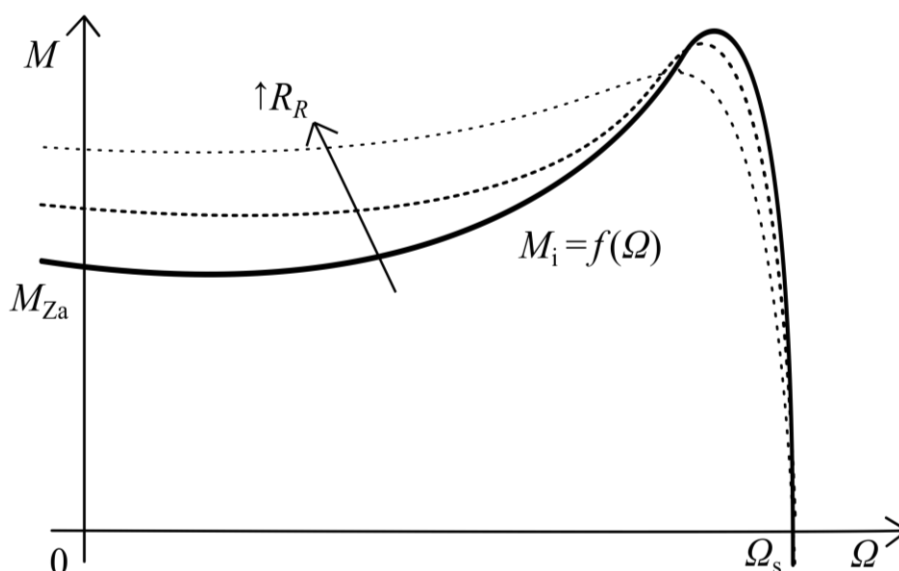
Základním prostředkem k řízení momentové charakteristiky je napájecí napětí. Ze vztahu (16) je zřejmé, že s rostoucím napětím roste moment kvadraticky. Statorový proud pak podle Ohmova zákona roste lineárně. Úhlová rychlost zvratu se nemění. Řízení pomocí napětí se využívá při mnoha zkouškách asynchronních motorů.

³ Uvažujeme asynchronní motor s kotvou nakrátko, který je součástí neřízeného asynchronního pohonu.

Například při měření nakrátko by proudy dosahovaly destruktivních hodnot, kdyby nebylo prováděno při sníženém napětí. Často se tohoto řízení využívá také při měření momentových charakteristik.

Počet fází a počet pólů jsou parametry, které jsou v drtivé většině případů dané konstrukcí motoru, a není možné je měnit. Obecně však platí, že zvýšení počtu fází satorového vinutí lineárně zvyšuje moment při zachování úhlové rychlosti. Na druhou stranu zvýšením počtu pólů lze dosáhnout vyššího momentu za cenu poklesu úhlové rychlosti zvratu na polovinu. To je také důvod, proč se pro vysokorychlostní aplikace vyrábí motory s co nejnižším počtem pólů.

Odpor rotorové klece a satorového vinutí patří v případě asynchronního motoru s kotvou nakrátko také k parametrům definovaným při konstrukci motoru. Při zvyšujícím se odporu satorového vinutí dochází ke zvyšování Jouleových ztrát a poklesu momentu při zachování úhlové rychlosti. Konstrukční snahou je tedy omezovat tento odpor. Na druhou stranu vliv odporu rotorové klece se často využívá. Zvyšováním tohoto odporu dochází k snížení momentu zvratu a úhlové rychlosti zvratu, zároveň ale také dochází ke zvyšování záběrného momentu. Tento efekt můžeme vidět na obrázku 8. Jeho problémem jsou však zvýšené ztráty v rotoru a s tím související snížení účinnosti motoru. Dá se ho však s výhodou využít při těžkých rozbězích.



Obrázek 8 – Vliv rotorového odporu na momentovou charakteristiku

Aby bylo možné využít vlastnost odporu rotorové klece, využívá se principu, který vynalezl Francouz Paul Boucherot. Využití tohoto principu vedlo například

k vytvoření dvouklecového rotoru, kde jsou jednotlivé klece odděleny úzkým krčkem. Jedna klec má nízký odpor a vysokou rozptylovou reaktanci, zatímco druhá klec to má naopak. V případě rozběhu motoru dochází k postupnému snižování frekvence indukovaného napětí v rotoru v důsledku snižování skluzu⁴. Ze začátku je tato frekvence vysoká, a tak klec s vysokou rozptylovou reaktancí brání průtoku proudu. Většina proudu tedy teče klecí s vysokým odporem a vytváří se velký záběrný moment. S klesající frekvencí však začne slábnout vliv rozptylové reaktance a proud se začne dělit v poměru odporů obou klecí. Na konci rozběhu tak vytváří moment téměř pouze klec s malým odporem.

3.6. Statické měření momentové charakteristiky

Toto měření vychází ze vztahu (5) a dělá se tzv. bod po bodu. Postup a podmínky měření jsou popsány v normě ČSN 35 0010 (1992: str. 44).

Pro zatěžování motoru se využívá dynamometru, kalibrovaného zatěžovacího stroje nebo měřicího momentového hřídele. Po dobu měření celého průběhu je zapotřebí sledovat oteplení motoru. Toto oteplení by se mělo pohybovat okolo jmenovité hodnoty a nesmí se od ní lišit o více než 20 °C. V případě, že tato podmínka není splněna, je nutné měření přerušit, nechat ochladit motor chodem naprázdno a až poté pokračovat. Taková situace může nastat například při proměřování momentových sedel.

Měření statické momentové charakteristiky probíhá v celém rozsahu motorické oblasti. Měření obvykle začíná chodem naprázdno a postupuje se k nižším úhlovým rychlostem. Statorový proud tedy v průběhu měření značně narůstá a s ním narůstá i oteplení motoru. Aby bylo možné proměřit momentovou charakteristiku i u velkých motorů, umožňuje norma ČSN 35 0010 měření při sníženém napětí. Charakteristiku je však nutné následně přepočítat na napětí jmenovité.

Při měření se měří aktuální úhlová rychlost, statorový proud a moment. V případě sníženého napětí je navíc potřeba zaznamenávat hodnotu tohoto napětí U_{\downarrow} .

V případě měření při jmenovitém napětí následuje provedení rozboru naměřené charakteristiky a určení významných veličin. Pokud měření probíhalo za sníženého napětí, je potřeba nejprve provést přepočet na jmenovité hodnoty. Norma ČSN 35 0010 uvádí pro tento přepočet vztahy:

⁴ Skluz lze definovat jako poměr frekvence indukovaného napětí v rotoru k frekvenci napájecího napětí.

$$M_{\text{Hs}} = (M_{\downarrow} + M_{\text{mech}}) \left(\frac{U_{\text{N}}}{U_{\downarrow}} \right)^2 - M_{\text{mech}} \quad (\text{Nm}), \quad (22)$$

$$I_{\text{ss}} = I_{\text{s}\downarrow} \frac{U_{\text{N}}}{U_{\downarrow}} \quad (\text{A}), \quad (23)$$

kde M_{\downarrow} je naměřený moment a $I_{\text{s}\downarrow}$ je naměřený statorový proud při sníženém napětí.

3.7. Dynamické měření momentové charakteristiky

K měření momentové charakteristiky lze využít i dynamického přístupu, založeného na pohybové rovnici (4). Tento postup je opět popsán v normě ČSN 35 0010 (1992: str. 45).

Při této metodě nedochází k přímému snímání momentu, ale moment je kalkulován z průběhu úhlové rychlosti. Jedním ze způsobů měření úhlové rychlosti uvedeným v normě je měření pomocí tachodynamu. V dnešní době lze však s výhodou využít i přesnějších měření, například pomocí kvadrurního enkodéru.

Dynamické měření momentové charakteristiky se provádí sejmutím průběhu úhlové rychlosti při rozběhu motoru a patří k nejproblematictějším měřením. Pokud je provedeno za jmenovitého napětí, a rozběh tudíž probíhá rychle, může se takto změřená momentová charakteristika velmi lišit od statické. To je dáno značným vlivem doplňkových ztrát, díky kterým vznikne nezanedbatelný podíl parazitních momentů superponujících se na vlastní momentovou charakteristiku. Měřením za sníženého napětí dojde ke zpomalení rozběhu motoru a zvýšení validity měření.

U malých motorů je nutné zvýšit jejich dobu rozběhu pomocí zvýšení momentu setrvačnosti. Toho lze dosáhnout připojením setrvačnicku s přesně definovaným momentem setrvačnosti k motoru. Nejlepší výsledky pak přináší, je-li proveden rozběh z protiběhu. Při tomto rozběhu je motor roztočen na jmenovité otáčky a poté je skokově změněn sled napájecích fází. Motor se tak ocitá v brzděné oblasti momentové charakteristiky, dochází k jeho brzdění a následnému rozběhu opět na jmenovité otáčky.

Další slabinou dynamického měření je, že je zatíženo nejenom chybou měření otáček a následného výpočtu momentu, ale také chybou přepočtu vzniklou měřením za sníženého napětí. Před vlastním měřením je navíc nutné určit moment setrvačnosti soustrojí J a vyhodnotit případné dodatečné zatížení motoru M_{Z} , což zanáší do výsledného průběhu další chyby.

Tato metoda je však vhodná pro analýzu sedlových momentů charakteristiky, které se statickým způsobem analyzují obtížně. Další výhodou je, že není prakticky zatížena chybou způsobenou ohříváním motoru.

Při měření se snímá průběh úhlové rychlosti a napětí. Výsledný moment na hřídeli se poté určí na základě pohybové rovnice (4) jako:

$$M_{\text{Hd}} = J \frac{d\Omega}{dt} + M_Z \quad (\text{Nm}). \quad (24)$$

Jestliže bylo měření prováděno za sníženého napětí, musí následovat přepočítání na jmenovité napětí dle vztahu (22).

4. Měřicí systémy pro sběr dat z měření momentových charakteristik⁵

Obecně lze říci, že pro každou měřenou veličinu lze nalézt několik metod jejího měření. Výsledky těchto metod se ale od sebe mohou i velmi výrazně lišit. Před vlastním měřením je tedy třeba si uvědomit, jaké tyto výsledky vlastně mají být. Mezi nejpodstatnější požadavky patří přesnost měření, jeho opakovatelnost, validita a vypovídací hodnota. Konečná volba je však často více než tímto ovlivněna vybavením jednotlivých pracovišť, ve kterých dané měření probíhá.

Ve chvíli, kdy je jasné, co se měří a jaká je metodologie daného měření, přichází na řadu úvahy ohledně volby měřicích přístrojů. Dříve bylo nejčastěji využíváno ručkových přístrojů, ze kterých se odečítaly požadované hodnoty ručně. Tato měření tak byla často pomalá a nepřesná. Dnešní technický pokrok umožňuje využití automatizovaných měřicích systémů, které značně přispívají ke zvýšení přesnosti a rychlosti jednotlivých měření.

K měření momentové charakteristiky je zapotřebí měřicí systém obsahující množství různých měřicích přístrojů. Statické měření se však i v dnešní době často provádí pomocí starých osvědčených metod. Při dynamickém měření lze naopak využít moderních technologií.

4.1. Měření krouticího momentu

Při měření krouticího momentu se využívá měření založených převážně na dvou fyzikálních jevech. Prvním je vzájemné silové působení vinutí, kterými protéká proud, druhým pak deformace hřídele v důsledku vzájemného působení momentů.

4.1.1. Elektromagnetický dynamometr

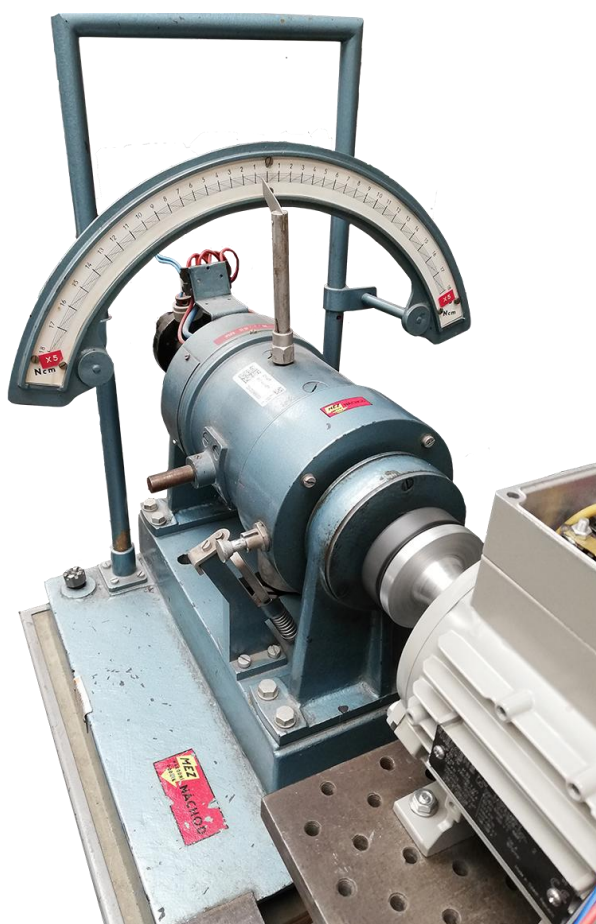
Jedná se o stejnosměrný motor s cizím buzením, sloužící k měření střední hodnoty momentu. Jeho funkce je založena na teorii elektrických strojů. Motor je nejprve nutno nabudit stejnosměrným napětím. Následným přiložením stejnosměrného napětí na kotvu motoru dojde k vytvoření magnetického pole, které začne interagovat s polem vytvořeným buzením. Výsledkem této interakce je síla uvádějící motor

⁵ Problematika měřicích systému přesahuje rámec této práce, následující podkapitoly jsou tedy spíše informativní a neobsahují podrobné popisy jednotlivých přístrojů a jejich variant.

do pohybu. Tato síla však působí dle zákona akce a reakce také zpětně na stator motoru. Proto je nutné mít motor pevně připevněn.

V dynamometru se této zpětné síly využívá k měření momentu. Jeho stator je otočně uložen v ložiskových štítech a spojen s ramenem přesně definované délky. Přes toto rameno se pak krouticí moment přenáší na ocejchovaný zobrazovač (Voženílek et al. 2006: str. 16-17).

Jelikož však dynamometr stále zůstává motorem, je možné ho využívat jako zátěž i jako pohonnou jednotku. Velikost momentu, který vytváří, lze poté řídit pomocí napětí na jeho svorkách. To je zejména u měření momentové charakteristiky asynchronního motoru esenciální. Při úhlových rychlostech nižších, než je úhlová rychlost zvratu, je totiž nutné, aby dynamometr převzal roli pohonné jednotky. V případě, že by zatěžování probíhalo pouze pomocí pasivní zátěže, by se totiž motor dostal do oblasti nestabilních pracovních bodů a došlo by k jeho zastavení⁶.



Obrázek 9 – Elektromagnetický dynamometr

⁶ Problematika podrobně rozebrána v kapitolách 2.4 a 3.3.

4.1.2. Elektrické snímače momentu

Existuje mnoho různých přístupů jak určit krouticí moment z deformace hřídele. Obecně však lze říci, že se jedná o převod mechanické veličiny na elektrickou. V důsledku deformace dochází totiž ke změně pracovních podmínek ve snímači, které se následně projeví ve změně měřené elektrické veličiny.

Nejběžnějším takovým snímačem momentu je tenzometr. Tenzometr funguje jako snímač smykového tření. Konstrukčně se jedná o odporové pásky nalepené na hřídeli, tvořící měřicí můstek. Tento můstek je napájen obvykle stejnosměrným napětím. V případě, že dojde k deformaci hřídele, dochází i ke změně rozměrů a tedy odporu pásků, což se projeví změnou napětí na výstupu můstku.

Kromě tenzometrů se lze v praxi setkat například s indukčními měřiči nebo kapacitními snímači. Tyto přístroje využívají vzduchové mezery měnící se v důsledku deformace. Tato změna vede ke změně indukčnosti popřípadě kapacity snímače, který ji pak převádí na hodnotu momentu.

Elektrické snímače momentu měří okamžitou hodnotu momentu a lze je tedy využít například při měření parazitních momentů. Jejich výstupem je totiž spojitý signál, který lze s vysokým rozlišením snímat.

4.2. Měření otáček

Měření otáček patří k základním mechanickým měřením. Měřiče otáček lze rozdělit podle jejich principu funkce do čtyř skupin - elektrodynamické, elektromagnetické, mechanické a optické.

V předchozích kapitolách byla vždy uváděna závislost na úhlové rychlosti. Tento postup je běžný v teorii pohonů, většina měřicích přístrojů však ukazuje hodnotu otáček. Pro převod mezi otáčkami a úhlovou rychlostí lze využít vztah:

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (\text{s}^{-1}). \quad (25)$$

4.2.1. Tachodynamo

Tachodynamo funguje na principu elektrodynamického snímání otáček. Jedná se o stejnosměrné dynamo s cizím buzením umístěné na společné hřídeli s měřeným motorem. Pro takový stroj platí vztah:

$$U_{sd} = c\Phi_d\Omega \quad (\text{V}), \quad (26)$$

kde U_{sd} je napětí na svorkách tachodynamu, c je konstanta daná konstrukcí stroje a Φ_d je budící tok. Z tohoto vztahu vyplývá, že otáčí-li se soustrojí, na svorkách dynama se objevuje napětí přímo úměrné rychlosti otáčení.

Aby bylo možné přesně definovat danou konstantu úměrnosti, je třeba před každým měřením provést oceňování tachodynamu. Soustrojí je roztočeno a pomocí optického nebo mechanického měřidla je určena rychlost jeho točení. Převodní konstantu lze poté určit jako poměr napětí na svorkách tachodynamu k těmto změřeným otáčkám.

Tachodynamo měří okamžitou hodnotu otáček a je vhodné pro měření přechodových jevů. Jeho výstupem je totiž spojitý signál, který lze s vysokým rozlišením snímat.



Obrázek 10 – Tachodynamo buzené permanentními magnety

4.2.2. Mechanické a optické senzory

Tyto senzory lze využít pro zjištění okamžité hodnoty otáček. V praxi se využívají především jako orientační měření a obvykle tedy neslouží pro měření dlouhodobá.

Optické senzory využívají obecně dvou principů. První princip je založen na světelném paprsku dopadajícím na hřídel, na kterou je umístěna speciální odrazka. Světelný paprsek se od této odrazky odráží a přístroj snímá frekvenci odrazů. Druhý princip je založen na stroboskopickém jevu. Přístroj vysílá přerušovaný světelný paprsek, jehož frekvenci lze regulovat. V případě, že se frekvence paprsků blíží k frekvenci točení hřídele, lidské oko tento pohyb vnímá jako zpomalený. Při shodné frekvenci se pak pohyb zdánlivě úplně zastaví.

Mechanické senzory je nutné přiložit k hřídeli soustrojí. Jejich funkce je často založena na snímání odstředivé síly.

4.2.3. Elektromagnetické senzory

Jedná se o nejpřesnější měření rychlosti. Jejich hlavní nevýhodou ovšem je, že k vyhodnocování jejich výstupů je třeba využít výpočetní techniky. Obecně lze do této skupiny senzorů zařadit enkodéry, hall senzory a resolvers.

Enkodéry lze rozdělit na optické a magnetické. V případě absolutního magnetického enkodéru dochází k otáčení velkého magnetického disku nad deskou přesně rozložených magnetických senzorů. Tím dochází k vytvoření přesně definovaných magnetických reakcí. Snímač tyto magnetické reakce poté převádí na elektrický signál. Vhodným rozbořením tohoto signálu je následně možné stanovit rychlost motoru.

Hall senzory jsou založeny na Hallově jevu. Tyto senzory jsou tvořeny polovodičovou destičkou. Jestliže touto destičkou protéká proud a je vložena do magnetického pole, prochází skrze ni magnetický tok, který přeskupuje náboje na jednu stranu destičky. Tím vzniká na senzoru napětí. Rozbořením tohoto napětí lze poté určit rychlost otáčení motoru.

Resolver je svým principem blízký rotačnímu transformátoru. Konstrukčně se jedná o stacionární primární vinutí a dvě vůči sobě o 90° posunutá rotující vinutí. Jestliže je jeho primární vinutí napájeno střídavým napětím, do jednoho z rotujících

vinutí se indukují kosinový průběh napětí a do druhého sinový průběh napětí. Z velikosti amplitudy těchto dvou indukovaných napětí lze pak určit aktuální rychlost otáčení motoru.

4.3. Měření elektrických veličin

Elektrických veličin je velké množství. V případě elektrických motorů se jedná zejména o napětí, proud, elektrický odpor, elektrický výkon a účinnost. Měření napětí a proudu patří mezi základní přímá měření. Ostatní veličiny se obvykle z těchto dvou kalkulují.

