



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

MĚNIČ PRO STEJNOSMĚRNÝ 800 W MOTOR

INVERTER FOR DC MOTOR 800 W

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Němec

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Procházka, Ph.D.

BRNO 2019



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Petr Němec

ID: 195400

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Měnič pro stejnosměrný 800 W motor

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Navrhněte a realizujte zapojení řídicích a silových obvodů měnič stejnosměrného motoru 36 V 800 W.
2. Navrhněte řídicí algoritmus měniče.
3. Oživte realizované obvody a ověřte navržený software.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Patočka M. Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice. Brno: VUTIUM, 2011. 564 s. ISBN: 978-80-214-4003-6.
- [2] Patočka M., Vybrané stati z výkonové elektroniky, Svazek II., Vydání 3., skriptum FEKT VUT Brno, 2004
- [3] Patočka M.: Vybrané statě z výkonové elektroniky, Svazek III. skriptum, FEKT, VUT Brno.

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 22.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Petr Procházka, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení částí druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je návrh výkonového měniče pro stejnosměrný motor 36 V/800 W s permanentními magnety.

První část této práce je věnována stručnému popisu součástí pohonu, v kterém bude navrhovaný měnič pracovat. Dále obsahuje změřené charakteristiky použitého motoru MY1020.

Druhá část zahrnuje nastínění funkce a zapojení těchto měničů s ohledem na konečné řešení. Výkonová část bude sestavena z tranzistorů MOSFET IRFP4110 zapojených do H můstku. Logiku řízení tranzistorů bude skrze integrovaný budící obvod IR2110 zajišťovat mikrokontrolerová vývojová deska Arduino UNO 3.

Klíčová slova

DC/DC měnič, H-můstek, MOSFET IRFP4110, driver IR2110, Arduino UNO3, bipolární řízení, BDC motor MY1020 36 V/800 W, zahradní vozík

Abstract

The goal of this Bachelor's thesis is design of an power inverter for BDC motor 36 V/800 W with permanent magnets.

The first part of this work is devoted to the brief description of drive elements, which with designed converter create drive system. It's also contain measures of used BDC motor MY1020.

In the second part there is a outline description of functions and connection of DC/DC converters with respect to the final solution. The power circuit will be built with the MOS-FET IRFP4110 connected to the H bridge. Transducer control logic will be provided by the microcontroller development board Arduino UNO 3 with the integrated driver circuit IR2110.

Keywords

DC/DC convertor, H-bridge, MOSFET IRFP4110, driver IR2110, Arduino UNO3, bipolar control, BDC motor 36 V/800 W, Three wheel garden carriage

Bibliografická citace:

NĚMEC, P. *Návrh měniče pro stejnosměrný motor 36 V/800 W*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2019. XY s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Procházka, Ph.D..

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma *Návrh měniče pro stejnosměrný motor 36 V/800 W* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujícího autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **1. května 2019**

.....
podpis autora

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Procházkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Děkuji také Ing. Martinu Machovi, Ph.D. za umožnění změření charakteristik použitého DC stroje v laboratoři VUT v Brně.

V Brně dne: **1. května 2019**

.....
podpis autora

Obsah

1.	Úvod.....	1
2.	Elektrický pohon.....	2
2.1	Olověný akumulátor.....	2
2.2	BDC Motor.....	3
2.2.1	Parametry motoru MY1020.....	4
2.3	Převodovka.....	6
3.	Pulzní DC/DC měnič.....	7
3.1	Pracovní kvadranty měničů.....	7
3.1.1	Jednokvadrantové měniče.....	8
3.1.2	Dvoukvadrantové měniče.....	9
3.1.3	Čtyřkvadrantové měniče.....	10
3.2	Řízení čtyřkvadrantového měniče.....	11
3.2.1	Arduino UNO3.....	12
4	Návrh prvků DC/DC měniče.....	14
4.1	Návrh výkonových tranzistorů a chladiče.....	14
4.2	Návrh budicího obvodu.....	15
4.3	Návrh kondenzátorů meziobvodu.....	17
5	Oživení měniče.....	18
6	Závěr.....	20

Seznam obrázků

Obr. 2-1 Blokový diagram prvků elektrického pohonu [2], upraveno	2	
Obr. 2-2 Změna otáček stroje MY1020 v závislosti na svorkovém středním napětí ve stavu naprázdno	3	
Obr. 2-3 Oteplení povrchu statoru stroje MY1020 36 V/800 W (teplota okolí 22,2 °C).....	5	
Obr. 2-4 Zatěžovací charakteristika stroje MY1020 36 V/800 W	5	
Obr. 2-5 Převodové poměry	Obr. 2-6 Motor MY1020 s převodovkou	6
Obr. 3-1 Čtyřkvadrantový provoz trojkolky s indikací stavu akumulátoru	7	
Obr. 3-2 Jednokvadrantový snižující měnič [10], upraveno.....	8	
Obr. 3-3 Jednokvadrantový zvyšující měnič [10], upraveno	9	
Obr. 3-4 Měnič pracující v prvním a druhém kvadrantu [10], upraveno.....	10	
Obr. 3-5 Měnič pracující v prvním a čtvrtém kvadrantu [10], upraveno.....	10	
Obr. 3-6 Čtyřkvadrantový měnič zapojený do H-můstku [10], upraveno	10	
Obr. 3-7 Bipolární řízení tranzistorů	Obr. 3-8 Unipolární řízení tranzistorů....	11
Obr. 3-9 Realizace jednoduchého deadtime obvodu [12] upraveno.....	12	
Obr. 3-10 Arduino UNO3 (klon) [14]	12	
Obr. 3-11 Zapojení silových kontaktů čidla LEM CAS25 NP [18]	13	
Obr. 4-1 Návrh chladiče.....	15	
Obr. 4-2 Budič vrchního spínače	Obr. 4-3 Budič spodního spínače	16
Obr. 4-4 Integrovaný budič IR2110.....	16	
Obr. 5-1 Průběhy na motoru MY1020 36 V/800 W; $s = 0,5$	18	
Obr. 5-2 Průběhy na motoru MY1020 36 V/800 W; $s \approx 0,76$	18	
Obr. 5-3 Průběhy na motoru MY1020 36 V/800 W; $s \approx 0,96$	19	
Obr. 5-4 Řídící napětí na vstupu IR2110	19	
Obr. 5-5 Osazený DC/DC měnič	20	
Obr. 6-1 Spodní vrstva desky (BOTTOM) ; Obr. 6-2 Vrchní vrstva desky (TOP)..	31	

Seznam tabulek

Tabulka 2-1 Štítkové hodnoty vybraného BDC motoru	4
---	---

1. Úvod

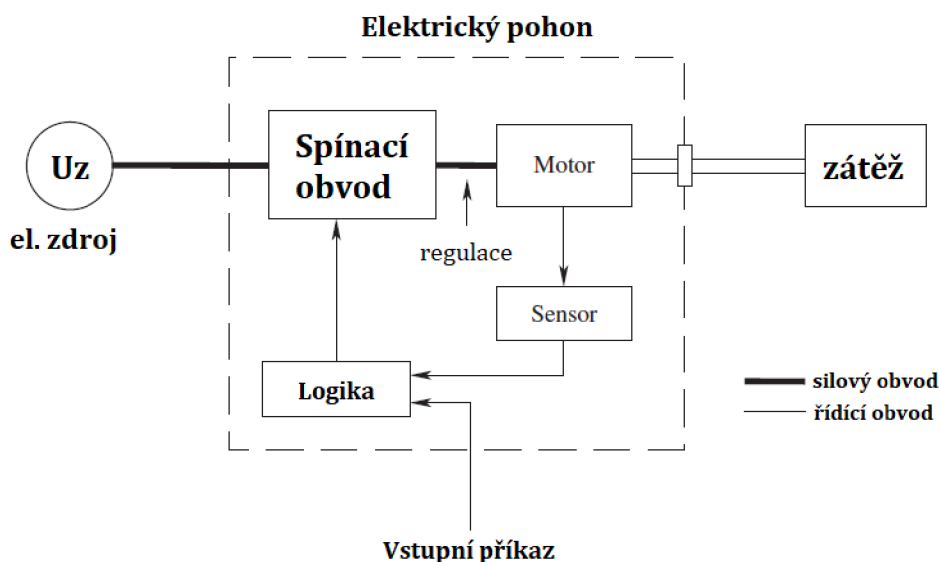
Ve své bakalářské práci se zabývám návrhem výkonového měniče pro BDC motor 36 V/800 W. Výběr vlastního téma podnítila potřeba pohonu, který by v součinnosti s převodovkou poháněl zahradní trojkolku. I když je práce zaměřená na návrh měniče, zahrnuje v 2. kapitole také strohý nástin zbylých prvků pohonu. Kapitola obsahuje výběr akumulátoru, úpravy převodovky (Simson S51) a proměření charakteristik použitého motoru MY1020 36 V/800 W.

V navazující 3. kapitole jsou popsány některé topologie DC/DC měničů a obecná problematika s tím spojená. Snahou je, aby jednotlivé pasáže teoretické části byly nasměrovány na cílové řešení měniče.

Praktická 4. a 5. kapitola obsahují návrh a oživení finálního měniče. K řízení měniče je využita vývojová deska Arduino UNO 3 (klon) využívající μ procesoru Atmega328P. Čtenář se dále dočte o problematice nastavení frekvence a o použitém způsobu řízení větších BDC motorů pomocí Arduina.

2. Elektrický pohon

Elektrický pohon jako soustava je tvořena vhodnou kombinací elektrotechnických zařízení pro elektromechanickou přeměnu energie a pro vytváření přenosu a zpracování signálů řídících tuto přeměnu [1]. Uspořádání prvků pohonu, které je použito u tohoto projektu je na obr. 2-1 [2].



Obr. 2-1 Blokový diagram prvků elektrického pohonu [2], upraveno

Obvykle se do el. pohonu zařazuje elektronický měnič, elektrický stroj a převodovka. Důvodem k osazení elektronického měniče a převodovky je snaha optimalizovat výstupní parametry elektromotoru podle aktuálních požadavků uživatele, často pak jako reakce na v čase měnící se zátěž.

Pokud je v ovládní motoru zpětná vazba ze senzorů motoru, mluvíme poté o regulaci. Zpětná vazba od motoru může být informace např. o aktuálních otáčkách nebo pozici hřídele, napětí, proud motoru atd. Tato informace je klíčová, pro zajištění potřebné rychlosti a dynamiky regulačního procesu. V průběhu regulace se poté vyhodnocují hodnoty regulovaných veličin a následují okamžité korekce v regulátoru [1].

2.1 Olověný akumulátor

Přestože na poli trakčních akumulátorů vládne již nějakou dobu Li-ion technologie, je upřednostněn olověný akumulátor v bezúdržbovém provedení. Hlavním důvodem je malý plánovaný dojezd vozítka cca 3 km jedna cesta, tudíž není při výběru potřeba bedlivě hlídat hustotu energie článku. Dalším faktorem je také lokální infrastruktura DC soustavy, v letních měsících nezatižených fotovoltaických panelů. Tento obnovitelný zdroj bude v době přebytků v soustavě schopen s využitím domovního regulátoru fotovoltaických panelů přispět k dobíjení právě tohoto typu akumulátoru.

Jelikož se standardně nevyrobí 36 V akumulátory v jednom kontejneru, bude výsledná akumulátorová baterie složena ze tří 12 V akumulátorů v sérii.

Výpočet ekvivalentní kapacity akumulátoru při jmenovitém proudu motoru

Kapacita olověného akumulátoru je závislá na velikosti odebíraného proudu. Tento vztah mezi velikostí kapacity a odebíraným proudem ošetřuje tzv. Peukertova konstanta k . Jedná se o opravnou mocninu odebíraného proudu, která závisí na typu olověného akumulátoru. Pro AGM je $k = 1,05$ až $1,15$; gelové $1,10$ až $1,25$; se zaplavenými elektrodami $1,2$ až $1,6$ [3].

Pro předpokládané zatížení motoru 550 W, při napětí 36 V je odebíraný proud:

$$I_a = \frac{P}{U} = \frac{550}{36} = \mathbf{15,3\text{ A}} \quad (2-2)$$

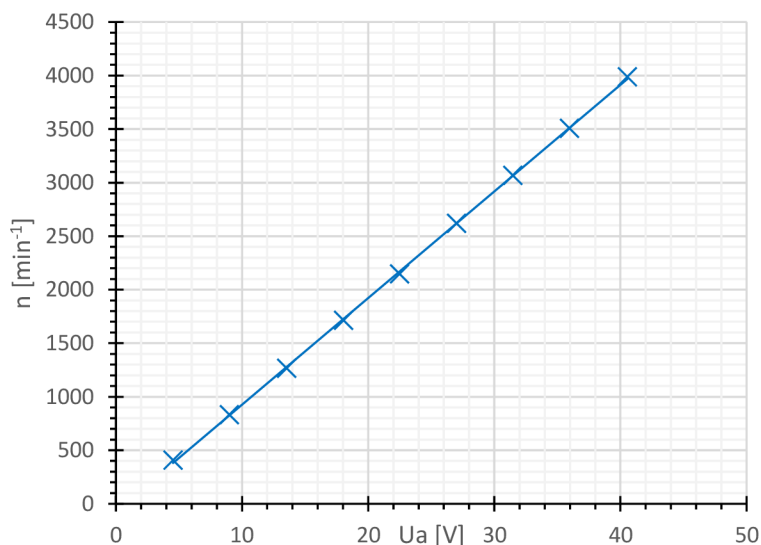
$$I_{eq} = I_a^k = I_a^{1,12} = 15,3^{1,12} \quad (2-3)$$

$$I_{eq} = \mathbf{21,2\text{ A}}$$

Na základě výpočtu pomocí rovnice (2-3) jsou vybrány tři trakční gelové akumulátory Ultracell UCG28-12 12 V/28 Ah [4].

2.2 BDC Motor

Motory mechanicky komutované lze efektivně regulovat skrze pulzně šířkovou modulaci střední hodnoty svorkového napětí. Nevýhodou BDC stroje je přítomnost mechanického komutátoru, s čehož plynou častější údržby. Výhodou stroje je technická vyspělost a hlavně nízké pořizovací ceny.



