



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

Návrh dynamometru pro testování motorů klimatizačních jednotek

Diplomová práce

Studijní program: N2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 3906T001 – Mechatronika

Autor práce: **Bc. Dominik Dufek**

Vedoucí práce: doc. Ing. Josef Černožorský, Ph.D.

Ústav mechatroniky a technické informatiky





Zadání diplomové práce

Návrh dynamometru pro testování motorů klimatizačních jednotek

Jméno a příjmení: **Bc. Dominik Dufek**
Osobní číslo: M18000161
Studijní program: N2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Mechatronika
Zadávací katedra: Ústav mechatroniky a technické informatiky
Akademický rok: **2020/2021**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s používanými typy motorů pro pohon ventilátoru klimatizační jednotky.
2. Navrhněte alternativy realizace zátěže pro dynamometr.
3. Rozpracujte jeden z vybraných návrhů.
4. Realizujte vybraný návrh a ověřte jej měřením.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

dle potřeby dokumentace
40–50
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] RYDLO, Pavel. *Řízení elektrických střídavých pohonů*. V Liberci: Technická univerzita, 2006. ISBN 80-7372-117-1.

Vedoucí práce:

doc. Ing. Josef Černohorský, Ph.D.
Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání práce:

9. října 2020

Předpokládaný termín odevzdání:

17. května 2021

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.
děkan

L.S.

doc. Ing. Milan Kolář, CSc.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 9. října 2020

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

16. 5. 2022

Bc. Dominik Dufek

Návrh dynamometru pro testování motorů klimatizačních jednotek

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá návrhem dynamometru sloužícího k testování stejnosměrných motorů ventilátorů klimatizačních jednotek. V teoretické části jsou popsány stejnosměrné komutátorové motory s permanentními magnety, běžně používané typy dynamometrů, senzory točivého momentu a snímače otáček. Dále jsou rozpracovány návrhy dynamometru s možnými alternativami brzdného systému. Součástí práce je měření motoru ventilátoru a testování zvoleného návrhu. Ve zvoleném návrhu dynamometru slouží jako brzdný systém stejnosměrný motor řízený programovatelnou elektronickou zátěží. Testovaný motor je napájen programovatelným zdrojem a čtení hodnot točivého momentu a otáček ze senzoru zajišťuje měřicí karta. Pro řízení dynamometru byla vytvořena aplikace s grafickým uživatelským rozhraním, která umožňuje provedení automatické zkoušky motoru. Návod na ovládání vytvořené aplikace je obsažen v příloze.

Klíčová slova:

dynamometr, testování motorů, stejnosměrný motor s permanentními magnety, senzory točivého momentu, senzory otáček, .NET aplikace, grafické uživatelské rozhraní



Design of Dynamometer for Ventilation Drive

Abstract

The diploma thesis is focused on designing a dynamometer used for testing direct current (DC) motors of air conditioning unit fans. The theoretical part describes DC commutator motors with permanent magnets, commonly used dynamometers, torque sensors and speed sensors. Dynamometer designs with possible alternatives to the braking system are also developed. Part of the work is also measuring the fan motor and testing the selected design. A DC motor controlled by a programmable electronic load in the selected dynamometer design serves as the braking system. A programmable source powers the tested motor, and a measuring card provides the reading of the torque and speed values from the sensor. An application with a graphical user interface was developed to control the dynamometer, allowing an automatic engine test. Instructions for operating the developed application are included in the appendix.

Key words:

dynamometer, motor testing, DC motor with permanent magnets, torque sensors, speed sensors, .NET application, graphical user interface



Poděkování

Rád bych poděkoval doc. Ing. Josefu Černoorskému, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a vstřícnost při konzultacích a vypracování diplomové práce.



Obsah

Seznam obrázků	12
Seznam zkratek	13
Úvod	14
1 Stejnoseměrný komutátorový motor s permanentními magnety	15
1.1 Fyzikální popis stejnosměrného motoru s permanentními magnety . .	16
2 Dynamometry	18
2.1 Dynamometry využívající principu vířivých proudů	18
2.2 Hysterezní dynamometry	19
2.3 Práškové dynamometry	20
2.4 Typové zkoušky elektrických strojů	20
3 Senzory točivého momentu a otáček	22
3.1 Senzory točivého momentu	22
3.1.1 Fyzikální principy senzorů točivého momentu	22
3.1.2 Senzory momentu s odporovými tenzometry	23
3.1.3 Senzory s přenosem momentu na úhel	24
3.2 Snímače otáček	24
3.2.1 Inkrementální snímač polohy	24
3.2.2 Absolutní snímač	25
3.2.3 Resolver	25
3.2.4 Tachodynamo	26



4	Návrh možných řešení	27
4.1	Dynamometr s hysterezní brzdou	27
4.1.1	Senzor točivého momentu	27
4.1.2	Hysterezní brzdy	27
4.1.3	Uspořádání řídicího systému s hysterezní brzdou	29
4.1.4	Východiska návrhu dynamometru s hysterezní brzdou	30
4.2	Dynamometr se zatěžovacím motorem	31
5	Měření motoru ventilátoru	33
5.1	Měření naprázdno	34
5.2	Měření vlastních ztrát dynamometru	35
5.3	Měření motoru v brzděném režimu	36
5.4	Měření nakrátko	38
6	Testování návrhu dynamometru	41
6.1	Popis testování	41
6.2	Vyhodnocení výsledků testování	43
7	Aplikace pro řízení dynamometru	46
7.1	Grafické uživatelské rozhraní	46
7.2	Komunikace s přístroji	47
7.3	Měření	47
7.3.1	Ukládání do souboru	48
7.4	Automatická zkouška	50
7.4.1	Testování automatické zkoušky	50
8	Závěr	54
	Seznam použité literatury	58
	Přílohy	58



A	Návod na ovládání aplikace	59
A.1	Manuální řízení	60
A.2	Automatická zkouška	61



Seznam obrázků

1.1	Náhradní schéma stejnosměrného komutátorového motoru s permanentními magnety	17
3.1	Umístění čtyř tenzometrů na hřídeli pro měření točivého momentu . .	23
4.1	Senzor točivého momentu řady TS společnosti Magtrol [17]	28
4.2	Konfigurace systému s otevřenou smyčkou [16]	29
4.3	Konfigurace systému s uzavřenou smyčkou [16]	30
4.4	Blokové schéma navrženého dynamometru	32
5.1	Graf závislosti počtu otáček za minutu na napětí při chodu naprázdno	34
5.2	Testování motoru na dynamometru	35
5.3	Vlastní ztráty dynamometru v závislosti na počtu otáček za minutu .	36
5.4	Momentová charakteristika	37
5.5	Závislost momentu na proudu	37
5.6	Ukázka měření motoru nakrátko	38
5.7	Znázornění sil a momentu působících na páku	39
5.8	Závislost momentu na proudu při měření nakrátko	40
6.1	Testování návrhu dynamometru	42
6.2	Schéma zapojení při testování návrhu	42
6.3	Rychlostní charakteristika naměřená při testování návrhu	44
6.4	Momentová charakteristika naměřená při testování návrhu	45
7.1	Vytvořená .NET aplikace umožňující řízení dynamometru	48



7.2	Vývojový diagram popisující sekvenci měření	49
7.3	Fotografie testování automatické zkoušky	50
7.4	Vývojový diagram popisující automatickou zkoušku motoru. I_z je proud zátěže, δt je doba vymežující délku jednoho kroku.	51
7.5	Momentová charakteristika naměřená při testování automatické zkoušky motoru	52
7.6	Rychlostní charakteristika naměřená při testování automatické zkoušky motoru	53
A.1	Hlavní formulář uživatelského rozhraní po spuštění aplikace	59
A.2	Formulář pro výběr zdroje	60
A.3	Zobrazení naměřených dat v MS Excel	61
A.4	Formulář pro zadání parametrů proudu zátěže před provedením automatické zkoušky	62
A.5	Znázornění parametrů, které je třeba zadat k provedení automatické zkoušky. $I_z(min)$ je počáteční minimální proud zátěže, $I_z(max)$ je konečný maximální proud zátěže, ΔI_z značí velikost kroku zvyšování proudu zátěže, Δt je doba vymežující délku jednoho kroku.	62
A.6	Probíhající automatická zkouška	63



Seznam zkratek

AHB	Compressed-Air-Cooled Hysteresis Brakes, řada hysterezních brzd chlazených tlakovým vzduchem
BHB	Blower-Cooled Hysteresis Brakes, řada hysterezních brzd chlazených ventilátorem
C#	C Sharp, vysokoúrovňový objektově orientovaný programovací jazyk
CSV	Comma-Separated Values, souborový formát určený pro výměnu tabulkových dat
GUI	Graphical User Interface, grafické uživatelské rozhraní
NI-DAQmx	současná generace ovladače sběru dat společnosti National Instruments
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning, topení, větrání a klimatizace (systém vzduchotechniky)
k_u	konstanta indukovaného napětí [V min]
k_m	momentová konstanta [N m A ⁻¹]
MS	Microsoft
NI	National Instruments
PC	Personal computer, osobní počítač
SCPI	Standard Commands for Programmable Instruments, standardní příkazy pro programovatelné přístroje
TS	Torque Sensor, senzor momentu
USB	Universal Serial Bus, univerzální sériová sběrnice



Úvod

Cílem diplomové práce je navrhnout a realizovat dynamometr sloužící k testování motorů ventilátorů klimatizačních jednotek. Motory v klimatizaci slouží jako pohon interiérového ventilátoru, který je umístěný v klimatizační jednotce (HVAC). Motory ventilátorů určené k testování mají různé parametry, všechny jsou však stejnosměrné komutátorové motory s permanentními magnety.

Motivací pro diplomovou práci byl požadavek společnosti Denso Manufacturing Czech s.r.o. Dynamometr by měl sloužit k ověření kvality vstupních kusů motorů provedením typové zkoušky. Výrobním programem firmy je sériová výroba klimatizací do osobních automobilů a výroba součástí do klimatizací osobních automobilů, kterými jsou topné těleso, kondenzátor, chladič, výparník a řemenice. Klimatizace a její součásti jsou směřovány k odběratelům z automobilového průmyslu. [1]

První tři kapitoly práce se věnují teorii a rešerši, jsou zde popsány stejnosměrné motory s permanentními magnety, běžně používané typy dynamometrů, způsoby měření točivého momentu a otáček. Následující kapitoly v rámci praktické části pojednávají o návrhu dynamometru a popisují realizaci zvoleného návrhu.



1 Stejnoseměrný komutátorový motor s permanentními magnety

Motory ventilátorů, které se používají v klimatizačních jednotkách (HVAC) osobních automobilů, jsou převážně motory komutátorového typu [2]. Všechny motory ventilátorů určené k testování dynamometrem navrženým v této práci jsou stejnosměrné komutátorové motory s permanentními magnety.

Stejnosměrné stroje patří z historického hlediska k nejstarším elektrickým strojům. Stejnoseměrný motor je snadno regulovatelný, jelikož jeho otáčky lze plynule měnit změnou velikosti napětí. Stejnoseměrný motor má dobré dynamické vlastnosti a dobrou přizpůsobivost momentových charakteristik různým druhům zátěže. Jejich nevýhodou je vysoká cena, spojená navíc s cenou napájení. [3]

Stejnosměrný komutátorový motor s permanentními magnety se skládá ze statoru s budicím obvodem s hlavními póly a z vinutého rotoru. Hlavní póly statoru jsou buzené permanentními magnety a po obvodu statoru jsou rozmístěny tak, že se jejich polarita střídá. Motor může být navíc opatřen pólovými nástavci, které slouží ke koncentraci magnetického toku do vzduchové mezery. Magnetický obvod statoru stejnosměrného motoru je obvykle tvořen svařovanými nebo mechanicky spojenými odlitky z plného, neděleného materiálu. [4] [5]

Rotor je vyroben ze vzájemně odizolovaných plechů, pevně uchycených na hřídeli. Rotorové vinutí je tvořeno cívkami, které jsou uloženy v drážkách a jsou vyvedeny na komutátor. Komutátor je tvořen lamelami, na které doléhají uhlíkové kartáče. [4]



1.1 Fyzikální popis stejnosměrného motoru s permanentními magnety

Při otáčení rotoru stejnosměrného motoru rychlostí ω se ve vinutí kotvy indukují napětí, které lze popsat rovnicí

$$U_i = k\Phi\omega \quad (1.1)$$

Působením magnetického toku Φ a proudu kotvy I_a se vytváří elektrický moment

$$M = k\Phi I_a \quad (1.2)$$

Velikost magnetického toku u stejnosměrných motorů s permanentními magnety je dána permanentními magnety a konstrukcí magnetického obvodu. Magnetický tok je tudíž konstantní a nelze jej měnit. Otáčky stejnosměrného motoru s permanentními magnety lze řídit pouze napětím na kotvě. [5]

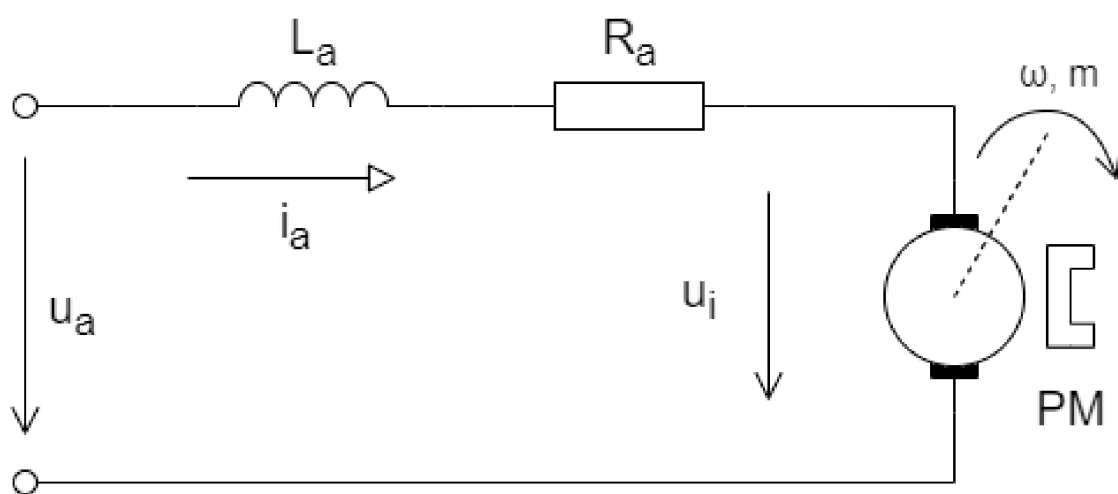
Na obrázku 1.1 je náhradní obvod stejnosměrného motoru s permanentními magnety. Obvod kotvy je možno popsat rovnicí rovnováhy elektrických napětí

$$u_a = u_i + L \frac{di_a(t)}{dt} + R_a i_a \quad (1.3)$$

Pro ustálený stav platí

$$U_a = U_i + R_a I_a \quad (1.4)$$





Obrázek 1.1: Náhradní schéma stejnosměrného komutátorového motoru s permanentními magnety

2 Dynamometry

Dynamometr je zařízení umožňující současné měření točivého momentu a otáček točivých strojů. Z momentu a otáček lze následně dopočítat i okamžitý výkon stroje. Měření se děje prostřednictvím zatěžování testovaného točivého stroje. Dynamometr se skládá z brzdného systému, sloužícího k zatěžování testovaného točivého stroje, a z prostředků pro měření točivého momentu a otáček stroje. Brzdným systémem je většinou rotor zasazený v pouzdře. Působením elektromagnetických nebo třecích sil je v závislosti na typu brzdného systému mezi rotorem a pouzdrem vytvářen brzdný moment. Při měřicí zkoušce je hřídel testovaného stroje připojena na hřídel rotoru dynamometru pružnou spojkou a ten se může otáčet rychlostí, jaká je pro zkoušku požadována. [6]

Existuje celá řada dynamometrů s různými typy brzdných systémů, z nichž jsou v této práci popsány ty, které zde přichází v úvahu.