Přístroje měřící proud a napětí lze podle způsobu zpracování dat rozdělit na analogové a digitální. Digitální přístroje jsou založené na zpracování měřeného signálu pomocí ADC. Analogové přístroje lze podle principu funkce rozdělit na magnetoelektrické a elektromagnetické. Magnetoelektrické přístroje fungují na principu vzájemného silového působení cívky protékané proudem a permanentního magnetu. Z tohoto důvodu je možné je použít pouze pro měření stejnosměrných průběhů. Elektromagnetické přístroje obsahují pevný a pohyblivý segment, které jsou zmagnetovány ve stejné polaritě, a tak se odpuzují. Tyto přístroje měří střední hodnotu, kterou následně převádějí na hodnotu efektivní, a jsou proto vhodné pro měření harmonických střídavých průběhů.

Pro měření napětí využíváme voltmetry. Tyto přístroje je nutné zapojovat paralelně k měřenému úseku. Jejich hlavním požadavkem je pak co největší elektrický odpor, aby proud jimi protékající byl co nejmenší a docházelo tak k minimálnímu ovlivnění měření. Pro měření vysokých napětí lze využít měřicí transformátory napětí.

Pro měření proudu využíváme ampérmetry. Tyto přístroje je nutné zapojovat sériově k měřenému úseku. Jejich hlavním požadavkem je pak co nejmenší elektrický odpor, aby na nich byl co nejmenší úbytek napětí a docházelo tak k minimálnímu ovlivnění měření. Pro měření vysokých proudů lze využít měřicí transformátory proudu.

Elektrický odpor lze určit pomocí Ohmova zákona jako poměr napětí k proudu. Elektrický výkon pak jako jejich součin. Účinnost lze poté určit jako poměr výstupního výkonu k výkonu vstupnímu.



Obrázek 11 – Magnetoelektrický a elektromagnetický ampérmetr

4.4. Měření teploty

V případě měření momentových charakteristik je měření teploty velice důležité. Zejména při úhlových rychlostech blízkých nule dochází k rapidnímu zahřívání motoru. V důsledku tohoto zahřívání dochází ke změnám parametrů motoru. Nejvíce teplotně závislé jsou odpor statorového vinutí a odpor rotorové klece. Pro teplotní závislost odporu lze nalézt vztah:

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta T) \quad (\Omega), \quad (27)$$

kde R_0 je referenční hodnota odporu při definované teplotě, α je teplotní součinitel odporu a ΔT je rozdíl aktuální teploty a teploty referenční. S rostoucí teplotou tedy dané odpory rostou, což následně značně ovlivňuje naměřené výsledky⁷.

Metody měření teploty lze rozdělit do dvou hlavních skupin - kontaktní a bezkontaktní. Pro měření teploty komponentů elektrických motorů jsou z kontaktních měřičů nejpoužívanější termočlánky a odporové senzory, z bezkontaktních pak termovize (Bartoň 2011: kap. 4).

Kontaktní tepelné senzory jsou vhodné pro dlouhodobá automatizovaná měření. Jejich výstupem je obvykle spojitý napěťový signál, který je třeba převádět na teplotu.

Termočlánky fungují na principu termoelektrického jevu. Při nerovnoměrném rozložení tepla v kovovém vodiči dochází k difundování částic z teplejší oblasti do oblasti chladnější. To je způsobeno větší energií těchto částic. Na koncích vodiče se

⁷ Podrobně rozebráno v kapitole 3.5.

tak objeví elektrické napětí. Termočlánky se skládají ze dvou na konci spojených kovů s odlišným teplotním součinitel odporu. Zahřívání termočlánku je tudíž nerovnoměrné a generuje napětí, které lze následně převádět na teplotu.

Odporové senzory mají svůj princip založen na vztahu (26). Je-li známa závislost odporu na teplotě daného odporového senzoru, lze měřením tohoto odporu určit teplotu daného komponentu. Nejčastěji používanými jsou polovodičové odporové senzory, mezi které patří NTC a PTC termistory. Tyto senzory mají velice výraznou závislost jejich odporu na teplotě a je možné s nimi snímat velké teplotní rozsahy.

Bezkontaktní tepelné senzory jsou vhodné pro ověření teploty objektu, popřípadě pro nalezení nejteplejšího místa. Výsledky těchto senzorů nejsou tak přesné jako u kontaktních senzorů, ale je možné je použít i v případě těžce dostupných komponentů.

Princip termovize je založen na faktu, že každé těleso vyzařuje infračervené záření odpovídající jeho teplotě. Přístroj využívající termovizi se nazývá termokamera. Jedná se o kameru obsahující infračervené kvantové detektory doplněné optikou. Logika uložená v kameře pak provádí zpracování přijatých signálů v reálném čase a jejich následné zobrazení. Jejím výstupem tak může být například vykreslení teplotního profilu zkoumané komponenty.

4.5. Prostředky využívané k automatizaci měření

V případě velice krátkých, případně dlouhých měření není již obvykle možné provádět odečet hodnot ručně. V takových a mnoha jiných případech je nutné použít automatizovaný měřicí systém.

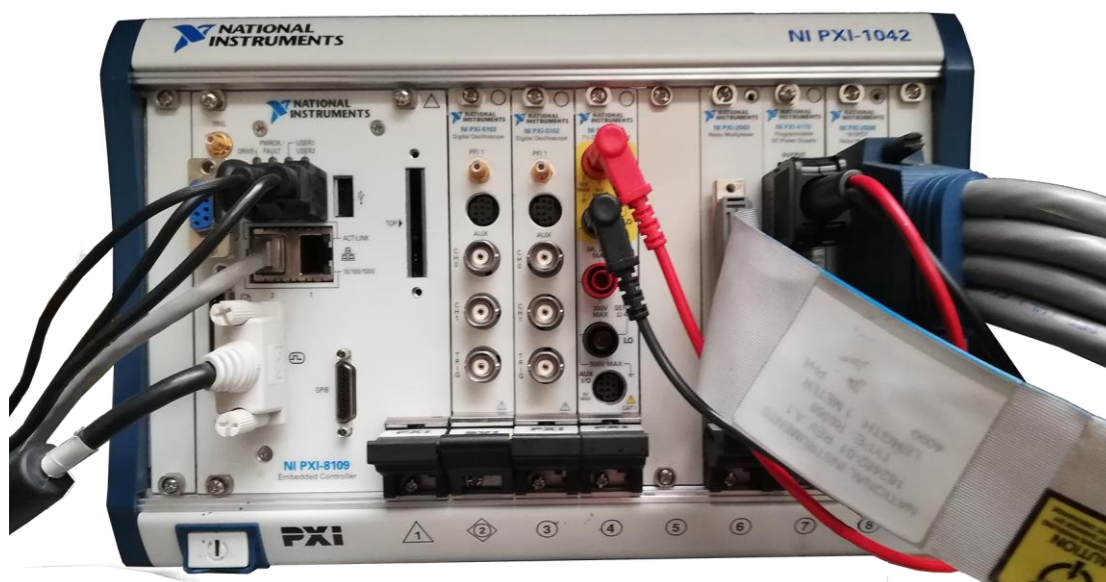
Jádrem automatizovaného měřicího systému je přístroj, zpracovávající výstupní signály jednotlivých měřicích přístrojů. Takto zpracované signály jsou obvykle následně vyhodnocovány pomocí výpočetní techniky. Ta obvykle také řídí celý automatizovaný systém využitím stykačů, relé či jiných spínacích systémů.

V případě, že cílem měření je krátkodobé zaznamenání spojitě hodnoty elektrického signálu, je vhodné využít osciloskop. Tyto přístroje jsou schopné měřit napěťové, případně proudové signály s vysokým rozlišením a v reálném čase. Naměřené výsledky je navíc možné následně exportovat například do počítače, kde může proběhnout další zpracování.

V případě, že cílem měření je dlouhodobé zaznamenávání jednotlivých hodnot elektrického signálu, je vhodné použít datalogger. Tyto přístroje jsou multiplexory, schopné snímat i velké množství signálů najednou. Každý signál je zpracován jedním kanálem obvykle obsahujícím ADC, kterým je převáděn ze spojitého spektra do digitální podoby. Tyto přístroje jsou navíc schopné tyto signály dále zpracovávat do požadované formy. Výsledné hodnoty jsou obvykle přenášeny do řídicího počítače. Pokud měření vyžaduje zpracování malého počtu signálů, které navíc není potřeba nijak zpracovávat, je vhodnější využít jednodušší přístroje obsahující pouze ADC.

Pro měření výkonových poměrů elektrických motorů vznikl sofistikovaný měřicí systém, tzv. power analyzer. Tento systém obvykle snímá proudy a napětí všech fází a z nich následně kalkuluje ostatní veličiny. Může tedy dávat informaci o výkonu, frekvenci, účinníku a mnoha dalších veličinách. Vyhodnocování probíhá v reálném čase a výsledky je možné posílat do počítače pro případné další zpracování.

Pro velmi vysoké požadavky automatizace vznikly speciální modulární systémy. Mezi tyto systémy patří například PXI modulární systémy. Tento systém obsahuje vestavěný počítač, který je napojen na jednotlivé měřicí moduly. Tyto moduly mohou mít stejné funkce jako výše uvedené měřicí systémy a je možné je měnit podle požadavků měření. Takto komplexní systém pak může samostatně provádět velice složitá měření.



Obrázek 12 – PXI modulární systém

5. Měření provedená v laboratorním prostředí

Na základě poznatků a předpokladů uvedených v minulých kapitolách byla v laboratorním prostředí provedena měření na třech různých motorech. Jde o asynchronní motory s kotvou nakrátko, které se značně liší svým jmenovitým výkonem.

Pro každý z těchto motorů byla provedena série měření za účelem získání statické a dynamické momentové charakteristiky. Jedná se o měření naprázdno, doběhovou charakteristiku, statickou momentovou charakteristiku za sníženého napětí a měření při rozběhu z protiběhu.

Z takto získaných výsledků byly vytvořeny statické a dynamické momentové charakteristiky při jmenovitém napětí. U těchto charakteristik byl proveden rozbor dle kapitoly 3.3. Na závěr pak bylo provedeno srovnání výsledků obou přístupů.

5.1. Motor se jmenovitým výkonem 45 kW

Jedná se o motor společnosti KEM EU sloužící jako pohonná jednotka eskalátoru. Štítek tohoto motoru lze vidět na obrázku 9. Jeho statorové vinutí bylo při všech měřeních zapojeno do trojúhelníku.

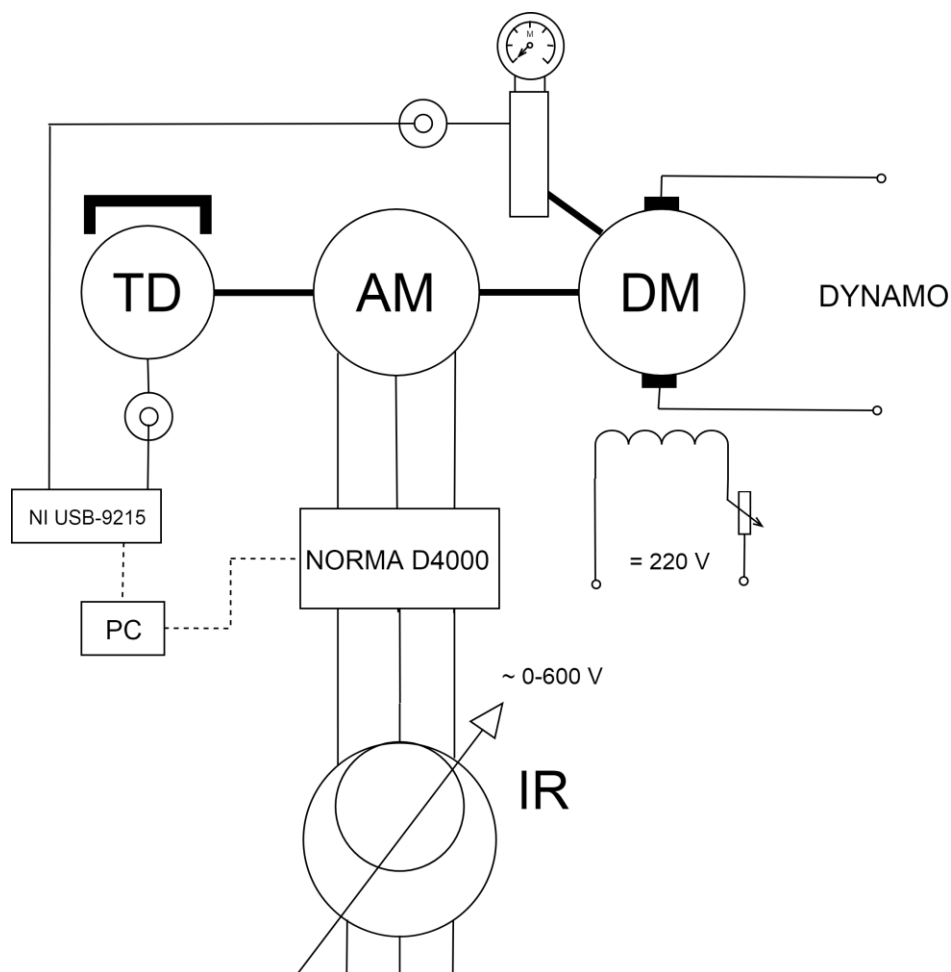


Obrázek 13 – Štítkové hodnoty velkého motoru

5.1.1. Měření naprázdno

Prvním provedeným měřením bylo měření naprázdno. Asynchronní motor byl umístěn na společnou hřídel s dynamometrem, permanentními magnety buzeným tachodynamem a byl napájen z indukčního regulátoru. Dynamometr byl při tomto měření pouze nabuzen, jeho kotva nebyla napájena.

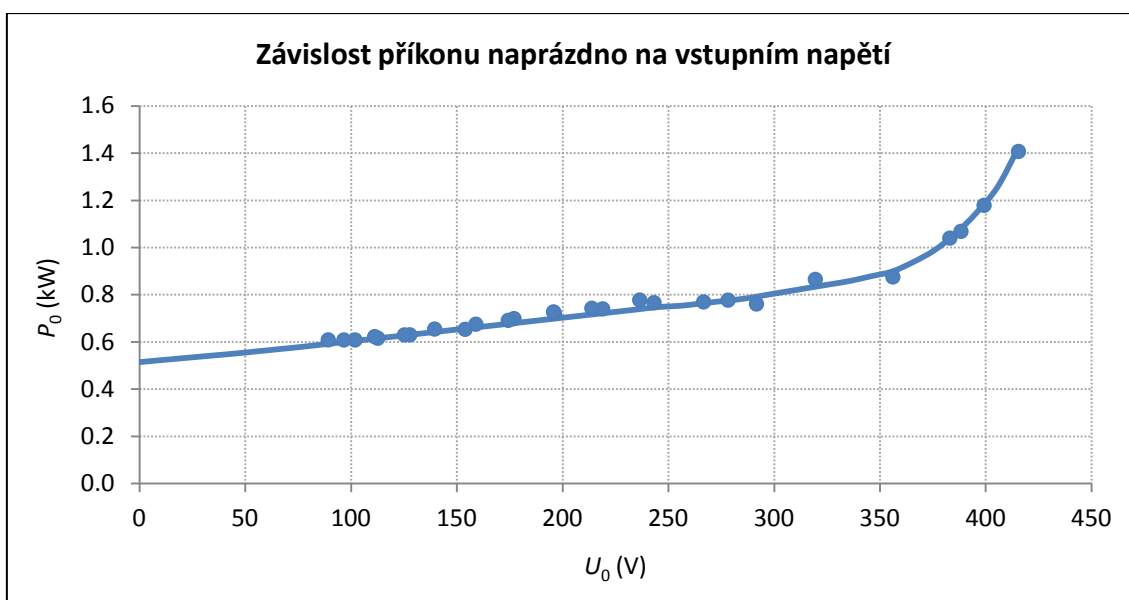
Mezi asynchronní motor a indukční regulátor byl umístěn power analyzer NORMA D4000. Tento power analyzer zajišťoval měření proudů všech tří fází a příslušných sružených napětí. Z těchto údajů poté určoval příkon, frekvenci napájecího napětí a účinník. Pro měření otáček a momentu byl využit DAQ systém NI USB-9215. K němu byly pomocí koaxiálních kabelů připojeny kotva tachodynamu a výstup z měřicí váhy dynamometru. Data z NORMY D4000 a NI USB-9215 byla přenášena pomocí USB do počítače. Orientační chéma zapojení je možné vidět na obrázku 14.



Obrázek 14 – Schéma zapojení pro měření statických charakteristik VM

Pro ovládání jednotlivých komponent a zpracování měřených hodnot bylo využito vývojové prostředí od firmy National Instruments LabWindows™/CVI. Program napsaný v tomto prostředí zprostředkovává komunikaci mezi počítačem a NORMOU D400. Na základě této komunikace je možné provádět odměry hodnot a poté ukládat výsledné hodnoty do tabulkového procesoru Microsoft® Office Excel.

Vlastní měření probíhalo přibližně od 110% jmenovitého napětí až po nejnižší možnou hodnotu. V průběhu měření byl netradičně měřen také moment na hřídeli motoru. Tento postup byl zvolen z důvodu zvýšení přesnosti měření. Změřený moment byl pomocí vztahu (1) přepočítán na výkon a odečten od naměřeného příkonu. Výsledkem je poté graf závislosti příkonu na napájecím napětí. Jeho průběh je zachycen na obrázku 15.



Obrázek 15 – Graf závislosti příkonu naprázdno velkého motoru

Extrapolací průběhu příkonu naprázdno byly určeny mechanické ztráty. Tyto ztráty byly vyčísleny jako $P_{\text{mech}} = 514$ W. Následně byly pomocí synchronní rychlosti přepočteny na moment mechanických ztrát $M_{\text{mech}} = 4.91$ Nm. Pro následující zkoušky je nutné také sestavit závislost těchto ztrát na otáčkách. Na základě vztahu (18) lze tuto závislost vyjádřit jako:

$$P_{\text{mech}} = 0.514 \cdot n \quad (\text{W}), \quad (28)$$

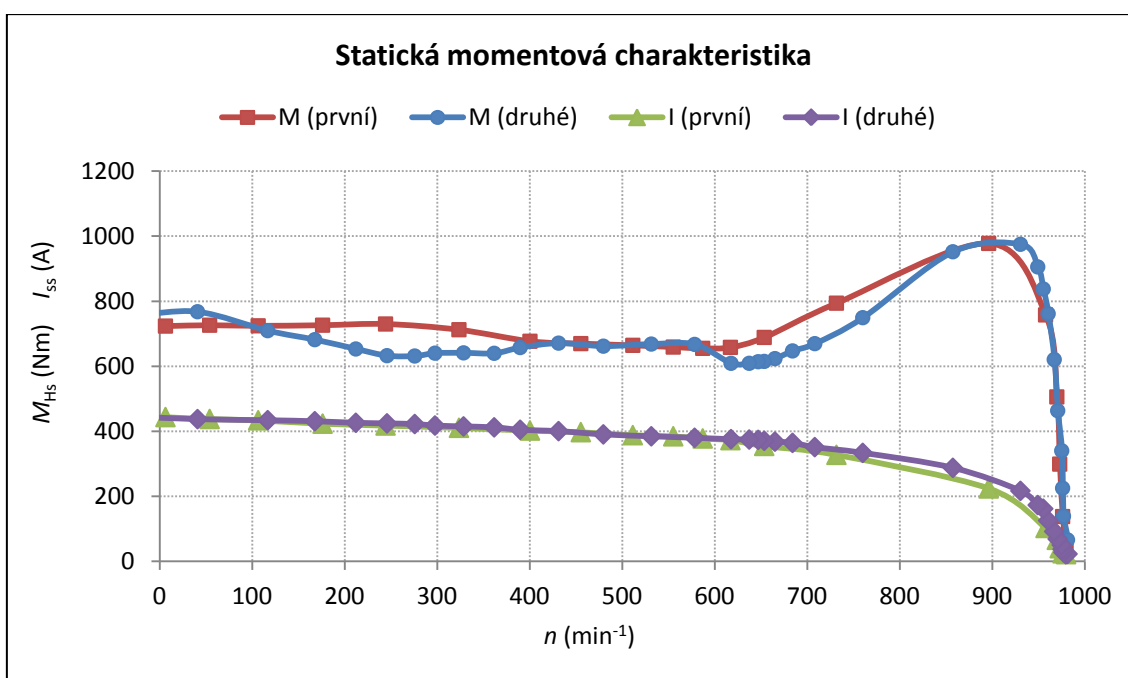
$$M_{\text{mech}} = 0.00491 \cdot n \quad (\text{Nm}). \quad (29)$$

5.1.2. Měření statické momentové charakteristiky

Po měření naprázdno následovalo měření statické momentové charakteristiky. Schéma zapojení bylo shodné s měřením naprázdno a je zobrazeno na obrázku 14. Zatěžování probíhalo pomocí napětí přivedeného na kotvu dynamometru. Toto napětí bylo vytvářeno pomocí Leonardova soustrojí. Jedná se o asynchronní motor pevně spojený hřídelí s cize buzeným dynamem, přičemž kotva tohoto dynama a dynamometru jsou elektricky spojeny. Změnou buzení dynama je poté možné řídit výkonové toky v celém systému a zatěžovat tak měřený motor.

