

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Regulace elektrického pohonu dětské čtyřkolky

Originál (kopie) zadání BP/DP

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je návrh nového měniče u dětské čtyřkolky za použití simulačního modelu MATLAB. Navržený nový měnič by měl zajistit zvýšení motorizace a navýšení funkcí u dětské čtyřkolky.

Klíčová slova

Stejnoseměrný motor, PI regulátor, Matlab, PCB

Abstract

The aim of this bachelor's thesis is to design a new converter for a children's quadricycle, using the MATLAB simulation model. The proposed new converter should increase the motorization and increase the functions of the children's quadricycles.

Key words

DC motor, PI controller, Matlab, PCB

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, které jsou součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 17.6.2020

Richard Roztočil

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinovi Jandovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení při zpracování této bakalářské práce.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
1. ÚVOD	10
2. STEJNOSMĚRNÝ MOTOR	11
2.1. KONSTRUKCE STATORU.....	12
2.2. KONSTRUKCE ROTORU.....	13
2.3. PRINCIP A KONSTRUKCE KOMUTÁTORU.....	13
2.4. PARAMETRY MOTORU.....	13
3. ZJIŠTĚNÍ PARAMETRŮ PRO NÁHRADNÍ SCHÉMA DC MOTORU	14
3.1. POPIS NÁHRADNÍHO OBVODU MOTORU ZY1020.....	14
3.2. ZMĚŘENÍ ODPORU VINUTÍ.....	16
3.3. URČENÍ INDUKČNOSTI VINUTÍ.....	17
4. SESTAVENÍ SIMULAČNÍHO MODELU ŘÍZENÍ	18
4.1. IMPLEMENTACE MODELU ŘÍZENÍ V PROSTŘEDÍ MATLAB.....	19
4.2. URČENÍ SPÍNACÍ FREKVENCE.....	22
4.3. VÝBĚR ŘÍDÍCÍHO MIKROKONTROLERU.....	23
4.4. URČENÍ PARAMETRŮ PI REGULÁTORU.....	24
5. MĚNIČ PRO MOTOR A JEHO PARAMETRY	27
5.1. NAPÁJECÍ ČÁSTI MĚNIČE.....	27
5.2. VÝKONOVÁ ČÁST MĚNIČE.....	28
5.3. ŘÍDÍCÍ ČÁST MĚNIČE.....	30
5.4. SESTAVENÍ TESTOVACÍHO SOFTWARE PRO ŘÍDÍCÍ MIKROKONTROLER.....	30
5.5. KOREKCE PI SLOŽEK REGULÁTORU.....	31
5.6. NÁVRH DPS V PROSTŘEDÍ EAGLE.....	31
6. ZÁVĚR	34
6. SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	36
7. PŘÍLOHY	I

OBRÁZEK 1 FOTOGRAFIE DĚTSKÉ ELEKTRICKÉ ČTYŘKOLKY	11
OBRÁZEK 2 ZÁKLADNÍ ČÁSTI STEJNOSMĚRNÉHO STROJE	12
OBRÁZEK 3. NÁHRADNÍ SCHÉMA MOTORU	14
OBRÁZEK 4 UMÍSTĚNÍ MOTORU V MĚŘÍCÍM PŘÍPRAVKU	14
OBRÁZEK 5 NÁHRADNÍ SCHÉMA MOTORU S MĚŘÍCÍM APARÁTEM	15
OBRÁZEK 6 ŠTÍTEK MOTORU	15
OBRÁZEK 7 GRAF ZMĚŘENÉHO ODPORU S LINEÁRNÍM PROLOŽENÍM	16
OBRÁZEK 8 GRAF PRŮBĚHŮ PROUDŮ	18
OBRÁZEK 9 PRŮBĚH ČASOVAČE V MIKROKONTROLERU	19
OBRÁZEK 10 SIMULOVANÝ PRŮBĚH V MIKROKONTROLERU	20
OBRÁZEK 11 PRŮBĚH SIMULOVANÉHO NAPĚTÍ NA MOTORU	21
OBRÁZEK 12 ZVLNĚNÍ SIMULOVANÉHO PROUDU	22
OBRÁZEK 13 PRŮBĚH SIMULOVANÉHO I_s PROUDU NA POŽADAVEK I_w	25
OBRÁZEK 14 HODNOTA $K_R = 0.003$	26
OBRÁZEK 15 HODNOTA $K_R = 0.3$	27
OBRÁZEK 16 BLOKOVÉ SCHÉMA NAPÁJECÍ SOUSTAVY	28
OBRÁZEK 17 ZAPOJENÍ PŮL MŮSTKU	29
OBRÁZEK 18 ŘÍZENÍ S RS485	32
OBRÁZEK 19 ROZHRAŇÍ KONCOVÝCH PRVKŮ	33
OBRÁZEK 20 ROZLOŽENÝ PROTOTYP MĚNIČE	35
PŘÍLOHA 1 ŘÍZENÍ S KOMUNIKAČNÍM ROZHRAŇÍM	I
PŘÍLOHA 2 ROZHRAŇÍ PRO PERIFERIE	II
PŘÍLOHA 3 PROGRAM ZJEDNODUŠENÉHO SIMULAČNÍHO MODELU	III
TABULKA 1 MĚŘENÍ ODPORU VINUTÍ	16

Seznam symbolů a zkratk

DC	Stejnosměrný motor
PWM	Pulsně šířková modulace
DPS	Deska plošných spojů
IO	Integrovaný obvod
ADC.....	Analog to Digital Converter
U_i	Indukované napětí
PCB.....	Printed Circuit Board

1. Úvod

Doba se vyvíjí, o tom nemůže být pochyb ani v oblasti čtyřkolek. Nárůstu oblíbenosti u čtyřkolek se ani nemůžeme divit. Motorová vozidla mají v České republice obecně velkou tradici a ve svých začátcích vzešly z motorek. Zásadní rozdíl je v tom, že zatímco motorka půl roku stojí v garáži, se čtyřkolkou můžete jezdit, ať je červen nebo leden. Jelikož je stále více „in“ dát dětem vše, co si užíváme sami, nástup dětských čtyřkolek byl jasný a jejich vývoj přirozený.

Zde však historie dokládá, že první dětská čtyřkolka byla vymyšlena před 1. světovou válkou. Důvod vzniku čtyřkolek dala žena francouzského konstruktéra Charlese Mocheta. Ta si myslela, že obyčejné kolo je pro jejich syna nebezpečné, a tak mu otec postavil čtyřkolé vozidlo.

A jelikož i já jsem otcem dvou malých dcer, tak se cílem mé práce stala úprava a posílení pohonné jednotky dětské čtyřkolky. Stávající řešení se stejnosměrným motorem o výkonu 800W již není dostatečné pro provoz na nezpevněném povrchu. Elektrická energie je poskytnuta trojicí 12V/ 14Ah olověných akumulátorů zapojených sériově.

Akumulátorová sestava o nominální hodnotě 36 V je připojena k motoru přes snižující měnič napětí bez možnosti omezení výkonu. Reverzní chod je realizován silovým křížovým přepínačem na přívodu k stejnosměrnému motoru. Nový měnič bude umožňovat jednoduché nastavení maximálního výkonu a reverzaci chodu stejnosměrného motoru bez použití silového přepínače. Změna měniče umožní připojení nového motoru o výkonu 1000W. Měnič se bude skládat ze dvou PCB. Hlavní PCB bude vyhrazena pro samotný měnič a řídicí mikrokontroler. Druhá deska bude obsluhovat periferie jako je klakson, světla a bezpečnostní prvky. Tato kombinace otevírá další možnosti, například hlídání napětí akumulátoru a možnosti odepínání světel při delší nečinnosti motoru.

Práce je rozdělena do třech hlavních částí. První část je zaměřena na zjištění potřebných hodnot reálného nového pohonu. Změřené parametry použijeme pro sestavení zjednodušeného simulačního modelu ve druhé části. Třetí část je zaměřena na návrh obvodových schémat a PCB.



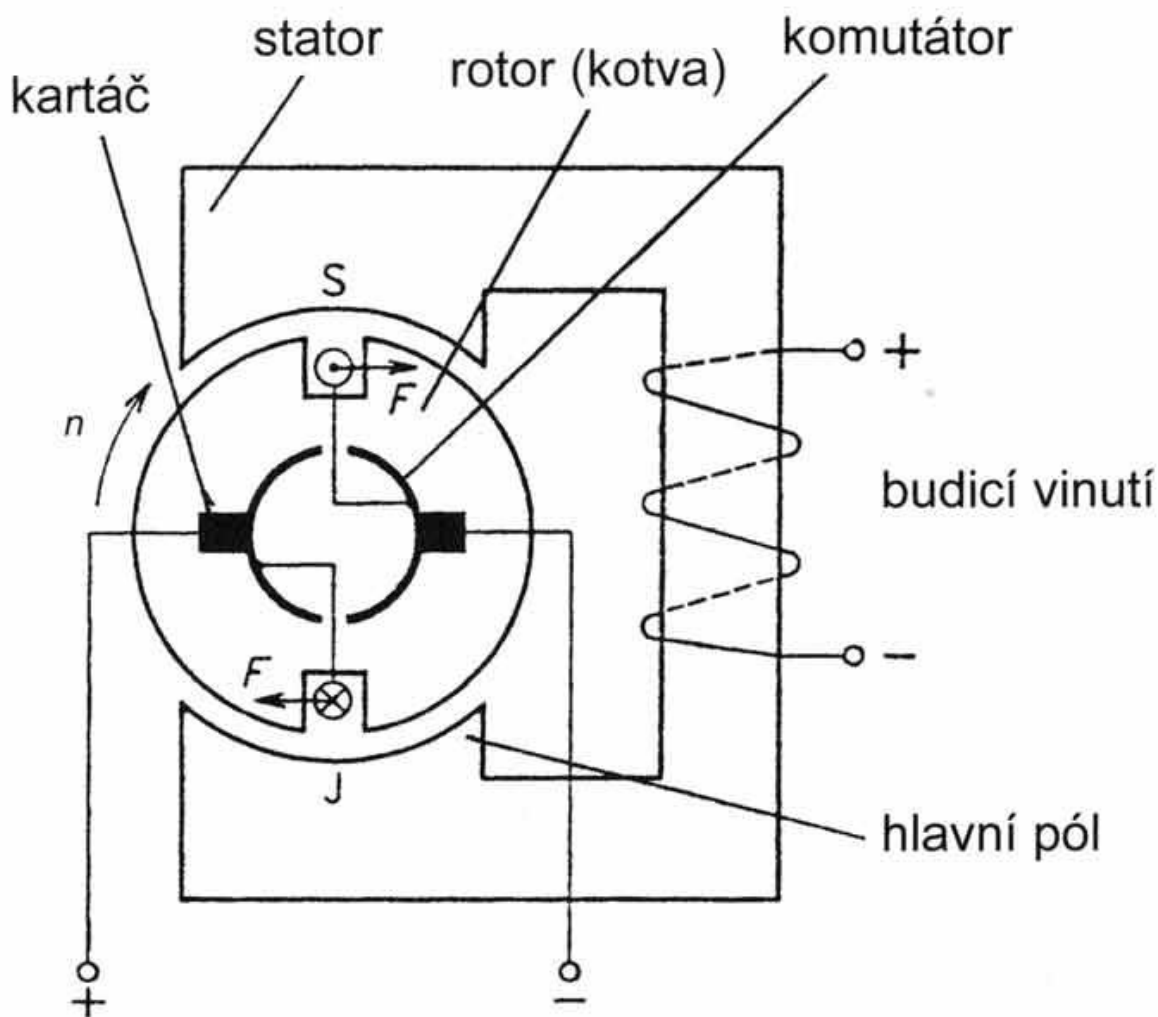
Obrázek 1 Fotografie dětské elektrické čtyřkolky