Obr. 2-2 Změna otáček stroje MY1020 v závislosti na svorkovém středním napětí ve stavu naprázdno

2.2.1 Parametry motoru MY1020

Použitý motor je levné čínské výroby s cizím buzením skrze PM (Permanentní Magnety).

Tabulka 2-1 Štítkové hodnoty vybraného BDC motoru

typ	MY1020
U_n [V]	36
P [W]	800
I_n [A]	28,5
n_n [min^{-1}]	3000

Výrobce motoru neuvádí zařazení podle druhu provozu, byla proto pro orientaci provedena oteplovací zkouška povrchu statoru a odhad oteplení magnetů. Zkouška je provedena pro předpokládané zatížení stroje 550 W, a to po dobu 45 min (v provozu omezení kapacitou akumulátoru). Výsledky měření pomohou s určením omezení doby provozu, případně s úpravami chlazení stroje.

Oteplení magnetů a povrchu statoru

Zřejmě nejpresnější metodou měření teploty magnetů je sonda snímající teplotu přímo z povrchu magnetu. Nicméně bez mechanického zásahu nebylo možné vytažení vodiče sondy přes víko motoru, teplota proto byla určena za pomoci nepřímého měření využívajícího rozdílu magnetické indukce magnetů za studena a za tepla. Předpokládaný zátěžný výkon stroje je $P_2 = 550 \text{ W}$.

Pro odhad teploty magnetů je použita rovnice (2-5) [5]:

$$\vartheta = \frac{1 - (K_e / K_{e\vartheta})}{(-9 \cdot 10^{-4})^*} + \vartheta_0 \quad (2-5)$$

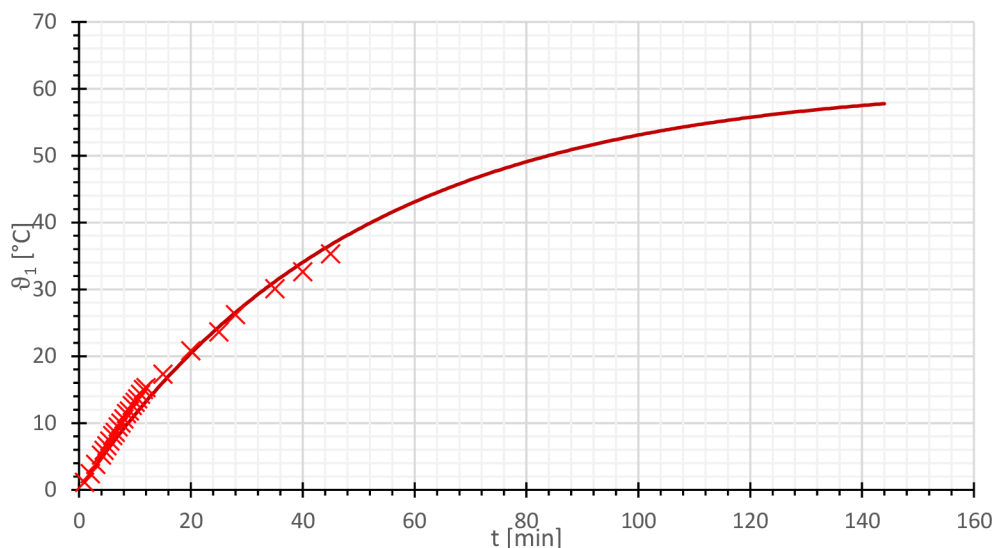
Kde: ϑ ... teplota magnetů ($^{\circ}\text{C}$); ϑ_0 ... okolní teplota ($^{\circ}\text{C}$); K_e ... napěťová konst. za studena ($\text{V} \cdot \text{min}^{-1}$); $K_{e\vartheta}$... napěťová konst. za tepla (V/min^{-1})

Ze souboru napěťových konstant za studena a za tepla pro různé otáčky a za použití rovnice (2-5), byla odhadnuta teplota magnetů po 45 min provozu na $70,8^{\circ}\text{C}$.

Tato teplota je s rezervou pod Curieovou teplotou magnetů NdFeB [6].

Z naměřených hodnot oteplení povrchu statoru - viz Obr. 2-3, není zřejmé ustálené oteplení předepisované normou ČSN 350010 [7]. Proložení je tedy pouze orientační, snad pro případ použití akumulátoru s vyšší kapacitou, a tedy delší dobou provozu.

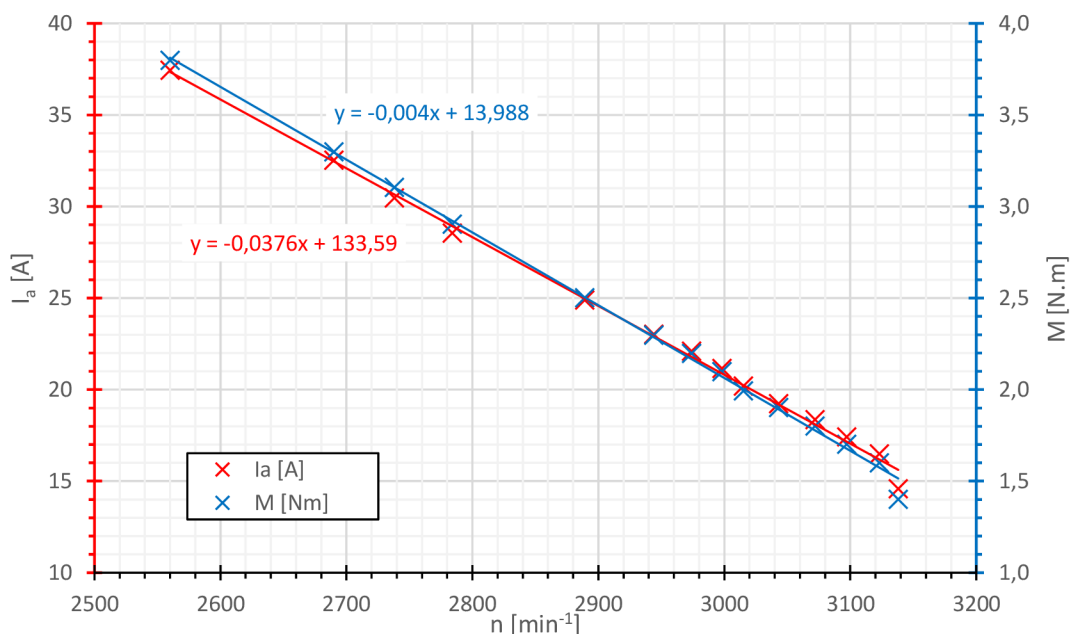
* Konstanta upravující typ použitých magnetů, zde doporučení z podniku VUES



Obr. 2-3 Oteplení povrchu statoru stroje MY1020 36 V/800 W (teplota okolí 22,2 °C)

Přetížení stroje

Vozítko bude převážet břemena o různých hmotnostech na členitém terénu. Změřená zatěžovací (obr. 2-4) a záběrná charakteristika (obr. 2-7 příloha 1) stroje poslouží k dimenzování silových prvků měniče a návrhu převodových poměrů. Informace o rezervách stroje jsou také zásadní v případě použití „turbo“ režimu, jenž může měnič obsahovat (legislativní omezení rychlosti do 25 km/h, nevztahující se však na soukromé pozemky [8]). Změřená charakteristika (Obr. 2-4) vykazuje značnou přetížitelnost komutátorového stroje. Tuto skutečnosti je třeba brát na vědomí při návrhu výkonových prvků měniče (nominální proud motoru je 28,9 A).



Obr. 2-4 Zatěžovací charakteristika stroje MY1020 36 V/800 W

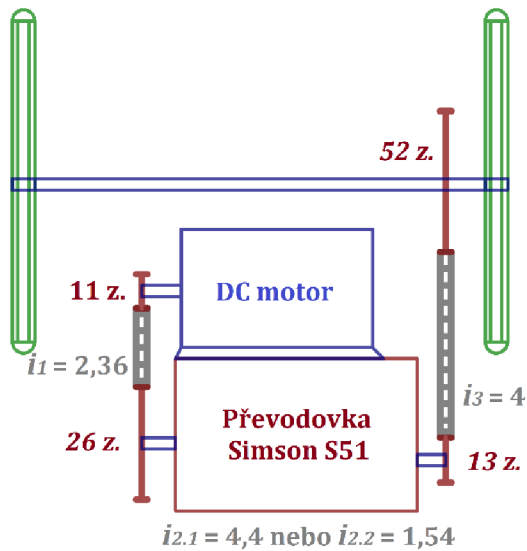
2.3 Převodovka

Obecně je účinnost DC/DC měničů vysoká pro široký rozsah otáček stroje. To však často neplatí o stroji samotném, obzvláště pak BDC stroji. Osvědčeným řešením je realizace převodového ústrojí. Pro tuto aplikaci bude použita mechanická převodovka z malého motocyklu Simson S51, konkrétně pak její 1. ($i_{2.1}$) a 4. ($i_{2.2}$) převod.

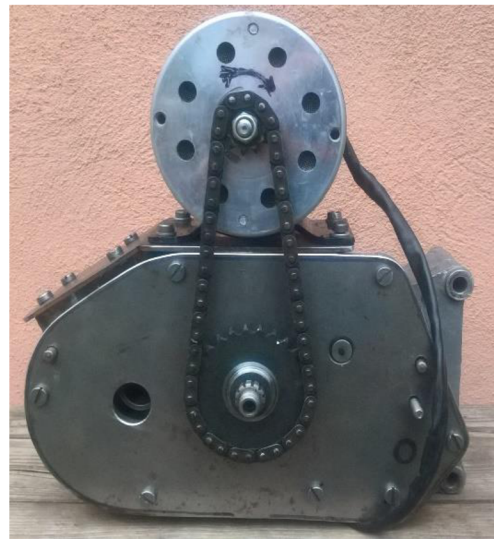
$$\text{Primární převod } i_1 = \frac{26 \text{ zubů}}{11 \text{ zubů}} = 2,36;$$

$$\text{Převodovka } i_{2.1} = 4,4 \text{ nebo } i_{2.2} = 1,54$$

$$\text{Sekundární převod } i_3 = \frac{52 \text{ zubů}}{13 \text{ zubů}} = 4.$$



Obr. 2-5 Převodové poměry



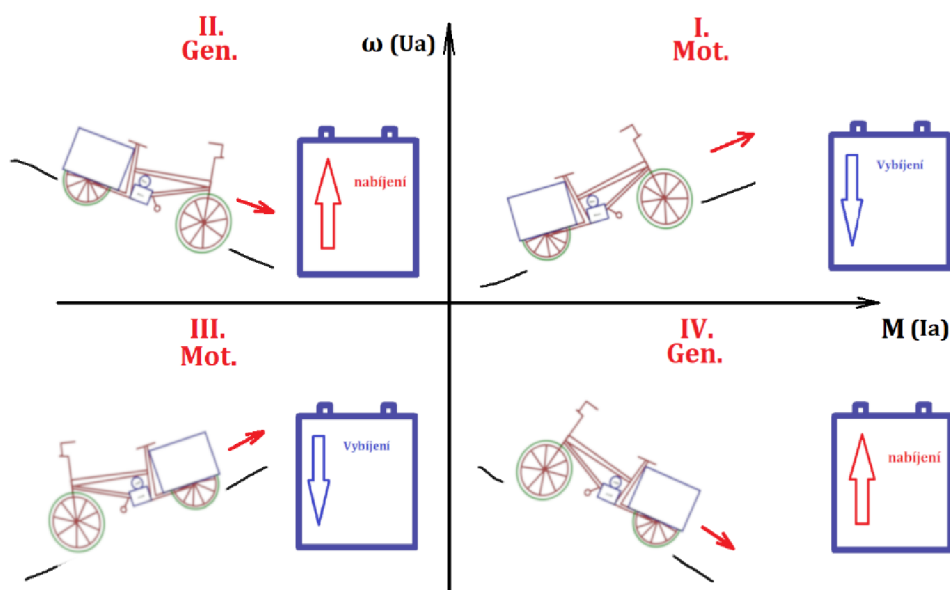
Obr. 2-6 Motor MY1020 s převodovkou

Pro nominální otáčky motoru, při zařazení 4. převodového stupně je stanovena rychlost trojkolky na asi 24 km/h. Při zařazení 1. převodové rychlosti, pak přibližně 8 km/h.

3. Pulzní DC/DC měnič

Jedná se o elektronické obvody, které umožňují skokovou nebo plynulou změnu velikosti středního napětí na svém výstupu, a to za pomoci cyklického spínání silového obvodu. Z důvodu obsáhlosti dané problematiky budou zmíněny pouze DC/DC měniče, logicky navazující na výsledné řešení. Rozsáhlé oblasti DC/DC měničů se pak do hloubky věnuje např. literatura Advance DC/DC converters [9].

3.1 Pracovní kvadranty měničů



Obr. 3-1 Čtyřkvadrantový provoz trojkolky s indikací stavu akumulátoru

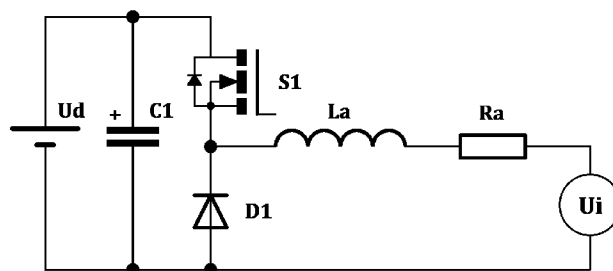
Konvenčně komutovaný DC motor s PM, je často stejně dobrým motorem jako dynamem. Ne všechny aplikace však vyžadují provoz ve všech provozních kvadrantech. Proto i měniče jsou navrhovány podle kvadrantů, ve kterém umožňují stroj provozovat.

Navrhovaný měnič pro trojkolku bude umožňovat práci stroje ve všech čtyřech kvadrantech - viz obr. 3-1. Je tomu tak proto, že jedním z hlavních požadavků je nenáročnost na řízení stroje (předpoklad snížených fyzických schopností obsluhy). Trojkolka tedy musí umožňovat reverzaci chodu, jelikož převodové ústrojí neumožňuje zpáteční rychlost, musí tuto funkci plnit měnič (III. kvadrant).

S ohledem na odlehčení mechanických brzd je výhodné použití generátorického brzdění stroje, výhodou je pak zrekuperování části energie zpět do akumulátoru, přestože z důvodu krátkých tras není tak zásadní (jedná se o II. a IV. kvadrant). Důvodem samotné realizace je pak dopřední motorický režim (I. kvadrant).