Z důvodů velkých výkonů bylo nutné měření provést velmi rychle. Měřicí program byl proto modifikován tak, aby byly hodnoty v průběhu měření zaznamenávány automaticky s pevně danou periodou.

Byla provedena dvě měření statické momentové charakteristiky při sníženém napětí. Naměřené hodnoty momentů a proudů byly následně přepočítány pomocí vztahů (22) a (23) na jmenovité hodnoty. Výsledné průběhy zobrazuje obrázek 16.



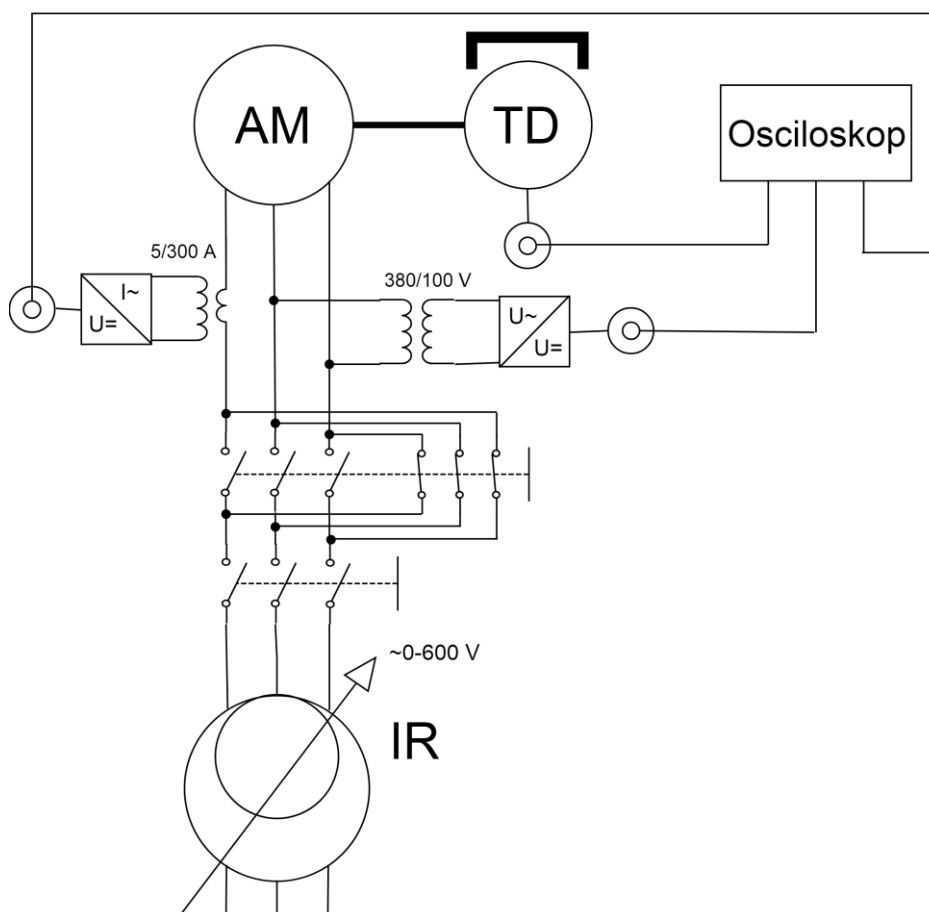
Obrázek 16 – Statická momentová charakteristika velkého motoru

Rozborem těchto momentových charakteristik podle kapitoly 3.3 lze získat podstatné parametry motoru. Jedná se o záběrný proud $I_{Za} = 440$ A, záběrný moment $M_{Za} = 765$ Nm, moment zvratu $M_{ZV} = 975$ Nm při otáčkách zvratu $n_{ZV} = 900$ min^{-1} a proud naprázdno $I_{10} = 28$ A.

5.1.3. Měření doběhové charakteristiky

Třetím provedeným měřením bylo měření doběhové charakteristiky. Při tomto měření bylo odpojeno zatěžovací dynamo, NI USB-9215 a nebyla využívána ani NORMA D4000. Dynamometr nebyl nabuzen.

Pro sejmutí průběhu otáček bylo osciloskopem měřeno napětí na kotvě tachodynamu. Kromě tohoto napětí byl osciloskopem také snímán statorový proud a sdružené napájecí napětí. Statorový proud bylo nutné transformovat na nižší hodnotu pomocí měřicího transformátoru proudu a následně pomocí převodníku efektivní hodnoty převést na stejnosměrnou hodnotu napětí. Napájecí napětí bylo také pomocí transformátoru sníženo a následně pomocí dalšího převodníku efektivní hodnoty převedeno na stejnosměrnou hodnotu. Kompletní schéma lze vidět na obrázku 17.

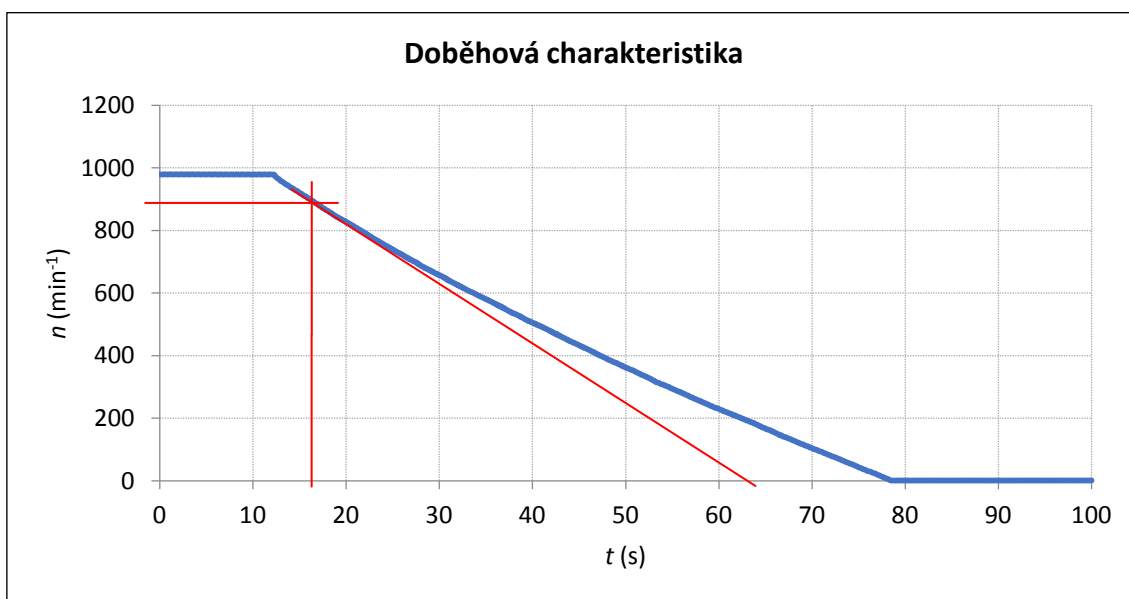


Obrázek 17 – Schéma zapojení pro měření dynamických charakteristik VM

Motor byl roztočen na jmenovité otáčky a poté odpojen od napájecího napětí. Výsledný průběh napětí na kotvě tachodynamu byl sejmut s hloubkou paměti 100 kSa a následně uložen na USB disk ve formě CSV souboru. Takto získaná data byla následně zpracována pomocí skriptu napsaného v programu Wolfram Mathematica.

Tento skript provádí jednoduché průměrování přes 100 hodnot a přepočet naměřených hodnot napětí na kotvě tachodynamu na hodnotu otáček.

Dalším krokem bylo provedení rozboru vzniklého průběhu. Tento rozbor byl proveden na základě kapitoly 2.3.1 a jeho výsledek je možné vidět na obrázku 18⁸. Rozborem získané hodnoty jsou $t_1 = 16$ s, $t_2 = 62$ s a $n_0 = 900$ min⁻¹. Využitím vztahu (25) lze následně určit $\Omega_0 = 94.25$ s⁻¹ a využitím vztahu (28) lze určit, že ztráty při těchto otáčkách jsou $P_z = 462.6$ W. Z těchto hodnot je již možné pomocí vztahu (10) určit moment setrvačnosti $J = 2.40$ kg · m⁻³.



Obrázek 18 – Doběhová charakteristika velkého motoru

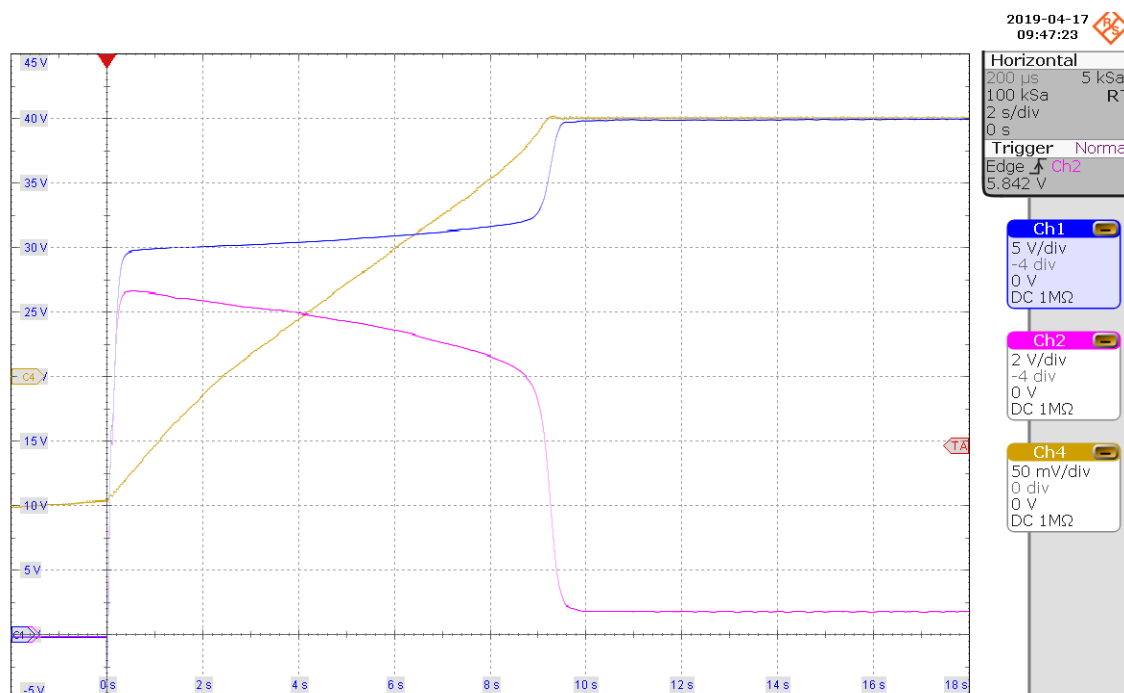
5.1.4. Měření rozběhu z protiběhu

Posledním provedeným měřením bylo měření z protiběhu. Schéma zapojení bylo v tomto případě totožné se zapojením při měření doběhové charakteristiky a je zobrazeno na obrázku 17. Motor byl pomocí sníženého napětí roztočen na jmenovité otáčky, následně byl od tohoto napětí odpojen a pomocí přepínače mu byly přehozeny dvě fáze. Opětovným připojením napájecího napětí došlo k jeho rozběhnutí na jmenovité otáčky v opačném směru točení.

Tento přechodový děj byl zachycen pomocí osciloskopu a je zobrazen na obrázku 19. Modrý průběh představuje sružené napájecí napětí, růžový průběh

⁸ V grafech dynamických měření nejsou zobrazeny naměřené body z důvodu jejich velké počtu.

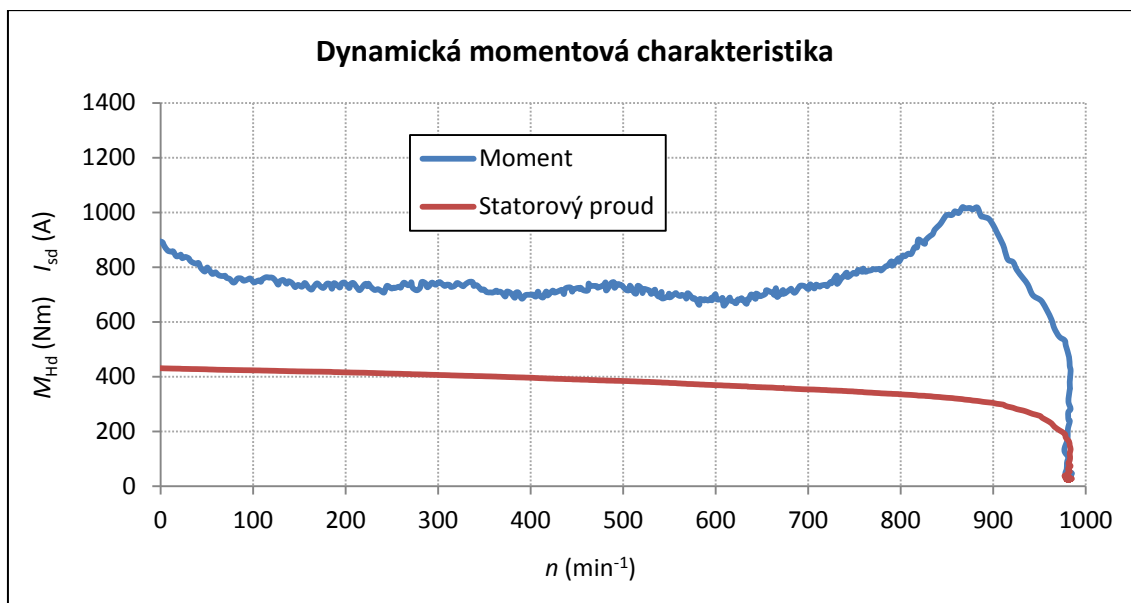
statorový proud a žlutý průběh napětí na kotvě tachodynamu. Z osciloskopu byly následně hodnoty uloženy ve formě CSV na USB disk.



Obrázek 19 – Oscilogram měření z protiběhu velkého motoru

Pro zpracování naměřených hodnot byl opět využit program Wolfram Mathematica. Funkce programu je založena na vztahu (24). Prvotní zpracování všech veličin probíhá obdobně jako při měření dobehové charakteristiky. Následně je nutné vytvořit časovou závislost otáček, aby bylo možné provést jejich numerickou derivaci. Výsledný průběh je třeba dodatečně vyhladit a vynásobit momentem setrvačnosti. K tomu je použit klouzavý průměr. Nakonec je ještě nutné na základě vztahů (22) a (23) přepočítat moment a statorový proud na jmenovité hodnoty.

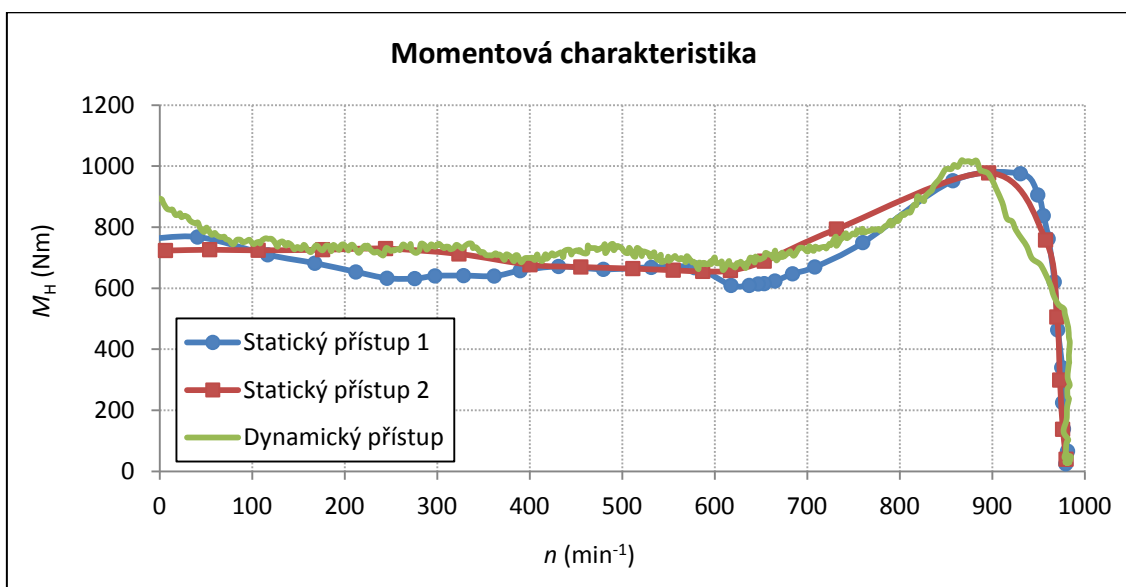
Výsledky měření rozběhu z protiběhu je možné vidět na obrázku 20. Rozborem této momentové charakteristiky lze získat záběrný proud $I_{Za} = 430$ A, záběrný moment $M_{Za} = 892$ Nm, moment zvratu $M_{ZV} = 1020$ Nm při otáčkách zvratu $n_{ZV} = 880$ min⁻¹ a proud naprázdno $I_{10} = 25$ A.



Obrázek 20 – Dynamická momentová charakteristika velkého motoru

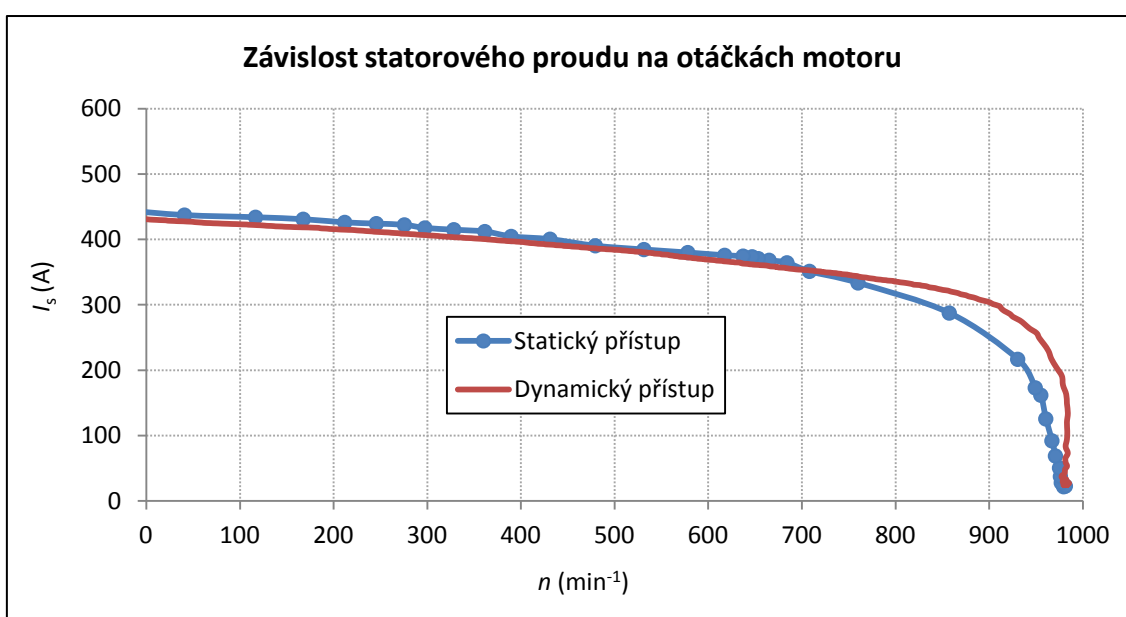
5.1.5. Porovnání statického a dynamického přístupu u velkého motoru

Na základě vytvořených grafů momentových charakteristik a jejich rozborů je možné provést porovnání obou přístupů. Na obrázcích 21 a 22 jsou vykresleny jejich výsledky, v tabulce 1 je pak vytvořeno porovnání výsledků jejich rozborů.



Obrázek 21 – Porovnání získaných momentových charakteristika velkého motoru

Průběhy vytvořené oběma přístupy jsou si značně podobné. V nestabilní části momentové charakteristiky je vidět značný vliv parazitních momentů. Jelikož tyto momenty jsou závislé na mnoha faktorech, je průběh naměřené momentové charakteristiky pokaždé jiný. Naopak stabilní část momentové charakteristiky vyšla shodná. V okolí momentu zvratu je pak znatelný rozdíl obou metod způsobený zpracováním dat z rozběhu z protiběhu. Jelikož momentová charakteristika velkého asynchronního motoru má úzkou oblast v okolí momentu zvratu, došlo v důsledku průměrování k deformaci této oblasti. Touto deformací byl postížen také průběh statorového proudu.