2. Stejnsměrný motor

Stejnsměrné stroje nejčastěji pracují jako motory, vzhledem k jednoduché regulaci výkonu nebo otáček. Pro dobré trakční vlastnosti se stejnsměrné motory se sériovým buzením se dosud používají v dopravě jako trakční motory lokomotiv, tramvají atd., i když jsou postupně nahrazovány řízenými střídavými motory, které jsou z několika důvodů mnohdy výhodnější. Stejnsměrné stroje se vyrábějí od zlomků wattů do výkonu až několika MW. Nejvážnější nevýhodou stejnsměrných strojů je problém komutace. Komutátor je navíc nejvíce namáhanou a technologicky nejsložitější částí stroje.¹

Stejnsměrný stroj se skládá ze třech hlavních částí: stator, rotor a komutátor. Stator je zdrojem konstantního magnetického pole. Rotor je pohyblivou částí stroje a představuje zdroj točivého momentu. Elektrický proud je do rotoru přiveden přes třetí část, která se nazývá komutátor, na který doléhají kartáče. Ten může mít více funkcí podle způsobu využití stejnsměrného stroje. Pokud je stejnsměrný stroj používán jako motor, má komutátor funkci mechanického střídače napětí. Při použití stejnsměrného stroje v generické oblasti komutátor představuje mechanický usměrňovač. Stejnsměrné motory dělíme podle způsobu zapojení budícího vinutí na: sériové, paralelní, cizí nebo ve speciálních případech kompaundní buzení.

¹ (Doc. Ing. Voženílek, 2007) [8]



Obrázek 2 Základní části stejnosměrného stroje [8]

2.1. Konstrukce statoru

Stator ve stejnosměrném stroji plní funkci zdroje magnetického pole. Konstrukce statoru se liší na základě použití stroje. Hlavním rozhodovacím faktorem je požadavek na momentovou charakteristiku. Zapojením statorového vinutí sériově k rotoru získáme charakteristiku vhodnou pro pohony, jelikož při rozbíhání získáváme maximální moment. Zapojením paralelně ke kotvě získáme charakteristiku vhodnou pro dynam. Pro jednodušší konstrukci statorové části je možné použít cizí buzení, například v podobě permanentních magnetů. Vzhledem k statickému magnetickému poli je možné udělat stator z jednoho bloku železa, jelikož zde teče jen stejnosměrný proud a nemusíme zde uvažovat hysterezní ztráty a vířivé proudy, které vznikají při časové změně tekoucího proudu obvodem vinutí.

2.2. Konstrukce rotoru

Rotor jako zdroj mechanického momentu je namáhán jak elektricky, mechanicky tak i tepelně. Jmenovitý proud motoru teče přes toto vinutí a zde je kladen důraz na izolaci vinutí vzhledem k možnosti elektrického průrazu. Vinutí musí být i mechanicky odolné, jelikož velké odstředivé síly jsou součástí rotující hmoty a působí na vinutí. Vinutím v rotoru teče časově proměnný proud, a proto musí být vzhledem k lepší účinnosti celého točivého stroje tato část složená z plechů s velkým obsahem křemíku. Tím dojde k eliminaci vířivých proudů a hysterezních ztrát v obvodu. Vzhledem k proměnnému proudu a proměnné poloze není vhodné používat orientované plechy jako u transformátoru.

2.3. Princip a konstrukce komutátoru

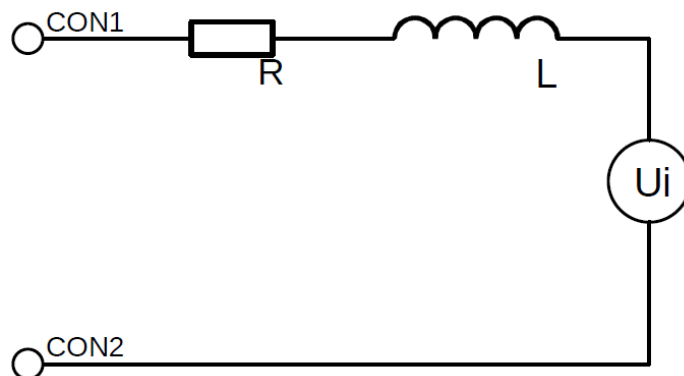
Při provozu stejnosměrného stroje v motorické oblasti plní komutátor funkci mechanického střídače napětí. Při generickém provozu plní komutátor funkci mechanického usměrňovače. Konstrukce komutátoru se skládá většinou z měděných lamel, po kterých kloužou kartáče. Pro menší výkony se používají uhlíkové kartáče. U velkých stejnosměrných strojů je použito více sad kartáčů, z otěru odolné slitiny, pro eliminaci vybroušení drážek a pro vyšší mechanickou životnost. To ovšem vede k nárůstu délky komutátoru a potažmo celého stroje. Tento nárůst může být nevhodný například v elektrických lokomotivách, kde je limitující rozchod kolejnic (1435 mm).

2.4. Parametry motoru

Nejdůležitější parametr pro řízení výkonu motoru vychází z rovnice pro určení mechanického momentu. Kde k je konstanta motoru, Φ magnetický tok, který vzhledem k statorovému buzení magnetického obvodu je také konstantní. Jako poslední parametr je zde proud tekoucí motorem, tato práce je zaměřena právě na regulaci proudu motorem. Efektivní řešení regulace proudu, je PWM regulací.

$$M_i = k * \Phi * I \quad (2.4.1)$$

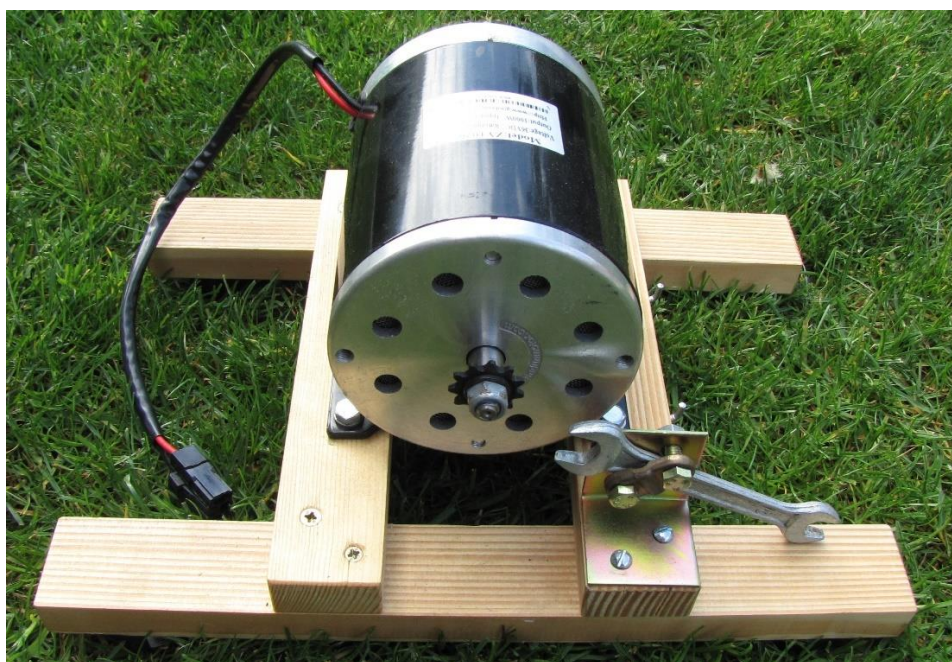
Na obrázek 3. je náhradní schéma motoru vzhledem k vstupním svorkám stroje, v tomto zjednodušeném náhradním obvodu.



obrázek 3. Náhradní schéma motoru

3. Zjištění parametrů pro náhradní schéma DC motoru

V následující kapitole bude popsán náhradní obvod stejnosměrného motoru (Obrázek 4), ze kterého budou odvozeny parametry (ohmický odpor vinutí a indukčnost) potřebné pro sestavení zjednodušeného simulačního modelu. Následně budou výše uvedené parametry využity pro určení spínací frekvence.

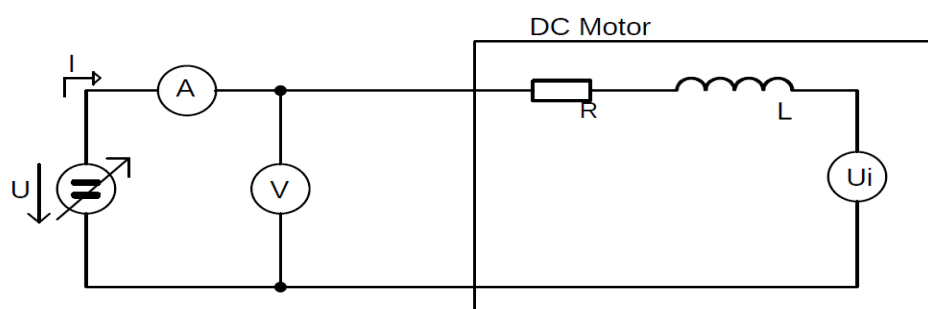


Obrázek 4 Umístění motoru v měřicím přípravku

3.1. Popis náhradního obvodu motoru ZY1020

Použitý motor ZY1020 představuje stejnosměrný motor s cizím buzením. Cizí buzení je realizováno formou permanentních magnetů v obvodu statoru. Z tohoto důvodu nebude

budící vinutí stroje zahrnuto do zjednodušeného náhradního obvodu stroje. Základní parametry stejnosměrného motoru pro určení spínací frekvence PWM (Pulse Width Modulation), proporcionální a integrační složky PI regulátoru vychází z náhradního schématu pro popis DC motoru (Obrázek 5). V tomto obrázku je zahrnuto i měření pro určení stejnosměrného sériového odporu a indukčnosti vinutí. Při měření bude zanedbán odpor na komutátoru. Pro potlačení chyby měření způsobené indukovaným napětím bude motor mechanicky zablokovaný proti otáčení.



Obrázek 5 Náhradní schéma motoru s měřícím aparátem

K sestavení zjednodušeného simulačního modelu je potřeba doplnit naměřené hodnoty o údaje ze štítku stroje. Především nás zajímají jmenovitě hodnoty napětí a proudu. Tyto hodnoty jsou důležité k izolaci vinutí, aby nedošlo k elektrickému průrazu či nadproudovému přetížení motoru. Používání motoru v přetíženém stavu by vedlo k poškození izolace či opálení komutátoru. Tato poškození by jistě vedla ke zničení celého stejnosměrného stroje. Nominální hodnota napětí 36V a proudu 27.8A je čitelná ze štítku na Obrázek 6.