2.1 Dynamometry využívající principu vířivých proudů

Dynamometr využívající principu vířivých proudů se skládá ze statoru s budicí cívkou a z ocelového rotoru, který má tvar ozubeného kola. Cívkou statoru protéká stejnosměrný proud budící magnetický tok magnetického obvodu, čímž vzniká magnetické pole statoru. Když se rotor otáčí v magnetickém poli statoru, střídání zubů a mezer rotoru má za následek změnu magnetického odporu v magnetickém obvodu. Změnou magnetického odporu se změní i magnetický tok, jenž způsobí indukování napětí v magnetickém obvodu. V důsledku změny magnetického pole se v obvodu naindukují vířivé proudy, které začnou obvodem protékat. [6]



Vířivé proudy mají za následek vznik magnetického pole a tepla. Magnetické pole indukovaných proudů dle Lorentzova zákona působí proti změně magnetického indukčního toku, která je jeho příčinou. Z toho plyne, že vzniklé magnetické pole vířivých proudů působí proti otáčení hřídele a testovaný stroj tak brzdí. Brzdný moment je říditelný velikostí vstupního proudu protékajícího statorovým vinutím. Pokud je mechanická rychlost rotoru nulová, ke změně magnetického odporu nedochází, tedy ani ke vzniku vířivých proudů, a proto je brzdný moment také nulový. [6]

Z principu je zřejmé, že brzdný systém využívající vířivých proudů poskytuje brzdný moment, který závisí na otáčkách hřídele. Při nízkých otáčkách dokáže vyvinout jen nízký brzdný účinek.

Výkon absorbovaný dynamometrem se v magnetickém obvodu přeměňuje na teplo. Je proto nutné, aby byl dynamometr s vířivou brzdou vybaven účinným chladičím systémem. [6]

Z elektrického hlediska lze dynamometr s vířivou brzdou považovat za synchronní stroj, jehož počet pólů je roven počtu zubů rotoru, a který má nekonečný počet fází a kotvu spojenou nakrátko. Frekvenci vířivých proudů tohoto pomyslného stroje lze vypočítat jako součin mechanické úhlové rychlosti a počtu zubů rotoru. [7]

2.2 Hysterezní dynamometry

Univerzálním typem jsou hysterezní dynamometry, které jsou použitelné na malé a střední výkony motorů, maximálně však 14 kW pro přetržitý provoz [6].

Hysterezní dynamometr vytváří brzdný točivý moment pomocí síťované pólové struktury a pomocí sestavy speciálního ocelového rotoru a hřídele. Ty jsou sestaveny dohromady, nejsou však ve fyzickém kontaktu. Dokud není budicí cívka pod napětím, rotor se může volně otáčet. Pokud je na budicí cívku přivedeno napětí, začne svým magnetickým polem působit na pólovou strukturu. Ve vzduchové mezeře mezi pólovou strukturou a rotorem začne působit magnetický tok. Tím dojde k vytvoření brzdného momentu mezi pólovou strukturou a rotorem. Hysterezní brzdný systém



poskytuje brzdňý moment, který nezávisí na otáčkách hřídle. [6]

2.3 Práškové dynamometry

Práškový dynamometr je konstruován tak, že mezi rotor a stator je umístěn jemný kovový prášek. Přivedením elektrického proudu na cívky se vytvoří magnetické pole. Kovový prášek ve směru indukčních čar magnetického pole vytvoří řetězce, které se vlivem otáčení rotoru brzdy neustále rozdělují a vlivem magnetického pole znovu a znovu spojují, přičemž vytvářejí hladký brzdňý točivý moment. Při nulové rychlosti poskytují práškové brzdy plný točivý moment. [6]

Práškové brzdy jsou typicky omezené na nižší otáčky kvůli problémům spojeným s odvodem tepla. Díky vodnímu chlazení, které se pro práškové brzdy typicky používá, se však jejich maximální výkon dokáže pohybovat okolo 48 kW. [6]

Tento typ brzdy se doporučuje pro všechny aplikace vyžadující nepřetržité brzdění a změnu točivého momentu v širokém pásmu a s vynikající citlivostí. Typickou aplikací je řízení napínání materiálu odvíjeného z cívek, kde pro zajištění stálého napětí se snižováním průměru materiálu na cívkách musí brzdňý moment plynule klesat. Navzdory svému jménu mají tu výhodu, že neuvolňují magnetický prášek do okolí a jsou tak vhodné i pro aplikace, kde je nepřípustná kontaminace zpracovávaného produktu, jako například v potravinářském průmyslu. [8]

2.4 Typové zkoušky elektrických strojů

Typové zkoušky motorů předepisuje norma ČSN EN 60034-1 ed.2. Norma definuje typovou zkoušku jako „zkoušku jednoho nebo více strojů určité konstrukce, která má prokázat, že tato konstrukce odpovídá určitým specifikacím“ [9]. Dále uvádí, že typovou zkoušku lze považovat za platnou, i pokud stroj, na kterém byla zkouška provedena, vykazuje bezvýznamné odchylky od jmenovitých hodnot nebo jiných charakteristik.

Stroj určený k všeobecnému použití musí být schopen pracovat při trvalém za-



tížení, tj. při zatížení druhu S1. [9]

Zkušební metody pro provozní nebo výrobní kusové zkoušky stejnosměrných strojů jsou popsány v normě ČSN EN 60034-2-1 ed. 2. Tyto zkušební metody mohou být použity pro jakoukoli zkoušku, např. také pro přejímací zkoušky podle přání zákazníka. [10]

Zkouška při zatížení se provádí při teplotě odpovídající jmenovitému zatížení. Před zkouškou a bezprostředně po zkoušce se určí teplota okolí a odpor vinutí motoru. Motor je napájen podle jmenovitých hodnot stroje a zatěžován jmenovitým zatížením musí pracovat dokud nedosáhne tepelné rovnováhy. [10]

Během zkoušky prováděné na dynamometru se zkoušený motor mechanicky spojí se zatěžovacím strojem. Zkoušený motor pracuje při požadovaném zatížení. Během zkoušky se na zkoušeném motoru měří napětí na kotvě, proud kotvy, příkon kotvy, počet otáček a točivý moment. [10]



3 Senzory točivého momentu a otáček

3.1 Senzory točivého momentu

3.1.1 Fyzikální principy senzorů točivého momentu

Pojem točivý moment označuje moment síly, který má rotační účinky. Pro pohyb tělesa kolem pevné osy je moment roven součinu síly a ramene síly 3.1

$$M = Fr \quad (3.1)$$

Výkon rotujícího tělesa v závislosti na momentu je roven součinu momentu a úhlové rychlosti 3.2

$$P = M\omega \quad (3.2)$$

Měření momentu je založeno na měření příčin vzniku momentu nebo na měření účinků momentu. U elektrických motorů je příčinou vzniku točivého momentu elektromagnetická interakce mezi poli rotoru a statoru. Proto lze například u stejnosměrného motoru určit točivý moment ze změřených proudů kotvou a budicím vinutím, a to jako součin těchto proudů a konstanty. Tato metoda však nerespektuje ztráty při přenosu momentu k zátěži, např. třením v ložiskách a ztráty způsobené momentem setrvačnosti rotujících částí při změnách úhlové rychlosti. Proto slouží pouze pro orientační odhady. V praxi se ve většině případů používají senzory, které měří účinky momentu. [11]

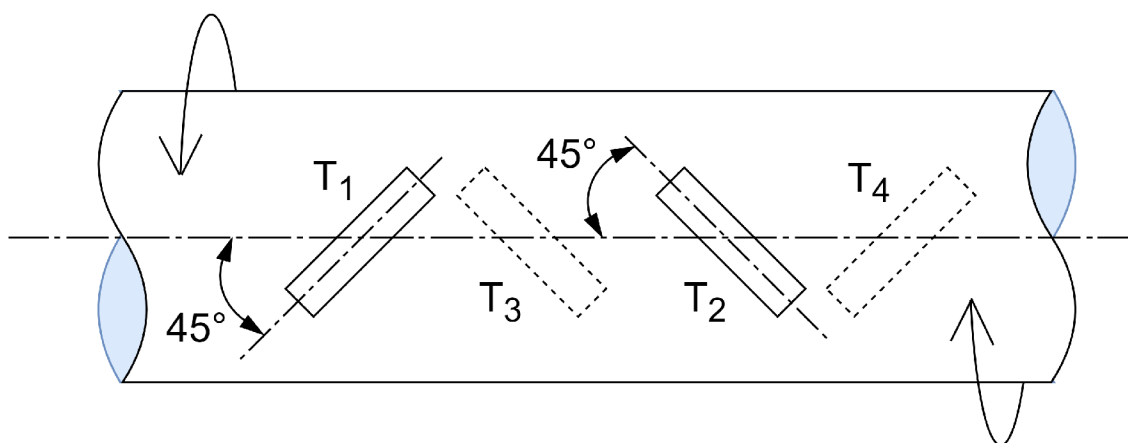


3.1.2 Senzory momentu s odporovými tenzometry

Senzory točivého momentu s odporovými tenzometry měří buď přímo deformaci hřídele mezi motorem a zátěží, nebo je měřena deformace speciálně tvarovaného torzního pružného členu vloženého mezi motor a zátěž. [11]

Odporové tenzometry se nalepují na hřídel nebo na pružný člen. Pro dosažení nejvyšší citlivosti jsou nalepeny čtyři tenzometry pod úhlem 45° k ose hřídele (viz obrázek 3.1). Tenzometry jsou zapojeny do plného můstku, kde se využívá dvou opačných deformací - tahu a tlaku. Při působení točivého momentu ve směru hodinových ručiček jsou tenzometry T_1 a T_3 namáhány v tahu a na tenzometry T_2 a T_4 působí tlak. [11] [12]

Takovéto uspořádání tenzometrů nejvíce kompenzuje vliv teplotní roztažnosti a deformací při ohybu. Přenos signálu z rotující části do vnějšího měřicího obvodu se provádí pomocí kartáčků a kroužků. Senzory točivého momentu s odporovými tenzometry dosahují v porovnání s jinými principy největší přesnosti a dlouhodobé stability. [11] [13]



Obrázek 3.1: Umístění čtyř tenzometrů na hřídeli pro měření točivého momentu

3.1.3 Senzory s přenosem momentu na úhel

Senzory s převodem momentu na úhel měří změnu úhlu při deformaci hřídele nebo pružného členu, která je vyvolána působením točivého momentu. Na hřídeli, popř. pružném členu jsou umístěny značky, jejichž vzájemné natočení se mění v závislosti na změně velikosti působícího točivého momentu. Úhel natočení značek je nejčastěji bezdotykově snímán indukčnostními nebo optickými čidly. V případě indukčnostních čidel jako značky slouží dvě ozubená kola z feromagnetického materiálu, která jsou umístěna na hřídeli v určité vzdálenosti od sebe. Proti ozubeným kolům jsou umístěny dvě indukčnostní čidla. V důsledku otáčení hřídele a střídáním zubů a mezer vznikají v čidlech periodické změny vlastních indukčností. Obvody, které měří indukčnost indukčnostních čidel, upraví výstupní signály do tvaru dvou sledů impulzů. Následně se měří vzájemné zpoždění těchto signálů, ze kterého se odvodí údaje potřebné pro výpočet točivého momentu. [11]

3.2 Snímače otáček

3.2.1 Inkrementální snímač polohy

Rotační inkrementální snímač nebo také inkrementální enkodér je optoelektronický snímač polohy, který převádí rotační posuv na elektrické signály. Inkrementální snímač se skládá z rotujícího disku, zdroje světla a fotodetektoru. Na rotujícím disku připevněném na hřídeli je vytvořen pravidelný vzor z průhledných a neprůhledných proužků. Při otáčení disku neprůhledné proužky přerušují světlo vyzařované na fotodetektor a tím jsou generovány výstupní elektrické signály. Inkrementální snímač generuje pulz pro každý inkrementální krok. [11] [14]

Nejběžnější typ inkrementálního enkodéru používá dva výstupní kanály (A a B) ke snímání polohy a třetí výstupní kanál, nazývaný nulový nebo referenční signál. Signály A a B jsou od sebe navzájem posunuté o fázi 90° . Čítáním impulzů lze sledovat polohu a díky vzájemnému posunutí je možné sledovat i směr otáčení. Referenční signál dodává jeden impuls na otáčku, který lze použít pro přesné určení

referenční polohy. [11] [14]

3.2.2 Absolutní snímač

Absolutní snímač polohy je stejně jako inkrementální snímač založen na optoelektronickém principu. Také jeho konstrukce je podobná konstrukci inkrementálního snímače. Rotační disk absolutního snímače je však rozdělen do několika stop, přičemž každá ze stop obsahuje průsvitné a neprůsvitné proužky. Tyto proužky na rotačním disku tvoří kódovací obrazec, který každé poloze rotoru přiřazuje určitou binární hodnotu. Kódovací obrazec je z jedné strany prosvětlován a na druhé straně se světlo detekuje fotocitlivými prvky. [11]

Při konstruování absolutního snímače se musí dbát na přesné umístění snímacích prvků, které musí přesně sledovat poloměr snímané stopy. Při nedodržení přesnosti mohou některé fotodetektory snímat sousední stopy a může tak dojít k hazardním stavům. Kódovací obrazce se nejčastěji tvoří použitím Grayova kódu, ve kterém se každé dvě sousední polohy liší pouze v jednom bitu. Případné vzniklé chyby se tak dají snadno detekovat a opravovat. [11]

