

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Návrh a realizace modulu s motorem BLDC

Bakalářská práce

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Ing. Michal Gottwald**
Osobní číslo: **D22666**
Studijní program: **B0788A040001 Dopravní technika**
Specializace: **Elektrická trakce a elektromobilita**
Téma práce: **Návrh a realizace modulu s motorem BLDC**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě**

Zásady pro vypracování

1. Seznamte se s technologií motoru BLDC a s jeho řízením, uveďte přehled variant řídicích metod motorů BLDC
2. Navrhněte řešení výukového modulu s motorem BLDC a s jeho řídicí jednotkou
3. Realizujte výukový modul s BLDC motorem, ověřte jeho funkčnost a změřte základní charakteristiky

Rozsah pracovní zprávy: **dle zadání**
Rozsah grafických prací: **dle zadání**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Kobrlé, P., Pavelka, J.: Elektrické pohony a jejich řízení, skriptum ČVUT v Praze, FEL, 2016, ISBN 978-80-01-06007-0
Crowder, R. M.: Electric drives and electromechanical systems, Oxford : Butterworth-Heinemann, 2006, ISBN 0-7506-6740-0
Firemní dokumentace k motoru a řídicí jednotce

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Jaroslav Novák, CSc.**
Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě

Datum zadání bakalářské práce: **3. října 2024**
Termín odevzdání bakalářské práce: **27. června 2025**

L.S.

doc. Ing. Ladislav Řoutil, Ph.D.
děkan

Ing. Vítězslav Krčmář, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 6. května 2024

Prohlášení autora

Prohlašuji:

Práci s názvem Návrh a realizace modulu s motorem BLDC jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že 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, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 18. června 2025

Ing. Michal Gottwald

Poděkování

Děkuji prof. Ing. Jaroslavu Novákovi, CSc. za odborné vedení mé bakalářské práce, věnovaný čas a cenné rady. Rovněž děkuji Ing. Petru Sýkorovi za hodnotné poznámky a náměty během návrhu a realizace praktické části práce.

Anotace

Bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací modulu laboratorního pracoviště pro měření s BLDC motorem. Nejprve je obecně popsána konstrukce a možnosti řízení BLDC motoru. Následně je popsán konkrétně použitý motor a kontrolér. Je navržen a vyroben modul a další komponenty laboratorního pracoviště. V závěru je provedeno měření signálů, fyzikálních veličin a základních charakteristik použitého motoru.

Klíčová slova

BLDC motor, Hallův senzor, 6fázová komutace, regulační charakteristiky BLDC motoru, zatěžovací charakteristiky BLDC motoru

Title

Design and implementation of a BLDC motor module

Abstract

The bachelor's thesis deals with the design and implementation of a laboratory workplace module for measurements with a BLDC motor. First, the construction and control options of a BLDC motor are generally described. Subsequently, the specifically used motor and controller are described. The module and other components of the laboratory workplace are designed and manufactured. Finally, the measurements of signals, physical quantities and basic characteristics of the used motor are performed.

Keywords

BLDC motor, Hall sensor, six-step commutation, BLDC motor control characteristics, BLDC motor load characteristics

Obsah

Seznam obrázků	8
Seznam tabulek	10
Seznam značek a zkratek.....	11
1 Úvod	13
2 BLDC motor	14
2.1 Konstrukce BLDC motoru.....	14
2.1.1 Hallovy senzory	16
2.2 Řízení BLDC motoru	18
2.2.1 6fázová komutace s Hallovými senzory	18
2.2.2 Bezsenzorové řízení	23
3 Návrh a realizace laboratorního pracoviště.....	24
3.1 BLDC motor laboratorního pracoviště.....	24
3.2 Příruba BLDC motoru	25
3.3 Kontrolér laboratorního pracoviště.....	26
3.4 Návrh a realizace ovládacího pultu modulu	28
3.5 Propojení modulu s motorem BLDC a DC zdrojem.....	31
3.6 Kompletace modulu laboratorního pracoviště.....	32
4 Měření na BLDC motoru	34
4.1 Měření fyzikálních veličin a signálů za chodu motoru	34
4.2 Měření regulačních charakteristik motoru	41
4.3 Měření zatěžovacích charakteristik motoru	43
5 Závěr	50
Literatura	51
Seznam příloh	52
Přílohy	53

Seznam obrázků

Obr. 2.1 – Zjednodušené zobrazení konstrukce BLDC motoru, zdroj [5], upraveno autorem	14
Obr. 2.2 – Náhradní schéma BLDC motoru, zdroj [4], upraveno autorem.....	15
Obr. 2.3 – Zobrazení statorového vinutí, zdroj [7], upraveno autorem	15
Obr. 2.4 – Modely statorových vinutí, vlevo distribuovaný a vpravo koncentrovaný, zdroj [7].....	16
Obr. 2.5 – Závislost momentu na otáčkách BLDC motoru, zdroj [8], upraveno autorem	16
Obr. 2.6 – Principiální schéma Hallova jevu se Schmitt. klopným obvodem, zdroj [2], upraveno autorem	17
Obr. 2.7 – Schéma třífázového střídače, zdroj [1], upraveno autorem.....	18
Obr. 2.8 – Definování komutačních sektorů, zdroj [6], upraveno autorem.....	19
Obr. 2.9 – Definování komutačních vektorů při otáčení motoru po směru hodinových ručiček, zdroj [6], upraveno autorem.....	20
Obr. 2.10 – Blokový diagram kontroléru pro řízení BLDC motoru, zdroj [2], upraveno autorem ..	21
Obr. 2.11 – Průběh Hallových signálů, indukované napětí a fázových proudů během jedné elektrické otáčky, zdroj [5], upraveno autorem	22
Obr. 3.1 – Fotografie BLDC motoru 6452.....	24
Obr. 3.2 – Fotografie vyrobené příruby motoru	25
Obr. 3.3 – Fotografie kontroléru	26
Obr. 3.4 – Vzorové zapojení kontroléru pro ovládání přes digitální a analogové vstupy [10]	27
Obr. 3.5 – Schéma zapojení v ovládací krabici	29
Obr. 3.6 – Fotografie ovládací krabice s vyvrtanými otvory	30
Obr. 3.7 – Fotografie elektrického zapojení ovládací krabice	30
Obr. 3.8 – Fotografie konečného vzhledu ovládací krabice.....	31
Obr. 3.9 – Fotografie naletovaných vodičů kabelu LiYCY na zdířky konektoru	32
Obr. 3.10 – Fotografie čelního pohledu laboratorního pracoviště.....	33
Obr. 3.11 – Fotografie zadního pohledu laboratorního pracoviště	33
Obr. 4.1 – Schéma zapojení pro měření Hallových signálů.....	35
Obr. 4.2 – Zobrazení signálů z Hallových senzorů, H _a – kanál 1 červeně, H _b – kanál 2 modře.....	35
Obr. 4.3 – Schéma zapojení pro měření střídavého sdruženého napětí a střídavého proudu za kontrolérem a stejnosměrného proudu před kontrolérem.....	36
Obr. 4.4 – Fázový výstupní střídavý proud z kontroléru při zatížení motoru 5 Nm.....	36
Obr. 4.5 – Vstupní stejnosměrný proud do kontroléru při zatížení motoru 5 Nm	37
Obr. 4.6 – Výstupní střídavé sdružené napětí za kontrolérem při zatížení motoru a 250 ot/min ..	37
Obr. 4.7 – Schéma zapojení pro měření indukovaného napětí.....	38
Obr. 4.8 – Indukované napětí z motoru při 3 000 ot/min.....	38
Obr. 4.9 – Schéma zapojení pro měření výstupního napětí.....	39
Obr. 4.10 – Výstupní napětí naprázdno při 3 245 ot/min.....	39
Obr. 4.11 – Výstupní napětí naprázdno při 1 000 ot/min.....	40
Obr. 4.12 – Fotografie měření indukovaného napětí na motorových svorkách	40
Obr. 4.13 – Graf závislosti indukovaného napětí na otáčkách motoru.....	41
Obr. 4.14 – Graf závislosti výstupního napětí na otáčkách motoru.....	42
Obr. 4.15 – Schéma zapojení pro měření zatěžovacích charakteristik	43
Obr. 4.16 – Graf závislosti výkonu na momentu.....	46

Obr. 4.17 – Graf závislosti otáček motoru na momentu	47
Obr. 4.18 – Graf závislosti vstupního DC proudu na momentu	47
Obr. 4.19 – Graf závislosti výstupního AC proudu na momentu	48
Obr. 4.20 – Graf závislosti účinnosti motoru s kontrolérem na momentu	48
Obr. 4.21 – Graf závislosti výstupního AC napětí na momentu	49
Obr. 4.22 – Fotografie motoru s dynamometrem.....	49

Seznam tabulek

Tab. 2.1 – Příklad možných výstupů z Halloových senzorů pro daný sektor, zdroj [6]	19
Tab. 2.2 – Sekvence spínání tranzistorů pro otáčení motoru po směru hodinových ručiček, zdroj [5], upraveno autorem.....	21
Tab. 2.3 – Sekvence spínání tranzistorů pro otáčení motoru proti směru hodinových ručiček, zdroj [5], upraveno autorem.....	21
Tab. 3.1 – Označení a barvy vodičů vybraného BLDC motoru, zdroj [9], upraveno autorem.....	24
Tab. 3.2 – Popis funkcí stavů prepínačů kontroléru, zdroj [10], upraveno autorem.....	27
Tab. 3.3 – Popis svorek a přístrojů kontroléru, zdroj [10], upraveno autorem.....	28
Tab. 4.1 – Závislost indukovaného napětí na otáčkách motoru.....	41
Tab. 4.2 – Závislost výstupního napětí na otáčkách motoru.....	42
Tab. 4.3 – Měření veličin během zatěžování při referenci 500 ot/min v otevřené smyčce	44
Tab. 4.4 – Měření veličin během zatěžování při referenci 1 000 ot/min v otevřené smyčce	44
Tab. 4.5 – Měření veličin během zatěžování při referenci 1 500 ot/min v otevřené smyčce	44
Tab. 4.6 – Měření veličin během zatěžování při referenci 2 000 ot/min v otevřené smyčce	44
Tab. 4.7 – Měření veličin během zatěžování při referenci 2 500 ot/min v otevřené smyčce	44
Tab. 4.8 – Měření veličin během zatěžování při referenci 3 000 ot/min v otevřené smyčce	45
Tab. 4.9 – Měření veličin během zatěžování při referenci 1 000 ot/min v uzavřené smyčce.....	45
Tab. 4.10 – Měření veličin během zatěžování při referenci 2 000 ot/min v uzavřené smyčce	45
Tab. 4.11 – Měření veličin během zatěžování při referenci 3 000 ot/min v uzavřené smyčce	45

Seznam značek a zkratek

Fyzikální veličiny

i_a, i_b, i_c	[A]	střídavé fázové proudy
I_{in}	[A]	stejnoseměrný proud vstupující do kontroléru
i_{out}	[A]	střídavý fázový proud z kontroléru
L	[H]	indukčnost
M	[Nm]	moment
n	[ot/min]	rychlost motoru
P	[W]	výkon
P_o	[W]	příkon
R	[Ω]	odpor
U	[V]	stejnoseměrné napětí
u_a, u_b, u_c	[V]	střídavá fázová napětí
U_{DC-}	[V]	záporný pól stejnosměrného napětí
$U_{DC+}, V+$	[V]	kladný pól stejnosměrného napětí
$U_{Hallovo}$	[V]	Hallovo napětí
U_{in}	[V]	stejnoseměrné napětí napájející kontrolér
u_{induk}, u_i	[V]	indukovaná napětí
U_{out}	[V]	výstupní stejnosměrné napětí ze Schmitt. klopného obvodu
u_{out}	[V]	střídavé sdružené napětí z kontroléru
η	[-]	účinnost

Značky

D	dynamometr
H_a, H_b, H_c	signály z Hallových senzorů
Q1-6	tranzistory

Zkratky

AC	Alternating Current	-	střídavý
BLDC	Brushless Direct Current	-	bezkartáčový stejnosměrný motor
CL	Closed Loop	-	uzavřená regulační smyčka
DC	Direct Current	-	Stejnoseměrný
DE	Drive End	-	strana pohonná
N	North	-	severní pól

NDE	Non-Drive End	-	strana nepohonná
NdFeB	Neodymium – Ferrum – Borum	-	neodym – železo – bór
OP	Open Loop	-	otevřená regulační smyčka
PWM	Pulse Width Modulation	-	pulzně šířková modulace
S	South	-	jižní pól

1 Úvod

Nároky na elektrický pohon v dopravních prostředcích jsou vysoké. Pohon by měl být spolehlivý s minimální potřebou údržby, energeticky efektivní, s dlouhou životností, dynamický a tichý. Všechny tyto vlastnosti mají právě BLDC motory. Jedná se o bezkartáčové stejnosměrné motory. Už z názvu lze vyvodit, že budou napájeny stejnosměrným proudem a nebudou obsahovat kartáče s uhlíky, které vytvářejí kluzný kontakt s komutátorem a které jsou zdrojem častých komplikací. Díky absenci těchto komponent jsou BLDC motory v porovnání s klasickými kartáčovými stejnosměrnými motory spolehlivější s menší potřebou údržeb, účinnější, s delší životností a tišší. U dopravních prostředků se tím zvyšuje doba nasazení a komfort. Komutace je u těchto motorů řešena elektronicky, což má svoje výhody, ale i nevýhody. Díky elektronickému řízení mají tyto motory lepší výkon při vyšších otáčkách. Dopravní prostředky jsou díky tomu dynamičtější. Řízení otáček je rovněž přesnější. Nevýhodou je nutná znalost polohy rotoru. Potřeba elektroniky pro chod motoru zvyšuje jeho pořizovací náklady. Obecně jsou BLDC motory v porovnání s klasickými stejnosměrnými motory dražší. Vzhledem k tomu však výhody BLDC motorů převyšují jejich nevýhody, a i proto jsou tyto motory často používány jako náhrady kartáčových stejnosměrných motorů. [14]

Jelikož jsou tyto motory v praxi tak využívány, byl Katedrou elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě Dopravní fakulty Jana Pernera zakoupen jeden třífázový BLDC motor s řízením. Cílem této práce bude navrhnout a vytvořit modul pro laboratorní pracoviště pro měření s tímto zakoupeným BLDC motorem, které se bude využívat k výuce a experimentům ve Výukovém a výzkumném centru v dopravě umístěném v Doubravících.

Práce bude rozdělena do tří částí. V první části bude obecný popis konstrukce motoru a možnosti jeho řízení. Ve druhé části bude popis jednotlivých zakoupených zařízení pracoviště a popis návrhu a výroby zbylých potřebných komponent. Poslední část se bude zabývat měřením na nově vzniklém laboratorním pracovišti. Budou se měřit a na osciloskopu zobrazovat signály ze senzorů otáček, napětí a proud za kontrolérem, proud před kontrolérem a indukované napětí z motoru. Dále se budou měřit regulační a zatěžovací charakteristiky motoru. Výsledkem by mělo být ověření funkčnosti laboratorního pracoviště a experimentální zjištění vlastností zakoupeného BLDC motoru s řízením.

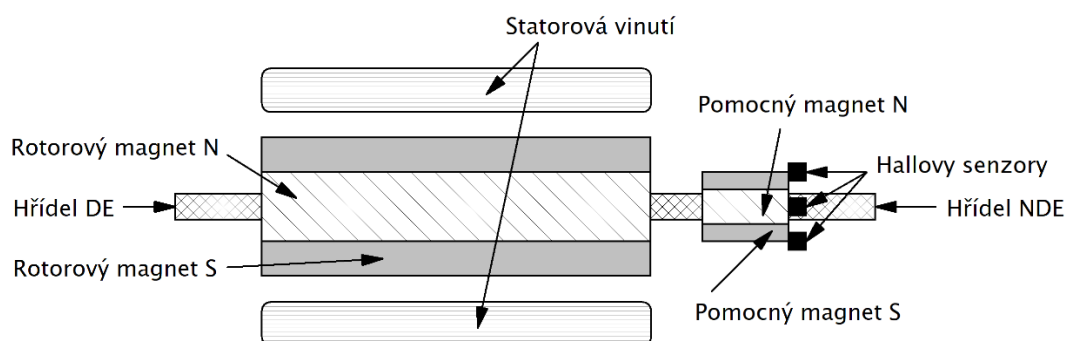
2 BLDC motor

Motor se zkratkou BLDC (Brushless Direct Current) označuje bezkartáčový stejnosměrný motor, který je díky své konstrukční jednoduchosti, spolehlivosti, delší životnosti, nižším nárokům na údržbu, vyšší účinnosti a dynamice často využíván. Své uplatnění nachází v širokém spektru oblastí od dopravy a průmyslu až po ruční nářadí a domácí spotřebiče. [3][14]

2.1 Konstrukce BLDC motoru

BLDC motor se skládá ze statoru, na kterém je navinuto většinou 3fázové statorové vinutí zapojené do hvězdy, a rotoru tvořeného permanentními magnety, které ve vzduchové mezeře vytváří konstantní magnetické pole. Uspořádání, umístění a tvary těchto magnetů udávají rozsah motorových charakteristik. Vzhledem k vysokým rychlostem a dynamice motoru je potřeba, aby magnety byly na jádře rotoru pevně uchyceny. Volba materiálu magnetů záleží na požadované hustotě magnetického toku. Při potřebě vysoké hustoty se používají magnety ze vzácných zemin, jakým jsou magnety NdFeB (neodym – železo – bór). Jejich nevýhodou je však vyšší cena. Magnetická indukce je typicky kolem 1 T. Pokud není potřeba taková magnetická indukce, lze použít i feritové magnety, které jsou levnější. Jejich magnetická indukce je kolem 0,4 T. Motory mohou mít jeden nebo více pól-párů. [2][3]

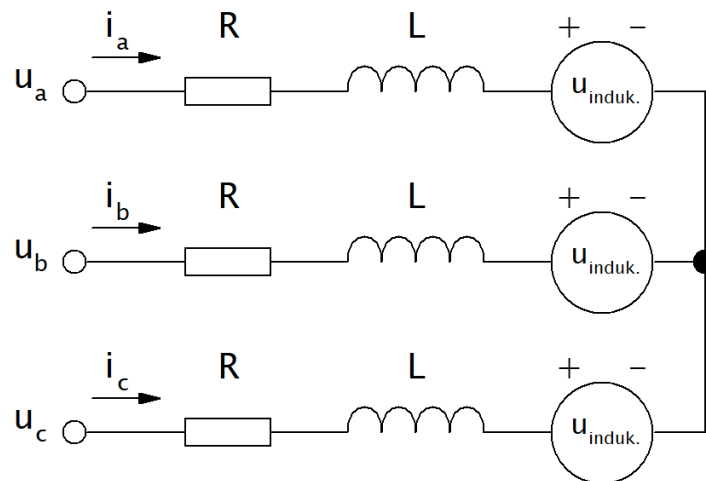
Na rozdíl od klasických stejnosměrných motorů nemají BLDC motory mechanický komutátor. Komutace neboli přepínání proudu do vinutí cívek je zde realizováno elektronicky. Aby komutace proběhla ve správný okamžik, je potřeba znát polohu rotoru. Tato poloha se často zjišťuje pomocí tří Hallových senzorů. Existují i řešení bez použití senzorů, kde odpadá problematika se správným umístěním a spolehlivým uchycením těchto senzorů. [3]



Obr. 2.1 – Zjednodušené zobrazení konstrukce BLDC motoru, zdroj [5], upraveno autorem

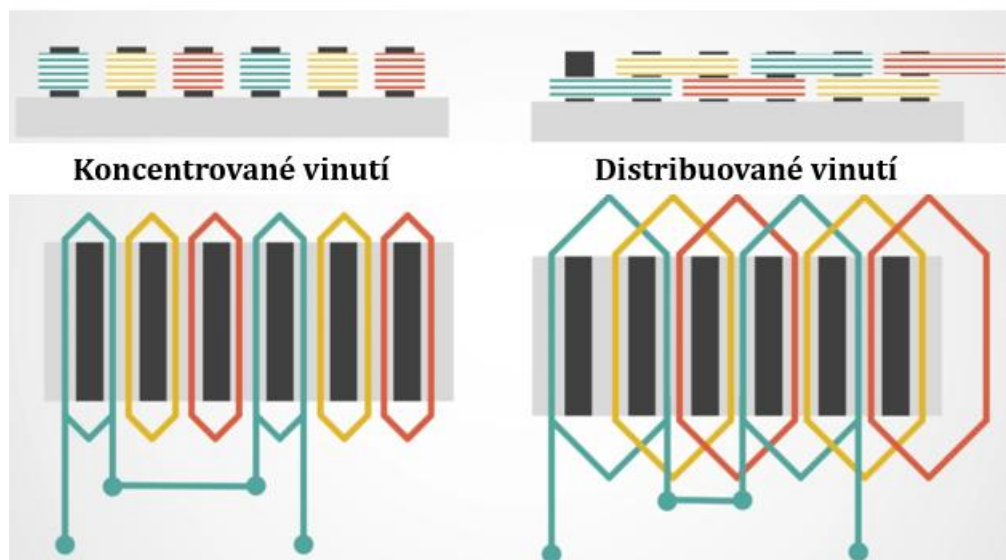
Náhradní schéma BLDC motoru je složeno z odporu a indukčnosti jednotlivého vinutí. Pokud se motor otáčí, tak do schématu vstupuje i indukované napětí z rotoru. [4] Toto indukované napětí má opačnou polaritu než napětí napájecí, a tedy působí proti tomuto napájecímu napětí. Indukované napětí záleží na třech faktorech

- úhlové rychlosti motoru,
- magnetickém poli vytvořeném rotorovými magnety,
- počtu závitů statorových vinutí. [5]