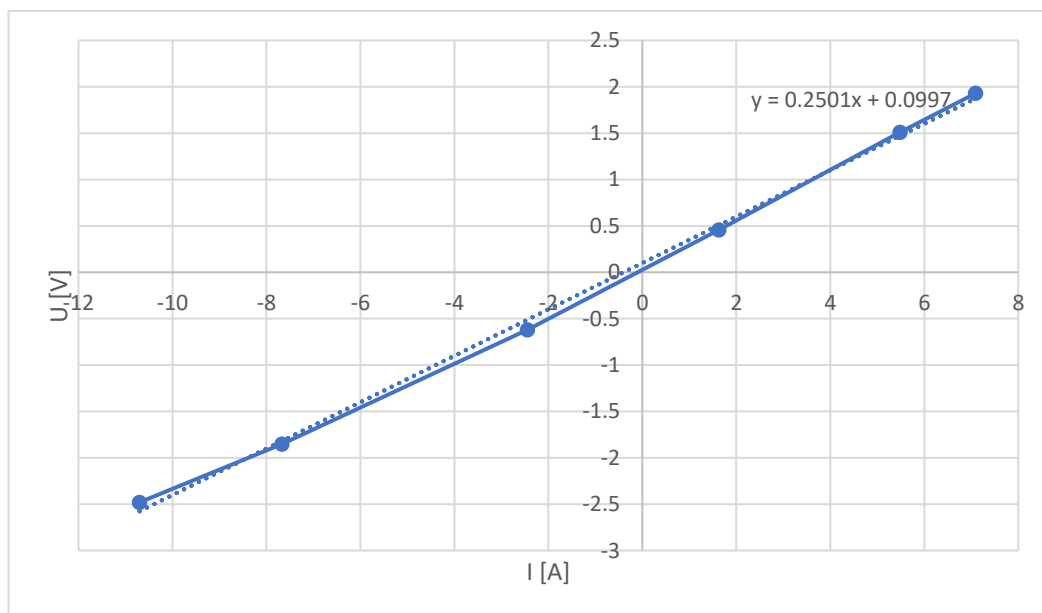
Obrázek 6 Štítek motoru

3.2. Změření odporu vinutí

Ohmickou hodnotu vinutí stejnosměrného stroje předpokládáme malou. Z tohoto předpokladu musí vycházet metoda pro měření. V náhradním schématu (Obrázek 5) je k motoru připojena měřící aparatura v podobě voltmetru, ampérmetru a regulovatelného laboratorního zdroje. Celé zapojení vychází z Ohmovy metody pro měření malých odporů. Jejím cílem je co nejpřesnější změření hodnoty odporu díky eliminaci vlivu samotných měřících přístrojů. Z náhradního schématu je dále patrné sériové zapojení zdroje indukovaného napětí U_i . Tento zdroj je vyřazen mechanickým zablokováním rotoru, díky tomu nedochází ke změnám v magnetickém toku, které by způsobovaly vznik indukovaného napětí. Z původního předpokladu o malém odporu, byl zvolen proud v jednotkách ampér. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 1

U [V]	I [A]	R [Ω]
1.93	7.096	0.271984
1.51	5.487	0.275196
0.458	1.628	0.281327
-0.621	-2.445	0.253988
-1.85	-7.666	0.241325
-2.48	-10.701	0.231754

Tabulka 1 Měření odporu vinutí



Obrázek 7 Graf změřeného odporu s lineárním proložením

Předpoklad v stejnosměrném obvodu je konstantní hodnota rezistoru dle Ohmova zákona.

$$R = \frac{U}{I} \quad (3.2.1)$$

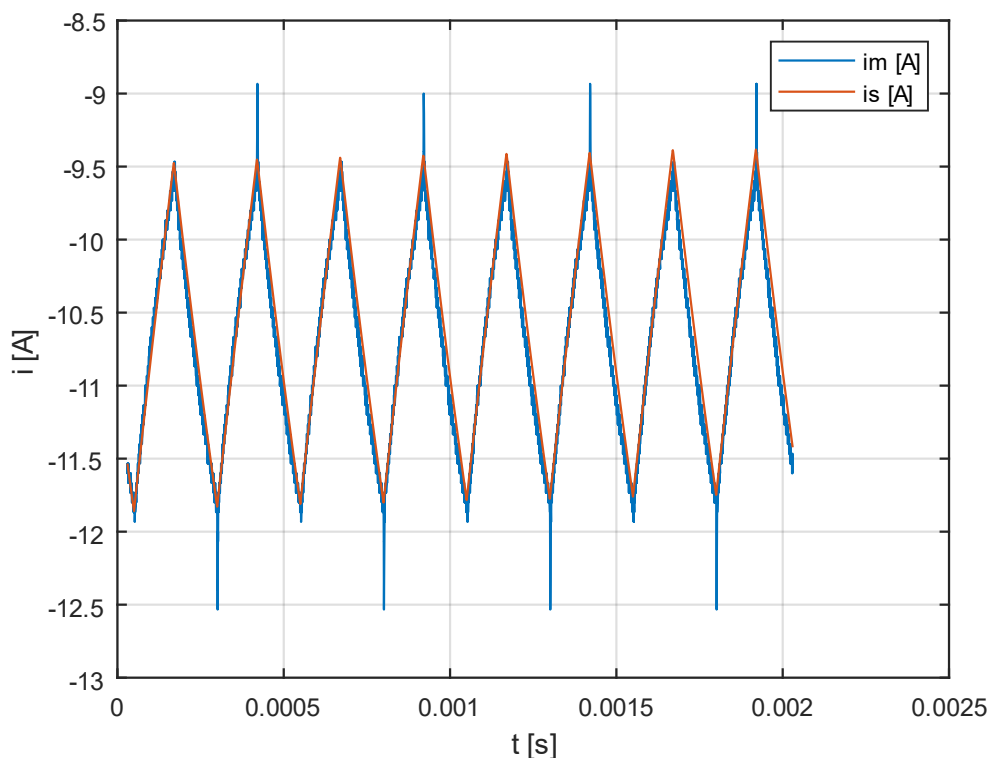
Výsledný odpor je spočten aritmetickým průměrem spočteného odporu vinutí, který pro větší přesnost porovnáme i se směrnici přímky, kterou proložíme graf. Výsledná hodnota, která bude dále použita pro výpočty: $R = 0,25 \Omega$.

3.3. Určení indukčnosti vinutí

Ke stanovení indukčnosti stejnosměrného motoru byla použita metoda využívající napěťového zdroje pulzů a SW Matlab. Proud tekoucí do motoru z napěťového zdroje byl snímán proudovou sondou. Naměřené hodnoty byly následně zpracovány v prostředí Matlab a zakresleny do grafu. Hodnota spínací frekvence musí být zvolena tak, aby byl patrný exponenciální průběh, a to z důvodu zachování přechodového děje při nabíjení indukčnosti. Z náhradního schématu byla (Obrázek 5) stanovena analýzou obvodu diferenciální rovnice prvního řádu, kde R je statický odpor vinutí a L je indukčnost vinutí, tyto parametry byly změřeny v předchozích odstavcích.

$$u = R * i + L * \frac{di}{dt} - U_i \quad (3.3.1)$$

Nalezenou rovnici (3.3.1) z obvodové analýzy přepíšeme do prostředí Matlab a necháme průběh proudu vykreslit do grafu s již vykresleným reálným průběhem proudu změřeným na reálném motoru. Změnou indukčnosti v simulačním prostředí Matlab nalezneme takovou hodnotu, kdy se průběh simulovaného proudu podobá reálnému naměřenému proudu.



Obrázek 8 Graf průběhů proudů

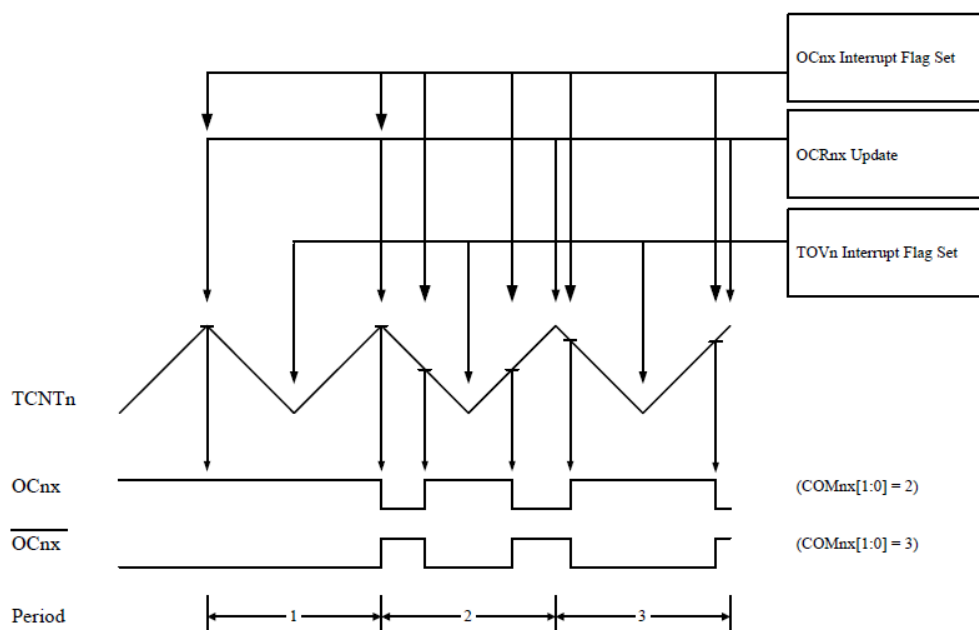
Touto srovnávací metodou určíme hodnotu indukčnosti vinutí motoru na $L = 260\mu\text{H}$. Vzhledem k tak malé indukčnosti bude kladen větší nárok na spínací frekvenci regulátoru, aby byl proud co nejvíce vyhlazen a byli jsme schopni určit hodnoty PI regulátoru, aniž by docházelo k rozkmitávání regulované soustavy.

4. Sestavení simulačního modelu řízení

V předchozích kapitolách byly nalezeny všechny potřebné parametry pro sestavení zjednodušeného simulačního modelu. V této kapitole bude sestaven zjednodušený simulační model v prostředí Matlab od společnosti MathWorks. Dále bude proveden výběr mikrokontroleru na základě určení spínací frekvence. V další části vybraný mikrokontroler použijeme k návrhu obvodových schémat řídicí i silové části snižujícího měniče napětí a bude přistoupeno k realizaci zkušebnímu programu za účelem testování simulačního modelu na reálném zařízení.

4.1. Implementace modelu řízení v prostředí MATLAB

Pro sestavení zjednodušeného simulačního modelu, byly nalezeny všechny veličiny v předchozí kapitole. Nyní bude přistoupeno k samotné implementaci. Vzhledem k hardwarovému a softwarovému zázemí pro vývoj a nahrání programu do mikrokontroleru. Také při návrhu modelu bylo přihlédnuto k preferované značce mikrokontroleru. Firma Atmel poskytuje dostatečné portfolio mikrokontrolerů vhodných pro řízení snižujícího měniče napětí, programovatelné přes rozhraní SPI. Při sestavování modelu již bylo k tomuto faktu přihlédnuto a v modelu řízení je použito chování simulujícího reálné časovače v mikrokontroleru. Obrázek 9 je převzatý obrázek z datasheetu [5], hlavní průběh TCNTn je generován jako vnitřní signál mikrokontroleru. Registr OCnx je určen pro nastavení střídy výstupního PWM signálu.