3.1.1 Jednokvadrantové měniče

Umožňují práci stroje pouze v jednom ze čtyř kvadrantů z obr. 3-1. Měnič pracující v prvním nebo ve třetím kvadrantu (záleží na připojené polaritě zdroje) se nazývá **snižující měnič** (také step-down či buck). Princip funkce řízení napětí na svorkách stroje je založen na přerušovaném spínání ideálně neměnné velikosti napětí zdroje U_d , s proměnným poměrem doby sepnutí ku celé jedné periodě (tj. střída), počet period v jedné sekundě je pak často konstantní. Například pro střídu $s = 0,8$ je střední napětí na zátěži $U_z = 0,8 \cdot U_d$. Principiální schéma snižujícího měniče zobrazuje obr. 3-2. Na tomto základním schématu lze vypořizovat základní konstrukční prvky i následujících vícekvadrantových měničů.



Obr. 3-2 Jednokvadrantový snižující měnič [10], upraveno

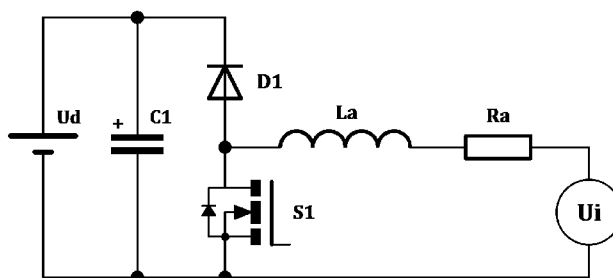
Jedná se o spínací prvek S_1 , zde je použit tranzistor MOSFET typu N s indukovaným kanálem (též enhancement mosfet), indukovaného kanálu je použito z důvodu příznivé vlastnosti převodní charakteristiky tranzistoru, a to, že při nulovém řídicím napětí U_{GS} je tranzistor vypnut. U MOSFET tranzistoru s vestavěným kanálem tomu již tak být nemusí. Často používanými spínacími prvky na vyšší napětí a výkony mohou být IGBT tranzistory nebo vývojově starší bipolární tranzistory. Úkolem kondenzátoru C_1 je snižovat zvlnění napětí v meziobvodu a pokrytí okamžité spotřeby proudu. Pro snížení parazitní indukčnosti musí být dbáno na to, aby byl kondenzátor umístěn co nejbliže spínacímu prvku S_1 . Důvodem ke snižování indukčností ve smyčce neuzavírající se diodou D_1 je, že při velice rychlé změně proudu (spínání S_1 s frekvencí desítek kilohertz) dochází, jak popisuje rovnice (3-1), k napěťovým impulzům, které by mohly být pro spínač S_1 destruktivní.

$$u_L(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt} \quad , \left(U; H \cdot \frac{A}{s} \right) \quad (3-1)$$

Při vztažení na použitý BDC stroj indukčnost vinutí kotvy stroje symbolizuje cívka L_a , odpor kotvy je pak R_a a U_i je indukované napětí kotvy. Jelikož při spínání indukčnosti kotvy dochází ke stejnému problému jako u parazitních indukčností, je obvod stroje uzavřen přes demagnetizační diodu D_1 . Při rozepnutí spínače S_1 se indukčnost L_a snaží udržet velikost procházejícího proudu zátěži, přičemž se sama stává zdrojem vysokého napětí.

Tento indukční proud je však uzavřen demagnetizační diodou D1 a zmařen v prvcích uzavřené smyčky. Stroj samotný je zpravidla daleko méně choulostivý na napěťové impulzy než polovodičové prvky.

Dalším jednokvadrantovým měničem je **zvyšující měnič** (také step up či boost), pracující ve druhém nebo čtvrtém kvadrantu (záleží na připojené polaritě zdroje). Principiální schéma zapojení zvyšujícího měniče je na obr. 3-3.



Obr. 3-3 Jednokvadrantový zvyšující měnič [10], upraveno

Pro svoji činnost využívá energie akumulované v magnetickém poli cívky kotvy [11]. Při rekuperaci je vlivem otáčení cívek kotvy stroje v budícím magnetickém poli statoru generováno napětí U_i . Aby bylo možné nabíjet akumulátor o napětí U_d , je potřeba zajistit, aby bylo toto napětí upraveno/zvýšeno na potřebnou úroveň.

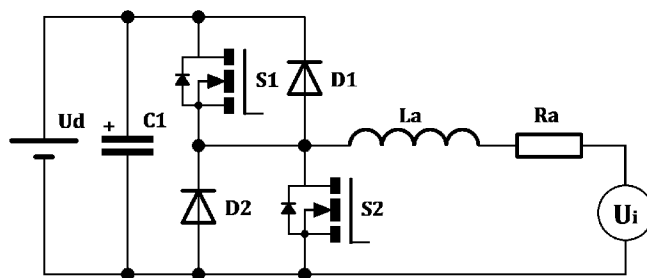
Pro zvýšení nabíjecího napětí využijeme již popsané vlastnosti cívky. Sepnutím spínače S1 dojde ke zkratování svorek stroje, proud procházející obvodem je poté omezen pouze odporem vinutí a jeho indukčností. Při opětovném sepnutí spínače S1 dojde k rozpojení tohoto proudu, nicméně indukčnost vinutí L_a se snaží tento proud zachovat a stává se zdrojem vysokého napětí (míra velikosti napětí na cívce je popsána rovnicí 3-1). Při řízeném cyklickém spínání spínače S1 lze poté nastavit příhodnou velikost napětí, na kterou se bude nabíjet kondenzátor C1 a posléze i akumulátor. Vztah mezi střídou s a výstupním napětím lze popsat rovnicí 3-2.

$$U_d = U_i \cdot \frac{1}{1-s} \quad , (V; V) \quad (3-2)$$

Aby nedošlo k vybití kondenzátoru C1 při sepnutí spínače S1, je mezi oba prvky umístěna jednocestná dioda.

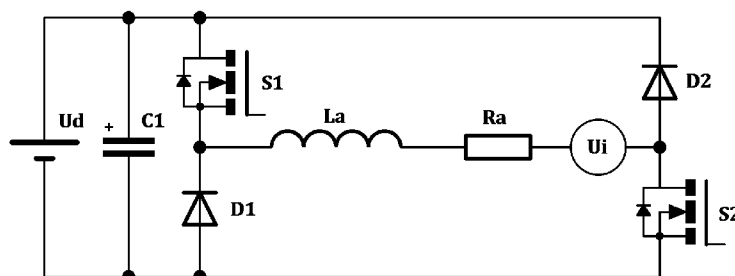
3.1.2 Dvoukvadrantové měniče

Jsou měniče umožňují provoz stroje ve dvou ze čtyř kvadrantů. Princip funkce vychází z jednokvadrantových měničů. Na obr. 3-4 je vyobrazeno schéma zapojení měniče pracujícího v prvním a druhém kvadrantu, toto zapojení umožňuje dopřední pohyb vozidla s možností přechodu do generátorického brzdění ve směru jízdy.



Obr. 3-4 Měnič pracující v prvním a druhém kvadrantu [10], upraveno

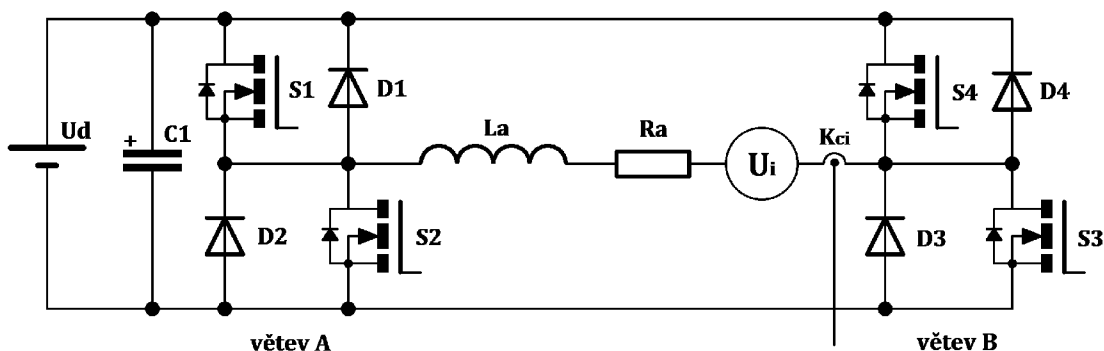
V případě návrhu měniče pro regulaci pohonu např. vrátku je výhodné použít zapojení dvoukvadrantového měniče na obr. 3-5. Takto zapojený měnič umožňuje provoz stroje v dopředném pohybu, kdy je břemeno vytahováno vzhůru. Při klesání břemena na vrátku mají otáčky stroje opačný smysl a je využíváno generátorického brždění ve čtvrtém kvadrantu provozu stroje obr. 3-1.



Obr. 3-5 Měnič pracující v prvním a čtvrtém kvadrantu [10], upraveno

3.1.3 Čtyřkvadrantové měniče

Jedná se o měniče umožňující práci stroje ve všech čtyřech kvadrantech. Typické zapojení na obr. 3-6, tzv. do H-můstku, jiným názvem také do plného mostu (z angl. full bridge).



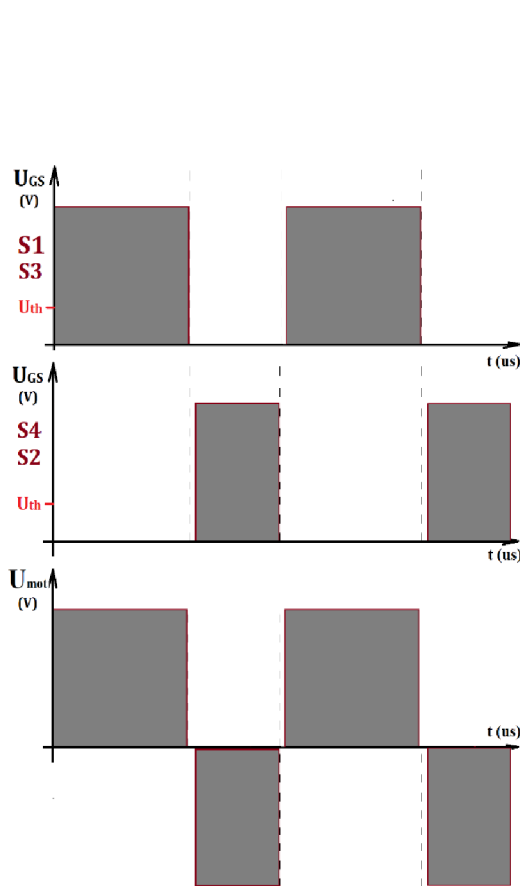
Obr. 3-6 Čtyřkvadrantový měnič zapojený do H-můstku [10], upraveno

Takto sestavený měnič je schopen na svém výstupu provozu s oběma polaritami napětí i proudu. Stroj je tedy schopen dopředného pohybu (1.Q), rekuperačního brždění ve směru jízdy (2.Q), reverzace chodu tj. elektrické zpátečky (3.Q) a rekuperačního brždění při jízdě na zpátečku (4.Q).

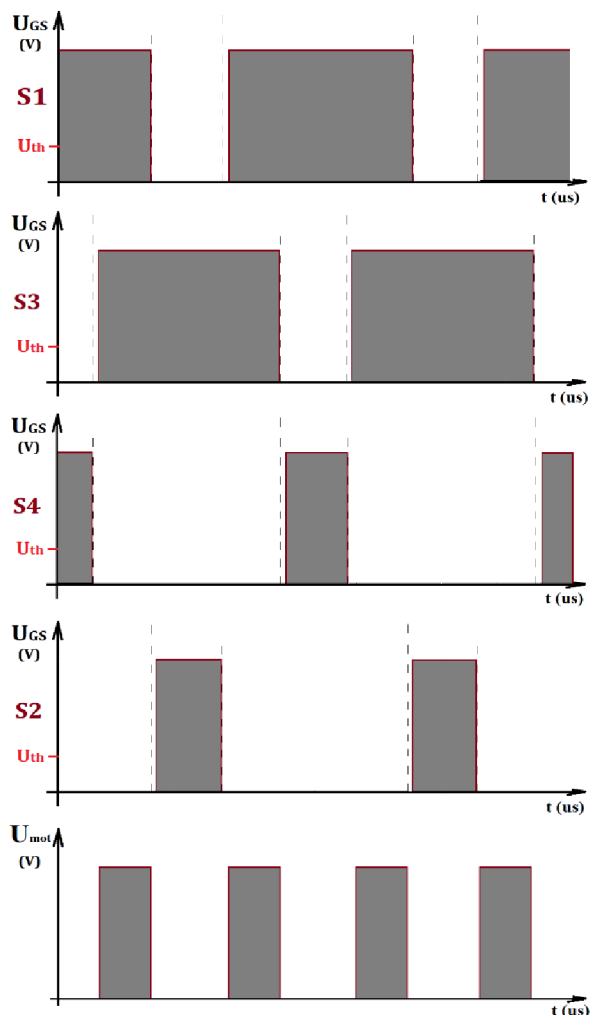
Těchto funkcí je docíleno pomocí kombinace čtyř výkonových spínačů (S1-S4) a čtyř diod (D1-D4), pokud to dynamické vlastnosti substrátových diod MOSFET tranzistorů dovolí, je možné diskretní diody (D1-D4) vynechat. Pro zjištění informace směru a velikosti procházejícího proudu motorem je do obvodu začleněna proudová sonda *Kci* (např. bočník nebo čidlo LEM). Tato informace pak může sloužit zpětné proudové smyčce pro účinnou regulaci momentu stroje v dynamických soustavách.

3.2 Řízení čtyřkvadrantového měniče

Logiku spínání tranzistorů měniče lze rozdělit podle polarit impulzů výstupního napětí na bipolární a unipolární. Bipolární řízení je takové, kdy se pravidelně střídají impulzy obojí polarity výstupního napětí (obr. 3-7). Naproti tomu u unipolárního řízení mají majoritní impulzy dlouhodobě jednu z polarit výstupního napětí (obr. 3.8) [10].