3.2.3 Resolver

Resolver je rotační elektrický transformátor používaný k měření absolutní úhlové polohy. Nejběžnější typ je bezkomutátorový resolver napájený do rotoru, který se skládá s primárního vinutí, referenčního vinutí a dvou sekundárních vinutí (sin a cos). V bezkomutátorovém resolveru je elektrická energie přiváděna do referenčního vinutí nacházejícího se na rotoru přes rotační transformátor. Sekundární vinutí sin a cos jsou umístěna ve statoru a jsou od sebe mechanicky posunuta o 90° . Referenční vinutí rotoru je buzeno střídavým napětím U_{ref} . Indukovaná napětí ve vinutích statoru sin a cos odpovídají hodnotě referenčního napětí U_{ref} vynásobené sin nebo cos úhlu natočení hřídele rotoru vztaženému k pevnému nulovému bodu. Resolver poskytuje dvě výstupní napětí, z jejichž poměru je určena absolutní poloha hřídele rotoru



$$\frac{U_s}{U_c} = \frac{U_{ref} \cdot \sin(\Phi)}{U_{ref} \cdot \cos(\Phi)} = \frac{\sin(\Phi)}{\cos(\Phi)} = \operatorname{tg}(\Phi) \quad (3.3)$$

kde Φ je úhel natočení hřídele. Jelikož je uvažován poměr napětí, eliminují se jakékoli změny v charakteristikách resolverů, ať už jsou způsobené opotřebením nebo změnou teploty. [15]

3.2.4 Tachodynamo

Tachodynamo je stejnosměrný elektrický stroj s permanentními magnety specificky konstruovaný pro měření úhlové rychlosti. Tachodynamo pracuje v generátorickém režimu. V důsledku otáčení rotoru v magnetickém poli statoru dochází k indukovaní napětí na kotvě. Indukované napětí na sběrných kartáčích stroje je úměrné rychlosti otáčení podle vztahu 1.1 uvedeném v první kapitole. Jelikož magnetický tok pole statoru s permanentními magnety je konstantní, lze indukované napětí tachodynamo popsat rovnicí

$$U_i = k_{TD} \cdot \omega \quad (3.4)$$

kde k_{TD} je konstanta tachodynamo. Polarita indukovaného napětí indikuje směr otáčení. Pro optimální funkci tachodynamo je nutné jeho minimální zatěžování, jelikož v důsledku přílišného zatěžování roste nelinearita a zvlnění indukovaného napětí. [11]

4 Návrh možných řešení

Návrh dynamometru se řídil parametry vzorků motorů dodané firmou. Požadované parametry dynamometru byly

- maximální točivý moment 1 N m,
- maximální počet otáček za minutu 10 000 min⁻¹.

Těžištěm návrhu bylo vytipování přesného snímače jakož i brzdného systému.

4.1 Dynamometr s hysterezní brzdou

4.1.1 Senzor točivého momentu

Ústředním prvkem navrženého dynamometru je senzor točivého momentu. Na základě požadavků na dynamometr byl vytipován momentový senzor TS-105 od společnosti Magtrol. Senzor kromě momentového čidla disponuje také inkrementálním enkodérem a udává tedy i informaci o poloze rotoru. Specifikace senzoru TS-105:

- maximální točivý moment 2 N m,
- maximální počet otáček za minutu 15 000 min⁻¹.

4.1.2 Hysterezní brzdy

V kapitole 2 je pojednáno o třech typech dynamometrů a jejich brzdných systémech. Na základě požadavků na dynamometr byly vytipovány dva typy hysterezních brzd od společnosti Magtrol. Společnost Magtrol nabízí dvě typové řady hysterezních





Obrázek 4.1: Senzor točivého momentu řady TS společnosti Magtrol [17]

brzd s chlazením. V závislosti na typové řadě je chlazení brzd zajištěno tlakovým vzduchem nebo speciálním ventilátorem:

- řada AHB – brzdy chlazené tlakovým vzduchem,
- řada BHB – brzdy chlazené ventilátorem.

Řada BHB nenabízí brzdu s nižším točivým momentem než jsou 3 N m. Taková brzda by byla z hlediska požadavku 1 N m třikrát předimenzovaná. To by v tomto případě znamenalo i více než třikrát vyšší náklady. Z toho důvodu byla vytipována brzda z typové řady AHB, konkrétně AHB-1, která má následující parametry:

- minimální točivý moment 1 N m při jmenovitém proudu,
- maximální počet otáček za minutu 25 000 min⁻¹,
- jmenovitý proud 400 mA.

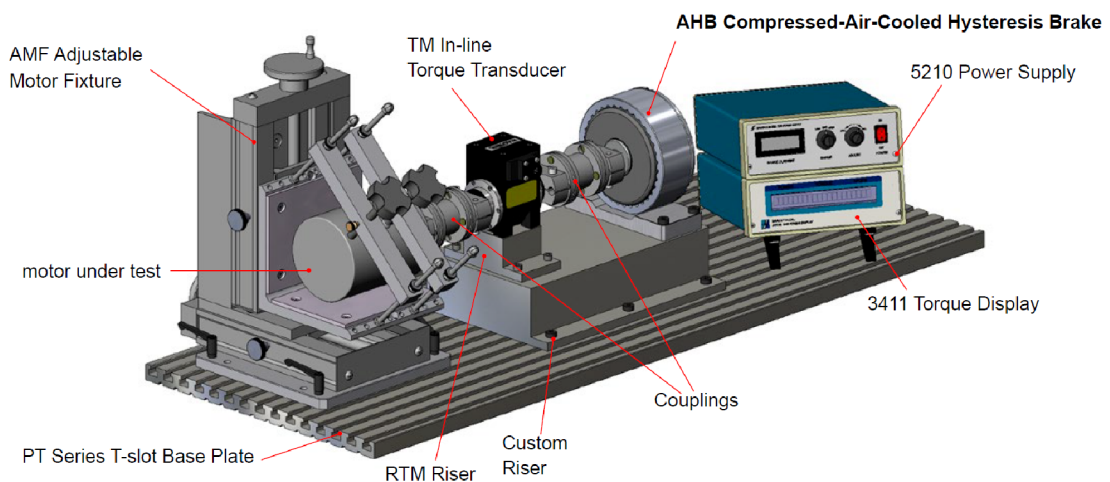
Podmínkou chlazení brzdy AHB-1 je zajištění přívodu tlakového vzduchu minimálně 6,21 barů, 283 litrů/min.

4.1.3 Uspořádání řídicího systému s hysterezní brzdou

Na základě vytipovaných hysterezních brzd a senzoru točivého momentu se dle manuálu společnosti Magtrol nabízejí dvě uspořádání systému určeného k měření motorů. Jeden z návrhů nabízí řízení s otevřenou smyčkou a druhý řízení s uzavřenou smyčkou.

Komponenty systému s otevřenou smyčkou jsou následující:

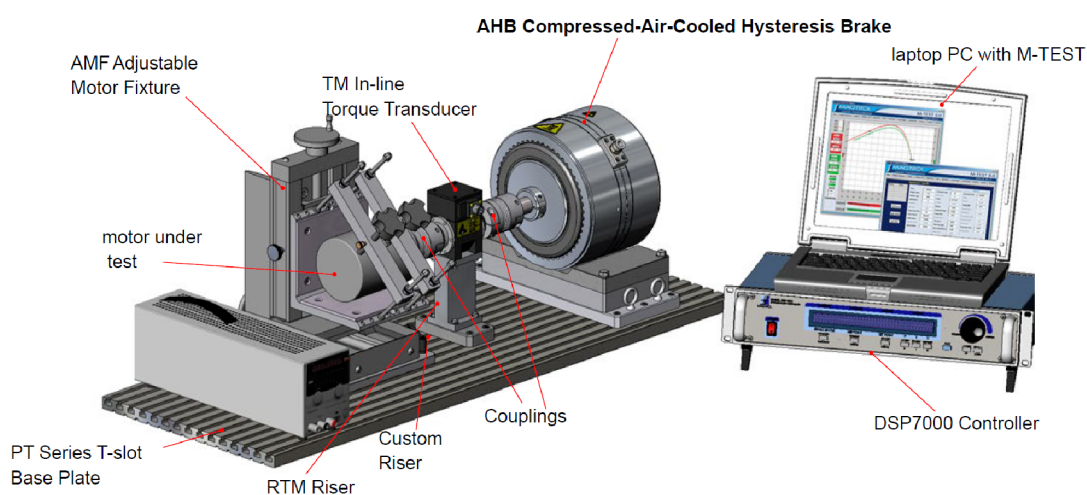
- senzor momentu TS-105,
- vzduchem chlazená hysterezní brzda AHB-1,
- napájecí zdroj VM6,
- spojky MIC-5-0156 (2 kusy),
- software torque-10.



Obrázek 4.2: Konfigurace systému s otevřenou smyčkou [16]

Komponenty systému s uzavřenou smyčkou jsou následující:

- řadič DSP-7001-0-0,
- software M-Test7.0,
- senzor momentu TS-105,
- vzduchem chlazená hysterezní brzda AHB-1,
- spojky MIC-5-0156 (2 kusy),
- kabel ER121, 3 metry (mezi TS a DSP).



Obrázek 4.3: Konfigurace systému s uzavřenou smyčkou [16]

4.1.4 Východiska návrhu dynamometru s hysterezní brzdou

Typ hysterezní brzdy chlazené tlakovým vzduchem byl firmou zamítnut z důvodu vysoké spotřeby tlakového vzduchu, který firma v laboratoři, kde bude testování motorů probíhat, nemá k dispozici. Typ brzdy chlazené ventilátorem nebyl společností přijat z důvodu hluku, který ventilátor vydává.

4.2 Dynamometr se zatěžovacím motorem

Po zamítnutí návrhů dynamometrů s hysterezní brzdou byl vytvořen alternativní návrh dynamometru s brzdícím systémem v podobě motoru. Podle [6] je takový návrh dynamometru také možný. Jako motor brzdícího systému se předpokládá použití nejsilnějšího motoru, který byl určen k testování.

Návrh dynamometru se zatěžovacím motorem popisuje blokové schéma na obrázku 4.4. Testovaný a zatěžovací motor jsou hřídelemi přes pružné spojky připojeny k senzoru točivého momentu.

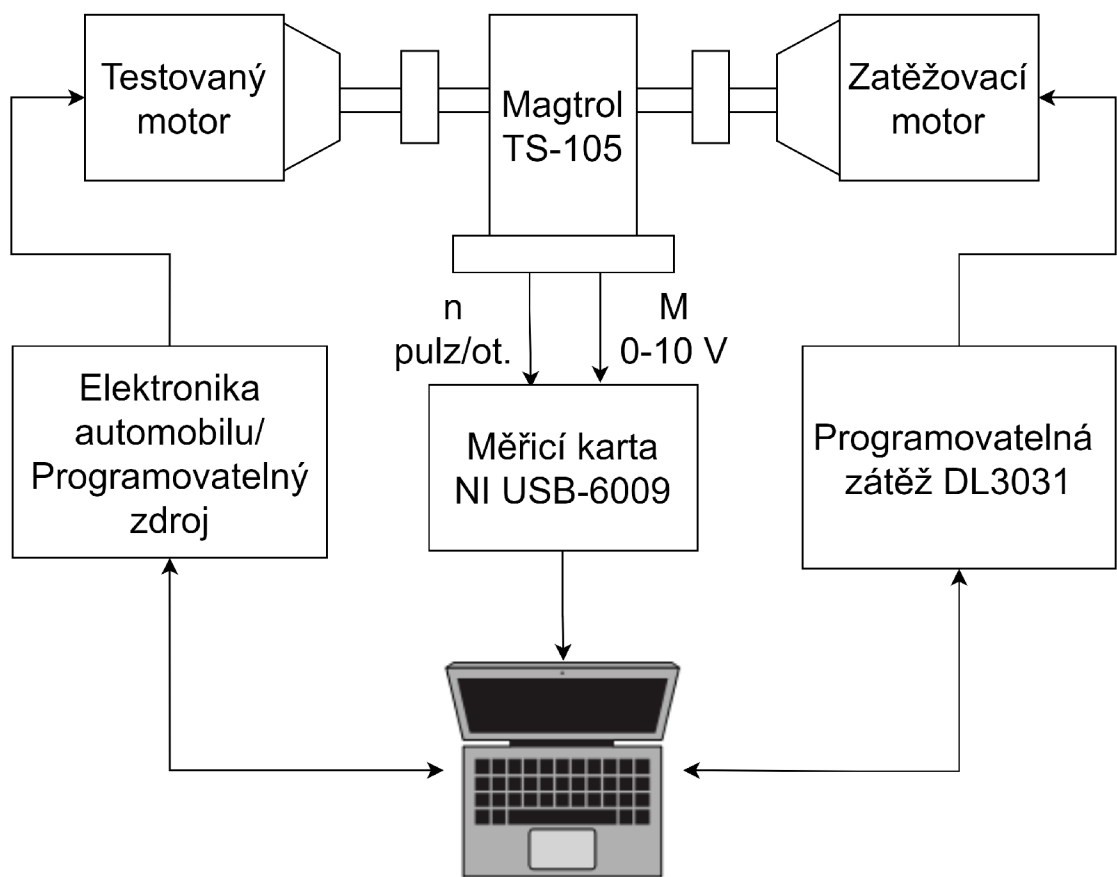
Při zkoušce motoru bude testovaný motor napájený zdrojem napětí. V důsledku otáčení motoru se v obvodu kotvy zatěžovacího stroje bude indukovat napětí. Změnou velikosti zátěže v obvodu kotvy lze měnit velikost proudu kotvy. Řízení zátěže je v návrhu řešeno programovatelnou elektronickou zátěží.

Během zkoušek ve firmě bude testovaný motor napájený přímo elektronikou automobilu. V návrhu tedy nebylo nutné vytipovávat napájecí zdroj pro testovaný motor. Při testování automatické zkoušky v kapitole 7.4.1 byl využit programovatelný laboratorní zdroj dostupný na TUL.

Programovatelná elektronická zátěž byla vytipována na základě charakteristiky nejsilnějšího testovaného motoru. Charakteristiku motoru v této práci není možné uvést, ale počítá se maximálním proudem kotvy 30 A (při napájecím napětí motoru 12,5 V). Vytipována byla programovatelná zátěž Rigol DL3031 s rozsahem 150 V/60 A, maximální výkon zátěže je však 350 W.

Senzor točivého momentu, který byl popsán v 4.1.1, je vhodným řešením i pro měření točivého momentu v návrhu dynamometru se zatěžovacím motorem. Ke čtení analogových hodnot momentu a otáček ze senzoru TS-105 slouží měřicí karta National Instruments USB-6009.