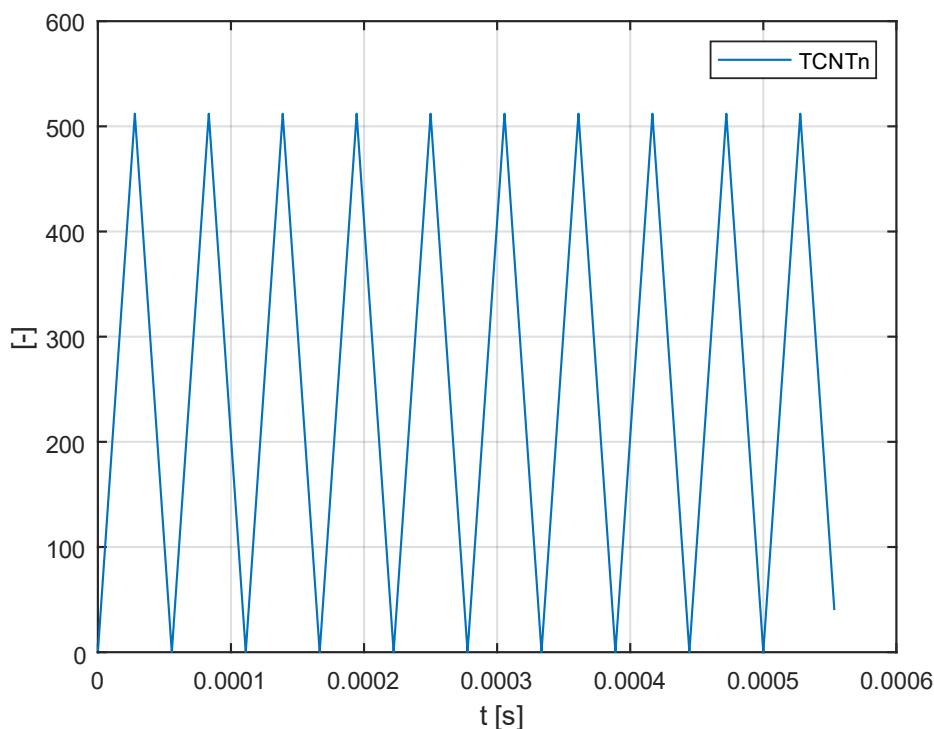


Obrázek 9 Průběh časovače v mikrokontroleru [5]

Pro implementaci zjednodušeného simulačního modelu v prostředí Matlab, je simulován průběh trojúhelníkového signálu TCNTn . Obrázek 10 zobrazuje implementovaný trojúhelníkový průběh signálu v prostředí Matlab dle následujícího skriptu.

```
pila = pila+sPila; %vypocet hodnot pro pilovy prubeh a pridani smernice
pila8 = int8(bitshift( pila , -2 )); %inkrementace promenne pila8
if (pila<=0) || (pila>=top) %kontrola pro zmenu smernice
    sPila = -sPila; %zmena smernice pily
```

V kódu je již využita proměnná „top“, která je dle [5] nastavena dle reálného zařízení na 512[-]. V dalších částech simulace se bude využívat pila8, do které se v každém průchodu ve smyčce simulace počítá nová hodnota trojúhelníkového signálu.



Obrázek 10 Simulovaný průběh v mikrokontroleru

Po změření velmi nízké indukčnosti motoru, a hardwarovým omezením 8bit mikrokontrolerů. Byla zvolena cesta dvou generovaných PWM, které se budou na svorkách motoru odčítat. Touto volbou dostaneme dvojnásobnou spínací frekvenci. Při vysoké spínací frekvenci a malé indukčnosti motoru, bude stále nízké zvlnění pracovního proudu.

Následné simulované průběhy zobrazují (Obrázek 11) předpokládané napěťové průběhy na levém a pravém půl můstku. Generování těchto napětí je výsledek porovnávání registru TCNTn s registry OCRnx. K řízení dvou půl můstků jsou použity dva registry pro porovnávání s registrem TCNTn. Komparace byla psaná pro jednodušší implementaci přímo do mikrokontroleru dle následující ukázky kódu. Kde jako první porovnáme hodnotu uloženou v registru OCR0A s aktuální hodnotou uloženou v proměnné pila8. Označení PWM_L vychází z pohledu na schéma zapojení dle přílohy 1. Výpočet aktuální hodnoty pro PWM_P je analogický. Proměnná U_{motor} je předpokládané rozdílové napětí na motoru.

```

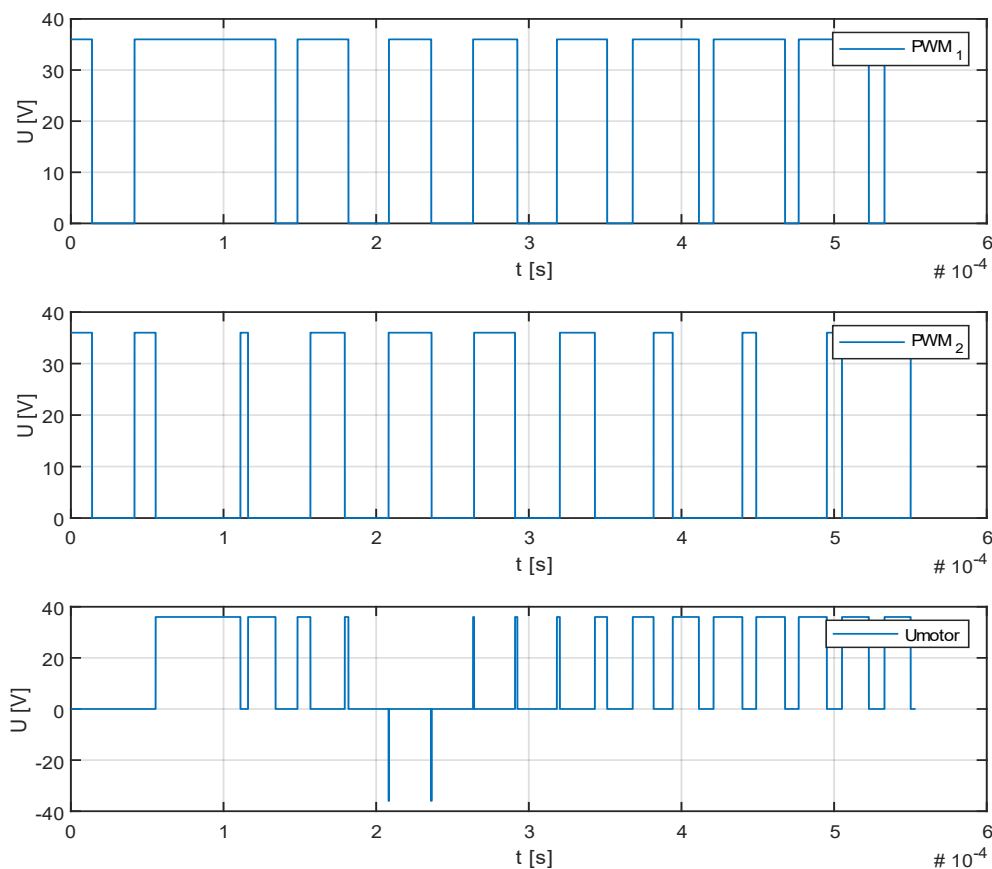
%PWM_L_polomost
if url1 > pila8 %registr OCR0A str.135
    U10 = Ucc;
else
    U10 = -Ucc;
end

%PWM_P_polomost
ur2 = 128-url1; %ridici U z reg.prepocteno no druhou PWM
if ur2 > pila8 %registr OCR0B str.135
    U20 = Ucc; %ridici napeti pro IR2104
else
    U20 = -Ucc;
end

Umotor = U10-U20 %prubeh napeti na zatezi

```

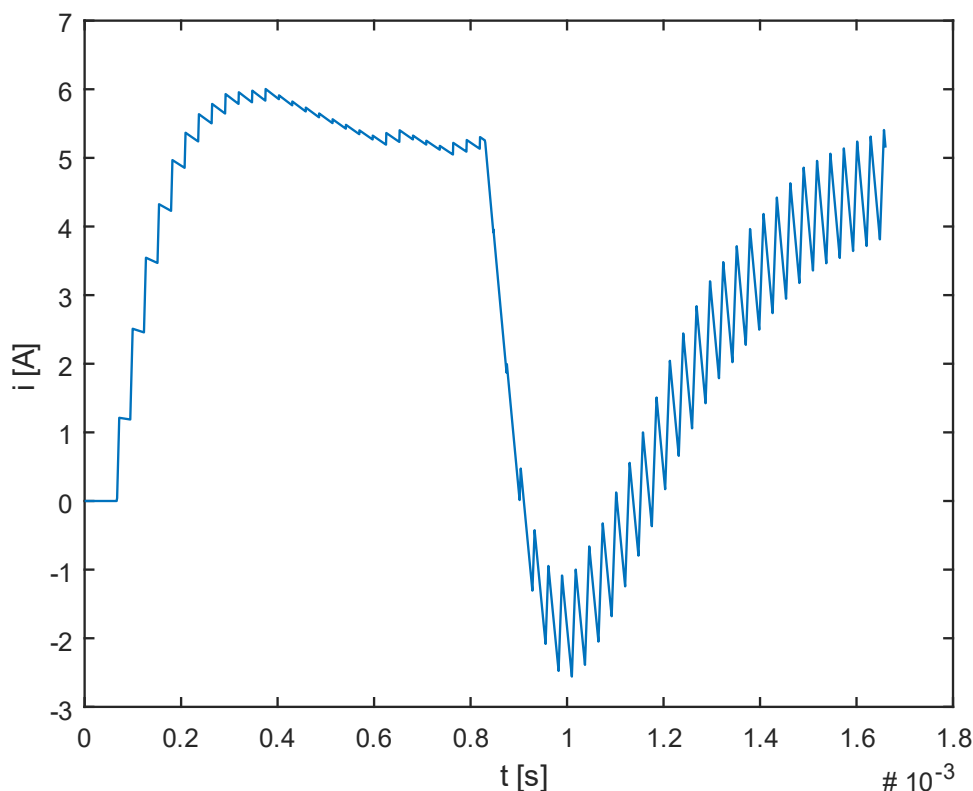
V simulaci již byl zahrnut PI regulátor. Ve třetí části je vidět průběh napětí U_{motor} , tento průběh je matematický rozdíl napětí na jednotlivých silových půl můstcích, který je možné měřit na svorkách motoru s galvanicky odděleným osciloskopem. Vzhledem k již implementované PI regulaci je vidět na tomto obrázku 11, napěťový překmit k – 36V, tento překmit je z důvodu dosažení požadované hodnoty proudu.