Obr. 3-7 Bipolární řízení tranzistorů

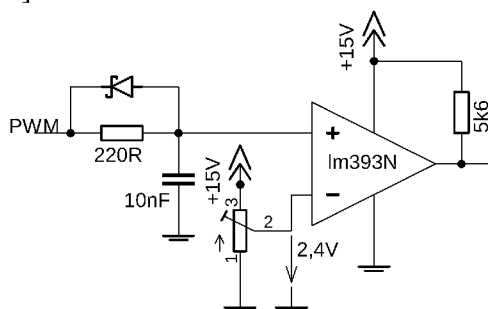


Obr. 3-8 Unipolární řízení tranzistorů

Unipolární řízení se spínáním obou tranzistorů ve větvi (obr.3-8) nabízí zdvojení výsledné frekvence na zátěži, což vede k nižšímu zvlnění proudu motoru při stejné frekvenci tranzistorů nežli u bipolárního řízení.

Další výhodou je pouze jedna polarita napětí na motoru, a tedy i nižší hysteretzní ztráty. Nevýhodou unipolárního řízení je složitější tvorba řídicího signálu.

Jak je vyobrazeno na obr. 3-7 a obr. 3-8 (čerchovaná čára), sepnutí tranzistorů ve větvi musí být zpožděno o časový úsek nazývaný deadtime. Pokud by tomu tak nebylo, docházelo by k prohořívání větve a zahřívání tranzistorů krátkými zkratovými proudy. Deadtime u MOSFET tranzistorů je typicky menší než 1 μ s. Rozepnutí tranzistorů by mělo být bez zpoždění [10].

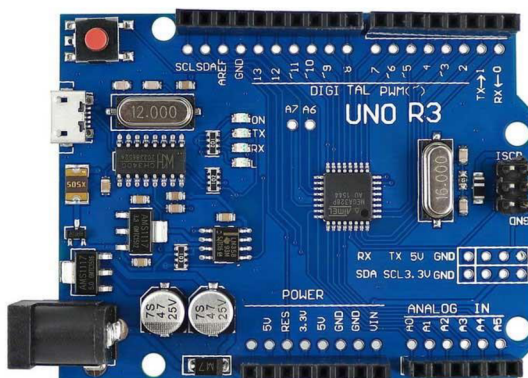


Obr. 3-9 Realizace jednoduchého deadtime obvodu [12] upraveno

Čím větší kapacita kondenzátoru a odpor rezistoru, tím delší čas zpoždění, než vstupní signál vystoupá přes 2,4 V a komparátor se přeplojí. Napětí výstupního signálu je asi 14,5V.

3.2.1 Arduino UNO3

Arduino UNO 3 (obr. 3-10) je vývojová deska založená na μ procesoru ATmega328P. Obsahuje 14 digitálních I/O výstupů, z toho 6 PWM. Maximální zatížení na výstupní port činí 20 mA, nicméně suma proudů ze všech výstupů nesmí překročit 150 mA. Vnější informaci lze přenést skrze 6 analogových vstupů. Napájecí napětí je v rozmezí 6-20 V [13].



Obr. 3-10 Arduino UNO3 (klon) [14]

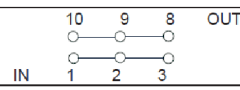

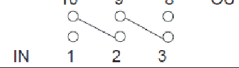
Parametricky je signál z PWM výstupů nevhodný k přímému buzení výkonových spínacích prvků typu MOSFET (napětím i dovoleným proudem, který by byl potřeba na nabití kapacit tranzistoru). Je tedy jako mezičlenu využito integrovaného budícího obvodu IR2110.

Frekvence PWM výstupů Arduina je v základu nastavena pro piny ~3, ~9, ~10 a ~11 na frekvenci 490,2 Hz. Pro piny ~5 a ~6 je to 976,6 Hz. Jelikož je tato frekvence nedostačující, musí dojít k jejímu přenastavení. Arduino umožňuje přeprogramování frekvence pouze skokově (pevně nastavené děličky frekvence 16 Mhz krystalu arduina), použitelná v řadě se jeví frekvence 7,8 kHz (umožňující piny ~5 a ~6), nejbližší vyšší je 31 kHz (umožňují piny ~3; ~9; ~10 a ~11). K navýšení frekvence dojde u pinu ~5 viz algoritmus níže [15]:

```
TCCR0B = TCCR0B & B11111000 | B00000010; // pro frekvenci PWM 7812.50 Hz
```

Celý řídicí algoritmus Arduina obsahuje 4.příloha. Microprocesor Atmega328P neumožňuje ze způsobu vytváření PWM přímo unipolární řízení obr. 3-8 [16]. Proto je pro svou jednoduchost zvoleno řízení bipolární. Ochranu Arduina před přepětím na vstupních pinech zabezpečují Zenerovy diody 5,1 V, jelikož při trvajícím přepětí 5,5 V se zničí vnitřní diody chránící Arduino před ESD a posléze i periferie Arduina [17].

Velikost a směr proudu motoru je snímána pomocí čidla LEM CAS25 NP.

Number of primary turns	Primary resistance R_p [m Ω]	Recommended connections
1	0.24	
2	1.08	
3	2.16	

Obr. 3-11 Zapojení silových kontaktů čidla LEM CAS25 NP [18]

Pro tuto aplikaci je použito zapojení 2 primárních závitů, při kterých je přesnost čidla asi 50 mV/A. Toto zapojení nabízí rozsah měření až do 42,5A pro obě polarity proudu.

Na výstupu čidla je použit filtr typu dolní propust s parametry $R_f = 20,5 \text{ k}\Omega$ a $C_f = 160 \text{ nF}$.

4 Návrh prvků DC/DC měniče

V této kapitole bude popsán výběr výkonových tranzistorů typu MOSFET, výpočet jejich ztrát a návrh chladiče. Bude zde popsán i výběr vhodného integrovaného budicího obvodu pro řídicí elektrody tranzistorů, z důvodu nevhodnosti přímého řízení z logiky Arduina, popsaného v předešlé kapitole.

4.1 Návrh výkonových tranzistorů a chladiče

Hlavními kritérii při výběru výkonových tranzistorů je dostatečně vysoké napětí U_{DS} a nízký odpor v sepnutém stavu $R_{DS(ON)}$. Za „dostatečně vysoké“ napětí U_{DS} je vzata hranice alespoň dvojnásobku napájecího napětí.

V tomto případě $2 \cdot U_{aku} = 2 \cdot 36 \Rightarrow U_{DSmin} = 72 \text{ V}$.

Důvodem pro snahu snižovat odpor v sepnutém stavu $R_{DS(ON)}$, je minimalizace tepelných ztrát v sepnutém stavu součástky. Platí totiž:

$$P_{on} = R_{DS(ON)} \cdot I_z^2 \quad (4-1)$$

Často pak vychází výhodně výběr proudově předdimenzovaného tranzistoru, který má však zpravidla nízký odpor $R_{DS(ON)}$. Protiváhou jsou však zvyšující se parazitní kapacity přechodů, vlivem kterých rostou spínací časy a v konečném důsledku i přepínací ztráty.

Tyto přepínací ztráty jsou dány:

$$P_{přep} = f(W_{on} + W_{off}) \quad (4-2)$$

a protože:

$$W_{on} = \frac{1}{4} \cdot I_n \cdot U_{DD} \cdot t_{on} \quad (4-3)$$

$$W_{off} = \frac{1}{4} \cdot I_n \cdot U_{DD} \cdot t_{off} \quad (4-4)$$

lze po úpravě:

$$P_{přep} = f \cdot \frac{1}{4} \cdot I_n \cdot U_{DD} (t_{off} + t_{on}) \quad (4-5)$$

Je vybrán N-kanálový MOSFET **IRFP4110**. Z technické dokumentace plyne, že $R_{dsmax(on)} = 4,5 \text{ m}\Omega$ (typ. $3,7 \text{ m}\Omega$), sestupná vypínací hrana $t_{off} = 78 \text{ ns}$ a náběžná spínací hrana $t_{on} = 25 \text{ ns}$.

Výpočet přepínacích ztrát s využitím rovnice (3-7):

$$P_{přep} = f \cdot \frac{1}{4} \cdot I_n \cdot U_{DD} (t_{off} + t_{on})$$

$$P_{přep} = 7,8 \cdot 10^3 \cdot \frac{1}{4} \cdot 28,9 \cdot 36(78 + 25) \cdot 10^{-9}$$

$$P_{přep} \cong 0,2 \text{ W}$$

Kde: f ... je řídicí frekvence Arduina; I_z ... nominální proud DC motorem;

U_{DD} ... napětí na akumulátoru $3 \times 12 \text{ V}$

Výpočet ztrát v sepnutém stavu s využitím rovnice (3-3)

$$P_{on} = R_{ds(on)} \cdot I_n^2$$

$$P_{on} = 4,5 \cdot 10^{-3} \cdot 28,9^2$$

$$P_{on} \cong 3,8 \text{ W}$$

Celkové ztráty jsou dány součtem ztrát přepínacích a ztrát vedením

$$P_{ztr} = P_{on} + P_{přep}$$

$$P_{ztr} = 3,8 + 0,2$$

$$P_{ztr} \cong 4 \text{ W}$$

Pro tepelnou povahu celkových ztrát je proveden výpočet chladiče:

Návrh chladiče

$$P_{ztr} = 4 \text{ W}$$

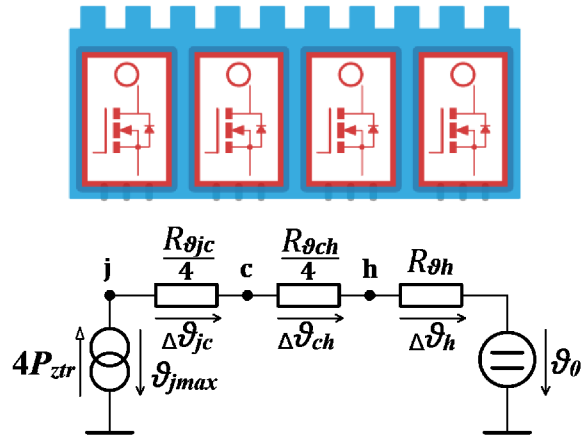
$$\vartheta_{jmax} = 120 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\vartheta_0 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$R_{\vartheta jc} = 0,402 \text{ K/W}$$

$$R_{\vartheta ch} = 0,24 \text{ K/W}$$

$$R_{\vartheta h} = ? \text{ K/W}$$



Obr. 4-1 Návrh chladiče

$$4P_{ztr} = \frac{\vartheta_{jmax} - \vartheta_0}{\frac{R_{\vartheta jc}}{4} + \frac{R_{\vartheta ch}}{4} + R_{\vartheta h}}$$

$$R_{\vartheta h} = \frac{\vartheta_{jmax} - \vartheta_0}{4P_{ztr}} - \frac{R_{\vartheta jc}}{4} - \frac{R_{\vartheta ch}}{4} =$$

$$R_{\vartheta h} = \frac{120 - 40}{4 \cdot 4} - \frac{0,402}{4} - \frac{0,24}{4} =$$

$$R_{\vartheta h} \cong 4,8 \text{ K/W}$$

Tepelný odpor chladiče pro rozložení výkonových prvků viz obr. 2-10, by měl být nižší než výpočtový tepelný odpor $R_{\vartheta h} = 4,8 \text{ K/W}$.

4.2 Návrh budicího obvodu

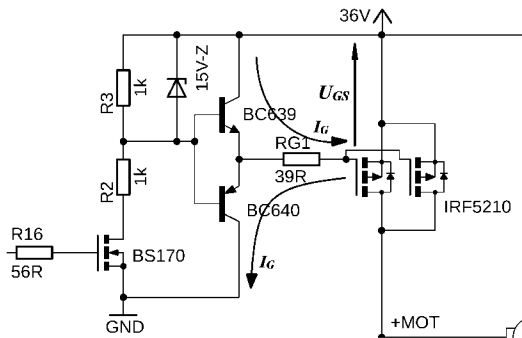
Účelem budicího obvodu je distribuce kvalitního signálu řídící elektrodě výkonového tranzistorového spínače [19].

Takový řídicí signál by měl mít v případě tranzistorů typu MOSFET dostatečně vysoké napětí, a to 2 až 3krát U_{th} , kde U_{th} je z angl. **threshold voltage**, a je výrobcem definované prahové napětí, při kterém tranzistor začíná vést el. proud výkonovými elektrodami. Budicí obvod také musí být schopen dodat a zase odebrat náboj, který je zapotřebí na nabití a vybití kapacit mezi řídicí a výkonovými elektrodami.

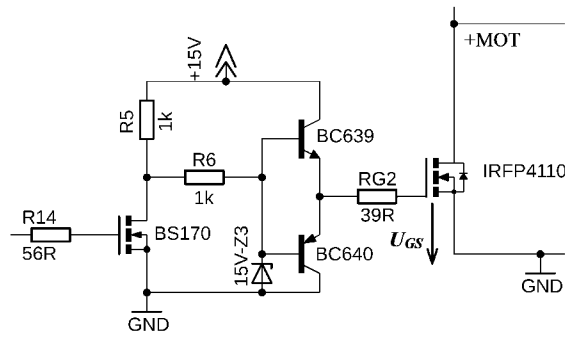
Budicí obvody mohou být sestaveny z diskretních součástek nebo jsou k dostání v integrované podobě. V rámci této bakalářské práce byly odzkoušeny oba typy (mimo průmyslové bezpečnostní normy, a tedy bez galvanického oddělení).

Návrh budicího obvodu z diskretních součástek

Návrh počítal s mosfet tranzistorem (IRF5210) s P kanálem jako vrchním spínačem větve a mosfet tranzistorem (IRFP4110) s N kanálem jako spodním spínačem větve. Pro řádově horší statické parametry IRF5210, byl vrchní spínač větve tvořen paralelním spojením dvou viz obr. 4-2.