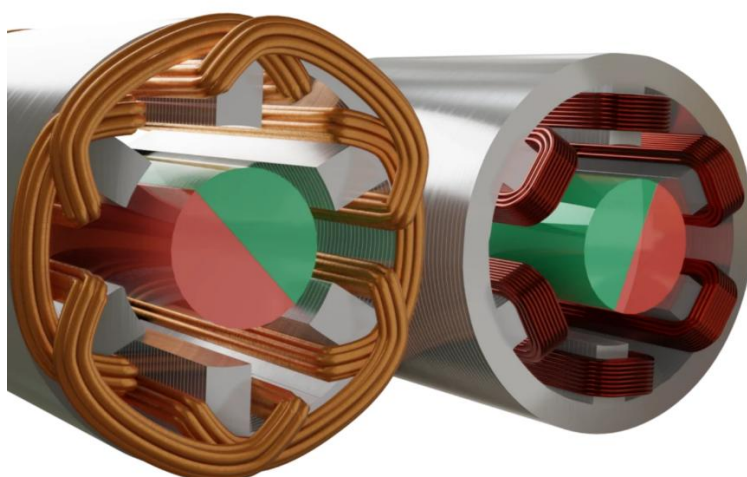


Obr. 2.2 – Náhradní schéma BLDC motoru, zdroj [4], upraveno autorem

BLDC motory mohou mít koncentrované nebo distribuované statorové vinutí. Způsob navinutí vodičů jednotlivých typů je vidět na Obr. 2.3. Jakým způsobem se navine statorové vinutí, ovlivňuje tvar indukovaného napětí. Koncentrované statorové vinutí má lichoběžníkový tvar indukovaného napětí. U distribuovaného vinutí je to sinusový tvar. Navinout vodiče distribuovaným způsobem je sice náročnější, ale díky tomuto navinutí je výsledný moment hladší. [5]

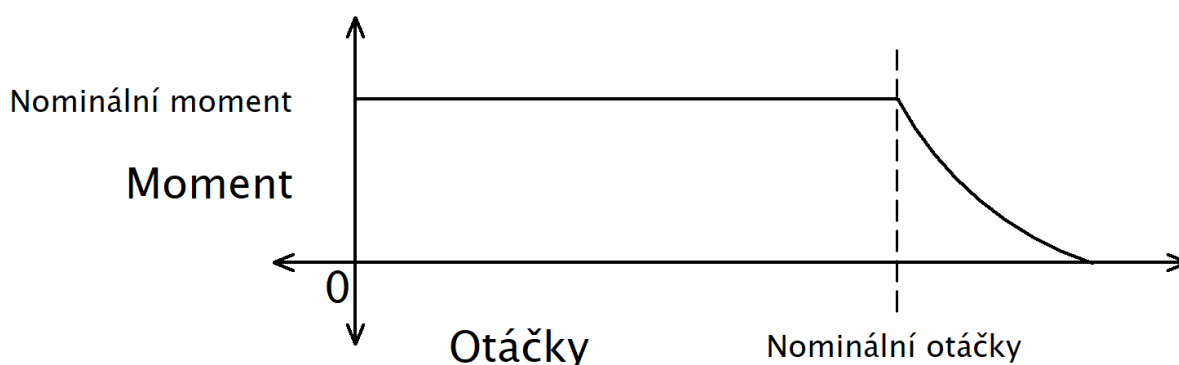


Obr. 2.3 – Zobrazení statorového vinutí, zdroj [7], upraveno autorem



Obr. 2.4 – Modely statorových vinutí, vlevo distribuovaný a vpravo koncentrovaný, zdroj [7]

Závislost momentu na otáčkách je zobrazena na Obr. 2.5. Ze závislosti je vidět, že BLDC motor může být zatěžován jeho nominálním momentem z nulových otáček do jeho nominálních otáček. V případě přetáčení motoru se bude moment hyperbolicky snižovat. Jeho magnetické pole se bude nepřímo odbuzovat zápornou magnetizační složkou proudu statoru. [8]



Obr. 2.5 – Závislost momentu na otáčkách BLDC motoru, zdroj [8], upraveno autorem

2.1.1 Hallové senzory

Jak již bylo zmíněno, pro zjištění polohy rotoru se nejčastěji používají tři Hallové senzory. Jejich princip vychází z Hallova jevu, při kterém během působení magnetického pole na tenkou polovodičovou destičku protékanou proudem vzniká Hallovo napětí. Směry magnetického pole, elektrického proudu a Hallova napětí jsou vzájemně kolmé. Vzniklé napětí je přímo úměrné působícímu magnetickému poli po dobu průchodu proudu polovodičem. Běžně jsou Hallové senzory vystaveny magnetickému poli rotoru. Jsou však motory, kde jsou senzory umístěny mimo působení magnetického pole rotoru. Bývá to většinou z důvodu vysoké teploty motoru. Tyto motory jsou vybaveny pomocnými magnety, které jsou umístěny na hřídeli motoru. Senzory jsou pak vystaveny magnetickému poli pomocných magnetů. [2]

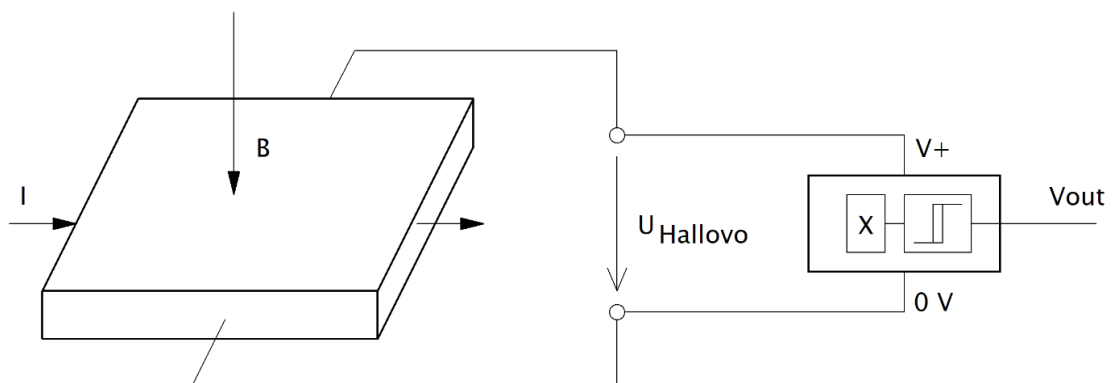
Umístění jednotlivých senzorů po obvodu bývá realizováno podle následujícího vzorce

$$\text{úhel}_{\text{mech}} = \frac{360^\circ}{\text{počet fází} \cdot \text{počet pólpárů}} \quad (2.1)$$

Podle tohoto vzorce bude pro 2pólové motory rozmístění senzorů po 120° mechanických. V případě 8pólového motoru bude rozmístění po 30° mechanických. V obou případech je však rozmístění v úhlu 120° elektrických. Elektrický úhel je získaný z mechanického úhlu vynásobeného počtem pól-párů. Všechny tři senzory jsou často uchyceny na jednom malém plošném obvodu, který je do motoru vložen během výroby. [2]

Aby signál z Hallova senzoru byl bez zákmitů, bývají výstupy z těchto senzorů vybaveny Schmittovými klopnými obvody. Výstupem je obdélníkový signál, jehož hrany se využívají pro zjištění okamžiku provedení komutace. [2]

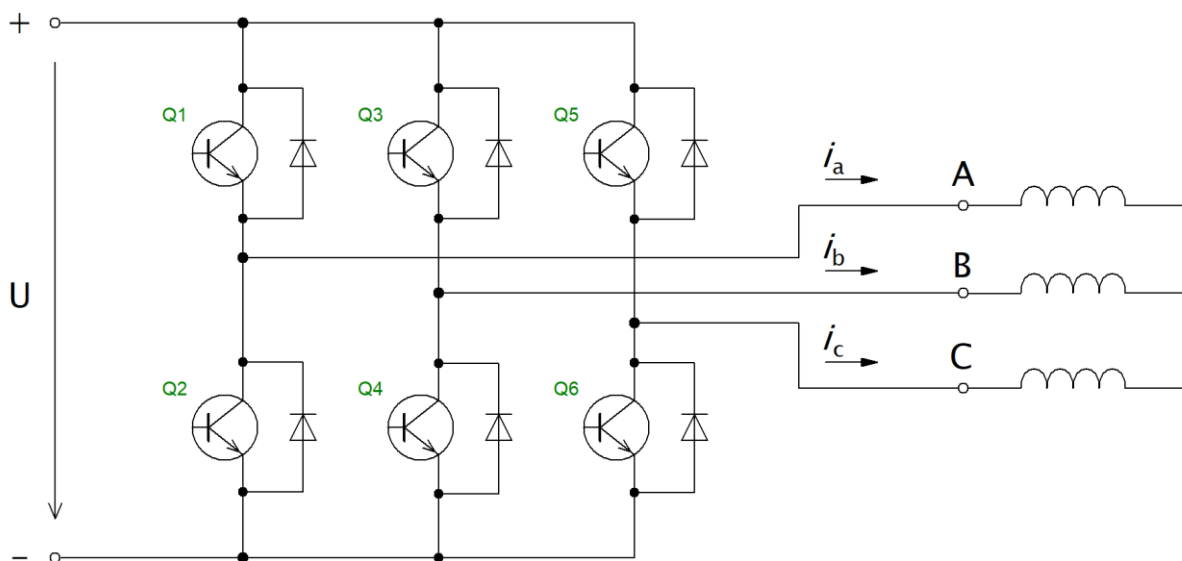
Hallové senzory mohou být použity jako levná varianta s malou přesností pro měření otáček motoru. Princip spočívá ve využití časovače, umístěného v mikropočítači, který bude počítat dobu mezi dvěma Hallovými přenosy. Z doby se potom vypočítá aktuální rychlost motoru, která může být využita jako zpětná vazba při řízení motoru v uzavřené smyčce. [5]



Obr. 2.6 – Principiální schéma Hallova jevu se Schmitt. klopným obvodem, zdroj [2], upraveno autorem

2.2 Řízení BLDC motoru

BLDC motory využívají elektronickou komutaci. Pomocí této elektronické komutace se ve vzduchové mezeře vytvoří rotační magnetické pole a následně elektromagnetický moment. Nejběžnější provedení motoru je 3fázové. Abychom byli schopni ovládat všechny tyto tři fáze, bývá spínání řešeno formou 3fázového střídače. Tento střídač obsahuje 6 tranzistorů IGBT nebo MOSFET rozdělených rovnoměrně do tří větví. Středky větví vedou na jednotlivé statorové fáze BLDC motoru. Spínání tranzistorů obstarává řídicí algoritmus v mikropočítači. [3]

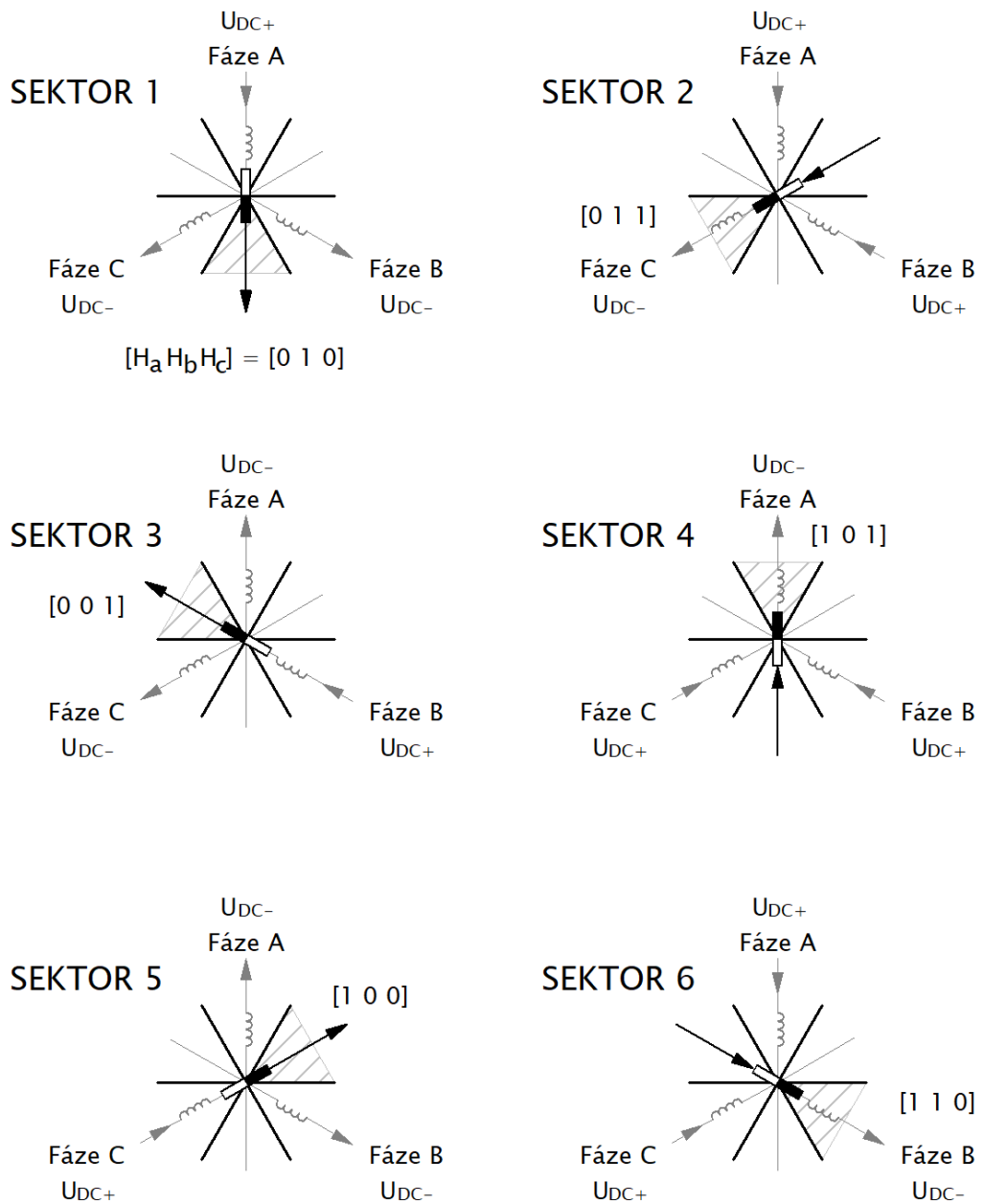


Obr. 2.7 – Schéma třífázového střídače, zdroj [1], upraveno autorem

2.2.1 6fázová komutace s Hallovými senzory

Jedná se o řídicí algoritmus vyžadující informaci o poloze rotoru. Střídač napájí vždy jen dvě fáze motoru. O jaké dvě fáze se bude jednat záleží na poloze rotoru a směru otáčení. Během jedné elektrické otáčky bude střídač šestkrát komutovat. Vektor magnetického toku statoru bude tedy měnit svůj směr po skocích 60° elektrických. [3]

Jedna elektrická otáčka se tedy může rozdělit do šesti sektorů. V každém sektoru bude jiná kombinace signálů z Hallových senzorů. Způsob zjišťování kombinací signálů ze senzorů je detailně popsán v literatuře [6]. Zjednodušeně se ale dá tento postup popsat jako čtení signálů z Hallových senzorů při různém stejnosměrném napájení fází statorového vinutí, viz Tab. 2.1. Kombinace různého stejnosměrného napájení způsobí otáčení rotoru s permanentním magnetem, jehož magnetické pole zapříčiní změny stavů signálů z Hallových senzorů, viz Obr. 2.8. [6]



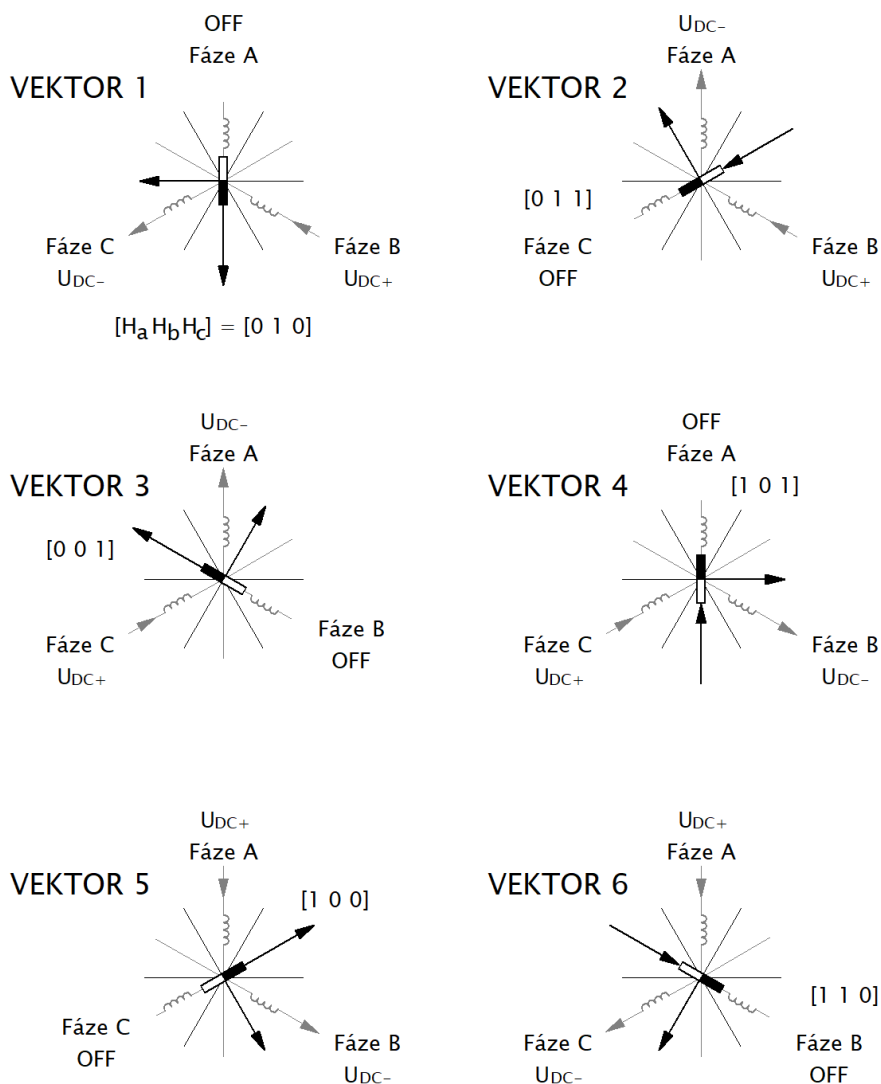
Obr. 2.8 – Definování komutačních sektorů, zdroj [6], upraveno autorem

Napájené fáze			Sektor	Výstup z Hallových senzorů		
Fáze A	Fáze B	Fáze C		H _a	H _b	H _c
U _{DC+}	U _{DC-}	U _{DC-}	1	0	1	0
U _{DC+}	U _{DC+}	U _{DC-}	2	0	1	1
U _{DC-}	U _{DC+}	U _{DC-}	3	0	0	1
U _{DC-}	U _{DC+}	U _{DC+}	4	1	0	1
U _{DC-}	U _{DC-}	U _{DC+}	5	1	0	0
U _{DC+}	U _{DC-}	U _{DC+}	6	1	1	0

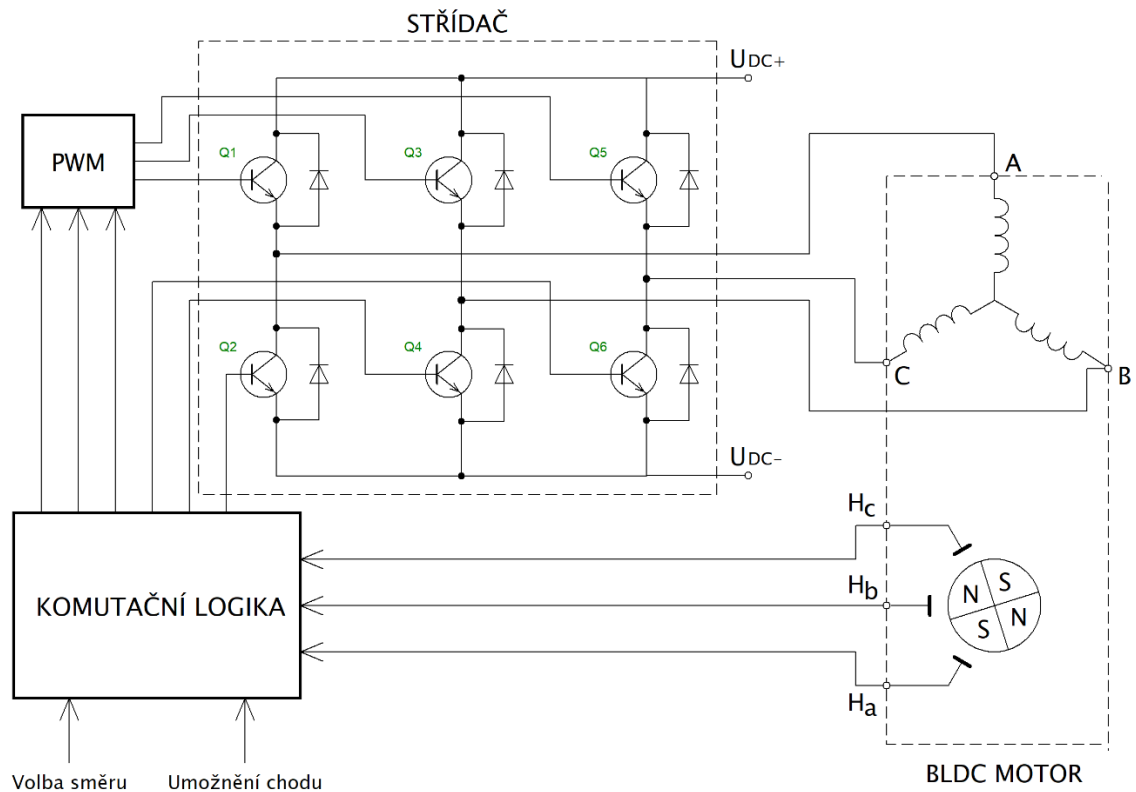
Tab. 2.1 – Příklad možných výstupů z Hallových senzorů pro daný sektor, zdroj [6]