Obrázek 11 Průběh simulovaného napětí na motoru

4.2. Určení spínací frekvence

Pro dokonale vyhlazený pracovní proud by se spínací frekvence blížila k nekonečnu. Z principu spínaného snižujícího měniče napětí je tento požadavek nerealizovatelný. Proto zavádíme parametr, kterým bude určeno maximální zvlnění proudu tekoucího motorem. S ohledem na nominální hodnotu pracovního proudu motoru bude zvolena dovolená odchylka od požadovaného proudu $\pm 0.8A$. Zavedením dovolené odchylky je již možné určit spínací frekvenci. Na Obrázek 12 je zaznamenán průběh simulovaného proudu se zvlněním do $\pm 0.8A$ při spínací frekvenci 18kHz jednoho půl můstku. Výsledná spínací frekvence, jak již bylo zmíněno v kapitole 4.1 je dvojnásobná tedy 36kHz. Výsledná spínací frekvence, byla určována postupně pro získání zvlnění proudu pod stanovenou mez $\pm 0.8A$.



Obrázek 12 Zvlnění simulovaného proudu

Určení spínací frekvence vychází ze vztahu, který je uveden v typovém listu mikrokontroleru dle rovnice (4.2.1). Kde N je číslo nastavené děličky kmitočtu. Opět experimentem byl hledán takový dělicí poměr, abychom se dostali do oblasti typizovaných krystalů. S dělicím poměr $N = 2$, nám vzniknul nárok na externí krystal v nominální hodnotě

18.432MHz. Nominální hodnota je vhodná i pro dělicí poměry vzhledem k definovaným rychlostem komunikačního standardu UART.

$$f_{clk\ 10} = \frac{N * 510}{f_{ocnxPCPWM}} \quad (4.2.1)$$

4.3. Výběr řídicího mikrokontroleru

Nároky na řídicí kontrolér jsou stanoveny v předchozích odstavcích. Jedním z důležitých parametrů bude maximální taktovací frekvence, rozlišení ADC převodníku a v neposlední řadě i počet vstupů a výstupů. Vzhledem k budoucím možnostem zařazení k nadřazenému řídicímu systému bude kladen i požadavek na integrované komunikační rozhraní UART a IIC.

Při realizaci PI regulátoru, možnosti pro nastavování různých proměnných a budoucí možnosti komunikace s nadřazeným systémem je kladen i nárok na vestavěnou plně elektronicky řízenou paměť typu EEPROM o minimální hodnotě 256byte.

Rodina ATMEGA společnosti Atmel poskytuje dostatečnou variabilitu i v oblasti paměti určenou pro programový běh. Například mikrokontroler ATMEGA48 se vyrábí ve třech provedeních s 4kB, 8kB a 16kB EEPROM. Přejít mezi ATMEGA 48 a ATMEGA 88 je bez zásahu do programu, stačí jen zkompilovat pro nový typ. Přejít na největší paměť v této řadě již vyžaduje úpravy programu v podobě změny vektorů přerušení.

Vybraný mikrokontroler řady ATMEGA88 s taktováním až do 20MHz disponuje dostatečným počtem vstupních / výstupních portů. Především je vhodná přímá integrace ADC převodníku, hardwarové výstupy až s šesti PWM signály předurčují tento typ mikrokontroleru pro motorové měniče. Zmíněný mikrokontroler obsahuje další hardwarově implementované funkcionality. Z těchto rozšíření bych vyzdvihl sériové komunikační rozhraní s podporovaným protokolem UART (universal asynchronous receiver/transmitter). Komunikace UART je asynchronní, tedy komunikace není synchronizována hodinovým signálem. Tato vlastnost vyžaduje dodržování přesné přenosové rychlosti. Přenosové rychlosti jsou standardizované a pro zamýšlené použití byla vybrána přenosová rychlost 115200Bd. Při určené taktovací frekvenci 18.432MHz bude nulová odchylka od přenosové rychlosti při použití hardwarových děliček frekvence.

4.4. Určení parametrů PI regulátoru

Parametry regulátoru vycházejí ze zjednodušeného simulačního modelu řízení. Ze kterého vyplývá hodnota pro proporcionální složku regulátoru a integrační složku regulátoru. Hodnoty pro zesílení a časovou konstantu byly v prvním kroku odhadovány a určovány ze zvlnění proudu. K tomuto odhadu sloužil implementovaný zjednodušený simulační model dle následujícího kódu.

```
e = i_w - i; %vypocet regulacni odchylky
ur = e*kr; %vypocet ridiciho napeti

if abs(ur)<1 %kontrola zda není regulator v omezeni
    uri=uri+kr*e/(Tr*f_pwm*2); %pridej integrační složku
end

ur=ur+uri;

if (ur <= -1) %omezeni na minimalni hodnotu
    ur = -1;
end
if (ur >= 1) %omezeni na maximalni hodnotu
    ur = 1;
end
```

Zvolené hodnoty zesílení v $K_r = 0.03[-]$ a časová konstanta pro integrační složku $T_r = 0.0003[s]$. V první fázi návrhu regulátoru si můžeme dovolit tento odhad. Jak již bylo zmíněno na začátku, zanedbáváme zpoždění mikrokontroleru, a proto bude nutné po sestavení zařízení tyto hodnoty upravit dle reálné situace. Zvolené parametry proporcionální a integrační složky PI regulátoru byly integrovány do vyvíjeného zjednodušeného modelu. Výsledek průběhu proudu na požadavek v podobě 5A můžete vidět na Obrázek 13, kde je i předpokládaný překmit 1A. Vzhledem k použití regulátoru se stejnosměrným motorem, je tento překmit zanedbatelný.

K dokončení zjednodušeného simulačního modelu je nutné simulovat průběh proudu, který vychází z rovnice (3.3.1). V reálném zařízení bude tento proud snímán moderním snímačem od společnosti LEM. Pro účely simulace je zde podmínka, zavedení indukovaného napětí v půlce simulovaných průběhů napětí. Tato podmínka se projevuje ve

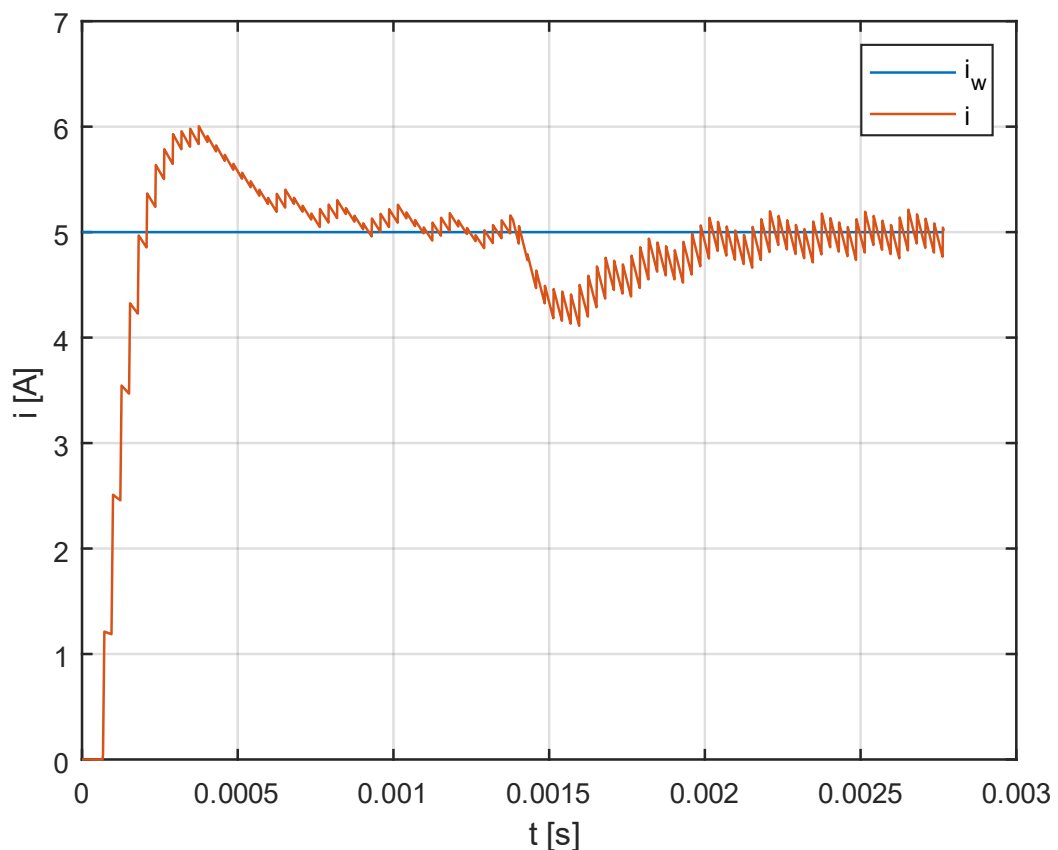
všech obrázcích s náhledem na průběh proudu, a to v podobě poklesu pracovního proudu v čase 1,5ms.

```

if t>t_sm/2 Ui=2;
end; %pro ucely simulace aby byla videt zmena v podobe indukovaneho
napeti

di = 1/L*(uz - R*i - Ui);
i=i+di*krok; %mereni z LEM obvodu na skutecnem hw

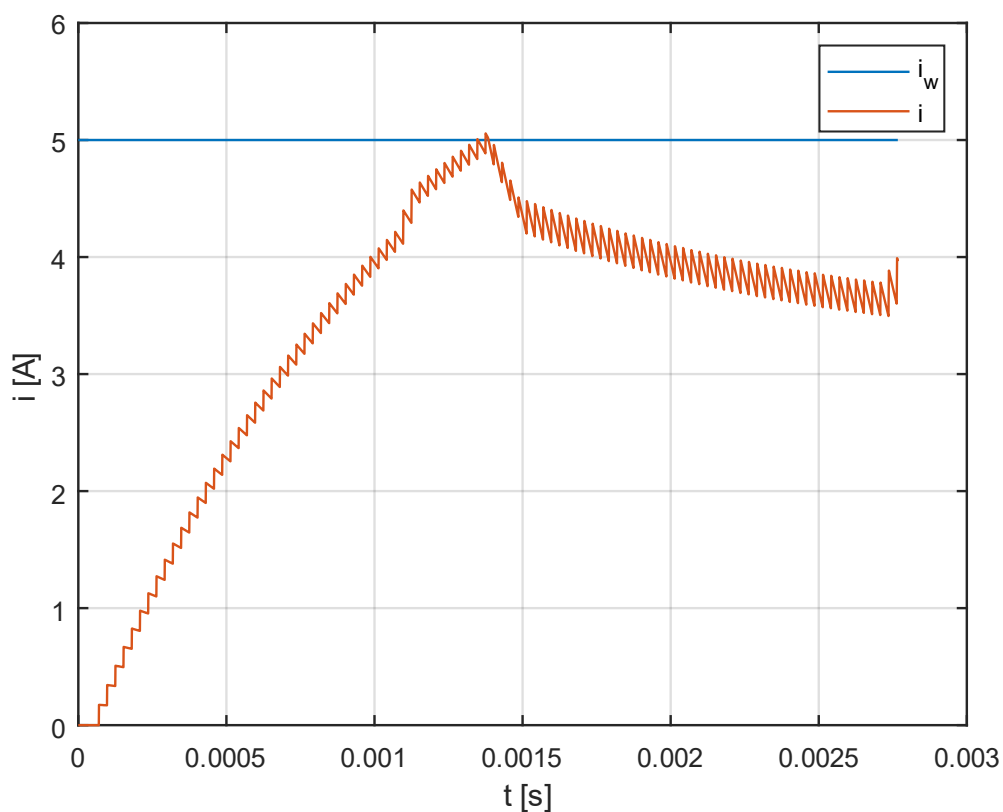
```