Obrázek 22 – Porovnání získaných průběhů statorového proudu velkého motoru

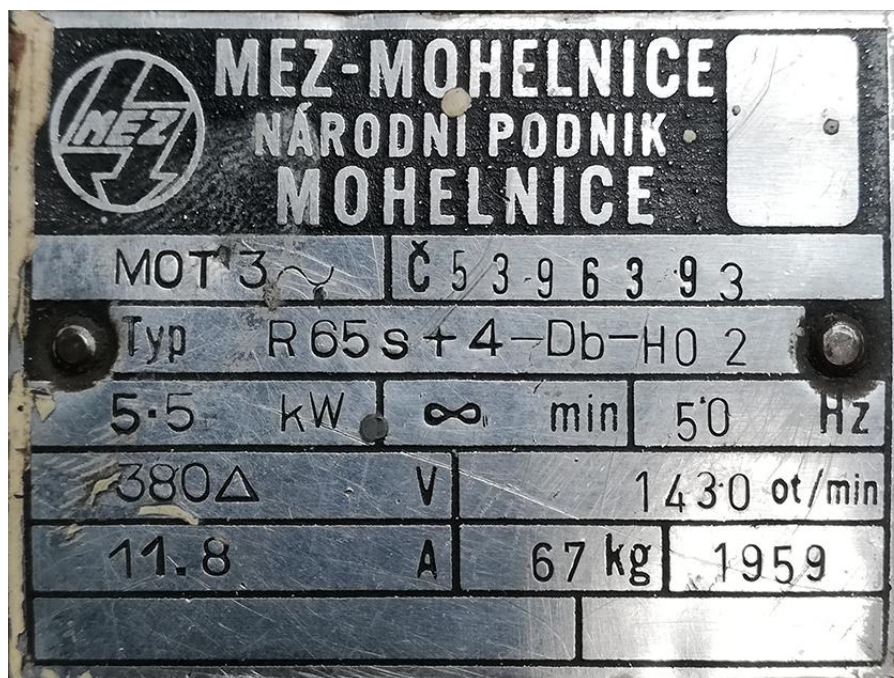
Naměřeným průběhům odpovídají i hodnoty v tabulce 1. Nejvíce rozdílný je záběrný moment, který při dynamickém přístupu vychází vyšší. V oblasti nízkých otáček se totiž nejvíce projevují parazitní momenty, které je statickým přístupem obtížné zachytit. Liší se také proud naprázdno. Tento rozdíl je pravděpodobně způsoben dynamometrem. Jak již bylo možné si všimnout při měření naprázdno, i pouze nabuzený dynamometr vytváří dodatečnou zátěž motoru, která může následně ovlivnit výsledky měření.

Veličina	Statická	Dynamická	Rozdíl (%)
Záběrný proud	440 A	430 A	2.3
Záběrný moment	765 Nm	893 Nm	-16.7
Moment zvratu	975 Nm	1020 Nm	-4.6
Otáčky zvratu	900 min ⁻¹	880 min ⁻¹	2.2
Proud naprázdno	28 A	25 A	10.7

Tabulka 1 – Porovnání výsledků momentových charakteristik velkého motoru

5.2. Motor se jmenovitým výkonem 5.5 kW

Jedná se o motor společnosti MEZ, sloužící jako učební pomůcka v laboratoři strojů. Štítek tohoto motoru je možné vidět na obrázku 23. Tento motor byl vyroben v roce 1959 a patří do řad motorů, které připouští pouze jeden způsob zapojení statorového vinutí.

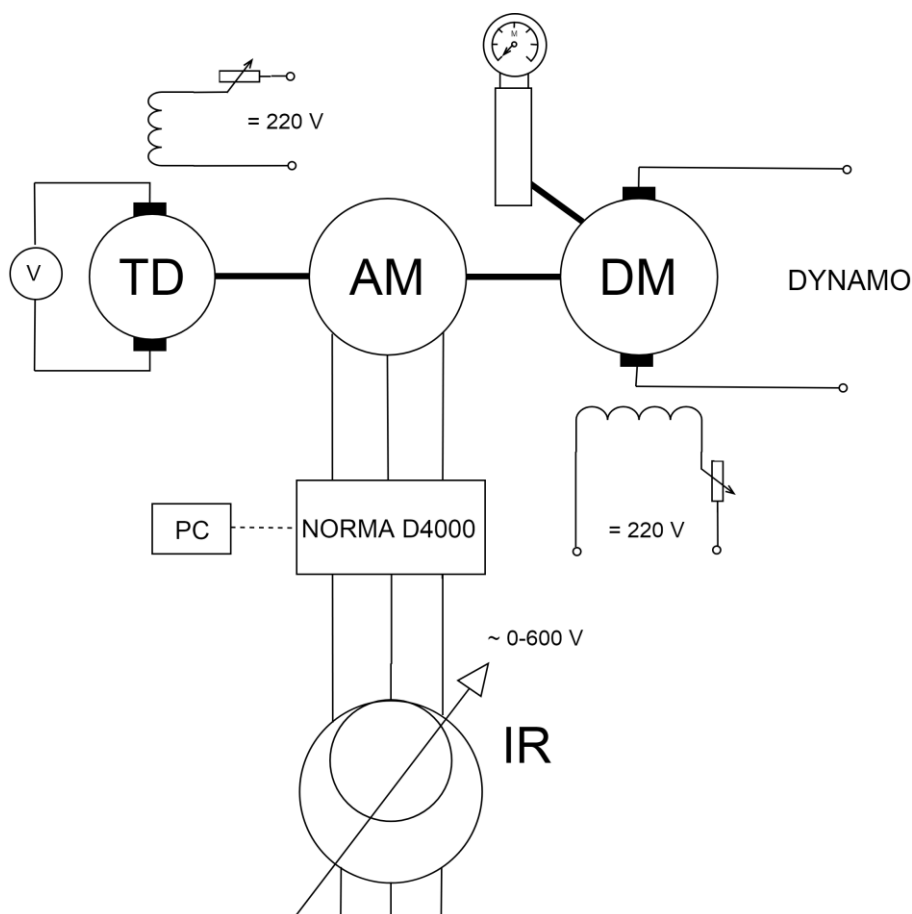


Obrázek 23 – Štítkové hodnoty středního motoru

5.2.1. Měření naprázdno

Prvním provedeným měřením bylo měření naprázdno. Asynchronní motor byl umístěn na společnou hřídel s dynamometrem a tachodynamem. Oba stroje však při tomto měření zůstaly nenabuzeny, aby neovlivňovaly naměřené hodnoty. Motor byl opět napájen z indukčního regulátoru.

Mezi asynchronní motor a indukční regulátor byl umístěn power analyzer NORMA D4000. Tento power analyzer zajišťoval měření proudů všech tří fází a příslušných sdružených napětí. Z těchto údajů poté určoval příkon, frekvenci napájecího napětí a účinník. Naměřené hodnoty byly následně posílány pomocí USB do počítače, ve kterém probíhalo jejich zpracování stejným způsobem jako při měření naprázdno velkého motoru. Orientační schéma zapojení je možné vidět na obrázku 24.

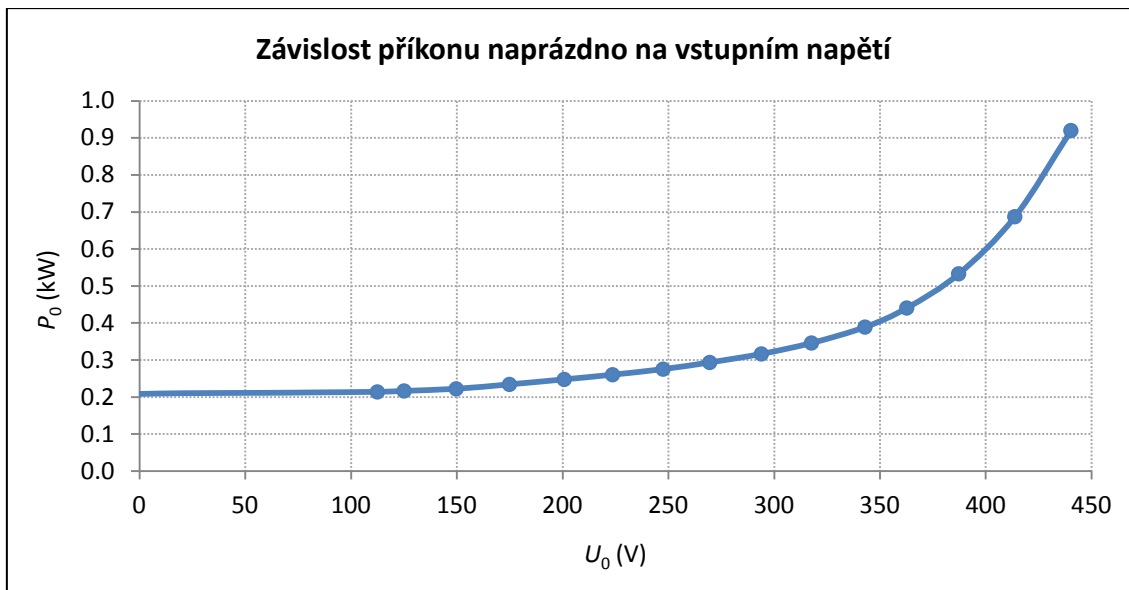


Obrázek 24 – Schéma zapojení pro měření statických charakteristik SM

Měření probíhalo přibližně od 130% jmenovitého napětí po nejnižší možnou hodnotu. Z naměřených výsledků byla vytvořena závislost příkonu naprázdno na vstupním napětí a byla provedena její extrapolace do nulové hodnoty napětí. Výsledný průběh zobrazuje obrázek 25. Z tohoto průběhu lze určit mechanické ztráty $P_{\text{mech}} = 208 \text{ W}$. Moment mechanických ztrát tak vychází $M_{\text{mech}} = 1.99 \text{ Nm}$. Jejich závislost na otáčkách poté je:

$$P_{\text{mech}} = 0.1387 \cdot n \quad (\text{W}), \quad (30)$$

$$M_{\text{mech}} = 0.001327 \cdot n \quad (\text{Nm}). \quad (31)$$



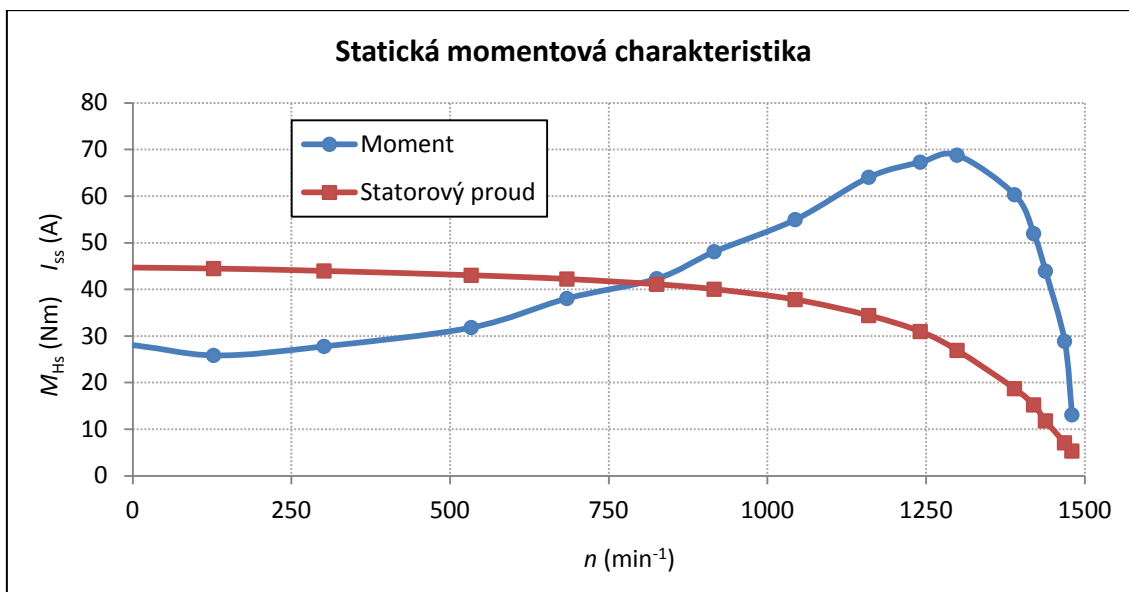
Obrázek 25 – Graf závislosti příkonu naprázdno středního motoru

5.2.2. Měření statické momentové charakteristiky

Po měření naprázdno následovalo měření statické momentové charakteristiky. Schéma zapojení bylo shodné s měřením naprázdno a je zobrazeno na obrázku 24. Tachodynamo i dynamo bylo v tomto případě nabuzeno stejnosměrným napětím. Zatěžování probíhalo pomocí napětí přivedeného na kotvu dynamometru. Toto napětí bylo opět vytvářeno pomocí Leonardova soustrojí.

Při tomto měření byla zvolena tradiční metoda měření otáček a momentu. Pomocí voltmetru bylo měřeno napětí na kotvě tachodynamu a moment byl odečítán ručně z měřících vah dynamometru. V každém měřeném bodě byl navíc proveden odměr pomocí NORMY D4000. Naměřené průběhy momentu a statorového proudu byly následně přepočítány na jmenovité hodnoty. Výsledek zobrazuje obrázek 26.

Rozborem této momentové charakteristiky podle kapitoly 3.3 lze získat záběrný proud $I_{Za} = 44.6$ A, záběrný moment $M_{Za} = 27$ Nm, moment zvratu $M_{ZV} = 68.4$ Nm při otáčkách zvratu $n_{ZV} = 1255$ min⁻¹ a proud naprázdno $I_{10} = 5.3$ A.



Obrázek 26 – Statická momentová charakteristika středního motoru

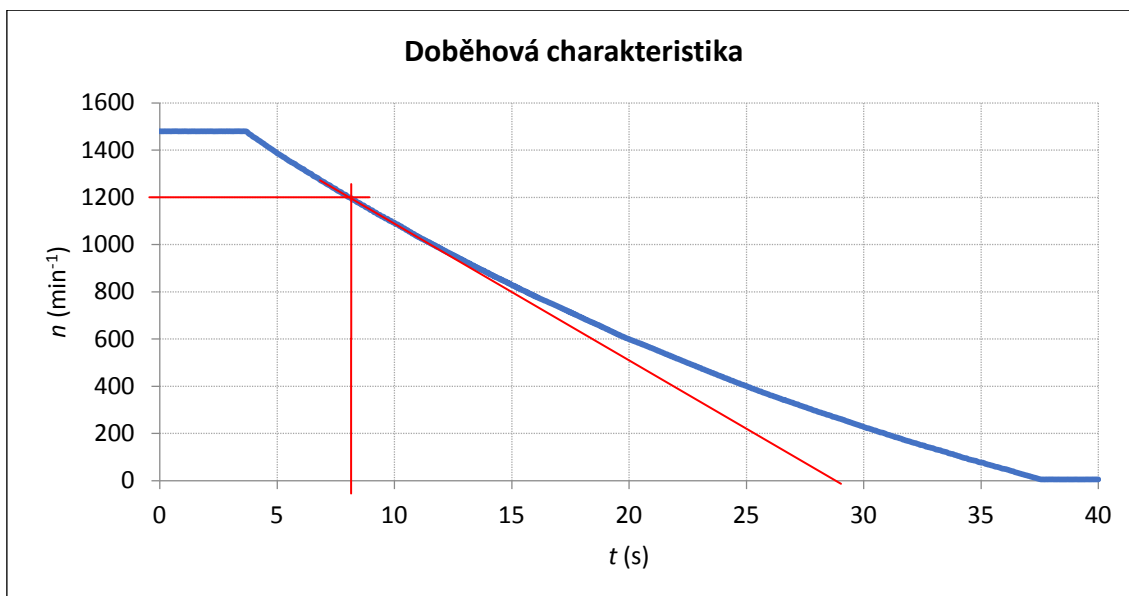
5.2.3. Měření doběhové charakteristiky

Třetím provedeným měřením bylo měření doběhové charakteristiky. Při tomto měření bylo odpojeno zatěžovací dynamo a NORMA D4000. Dynamometr nebyl nabuzen.

Stejně jako při měření doběhové charakteristiky velkého motoru bylo využito osciloskopu k měření statorového proudu, sdruženého napájecího napětí a napětí na kotvě tachodynamu. Opět bylo nutné použít měřicí transformátor proudu a napětí pro snížení měřených veličin a následně převést tyto veličiny pomocí převodníků efektivní hodnoty na stejnosměrné. Schéma zapojení zobrazuje obrázek 28.

Motor byl jmenovitým napětím roztočen na jmenovité otáčky, od tohoto napětí byl následně odpojen a byl sejmut průběh napětí na kotvě tachodynamu. Tento průběh byl uložen na USB disk ve formě CSV souboru a byl následně v počítači zpracován stejným skriptem jako v případě velkého motoru. Následovalo provedení jeho rozboru. Výsledek je zobrazen na obrázku 27.

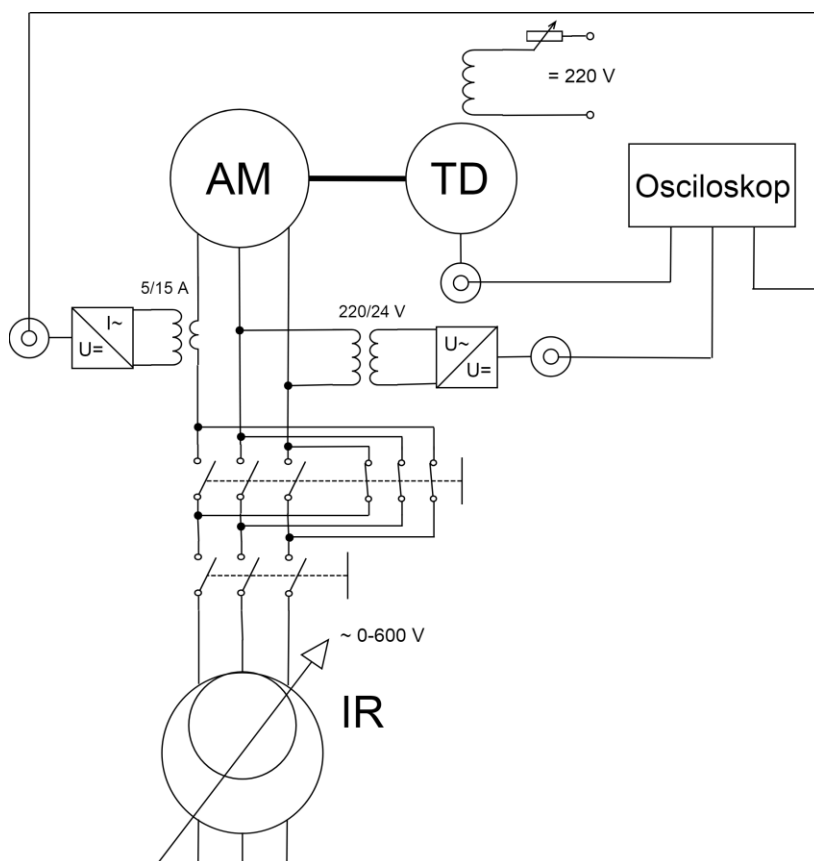
Rozborem získané hodnoty jsou $t_1 = 7.6$ s, $t_2 = 28.5$ s a $n_0 = 1200$ min⁻¹. Využitím vztahu (25) lze následně určit $\Omega_0 = 125.66$ s⁻¹ a využitím vztahu (30) lze určit, že ztráty při těchto otáčkách jsou $P_z = 166.4$ W. Z těchto hodnot je již možné pomocí vztahu (10) určit moment setrvačnosti $J = 0.22$ kg · m⁻³.