Komutační vektory jsou voleny tak, aby BLDC motor dosahoval maximálního momentu. Toho lze docílit, když úhel mezi magnetickým tokem rotoru a statoru bude 90° elektrických. Jelikož se kombinace signálů z Hallových senzorů mění po 60° sektorech, bude volen takový komutační vektor, který bude posunut o 120° elektrických oproti pozici rotoru. Jestli to bude úhel po směru nebo proti směru hodinových ručiček bude záležet na volbě směru otáčení rotoru. Po volbě komutačního vektoru se sepnou příslušné tranzistory střídače a magnetický tok statoru bude směřovat pod patřičným úhlem. Rotor bude mít tendenci zarovnat směr svého magnetického toku s tokem statoru. Rotor se tím dává do pohybu. Jakmile se směr magnetického toku rotoru přiblíží na 60° elektrických k statorovému magnetickému toku, to se zjistí díky změně kombinace signálů z Hallových senzorů, dojde k volbě dalšího komutačního vektoru, který bude opět posunut o 120° elektrických oproti pozici rotoru. Tento postup se stále opakuje a tím dochází k otáčení rotoru. Z výše uvedeného vyplývá, že úhel mezi rotorovým a statorovým magnetickým tokem se bude měnit od 120° do 60° elektrických, viz Obr. 2.9, Obr. 2.10, Tab. 2.2, Tab. 2.3. [6]

Jedná se o jednoduchý algoritmus, který však není vhodný pro všechny aplikace, protože skokové změny směru magnetického toku statoru způsobují zvlnění momentu motoru. [3]



Obr. 2.9 – Definování komutačních vektorů při otáčení motoru po směru hodinových ručiček, zdroj [6], upraveno autorem



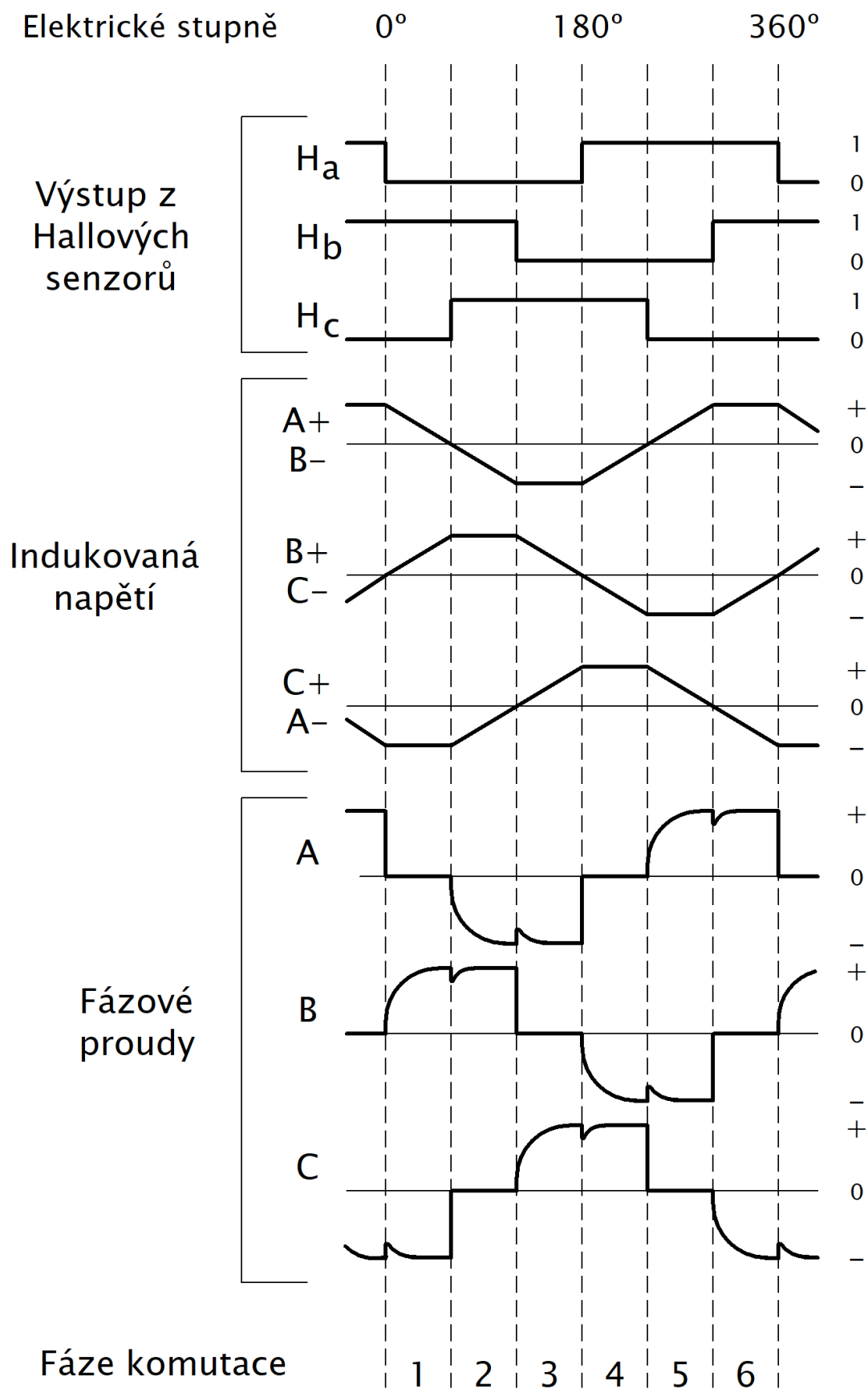
Obr. 2.10 – Blokový diagram kontroléru pro řízení BLDC motoru, zdroj [2], upraveno autorem

Fáze komutace	Výstup z Hallových senzorů			Vektor	Aktivní tranzistor		Komutační vektory		
	Ha	Hb	Hc				Fáze A	Fáze B	Fáze C
1	0	1	0	1	Q3	Q6	OFF	U _{DC+}	U _{DC-}
2	0	1	1	2	Q3	Q2	U _{DC-}	U _{DC+}	OFF
3	0	0	1	3	Q5	Q2	U _{DC-}	OFF	U _{DC+}
4	1	0	1	4	Q5	Q4	OFF	U _{DC-}	U _{DC+}
5	1	0	0	5	Q1	Q4	U _{DC+}	U _{DC-}	OFF
6	1	1	0	6	Q1	Q6	U _{DC+}	OFF	U _{DC-}

Tab. 2.2 – Sekvence spínání tranzistorů pro otáčení motoru po směru hodinových ručiček, zdroj [5], upraveno autorem

Fáze komutace	Výstup z Hallových senzorů			Vektor	Aktivní tranzistor		Komutační vektory		
	Ha	Hb	Hc				Fáze A	Fáze B	Fáze C
1	0	1	0	4	Q5	Q4	OFF	U _{DC-}	U _{DC+}
2	1	1	0	3	Q5	Q2	U _{DC-}	OFF	U _{DC+}
3	1	0	0	2	Q3	Q2	U _{DC-}	U _{DC+}	OFF
4	1	0	1	1	Q3	Q6	OFF	U _{DC+}	U _{DC-}
5	0	0	1	6	Q1	Q6	U _{DC+}	OFF	U _{DC-}
6	0	1	1	5	Q1	Q4	U _{DC+}	U _{DC-}	OFF

Tab. 2.3 – Sekvence spínání tranzistorů pro otáčení motoru proti směru hodinových ručiček, zdroj [5], upraveno autorem



Obr. 2.11 – Průběh Hallových signálů, indukované napětí a fázových proudů během jedné elektrické otáčky, zdroj [5], upraveno autorem

Na Obr. 2.11 je vidět průběh Hallových signálů, indukovaných napětí a fázových proudů. Průběhy korespondují se spínáním tranzistorů pro otáčení motoru po směru hodinových ručiček, viz Tab. 2.2.

2.2.2 Bezsenzorové řízení

Elektronická komutace se může řídit i bez použití Hallových senzorů. Používají se metody, které měří nebo odhadují indukovaná napětí, nebo metody, které reagují na změnu indukčnosti vzhledem k různé poloze rotoru. Každá metoda má své výhody i svá úskalí, proto je dobré nejprve zvážit vhodnost použití pro danou aplikaci. Jednoznačně lze ale říct, že bezsenzorové řízení je hardwarově jednodušší. Motor nemusí obsahovat senzory, které musí být dobře a pevně umístěné a které nelze použít v místech s vysokou teplotou. Eliminuje se i kabeláž k senzorům a rozhraní pro zpracování signálů ze senzorů. Celý systém se tím stává spolehlivější a cenově výhodnější. [3]

Bezsenzorové řízení s využitím indukovaného napětí

Jedna ze zmiňovaných metod pro bezsenzorové řízení byla založena na měření úrovně indukovaného napětí. Při elektronické komutaci je jedno statorové vinutí napájeno kladným pólem napětí, druhé záporným pólem napětí a třetí je nenapájeno. Při změně sdruženého indukovaného napětí z kladné polaroty do záporné polaroty nebo obráceně prochází toto sdružené indukované napětí nulou. Ke změně kombinace signálů z Hallových senzorů dochází v ideálním případě právě v okamžiku nulové hodnoty indukovaného napětí. Ve skutečnosti je to později vlivem vlastností vinutí a toto zpoždění je potom potřeba kompenzovat v mikropočítači. Průchod nulovou hodnotou indukovaného napětí se potom využívá pro detekci polohy rotoru. Tato metoda není vhodná pro velmi malé otáčky motoru, kdy indukované napětí má velmi nízkou amplitudu. Detekce nulové hodnoty je při velmi malých otáčkách náročná, proto se využívá při rozběhu motoru řízení v otevřené smyčce a teprve potom, co se dosáhne dostatečných otáček, aby amplituda indukovaného napětí byla dostatečná, se přepne na řízení s detekcí nulové hodnoty indukovaného napětí. [5] Tato metoda se používá přibližně v rozsahu od 5 %-10 % až po 100 % nominálních otáček. [3]

Samotné měření se realizuje ve fázi motoru, která není napájena a kterou neteče žádný proud. Toho se dosáhne, když oba tranzistory dané větve střídače budou vypnuté. [3]

3 Návrh a realizace laboratorního pracoviště

Laboratorní pracoviště bude sloužit pro měření charakteristik BLDC motoru studenty a akademickými pracovníky. Bude se skládat z motoru, kontroléru a ovládacího panelu. Tento výčet je pouze základní, protože pro realizaci bude potřeba navrhnout a vyrobit i další komponenty, bez kterých by měření nebylo možno bezpečně provádět.

3.1 BLDC motor laboratorního pracoviště

Pro laboratorní pracoviště byl vybrán BLDC motor s označením 6452 o výkonu 2 kW. Jedná se o kompaktní přírubový motor obsahující Hallovy senzory. Motor je proveden v krytí IP54. Je vhodný pro umístění do provozu s okolní teplotou v rozsahu 0–40 °C a vlhkostí vzduchu pod 80 %. Níže jsou uvedeny štítkové hodnoty motoru. [9]

Napětí: $U_n = 48 \text{ V DC}$

Výkon: $P_n = 2 \text{ kW}$

Proud: $I_n = 52 \text{ A}$

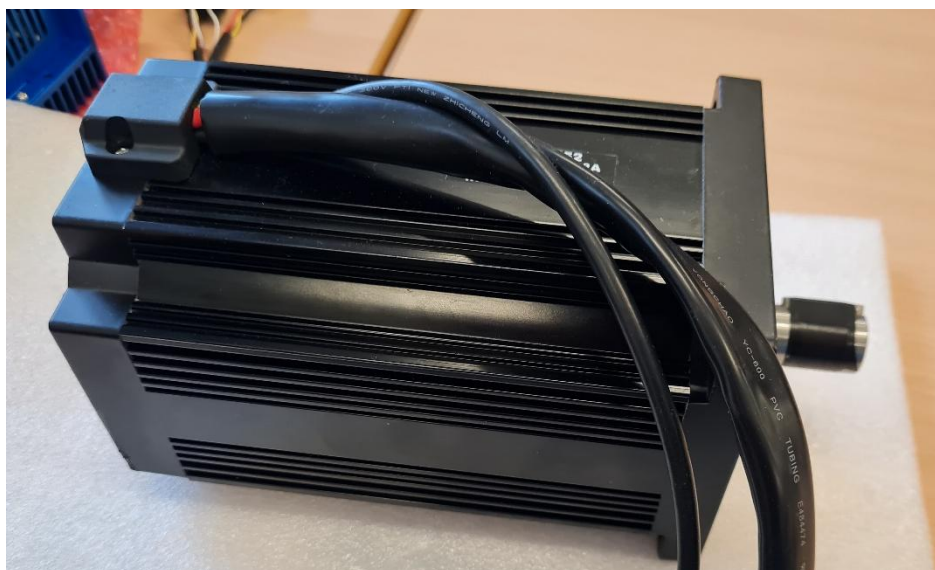
Moment: $M_n = 6,38 \text{ Nm}$

Otáčky: $n_n = 3\,000 \text{ ot/min} \pm 10\%$

Z motoru jsou vyvedeny silové vodiče a vodiče z Hallových senzorů v separátních bužírkách. Označení a barvy jednotlivých vodičů jsou zobrazeny v Tab. 3.1.

	Silové vodiče			Vodiče z Hallových senzorů				
Označení	U	V	W	5V	GND	Hu	Hv	Hw
Barva	Červená	Žlutá	Černá	Červená	Černá	Modrá	Zelená	Bílá

Tab. 3.1 – Označení a barvy vodičů vybraného BLDC motoru, zdroj [9], upraveno autorem

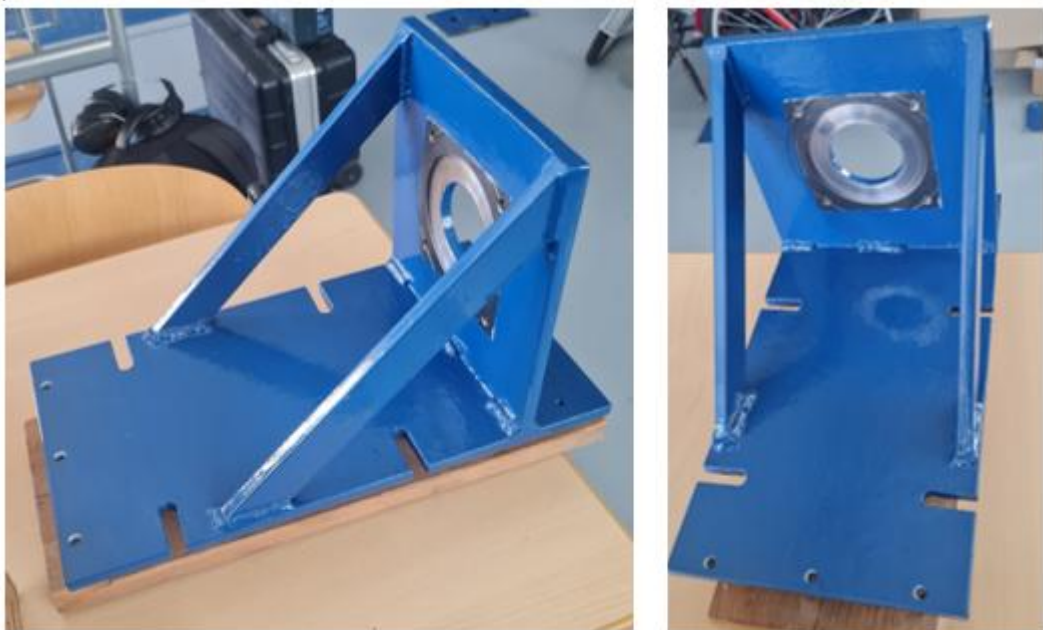


Obr. 3.1 – Fotografie BLDC motoru 6452

3.2 Příruba BLDC motoru

Vzhledem k tomu, že vybraný BLDC motor je přírubové montáže, bylo potřeba takovou přírubu navrhnout a vyrobit. Příruba musela být dostatečně masivní, aby zvládala přenášet reakční momenty motoru při dynamickém provozu. Musela jít dobře namontovat na podstavec měřicího pracoviště a motor, který bude na přírubě přišroubovaný, musí být v ose dynamometru, aby šlo hřídele obou elektrických strojů spojit spojkou. Návrh příruby vytvořil autor práce. Příruba se pak nechala vyrobit v univerzitní dílně dílenskými pracovníky z důvodu potřeby svařování. Níže je její detailní popis.

Příruba se skládá ze dvou desek na sebe kolmých. Jako materiál byla vybrána ocel tloušťky 10 mm. Horizontální deska má rozměry 370 × 200 × 10 mm. Na podstavec se montuje pomocí čtyř šroubů M10. Aby byl splněn požadavek snadné montáže a souososti, jsou otvory pro šrouby udělány formou drážek. V přední části desky, kde bude hřídel motoru, jsou vyvrtány dva otvory s vnitřními závity M5. Ty jsou určeny pro montáž krycího plechu hřídele. V zadní části desky jsou vyvrtány tři otvory pro montáž U-profilu, na kterém bude silové připojení motoru a připojení vodičů z Hallových senzorů. Jelikož budou tyto otvory mimo drážky podstavce, bylo nutné spodní část otvorů zvětšit, aby šlo šrouby zahлубit. Vertikální deska má rozměry 200 × 200 × 10 mm. Ve svém středu má otvor průměru 40 mm pro vložení hřídele motoru. Dále obsahuje čtyři otvory s vnitřními závity M8 pro montáž motoru a zahлубení 2 mm v průměru 97 mm pro vystouplou část motoru. Obě desky jsou k sobě spojeny třemi sváry z obou stran. Pro zpevnění jsou desky ještě spojeny dvěma ocelovými pláty. Z každé strany je jeden plát. Pláty jsou k deskám spojeny pomocí táhlých svárů. Celá příruba má ochranný nátěr modré barvy.



Obr. 3.2 – Fotografie vyrobené příruby motoru

3.3 Kontrolér laboratorního pracoviště

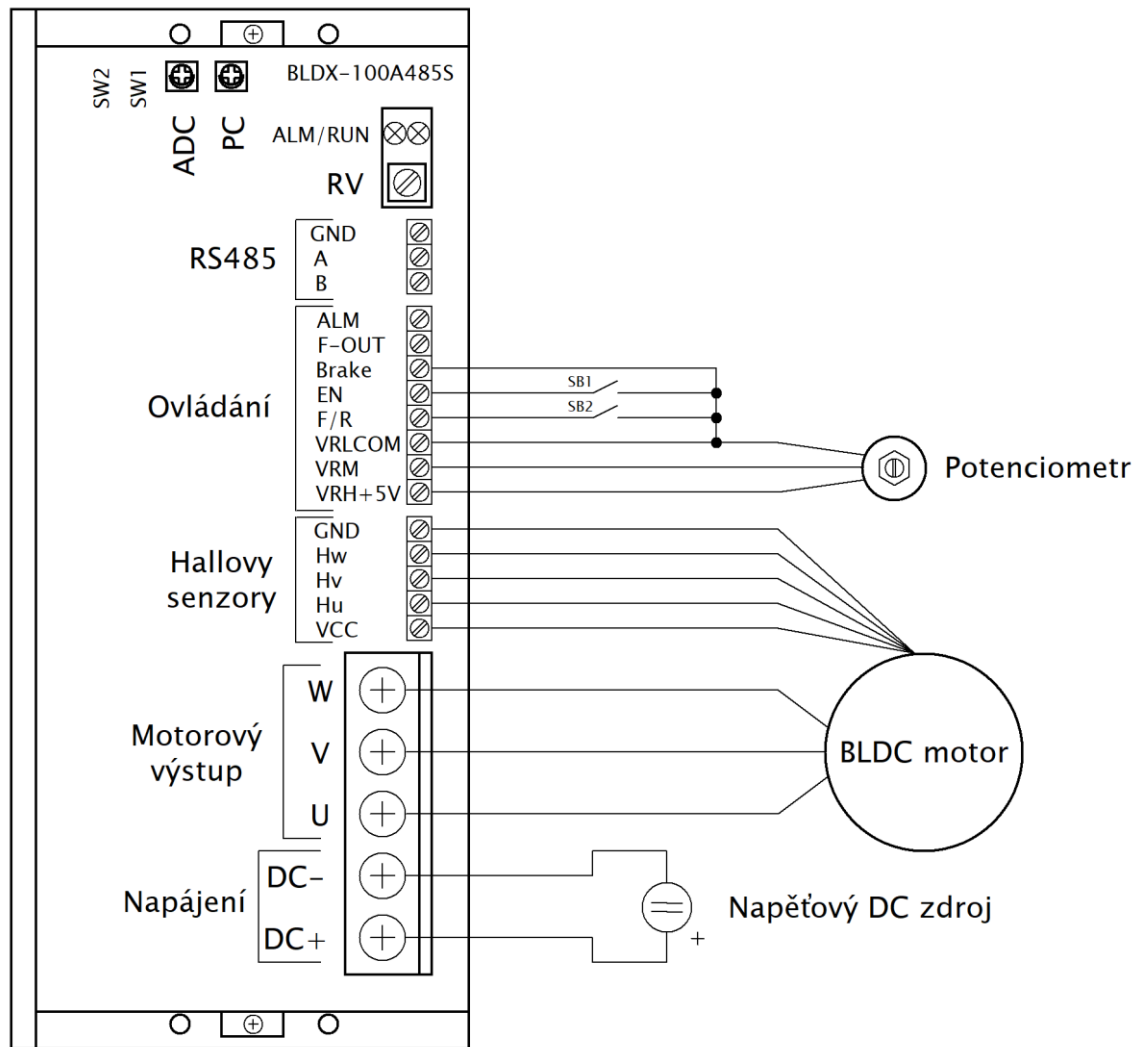
Pro výše uvedený BLDC motor byl vybrán kontrolér s typovým označením BLDX-100A485S, jehož návrh je založen na ARM 32bitovém mikrokontroleru. Jeho konstrukce není robustní. Nesmí být vystaven prachu, korozivním plynům, silným vibracím nebo vlhkosti vzduchu vyšší jak 80 %. Kontrolér nemá aktivní chlazení. Z toho důvodu musí být instalován v místě s dobrou ventilací. Je dimenzován na výstupní proud 65 A. Napájecí napětí může být v rozsahu 12–72 V DC. Konkrétní úroveň napájecího napětí by měla být stejná jako nominální napětí motoru. Jelikož kontrolér nemá ochranu proti přepólování vstupního napětí, je potřeba dbát zvýšené pozornosti při jeho zapojování. [10]