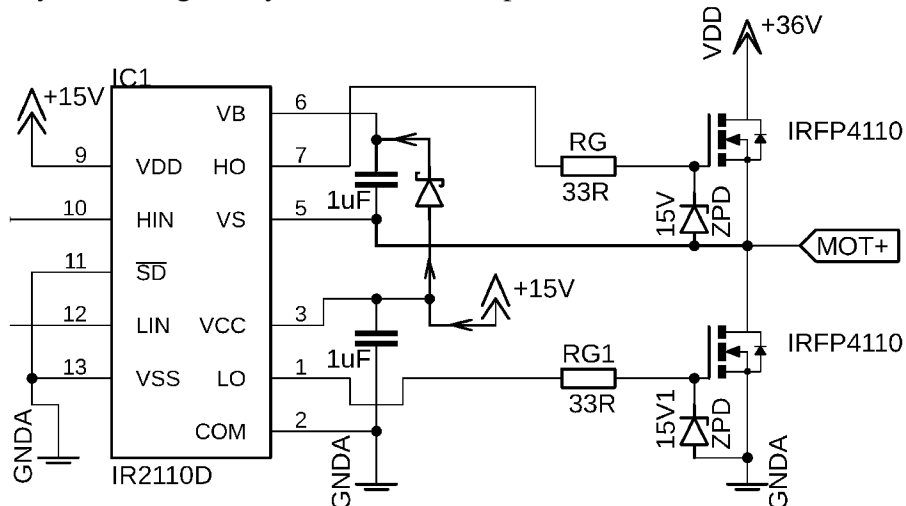
Obr. 4-2 Budič vrchního spínače



Obr. 4-3 Budič spodního spínače

Integrovaný budicí obvod

Je vybrán integrovaný obvod IR2110 z produkce International Rectifier.



Obr. 4-4 Integrovaný budič IR2110

Integrovaný obvod IR2110 využívá k udržení velikosti řídicího napětí vrchního spínače bootstrap kondenzátor, který při sepnutí spodního spínače drží potenciál zemně mezi spínači větve viz obr. 4-4.

Pro správnou funkci bootstrap zapojení je zapotřebí řízení obou spínačů ve větvi, tedy alespoň na krátký časový úsek sepnout spodní spínač větve. Řešením je softwarové omezení max. střidy arduina bipolárního řízení na asi 0,96.

Výhodou bootstrap zapojení oproti testovanému zapojení s diskretních součástek je využití pro vrchní i spodní spínač MOSFET tranzistoru s N-kanálem, který má obecně lepší statické parametry než tranzistor s P-kanálem.

4.3 Návrh kondenzátorů meziobvodu

Hlavním účelem kondenzátorů v meziobvodu je omezení zvlnění napětí a pokrytí okamžité spotřeby proudu cyklicky spínané indukční zátěže (zde BDC motoru). Touto problematikou se i s grafickou podporou zabývá tento článek: Lost Secrets of the H-Bridge [20]. Při napěťovém dimenzování kondenzátoru je vzato v úvahu napájecí napětí 36 V s nutnou rezervou na rozsah napětí akumulátoru a přechodné děje v obvodu. S rezervou je zvolen kondenzátor s jmenovitým napětím 100 V. Dalším faktorem návrhu je velikost zvlnění proudu na kondenzátoru. Při uvažovaném nominálním proudu I_n motoru se dostaví maximální zvlnění proudu na kondenzátoru při střídě rovné 0,5 výpočtem:

$$I_{kon.ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int i_c(t)^2 \cdot dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot T \cdot I_n^2 \cdot (s - s^2)} = I_n \cdot \sqrt{(s - s^2)} \quad (4-6)$$

$$I_{kon.ef} = 28,5 \cdot \sqrt{(0,5 - 0,5^2)}$$

$$I_{kon.ef} = 14,25 \text{ A}$$

Je vybrán elektrolytický kondenzátor 100 V, 1000 μF . V technické dokumentaci [21] je stanoveno povolené zvlnění proudu kondenzátoru $I_{R.C} = 1,93 \text{ A}$, s uvážením opravného koeficientu $k_{frek.} = 0,98$. Při použití paralelní kombinace čtyř kondenzátorů, pak:

$$I^*_{kon.ef} = n \cdot k_{frek.} \cdot I_{R.C} \quad (4-7)$$

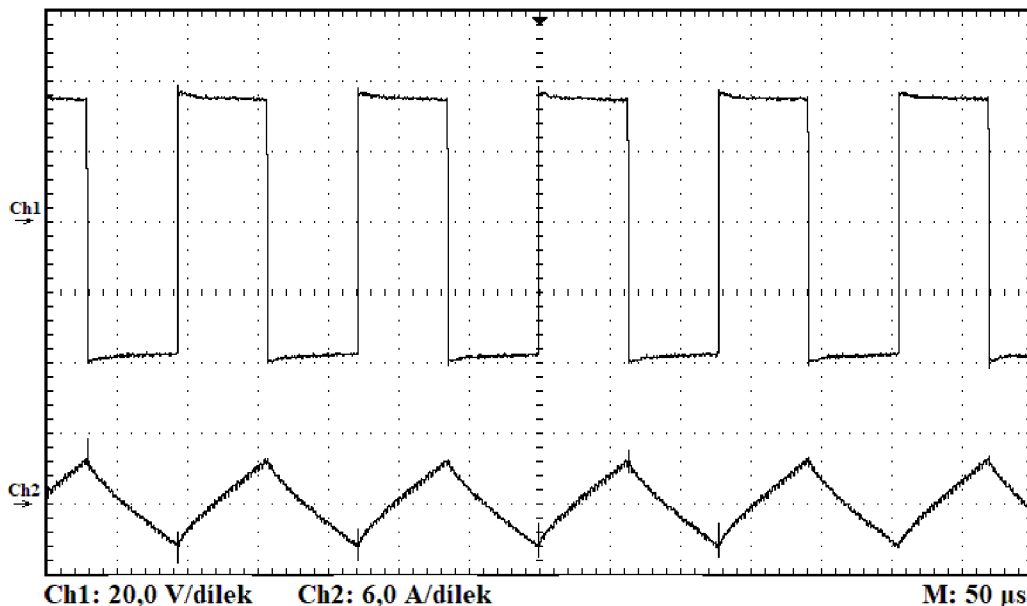
$$I^*_{kon.ef} = 4 \cdot 0,98 \cdot 1,93$$

$$I^*_{kon.ef} = 7,57 \text{ A}$$

Přestože je tato povolená hodnota přibližně poloviční oproti zvlnění proudu při kritické střídě a nominálním proudu, je pro praktickou velikost DPS přistoupeno ke kompromisu mezi životností a kapacitou kondenzátorové baterie, s přihlédnutím k předpokladu pouze ojedinělého zatížení jmenovitým a vyšším proudem motoru při kritické střídě 0,5. Pro snížení indukčnosti přívodů elektrolytických kondenzátorů je součástí meziobvodové kondenzátorové baterie také sérioparalelní zapojení bezindukčních SMD keramických kondenzátorů v součtu 12,1 μF při 100 V.

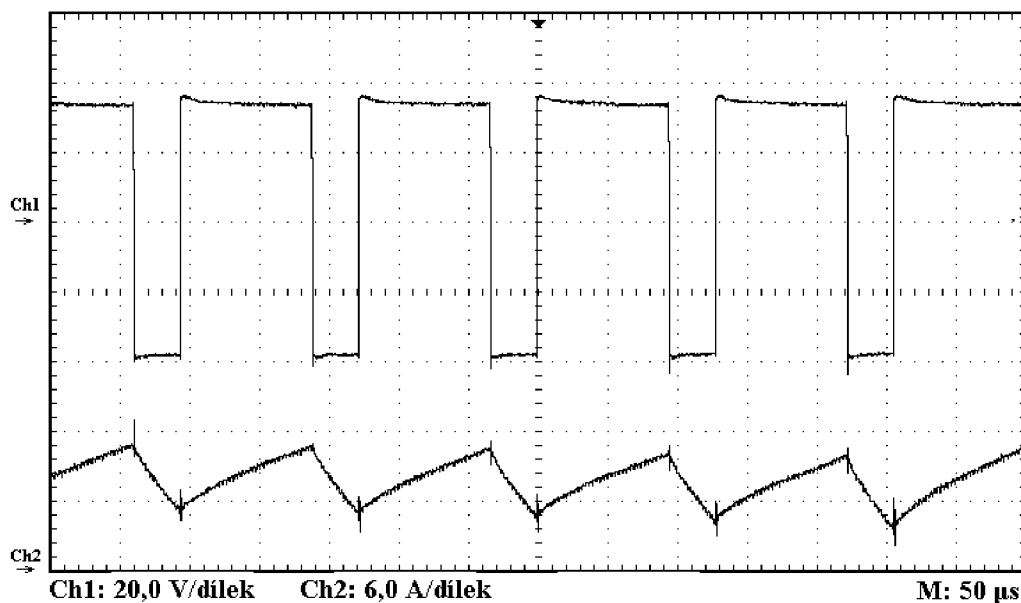
5 Oživení měniče

Tato kapitola obsahuje průběhy napětí a proudu naměřené na bipolárně řízeném BDC motoru MY1020, a to pro střídu 0,5; 0,76 a 0,96. Součástí jsou také řídicí napěťové signály na vstupu budícího obvodu IR2110. Průběhy jsou měřeny na osciloskopu UNI-T UTD2052CEX.

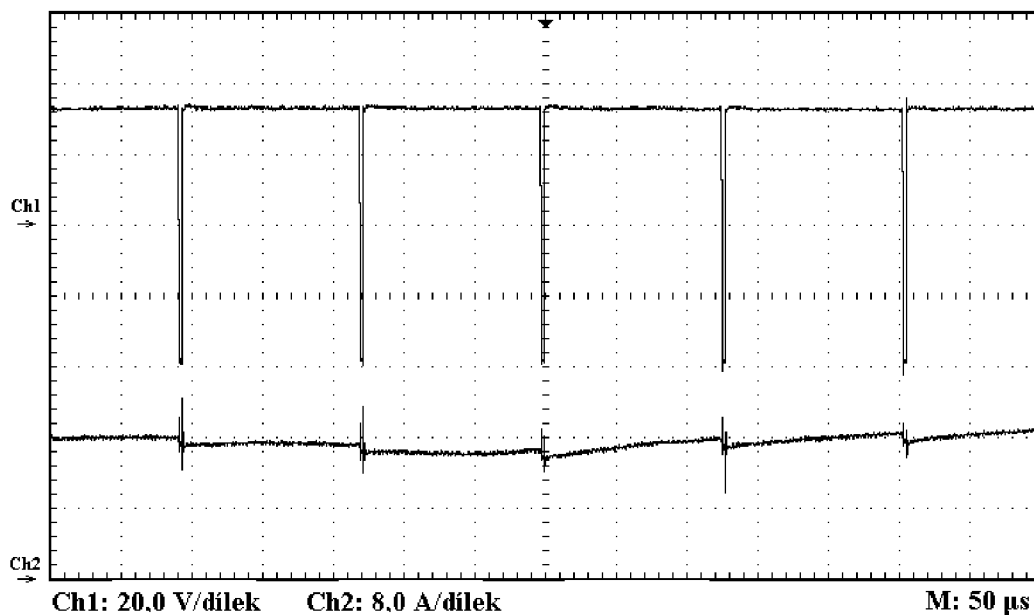


Obr. 5-1 Průběhy na motoru MY1020 36 V/800 W; $s = 0,5$

Obr. 5-1 zahrnuje Ch1 bipolární průběh napětí na motoru při střídě 0,5 (hřídel motoru se neotáčí). Ch2 obr. 5-1, lze vidět zvlnění proudu motorem. K měření bylo použito čidla proudu LEM CAS25 NP bez výstupního RC filtru.