Obrázek 4.4: Blokové schéma navrženého dynamometru

5 Měření motoru ventilátoru

Návrh, kde je zatěžovací systém dynamometru realizován motorem, byl zapotřebí ověřit měřeními. Bylo nutné změřit určité charakteristiky motoru a zjistit, zda je možné tímto motorem zatěžovat motor se stejnými parametry. Měření byl podroben stejnosměrný komutátorový motor s permanentními magnety. Zvolen byl jeden z několika motorů, které firma v klimatizačních jednotkách jako pohon ventilátoru používá.

Tabulka 5.1: Seznam použitých přístrojů

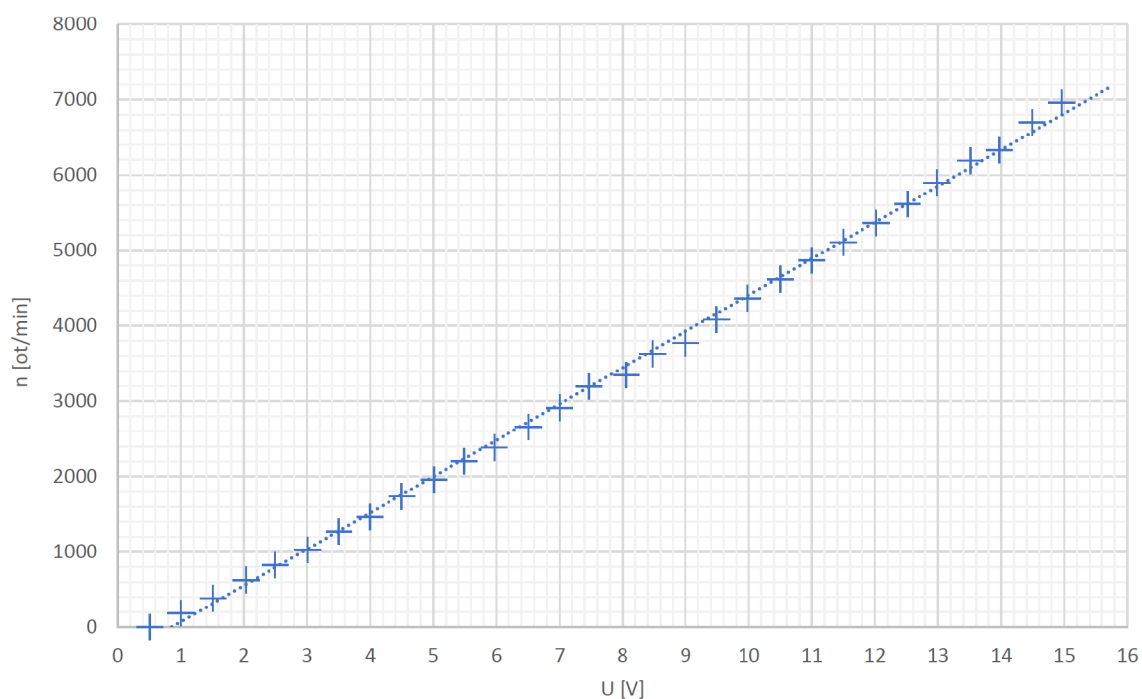
Označení	Název	Výrobní číslo
U_1	Laboratorní zdroj Zhaoxin KXN-6020D	0755-82780800
A_1	Číslicový multimetr AXIOMET AX-582B	093371095
V_1	Číslicový multimetr UNI-T UT71B	817035530
V_2	Číslicový multimetr UNI-T UT71B	817035533
O_1	Univerzální průmyslový otáčkoměr Chauvin Arnoux C.A 1727	



5.1 Měření naprázdno

První měření, které na motoru bylo provedeno, bylo naprázdno, tedy bez zátěže na hřídeli. Motor byl připojen k laboratornímu zdroji, na kterém se nastavovaly hodnoty napětí od 0 V do 14 V po 0,5 V. Pro každé nastavené napětí byl multimetrem A_1 (viz tabulka 5.1) změřen motorem odebíraný proud ze zdroje a otáčkoměrem O_1 změřeny otáčky motoru. K měření otáček byl použit otáčkoměr, který pracuje na principu detekce odraženého infračerveného paprsku (konkrétní typ je uveden v tabulce 5.1).

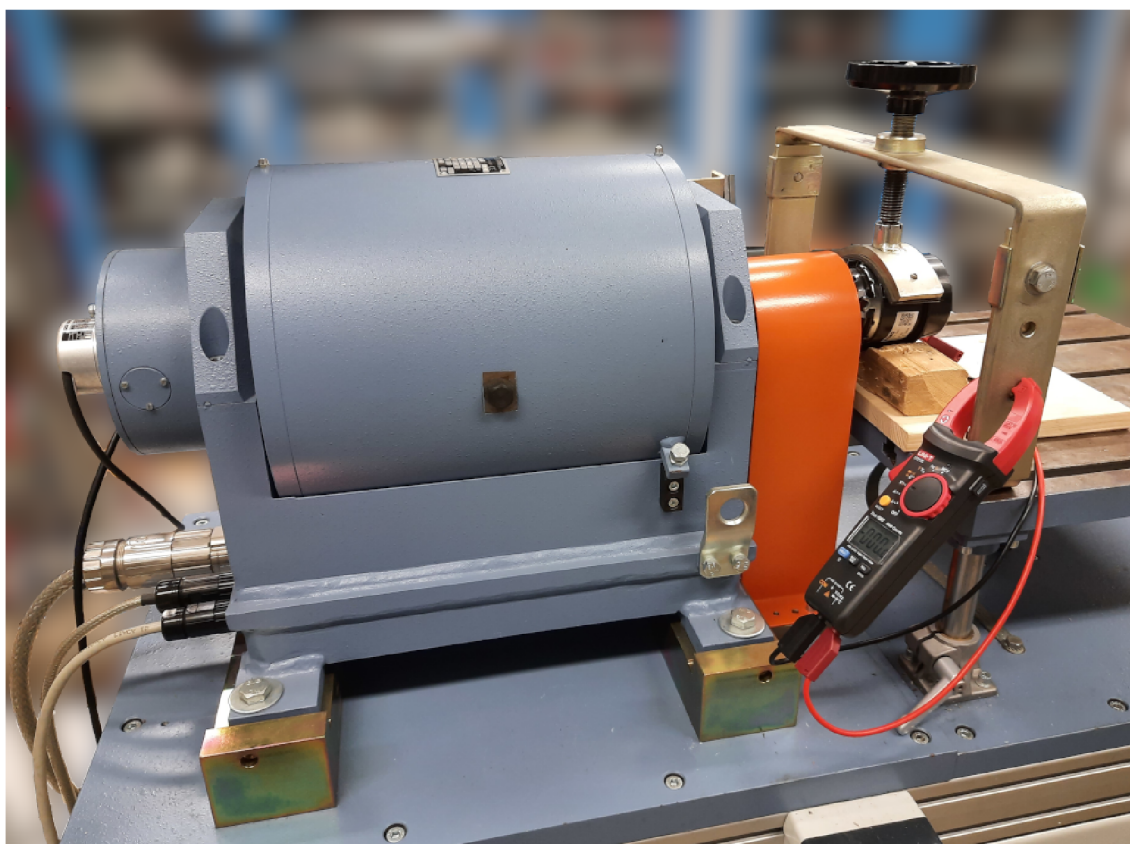
Výsledek měření v podobě grafu je zpracovaný na obrázku 5.1. Na nezávislou osu grafu je vykresleno napětí zdroje, a změřené výstupní hodnoty počtu otáček za minutu jsou vyneseny na závislou osu grafu.



Obrázek 5.1: Graf závislosti počtu otáček za minutu na napětí při chodu naprázdno

5.2 Měření vlastních ztrát dynamometru

V následujících několika měřeních byl motor podroben testování na dynamometru v laboratoři (A001) na TUL. Tento dynamometr má výkon 6,3 kW a vzhledem k měřenému motoru o výkonu v řádu 10^2 W je příliš velkých rozměrů. Z toho důvodu bylo zapotřebí změřit vlastní ztráty tohoto dynamometru. Při měřeních na dynamometru byl motor uchycen k desce sloužící k měření motorů, a jeho hřídel byla připevněna k hřídeli dynamometru pomocí pružných spojek. Obrázek 5.2 znázorňuje upnutí motoru k dynamometru a orientační měření napěťové konstanty motoru.

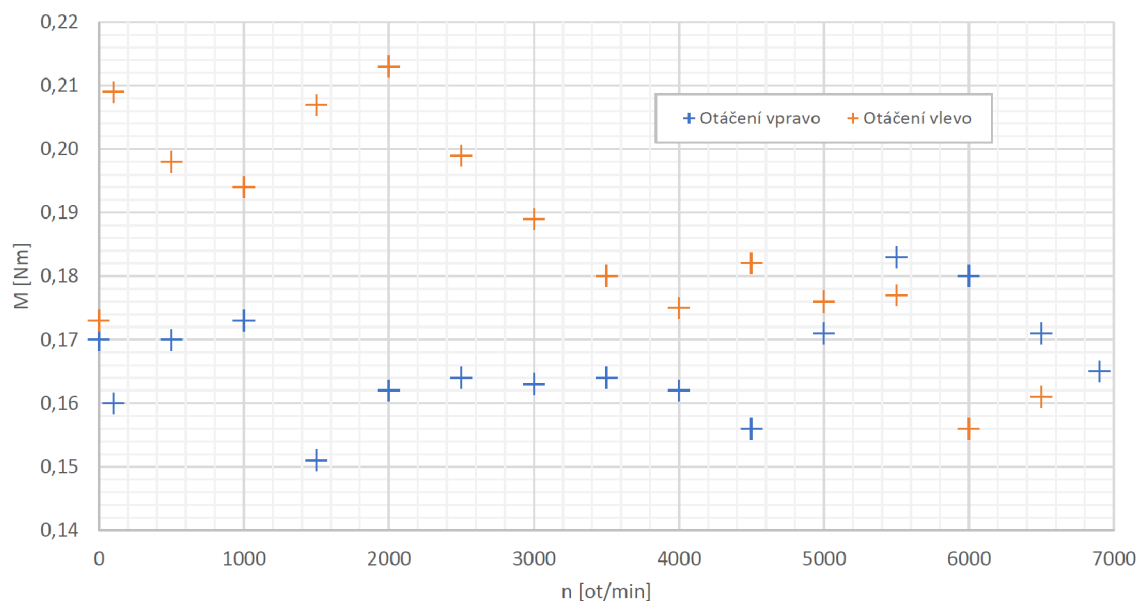


Obrázek 5.2: Testování motoru na dynamometru

Na dynamometru byl nastavován počet otáček za minutu od 0 do 6500 min^{-1} , převážně po 500 min^{-1} (viz graf na obrázku 5.3).

Vlastní ztráty dynamometru příliš nevykazovaly otáčkovou závislost, jako infor-

mace o vlastních ztrátách tedy dobře poslouží průměry hodnot pro oba směry. Pro směr otáčení vpravo to je 0,167 N m a pro směr otáčení vlevo 0,186 N m.



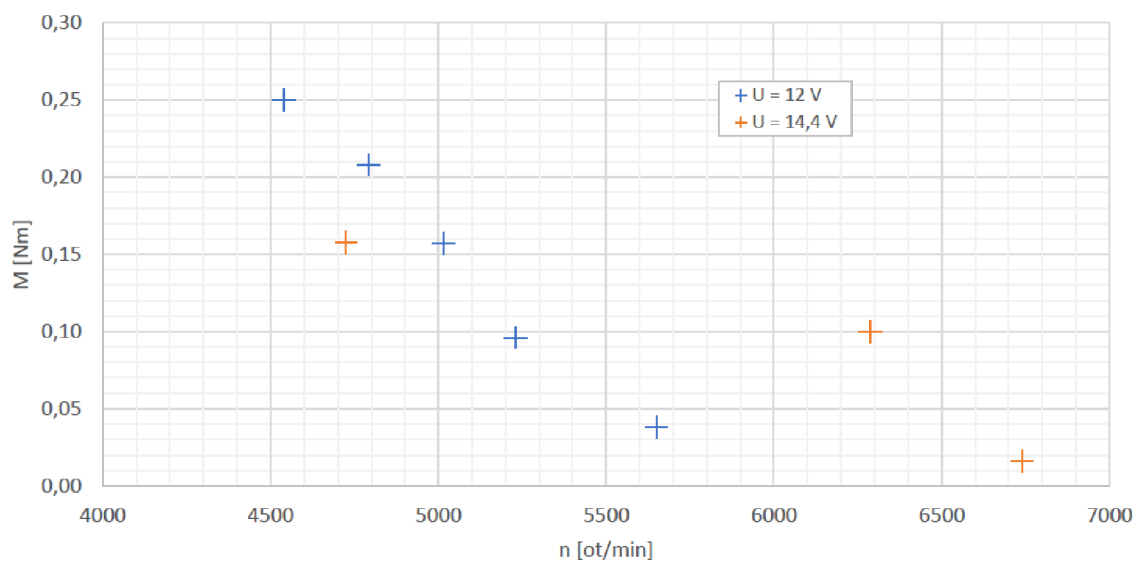
Obrázek 5.3: Vlastní ztráty dynamometru v závislosti na počtu otáček za minutu

5.3 Měření motoru v brzděném režimu

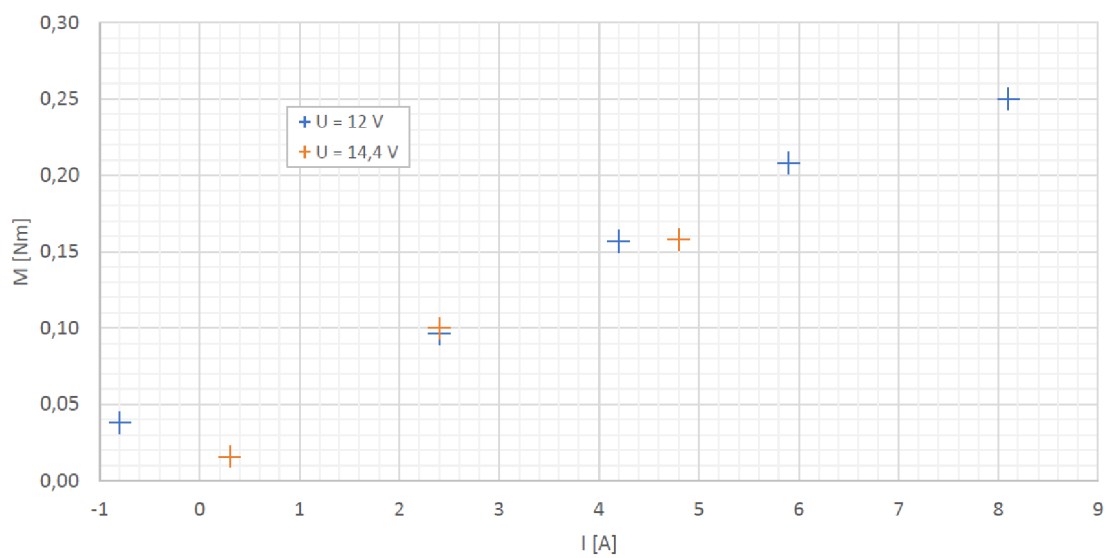
V této části měření byl motor připojen na zdroj napětí. Na napájecím zdroji motoru byla postupně nastavena dvě různá napětí, nejprve 12 V, poté 14,4 V (typická napětí pro autobaterie). Na dynamometru byl nastavován točivý moment. Počet otáček motoru byl vyčítán na dynamometru a proud kotvy přímo na napájecím zdroji motoru.