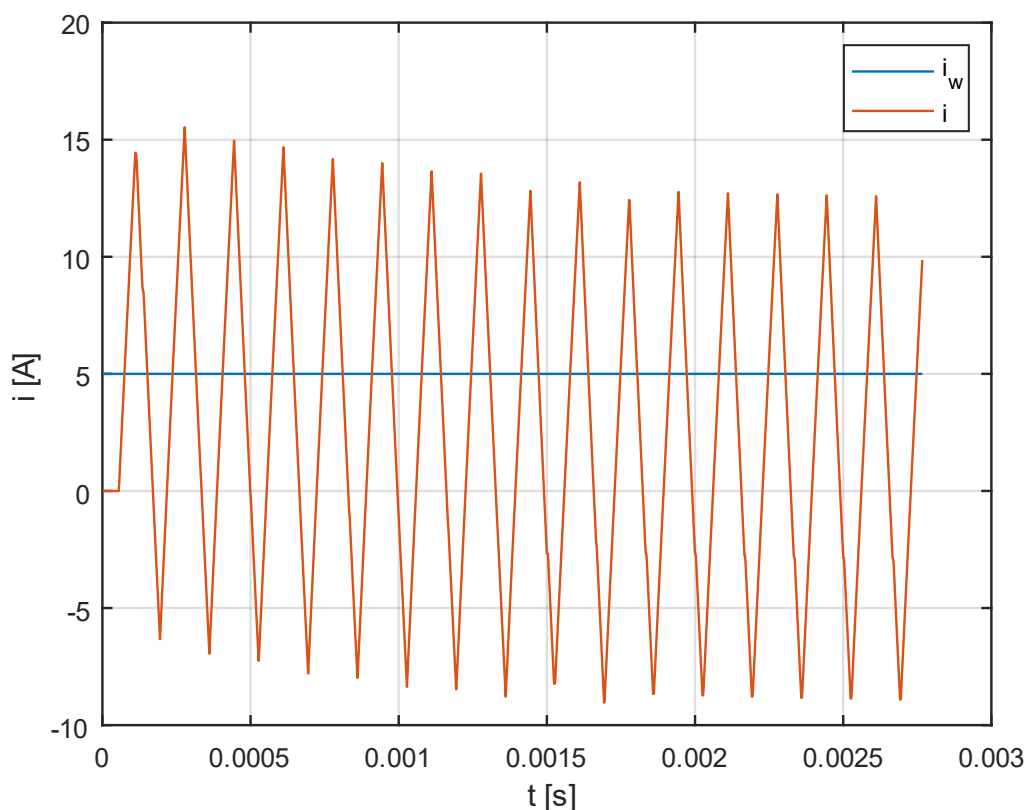
Obrázek 13 Průběh simulovaného i_s proudu na požadavek i_w

Při experimentech s nastavením vzniklo mnoho grafů, pro úplnost jsou přiloženy dva grafy s parametry pro malou proporcionální složku $K_r = 0.003[-]$ Obrázek 14, tak i hodnoty relativně vysoké $K_r = 0.3[-]$ Obrázek 15. Jak je vidět z těchto obrázků, že při příliš vysokém zesílení dochází k rozkmitání regulátoru. Tento jev je silně nežádoucí, jelikož by to vedlo k prudkým změnám polarity na svorkách motoru. Zcela jistě by se tento motor netočil, ale

jen „trhal“ s výstupní hřídelí, která slouží jako zdroj mechanického momentu pro pohon čtyřkolky. Naopak při malém zesílení skoro nestačí regulátoru simulační čas pro nastavení požadované hodnoty. Tento stav má výhodu, jak je vidět na Obrázek 14 v tom, že nedochází k překmitu požadovaného proudu. Ovšem tento regulátor je velmi pomalý a pro zadání nepraktický. Nejvěrněji nám představu o průběhu proudu motor zprostředkovává Obrázek 13. Tedy při proporcionální složce regulátoru $K_r = 0.03 [-]$ a integrační složce $T_r = 0.0003[s]$. Tyto hodnoty budou implementovány pro první testy ve vybraném 8bitovém mikrokontroleru.



Obrázek 14 Hodnota $K_r = 0.003$

Obrázek 15 Hodnota $K_r = 0.3$

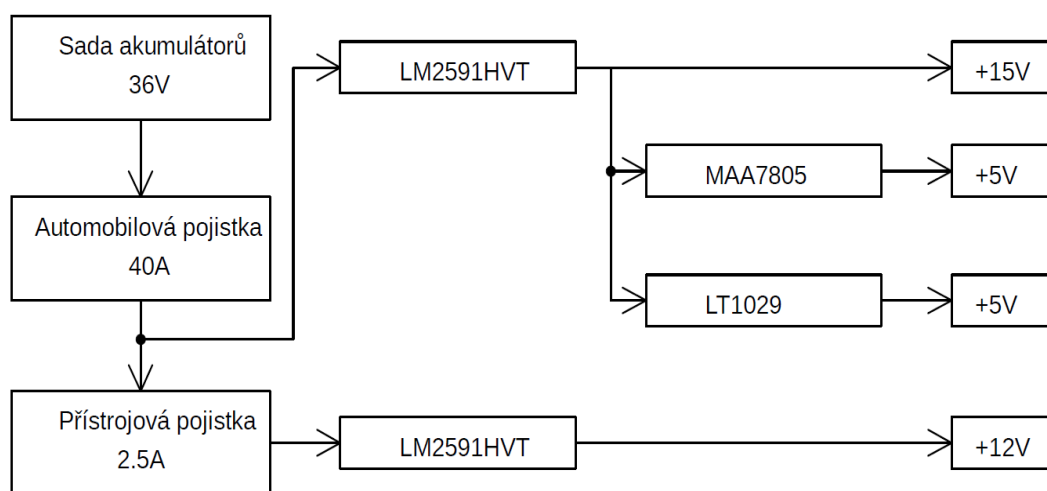
5. Měnič pro motor a jeho parametry

V této části se již přesuneme z teoretické roviny do reálného návrhu měniče napětí. Navrhne základní části měniče jako jsou zdroje, řídicí obvody a výkonové obvody. Bude zároveň vytvářen testovací software pro kontrolu měřených veličin mikrokontrolerem a pro korekci proporcionální a časové složky PI regulátoru. Kapitola bude uzavřena s návrhem DPS pro snižující měnič napětí.

5.1. Napájecí části měniče

O zdroj energie se stará trojice sériově zapojených 12V akumulátorů. Tato kombinace přináší větší nároky na napájecí část. Při maximálním napětí na olověný článek 2.45V, dosáhne napětí při plně nabitých akumulátorech (18 olověných článků) k hodnotě necelých 45V. Toto napětí již nemůže být efektivně snižováno s lineární stabilizátorem. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno ke kaskádnímu snižování napětí. První snižující pulsní měnič poskytuje stabilizovaných 15V / 3A. Stabilizované napájecí napětí pro mikrokontroler a jeho periferie se stará monolitický lineární stabilizátor typu MAA7805. Deska s rozhráním pro

čtyřkolku, disponuje vlastní stabilizací napětí. Zmíněný zdroj napětí je možné vypínat / zapínat přímo z řídicího mikrokontroleru. Tuto vlastnost můžeme využít pro odpojení periférií při nečinnosti stroje. Tato úprava povede k šetření energie, a především k základní ochraně proti hlubokému vybití napájecích akumulátorů. Což by zcela jistě vedlo ke zničení akumulátorů. Ochranu proti zkratu či nadproudu poskytuje jedna automobilová nožová pojistka o nominální hodnotě 40A. Tato pojistka bude zachována pro silové obvody v nově navrhovaném měniči. Periferie v nově navrhovaném měniči budou jištěny přístrojovou trubičkovou pojistkou o nominální hodnotě 2.5A.



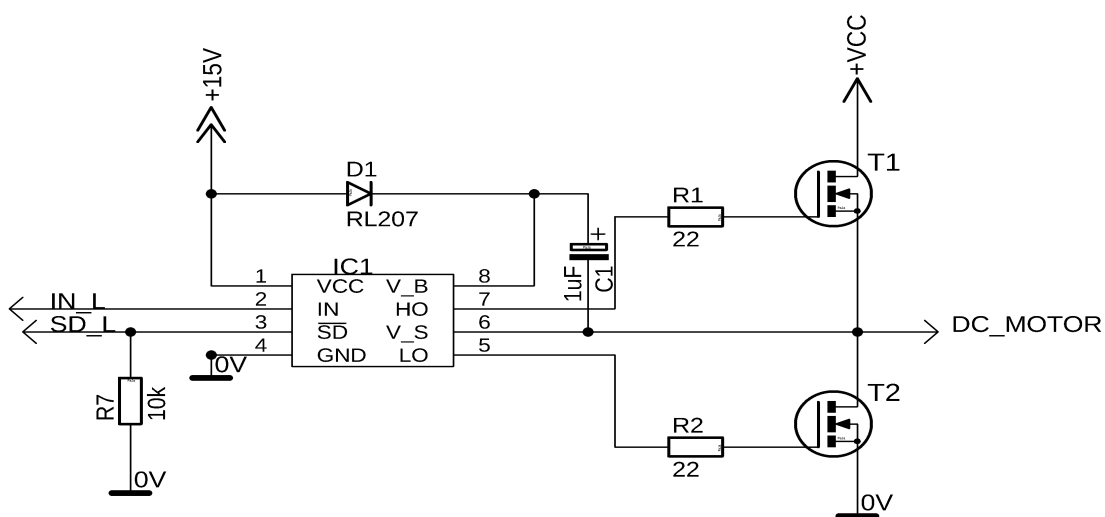
Obrázek 16 Blokové schéma napájecí soustavy

Napěťové úrovně +15V, +5V a +5V (Obrázek 16) jsou určeny pro vnitřní řízení navrhovaného měniče napětí. Napěťová hladina +12V slouží jen pro periferie, a proto je také jištěna pojistkou o nominální hodnotě 2.5A. Napájecí napětí za integrovaným obvodem LT1029 je vyhrazeno jen jako referenční napětí pro obvody ADC mikrokontroleru a jako referenční napětí pro proudový převodník snímající pracovní proud motorem. Hlavní napájecí napětí mikrokontroleru a obvodu zajišťující hardwarové přizpůsobení komunikačního rozhraní, poskytuje třibodový lineární stabilizátor řady 7805.

5.2. Výkonová část měniče

Výkonová část snižujícího měniče se skládá ze dvou hlavních částí, jedná se o samotný H-můstek s budiči unipolárních tranzistorů a druhá část je zaměřena na snímání pracovního proudu, který se bude blížit hodnotě 30A.