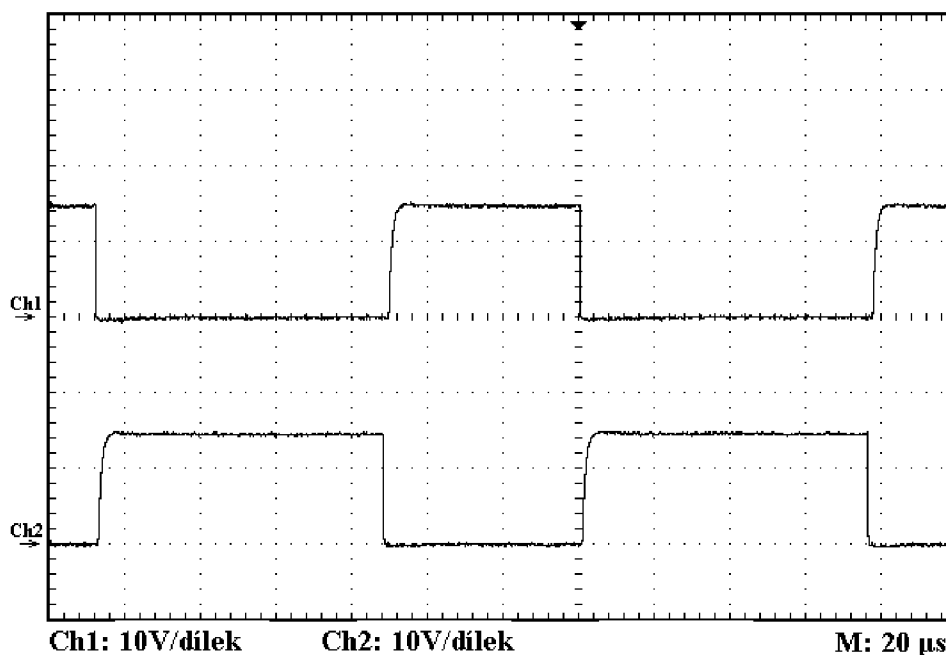


Obr. 5-2 Průběhy na motoru MY1020 36 V/800 W; $s \approx 0,76$



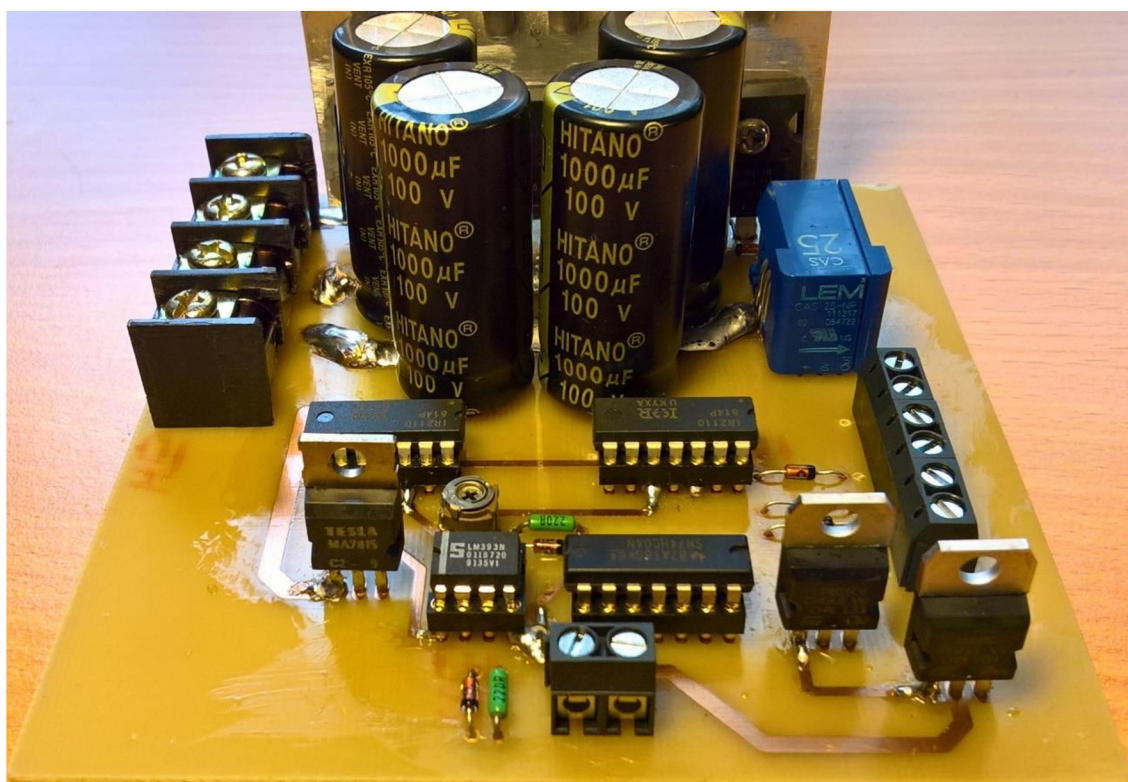
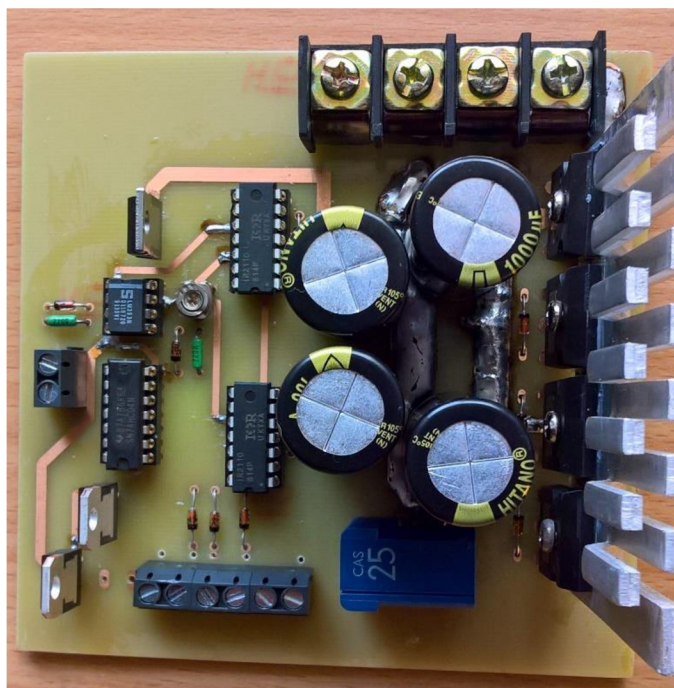
Obr. 5-3 Průběhy na motoru MY1020 36 V/800 W; $s \approx 0,96$

Na obr. 5-3 lze vidět napětí Ch1 a proudu Ch2, při maximální výchylce řídicí veličiny (softwarové omezení nutné pro správnou funkci budícího obvodu typu bootstrap).



Obr. 5-4 Řídicí napětí na vstupu IR2110

Na obr. 5-4 lze vidět řídicí napětí na Ch2 pro spínače S1, S3 a pro spínače S2, S4 na Ch1. Na obr. 5-4 je také patrné okamžité rozepnutí. Sepnutí je s časovým zpožděním o tzv. deadtime (zde asi 1 μs).



Obr. 5-5 Osazený DC/DC měnič

6 Závěr

Hlavním cílem této bakalářské práce byl návrh (příloha 2 a 3), osazení a oživení výkonového měniče pro BDC motor 36 V/800 W.

V rámci práce na pohonu zahradní trojkolky, pro kterou je měnič sestaven byl také popsán výběr akumulátoru, kde z důvodu nenáročnosti trojkolky na délku dojezdu byly vybrány tři trakční gelové Pb akumulátory 28 Ah. Pro absenci kvalitní technické dokumentace vybraného BDC motoru MY1020 čínské výroby, byla doměřena záběrná, zatěžovací a otáčková charakteristika (viz 1. příloha). Pro představu o druhu provozu stroje, byla také změřena oteplovací charakteristika povrchu motoru a pomocí napěťových konstant odhadnuta teplota magnetů statoru. Po 45 min provozu na předpokládaný výkon 550 W byla teplota magnetů vypočtena na asi 71 °C, oteplení povrchu statoru při stejných podmínkách bylo asi o 35 °C. Další zvýšení teploty je zabráněno omezenou kapacitou akumulátorů a nebylo proto přistoupeno k dalším opatřením. Pro optimalizaci momentu stroje v nízkých otáčkách bude mezi motor a hnanou nápravu zařazena převodovka z malého motocyklu Simson S51. S využitím nejrychlejšího převodu je odhadnuta rychlost trojkolky asi 24 km/h, při nejnižším převodu pak přibližně 8 km/h (obě rychlosti při nominálních otáčkách hřídele motoru).

S ohledem na rozsáhlost problematiky DC/DC měničů byly popsány právě ty architektury, které logicky vyústí k použitému zapojení do H-můstku. Volba zapojení spínačů do H-můstku umožňuje provoz s oběma polaritami napětí i proudu na motoru, lze tedy počítat s motorickou podporou brzdného momentu ve svahovitém terénu a se zpátečku reverzací motoru (upravená mechanická převodovka tuto možnost nemá).

Pro řízení měniče bylo použito mikrokontrolerové základové desky Arduino UNO3. U desky došlo k softwarovému navýšení frekvence na PWM ~5 pinu, a to z továrních 976 Hz na asi 7,8 kHz. Frekvence PWM pinů Arduina lze měnit pouze po určitých skocích daných děličkami frekvence krystalu desky, nejbližší vyšší frekvence je asi 31 kHz. Z důvodu způsobu vytváření PWM μ procesorem ATmega328P je použito bipolárního řízení H-můstku. Potřebnou kvalitu signálu přiváděného na řídicí elektrody tranzistorů zajišťují integrované budící obvody IR2110 v bootstrap zapojení. Integrovanému obvodu IR2110 byla dána přednost před návrhem budiče z diskretních součástek, důvodem je zjednodušení schéma měniče a umožnění osazení N-kanálových MOSFET tranzistorů i v horním spínači větve namísto tranzistorů s P-kanálem, které vyžadovaly paralelní kombinace, aby bylo docíleno stejných statických parametrů jako jeden N-kanálový. K získání informace o velikosti proudu motoru bylo použito čidlo LEM CAS25NP, tato informace se pro uvažovanou nízkou dynamiku systému a plánované proškolení obsluhy neuvádí k účelu zpětné proudové vazby. Pokud se v provozu ukáže její potřeba lze ji získat úpravou programu Arduina bez zásahu na měniči. Posledním krokem je odzkoušení funkce měniče v provozu a přizpůsobení řídicího programu Arduina uživateli (velikost zpáteční rychlosti, míra brzdného výkonu a rekuperace).

Literatura

- [1] KOBRLE, Pavel a Jiří PAVELKA. *Elektrické pohony a jejich řízení*. 3. přep. vyd. Praha: ČVUT, 2016.
- [2] MOHAN, Ned a Dan SAYRE, ed., Janis SOO, ed. *Electric machines and drives*. 1.st course. USA: Wiley, 2012. ISBN 978-1-118-07481-7.
- [3] Skoro vše o akumulátorech a nabíjení. *Motola* [online]. 2008 [cit. 2018-11-10]. Dostupné z: http://www.motola.cz/UserFiles/Diskuzni_clanky/akumulatory.pdf
- [4] *Pb gelový akumulátor_UCG 28-12* [online Katalogový list]. In: . Liverpool: Ultracell(UK) Ltd, b.r. [cit. 2018-11-10].
- [5] MONTONE, Dan. TEMPERATURE EFFECTS ON MOTOR PERFORMANCE. In: *Ametekhaydonkerk* [online Technical article]. b.r., s. 2-3 [cit. 2018-10-29].
- [6] Curieova teplota. *GOUDSMIT: MAGNETICS GROUP* [online]. Mníšek pod Brdy: WAMAG, spol. s r.o., b.r. [cit. 2018-11-11]. Dostupné z: <https://www.goudsmitmagnets.com/cz/wiki/211/curieova-teplota>
- [7] ČSN 35 0010: TOČIVÉ ELEKTRICKÉ STROJE - Zkoušky. 1st ed. Praha: Federální úřad pro normalizaci a měření, 1992.
- [8] ČESKÁ REPUBLIKA. *Vyhláška o schvalování technické způsobilosti a o technických podmínkách provozu vozidel na pozemních komunikacích: Technické požadavky na výbavu jízdních kol, potahových vozidel a ručních vozíků*. In: . Ministerstvo dopravy, 2014, ročník 2014, číslo 341. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2014-341>
- [9] LIN LUO, Fang a Hong YE. *Advanced DC/DC converters*. 2.nd. Boca Raton: CRC Press, 2004. ISBN 08-493-1956-0.
- [10] PATOČKA, Miroslav. *VYBRANÉ STATĚ Z VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY: SVAZEK III Pulzní měniče bez transformátoru*. 1. Brno: VUT Brno, 2005.
- [11] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *DC/DC měniče*. Praha: BEN, 2001. ISBN 80-730-0045-8.
- [12] I need help in my circuit to generate dead time: DEADTIME. In: *Edaboard* [online]. 2017 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z:

<https://www.edaboard.com/showthread.php?324247-I-need-help-in-my-circuit-to-generate-dead-time>

- [13] Klon Arduino UNO R3. In: *ECLIPSE*-modules [online Katalogový list]. ECLIPSE s.r.o., 2017 [cit. 2018-11-19].
- [14] Arduino_UNO3. In: *Make.net* [online]. b.r. [cit. 2018-11-19]. Dostupné z: https://www.make.net.za/wp/wp-content/uploads/2016/08/sku_370842_1.jpg
- [15] How To Change Frequency On PWM Pins Of Arduino UNO. *ETechnophiles: Make it or Break it!* [online]. b.r. [cit. 2018-11-19]. Dostupné z: <https://etechnophiles.com/change-frequency-pwm-pins-arduino-uno/>
- [16] ATmega328P: Datasheet. In: *Automotive-Microcontrollers* [online]. San Jose, CA 95110 USA: Atmel Corporation, 2015, s. 79-85 [cit. 2019-05-07].
- [17] 10 Ways to Destroy An Arduino. <https://www.rugged-circuits.com> [online]. Michigan, USA, b.r. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.rugged-circuits.com/10-ways-to-destroy-an-arduino>
- [18] *LEM CAS25NP: Datasheet* [online]. In: . LEM, 2012, s. 14-15 [cit. 2019-05-18].
- [19] VOREL, Pavel a Miroslav PATOČKA. Budiče výkonových tranzistorů MOSFET a IGBT. *Elektrorevue* [online]. 2004, **2004** [cit. 2018-10-28]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/04030/index.html#kap2>
- [20] SACHS, Jason. Lost Secrets of the H-Bridge: Part III: Practical Issues of Inductor and Capacitor Ripple Current. In: *Embeddedrelated: related* [online]. b.r. [cit. 2019-05-18].
- [21] Elektrolyt. kondenzátor CE 1000u/100VIT: Datasheet. In: *HITANO: Enterprise corp.* [online]. b.r., s. 2 [cit. 2019-05-18].

Seznam symbolů a zkratek

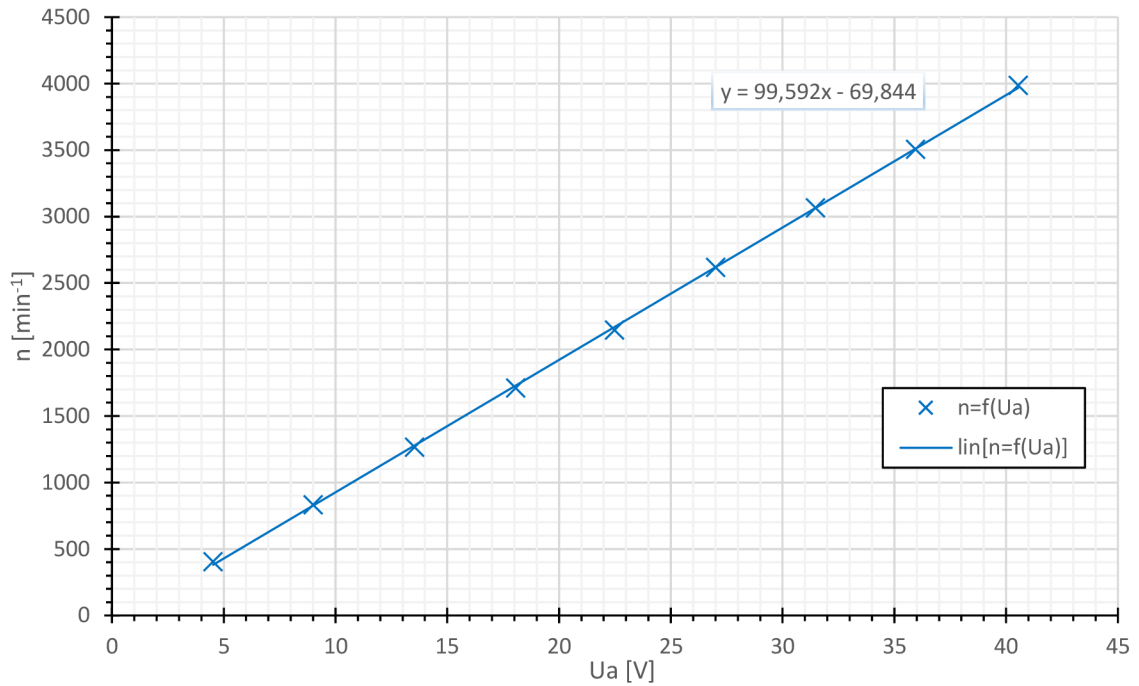
Zkratka	Popis
AGM	Absorbed Glass Material (elektrolyt vázaný ve skelném rounu)
BDC	Brush Direct Current [motor] (stejnoseměrný uhlíkový motor)
C	Kondenzátor
D	Dioda (polovodičová)
DC	Direct Current
DPS	Deska plošného spoje
ESD	Electrostatic discharge (Elektrostatický výboj)
I/O	Input/Output (vstup/výstup)
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (polem řízený tranzistor)
OZ	Obnovitelné Zdroje
PM	Permanent Magnet
PWM	Pulse Width Modulation
Q	Quadrant (Kvadrant)
S	Switch [polovodičový](Spínač)