Výsledky měření jsou interpretovány momentovou charakteristikou (graf na obrázku 5.4) a závislostí momentu na proudu (graf na obrázku 5.5).

Podařilo se změřit jen několik bodů charakteristik, jelikož došlo k utavení plastových spojek motoru. Podrobněji zpracovaná závislost momentu na proudu je popsána v následující podkapitole.



Obrázek 5.4: Momentová charakteristika



Obrázek 5.5: Závislost momentu na proudu

5.4 Měření nakrátko

Cílem tohoto měření bylo změřit charakteristiku závislosti točivého momentu motoru na proudu kotvy a zjistit tak, jaká velikost momentu odpovídá určité velikosti proudu.

Při měření nakrátko byl motor upevněn ke stolu pomocí truhlářské svěrky. Na hřídel motoru byla uchycena páka, která byla vytisknuta na 3D tiskárně. Hrot páky směřoval do středu laboratorní váhy. Uspořádání měření znázorňuje fotografie na obrázku 5.6.

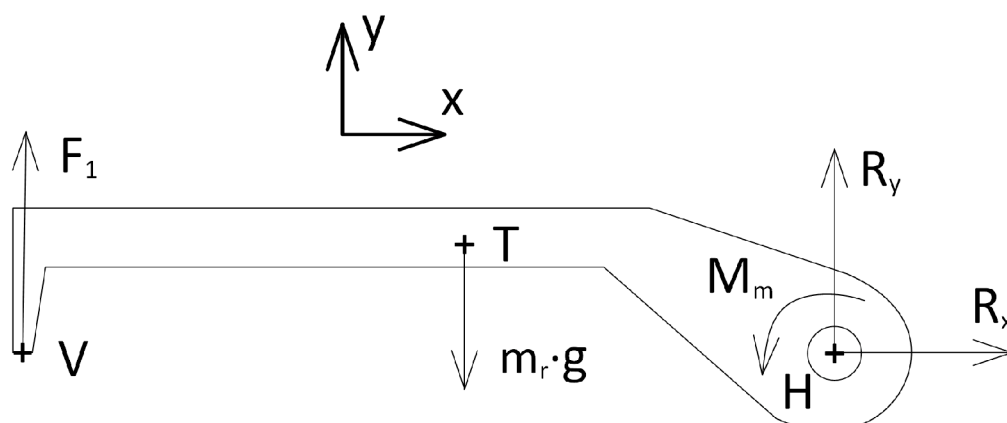


Obrázek 5.6: Ukázka měření motoru nakrátko

Měření momentu je zde založeno na jednoduchém principu působení páky na laboratorní váhu. Na laboratorním zdroji byl nastavován proud kotvy a na váze byla odečítána hmotnost. Byla provedena tři měření. Hodnota proudu kotvy byla nastavována od 0,5 A do 10 A, převážně po 0,5 A (u druhého měření po 1 A).

Z naměřených dat hmotnosti bylo třeba určit hodnoty momentu motoru. Na obrázku 5.7 je znázorněno působení sil a momentů na páku připevněnou na hřídeli

motoru.



Obrázek 5.7: Znázornění sil a momentu působících na páku

Působení sil a momentů na páku připevněnou na hřídeli motoru lze popsat dvěma rovnicemi sil a jednou rovnicí momentů sil. Rovnice 5.1 popisuje silové působení na páku v ose x , rovnice 5.2 v ose y

$$R_x = 0 \quad (5.1)$$

$$F_1 - m_r \cdot g + R_y = 0 \quad (5.2)$$

Pro momenty sil vztahené k bodu H (střed hřídele) platí rovnice

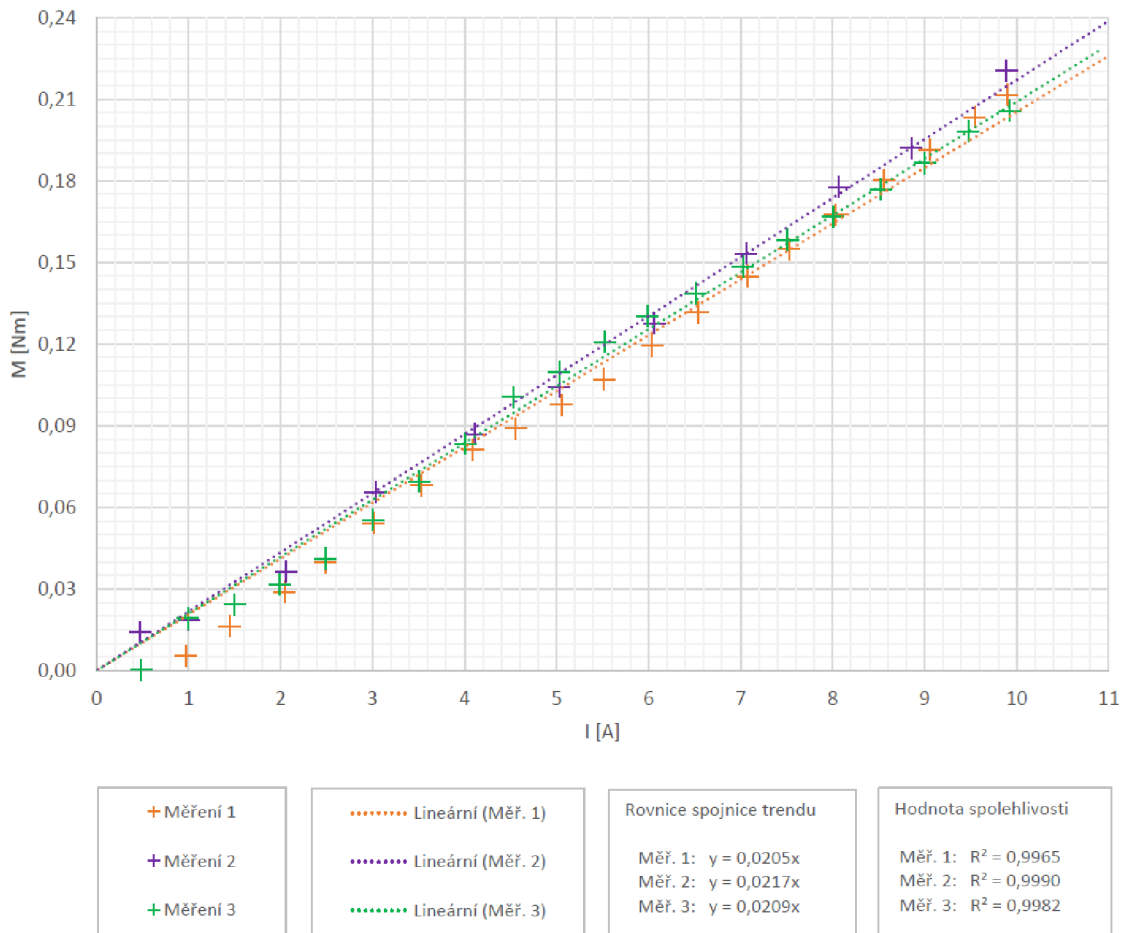
$$-F_1 \cdot l_r + m_r \cdot g \cdot l_t + M_m = 0 \quad (5.3)$$

kde F_1 je síla působící ramenem na váhu, l_r je délka ramene páky, m_r je hmotnost dílu páky, g je gravitační zrychlení, l_t je vzdálenost těžiště páky od hřídele motoru a M_m je moment motoru.

K určení momentu motoru postačí pouze momentové rovnice 5.3. Sílu F_1 působící ramenem na váhu lze vyjádřit jako součin hmotnosti naměřené na váze m_v a gravitačního zrychlení g . Dosazením tohoto vztahu do rovnice 5.3 a následnou úpravou a vyjádřením momentu motoru M_m získáme tvar pro vypočítání tohoto momentu

$$M_m = g \cdot (m_v \cdot l_r - m_r \cdot l_t) \quad (5.4)$$

Naměřená data hmotnosti byla podle tohoto vztahu přepočítána na moment motoru a výsledky byly vyneseny v závislosti na proudu kotvy do grafu na obrázku 5.8. Graf zobrazuje všechna tři měření. Body ze všech třech měření jsou proloženy přímkami procházejícími počátkem souřadného systému.



Obrázek 5.8: Závislost momentu na proudu při měření nakrátko

6 Testování návrhu dynamometru

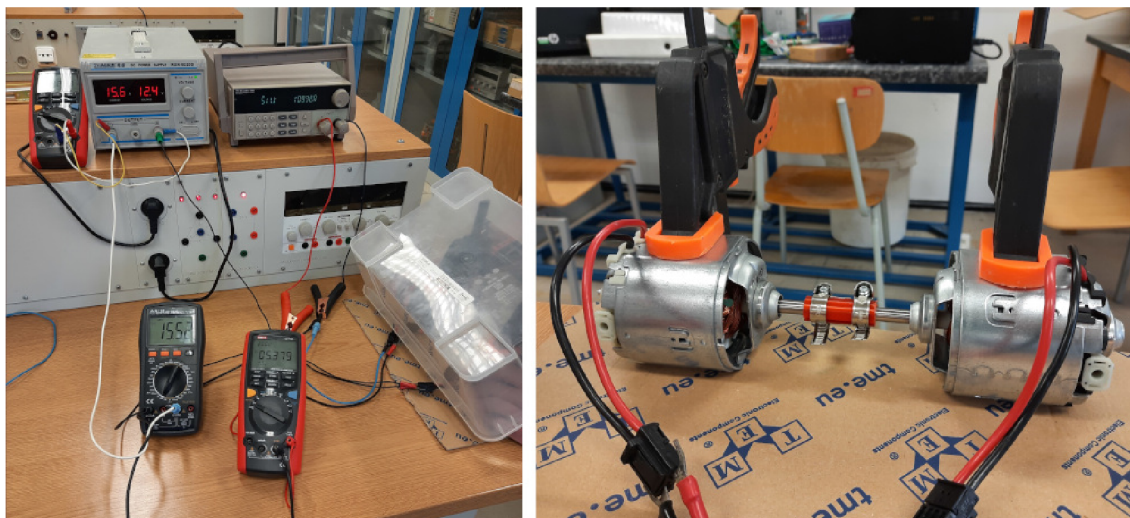
Mechanický návrh zatěžovací stolice, sloužící k upevnění motorů a senzoru momentu k jejich hřídelím, zajišťuje firma, která na tuto práci vznesla požadavek. Zatěžovací stolice v době realizace práce nebyla k dispozici, a proto se při testování návrhu dynamometru bylo nutné uchýlit k provizornímu řešení. Testování nebylo možné provést s pořízeným senzorem momentu TS-105 Magtrol, jelikož jej nebylo možné upevnit tak, aby byla zajištěna dostatečná tuhost spojení, a mohlo by dojít k jeho případnému poškození.

6.1 Popis testování

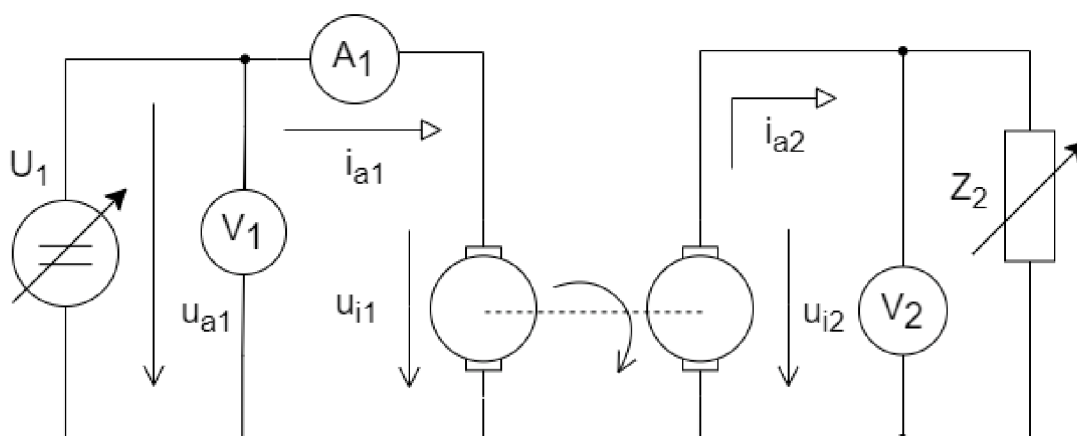
Hřídele motorů byly spojeny těsnou spojkou vytištěnou na 3D tiskárně. K zajištění pevnějšího spojení byla spojka ke hřídelím přitažena nerezovou stahovací páskou. Spojené motory byly připevněny ke stolu pomocí truhlářských svěrek (viz fotografie na obrázku 6.1).

Na obrázku 6.2 je znázorněno elektrické schéma zapojení motorů při testování. Testovaný motor byl připojen ke 20A laboratornímu zdroji napětí U_1 . Motor sloužící k zatěžování byl připojen k 15A elektronické laboratorní zátěži Z_2 . Multimetr označený jako V_1 slouží k přesnému nastavení svorkového napětí na laboratorním zdroji u_{a1} , multimetr A_1 měří proud kotvy i_{a1} testovaného motoru a multimetrem se značkou V_2 je měřeno indukované napětí v obvodu kotvy testovaného motoru u_{i2} . Soupis použitých přístrojů během testování je uveden v tabulce 6.1.





Obrázek 6.1: Testování návrhu dynamometru



Obrázek 6.2: Schéma zapojení při testování návrhu

Tabulka 6.1: Seznam použitých přístrojů

Označení	Název	Výrobní číslo
U_1	Laboratorní zdroj Zhaoxin KXN-6020D	0755-82780800
Z_2	Elektronická laboratorní zátěž ITECH IT8512B	002012176177001004
A_1	Číslicový multimetr AXIOMET AX-582B	093371095
V_1	Číslicový multimetr UNI-T UT71B	817035530
V_2	Číslicový multimetr UNI-T UT71B	817035533

Na zdroji testovaného motoru bylo nastaveno napětí $u_{a1} = 12,5$ V, tedy nominální hodnota napětí uvedena u momentové charakteristiky v katalogu motoru. Elektronickou zátěží byl nastaven proud kotvou zatěžovacího motoru $i_{a2} = 15$ A, tedy maximální proud dostupné zátěže.