Kontrolér umí zpracovávat obdélníkové signály z Hallových senzorů a používat je pro potřebu elektronické komutace, a i jako zpětnou vazbu otáček motoru při řízení v uzavřené smyčce. Kontrolér tedy umí pracovat jak v otevřené, tak i v uzavřené regulační smyčce. Volba smyčky je realizována pomocí přepínače. Během testů kontrolérů bylo zjištěno, že výrobce zaměnil funkce jednotlivých stavů přepínače. V Tab. 3.2 je funkce stavů přepínače uvedena správně. Kontrolér obsahuje ještě jeden přepínač, pomocí kterého se volí počet pól-párů motoru. Na kontroléru lze nalézt dva trimry. Jeden slouží pro nastavení maximálního proudu a druhý pro volbu rozběhové a doběhové rampy. Reference otáček se může zadávat pomocí interního potenciometru, externího 10 k Ω potenciometru napájeného z kontroléru, napětového výstupu 0–5 V DC z PLC, PWM signálu 4 Hz – 10 kHz nebo pomocí MODBUS komunikace. Povel ke startu / stopu a změnu směru otáček lze zadat pomocí digitálních NPN vstupů nebo opět přes MODBUS komunikace. MODBUS RTU protokol lze využít nejen pro ovládání motoru, ale i pro přístup k parametrům kontroléru. Stav kontroléru lze vizuálně zjistit pomocí dvou LED diod. Jedna LED dioda se zelenou barvou indikuje stav kontroléru pod napětím a druhá LED dioda s červenou barvou signalizuje poruchu. Poruchový stav lze posílat pomocí digitálního NPN výstupu. Pomocí kontroléru lze i posílat aktuální otáčky motoru pomocí frekvenčního výstupu. Jedná se o odhadnuté otáčky, které lze vypočítat podle vzorce $n = 60 \cdot f/p$, kde f je frekvence z výstupu a p je počet pól-párů motoru. [10]

Povel ke startu motoru po směru hodinových ručiček pomocí digitálních vstupů se provede přivedením nuly do svorky EN a start motoru proti směru hodinových ručiček současným přivedením nuly do svorek EN a F/R. [10]



Obr. 3.3 – Fotografie kontroléru



Obr. 3.4 – Vzorové zapojení kontroléru pro ovládání přes digitální a analogové vstupy [10]

Přepínač	Stav	Funkce
SW1	ON	4 pól-páry
	OFF	2 pól-páry
SW2	ON	Uzavřená smyčka
	OFF	Otevřená smyčka

Tab. 3.2 – Popis funkcí stavů přepínačů kontroléru, zdroj [10], upraveno autorem

Svorky, přístroje	Označení	Funkce
RS485	GND	Země
	A	Vodič A
	B	Vodič B
Ovládání	ALM	Digitální výstup NPN – porucha
	F-OUT	Frekvenční výstup – aktuální otáčky
	Brake	Digitální vstup NPN – rychlé zastavení motoru
	EN	Digitální vstup NPN – umožnění chodu
	F/R	Digitální vstup NPN – volba směru otáček
	VRLCOM	Společná země 0 V pro ovládací signály
	VRM	Napěťový vstup pro referenci otáček
	VRH + 5 V	Výstupní napájení + 5 V DC, max 20 mA
Hallové senzory	GND	Výstupní napájení Hall. senzorů 0 V
	Hw	Vstupní signál z Hall. senzoru – w
	Hv	Vstupní signál z Hall. senzoru – v
	Hu	Vstupní signál z Hall. senzoru – u
	VCC	Výstupní napájení Hall. senzorů +5 V DC
Motorový výstup	W	Motorová fáze – W
	V	Motorová fáze – V
	U	Motorová fáze – U
Napájení	DC-	Záporný pól napájení
	DC+	Kladný pól napájení
Potenciometr	RV	Interní zadávání reference otáček
Trimry	PC	Nastavení proudového limitu
	ADC	Nastavení rozběhové / doběhové rampy

Tab. 3.3 – Popis svorek a přístrojů kontroléru, zdroj [10], upraveno autorem

3.4 Návrh a realizace ovládacího pultu modulu

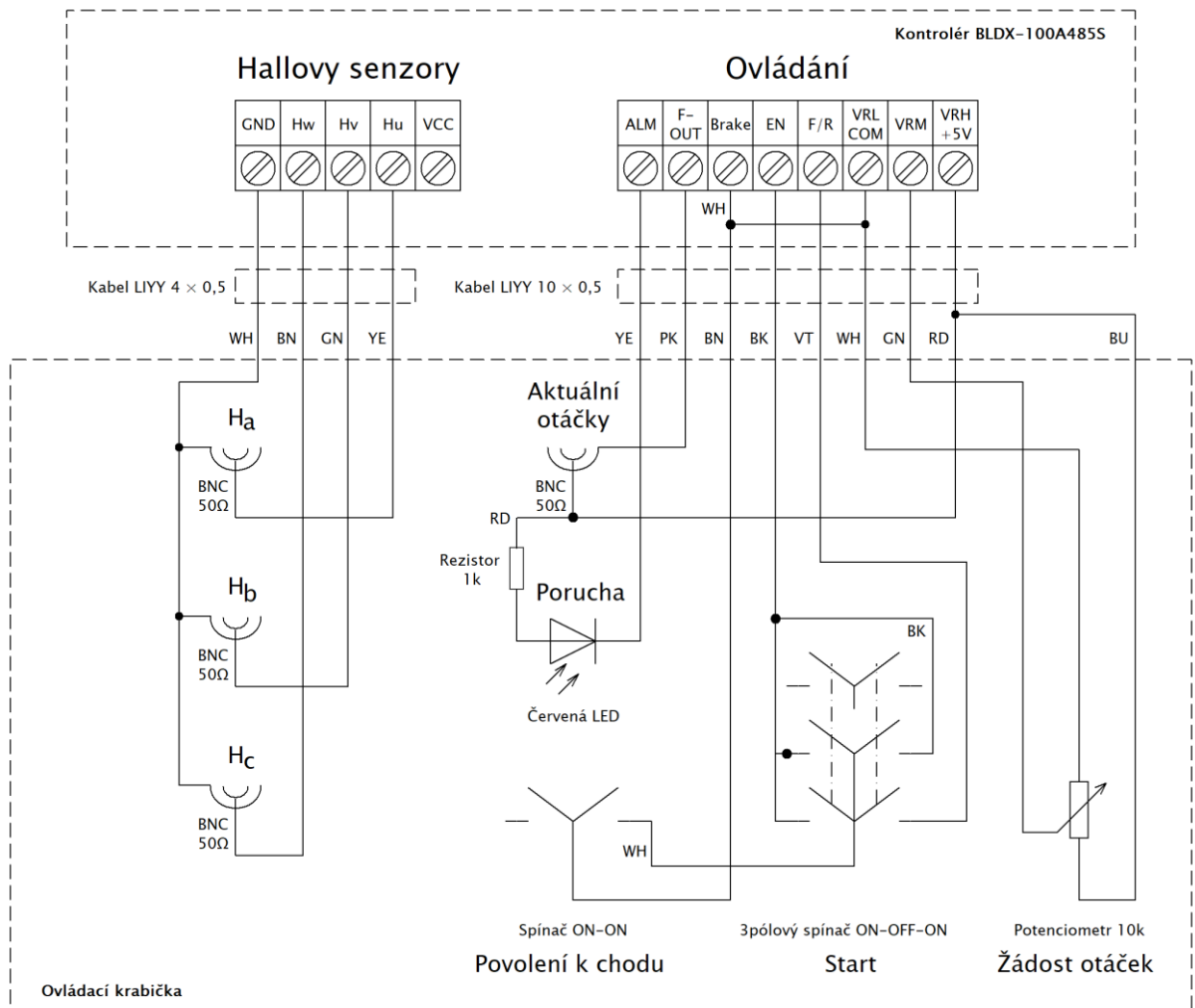
Ovládací pult laboratorního pracoviště musel být navržen tak, aby umožňoval základní ovládání motoru a obsahoval i možnost diagnostiky kontroléru a motoru. Pro takový ovládací pult byla vybrána černá plastová krabička KRADEX s typovým označením Z33A. Krabička je z ABS materiálu, který je pevný, houževnatý, netoxický a odolný vůči poškrábáním. [11] Šikmý sklon k delší straně krabičky umožňuje pohodlnější ovládání. Její rozměry plně vyhovují pro umístění a propojení jednotlivých součástek potřebných pro splnění požadavku.

Ovládání motoru je realizováno pomocí dvou páčkových spínačů a lineárního potenciometru. První spínač je 1pólový přepínací a dovoluje povolení k chodu. Pomocí druhého 3pólového přepínacího spínače se dává konkrétní povel k chodu motoru buď dopředu nebo dozadu. Bez sepnutí kontaktu prvního spínače je funkčnost druhého spínače blokována. Požadavek na rychlost otáčení motoru se provádí pomocí 10 k Ω lineárního potenciometru opatřeného číselnou stupnicí 0–10. Pokud ukazatel otočného hmatníku směřuje na číslici 0, tak bude žádost minimální, tj. 0 ot/min. V případě číslice 10 je žádost maximální, tj. cca 3 000 ot/min.

Kontrolér obsahuje dva výstupy. Jeden výstup je digitální a dává informaci o poruchovém stavu. Druhý výstup je frekvenční a pomocí něho lze zjistit odhadnuté aktuální otáčky motoru. Oba výstupy jsou vyvedeny na ovládací pult. Porucha kontroléru bude na pultě rozsvěcet červenou LED diodu a aktuální otáčky budou posílány na BNC konektor.

K lepším diagnostickým a pedagogickým účelům je pult vybaven ještě třemi dalšími BNC konektory. Na tyto konektory jsou vyvedeny signály z Hallových senzorů. Signály jdou separátním kabelem.

Schéma zapojení ovládání je vidět na Obr. 3.5.



Obr. 3.5 – Schéma zapojení v ovládací krabičce

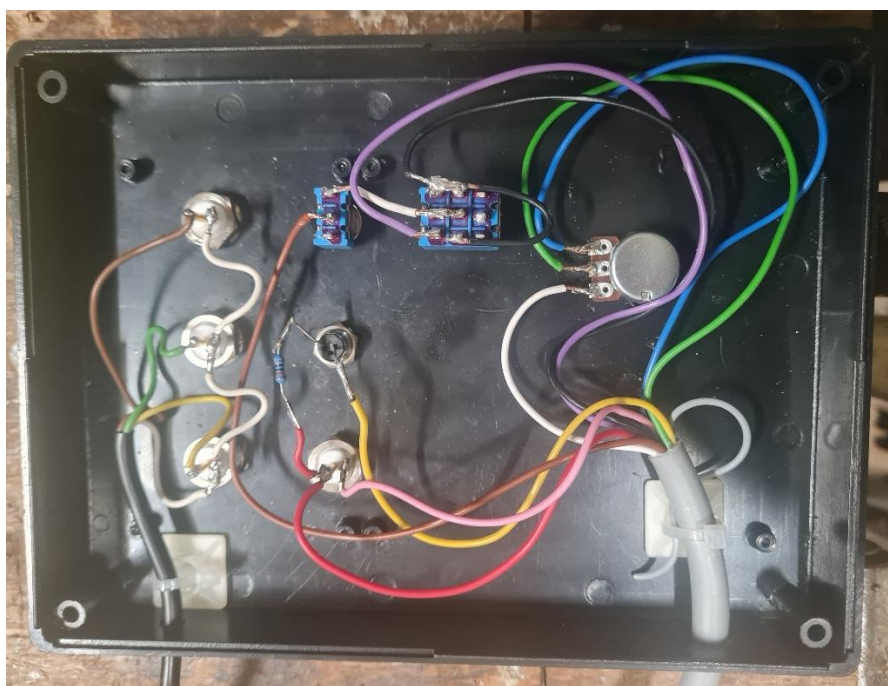
Před vlastní realizací bylo nutné si nejprve vhodně rozvrhnout umístění součástek na ploše. Součástky se rozdělily na ovládací a zpětnovazební. Ovládací byly dále rozděleny na povelové a referenční. Referenční součástka je potenciometr, kterým se zadává žádost na otáčky. Tato součástka bude často používaná, proto její poloha musí být dobře dostupná a výrazná. Byla pro ni tedy zvolena poloha vpravo dole. Potenciometr je pro snadnou manipulaci vybaven velkým hmatníkem a číselnou stupnicí. Mezi povelové součástky patří spínač pro povolení k chodu a spínač pro start. Ty byly umístěny ve spodní části, vlevo od potenciometru. Spínač pro start je umístěn blíže k potenciometru. Zpětnovazební součástky byly rozděleny na součástky pro signály

od motoru a kontroléru. Od motoru jdou signály ze tří Hallových senzorů do třech BNC konektorů. Tyto konektory byly rovnoměrně rozmístěny po levé straně. Od kontroléru jde informace o poruše do červené LED diody a odhadnutých aktuálních otáček motoru do BNC konektoru. Pro tyto součástky byla vybrána poloha vpravo od BNC konektorů Hallových senzorů nad spínačem pro povolení k chodu. Vzhledem k tomu, že BNC konektor je vystouplý, byla LED dioda umístěna níže kvůli lepší viditelnosti. Vpravo nahoře zbyl volný prostor, který se využil pro soupis štítkových hodnot BLDC motoru. Rozmístění součástek s popisky je vidět na Obr. 3.8.

Vlastní realizace byla rozdělena na mechanickou a elektrickou část. Mechanická část spočívala ve vyvrtání patřičných otvorů do krabičky a montáži součástek. Elektrická část spočívala v zapojení jednotlivých součástek dle schématu, viz Obr. 3.5. Spoj součástek a vodičů byl vytvořen pomocí procesu letování. Dva kabely těchto vodičů procházejí vyvrtanými otvory skrz stěnu vrchní části krabičky ven.



Obr. 3.6 – Fotografie ovládací krabičky s vyvrtanými otvory



Obr. 3.7 – Fotografie elektrického zapojení ovládací krabičky

Krabička je opatřena štítkem s funkčními popisky jednotlivých součástí a se soupisem jmenovitých hodnot BLDC motoru.



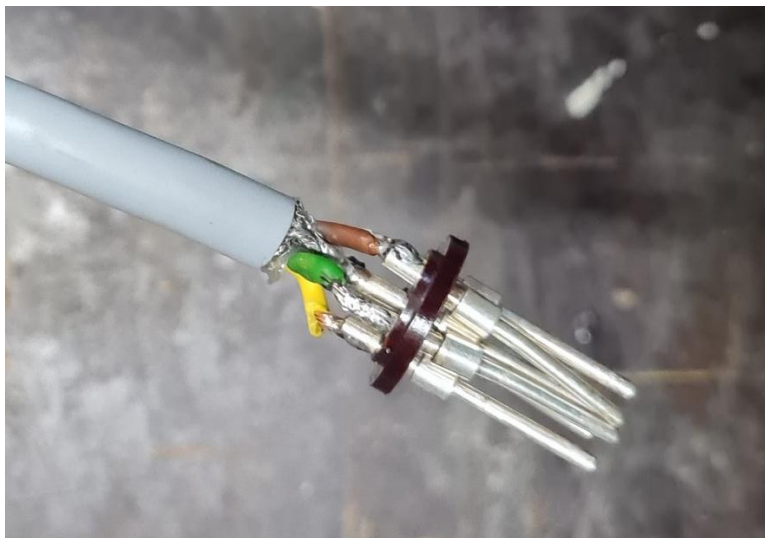
Obr. 3.8 – Fotografie konečného vzhledu ovládací krabičky

3.5 Propojení modulu s motorem BLDC a DC zdrojem

Jelikož modul nebude přímo u motoru, ale na laboratorním stole vzdáleném několika metrů bylo nutné navrhnout a zrealizovat jejich vzájemné elektrické propojení. Propojovat se budou silové vodiče motoru a slaboproudé vodiče z Hallových senzorů. Na straně modulu bude ještě propojení s DC zdrojem. Musejí se vybrat takové komponenty, které budou napětově a proudově vhodné a se kterými lze propojovat bez použití nástrojů. Pro silové vodiče byly vybrány zdířky do panelu 4 mm od společnosti Hirschmann. Tyto zdířky jsou určeny pro jmenovité napětí 60 V DC a zvládnou jmenovitý proud 63 A. [12] Jelikož výrobce nabízí zdířky různých barev byly vybrány pro motorový propoj zdířky černé barvy a pro napájení zdířka červené barvy pro kladný pól a modré barvy pro záporný pól. Na propojení vodičů z Hallových senzorů byla vybrána zánovní 6pinová šroubovací konektorová souprava robustní konstrukce ze skladu fakulty. Na straně modulu bude zásuvka do panelu a na straně motoru přívodka do panelu. Obě části se budou propojovat kabelem opatřeným konektory. Byl vybrán stíněný kabel LiYCY 5 × 0,5. Propojovací prvky budou montovány na zinkované U-profilu o rozměrech 20 × 33 × 20 tloušťky 1,5 mm.

U-profil se dodává v délce 2 m, proto bylo potřeba ho nejprve zkrátit na potřebné délky, které vycházely z počtu montovaných komponent. Kolem každé komponenty byl nechán prostor pro manipulaci. U-profil u motoru byl nakonec zkrácen na délku 200 mm a u modulu na délku 270 mm. Po seříznutí byly U-profilu zaobleny. Na předem určená místa byly vyvrtány otvory pro montáž komponent. Ve spodní části profilu byly rovněž vyvrtány otvory pro montáž na desku modulu a příruby motoru. Po očištění od kovových třísek byly komponenty namontovány. Nakonec byly na profily nalepeny štítky s funkčním popisem jednotlivých komponent.

Na propojení vodičů Hallových senzorů byl vybrán kabel s označením LiYCY. Nejprve byl kabel zkrácen na délku 7 m. Tato délka je dostatečná, aby kabel dosáhl od laboratorního stolu k motoru i s rezervou. Aby bylo možno ho zapojit do zásuvky a přívodky, bylo potřeba ho opatřit konektory. Na jedné straně bude konektor s piny a na druhé se zdířkami. Proto byl kabel v patřičné délce zbaven pláště. Stínění a jednotlivé vodiče byly systematicky napájeny na zdířky konektorů. Po napájení vodičů byly konektory smontovány. Pro ochranu vodičů proti vytržení byl za každý konektor navlečena bužírka stažená plastovou páskou. Na propojení motorových a napájecích vodičů budou využity místní laboratorní vodiče s nalisovanými vidlicemi nebo oky.



Obr. 3.9 – Fotografie naletovaných vodičů kabelu LiYCY na zdířky konektoru

3.6 Kompletace modulu laboratorního pracoviště

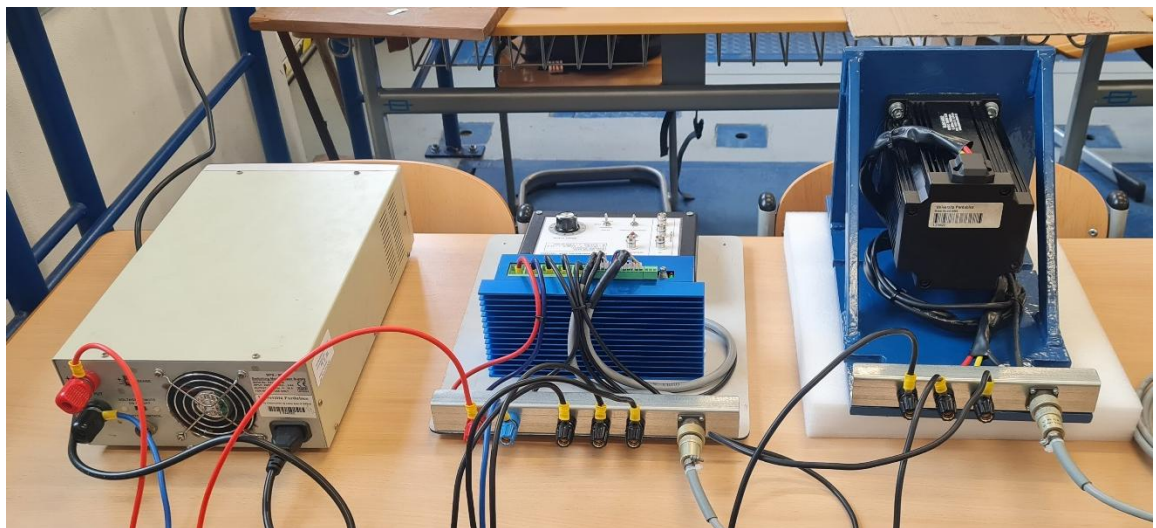
Pro montáž komponent modulu laboratorního pracoviště byla vybrána pro svou pevnost a dobrou opracovatelnost deska z kompozitního materiálu. Na desku bude umístěna ovládací krabice, kontrolér BLDC motoru a U-profil pro připojování vstupů a výstupů modulu. Rozmístění součástí bude následující. Nejbližší k operátorovi bude ovládací krabice, za ní bude umístěn kontrolér a úplně vzadu U-profil. Kontrolér bude mít horizontální polohu z důvodu lepší stability modulu. Kontrolér má sice chladič orientovaný pro vertikální montáž, ale pro laboratorní účely v laboratorních podmínkách bude kontrolér i v horizontální poloze dostatečně chlazený. Pro lepší manipulativnost bude deska vybavena o gumové nožičky.