Symbol	Popis	Jednotka
C_{DS}	Přechodová kapacita MOSFET Drain-Source	[F]
C_{GD}	Přechodová kapacita MOSFET Gate-Drain	[F]
C_{GS}	Přechodová kapacita MOSFET Gate-Source	[F]
C_m	Müllerova kapacita	[F]
f	Frekvence	[Hz]
GND_A	„nulový potenciál“	
I_G	Nabíjecí proud kapacit MOSFET Tr.	[A]
I_{MAX}	Odhadnutý maximální provoz. proud	[A]
$I_{R.C}$	Dovolené zvlnění proudu na kondenzátoru	[A]
I_a	Měřený proud motorem	[A]
I_{eq}	Ekvivalentní zátěžný proud Pb akumulátoru	[A]
$I_{kon.ef}$	Efektivní hodnota proudu kondenzátory	[A]
I_n	Nominální proud elektromotoru	[A]
i	Převodový poměr převodovky	[-]
K_{ci}	Zesílení čidla proudu	[V/A]
K_e	Napěťová konstanta motoru za studena	[V/min ⁻¹]
$K_{e\theta}$	Napěťová konstanta motoru za tepla	[V/min ⁻¹]
k	Peukertova konstanta	[-]
k_{frek}	Opravný koeficient dovoleného zvlnění proudu	[-]
L	Indukčnost	[H]
L_a	Indukčnost kotvy motoru	[H]
M	Kroutící moment	[Nm]
N	Počet závitů jedné cívky kotvy	[-]
n_n	Nominální otáčky	[min ⁻¹]
t_{on}	Časový úsek náběžné spínací hrany	[s]
t_{off}	Časový úsek sestupné vypínací hrany	[s]
t_{rise}	Čas potřebný na změnu z nízké do vysoké úrovně	[s]
P	Elektrický výkon	[W]
P_2	Výkon předpokládaného zatížení motoru	[W]
P_{ztr}	Celkový ztrátový výkon na tranzistoru	[W]

P_{on}	Ztrátový výkon průchodem proudem tranzistorem	[W]
$P_{přep}$	Přepínací ztrátový výkon na tranzistoru	[W]
Q_g	Celkový náboj řídicí elektrody (gate) tranzistoru	[C]
$R_{DS(max)}$	Maximální odpor Drain-Source Tr. v seplém stavu	[Ω]
$R_{DS(on)}$	Odpor Drain-Source Tranzistoru v seplém stavu	[Ω]
R_G	Rezistor omezující nabíjecí proudy tranzist. (Gate)	[Ω]
R_a	Odpor kotvy motoru	[Ω]
s	Střída	[-]
U_{aku}	Nominální napětí akumulátoru (3x 12 V)	[V]
U_{DD}	Mezní provozní napětí na akumulátoru (3x 13,3V)	[V]
U_{DS}	Napětí tranzistoru drain-source	[V]
U_{DSmin}	Minimální napětí tranzistoru drain-source	[V]
U_{GS}	Napětí tranzistoru gate-source	[V]
U_d	Napětí stejnosměrného zdroje	[V]
U_i	Indukované napětí na kotvě motoru	[V]
U_n	Nominální napětí motoru	[V]
$U_{stř}$	Střední hodnota napětí	[V]
U_{th}	Prahové napětí na řídicí elektrodě, kdy se začíná tranzistor otevírat	[V]
U_z	Napětí na zátěži	[V]
W_{off}	Energie zmaření při vypínacím procesu	[J]
W_{on}	Energie zmaření při spínacím procesu	[J]

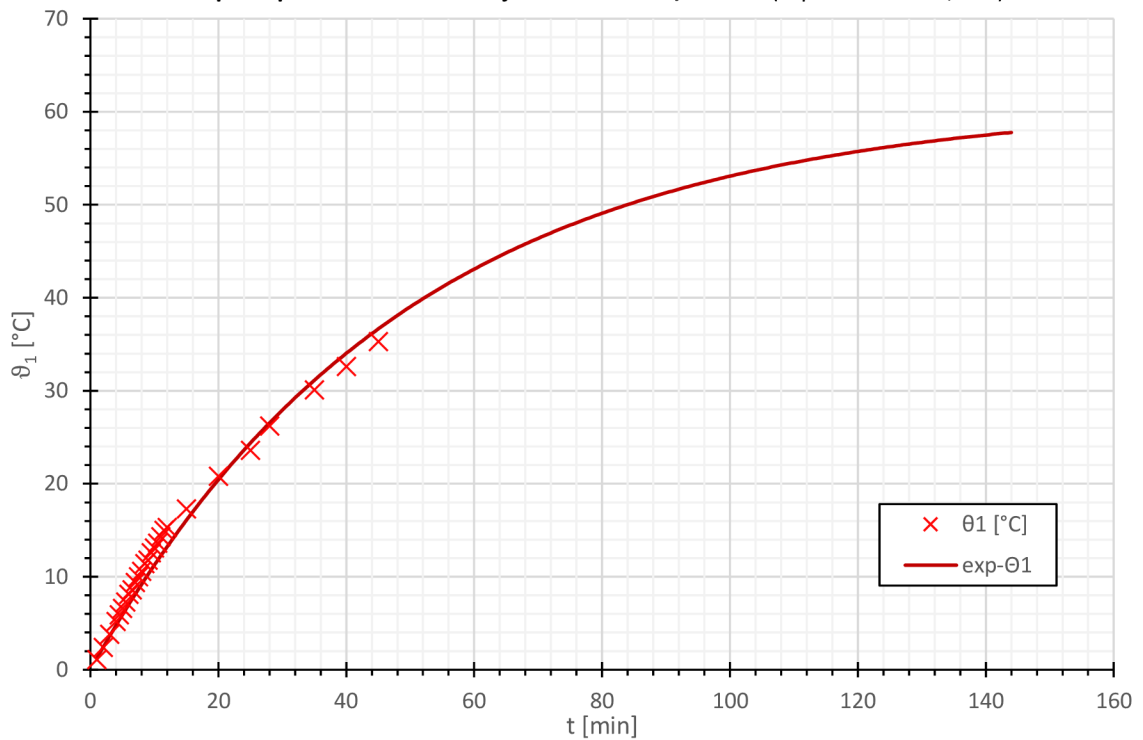
Příloha 1 - Charakteristiky motoru MY1020

Změna otáček stroje MY1020 v závislosti na přiloženém svorkovém napětí
ve stavu naprázdno

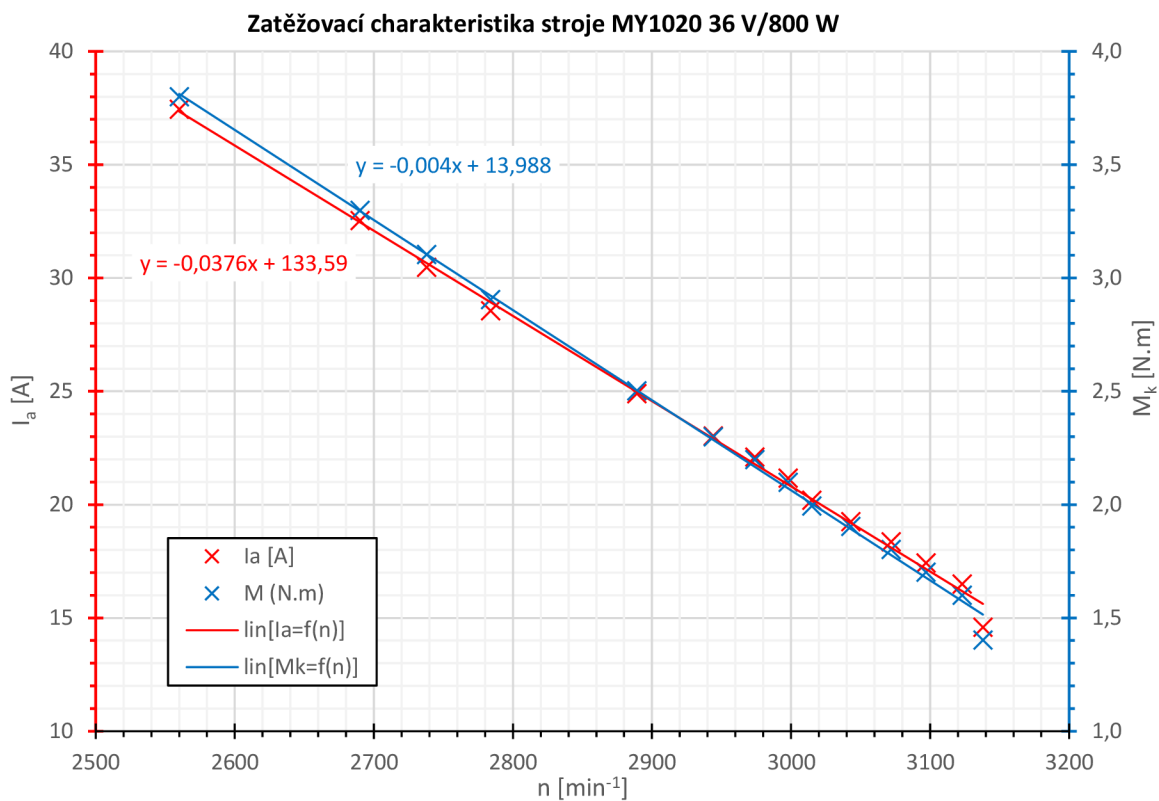


Obr. 2-3

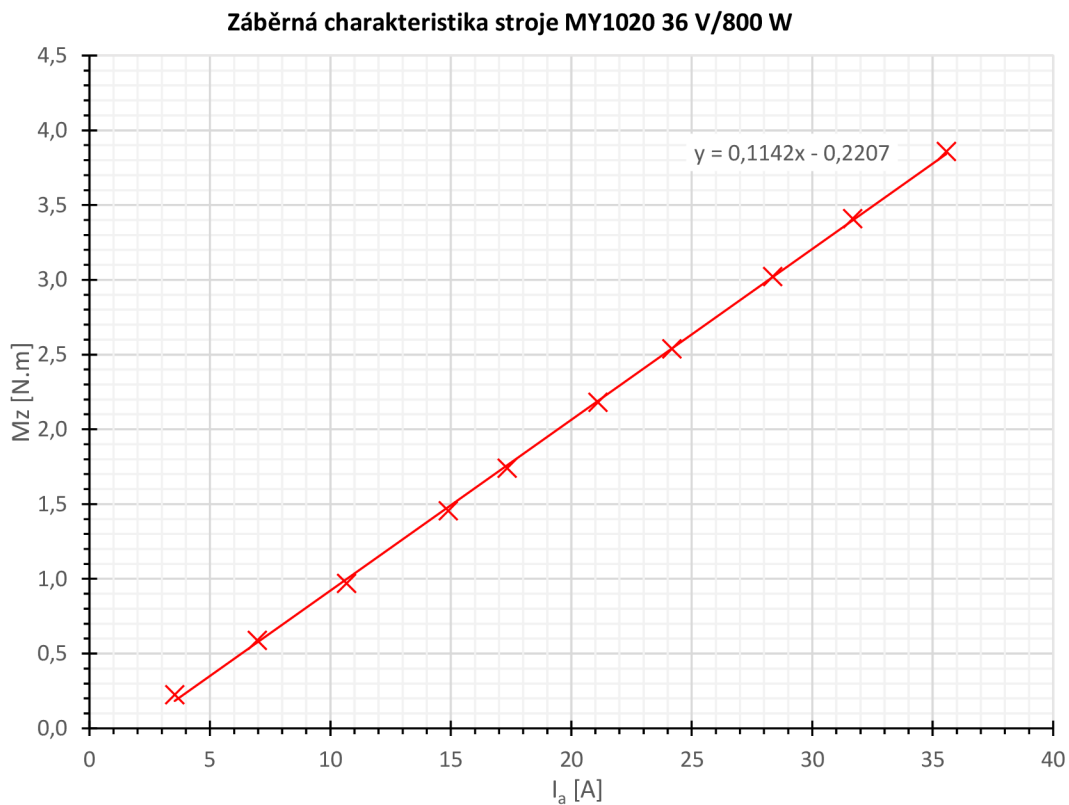
Oteplení povrchu statoru stroje MY1020 36 V/800 W (teplota okolí 22,2 °C)