Testování spočívalo ve snižování proudu kotvou zatěžovacího motoru i_{a2} po 1 A, přičemž byl měřen proud kotvou testovaného motoru i_{a1} a měřeno indukované napětí na zatěžovacím motoru u_{i2} .

6.2 Vyhodnocení výsledků testování

Jelikož při testování nebylo možné použít senzor momentu obsahující inkrementální enkodér byly informace o točivém momentu a otáčkách vypočítány z naměřených hodnot napětí a proudu. Počet otáček za minutu byl vypočítán z naměřených dat indukovaného napětí na zatěžovacím motoru podle vztahu 6.1. Velikost točivého momentu byla vypočítána z naměřených dat proudu kotvy měřeného motoru podle vztahu 6.2. Takto vypočítané hodnoty jsou však jen orientační.

$$U_i = k\Phi\omega = \frac{2\pi nk\Phi}{60} = k_u \cdot n \quad (6.1)$$

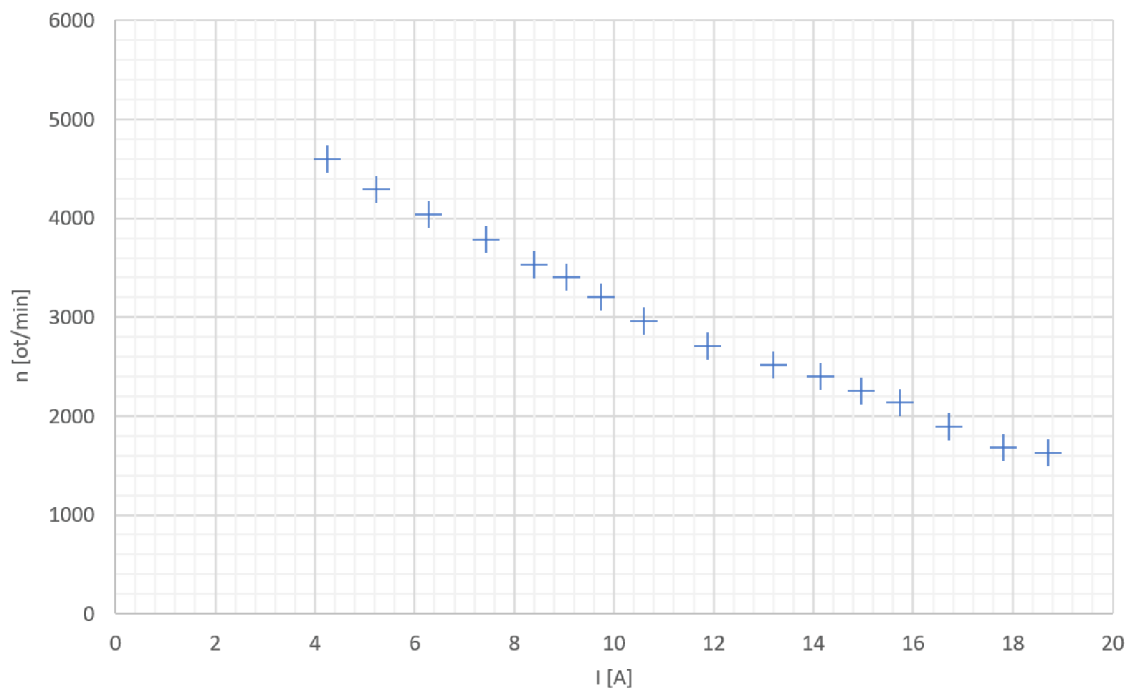
$$M = k \cdot \Phi \cdot I = k_m \cdot I \quad (6.2)$$



Uvedené vztahy vychází ze vztahů popsaných v kapitole 1.1. Konstanta indukovaného napětí k_u a momentová konstanta k_m jsou určeny na základě naměřených charakteristik uvedených v kapitole 5.

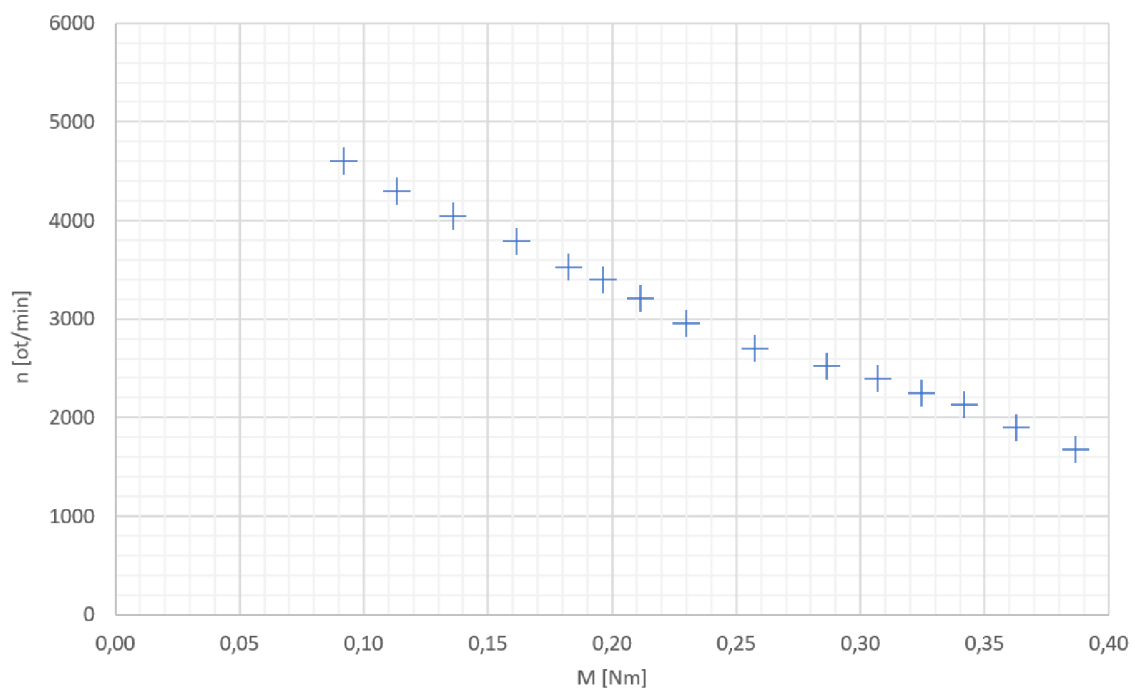
$$k_u \sim 2,265 \cdot 10^{-3} \text{ V min}$$

$$k_m \sim 0,0217 \text{ N m A}^{-1}$$



Obrázek 6.3: Rychlostní charakteristika naměřená při testování návrhu

Testování bylo omezeno jednak dostupným zdrojem 20 A a jednak zátěží 15 A (300 W)(viz tabulka 6.1). Užitým mechanickým upevněním motorů bylo dosaženo malé tuhosti spojení. Počet otáček za minutu a hodnoty točivého momentu byly určeny pouze orientačně, k přesnému měření slouží senzor momentu TS-105 Magtrol. Měření však sloužilo pouze k ověření návrhu dynamometru, především ověření způsobu zatěžování zatěžovacího motoru elektronickou zátěží v obvodu kotvy.



Obrázek 6.4: Momentová charakteristika naměřená při testování návrhu

7 Aplikace pro řízení dynamometru

Pro usnadnění řízení dynamometru byla vytvořena aplikace Windows Forms (.NET Framework verze 4.7.2.). K vytvoření aplikace bylo využito vývojové prostředí Microsoft Visual Studio 2022. Zdrojový kód aplikace je psaný v programovacím jazyce C#. V jedné aplikaci je integrováno řízení programovatelného zdroje, řízení programovatelné zátěže a čtení dat z měřicí karty. Měřicí karta má za úkol vyčítat data ze senzoru momentu.

Dynamometr je možné řídit manuálně, a to nastavením napětí a proudového omezení na testovaném motoru, a změnou proudu zátěže měnit velikost zatížení testovaného motoru. Aplikace dokáže provést automatickou zkoušku motoru, během které se proud zátěží mění v závislosti na nastavených parametrech.

7.1 Grafické uživatelské rozhraní

Součástí aplikace je grafické uživatelské rozhraní (GUI), které slouží pro snadné ovládání aplikace. GUI je rozděleno do tří částí. Levá část slouží ke komunikaci s programovatelným zdrojem, pravá část ke komunikaci s programovatelnou zátěží a uprostřed se nachází jednak část zobrazující data ze senzoru momentu naměřené měřicí kartou a také část určena ke spouštění měření a automatické zkoušky. Podrobnější popis GUI a návod na ovládání aplikace je v příloze A.



7.2 Komunikace s přístroji

Aby mohla připojená zařízení komunikovat s aplikací v počítači, je nutné do počítače nainstalovat příslušné ovladače těchto přístrojů. Nainstalován byl ovladač NI-Visa, který je využíván ke komunikaci se zdrojem a se zátěží a ovladač NI-DAQmx využíváný pro komunikaci s měřicí kartou. Při sestavování aplikace je ve MS Visual Studiu nutné v *Průzkumníku řešení* přidat odkazy na jmenné prostory *NationalInstruments.DAQmx.dll* a *NationalInstruments.Visa.dll* příslušných ovladačů a v hlavičce zdrojového kódu na tyto jmenné prostory odkázat použitím: `using NationalInstruments.DAQmx;` a `using NationalInstruments.Visa;`.

Koncepce dynamometru při sestavování aplikace se od koncepce návrhu dynamometru popsaného v kapitole 4.2 liší použitím programovatelného zdroje (nahrazujícího elektroniku automobilu) a jiného typu programovatelné zátěže, jelikož byla použita zařízení, která byla na TUL k dispozici a pro sestavování aplikace zcela vyhovují. Pro řízení testovaného motoru byl použit programovatelný laboratorní zdroj Rigol DP811A a jako elektronická zátěž byl využit obousměrný programovatelný zdroj ITECH IT6018C-800-60, který dokáže pracovat jako zdroj i jako zátěž.

Komunikace se zdrojem a zátěží je zprostředkována pomocí USB rozhraní a děje se pomocí standardních příkazů pro programovatelné přístroje (SCPI) [18].

7.3 Měření

V aplikaci je možné spustit měření, během kterého jsou naměřená data ukládána do souboru. Měření popisuje vývojový diagram na obrázku 7.2. Do souboru se ukládají data čtena ze zdroje (napětí, proud, výkon) a ze zátěže (napětí, proud, výkon). Napětí čteno měřicí kartou ze snímače je přepočítáno na hodnotu točivého momentu.

Ke čtení dat ze senzoru točivého momentu slouží měřicí karta National Instruments NI USB-6009. Senzor momentu TS-105 má analogový výstup, kde hodnotu momentu udává napětí v rozmezí ± 10 V (v jednom směru 0-10V). Inkrementální enkodér senzoru TS-105 má dva signály, A a B, fázově posunuté o 90° a jeden re-



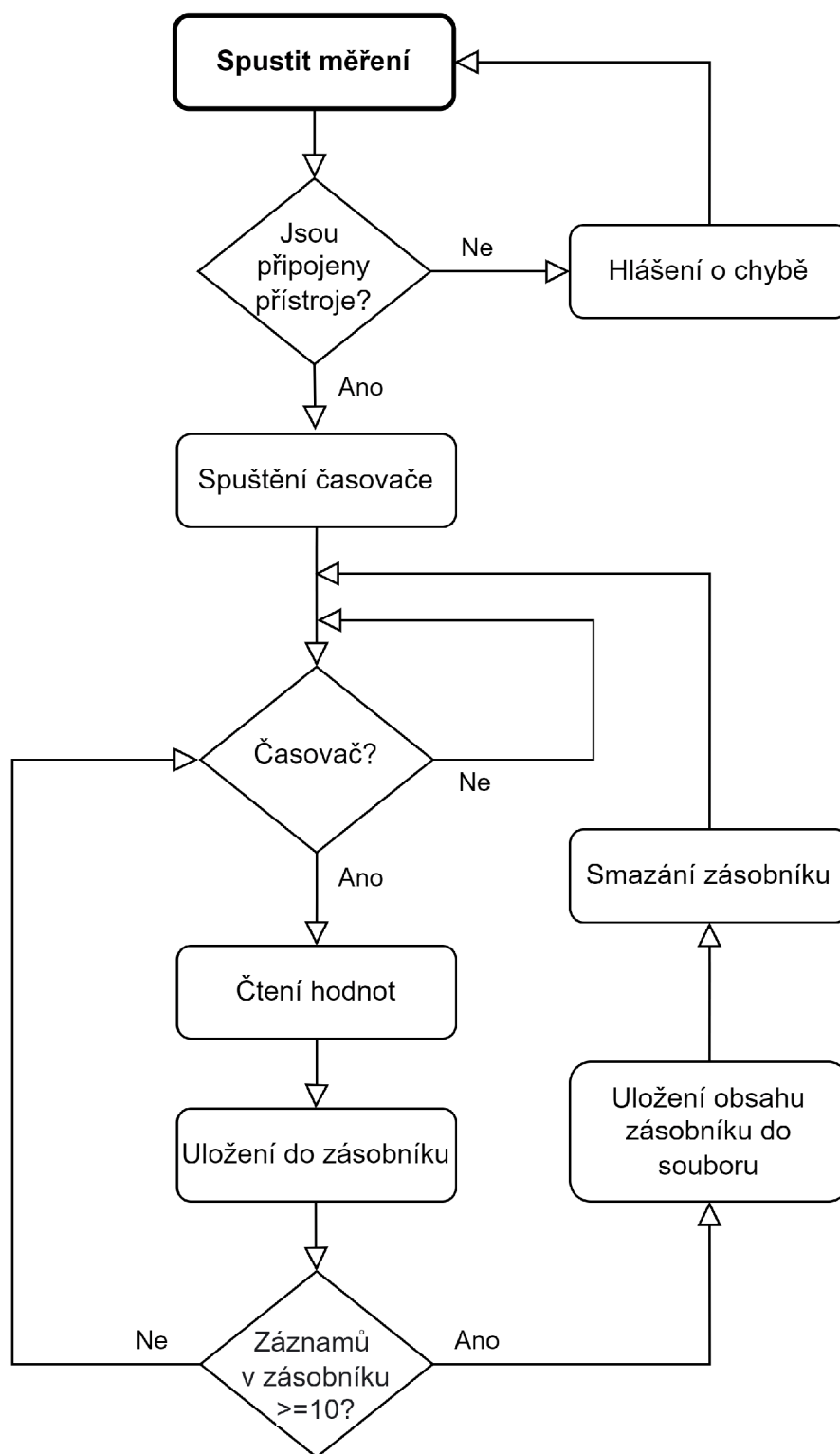
Obrázek 7.1: Vytvořená .NET aplikace umožňující řízení dynamometru

ferenční nulový signál. Ke čtení počtu otáček stačí čítat pulzy referenčního signálu. Měřicí karta NI USB-6009 disponuje pinem PFI 0, který lze použít, jako čítač pulzů.