Deska byla nejprve seříznuta na rozměry 290 × 340 mm. Rozměry byly zvoleny takové, aby se všechny komponenty na desku vešly a aby bylo možno provést jejich elektrické propojení. Hrany desky byly zaobleny. Do desky byly vyvrtány otvory pro montáž jednotlivých komponent. Otvory pro nožičky musely být umístěny v takové poloze, aby nedocházelo k překlápění modulu. Některá vybraná místa měla kolizi s komponentami na druhé straně. Proto muselo být při montáži nožiček použito samořezných šroubů. Po odvrtání otvorů byla provedena montáž komponent. Krabice s kontrolérem byla elektricky propojena pomocí vodičů dvou kabelů vyvedených z krabice. Vodiče byly zalisovány do izolovaných dutinek a zašroubovány do svorek kontroléru. Z U-profilu do kontroléru měly vést napájecí a motorové vodiče a vodiče pro Hallové senzory. Pro silové vedení byly zvoleny laněné vodiče H07V-K (CYA) o průřezu 6 mm², které mají proudovou

zatížitelnost na vzduchu o teplotě 30 °C maximálně 55,1 A. To je dostačující pro motor s jmenovitým proudem 52 A. [13] Pro kladný pól napájení byl zvolen vodič červené barvy, pro záporný pól modré barvy, pro motorové vodiče černé barvy. Na straně kontroléru byly vodiče nalisovány do izolovaných dutinek a zašroubovány do svorek, na straně U-profilu byly konce nalisovány na izolovaná kabelová oka a ta byla namontována na Hirschmann zdířky. Pro vodiče Halloových sensorů byl použit kabel LiYCY 5 × 0,5. Na straně kontroléru bylo opět provedeno zapojení přes izolované dutinky do svorek. Jelikož zde u některých vodičů dochází k paralelnímu větvení, musely být použity dvojité dutinky. Na straně U-profilu byly vodiče naletovány na zdířky zásuvky.



Obr. 3.10 – Fotografie čelního pohledu laboratorního pracoviště



Obr. 3.11 – Fotografie zadního pohledu laboratorního pracoviště

4 Měření na BLDC motoru

K ověření funkčnosti navrženého a vyrobeného modulu laboratorního pracoviště bude provedeno měření na BLDC motoru. Budou se měřit jednotlivé fyzikální veličiny a signály za chodu motoru, které budou zobrazeny na osciloskopu. Dále se budou měřit regulační a zatěžovací charakteristiky motoru.

Jelikož nebyla dostupná informace o počtu pólů motoru, bylo potřeba nejprve tento údaj zjistit experimentálně. Pro zjištění této hodnoty byl motor napájen mezi dvě fáze DC napětím z laboratorního zdroje. Magnetický tok rotoru bude mít snahu se zarovnat s magnetickým tokem statoru, a to způsobí natočení rotoru. Při ručním pootočení rotoru dojde k překlopení do jiné polohy, kde je rotorový tok opět zarovnán se statorovým. Počet překlopení neboli magnetických zarovnávaních během jedné mechanické otáčky nám dalo informaci o počtu pól-párů. Během měření bylo zjištěno, že rotor se během jedné otáčky překlopil 4krát. To znamená, že motor je 8pólový. Vzhledem k této informaci bylo nutné nastavit přepínač SW1 na kontroléru na pozici ON.

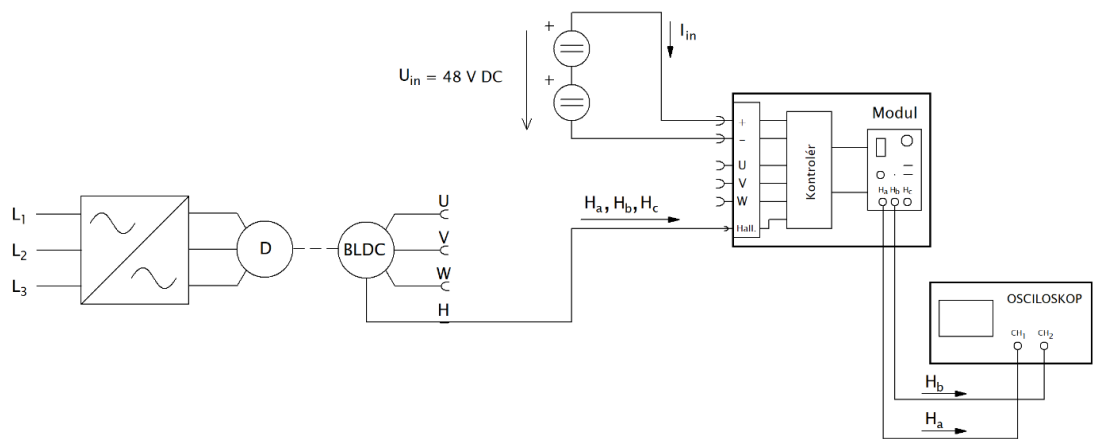
Během měření byly použity následující měřicí přístroje

- Laboratorní DC zdroj Manson HCS - 3602, $U_n = 1-32$ V DC, $I_{max} = 30$ A,
- Laboratorní DC zdroj Manson SPS9602, $U_n = 1-30$ V DC, $I_{max} = 30$ A,
- Analogový voltmetr elektromagnetický HLV-2,
- Analogový voltmetr magnetoelektrický,
- Digitální multimetr MASTECH MY68,
- Diferenční sonda HAMEG HZ115,
- Analogový ampérmetr elektromagnetický,
- AC / DC proudové kleště FLUKE i310s, maximální proud 300 A RMS,
- Osciloskop Tektronix TDS 1002,
- Dynamometr VUES.

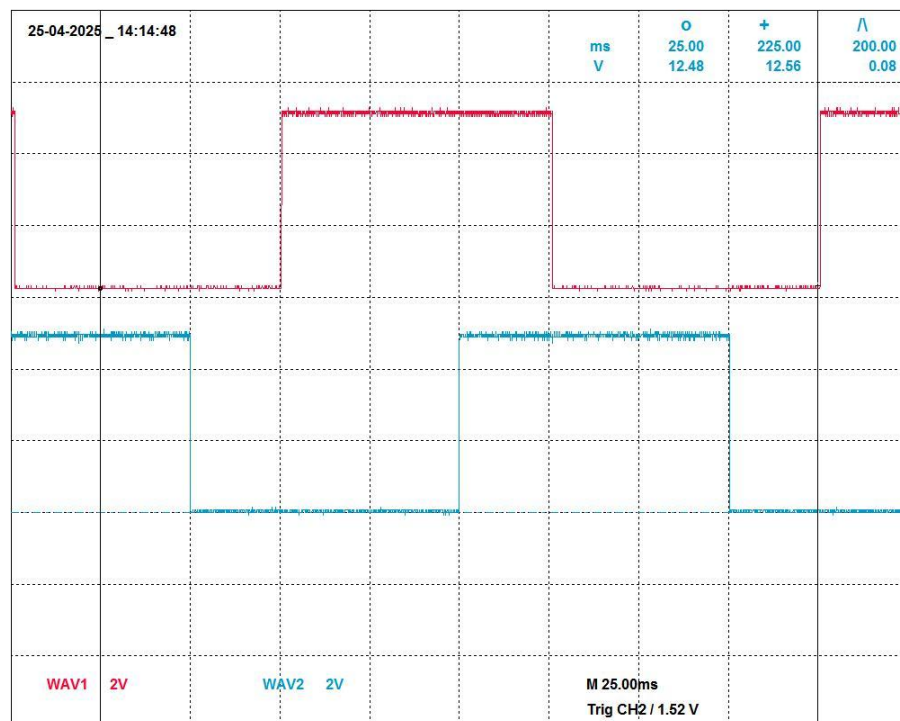
Dva stejnosměrné laboratorní zdroje byly použity z toho důvodu, že bylo potřeba dosáhnout jmenovitého napětí na DC straně kontroléru podle specifikace motoru, a to bylo napětí 48 V DC. Oba tyto zdroje nejsou schopny samostatně této úrovně dosáhnout a jiný zdroj nebyl k dispozici. Zdroje se proto zapojily do série a na prvním se nastavilo napětí 16 V DC a na druhém 32 V DC.

4.1 Měření fyzikálních veličin a signálů za chodu motoru

Nejprve bylo provedeno měření signálů z Hallových senzorů. Zapojil se obvod podle schématu na Obr. 4.1. Dynamometrem se roztočil BLDC motor na 100 ot/min. Jelikož byl dostupný jen dvoukanálový osciloskop, tak bylo možno měřit jenom dva signály. Na kanálu 1 byl přiveden signál z H_a , na kanálu 2 z H_b . Na Obr. 4.2 je vidět zobrazení těchto signálů na osciloskopu. Signály mají obdélníkový tvar a jsou posunuty o 120° elektrických.

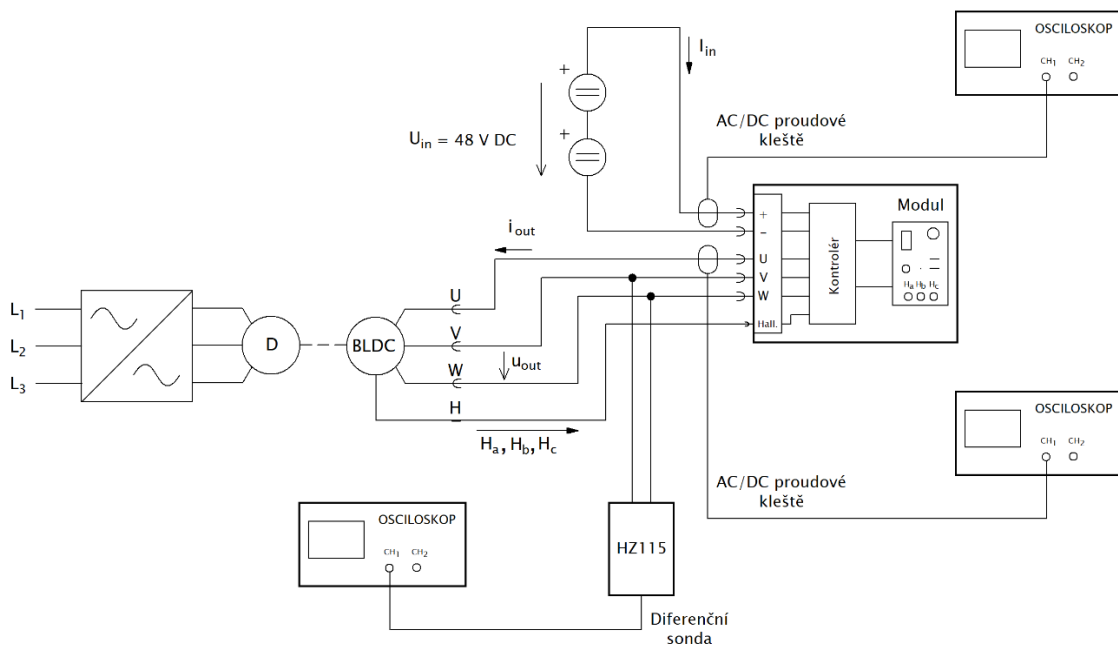


Obr. 4.1 – Schéma zapojení pro měření Hallových signálů

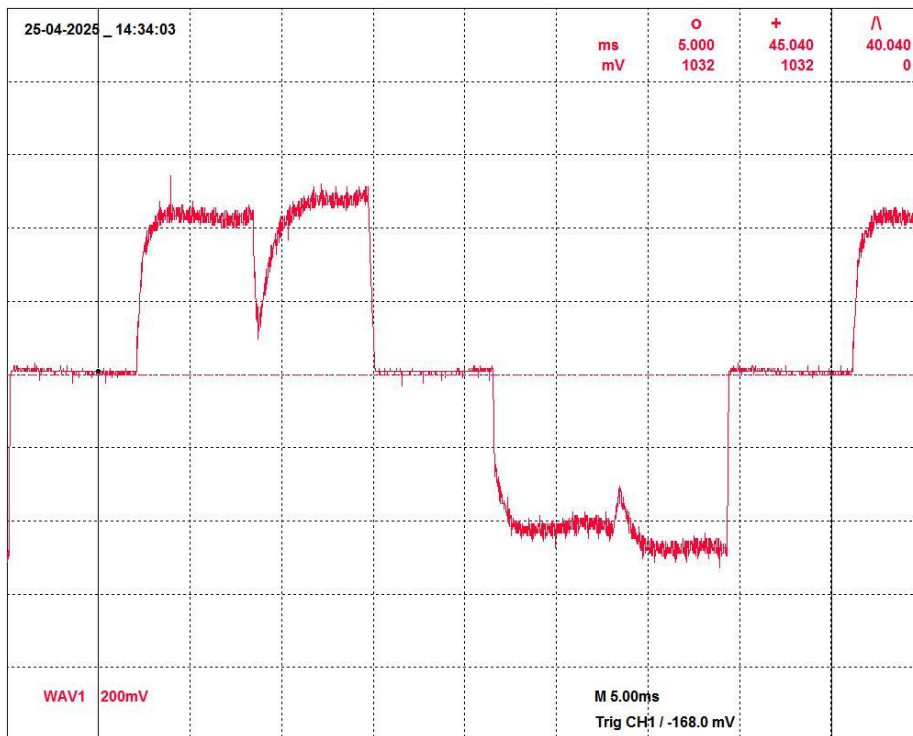


Obr. 4.2 – Zobrazení signálů z Hallových senzorů, H_a – kanál 1 červeně, H_b – kanál 2 modře

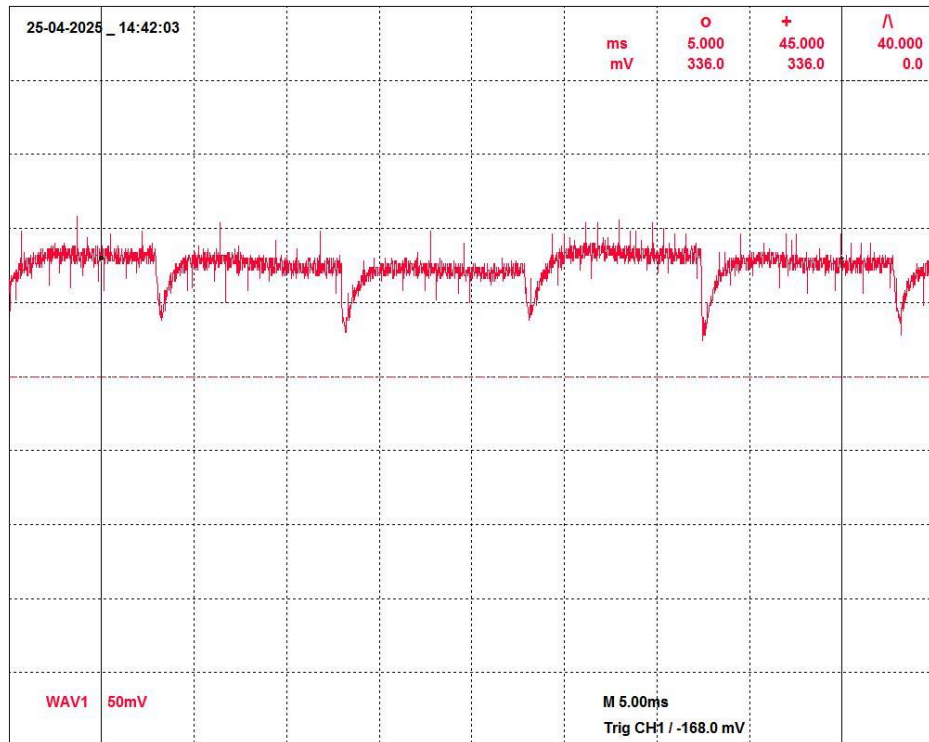
Potom se měřilo výstupní střídavé sdružené napětí a střídavý fázový proud za kontrolérem a vstupní stejnosměrný proud před kontrolérem. Zapojil se obvod dle schématu na Obr. 4.3. Jelikož byl k dispozici jen jeden osciloskop, tak se měření jednotlivých veličin realizovalo postupně. Motor se pomocí kontroléru roztočil na 250 ot/min a dynamometrem se zatížil na moment 5 Nm. Na Obr. 4.4 je vidět průběh výstupního střídavého proudu. Průběh krásně ukazuje šest fází komutace během jedné elektrické otáčky. Zobrazení průběhu vstupního stejnosměrného proudu je na Obr. 4.5. Zde jsou krásně vidět poklesy proudu během komutace. Průběh výstupního střídavého napětí je zobrazen na Obr. 4.6. Výstupní napětí je ovlivněno velikostí indukovaného napětí. Při této rychlosti je indukované napětí ještě nízké. Tvar průběhu lehce připomíná lichoběžník.



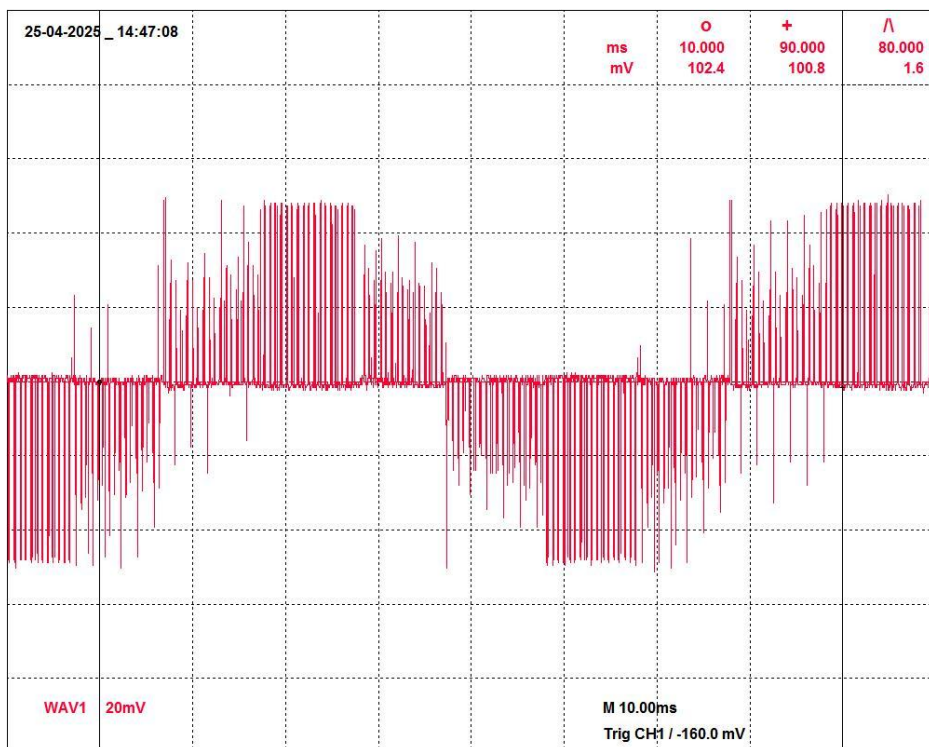
Obr. 4.3 – Schéma zapojení pro měření střídavého sruženého napětí a střídavého proudu za kontrolérem a stejnosměrného proudu před kontrolérem



Obr. 4.4 – Fázový výstupní střídavý proud z kontroléru při zatížení motoru 5 Nm

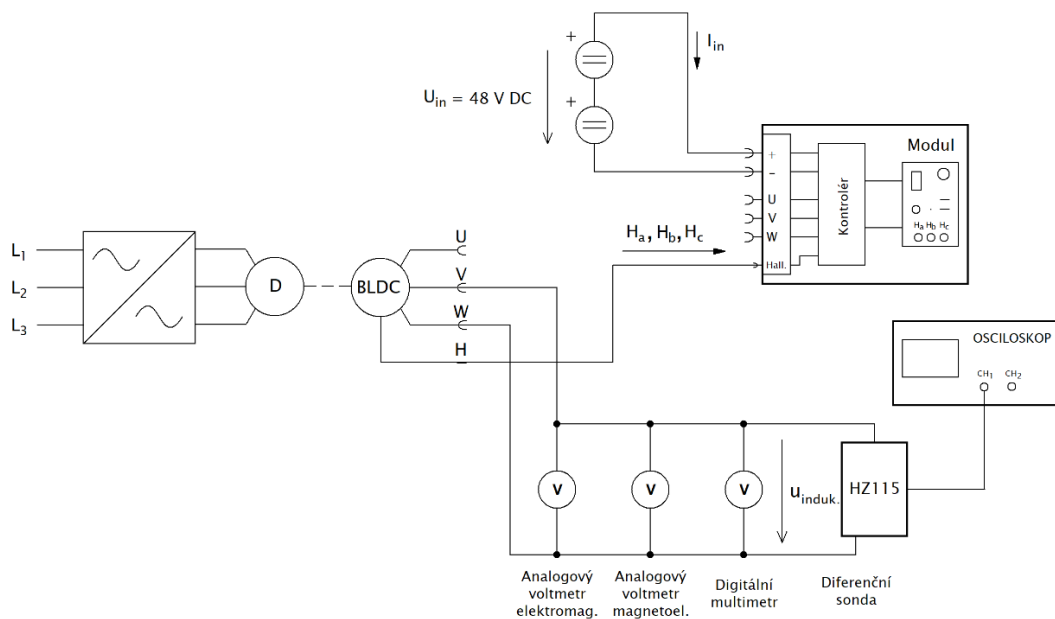


Obr. 4.5 – Vstupní stejnosměrný proud do kontroléru při zatížení motoru 5 Nm

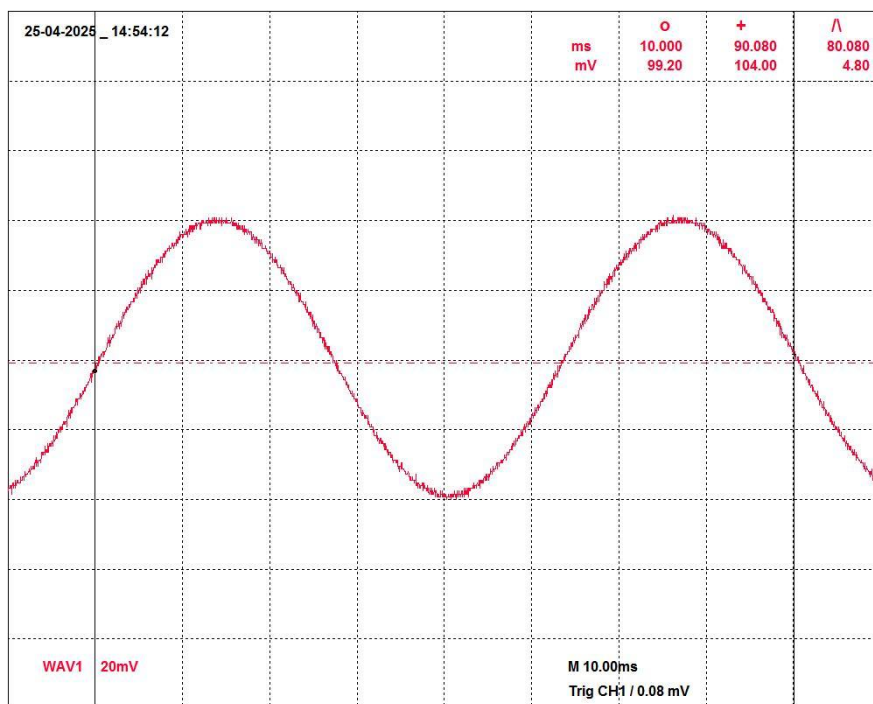


Obr. 4.6 – Výstupní střídavé sdružené napětí za kontrolérem při zatížení motoru a 250 ot/min

Následně se měřilo indukovaného napětí z BLDC motoru. Obvod se zapojil podle schématu na Obr. 4.7. Motor se pomocí dynamometru roztočil na 3 000 ot/min. Zobrazení indukovaného napětí na osciloskopu je vidět na Obr. 4.8. Průběh signálu je sinusový.