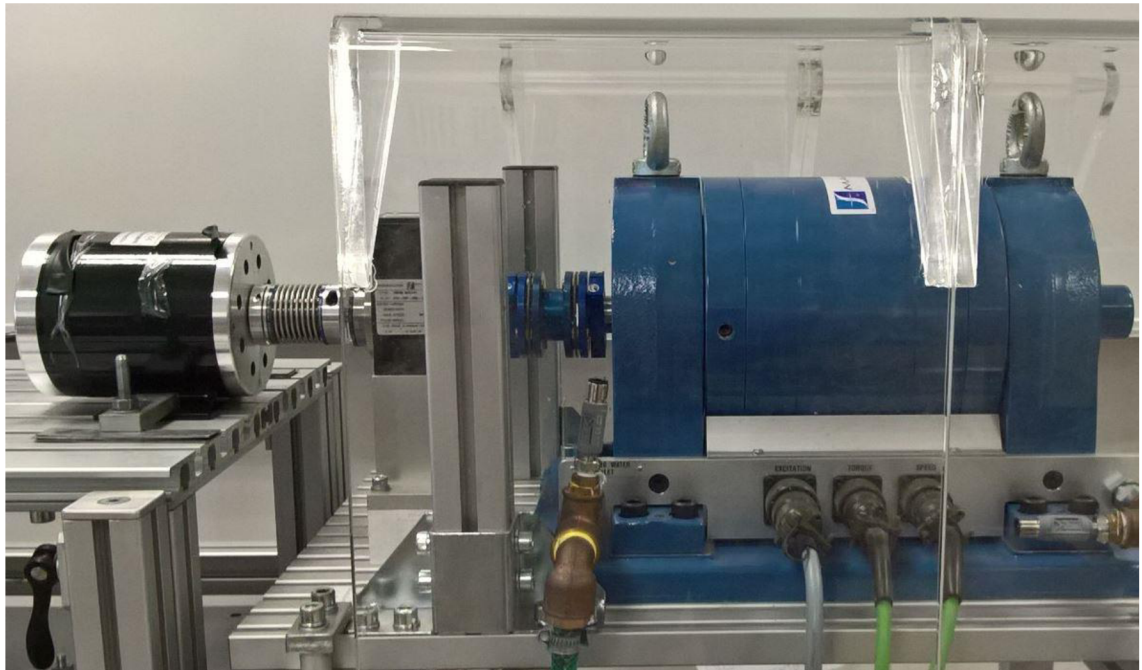
Obr. 2-4



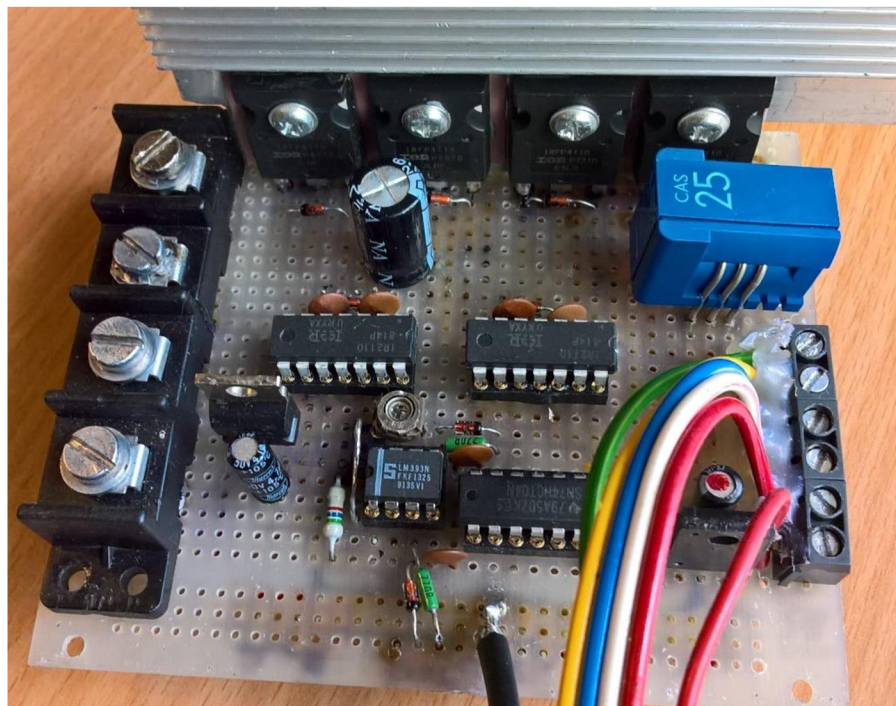
Obr. 2-5



Obr. 2-7 Záběrná charakteristika stroje MY1020 36 V/800 W

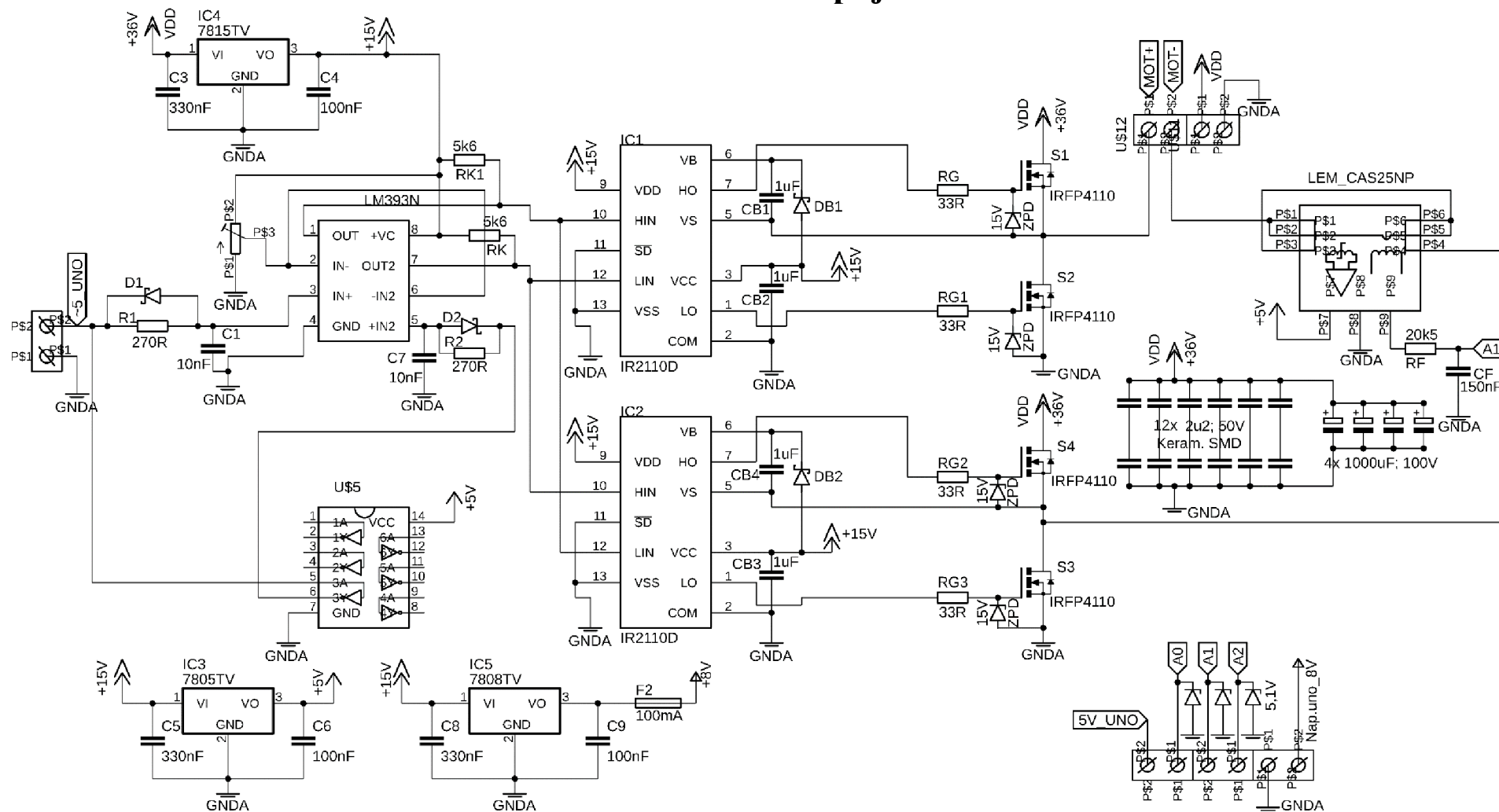


Obr. 2-8 Připojení měřeného stroje MY1020 k dynamometru

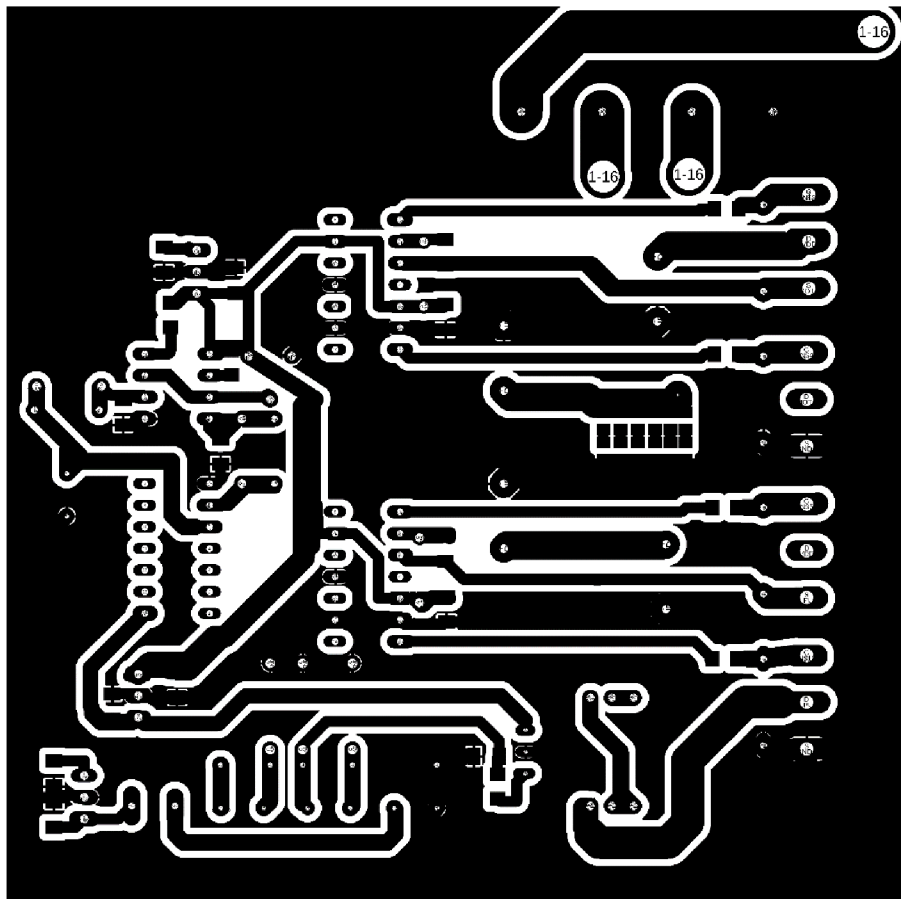


Obr. 4-5 Prvotní návrh měniče

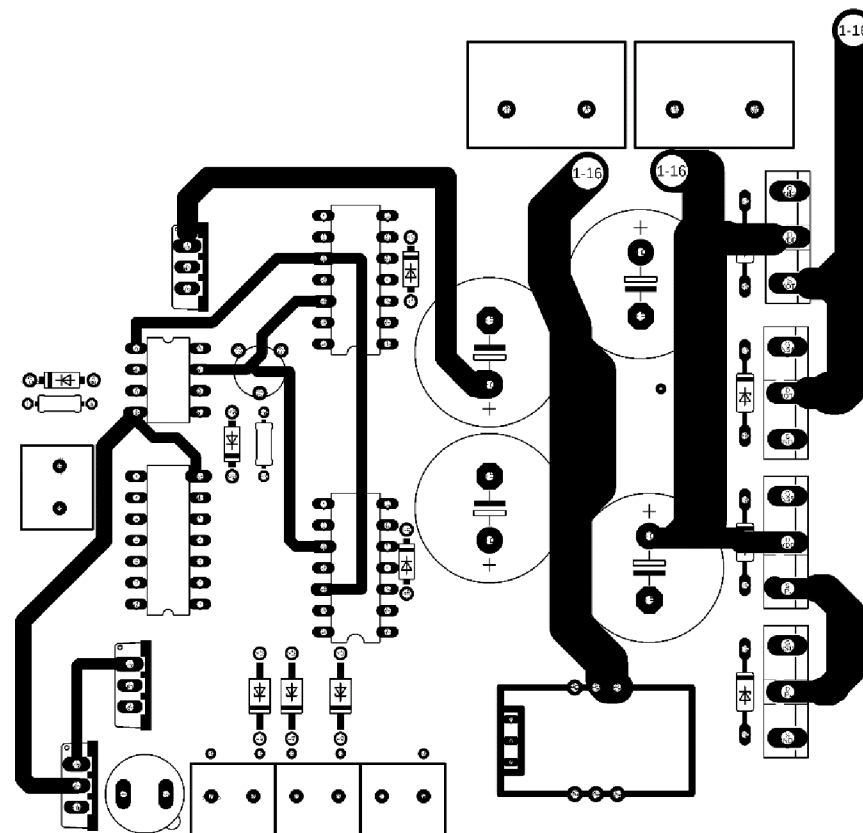
Příloha 2 - Schéma zapojení měniče



Příloha 3 – Osazovací plán desky měniče



Obr. 6-1 Spodní vrstva desky (BOTTOM)



Obr. 6-2 Vrchní vrstva desky (TOP)

Příloha 4 – Řídící algoritmus Arduina

```
// projekt BDC MOTORu 36V/800W
// bc. práce: Němec Petr
// převzato a upraveno z:
// https://navody.arduino-shop.cz/zaciname-s-arduinem/potenciometr.html

int potPin = A0; // reference potenciometr
int revPin = A1; // reverzace spinac
int LEMPin = A2; // čidlo proudu LEM
int PWMPin = 5; // číslo použitého pinu PWM

int potProm = 0; // proměnná pro analogovou hodnotu potenciometru
int revProm = 0;
int LEMProm = 0;
int PWMProm = 0; // proměnná pro analogovou hodnotu PWM

void setup() {
  TCCR0B = TCCR0B & B11111000 | B00000010; // PWM frequency of 7812.50 Hz
  // nastavení PWM jako výstup
  pinMode(PWMPin, OUTPUT);
  // nastavení potenciometru a reverzace jako vstup
  pinMode(potPin, INPUT);
  pinMode(revPin, INPUT);
  // nastavení čidla LEM jako vstup
  pinMode(LEMPin, INPUT);
  // nastavení komunikace přes sériovou linku s rychlostí 9600 bps
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  // načtení analogové hodnoty senzoru a uložení do proměnné
  potProm = analogRead(potPin);
  revProm = analogRead(revPin);
  LEMProm = analogRead(LEMPin);
  // přepočítání hodnot z potenciometru na PWM
  if(revProm >= 800){ //5V...1023; 4V...818
    PWMProm = map(potProm, 0, 1023, 127, 60); //zpátečka;
  }
  else if(revProm < 800){
    //dopředný ohyb; s = 1 při 255 kvůli bootstrap zapojení snížení na s ≈ 0,96 při 250
    PWMProm = map(potProm, 0, 1023, 127, 250);
  }
  analogWrite(PWMPin, PWMProm);
  delay (200);
}
```