Obrázek 27 – Doběhová charakteristika středního motoru

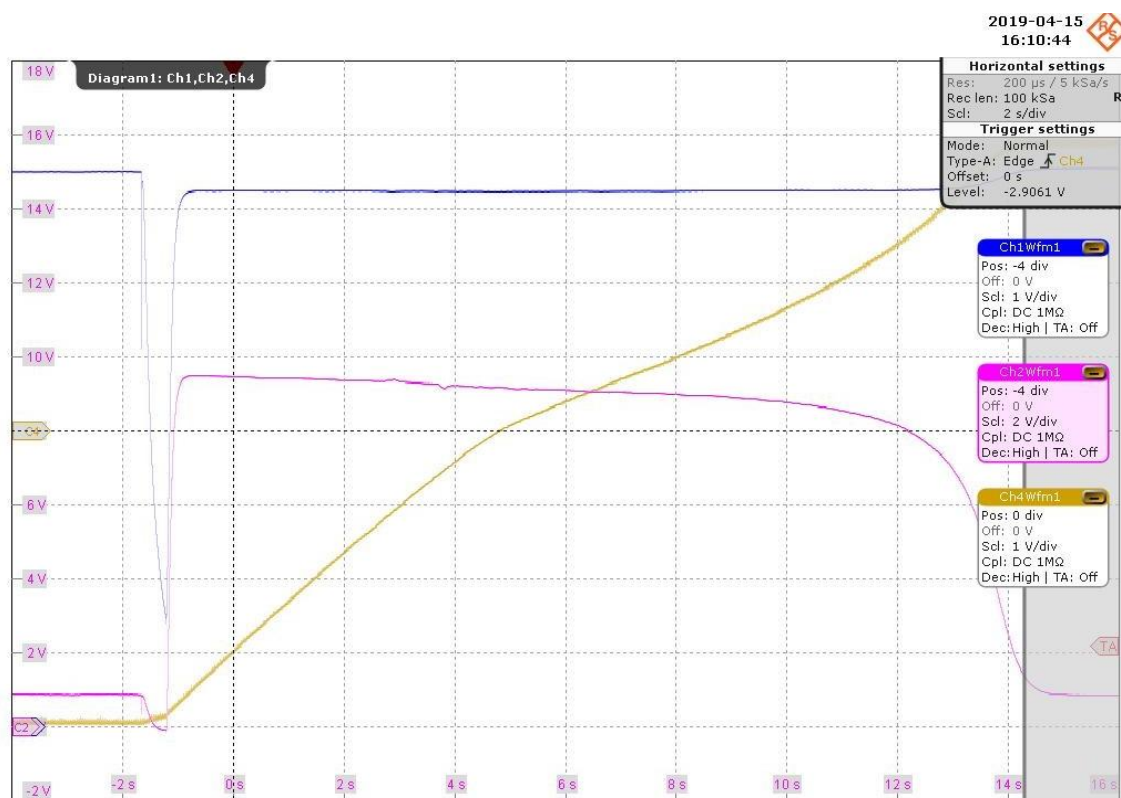
5.2.4. Měření rozběhu z protiběhu

Posledním provedeným měřením bylo měření z protiběhu. Schéma zapojení bylo shodné s měřením doběhové charakteristiky a je zobrazeno na obrázku 28.



Obrázek 28 – Schéma zapojení pro měření dynamických charakteristik SM

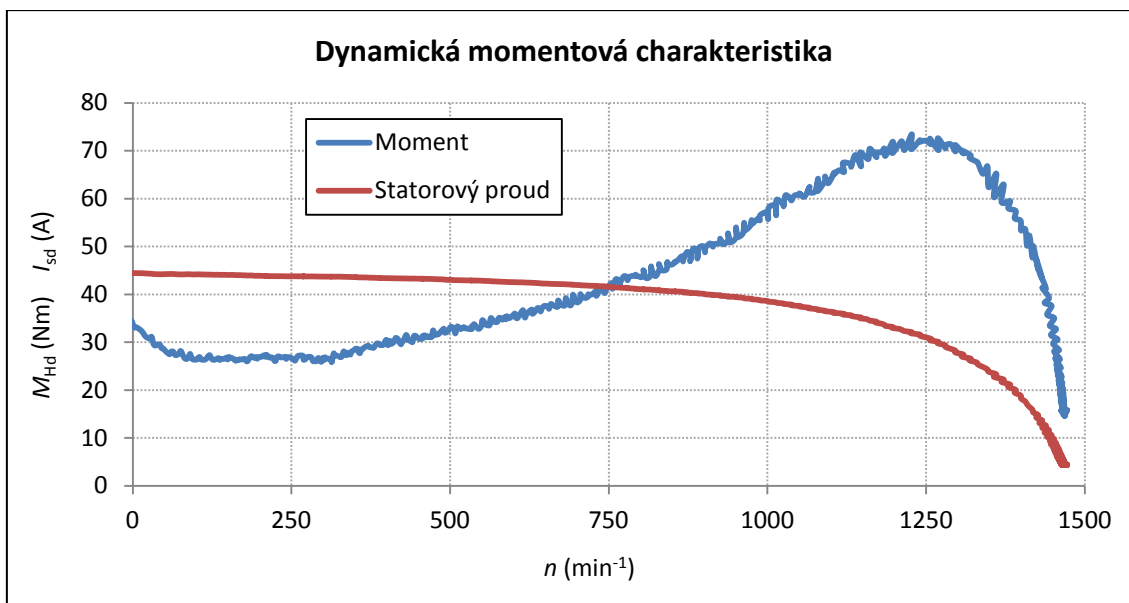
Motor byl sníženým napětím rozběhnut na jmenovité otáčky, následně byl odpojen od napájení a byly mu prohozeny fáze. Následným připojením k napětí došlo k rozběhu motoru na jmenovité otáčky v opačném smyslu točení. Celý tento přechodný děj byl zachycen na osciloskop. Příslušný oscilogram lze vidět na obrázku 29, kde modrý průběh znázorňuje napájecí napětí, růžový průběh statorový proud a žlutý průběh napětí na kotvě tachodynamu.



Obrázek 29 – Oscilogram měření z protiběhu středního motoru

Data byla z osciloskopu uložena na USB disk ve formě CSV souboru a byla následně zpracována stejným skriptem jako data z měření z protiběhu velkého motoru. Nakonec byl proveden jejich přepočítání na jmenovité hodnoty napětí.

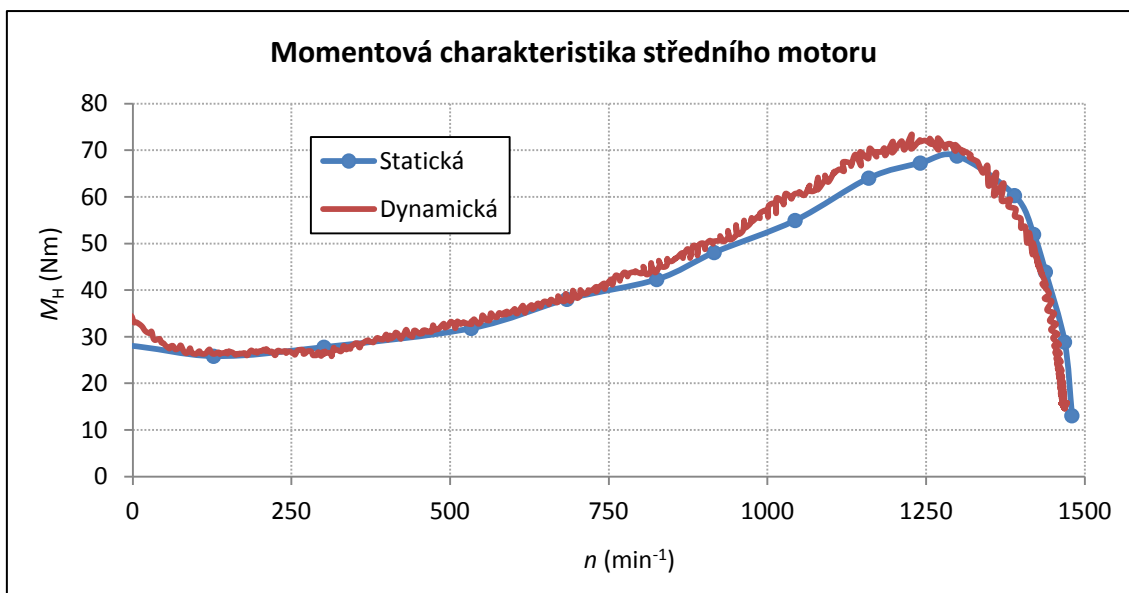
Výsledky měření rozběhu z protiběhu je možné vidět na obrázku 30. Rozborem této momentové charakteristiky lze získat záběrný proud $I_{Za} = 44.4$ A, záběrný moment $M_{Za} = 33.5$ Nm, moment zvratu $M_{ZV} = 72.2$ Nm při otáčkách zvratu $n_{ZV} = 1269$ min⁻¹ a proud naprázdno $I_{10} = 4.7$ A.



Obrázek 30 – Dynamická momentová charakteristika středního motoru

5.2.5. Porovnání statického a dynamického přístupu u středního motoru

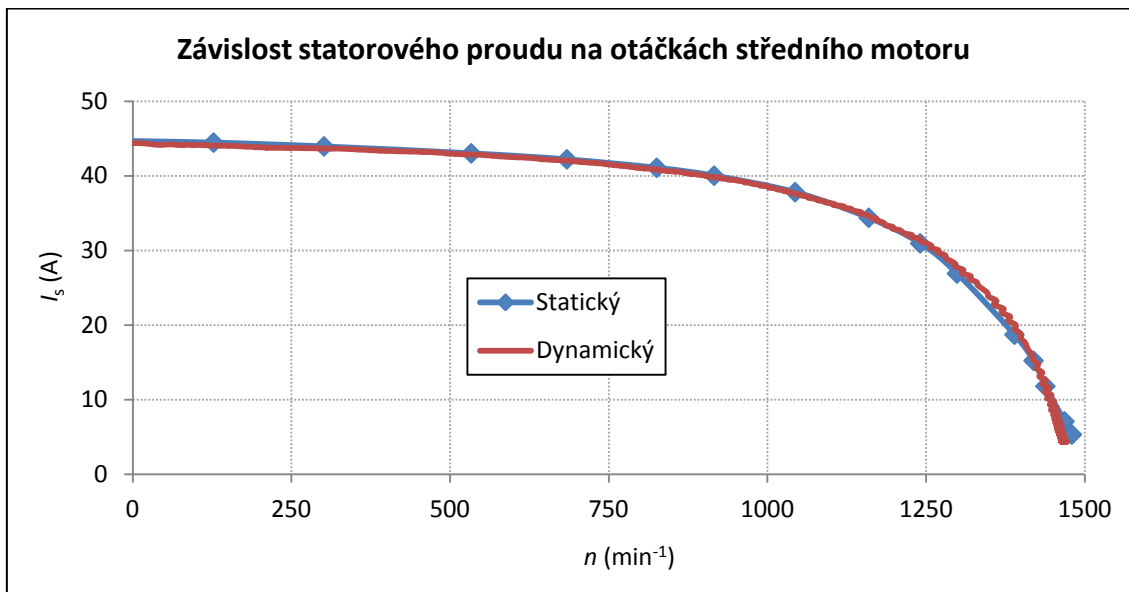
Na základě vytvořených grafů momentových charakteristik a jejich rozborů je možné provést porovnání obou přístupů. Na obrázcích 31 a 32 jsou vykresleny jejich výsledky, v tabulce 2 je pak vytvořeno porovnání výsledků jejich rozborů.



Obrázek 31 – Porovnání získaných momentových charakteristika středního motoru

Výsledky obou přístupů jsou téměř totožné. V oblasti stabilní části momentové charakteristiky není prakticky žádný rozdíl. V oblasti nestabilní části momentové charakteristiky je vidět odchylka v oblasti 1000 až 1250 otáček. Tato odchylka je

s největší pravděpodobností způsobena nepřesností odečtu hodnot při statickém měření. Tomu napovídá i fakt, že satorový proud vyšel shodný v celém rozsahu otáček.



Obrázek 32 – Porovnání získaných průběhů satorového proudu středního motoru

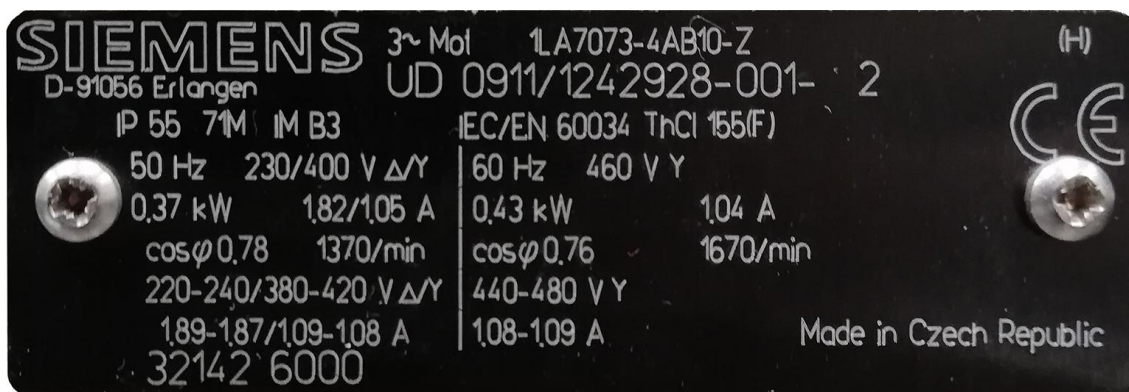
Tomuto rozboru odpovídají i hodnoty uvedené v tabulce 2. Odchytky jednotlivých veličin jsou minimální. Jediným rozdílem je záběrný moment, který stejně jako při měření velkého motoru vyšel větší. Důvodem je opět problematicky měřitelná oblast nízkých otáček motoru.

Veličina	Statická	Dynamická	Rozdíl (%)
Záběrný proud	44.6 A	44.4 A	0.4
Záběrný moment	27 Nm	33.5 Nm	-24.1
Moment zvratu	68.8 Nm	72.2 Nm	-4.9
Otáčky zvratu	1300 min^{-1}	1269 min^{-1}	2.4
Proud naprázdno	5.3 A	4.7 A	4.3

Tabulka 2 – Porovnání výsledků momentových charakteristik středního motoru

5.3. Motor se jmenovitým výkonem 370 W

Jedná se o motor společnosti SIEMENS, sloužící jako pohonná jednotka čerpadel. Štítek tohoto motoru je možné vidět na obrázku 33. V průběhu všech měření bylo satorové vinutí motoru zapojeno do hvězdy.



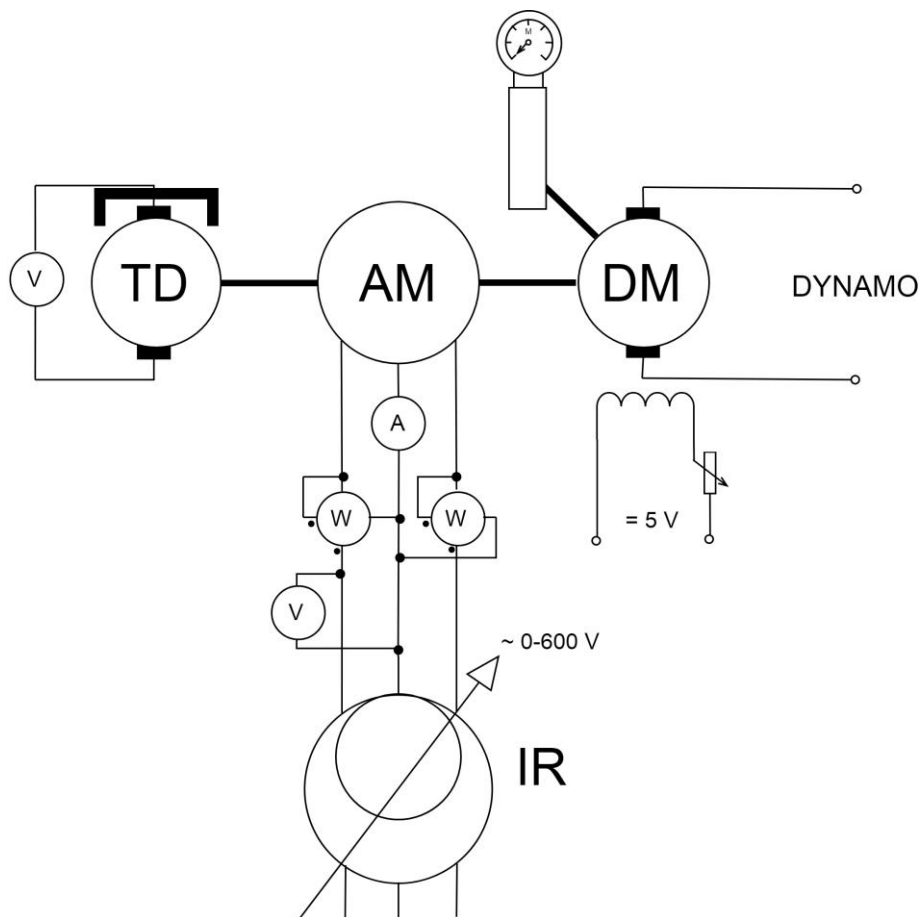
Obrázek 33 – Štítkové hodnoty malého motoru

5.3.1. Měření naprázdno

Prvním provedeným měřením bylo měření naprázdno. Asynchronní motor byl umístěn na společnou hřídel s dynamometrem a permanentními magnety buzeným tachodynamem. Satorové vinutí měřeného motoru bylo opět napájeno z indukčního regulátoru.

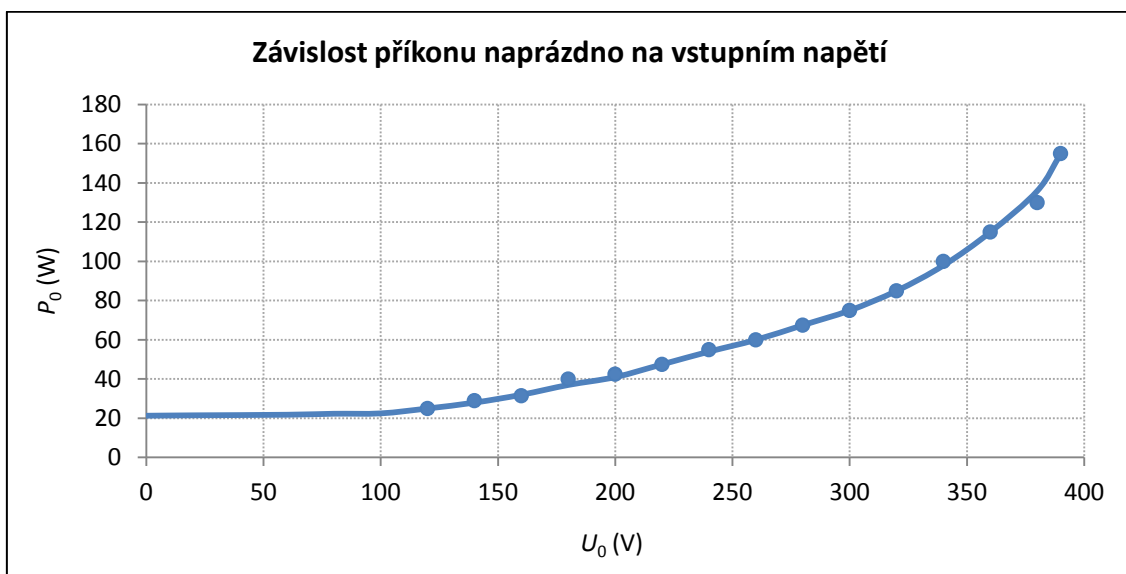
V případě tohoto měření byl využit tradiční způsob odečtu hodnot. Pro měření satorového proudu byl použit elektromagnetický ampérmetr, pro měření sdruženého napájecího napětí byl použit elektromagnetický voltmetr a pro měření výkonu byly použity dva elektrodynamické wattmetry v Aronově zapojení. Dynamometr nebyl v případě tohoto měření nabuzen a na jeho kotvu nebylo přivedeno napětí. Orientační schéma zapojení lze vidět na obrázku 34.

Aronovo zapojení měření trojfázového výkonu pomocí dvou elektrodynamických wattmetrů vychází z Blondelova teorému. Proudové cívky těchto wattmetrů jsou připojeny každá k jiné fázi, k této fázi jsou také připojeny začátky jejich napěťových vinutí. Konce napěťových vinutí obou wattmetrů jsou poté připojeny na fázi třetí. Celkový výkon daného trojfázového systému lze získat součtem hodnot obou wattmetrů.



Obrázek 34 – Schéma zapojení pro měření statických charakteristik MM

Měření probíhalo přibližně od 110% jmenovitého napětí po nejnižší možnou hodnotu. Z naměřených výsledků byla opět vytvořena závislost příkonu naprázdno na vstupním napětí a byla provedena její extrapolace do nulové hodnoty napětí. Výsledný průběh zobrazuje obrázek 35.