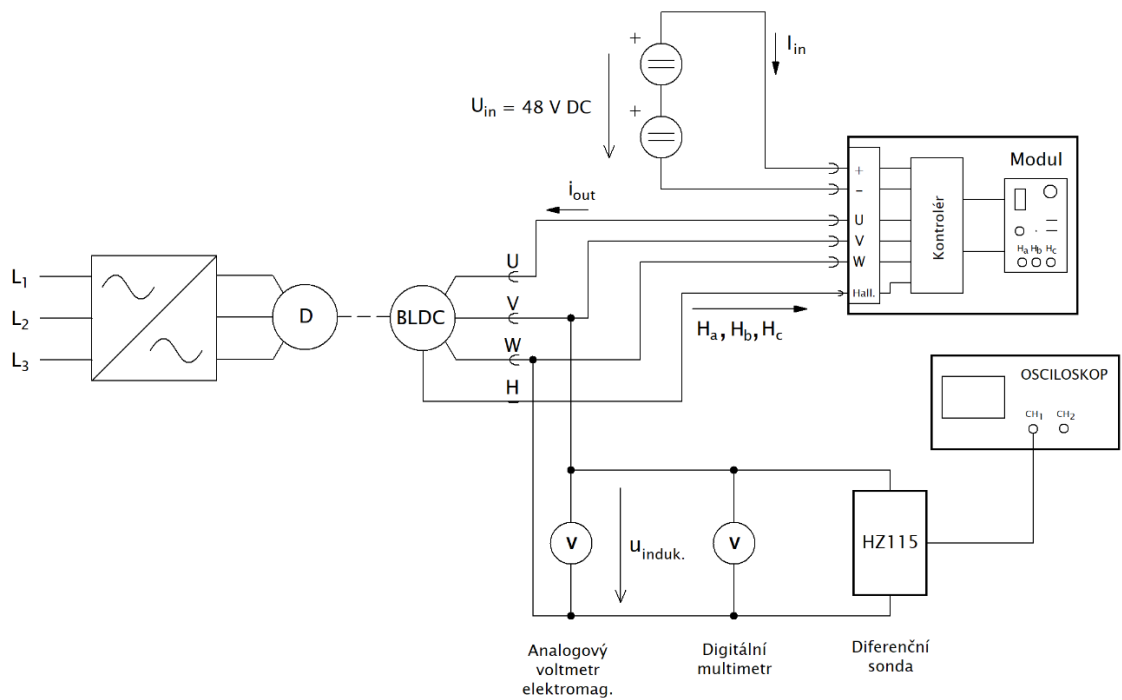


Obr. 4.7 – Schéma zapojení pro měření indukovaného napětí

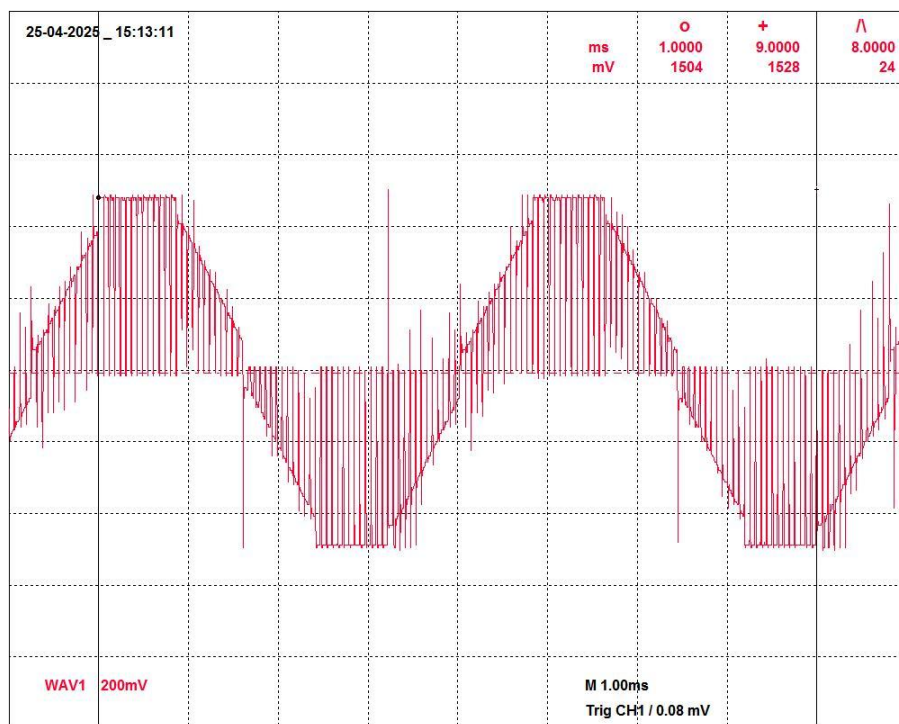


Obr. 4.8 – Indukované napětí z motoru při 3 000 ot/min

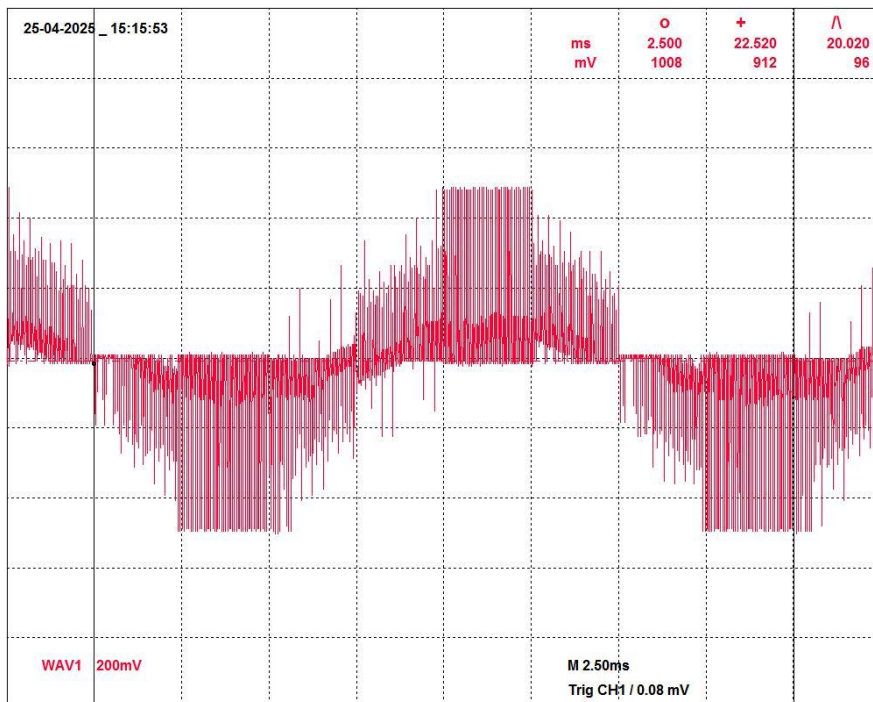
Nakonec se provedlo měření výstupního střídavého sdruženého napětí z kontroléru při různých otáčkách bez zatížení motoru. Obvod byl zapojen dle schématu na Obr. 4.9. Motor byl pomocí kontroléru nejprve roztočen na 3 245 ot/min a pak na 1 000 ot/min. Zobrazení těchto napětí jsou vidět na Obr. 4.10 a Obr. 4.11. Výstupní napětí za střídačem je ovlivňováno velikostí indukovaného napětí. Při menších otáčkách motoru, kdy je střída PWM nízká, je indukované napětí nízké. Při vyšších otáčkách je tomu naopak. Při 3 245 ot/min je průběh zobrazený na osciloskopu již téměř lichoběžníkový.



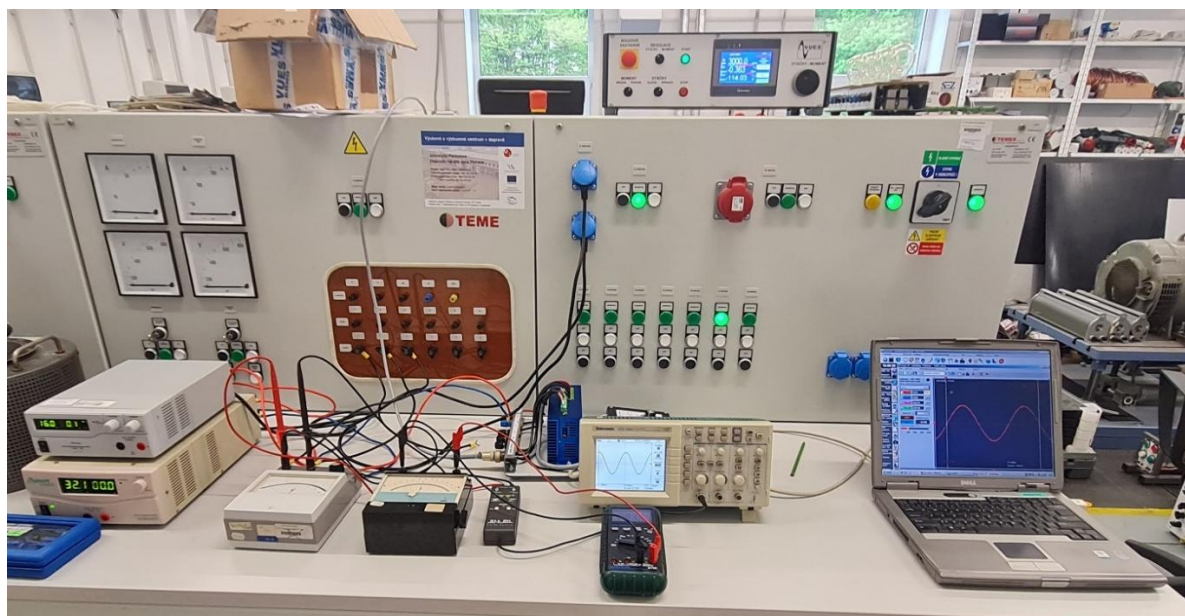
Obr. 4.9 – Schéma zapojení pro měření výstupního napětí



Obr. 4.10 – Výstupní napětí naprázdno při 3 245 ot/min



Obr. 4.11 – Výstupní napětí naprázdno při 1 000 ot/min



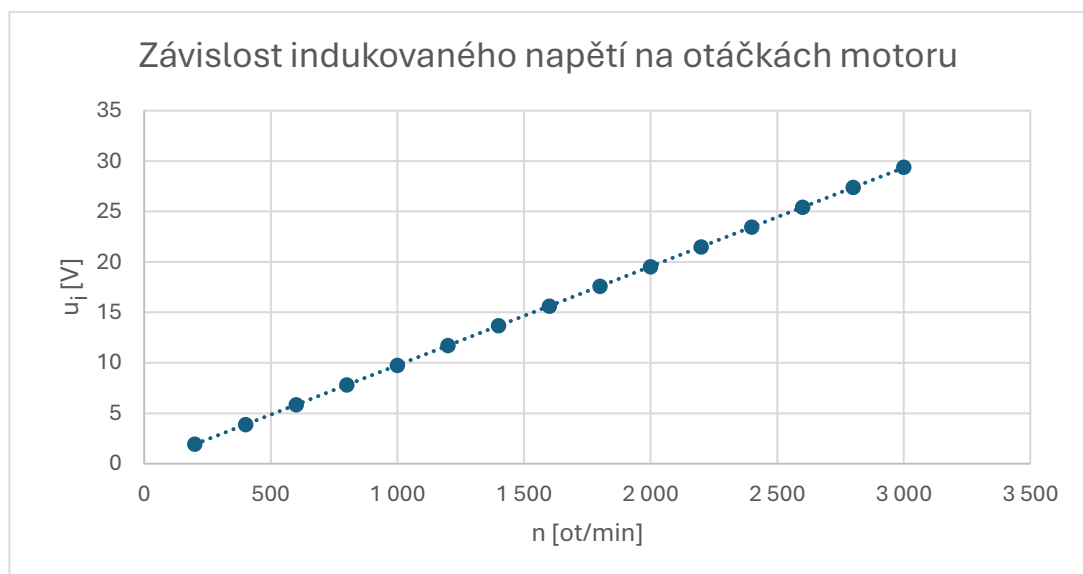
Obr. 4.12 – Fotografie měření indukovaného napětí na motorových svorkách

4.2 Měření regulačních charakteristik motoru

Měřili se dvě regulační charakteristiky. Nejprve se změřila závislost indukovaného napětí na otáčkách motoru. Měřilo se sdružené efektivní napětí. Obvod se zapojil podle schématu na Obr. 4.7. Použily se dva analogové a jeden digitální voltmetr z toho důvodu, aby se porovnala měřená hodnota z různých měřicích přístrojů. Dynamometrem se roztočil motor a měřilo se indukované napětí na motorových svorkách. Měřilo se od 3 000 do 200 ot/min po 200 ot/min. Tabulka se změřenými hodnotami a výsledný graf jsou níže. Během měření měřicí přístroje ukazovaly téměř stejnou naměřenou hodnotu. Pro jednoduchost zápisu hodnot se do tabulky uvedla hodnota z digitálního měřicího přístroje. Z výsledného grafu je vidět lineární závislost indukovaného napětí na otáčkách motoru.

n [ot/min]	u_i [V]
3 000	29,38
2 800	27,38
2 600	25,42
2 400	23,46
2 200	21,49
2 000	19,53
1 800	17,58
1 600	15,62
1 400	13,67
1 200	11,71
1 000	9,76
800	7,80
600	5,85
400	3,89
200	1,94

Tab. 4.1 – Závislost indukovaného napětí na otáčkách motoru

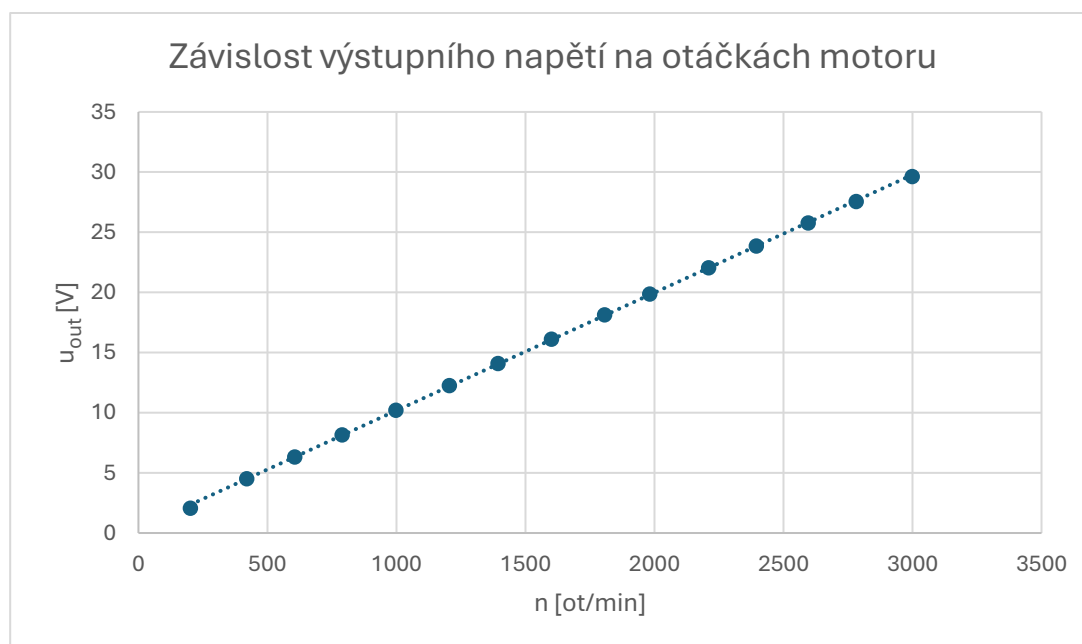


Obr. 4.13 – Graf závislosti indukovaného napětí na otáčkách motoru

Následně se změřila závislost výstupního napětí z kontroléru na otáčkách motoru. Opět se měřilo sdružené efektivní napětí. Obvod se zapojil podle schématu na Obr. 4.9. Kontrolérem se roztočil motor a na motorových svorkách se měřilo výstupní napětí. Kontrolér měl nastavenou regulaci v otevřené smyčce. Měřilo se zhruba od 200 do 3 000 ot/min po 200 ot/min. Přesná hodnota otáček se pomocí citlivého potenciometru kontroléru nastavovala obtížně. Tabulka se změřenými hodnotami a výsledný graf jsou níže. Z grafu je opět vidět lineární závislost výstupního napětí na otáčkách motoru.

n [ot/min]	u_{out} [V]
201	2,08
419	4,53
605	6,32
789	8,16
998	10,22
1205	12,26
1394	14,09
1601	16,12
1807	18,14
1982	19,86
2210	22,06
2395	23,86
2595	25,78
2781	27,57
2999	29,65

Tab. 4.2 – Závislost výstupního napětí na otáčkách motoru



Obr. 4.14 – Graf závislosti výstupního napětí na otáčkách motoru

n [ot/min]	M [Nm]	P [W]	I_{in} DC [A]	i_{out} AC [A]	u_{out} AC [V]	η [-]
504	0	0	0,4	0	5,38	0
340	1	35	1,4	8,0	4,43	0,52
270	2	56	2,5	14,8	4,37	0,47
205	3	65	3,5	20,5	4,29	0,39
142	4	60	4,6	27,5	4,26	0,27
80	5	43	5,6	34,0	4,23	0,16

Tab. 4.3 – Měření veličin během zatěžování při referenci 500 ot/min v otevřené smyčce

n [ot/min]	M [Nm]	P [W]	I_{in} DC [A]	i_{out} AC [A]	u_{out} AC [V]	η [-]
1 005	0	0	0,8	0	10,24	0
647	1	68	2,4	8,0	7,53	0,59
571	2	120	4,1	14,5	7,40	0,61
496	3	155	5,8	21,0	7,31	0,56
424	4	177	7,6	27,5	7,22	0,49
357	5	187	9,2	34,0	7,16	0,42

Tab. 4.4 – Měření veličin během zatěžování při referenci 1 000 ot/min v otevřené smyčce

n [ot/min]	M [Nm]	P [W]	I_{in} DC [A]	i_{out} AC [A]	u_{out} AC [V]	η [-]
1 500	0	0	1,2	0	15,09	0
979	1	103	3,4	8,0	10,84	0,63
895	2	188	5,8	14,5	10,69	0,68
809	3	254	8,3	21,0	10,56	0,64
729	4	305	10,5	27,5	10,47	0,61
659	5	345	13,2	34,5	10,39	0,54

Tab. 4.5 – Měření veličin během zatěžování při referenci 1 500 ot/min v otevřené smyčce

n [ot/min]	M [Nm]	P [W]	I_{in} DC [A]	i_{out} AC [A]	u_{out} AC [V]	η [-]
2 004	0	0	1,6	0	19,94	0
1 383	1	145	4,6	8,0	14,83	0,66
1 290	2	270	8,0	14,5	14,64	0,70
1 197	3	376	11,3	21,0	14,48	0,69
1 112	4	466	14,6	27,5	14,38	0,66
1 038	5	544	18,0	34,5	14,30	0,63

Tab. 4.6 – Měření veličin během zatěžování při referenci 2 000 ot/min v otevřené smyčce

n [ot/min]	M [Nm]	P [W]	I_{in} DC [A]	i_{out} AC [A]	u_{out} AC [V]	η [-]
2 506	0	0	2,0	0	24,74	0
1 917	1	201	6,2	8,0	20,03	0,68
1 812	2	380	10,6	14,5	19,80	0,75
1 709	3	537	15,2	20,7	19,55	0,74
1 611	4	675	19,5	27,5	19,44	0,72
1 524	5	799	24,0	34,0	19,35	0,69

Tab. 4.7 – Měření veličin během zatěžování při referenci 2 500 ot/min v otevřené smyčce

n [ot/min]	M [Nm]	P [W]	$I_{in DC}$ [A]	$i_{out AC}$ [A]	$u_{out AC}$ [V]	η [-]
2 997	0,0	0	2,4	0	29,41	0
2 661	1,0	279	8,5	8,0	27,07	0,68
2 540	2,0	532	14,5	14,5	26,73	0,76
2 419	3,0	760	20,5	20,5	26,42	0,77
2 309	4,0	968	26,5	27,0	26,26	0,76
2 259	4,5	1065	29,5	30,0	26,20	0,75

Tab. 4.8 – Měření veličin během zatěžování při referenci 3 000 ot/min v otevřené smyčce

n [ot/min]	M [Nm]	P [W]	$I_{in DC}$ [A]	$i_{out AC}$ [A]	$u_{out AC}$ [V]	η [-]
1 016	0	0	0,7	0	10,16	0
1 016	1	107	3,5	8,0	11,11	0,64
1 016	2	213	6,5	14,5	11,88	0,68
1 016	3	319	10,0	21,0	12,65	0,66
1 016	4	426	13,7	28,0	13,40	0,65
1 016	5	532	17,7	34,5	14,08	0,63

Tab. 4.9 – Měření veličin během zatěžování při referenci 1 000 ot/min v uzavřené smyčce

n [ot/min]	M [Nm]	P [W]	$I_{in DC}$ [A]	$i_{out AC}$ [A]	$u_{out AC}$ [V]	η [-]
1 994	0	0	1,6	0	19,66	0
1 994	1	209	6,5	8,0	20,71	0,67
1 995	2	418	11,5	14,5	21,59	0,76
1 995	3	627	17,3	21,0	22,41	0,76
1 994	4	836	23,4	27,0	23,22	0,74
1 995	5	1045	29,6	33,5	24,00	0,74