7.3.1 Ukládání do souboru

Naměřená data jsou ukládána do souboru typu CSV. První měření se uloží do souboru s názvem *mereni1.csv*, každé další započaté měření se uloží do nového souboru, přičemž se číslo v názvu inkrementuje. Cesta ukládaného souboru je: `..\AppData\Roaming\DataMereni\mereni1.csv`. Pokud cesta k souboru neexistuje, vytvoří se ve složce Roaming nová složka s názvem *DataMereni*. Data z měření jsou oddělena středníky a lze je tak jednoduše otevřít například v MS Excel a vykreslit potřebné závislosti v grafech. V souboru je vytištěna hlavička pojmenovávající jednotlivé sloupce. V aplikaci jsou naměřená data v podobě řetězce ukládána do kolekce *List* a po deseti měřeních je obsah kolekce uložen do souboru a jeho obsah je smazán. Je tak omezen častý přístup k zapisovanému souboru.





Obrázek 7.2: Vývojový diagram popisující sekvenci měření

7.4 Automatická zkouška

Hlavním úkolem vytvořené aplikace je automatická zkouška motoru, během které dojde ke změření momentové charakteristiky. Vývojový diagram popisující průběh automatické zkoušky je na obrázku 7.4. Při spuštění automatické zkoušky se zobrazí formulář vyžadující zadání parametrů k definování průběhu proudu zátěže. Konkrétně je zapotřebí zadat počáteční minimální proud zátěže, konečný maximální proud zátěže, velikost kroku zvyšování proudu zátěže a dobu vymezující délku jednoho kroku.

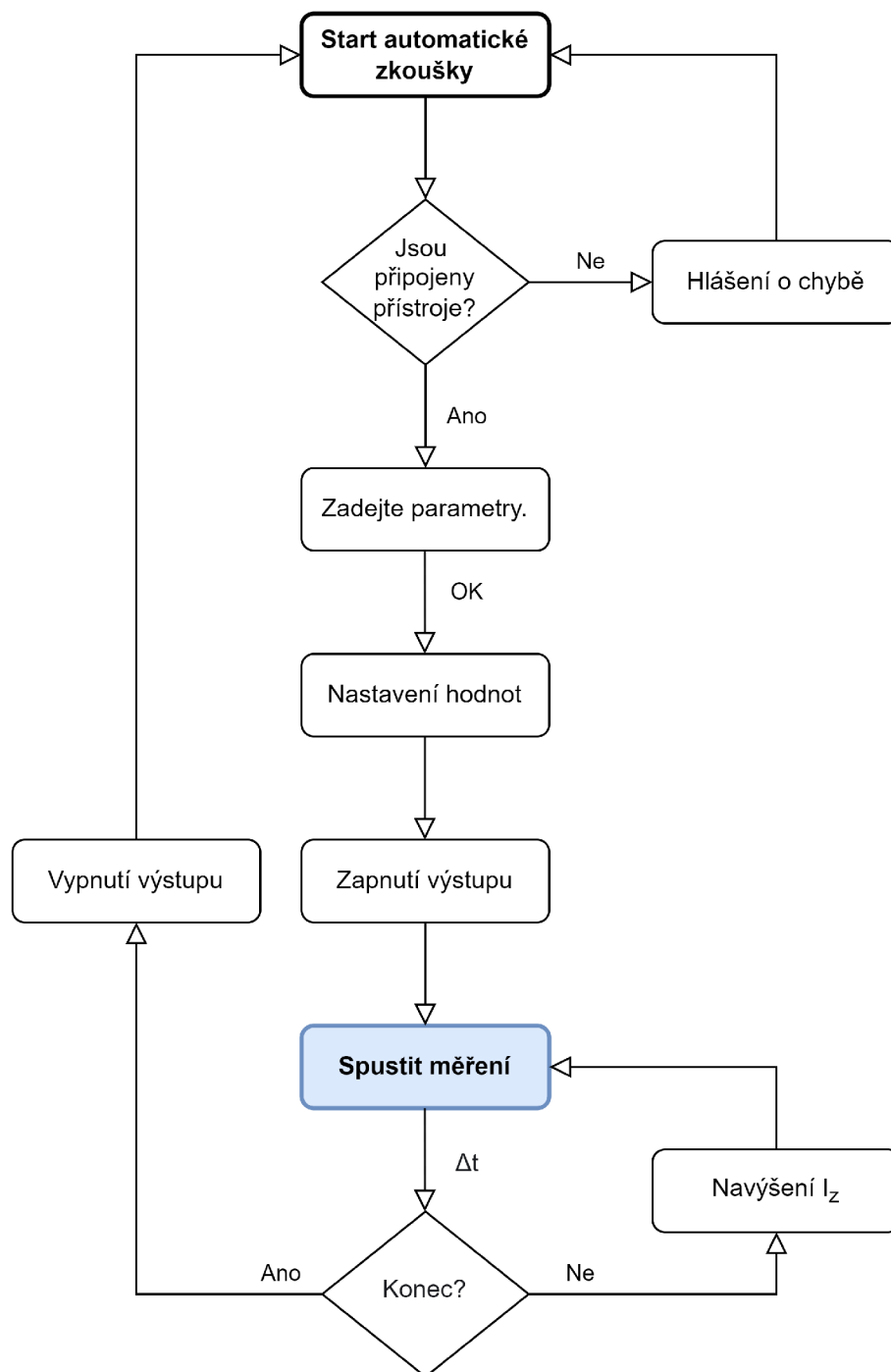
Po potvrzení je na napájecím zdroji motoru nastaveno napětí 12,5 V bez proudového omezení. Proud zátěže je v průběhu zkoušky měněn tak, jak bylo zadáno. Stejně jako při spuštění měření během manuálního řízení dynamometru jsou naměřená data ukládána do souboru. Každá zkouška se uloží do nového souboru.

7.4.1 Testování automatické zkoušky

Testování motoru bylo omezeno maximálním proudem dostupného zdroje Rigol DP811A. Jehož maximální proud činí 10,5 A. K ověření funkce automatické zkoušky byl však tento zdroj zcela vyhovující.

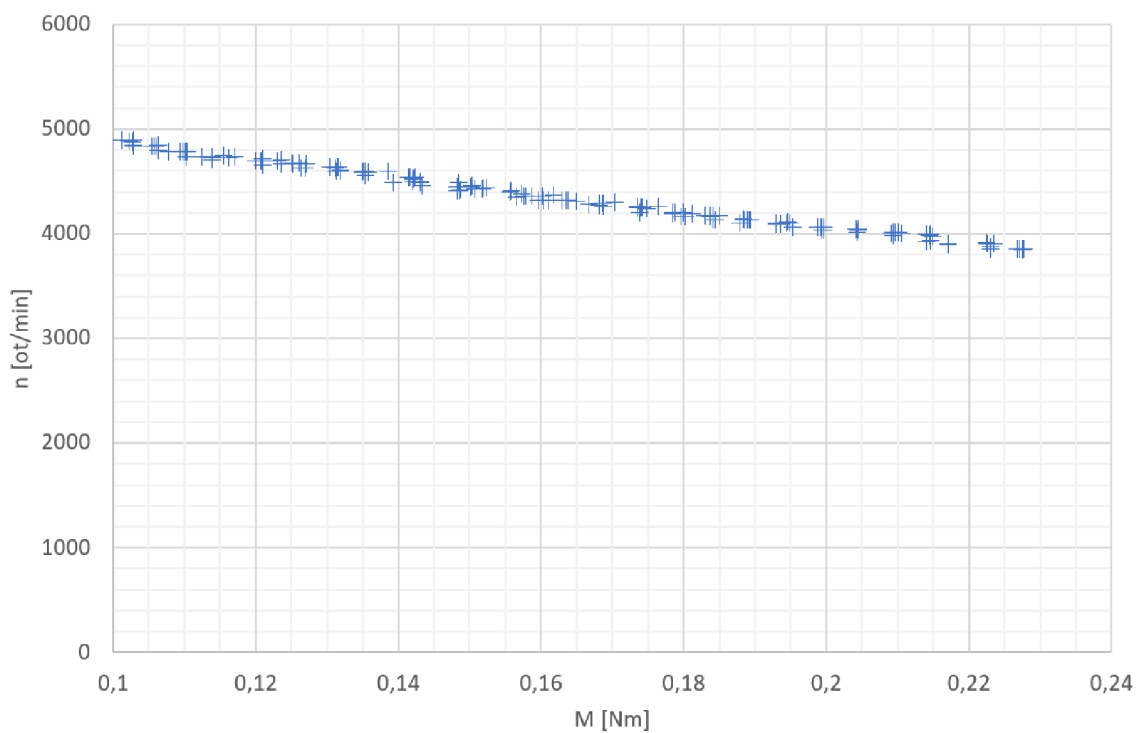


Obrázek 7.3: Fotografie testování automatické zkoušky

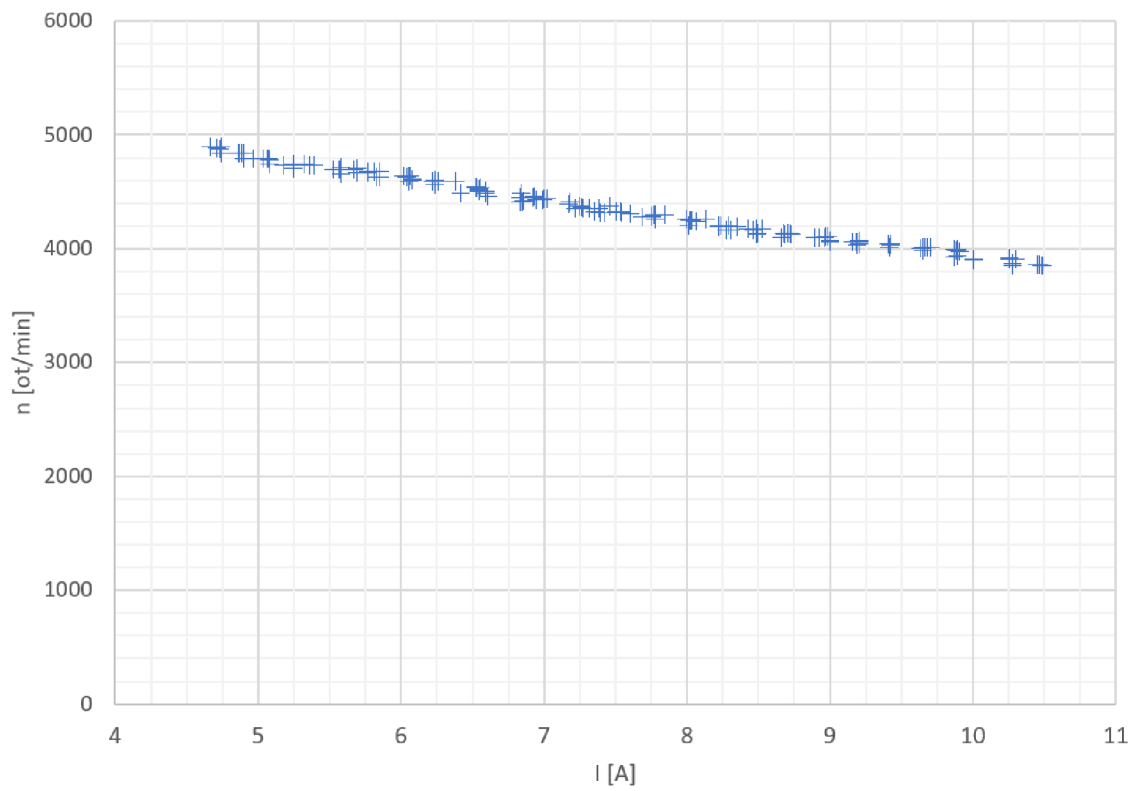


Obrázek 7.4: Vývojový diagram popisující automatickou zkoušku motoru. I_z je proud zátěže, δt je doba vymezející délku jednoho kroku.

Vyhodnocení výsledků testování automatické zkoušky proběhlo obdobně jako v kapitole 6.2, charakteristiky naměřené při automatické zkoušce jsou uvedeny na obrázcích 7.5 a 7.6.



Obrázek 7.5: Momentová charakteristika naměřená při testování automatické zkoušky motoru



Obrázek 7.6: Rychlostní charakteristika naměřená při testování automatické zkoušky motoru

8 Závěr

Cíle diplomové práce byly seznámení se s typy motorů klimatizačních jednotek a navrhnout alternativy zátěže pro dynamometr, dále rozpracovat jeden z návrhů dynamometru, ten realizovat a ověřit měřením.

V teoretické části práce byly popsány tři typy dynamometrů s jejich brzdnými systémy. Na základě požadavků na dynamometr byly vytipovány dva typy hysteretických brzd: chlazená tlakovým vzduchem a chlazená ventilátorem. Oba dva typy brzd byly firmou zamítnuty, první zmíněná z důvodu vysoké spotřeby tlakového vzduchu a druhá brzda kvůli hlučnému ventilátoru.

Zpracován byl tedy návrh s brzdným systémem v podobě motoru. Návrh zahrnuje stejnosměrný komutátorový motor s permanentními magnety, který slouží k zatěžování testovaného motoru. Zatěžovací motor je řízen programovatelnou elektronickou zátěží. Testovaný motor bude ve firmě napájený přímo elektronikou automobilu. K měření točivého momentu a otáček testovaného motoru slouží senzor momentu TS-105 Magtrol.

Součástí práce je měření motoru ventilátoru klimatizační jednotky. Provedeno bylo měření naprázdno a nakrátko, a byly vykresleny charakteristiky, na jejichž základě byly určeny dvě konstanty, napěťová a momentová. Bylo provedeno testování návrhu dynamometru. Jelikož zatěžovací stolice k mechanickému upevnění motorů nebyla v době testování návrhu k dispozici, bylo nutno se při upevňování motorů uchýlit k provizornímu řešení.