Obrázek 35 – Graf závislosti příkonu naprázdno malého motoru

Rozborem obrázku 35 lze určit mechanické ztráty $P_{\text{mech}} = 21.3 \text{ W}$. Moment mechanických ztrát při synchronních otáčkách tak vychází $M_{\text{mech}} = 0.136 \text{ Nm}$. Závislost těchto veličin na otáčkách poté je:

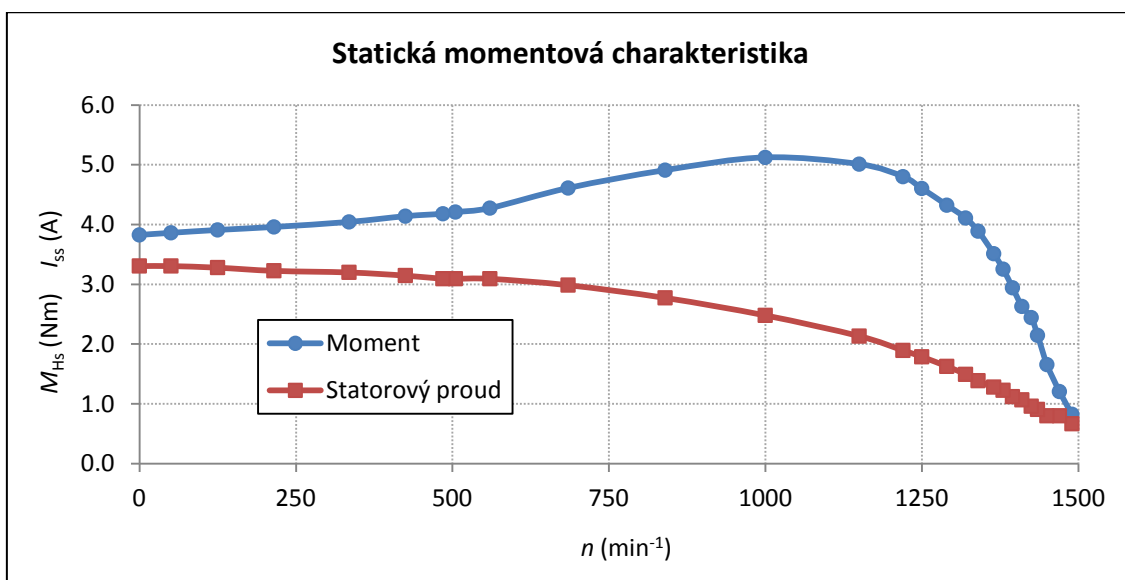
$$P_{\text{mech}} = 0.0142 \cdot n \quad (\text{W}), \quad (32)$$

$$M_{\text{mech}} = 0.0000906 \cdot n \quad (\text{Nm}). \quad (33)$$

5.3.2. Měření statické momentové charakteristiky

Po měření naprázdno následovalo měření statické momentové charakteristiky. Schéma zapojení bylo stejné jako v případě měření naprázdno. V tomto případě však byl dynamometr nabuzen pomocí síťového adaptéru a na jeho svorky bylo přivedeno zatěžovací napětí. Toto napětí bylo stejně jako v předchozích případech generováno pomocí Leonardova soustrojí.

Otáčky motoru byly měřeny pomocí voltmetru připojeného na kotvu tachodynamu a moment motoru byl odečítán z vah dynamometru. Společně s nimi byla odečítána hodnota statorového proudu z elektromagnetického ampérmetru a hodnota sdruženého napájecího napětí z elektromagnetického voltmetru. Naměřené hodnoty byly zpracovány a přepočteny na jmenovité hodnoty napětí. Výsledné průběhy lze vidět na obrázku 36.



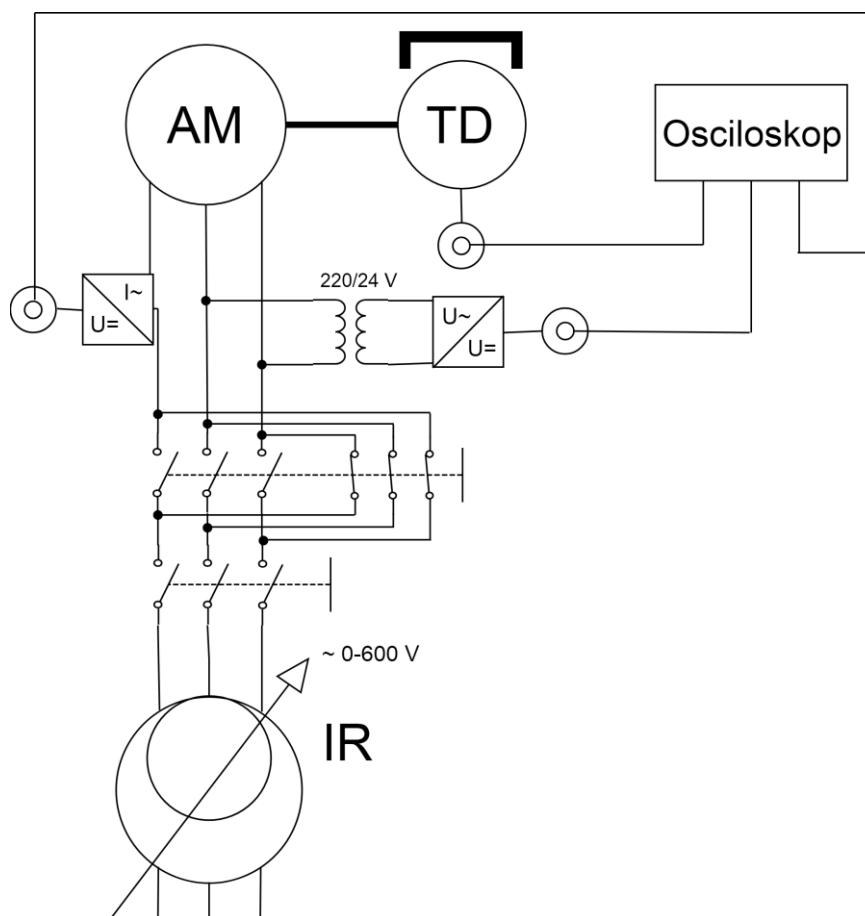
Obrázek 36 – Statická momentová charakteristika malého motoru

Rozborem těchto průběhů lze získat záběrný proud $I_{Za} = 3.3 \text{ A}$, záběrný moment $M_{Za} = 3.83 \text{ Nm}$, moment zvratu $M_{ZV} = 5.12 \text{ Nm}$ při otáčkách zvratu $n_{ZV} = 1000 \text{ min}^{-1}$ a proud naprázdno $I_{10} = 0.7 \text{ A}$.

5.3.3. Měření doběhové charakteristiky

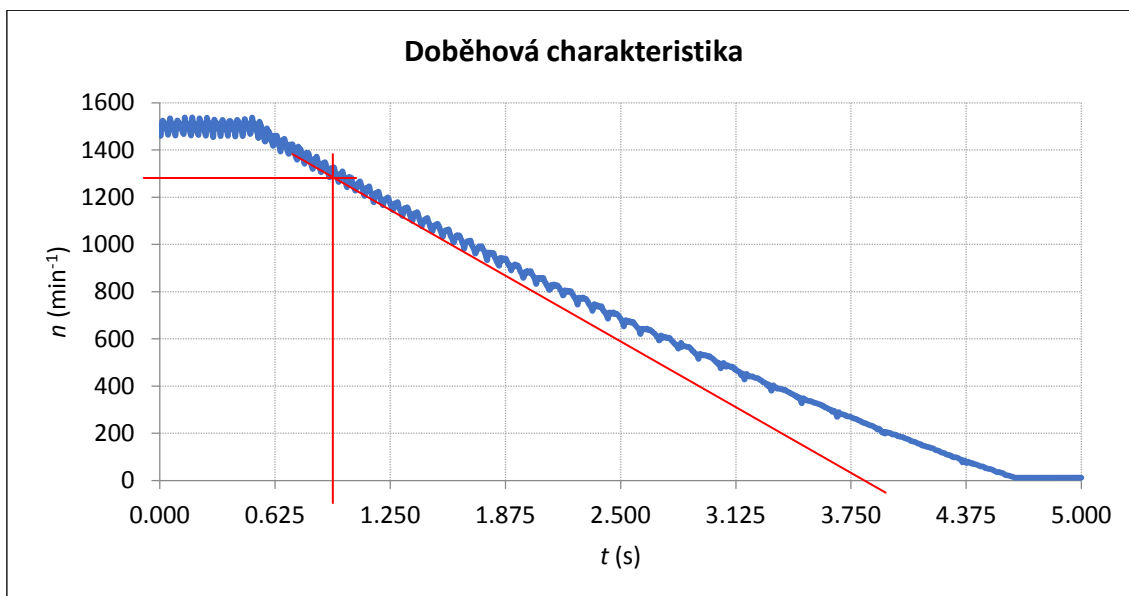
Třetím provedeným měřením bylo měření doběhové charakteristiky. Při tomto měření bylo odpojeno zatěžovací dynamo a dynamometr nebyl nabuzen.

Měření doběhové charakteristiky malého motoru probíhalo stejně jako v případě ostatních motorů. Pomocí osciloskopu byl měřen satorový proud, sdružené napájecí napětí a napětí na kotvě tachodynamu. Napájecí napětí bylo pomocí měřicího transformátoru napětí převáděno na nižší hodnotu, měřicí transformátor proudu nemusel být použit. Obě tyto veličiny byly následně převedeny pomocí převodníků efektivní hodnoty na stejnosměrné. Schéma zapojení zobrazuje obrázek 37.



Obrázek 37 – Schéma zapojení pro měření dynamických charakteristik MM

Motor byl jmenovitým napětím roztočen na jmenovité otáčky, od tohoto napětí byl následně odpojen a byl sejmuto průběh napětí na kotvě tachodynamu. Tento průběh byl uložen na USB disk ve formě CSV souboru a byl následně v počítači zpracován stejným skriptem jako v případě obou předchozích motorů. Následovalo provedení jeho rozboru. Výsledek je zobrazen na obrázku 38.



Obrázek 38 – Doběhová charakteristika malého motoru

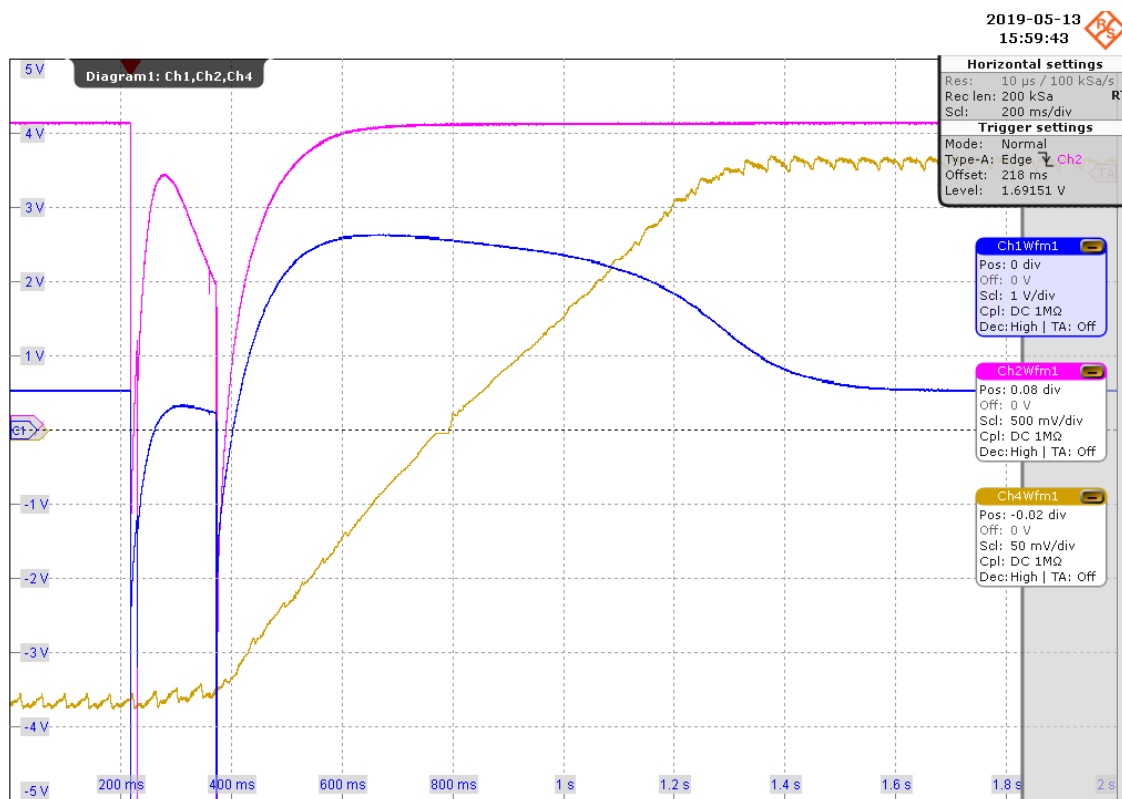
Výsledný průběh je již na první pohled značně zvlněný. Toto zvlnění je způsobeno komutacemi v měřícím tachodynamu. Rozborem se však i tak dají získat hodnoty $t_1 = 0.94$ s, $t_2 = 3.9$ s a $n_0 = 1300$ min⁻¹. Využitím vztahu (25) lze následně určit $\Omega_0 = 136.1$ s⁻¹ a využitím vztahu (32) lze určit, že ztráty při těchto otáčkách jsou $P_z = 18.46$ W. Z těchto hodnot je již možné pomocí vztahu (10) určit moment setrvačnosti $J = 0.00295$ kg · m⁻³.

5.3.4. Měření rozběhu z protiběhu

Posledním provedeným měřením bylo měření z protiběhu. Schéma zapojení bylo shodné s měřením doběhové charakteristiky a je zobrazeno na obrázku 37.

Postup měření byl stejný jako u ostatních motorů. Motor byl sníženým napětím rozběhnut na jmenovité otáčky, následně byl odpojen od napájení a byly mu prohozeny fáze. Následným připojením k napětí došlo k rozběhu motoru na jmenovité otáčky v opačném smyslu točení. Celý tento přechodný děj byl zachycen na osciloskop.

Příslušný oscilogram lze vidět na obrázku 39, kde růžový průběh znázorňuje napájecí napětí, modrý průběh statorový proud a žlutý průběh napětí na kotvě tachodynamu.

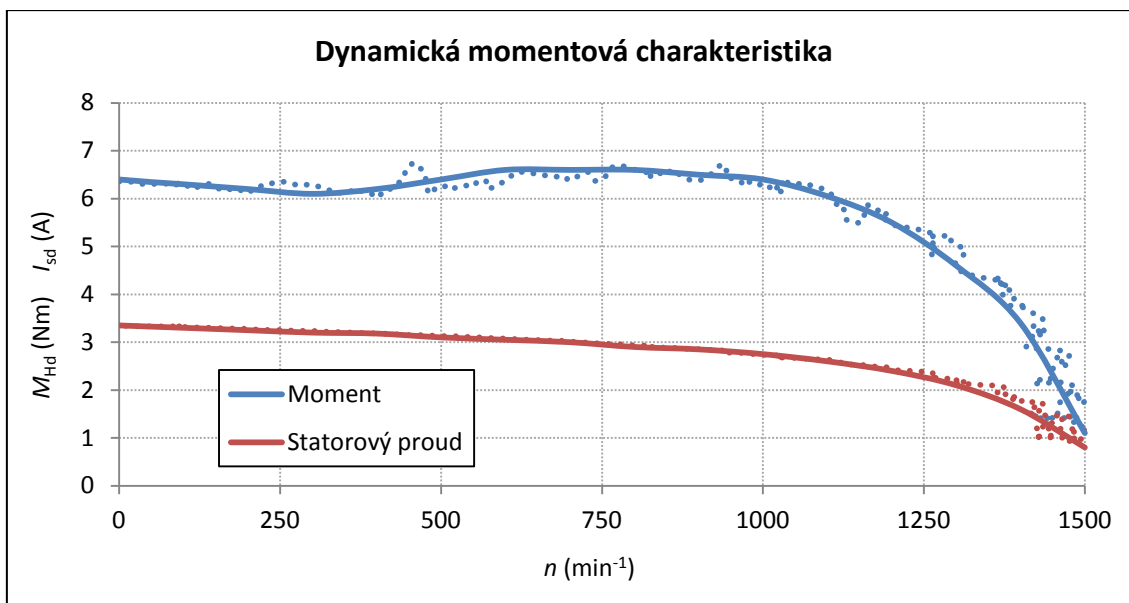


Obrázek 39 – Oscilogram měření z protiběhu malého motoru

Data byla z osciloskopu uložena na USB disk ve formě CSV souboru a byla následně zpracována stejným skriptem jako data z měření z protiběhu ostatních motorů. Nakonec byl proveden jejich přepočítání na jmenovité hodnoty napětí.

Ze sejmutého oscilogramu je zřejmé, že rozběh proběhl velice rychle, i když měření probíhalo při rozběhu z protiběhu za sníženého napětí. Průběh napětí na kotvě tachodynamu je navíc značně ovlivněn komutacemi tohoto stroje. Derivace tohoto průběhu tak vyšla značně deformovaná i při velmi rozsáhlém průměrování. Z tohoto důvodu byly výsledné hodnoty statorového proudu a momentu při jmenovitém napětí vhodně proloženy. Výsledky měření rozběhu z protiběhu je možné vidět na obrázku 40.

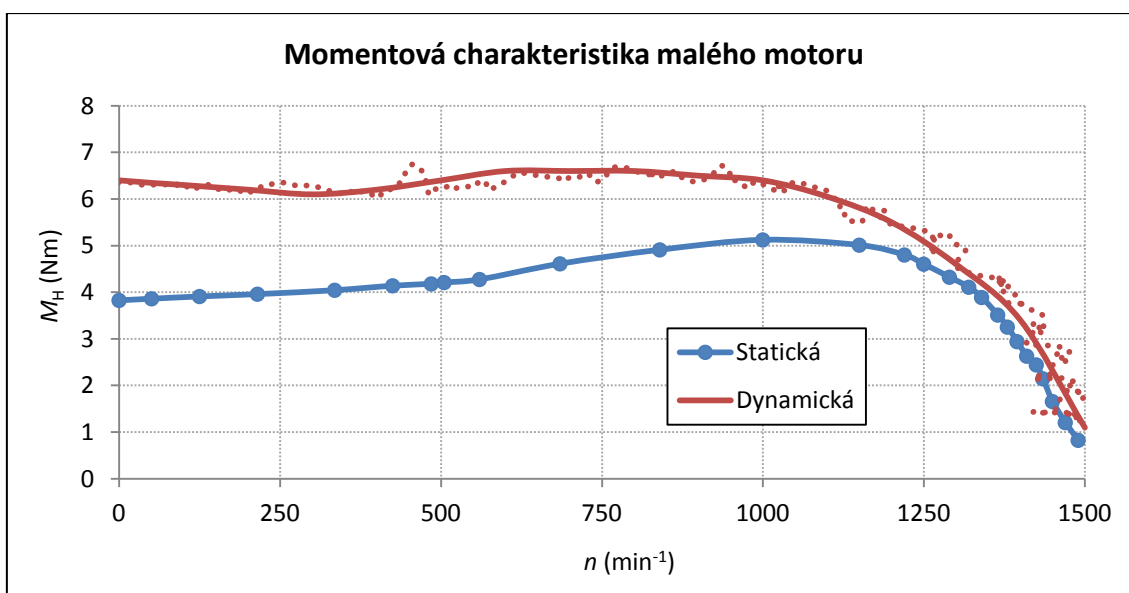
Rozbor této momentové charakteristiky je z výše uvedených důvodů velmi komplikovaný, i přesto však z ní lze získat záběrný proud $I_{Za} = 3.35 \text{ A}$, záběrný moment $M_{Za} = 6.4 \text{ Nm}$, moment zvratu $M_{ZV} = 72.2 \text{ Nm}$ při otáčkách zvratu $n_{ZV} = 1269 \text{ min}^{-1}$ a proud naprázdno $I_{10} = 0.8 \text{ A}$.



Obrázek 40 – Dynamická momentová charakteristika malého motoru

5.3.5. Porovnání statického a dynamického přístupu u malého motoru

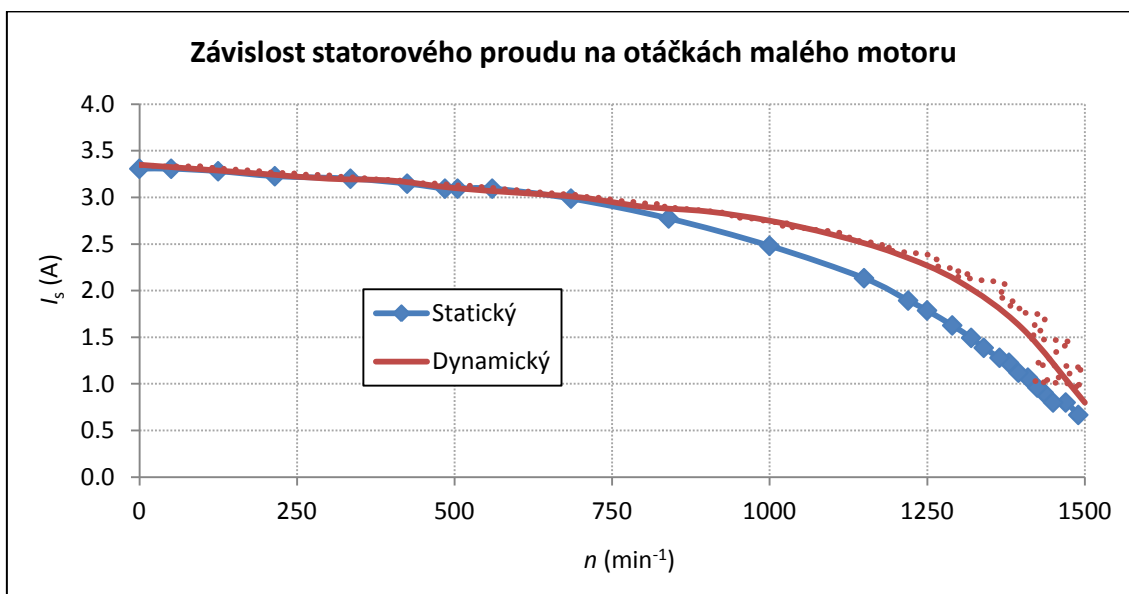
Na základě vytvořených grafů momentových charakteristik a jejich rozborů je možné provést porovnání obou přístupů. Na obrázcích 41 a 42 jsou vykresleny jejich výsledky, v tabulce 3 je pak vytvořeno porovnání výsledků jejich rozborů.