Můstkové zapojení čtveřice výkonových tranzistorů typu IRFB4127 poskytuje silnou oporu celého zařízení. Maximální hodnoty proudu až 76A při napětí do 200V. Především byl tento typ vybrán pro velmi nízký odpor při sepnutém stavu $R_{ds(on)} = 0.017\Omega$. Při kalkulovaném maximálním proudu do 30A vychází dle vzorce (5.2.1) ke ztrátovému výkonu 15.3W. Výkonová ztráta 15.3W bude chlazena pasivním chladičem. Unipolární tranzistory v plném můstkovém zapojení jsou řízeny pomocí specializovaných obvodů IR2104 (Obrázek 17). Budící obvody typu IR2104 v sobě zahrnují jak nábojovou pumpu pro zvýšení napětí pro otvírání tranzistorů v horní větvi můstku, tak v sobě zahrnují i pevně zvolený takzvaný „death time“. Tato doba je použita proti zamezení otevření horního a spodního tranzistoru, aby nedošlo k průchodu zkratového proudu půl můstkem. Celý obvod je zapojen jen s minimem externích součástek, které vychází z doporučeného zapojení obvodu uvedeného v typovém listě [9].



Obrázek 17 Zapojení půl můstku

Pro zachování co nejvyšší účinnosti měniče a zároveň co největšímu snížení zahřívání, ke kterému dochází díky Joulovým ztrátám, bylo provedeno snímání pracovního proudu efektivním způsobem. Původní plán zahrnoval snímání proudu na výkonovém odporu, kde by ovšem docházelo ke ztrátám dle rovnice (5.2.1).

$$P = R * I^2 \quad (5.2.1)$$

K energeticky vhodnějšímu snímání proudu byl použit moderní prvek Current Transducer od společnosti LEM. Jedná se o přesný typ HLSR 20-P [10], který snímá jak

střídavé, tak stejnosměrné proudy. Tento moderní prvek obsahuje uvnitř elektroniku potřebnou k převodu proudu na napěťový výstup. Jednoduchým přepočtem dle rovnice (5.2.2) získáme informaci o tekoucím proudu.

$$I = \frac{U}{40} \quad (5.2.2)$$

Napěťový výstup z proudového převodníku je přímo přiveden na ADC vstup mikrokontroleru. Následně je informace o velikosti napětí převedena 10-bitovým převodníkem. Dále je napěťová hodnota přepočtena dle rovnice (5.2.2) na aktuální hodnotu pracovního proudu tekoucího motorem.

5.3. Řídící část měniče

Nejdůležitější částí měniče je řídicí mikrokontroler, který již byl vybrán v předchozích kapitolách. Řídící mikrokontroler byl doplněn o hardwarové přizpůsobení komunikačního sériového rozhraní UART. Toto rozhraní bude prvotně sloužit jako rozhraní pro sledování a ladění programu v prvních krocích vývoje programu do mikrokontroleru. Pro větší odolnost proti rušení komunikace, byla vybrána diferenciální sběrnice dle standardu RS485 full duplex. Jedná se o čtyř vodičovou sběrnici s protokolem UART, která je hardwarově podporován vybraným mikrokontrolerem. Řídící část měniče je doplněna o přesnou referenci napětí pro ADC mikrokontroler.

5.4. Sestavení testovacího software pro řídicí mikrokontroler

Testovací software byl napsán v programovacím jazyce microC od společnosti Microelektronika [11]. Vybrané vývojové prostředí poskytuje silné zázemí pro psaní programu. Výhoda psaní programu v jazyce C je zejména v nízko úrovněm psaní kódu. Tento aspekt má vliv především na výpočetní výkon mikrokontroleru.

Veškeré testování samotného softwaru bylo provedeno pomocí rozhraní UART, kde na straně PC byl použit kontrolní SW Hercules [12], pro jednoduché kontrolování stavů v mikrokontroleru. Testovací software obsluhuje dva vstupy ADC převodníku. První vyčítá

proudu z převodníku LEM a druhý vstup snímá požadavek pracovního proudu z plynové rukojeti. Na základě požadavku na proud dochází k výpočtu regulační odchylky. Která se propisuje do dvou výstupních registrů v mikrokontroleru obsluhující třídu PWM signálu.

Pro odzkoušení zkušebního programu bylo přistoupeno k ruční výrobě PCB. Na těchto deskách plošných spojů, bylo zkoušeno i obvodové navržené řešení a odladění zkušebního programu. V prvních krocích zapojení sloužilo k testování nového obvodu od společnosti LEM. Prvotní zapnutí a připojení motoru proběhlo dle očekávání téměř bez problémů.

5.5. Korekce PI složek regulátoru

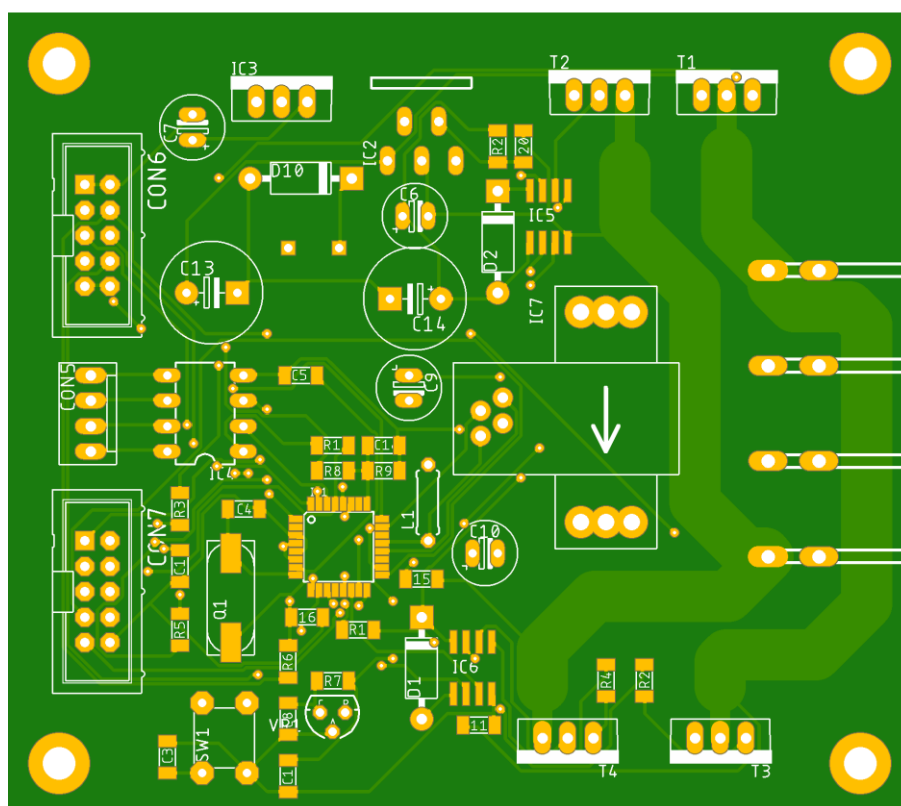
Jak již bylo zmíněno zkušební zapojení a testování bylo téměř bez problémů. Ukázaly se předpokládané problémy v oblasti rychlosti regulátoru. Jelikož mikrokontroler zavádí zpoždění do regulační smyčky. Při pokusném nastavování proporcionální a integrační složky došlo k rozkmitání měniče a poškození elektrolytických kondenzátorů ve zdroji. Nápravné řešení bylo nalezeno v podobě přidání tzv. snubber kapacitoru, který eliminuje spínací napěťové špičky. Zjednodušený snubber obvod skládající se jen z kondenzátoru byl paralelně připojen k spínacímu prvku. Hodnoty regulátoru byly upraveny $K_r = 0.05[-]$ a časová konstanta pro integrační složku $T_r = 0.0006[s]$. Tyto hodnoty přispěly k mírnému zpomalení regulátoru. Ovšem toto zpomalení se na výsledné aplikaci viditelně nepodepsalo.

5.6. Návrh DPS v prostředí Eagle

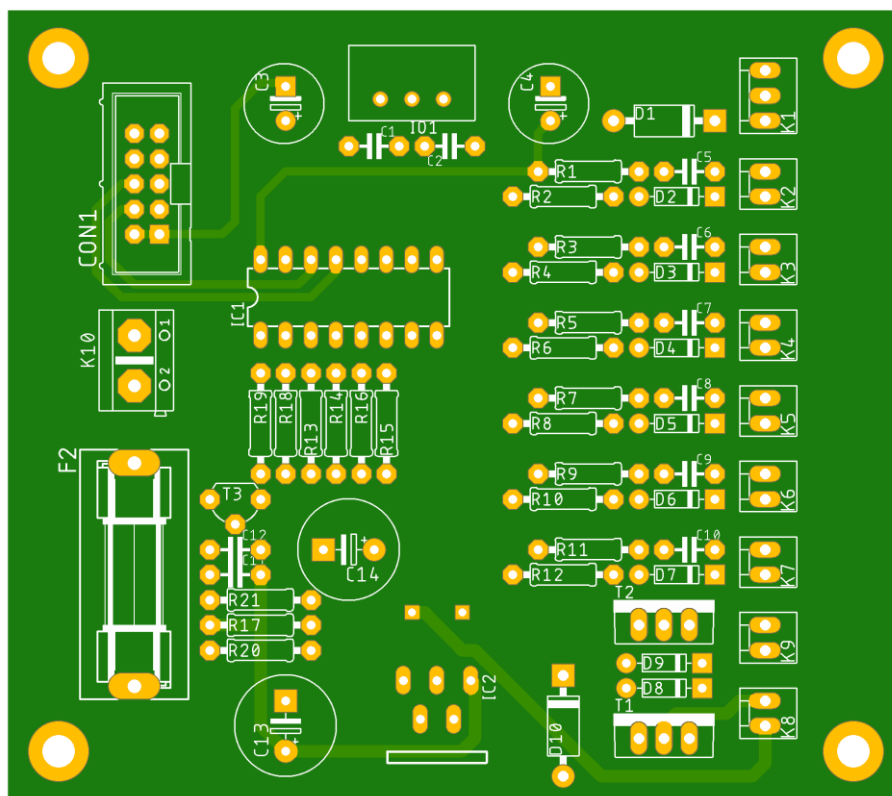
Z předchozích zkušeností a pro intuitivní ovládání byl zvolen návrhový software Eagle od společnosti Autodesk [13]. Tento software poskytuje veškeré potřebné nástroje pro návrh obvodových schémat až po kreslení samotných motivů na PCB. Při návrhu bylo postupováno dle pravidel návrhů. Nejprve tedy bylo přistoupeno k rozmístění komponent, které bude nutné připojit na chladič. Následovalo rozmístění konektorů pro snadnější montáž do zatím nevybrané přístrojové krabičky. To ale nebrání přípravě technologických otvorů zde v podobě otvorů pro přichycení šrouby M3. Po tomto mechanické rozmístění komponent již bylo přistoupeno k návrhu napájení a sběrnicových vodičů s resetem. Jako poslední byly kresleny vstupy a výstupy. Bohužel software Eagle neobsahuje rozšíření v podobě výpočtu maximálního proudového zatížení vodiče při zvoleném povoleném oteplení o 20°C. Pro tyto výpočty byl zvolen software Saturn od společnosti Saturn PCB Design [7]. Viz Obrázek 19

kde je návrh PCB pro připojení všech periférií, které po novu je možné připojit do jednoho přípojného místa. Na Obrázek 18 je návrh PCB s řízením a možností připojení výkonových prvků na chladič, který je uvažován v podobě hliníkové přístrojové krabičky. Vzhledem k rozdílným potenciálům na chladičích ploškách výkonových prvků, budou všechny tyto prvky připevněny přes izolační podložky.