K pohodlnému řízení dynamometru byla vytvořena aplikace s grafickým uživatelským rozhraním. Aplikace umožňuje řízení programovatelného zdroje, řízení programovatelné elektronické zátěže a čtení dat z měřicí karty, která má za úkol číst



data ze senzoru momentu. Dynamometr je možné řídit manuálně z uživatelského rozhraní, nebo lze spustit automatickou zkoušku motoru, při níž je motor postupně zatěžován. V aplikaci je možné spustit měření, během kterého jsou naměřená data ukládána do souboru. Při spuštění automatické zkoušky se automaticky spustí i měření.

Automatická zkouška byla testována a z naměřených dat byly sestrojeny vždy dvě charakteristiky, momentová a rychlostní. Tvar charakteristik odpovídá teoretickému předpokladu.



Literatura

- [1] Výrobky Denso. *Denso Manufacturing Czech s.r.o.: Dodavatel klimatizačních jednotek do automobilů* [online]. [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://www.denso.cz/vyrobky/>
- [2] BENNOUNA, Saâd, Thibaud MATHARAN a Olivier CHERIAUX. Automotive HVAC Noise Reduction. *SAE Technical Paper* [online]. 2018 [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2018-01-1519/>
- [3] BARTOŠ, Václav. Elektrické stroje. V Plzni: Západočeská univerzita, 2002 dotisk, 221 s. ISBN 80-7082-221-X.
- [4] UHLÍŘ, Ivan. *Elektrické stroje a pohony*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03730-0.
- [5] SKALICKÝ, Jiří. *Elektrické regulované pohony* [online]. Brno, 2007 [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/49211/E1._reg._pohony.pdf. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně.
- [6] KILLEDAR, Jyotindra S. *Dynamometer: Theory and Application to Engine Testing* [e-kniha]. Xlibris, 2012, 607 s. [cit. 2020-12-15]. ISBN 9781477120088. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=3Yj5AAAAQBAJ>
- [7] NOVÁK, Jaroslav. Dynamometr na vířivé proudy a jeho regulace. *ELEKTRO* [online]. 2002 [cit. 2021-04-14]. Dostupné



- z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/dynamometr-na-virive-proudy-a-jeho-regulace--14869>
- [8] Electromagnetic Powder Brakes. *Fisatech* [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <http://www.fisatech.cz/wp-content/uploads/2017/09/elektromagne-\ticke-praskove-brzdy.pdf>
- [9] ČSN EN 60034-1 ed.2. *Točivé elektrické stroje – Část 1: Jmenovité údaje a vlastnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. Třídící znak 35 0000.
- [10] ČSN EN 60034-2-1 *Točivé elektrické stroje – Část 2-1: Standardní metody určování ztrát a účinnosti ze zkoušek (s výjimkou strojů pro trakční vozidla)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015. Třídící znak 35 0000.
- [11] ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. *Senzory a měřicí obvody*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-01-02057-6.
- [12] How Multi-Axis Load Cells And Sting Balances Work. *Sensor Solutions Ltd.: Strain Gauge, Load Monitoring & Data Logging Services* [online]. 5. 2. 2014 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <http://www.sensorsolutions.co.uk/news/company-news/multi-axis-load-cells-and-sting-balances.htm>
- [13] Senzory s kovovými tenzometry v technické praxi. *Automa: časopis pro automatizační techniku* [online]. 2008 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: https://automa.cz/cz/casopis-clanky/senzory-s-kovovymi-tenzometry-v-technicke-praxi-2008_04_36970_6543/
- [14] Incremental Encoders: How they work and what are their benefits. *PC Automation and Robotics for Everyone* [online]. 2008 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: https://www.pc-control.co.uk/incremental_encoders.htm

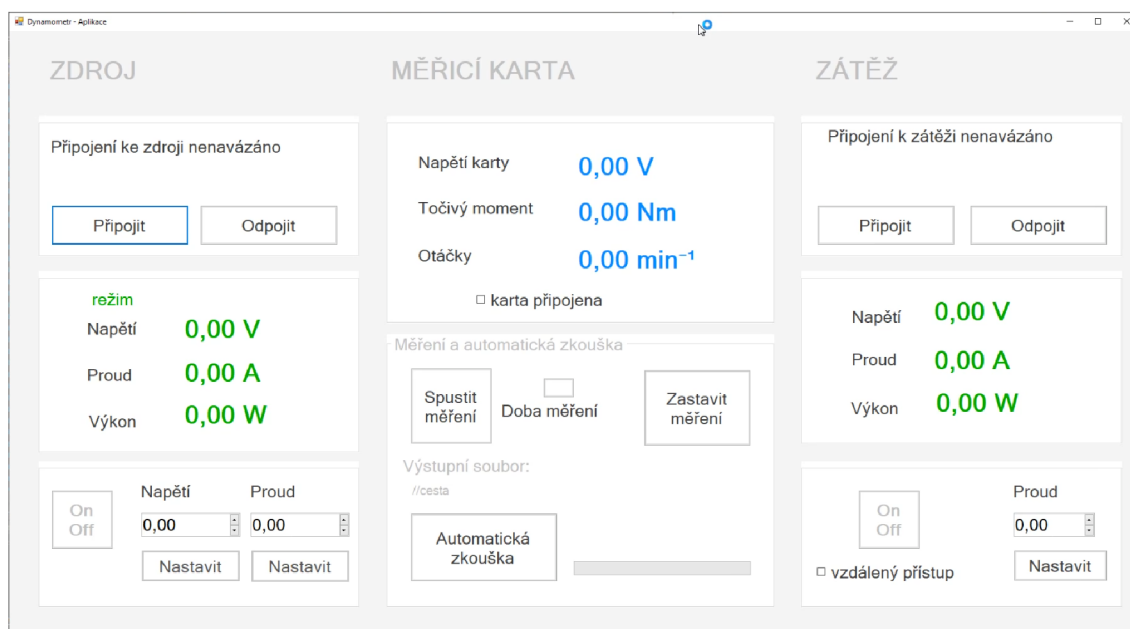


- [15] What is a Resolver?. *AMCI: PLC Based Industrial Automation Controls* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.amci.com/industrial-automation-resources/plc-automation-tutorials/what-resolver/>
- [16] AHB Series: Compressed-Air-Cooled Hysteresis Brakes. In: *Magtrol* [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.magtrol.com/wp-content/uploads/ahb.pdf>
- [17] TS Series in-line Torque Sensors: User manual. *Magtrol* [online]. 2020 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: https://www.magtrol.com/wp-content/uploads/ts_manual.pdf
- [18] RIGOL Programming Guide: DP800 Series Programmable Linear DC Power Supply [online]. *RIGOL Technologies*, 2015 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: https://www.batronix.com/pdf/Rigol/ProgrammingGuide/DP800_ProgrammingGuide_EN.pdf



A Návod na ovládání aplikace

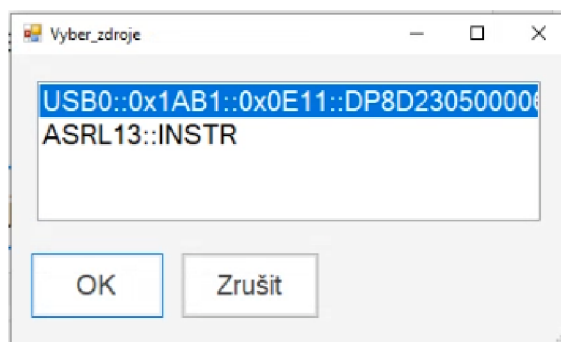
K ovládání řídicí aplikace dynamometru slouží grafické uživatelské rozhraní (GUI). Při spuštění aplikace se otevře hlavní formulář (viz obrázek A.1). Nejprve je třeba navázat připojení k programovatelnému zdroji a programovatelné zátěži.



Obrázek A.1: Hlavní formulář uživatelského rozhraní po spuštění aplikace

Zdroj a zátěž je nutné pomocí USB připojit k PC. Po kliknutí na tlačítko *Připojit* v levé části GUI označené nadpisem *ZDROJ*, resp. v pravé části GUI označené nadpisem *ZÁTĚŽ* se zobrazí se nový formulář (viz obrázek A.2) s nabídkou připojených zařízení. Volbou označení programovatelného zdroje, resp. programovatelné zátěže a potvrzení se formulář zavře. Po zavření se v hlavním formuláři objeví název připojeného přístroje a v okně níže se začnou zobrazovat hodnoty napětí, proudu

a výkonu připojeného zařízení, podobně jako na displeji.



Obrázek A.2: Formulář pro výběr zdroje

Po připojení měřicí karty pomocí USB k PC je třeba ve střední části GUI s nadpisem *MĚŘICÍ KARTA* zaškrtnout políčko *karta připojena*. Na displeji příslušící měřicí kartě se začnou zobrazovat okamžité hodnoty napětí na analogovém vstupu karty, kam je připojen analogový výstup momentového senzoru, a níže hodnota momentu a otáček.

A.1 Manuální řízení

Po připojení všech přístrojů je možné dynamometr řídit manuálně. V části GUI *ZDROJ* lze řídit napětí na programovatelném zdroji a proudové omezení zdroje. Po nastavení požadovaných hodnot je vždy třeba kliknout na tlačítko *Nastavit*. Tlačítko *On/Off* zapne, resp. vypne výstup zdroje.

V části GUI *ZÁTĚŽ* lze řídit proud na programovatelné zátěži. Po nastavení požadované hodnoty je vždy třeba kliknout na tlačítko *Nastavit*. Tlačítko *On/Off* zapne, resp. vypne výstup zátěže. Zaškrtnutím nebo odškrtnutím políčka *vzdálený přístup* je povoleno, resp. zakázáno řízení zátěže z aplikace.

Během manuálního řízení lze ve střední části GUI spustit měření stiskem tlačítka *Spustit měření*. Naměřená data jsou ukládána do souborů typu CSV s názvem *merenix.csv*, kde je *x* nahrazeno pořadovým číslem měření. Každé další započaté měření se uloží do nového souboru. Cesta ukládaného souboru je: `..\AppData\Roaming\DataMereni\merenix.csv`. Pokud cesta k souboru neexistuje,

vytvoří se ve složce Roaming nová složka s názvem *DataMereni*. Data z měření lze jednoduše otevřít například v MS Excel (viz obrázek A.3) a vykreslit potřebné závislosti v grafech.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	C.	Cas [s]	Napeti zdroje [V]	Proud zdroje [A]	Vykon zdroje [W]	Napeti zateze [V]	Proud zateze [A]	Vykon zateze [W]	Tocivy moment [Nm]	Otacky [1/min]
2	1	0	0	0	0	0	0	0	0,000618045	0
3	2	0,1	0,0025	0,0079	0	5,3176	-0,1849	-0,9824	0,000618045	0
4	3	0,2	0,0025	0,0079	0	8,9348	-0,1773	-1,5796	0,000490599	0
5	4	0,3	7,1724	10,4989	75,302	11,1912	-0,1184	-1,3253	0,000618045	0
6	5	0,4	12,5008	4,5622	57,031	11,1426	-0,1194	-1,3306	0,000490599	0
7	6	0,5	12,5009	4,5842	57,307	11,1033	-0,1179	-1,3099	0,000363153	0
8	7	0,6	12,501	4,6623	58,283	11,0964	-0,1207	-1,3392	0,000363153	0
9	8	0,7	12,501	4,7375	59,223	11,0876	-0,1216	-1,3488	0,000872938	0
10	9	0,8	12,501	4,7113	58,896	11,0659	-0,129	-1,4279	0,000745492	0
11	10	0,9	12,501	4,733	59,167	11,0537	-0,1321	-1,4603	0,000618045	0
12	11	1	12,501	4,739	59,242	10,9646	-0,2572	-2,8206	0,000618045	0
13	12	1,1	12,501	4,739	59,242	10,9592	-0,2431	-2,6649	0,000745492	0
14	13	1,2	12,5011	4,8719	60,904	10,9561	-0,2422	-2,6542	0,000745492	0
15	14	1,3	12,5011	4,8719	60,904	10,959	-0,2452	-2,6869	0,000872938	0
16	15	1,4	12,5011	4,8861	61,082	10,9563	-0,2489	-2,7267	0,000745492	0
17	16	1,5	12,501	4,8586	60,737	10,9546	-0,2406	-2,6357	0,000745492	0
18	17	1,6	12,501	4,9013	61,271	10,9673	-0,2362	-2,5905	0,000490599	0

Obrázek A.3: Zobrazení naměřených dat v MS Excel

A.2 Automatická zkouška

Aplikace dynamometru umožňuje spustit automatickou zkoušku motoru. Po stisknutí tlačítka *Automatická zkouška* se zobrazí nový formulář A.4, ve kterém je třeba zadat parametry zkoušky. Zadávané parametry jsou zobrazeny na obrázku A.5 a popsány v jeho popisku.

Napětí na programovatelném zdroji je při automatické zkoušce defaultně nastaveno na 12,5 V a proud zdroje není omezen. Při spuštění automatické zkoušky se spustí také měření, které probíhá obdobně jako při manuálním řízení. Probíhající automatickou zkoušku zachycuje obrázek A.6

Parametry automatické zkoušky

Zadejte parametry proudu zátěže.

meze: I_z (min) 0,00 A

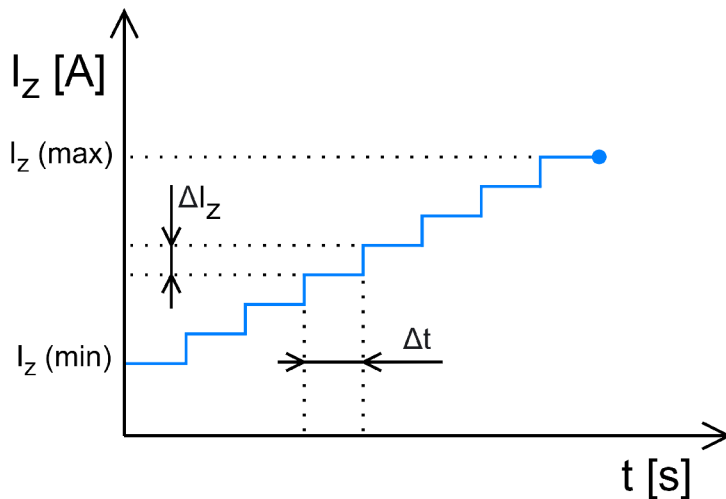
I_z (max) 10,00 A

1 krok: ΔI_z 0,25 A

Δt 3,00 s

OK Zrušit

Obrázek A.4: Formulář pro zadání parametrů proudu zátěže před provedením automatické zkoušky



Obrázek A.5: Znázornění parametrů, které je třeba zadat k provedení automatické zkoušky. I_z (min) je počáteční minimální proud zátěže, I_z (max) je konečný maximální proud zátěže, ΔI_z značí velikost kroku zvyšování proudu zátěže, Δt je doba vymezující délku jednoho kroku.



Obrázek A.6: Probíhající automatická zkouška