Obrázek 41 – Porovnání získaných momentových charakteristika malého motoru

Z naměřených hodnot doběhové charakteristiky a rozběhu z protiběhu bylo jasné, že dynamická charakteristika bude v tomto případě značně zkreslená. Stabilní oblast dynamické momentové charakteristiky přibližně odpovídá naměřeným

výsledkům statického přístupu, zbytek charakteristiky je však zcela jiný. Parazitní momenty se zde projevují velice silně, díky čemuž je moment zvratu prakticky potlačen a charakteristika je v nestabilní oblasti téměř plochá. O něco lépe vychází závislost statorového proudu na otáčkách, kde je zřetelná značná deformace křivky vzniklé dynamickým přístupem v oblasti jmenovitých hodnot, nicméně v oblasti nízkých otáček jsou obě křivky shodné.



Obrázek 42 – Porovnání získaných průběhů statorového proudu malého motoru

Tomuto rozboru odpovídají i hodnoty v tabulce 3. Takto obrovský rozdíl mezi statickým a dynamickým přístupem je způsoben velmi krátkou dobou rozběhu a s ní spojenou nepřesností měření otáček pomocí tachodynamu. Z tohoto důvodu muselo být použito vyhlazení hodnot přes velké množství vzorků, což vedlo k dalším deformacím naměřených průběhů.

Veličina	Statická	Dynamická	Rozdíl (%)
Záběrný proud	3.3 A	3.35 A	-1.5
Záběrný moment	3.83 Nm	6.4 Nm	-89.3
Moment zvratu	5.12 Nm	6.6 Nm	-28.9
Otáčky zvratu	1000 min^{-1}	800 min^{-1}	20.0
Proud naprázdno	0.7 A	0.8 A	-14.3

Tabulka 3 – Porovnání výsledků momentových charakteristik malého motoru

5.4. Zhodnocení validity jednotlivých měřicích metod

Na základě výše uvedených měření a jejich výsledků je možno provést zhodnocení validity jednotlivých použitých metod. Jako první kritérium tohoto hodnocení bylo zvoleno porovnání naměřených průběhů se štítkovými hodnotami, jako druhé kritérium pak vliv automatizace na přesnost naměřených hodnot. Třetím kritériem je vliv výkonu motoru na tyto hodnoty.

5.4.1. Porovnání štítkových hodnot motorů s naměřenými průběhy

Každý štítek asynchronního motoru uvádí jmenovitý proud motoru při jmenovitých otáčkách a jmenovitém výkonu. Využitím vztahu (1) pak z tohoto výkonu a otáček lze určit jmenovitý moment. Na základě rozboru v kapitole 3.3 lze orientačně říci, že moment zvratu odpovídá 1.5 až 2.5 násobku tohoto jmenovitého momentu a záběrný proud odpovídá 4 až 7 násobku jmenovitého proudu. Na základě těchto poznatků lze provést porovnání naměřených hodnot se štítkovými hodnotami.

Jmenovitý proud velkého motoru při zapojení do trojúhelníku je $I_N = 81.7 \text{ A}$, jmenovitý moment je $M_N \approx 438 \text{ Nm}$ a jmenovité otáčky jsou $n_N = 980 \text{ min}^{-1}$. Porovnáním těchto hodnot s tabulkou 1 lze říci, že naměřené průběhy při statickém a dynamickém přístupu odpovídají teoretickým předpokladům. Poměr momentu zvratu ku jmenovitému momentu vychází přibližně 2.2 a poměr záběrného proudu ku proudu jmenovitému 5.3. Při pohledu na obrázek 21 lze navíc říci, že jmenovitý moment v naměřených průbězích odpovídá jmenovitému otáčkám s odchylkou okolo 5%. Totéž lze podle obrázku 22 říci o jmenovitém statorovém proudu.

Jmenovitý proud středního motoru při zapojení do trojúhelníku je $I_N = 11.8 \text{ A}$, jmenovitý moment je $M_N \approx 37 \text{ Nm}$ a jmenovité otáčky jsou $n_N = 1430 \text{ min}^{-1}$. Porovnáním těchto hodnot s tabulkou 2 lze říci, že naměřené průběhy při statickém a dynamickém přístupu odpovídají teoretickým předpokladům. Poměr momentu zvratu ku jmenovitému momentu vychází přibližně 1.9 a poměr záběrného proudu ku proudu jmenovitému se pohybuje okolo 3.8. Z rozboru obrázků 31 a 32 lze poté říci, že jmenovitý moment a jmenovitý statorový proud v naměřených průbězích odpovídá s odchylkou 5% jmenovitému otáčkám.

Jmenovitý proud malého motoru při zapojení do hvězdy je $I_N = 1.05 \text{ A}$, jmenovitý moment je $M_N \approx 2.6 \text{ Nm}$ a jmenovité otáčky jsou $n_N = 1370 \text{ min}^{-1}$.

Porovnáním těchto hodnot s tabulkou 3 lze říci, že naměřené průběhy při statickém přístupu odpovídají teoretickým předpokladům. Poměr momentu zvratu ku jmenovitému momentu vychází přibližně 2 a poměr záběrného proudu ku proudu jmenovitému se pohybuje okolo 3.7. Z rozboru obrázků 41 a 42 lze poté říci, že jmenovitý moment a jmenovitý statorový proud v naměřených průbězích odpovídá s odchylkou 5% jmenovitým otáčkám. Toto však neplatí v případě dynamického přístupu, kde jmenovité hodnoty příslušných veličin těmto jmenovitým otáčkám neodpovídají.

5.4.2. Vliv automatizace na naměřené výsledky

Statická měření jednotlivých motorů byla měřena se snižujícím se rozsahem automatizace. U velkého motoru bylo automatizováno měření jak elektrických tak mechanických veličin. Díky tomu bylo možné měření provést velice rychle, čímž byl značně snížen vliv oteplení motoru na naměřené výsledky. Jednotlivé naměřené hodnoty byly tak zatíženy pouze chybou měřicího přístroje. V důsledku toho bylo možné touto metodou zachytit i vliv parazitních momentů.

U středního motoru bylo využito automatizace měření elektrických veličin, mechanické veličiny byly odečítány ručně. Tento odečet zpomalil průběh měření, a aby nebyl ovlivněn oteplováním motoru, bylo nutné snížit počet měřených bodů. Jednotlivé naměřené hodnoty byly zatíženy nejen chybou měřicích přístrojů, ale také chybou odečtu hodnot. V důsledku této chyby došlo k deformaci výsledného průběhu momentové charakteristiky. Malé množství naměřených hodnot také neumožňuje zachycení parazitních momentů.

U malého motoru nebylo využito žádné automatizace. Jak elektrické tak mechanické veličiny byly snímány ručně. Tato metoda značně zpomalovala celé měření. Statorový proud tohoto motoru však dosahuje hodnot pouze několika ampérů, a tak oteplování není tak výrazné jako v případě větších motorů. Naměřené hodnoty byly tak hlavně zatíženy chybou měřicích přístrojů a chybou jejich odečtu.

Dynamická měření všech motorů byla provedena s automatizací měření jak elektrických tak mechanických veličin. Měření tak probíhala velice rychle, čímž došlo k vyloučení chyby v důsledku oteplení motoru. Jelikož bylo pro měření otáček využito tachodynamo, bylo možné všechny průběhy navíc snímat ve vysokém rozlišení. Díky

tomu bylo možné zachytit vliv parazitních momentů. Naměřené hodnoty tak byly zatíženy pouze chybou měřících přístrojů. Tato chyba se však v případě tachodynoma značně zvyšuje s klesající dobou rozběhu motoru.

5.4.3. Vliv výkonu na naměřené výsledky

S rostoucím výkonem motoru souvisí růst momentu setrvačnosti, statorového proudu, ale také růst vlivu parazitních momentů. U motorů o výkonu desítek až stovek kW tak dochází ke značnému zkreslení výsledků statických momentových charakteristik. V důsledku působení oteplení a parazitních momentů není u těchto motorů prakticky možné naměřit dvakrát stejný průběh. Naopak díky velkému momentu setrvačnosti dochází k prodloužení doby rozběhu, což vede ke zvýšení přesnosti dynamického přístupu.

U motorů s výkonem jednotek kW nedochází k tak výrazné deformaci momentové charakteristiky v důsledku parazitních momentů a zároveň jejich moment setrvačnosti umožňuje dostatečně dlouhý rozběh. Tyto motory tak lze s vysokou přesností měřit oběma přístupy.

U motorů s výkonem pod jeden kW se parazitní momenty projevují jen slabě. V důsledku malých proudů navíc není oteplení motoru tak značné. U těchto motorů tak lze využít statický přístup. Obvyklé je tak využití elektrických měřičů momentu u těchto motorů. Naopak moment setrvačnosti těchto motorů je již velmi malý, doba rozběhu je krátká a dynamický přístup je zde značně deformován přechodovými parazitními momenty.

5.4.4. Závěrečné zhodnocení výsledků měření

Při měření statické momentové charakteristiky velkého motoru byl vhodně zvolen vysoký rozsah automatizace. Měřením se povedlo zachytit jak parazitní momenty v nestabilní oblasti charakteristiky, tak úzkou oblast kolem momentu zvratu. Při měření dynamické momentové charakteristiky došlo k chybnému zpracování naměřených dat. Průběh napětí na kotvě tachodynoma je navzdory předpokladům značně zvlněn. Aby bylo možné získat momentovou charakteristiku, je zapotřebí provést průměrování přes mnoho hodnot a ještě následně provést vyhlazení výsledku derivace. Jelikož i při vysokém rozlišení osciloskopu byla oblast kolem momentu zvratu

tvořena malým množstvím hodnot, v důsledku průměrování došlo k deformaci dané části charakteristiky. Možným řešením by bylo využít k měření otáček přesnějších elektromagnetických senzorů.

Při měření statické momentové charakteristiky středního motoru došlo k deformaci průběhu v důsledku ručního odečtu hodnot. Možným řešením by tak bylo automatizování měření mechanických veličin. I přes tuto drobnou chybu však průběh statické a dynamické momentové charakteristiky vyšel prakticky shodný, což potvrzuje správnost měřicích metod.

Při měření statické momentové charakteristiky malého motoru byla zvolena měřicí metoda bez využití automatizace. Vzhledem k okolnostem je využití této metody u daného motoru oprávněné a poskytuje dostatečně přesné výsledky. Naopak dynamické měření momentové charakteristiky v daném provedení nemá smysl. Při takto krátkých rozběhích se projevují přechodné parazitní momenty, kvůli kterým je výsledná momentová charakteristika nevypovídající. Pokud je tedy dynamické měření u motoru malého výkonu požadováno, je bezpodmínečně nutné zvýšit moment setrvačnosti motoru pomocí setrvačníku.

6. Závěr

Tématem této diplomové práce byl asynchronní motor a jeho momentová charakteristika. První část pojednává o asynchronním motoru jako o části asynchronního pohonu. Na základě tohoto zařazení je také vyložen důvod měření momentových charakteristik a jejich využití při návrzích pohonů.

V druhé části je proveden podrobný rozbor momentové charakteristiky asynchronního motoru. Tento rozbor začíná výkonovou bilancí motoru, následuje popis podstatných částí této charakteristiky a faktorů, které ovlivňují její tvar a končí způsoby jejího měření. Tato kapitola je řešena na základě norem ČSN 35 0010 (350010) a ČSN EN 60034-2-1 ed. 2.

Třetí část se věnuje měřicím systémům potřebným k úspěšnému získání momentových charakteristik. Zaměřuje se zejména na měření mechanického momentu, otáček, elektrických veličin a teploty. V jeho závěru jsou uvedeny příklady automatizovaných měřicích systémů.

Na základě těchto teoretických předpokladů byla provedena série měření na třech asynchronních motorech. O těchto měřeních a jejich výsledcích pojednává poslední část této práce. Jedná se o motory o jmenovitém výkonu 45, 5.5 a 0.37 kW. U každého z těchto motorů bylo provedeno měření naprázdno za účelem zjištění mechanických ztrát a měření dobové charakteristiky za účelem zjištění momentu setrvačnosti. Následovalo měření statické momentové charakteristiky a měření rozběhu z protiběhu, které bylo následně pomocí skriptu napsaného v programu Wolfram Mathematica převáděno na dynamickou momentovou charakteristiku.

Na závěr práce je provedeno zhodnocení validity použitých měřicích postupů. Na základě tohoto zhodnocení lze říci, že statický přístup při měření momentové charakteristiky asynchronního motoru je vhodný u motorů, jejichž výkon se pohybuje do 10 kW. Dynamický přístup je naopak vhodný u motorů, jejichž výkon se pohybuje v jednotkách kW a výše. Zároveň lze také konstatovat, že zvýšení rozsahu automatizace měření vede ke zvýšení kvality naměřených hodnot.

7. Seznam literatury

1. BARTOŇ, Petr. *Měření teploty na asynchronním motoru. Bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. 2011. [online]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/243/Mereni%20teploty%20na%20asynchronnim%20motoru.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
2. BAŠTA, Jan, Vojtěch KULDA, František PAVLÁSEK a kolektiv. *Měření na elektrických strojích. 4, Měření na indukčních strojích*. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1962.
3. ČSN 35 0010 (350010), *Točivé elektrické stroje. Zkoušky*, Praha: Český normalizační institut, 1. 8. 1992
4. ČSN EN 60034-2-1 ed. 2, *Točivé elektrické stroje - Část 2-1: Standardní metody určování ztrát a účinnosti ze zkoušek (s výjimkou strojů pro trakční vozidla)*, Praha: Český normalizační institut, 1. 4. 2015
5. HRABCOVCOVÁ, Valéria, Pavol RAFAJDUS, Marek FRANKO, a Peter HUDÁK. *Meranie a modelovanie elektrických strojov*. Žilina: Žilinská univerzita v Žilíně, 2009. ISBN 978-80-8070-924-2.
6. HRABCOVCOVÁ, Valéria, Pavol RAFAJDUS, Pavol MAKYŠ. *Analýza elektrických strojov*. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2017. ISBN 978-80-5541-323-5
7. 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.
8. POKORNÝ, Karel. *Stavba elektrických strojů II*. první. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury n.p., 1983.
9. PETROV, Georgij N. *Elektrické stroje 2*. Druhé vydání. Moskva, 1963. ISBN 509-21-857.
10. STEJSKAL, Jan. *Automatizace měření malých asynchronních motorů. bakalářská práce*. Praha. 2017 [online]. Dostupné z:

<https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/69557/F3-BP-2017-Stejskal-Jan-Automatizace%20mereni%20malych%20asynchronnich%20motoru.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

11. VOŽENÍLEK, Petr, Pavel MINDL a Vladimír NOVOTNÝ. *Elektromechanické měniče. Cvičení*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03387-2.
12. VOŽENÍLEK, Petr, Pavel MINDL a Vladimír NOVOTNÝ. *Elektromechanické měniče*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2015. ISBN 80-01-03387-2.

Seznam příloh

Příloha A – Ukázky zdrojových kódů	I
Příloha B – Tabulky naměřených a vypočítaných hodnot.....	II
Příloha C – Fotografie	VIII

Příloha A – Ukázky zdrojových kódů

```
XII. Klouzavý průměr momentu;  
  
pocetdatklouz = Length[derivace];  
prumer = Table[0, {pocetdatklouz - 2 * prumerovanipresxdatklouz}];  
datasumadobeh = Table[0, {1}];  
pomoc = 0;  
x = 1;  
o = 1 + prumerovanipresxdatklouz;  
  
For[i = 1 + (prumerovanipresxdatklouz), i < (pocetdatklouz - prumerovanipresxdatklouz + 1), i++,  
  For[p = 0, p < prumerovanipresxdatklouz + 1, p++,  
    datasumadobeh[[1]] = datasumadobeh[[1]] + derivace[[o + p]];  
  ];  
  For[p = 1, p < prumerovanipresxdatklouz + 1, p++,  
    datasumadobeh[[1]] = datasumadobeh[[1]] + derivace[[o - p]];  
  ];  
  prumerokam =  $\left(\frac{\text{datasumadobeh}[[1]]}{2 * (\text{prumerovanipresxdatklouz} + 1) - 1}\right)$ ;  
  prumer[[x]] = prumerokam;  
  x++;  
  o++;  
  datasumadobeh[[1]] = 0;  
]
```

Obrázek 43 – Ukázka části skriptu na zpracování dat z měření z protiběhu

```
278 //-----  
279 //----- Vyvolání šablony EXCELL  
280 //-----  
281 int CVICALLBACK Excel_start(int panel, int control, int event, void *callbackData,  
282 int eventData1, int eventData2)  
283 { switch (event) {  
284 case EVENT_COMMIT:  
285 SetBreakOnLibraryErrors (0);  
286 if (FileSelectPopup (DirProjekt, "*.xlt*", "*.xlt*", "Tabulka naměřených hodnot",  
287 VAL_LOAD_BUTTON, 0, 0, 1, 0, FileExcel) != 0) {  
288 // Fmt (FileExcel, "%s<%s\\Mereni motoru solo.xlt*", DirProjekt);  
289 Delay (0.25);  
290 ExcelRpt_WorkbookOpen (Excel_aplikace, FileExcel, &Excel_kniha);  
291 Delay (0.25);  
292 ExcelRpt_SetApplicationAttribute (Excel_aplikace, ER_AP_ATTR_VISIBLE, ExRConst_True);  
293  
294 ExcelRpt_GetWorksheetFromIndex (Excel_kniha, 1, &Excel_list);  
295  
296 ExcelRpt_SetWorksheetAttribute (Excel_list, ER_WS_ATTR_PRINT_PAGE_ORIENTATION,  
297 ExRConst_Portrait);  
298  
299 ExcelRpt_ActivateWorksheet (Excel_list);  
300  
301 ExcelRpt_Show (Excel_list, "A1");  
302  
303 MakeApplicationActive ();  
304  
305 Cislo_mereni = 0; }  
306 SetBreakOnLibraryErrors (1);  
307 break; }  
308 return 0; }  
309 //-----
```

Obrázek 44 – Část zdrojového kódu sloužící k vyvolání šablony pro ukládání dat

Příloha B – Tabulky naměřených a vypočítaných hodnot

Následující příloha obsahuje tabulky naměřených a vypočítaných hodnot ze statických měření jednotlivých motorů. Tabulky hodnot z dynamických měření lze z důvodu jejich rozsahu nalézt pouze na přiloženém CD.