Tab. 4.10 – Měření veličin během zatěžování při referenci 2 000 ot/min v uzavřené smyčce

n [ot/min]	M [Nm]	P [W]	$I_{in DC}$ [A]	$i_{out AC}$ [A]	$u_{out AC}$ [V]	η [-]
2 992	0	0	2,5	0	29,29	0
2 992	1,0	315	9,5	8,0	30,15	0,69
2 992	2,0	627	17,0	14,5	31,15	0,77
2 991	3,0	940	25,0	20,5	32,04	0,78
2 965	3,5	1 089	28,5	25,5	32,23	0,80

Tab. 4.11 – Měření veličin během zatěžování při referenci 3 000 ot/min v uzavřené smyčce

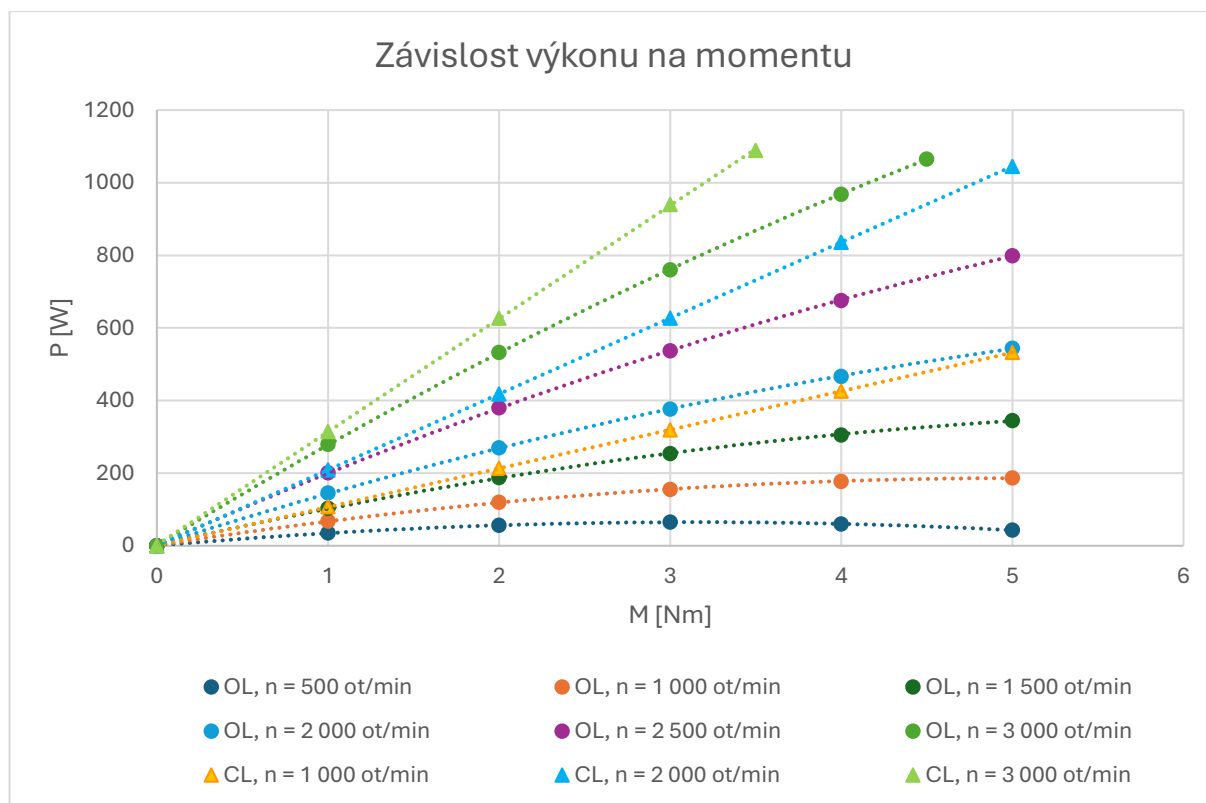
Z grafu závislosti výkonu na momentu je vidět, že s rostoucím zatížením roste i výkon motoru. U měření s uzavřenou smyčkou je růst lineární. U otevřené smyčky je vzhledem k poklesům otáček růst nelineární. Přírůstek výkonu je se zvyšujícím se zatížením menší. U měření s referenčními 500 ot/min se při vyšším zatížení výkon dokonce zmenšuje.

Pokles otáček při zatížení v otevřené smyčce je dobře vidět v grafu závislosti otáček motoru na momentu. Překvapující je velký pokles otáček při zatížení z 0 Nm na 1 Nm. Při následném zatěžování jsou poklesy otáček už téměř lineární.

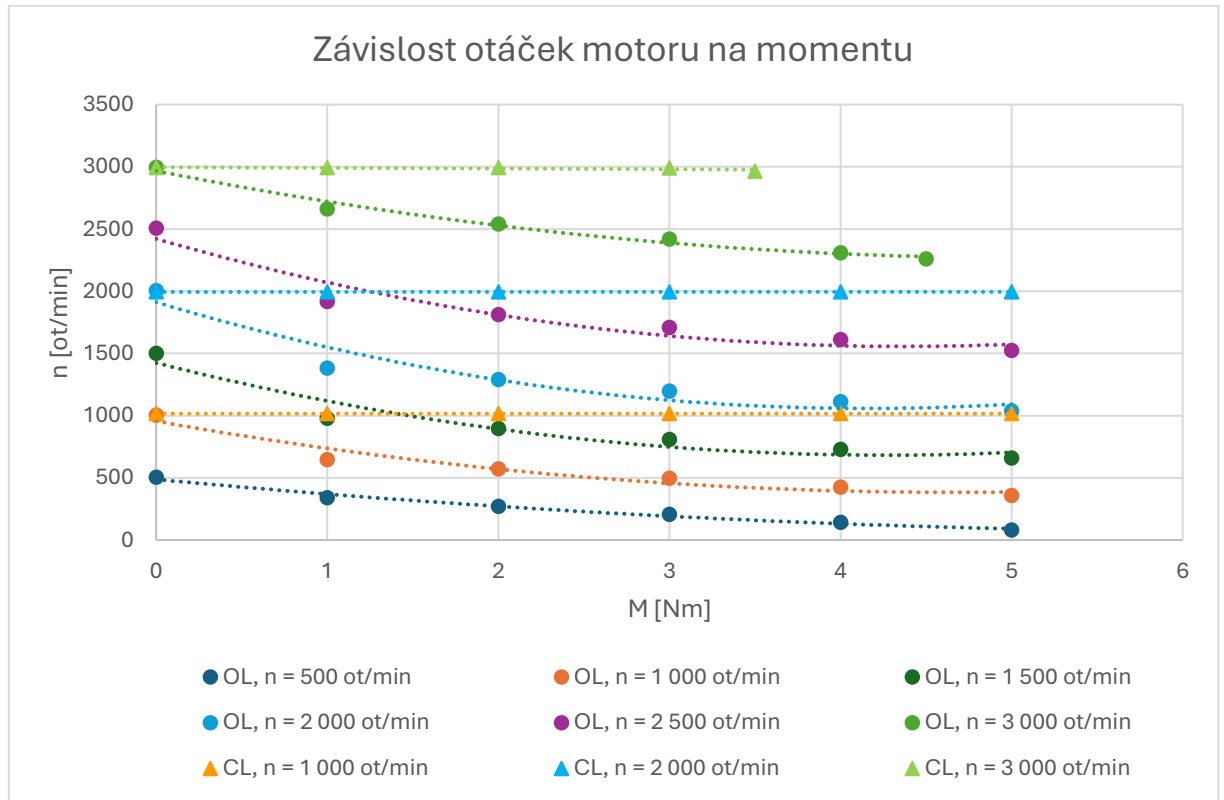
S rostoucím zatížením samozřejmě roste i proud. Střední hodnota stejnosměrného proudu odebíraná kontrolérem je různá pro různé referenční otáčky. V případě regulace v uzavřené smyčce je nárůst proudu vyšší než v otevřené smyčce. Efektivní hodnota střídavého proudu odebíraná motorem je pro všechny referenční otáčky v otevřené i uzavřené smyčce téměř shodná. Průběh roste lineárně.

Účinnost systému motor s kontrolérem se průměrně pohybuje v rozmezí 60–80 %. Při nízkých referenčních otáčkách v otevřené smyčce účinnost s rostoucím zatížením hodně klesá.

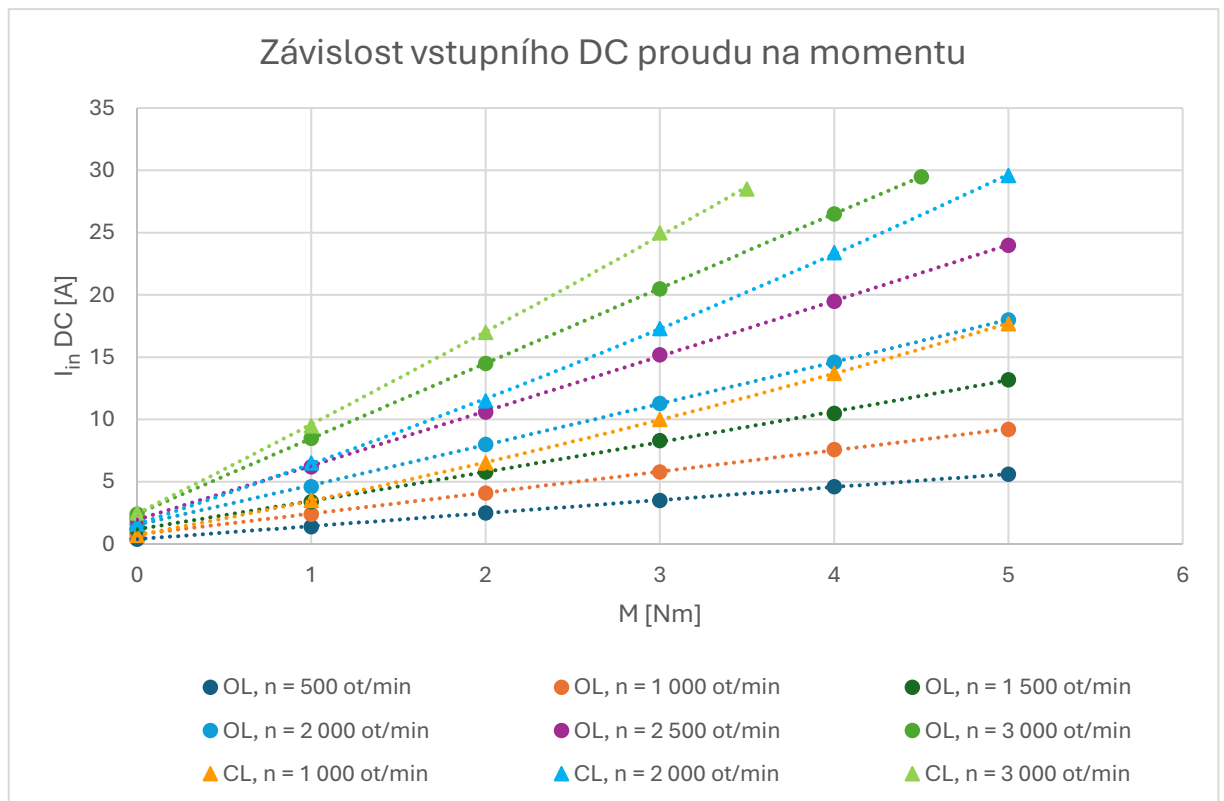
Efektivní hodnota střídavého sdruženého napětí na výstupu z kontroléru v otevřené smyčce se zatížením klesá. Na začátku zatěžování je opět prudký pokles hodnoty. V uzavřené smyčce výstupní napětí se zatížením stoupá. Je to z toho důvodu, aby kontrolér udržel referenční otáčky během zatěžování.



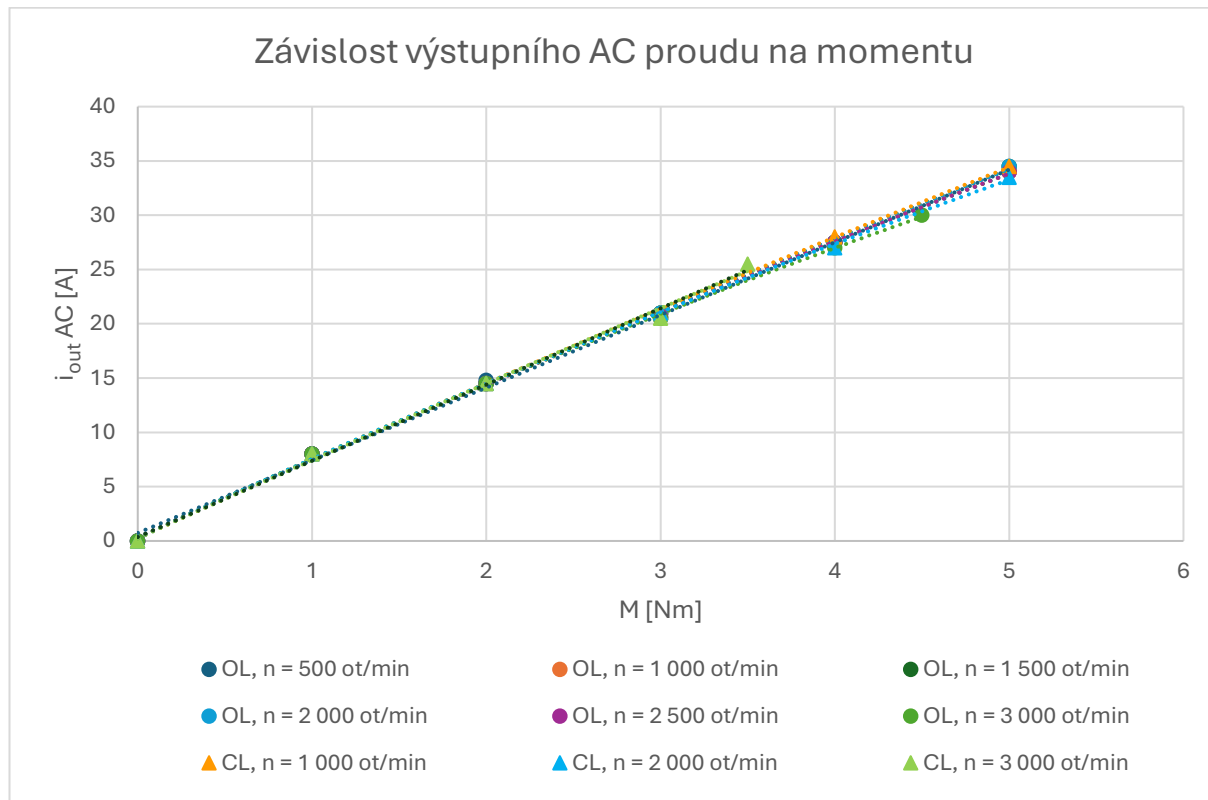
Obr. 4.16 – Graf závislosti výkonu na momentu



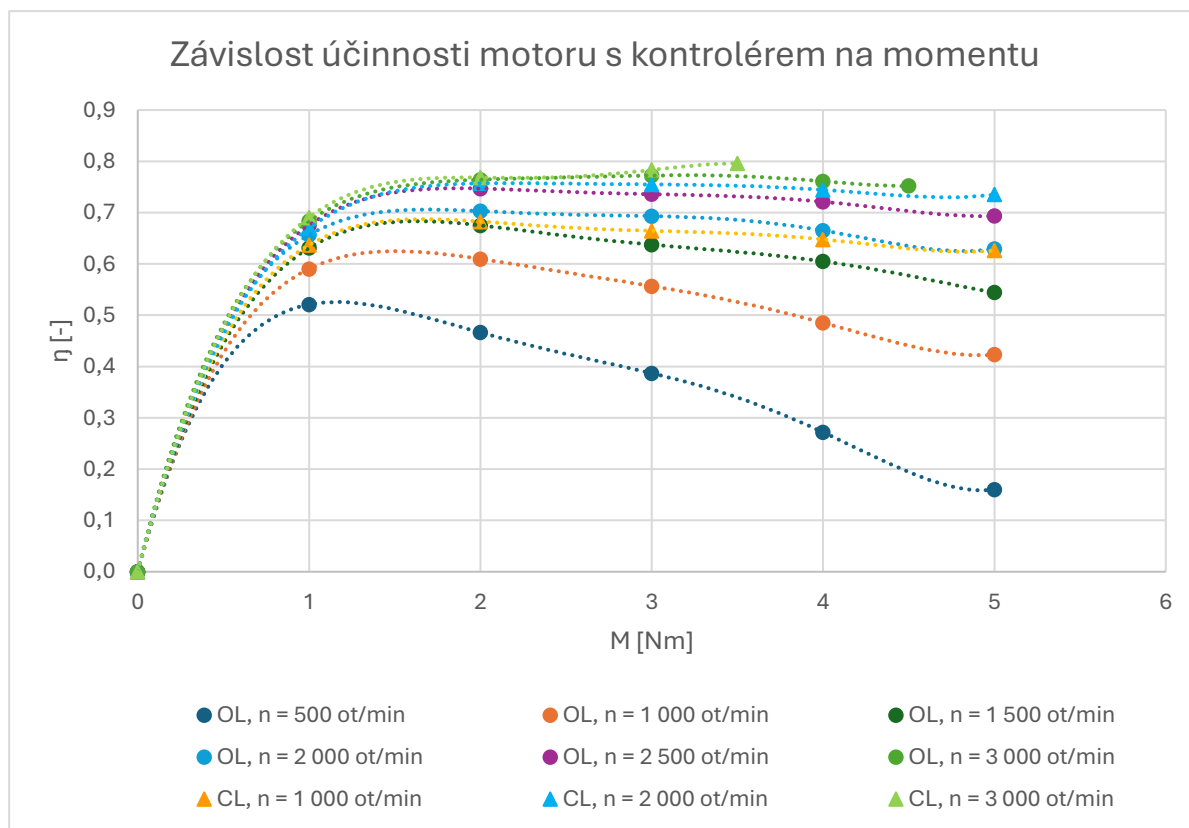
Obr. 4.17 – Graf závislosti otáček motoru na momentu



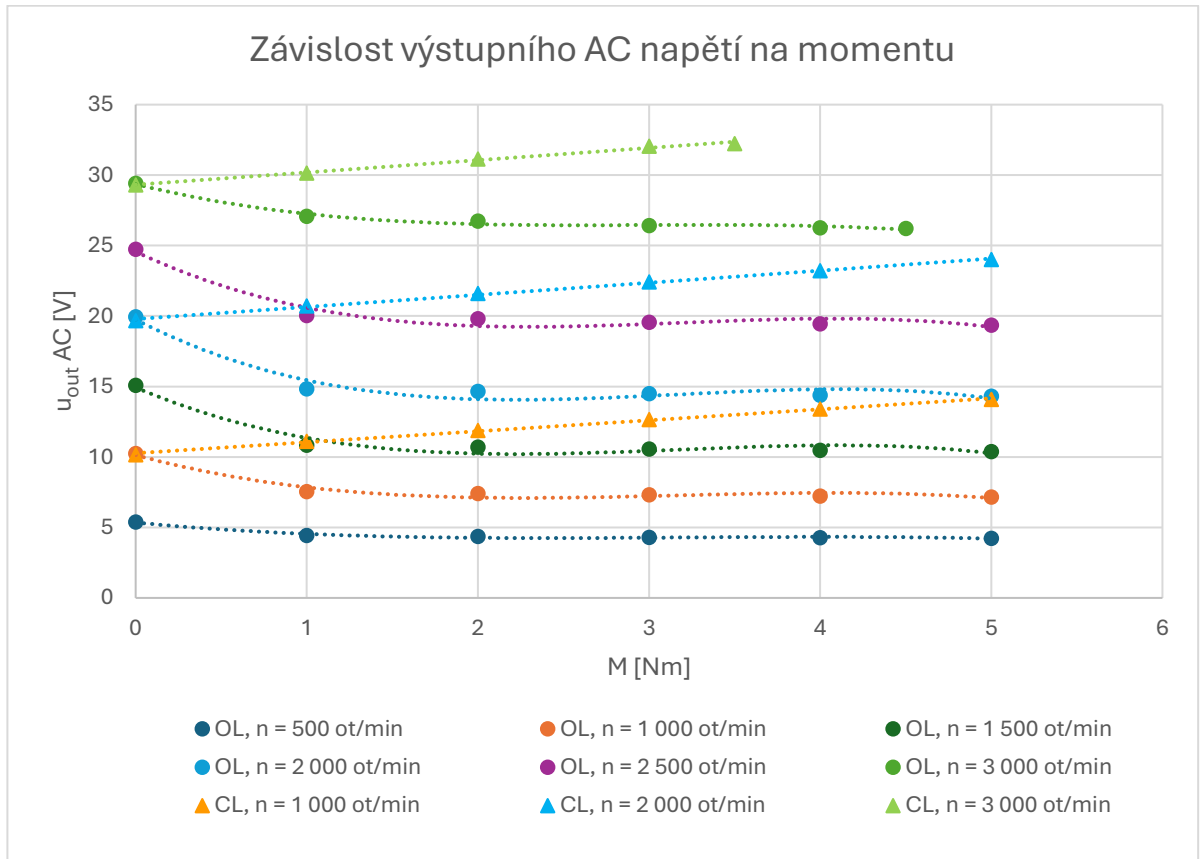
Obr. 4.18 – Graf závislosti vstupního DC proudu na momentu



Obr. 4.19 – Graf závislosti výstupního AC proudu na momentu



Obr. 4.20 – Graf závislosti účinnosti motoru s kontrolérem na momentu



Obr. 4.21 – Graf závislosti výstupního AC napětí na momentu



Obr. 4.22 – Fotografie motoru s dynamometrem

5 Závěr

Cílem této práce bylo vytvořit laboratorní pracoviště pro měření s BLCD motorem, které bude využíváno k výuce a experimentům ve Výukovém a výzkumném centru v dopravě.