Měření naprázdno velkého motoru							
U_s	I_{10}	P_{10z}	$\cos \varphi_{10}$	f	M_z	n	P_{10}
(V)	(A)	(kW)	(-)	(Hz)	(Nm)	(min^{-1})	(kW)
415.6	31.54	1.59	0.062	50	1.77	982	1.41
399.3	28.19	1.34	0.069	50	1.61	982	1.18
388.4	26.10	1.24	0.070	50	1.69	981	1.07
383.1	25.49	1.21	0.080	50	1.64	982	1.04
356.2	22.23	1.05	0.076	50	1.67	981	0.88
319.5	18.98	1.03	0.105	50	1.61	980	0.86
291.7	16.86	0.93	0.109	50	1.67	981	0.76
278.3	15.94	0.95	0.123	50	1.68	981	0.78
266.7	15.22	0.93	0.132	50	1.6	980	0.77
243.3	13.68	0.93	0.161	50	1.6	981	0.77
236.5	13.28	0.94	0.173	50	1.61	981	0.78
219.0	12.20	0.91	0.196	50	1.62	980	0.74
213.9	11.77	0.90	0.207	50	1.57	981	0.74
196.2	10.97	0.89	0.236	50	1.6	981	0.72
195.8	10.93	0.89	0.239	50	1.56	980	0.73
177.1	9.95	0.86	0.283	50	1.62	981	0.70
174.4	9.77	0.85	0.289	50	1.58	980	0.69
159.1	9.07	0.84	0.335	50	1.59	980	0.67
154.0	8.63	0.82	0.359	50	1.61	980	0.65
139.6	8.18	0.82	0.411	50	1.61	980	0.65
127.9	7.76	0.79	0.460	50	1.58	980	0.63
125.3	7.73	0.80	0.477	50	1.67	980	0.63
112.7	7.36	0.79	0.548	50	1.72	979	0.62
111.3	7.34	0.79	0.555	50	1.59	979	0.62
102.0	7.18	0.78	0.610	50	1.63	979	0.61
96.7	7.15	0.77	0.644	50	1.59	978	0.61
89.3	7.19	0.77	0.693	50	1.59	979	0.61

Tabulka 4 – Naměřené a vypočítané hodnoty při měření naprázdno VM

Měření statické momentové charakteristiky velkého motoru 1						
M_{\downarrow}	n	U_{\downarrow}	$I_{s\downarrow}$	I_{ss}	M_{mech}	M_{Hs}
(Nm)	(min⁻¹)	(V)	(A)	(A)	(Nm)	(Nm)
7.4	980.0	209.2	11.6	22.2	4.8	39.7
33.9	976.2	208.4	13.0	25.0	4.8	137.8
76.5	973.1	206.9	20.9	40.4	4.8	299.0
126.0	970.0	202.5	33.6	66.3	4.8	505.6
180.5	957.8	197.2	50.7	102.8	4.7	757.8
211.6	896.3	187.6	105.2	224.3	4.4	977.7
137.3	731.7	168.1	137.7	327.6	3.6	793.9
115.8	653.7	165.9	147.2	355.0	3.2	688.6
108.5	617.1	164.3	153.1	372.9	3.0	658.1
107.5	587.2	163.8	154.8	377.9	2.9	655.1
107.3	555.3	163.1	156.9	384.7	2.7	659.0
108.0	511.6	162.8	158.0	388.1	2.5	664.3
107.9	455.4	162.0	160.9	397.4	2.2	669.6
109.0	400.4	161.8	162.7	402.4	2.0	676.8
114.7	323.6	161.5	165.8	410.8	1.6	712.3
116.4	244.3	160.5	167.6	417.9	1.2	729.8
115.3	176.2	159.9	169.3	423.6	0.9	726.2
113.9	106.6	159.0	172.4	433.9	0.5	724.3
114.0	54.1	158.6	173.6	437.8	0.3	726.1
113.3	6.3	158.3	175.6	443.7	0.0	723.4

Tabulka 5 – Naměřené a vypočítané hodnoty při měření momentové charakteristiky VM1

Měření statické momentové charakteristiky velkého motoru 2						
M_↓	n	U_↓	I_{s↓}	I_{ss}	M_{mech}	M_{Hs}
(Nm)	(min⁻¹)	(V)	(A)	(A)	(Nm)	(Nm)
3.2	979.7	209.5	11.46	21.88	4.8	24.5
14.5	981.6	208.9	11.93	22.84	4.8	66.1
34.0	977.2	207.9	14.49	27.87	4.8	139.0
56.7	976.2	206.9	19.40	37.50	4.8	225.1
86.0	975.3	205.2	25.95	50.59	4.8	340.1
114.5	970.9	201.9	34.78	68.91	4.8	463.4
149.2	967.2	198.5	45.66	92.03	4.7	620.5
174.6	960.6	193.5	60.76	125.62	4.7	761.5
184.8	955.3	189.7	76.77	161.86	4.7	837.5
190.7	949.4	185.3	80.20	173.11	4.7	905.4
195.1	930.7	180.6	97.86	216.75	4.6	975.0
172.8	857.6	172.1	123.72	287.53	4.2	951.9
128.6	760.2	167.7	139.86	333.59	3.7	749.3
112.7	708.3	166.2	145.96	351.29	3.5	669.5
107.3	684.3	165.0	150.28	364.34	3.4	647.0
102.9	665.2	164.6	151.53	368.20	3.3	623.4
101.4	653.7	164.6	152.53	370.75	3.2	614.9
101.0	647.1	164.4	153.52	373.57	3.2	613.9
100.1	637.4	164.3	153.84	374.59	3.1	609.0
100.0	617.8	164.1	154.15	375.80	3.0	609.0
109.3	578.4	163.7	155.48	380.00	2.8	667.1
109.2	531.6	163.3	157.01	384.61	2.6	668.1
107.7	479.7	162.8	158.93	390.39	2.4	661.7
108.1	431.3	161.9	162.02	400.42	2.1	671.0
105.4	389.8	161.4	163.30	404.69	1.9	657.4
101.8	361.7	160.7	165.57	412.10	1.8	639.8
101.8	328.6	160.4	166.45	414.98	1.6	641.1
101.5	297.7	160.2	167.27	417.64	1.5	640.2
99.6	275.8	159.8	168.68	422.34	1.4	631.4
99.7	245.8	159.6	169.30	424.29	1.2	632.5
102.8	212.1	159.4	169.82	426.13	1.0	653.1
106.8	167.8	158.9	171.17	430.96	0.8	681.7
111.1	116.9	158.6	172.12	434.02	0.6	709.4
120.3	41.0	158.4	173.21	437.31	0.2	767.6
118.9	-30.2	157.8	175.73	445.33	-0.1	762.8
127.6	-78.3	157.4	176.76	449.15	-0.4	822.1

Tabulka 6 – Naměřené a vypočítané hodnoty při měření momentové charakteristiky VM2

Měření naprázdno středního motoru				
U_s	I_{10}	P_{10}	$\cos \varphi_{10}$	f
(V)	(A)	(kW)	(-)	(Hz)
440.3	9.96	0.920	0.121	50.0
413.8	7.80	0.687	0.122	50.0
387.3	6.12	0.533	0.130	50.0
362.7	4.95	0.440	0.141	50.0
343.0	4.26	0.389	0.154	50.0
317.7	3.57	0.346	0.176	50.0
294.0	3.12	0.316	0.199	50.0
269.6	2.72	0.293	0.230	50.0
247.6	2.43	0.275	0.264	50.0
223.7	2.16	0.260	0.311	50.0
200.8	1.93	0.247	0.368	50.0
175.0	1.73	0.234	0.445	50.0
149.8	1.57	0.222	0.544	50.0
125.2	1.51	0.216	0.654	50.0
112.5	1.54	0.214	0.712	50.0

Tabulka 7 – Naměřené a vypočítané hodnoty při měření naprázdno SM

Měření naprázdno malého motoru					
U_s	I_{10}	P_A	P_B	P_{10}	$\cos \varphi_{10}$
(V)	(A)	(dílků)	(dílků)	(W)	(-)
390	1.00	24	-55	155	0.230
380	0.92	23	-49	130	0.215
360	0.81	18	-41	115	0.228
340	0.73	15	-35	100	0.233
320	0.66	13	-30	85	0.233
300	0.61	11	-26	75	0.237
280	0.56	9	-23	68	0.249
260	0.51	8	-20	60	0.262
240	0.47	6	-17	55	0.285
220	0.43	5	-15	48	0.290
200	0.39	4	-13	43	0.315
180	0.36	3	-11	40	0.357
160	0.33	3	-9	32	0.345
140	0.30	2	-8	29	0.399
120	0.27	2	-7	25	0.446
100	0.26	1	-6	23	0.510

Tabulka 8 – Naměřené a vypočítané hodnoty při měření naprázdno MM

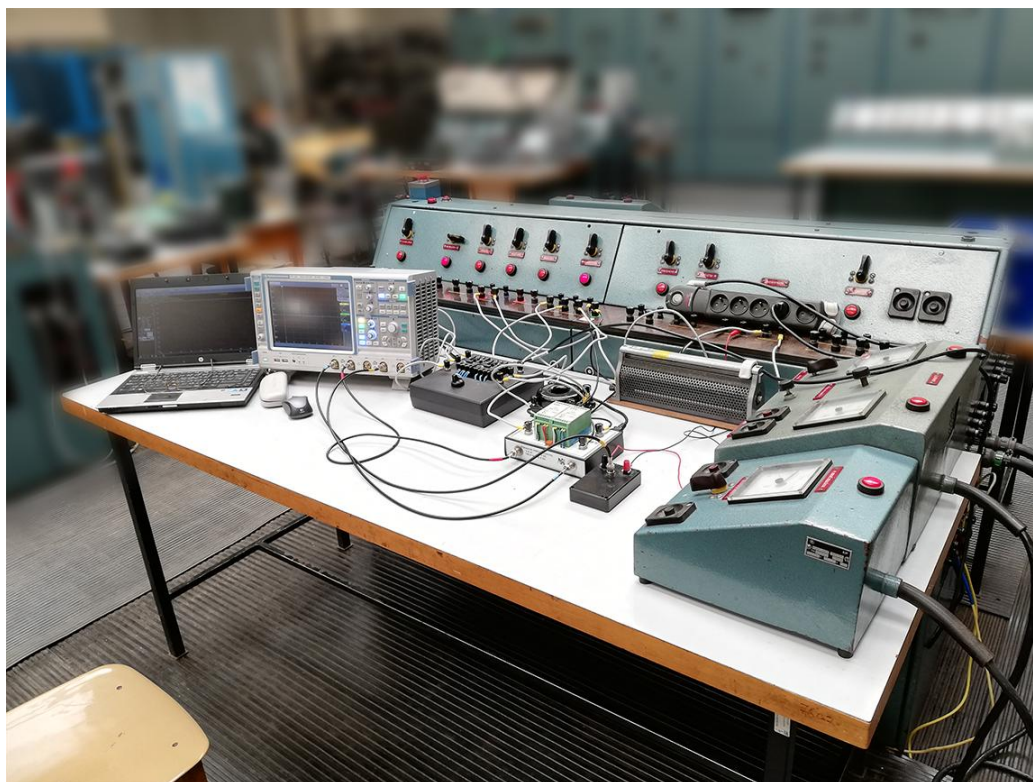
Měření statické momentové charakteristiky středního motoru						
M_↓	n	U_↓	I_{s↓}	I_{ss}	M_{mech}	M_{Hs}
(Nm)	(min⁻¹)	(V)	(A)	(A)	(Nm)	(Nm)
0.0	1480.0	137.3	1.92	5.3	2.0	13.1
2.0	1468.4	136.0	2.53	7.1	1.9	28.9
4.0	1438.2	136.5	4.23	11.8	1.9	43.9
5.0	1419.7	135.9	5.44	15.2	1.9	52.0
6.0	1389.5	135.0	6.64	18.7	1.8	60.3
7.0	1299.1	133.7	9.46	26.9	1.7	68.8
6.8	1241.1	133.0	10.83	30.9	1.6	67.3
6.5	1159.9	133.1	12.04	34.4	1.5	64.0
5.5	1043.9	132.8	13.22	37.8	1.4	55.0
4.8	916.3	132.8	13.98	40.0	1.2	48.1
4.2	825.8	132.8	14.35	41.1	1.1	42.3
3.8	684.3	132.1	14.67	42.2	0.9	38.0
3.2	533.5	131.7	14.91	43.0	0.7	31.8
3.0	301.6	132.0	15.27	43.9	0.4	27.8
3.0	127.6	132.7	15.52	44.5	0.2	25.8
3.5	-34.8	132.5	15.59	44.7	0.0	28.4
4.2	-394.4	132.4	15.79	45.3	-0.5	30.8
4.2	-637.9	132.3	15.83	45.5	-0.8	28.5
4.3	-835.1	132.5	15.92	45.7	-1.1	27.4
4.5	-951.1	132.1	15.87	45.6	-1.3	28.1

Tabulka 9 – Naměřené a vypočítané hodnoty při měření momentové charakteristiky SM

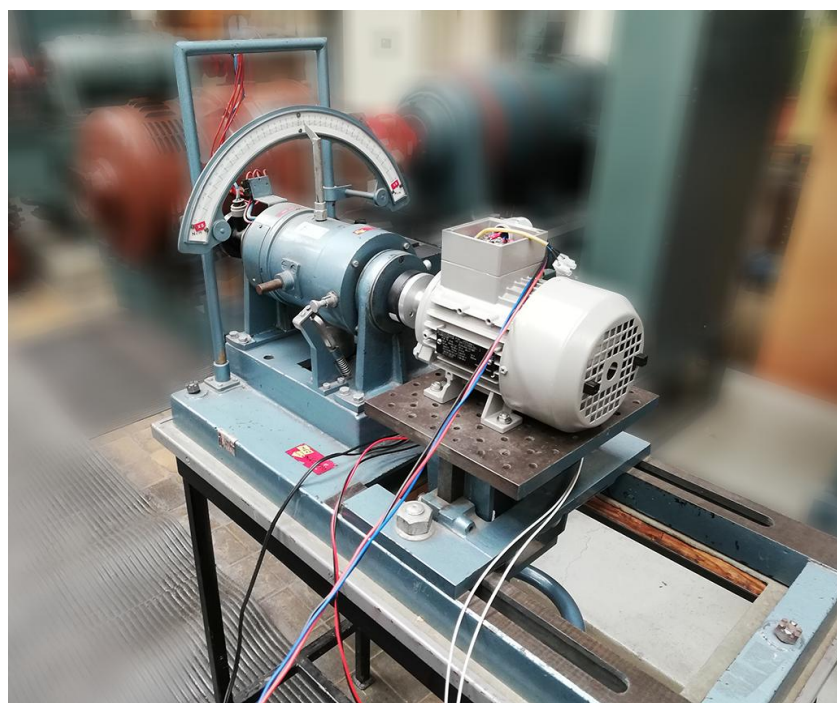
Měření statické momentové charakteristiky malého motoru							
M_{\downarrow}	U_{sd}	n	U_{\downarrow}	$I_{s\downarrow}$	I_{ss}	M_{mech}	M_{Hs}
(Ncm)	(V)	(min ⁻¹)	(V)	(A)	(A)	(Nm)	(Nm)
0.0	2.98	1490	150	0.25	0.7	0.13	0.82
5.5	2.94	1470	150	0.30	0.8	0.13	1.21
12.0	2.90	1450	150	0.30	0.8	0.13	1.66
19.0	2.87	1435	150	0.34	0.9	0.13	2.15
23.3	2.85	1425	150	0.36	1.0	0.13	2.44
26.0	2.82	1410	150	0.40	1.1	0.13	2.63
30.5	2.79	1395	150	0.42	1.1	0.13	2.94
35.0	2.76	1380	150	0.46	1.2	0.13	3.25
38.8	2.73	1365	150	0.48	1.3	0.12	3.51
44.3	2.68	1340	150	0.52	1.4	0.12	3.89
47.5	2.64	1320	150	0.56	1.5	0.12	4.11
50.8	2.58	1290	150	0.61	1.6	0.12	4.32
55.0	2.50	1250	150	0.67	1.8	0.11	4.60
58.0	2.44	1220	150	0.71	1.9	0.11	4.80
61.5	2.30	1150	150	0.80	2.1	0.10	5.01
64.3	2.00	1000	150	0.93	2.5	0.09	5.12
62.5	1.68	840	150	1.04	2.8	0.08	4.91
59.5	1.37	685	150	1.12	3.0	0.06	4.61
55.8	1.12	560	150	1.16	3.1	0.05	4.27
55.3	1.01	505	150	1.16	3.1	0.05	4.21
55.0	0.97	485	150	1.16	3.1	0.04	4.18
54.9	0.85	425	150	1.18	3.1	0.04	4.14
54.3	0.67	335	150	1.2	3.2	0.03	4.04
54.0	0.43	215	150	1.21	3.2	0.02	3.96
54.0	0.25	125	150	1.23	3.3	0.01	3.91
53.9	0.10	51	150	1.24	3.3	0.00	3.86
53.8	0.00	0	150	1.24	3.3	0.00	3.83

Tabulka 10 – Naměřené a vypočítané hodnoty při měření momentové charakteristiky MM

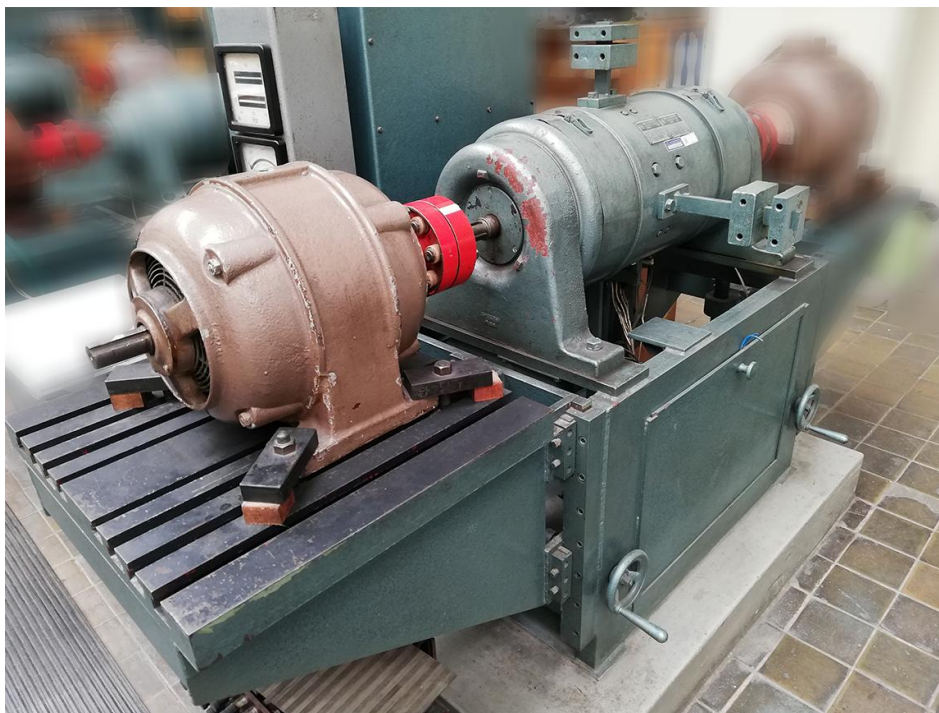
Příloha C – Fotografie



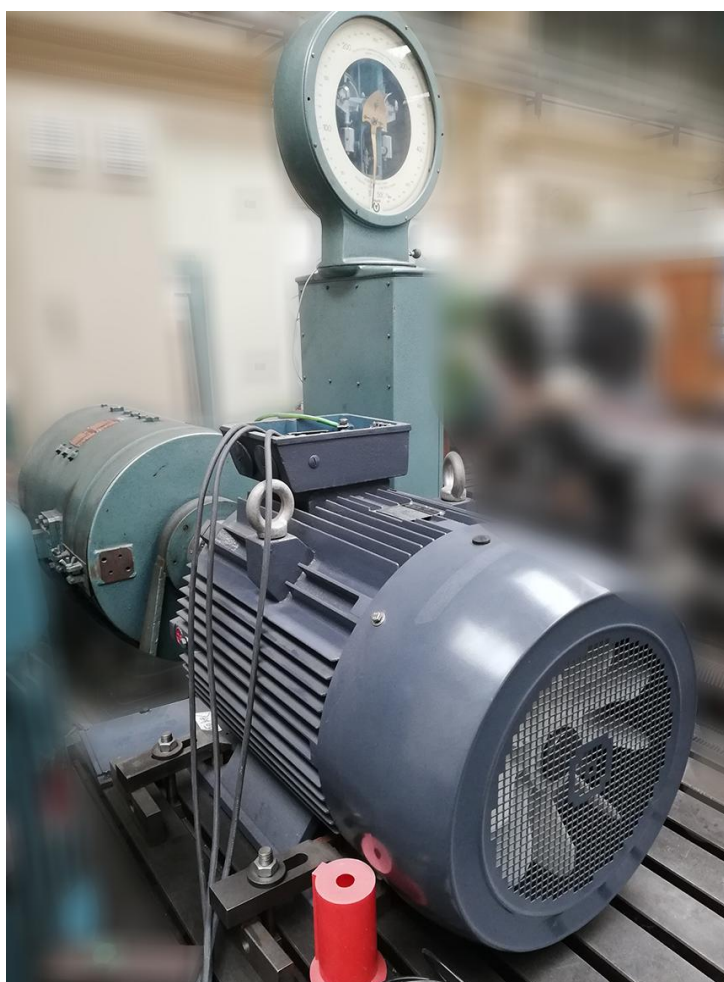
Obrázek 45 – Ukázka pracoviště pro měření dynamických charakteristik



Obrázek 46 – Motor malého výkonu s dynamometrem



Obrázek 47 – Motor středního výkonu s dynamometrem



Obrázek 48 – Motor velkého výkonu s dynamometrem