V první části práce se obecně popisuje konstrukce motoru a možnosti jeho řízení. Nejprve jsou popsány jednotlivé části motoru. Zvláštní pozornost je věnována Hallovým sensorům, které jsou u těchto motorů často využívány. U popisu řízení je detailně popsána 6fázová komutace s Hallovými senzory. Následně jsou zmíněny způsoby bezsenzorového řízení.

Po seznámení s teorií přišla na řadu část projektová a realizační. V této části se popsala zakoupená zařízení. Provedl se návrh a realizace zbylých potřebných dílů pracoviště. Jednalo se o návrh a výrobu příruby motoru, modulu s ovládacím pultem a komponent na propojení jednotlivých dílů pracoviště. V závěru této části bylo pracoviště složeno.

V poslední části bylo provedeno měření na zrealizovaném pracovišti. Měřily se a na osciloskopu zobrazovaly signály z Hallových sensorů, střídavé sdružené napětí a střídavý fázový proud za kontrolérem, stejnosměrný proud před kontrolérem, indukované napětí z motoru a výstupní střídavé sdružené napětí z kontroléru při 3 245 ot/min a 1 000 ot/min naprázdno. O detailním provedení zakoupeného BLDC motoru nejsou dostupné informace, ale z průběhu indukovaného napětí, který měl sinusový tvar, lze usoudit, že zakoupený motor bude mít distribuované statorové vinutí. Zbylé zobrazené průběhy odpovídají teoretickému předpokladu. U proudových průběhů jsou krásně vidět okamžiky komutace. Výstupní napětí má lichoběžníkový průběh a tvar lichoběžníku se mění s otáčkami. Signály z Hallových sensorů jsou krásně obdélníkové posunuté o 120° elektrických.

Následně se změřily regulační charakteristiky. Měřila se závislost indukovaného a výstupního napětí na otáčkách. Kontrolér měl nastavenou regulaci v otevřené smyčce. Naměřené hodnoty se vložily do tabulky a vytvořily se grafy. Obě závislosti jsou lineární a hodnotově velice podobné. Z výsledků lze usoudit jistou analogii s komutátorovými stejnosměrnými motory.

Jako poslední se měřily zatěžovací charakteristiky motoru. Měřila se závislost výkonu na momentu, otáček motoru na momentu, vstupního DC a výstupního AC proudu na momentu, účinnosti motoru s kontrolérem na momentu a výstupního napětí na momentu při různých referenčních otáčkách motoru v otevřené nebo uzavřené regulační smyčce. Z průběhů je vidět rozdíl v řízení s otevřenou nebo uzavřenou smyčkou. Při regulaci v otevřené smyčce dochází k poklesu výstupního napětí a tím i otáček během zatěžování. Největší pokles je na začátku zatěžování. V uzavřené smyčce se regulátor snaží během zatěžování držet otáčky motoru, a proto zvyšuje výstupní napětí. Průběh závislosti výkonu na momentu je pro uzavřenou smyčku lineárně rostoucí, ale v otevřené smyčce roste nelineárně. Přírůstky výkonu klesají. Průběh vstupního stejnosměrného proudu do kontroléru je zhruba lineární a jeho střední hodnoty jsou jiné pro různé referenční otáčky. V uzavřené smyčce má vyšší hodnoty. Průběhy výstupního střídavého proudu z kontroléru jsou lineární. Jejich efektivní hodnoty jsou pro všechny referenční otáčky v otevřené i uzavřené smyčce velice podobné. Ze závislosti účinnosti motoru s kontrolérem lze říct, že motor dosahuje účinnosti až 80 %.

Měřením se ověřila funkčnost laboratorního pracoviště. Výsledky z měření mohou sloužit jako referenční pro následná měření.

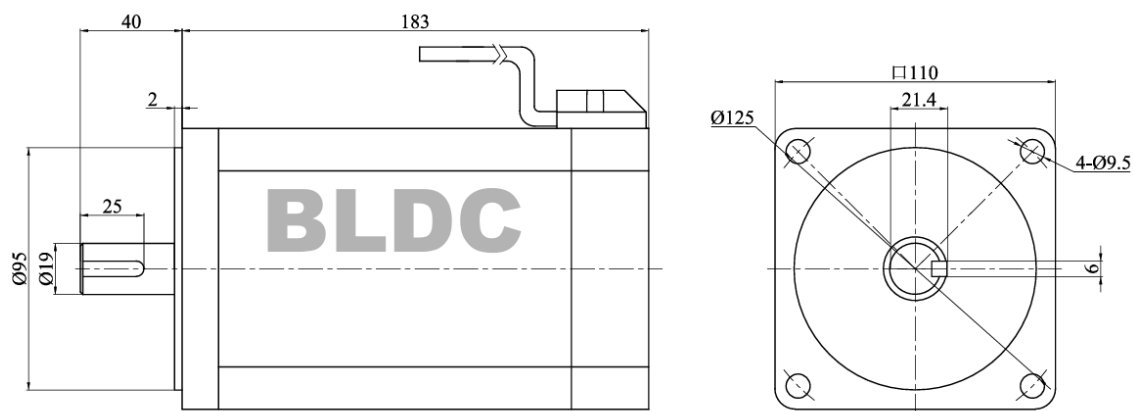
Literatura

- [1] Kobrle, P., Pavelka, J.: Elektrické pohony a jejich řízení, skriptum ČVUT v Praze, FEL, 2016, ISBN 978-80-01-06007-0
- [2] Crowder, R. M.: Electric drives and electromechanical systems, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006, ISBN 0-7506-6740-0
- [3] Lepka J., Grasblum P.: Použití mikroprocesorů pro řízení pohonů s BLDC motory, učební texty ke kurzu, Vysoké učení technické v Brně, 2011. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/offline/SYSTEM/FILES/BROZURA_09_1111.PDF [citováno 2025-02-23].
- [4] Brown W.: Brushless DC Motor Control Made Easy, MICROCHIP AN857, 2002–2011. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00857b.pdf> [citováno 2025-05-25].
- [5] Yedamale P.: Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals, MICROCHIP AN885, 2003. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/OTH/ApplicationNotes/ApplicationNotes/00885a.pdf> [citováno 2025-05-25].
- [6] Cholasta P.: 3-Phase BLDC Hall Sensor Application Using S12ZVM, Freescale semiconductor, 2013. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN4718.pdf> [citováno 2025-05-25].
- [7] OSWOS, Winding for Electric Motors, oswos.com, online, 2025. Dostupné z: <https://oswos.com/motor-windings/> [citováno 2025-06-13].
- [8] SOMANET CIRCULO, Field Weakening, doc.synapticon.com, online. Dostupné z: https://doc.synapticon.com/circulo/sw5.1/motion_control/advanced_control_options/field_weakening.html [citováno 2025-06-13].
- [9] SERVO-DRIVE.CZ, Uher P., firemní dokumentace, výkres V36443, BLDC–6452. Doručeno elektronickou poštou od dodavatele, 2024.
- [10] SERVO-DRIVE.CZ, Bseries, firemní dokumentace, BLDX–15A485S/ BLDX–50A485S/ BLDX–100A485S User manual. Doručeno elektronickou poštou od dodavatele, 2024.
- [11] GM electronic, KRADEX Z33A ABS černá (KP23) krabička plastová, gme.cz, online, 2004–2025. Dostupné z: <https://www.gme.cz/v/1514049/kradex-z33a-abs-cernakp23-krabicka-plastova> [citováno 2025-06-13].
- [12] GM electronic, HIRSCHMANN 930136100 zdířka do panelu 4 mm černá, gme.cz, online, 2004–2025. Dostupné z: <https://www.gme.cz/v/1496987/hirschmann-930136100-zdirka-do-panelu-4mm-cerna> [citováno 2025-06-13].
- [13] NKT, H07V-K, One core installation cables, CTL00010 rev. 3. Dostupné z: https://nkt.widen.net/content/c4yfxdij4f/pdf/Datasheet_H07V_K_EN_60001.pdf?u=gj0n1y [citováno 2025-06-13].
- [14] ELVUZ, PROČ BLDC MOTOR NA ELVUZ, elvuz.cz, online, 2025. Dostupné z: <http://https://www.elvuz.cz/blog/proc-je-bldc-motor-lepsi-nez-dc-motor/> [citováno 2025-06-15].

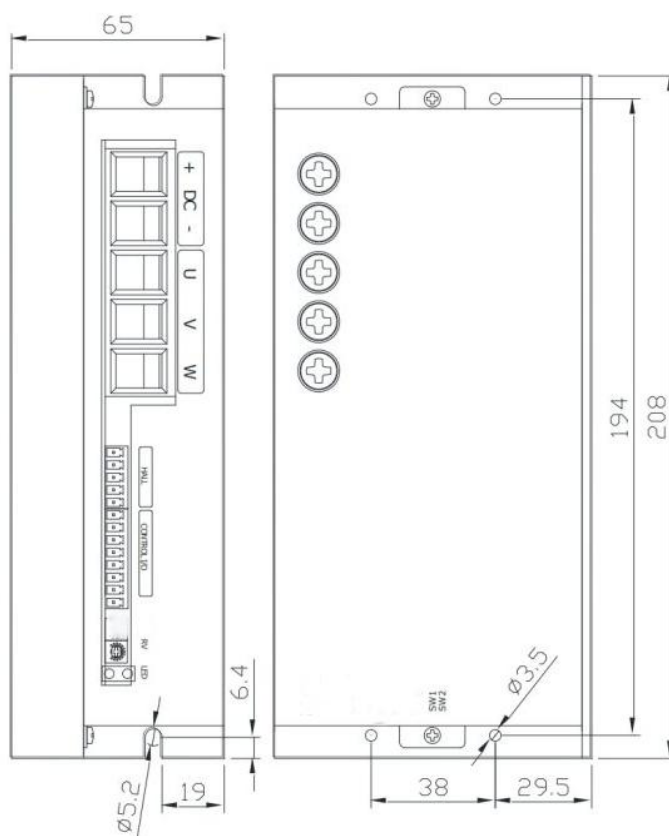
Seznam příloh

Příloha 1 – Rozměry BLDC motoru 6452, zdroj [9].....	53
Příloha 2 – Rozměry kontroléru BLDX-100A485S, zdroj [10]	53
Příloha 3 – Výkres příruby pro motor BLDC – 6452, práce autora	54
Příloha 4 – Výkres U-profilů, práce autora.....	55
Příloha 5 – Výkres montážních otvorů ovládací krabičky, práce autora.....	56
Příloha 6 – Výkres ovládacího a řídicího modulu, práce autora	57

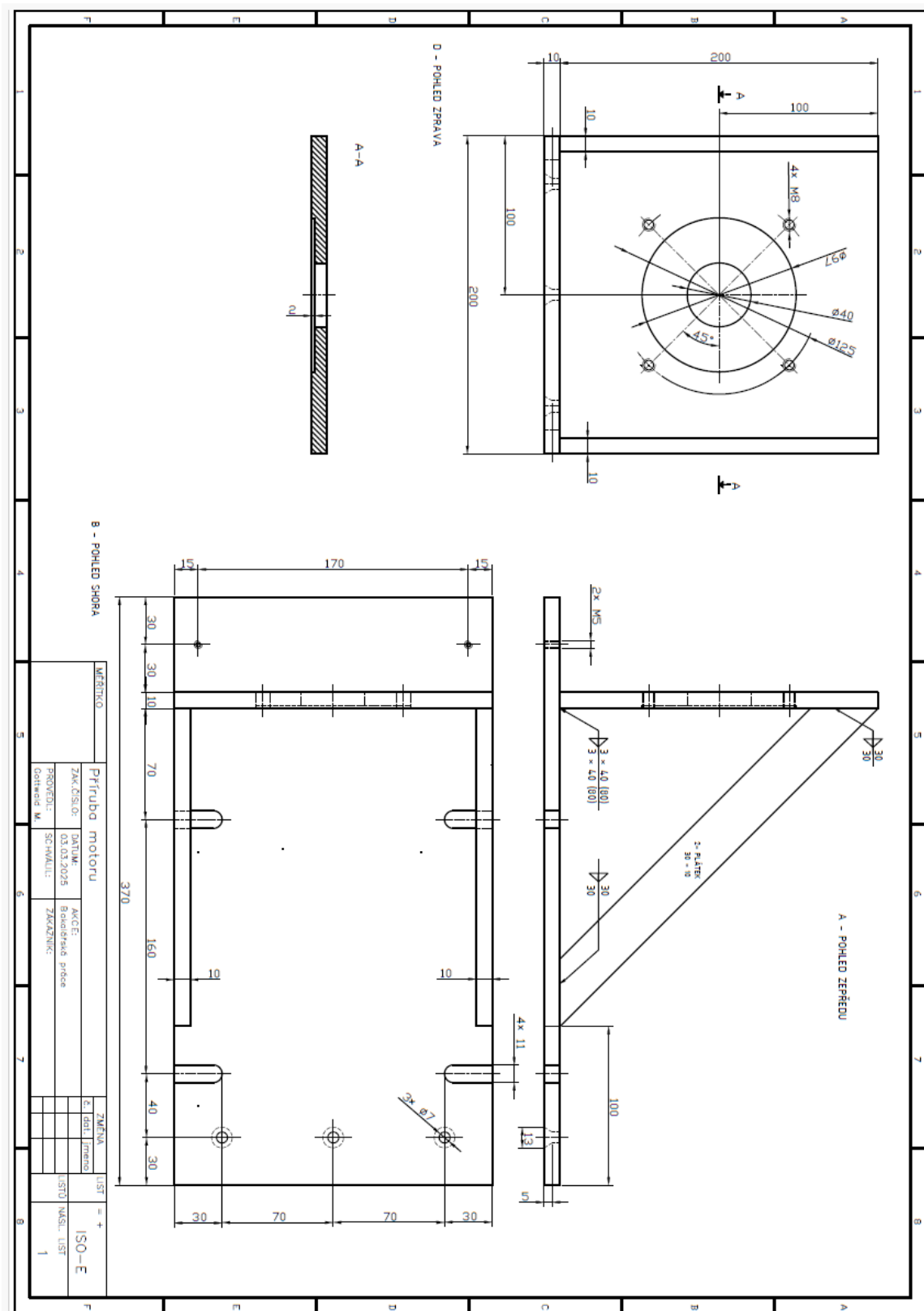
Přílohy



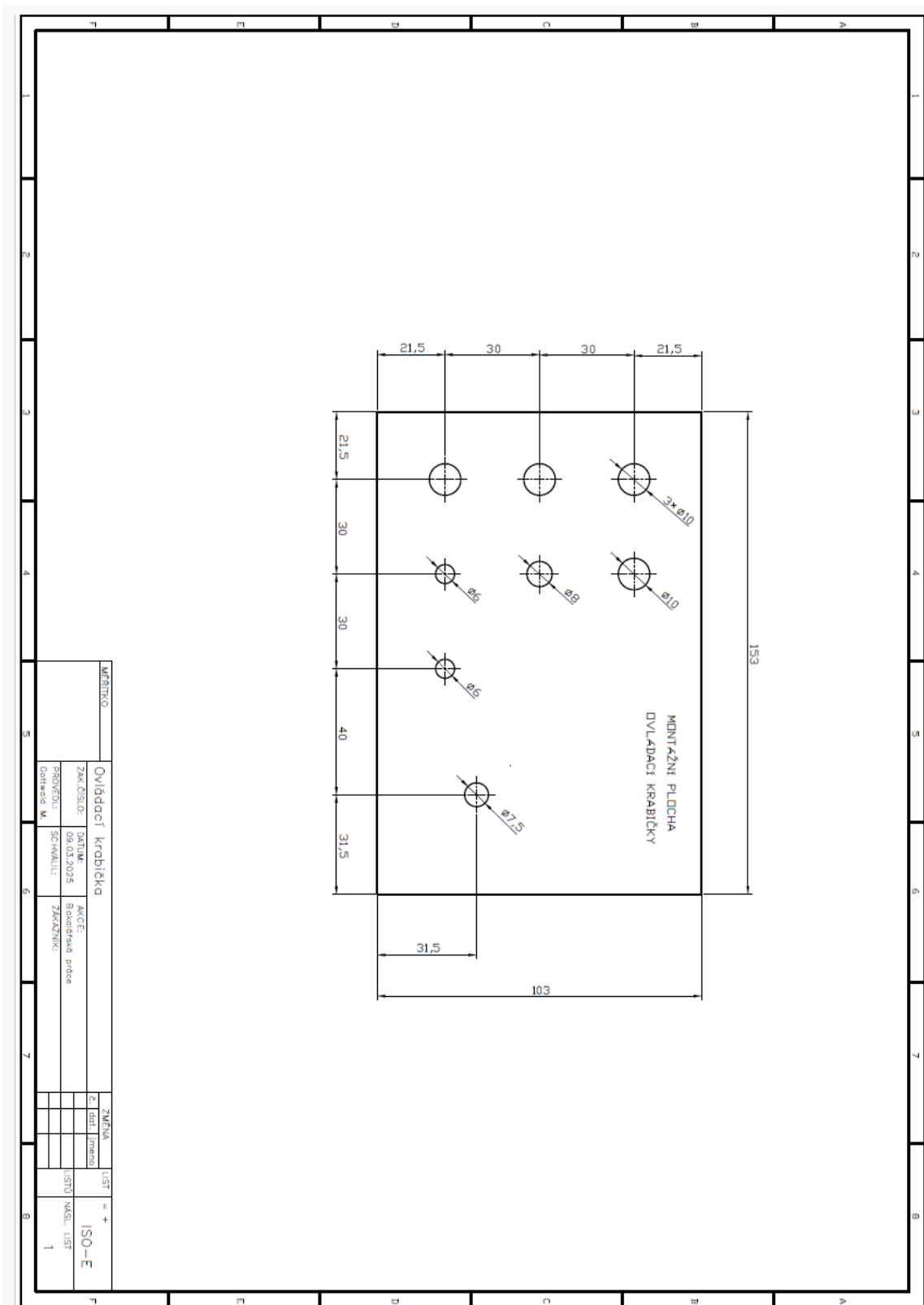
Příloha 1 – Rozměry BLDC motoru 6452, zdroj [9]



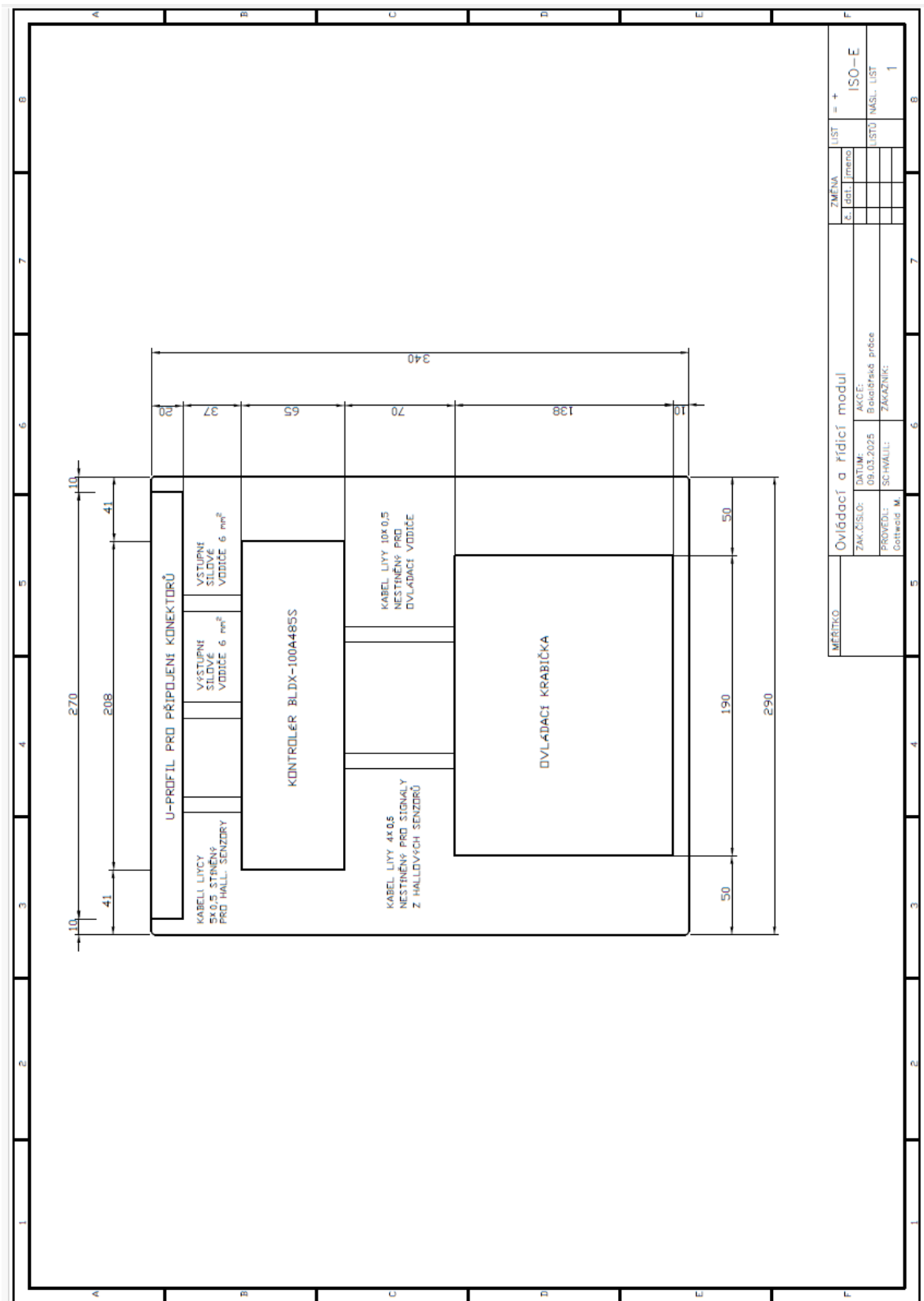
Příloha 2 – Rozměry kontroléru BLDX-100A485S, zdroj [10]



Příloha 3 - Výkres příruby pro motor BLDC - 6452, práce autora



Příloha 5 – Výkres montážních otvorů ovládací krabičky, práce autora



Příloha 6 – Výkres ovládacího a řídicího modulu, práce autora