Jak již bylo avizováno v odstavcích výše. Je zde ponechána myšlenka pro zařazení tohoto regulátoru do složitějších zařízení. Konkrétně myšleno do různých vozítek s více pohonnými jednotkami. Proto bylo k přístupu ku dvěma deskám plošných spojů. Deska plošných spojů na Obrázek 18 je samostatně použitelná a je možné nastavování požadovaného proudu přes rozhraní RS485. Propojení mezi druhou deskou, která je určena pro připojení periférií slouží konektor CON6. Obě tyto DPS jsou propojeny 10 žilovým plochým kabelem zakončenými lisovacími konektory. Tato variabilita má výhodu i pro budoucí případné změny v oblasti periférií.



Obrázek 18 Řízení s RS485



Obrázek 19 rozhraní koncových prvků

Pro snazší montáž do přístrojové krabičky mají DPS (Obrázek 18 a Obrázek 19) otvory pro přišroubování na stejných místech. Ze stejného důvodu byly sjednoceny i rozměry a směr vývodů konektoru pro připojení vnějších vodičů. Vzhledem k umístění přístrojové trubičkové pojistky na DPS (Obrázek 19) je předpokládáno, že právě tato DPS bude umístěna jako horní.

Model dvou DPS nad sebou byl již realizován na prototypových DPS (Obrázek 20). Rozdělení prototypových DPS bylo za účelem odladění PWM signálů a zpracování ADC signálů v mikrokontroleru. Výkonová část byla nejprve připojena na generátor pravouhého signálu. Po kontrole správného zapojení byly tyto DPS spojeny. A následně odladěny konstanty regulátoru.

6. Závěr

Cílem mé práce byla úprava a posílení pohonné jednotky dětské čtyřkolky. Práce je rozdělena do třech hlavních částí. První část se zaměřila na zjištění potřebných hodnot reálného nového pohonu. Hlavní dva měřené parametry stejnosměrného motoru vyžadovaly použití laboratorního zdroje Rhode&Schwarz NGSM, a multimetrů Agilent U1272A s proudovou sondou Tektornix A622 a samozřejmě výpočetního matematického softwaru Matlab. Překvapující hodnota se dostavila v podobě velmi nízké indukčnosti (260uH) vinutí motoru. Tato nízká indukčnost předurčovala nutnost použití vysoké spínací frekvence.

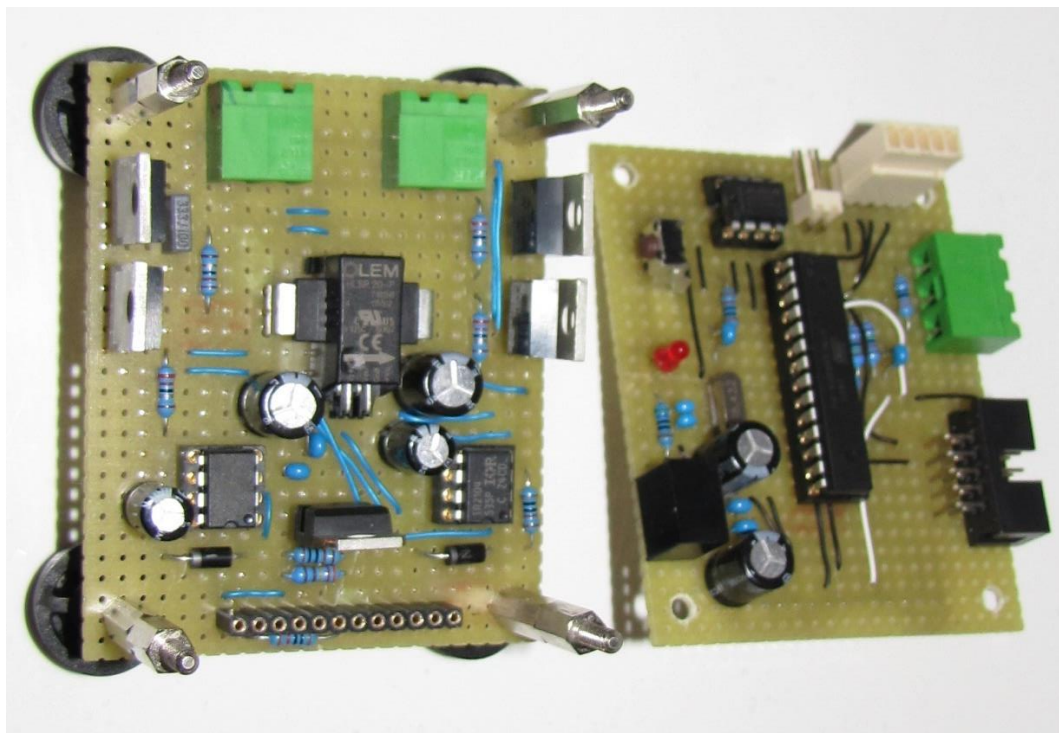
Změřené parametry byly použity pro sestavení zjednodušeného simulačního modelu ve druhé části. Po překvapivě nízké hodnotě indukčnosti návrh simulačního modelu nepřinesl žádné obtíže,

Třetí část byla zaměřena na návrh obvodových schémat a PCB.

Během přípravy této práce nastalo mnoho překážek, které jsou popsány výše. I přes tato úskalí došlo k dokončení všech tří úkolů, jak popisují konkrétní části. V průběhu vypracování této práce vznikly prototypové desky (Obrázek 20), které byly testovány přímo na reálné čtyřkolce spolu s laboratorním zdrojem nastaveným na 30V. Problém nastal až při prvotním testování se zátěží v podobě mechanické kotoučové brzdy na zadní nápravě čtyřkolky. Vlivem spínacích pulzů vznikajících při spínání indukčnosti došlo k poškození elektrolytických kondenzátorů pulzním působením napětí. Po konzultaci s vedoucím práce jsem byl nasměrován k obvodu snubber. Použil jsem zjednodušenou verzi pouze s fóliovým kondenzátorem. Touto jednoduchou změnou se odstranil problém s elektrolytickými kondenzátory ve zdrojové části.

Navržený měnič je finálně schopen omezeného provozu na reálném zařízení se sníženým bateriovým napětím, bez připojení periférií, a to včetně bezpečnostních prvků. V prvotním návrhu desek plošných spojů bylo uvažováno i komunikační rozhraní, které případně měnič může integrovat do zařízeních s centrální řídicí jednotkou.

Závěrem jsem tedy schopen konstatovat, že cíl mé práce byl splněn a dětská čtyřkolka nyní užívá posílené pohonné jednotky, a to díky všem výše uvedeným úspěšným krokům.

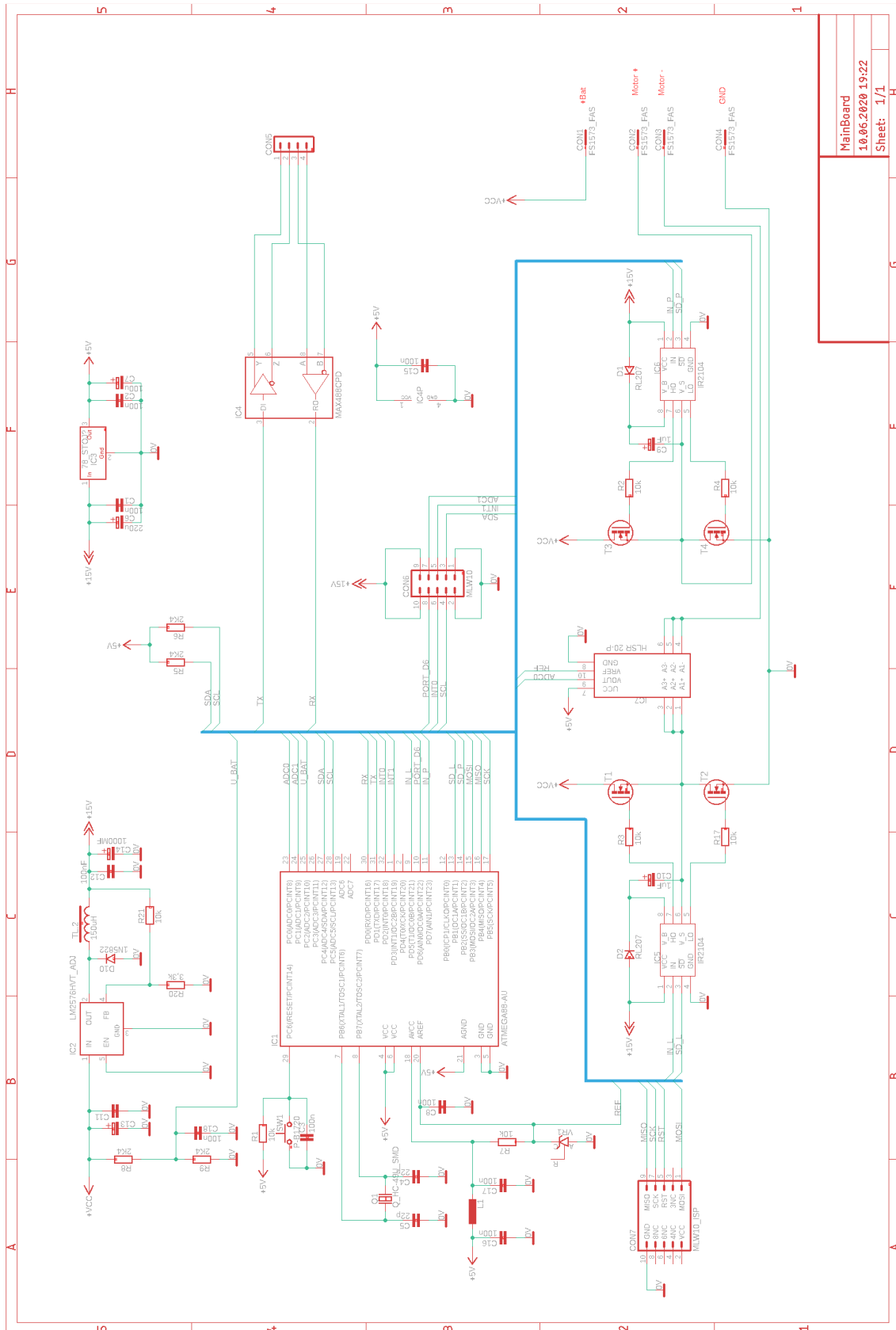


Obrázek 20 Rozložený prototyp měniče

6. Seznam literatury a informačních zdrojů

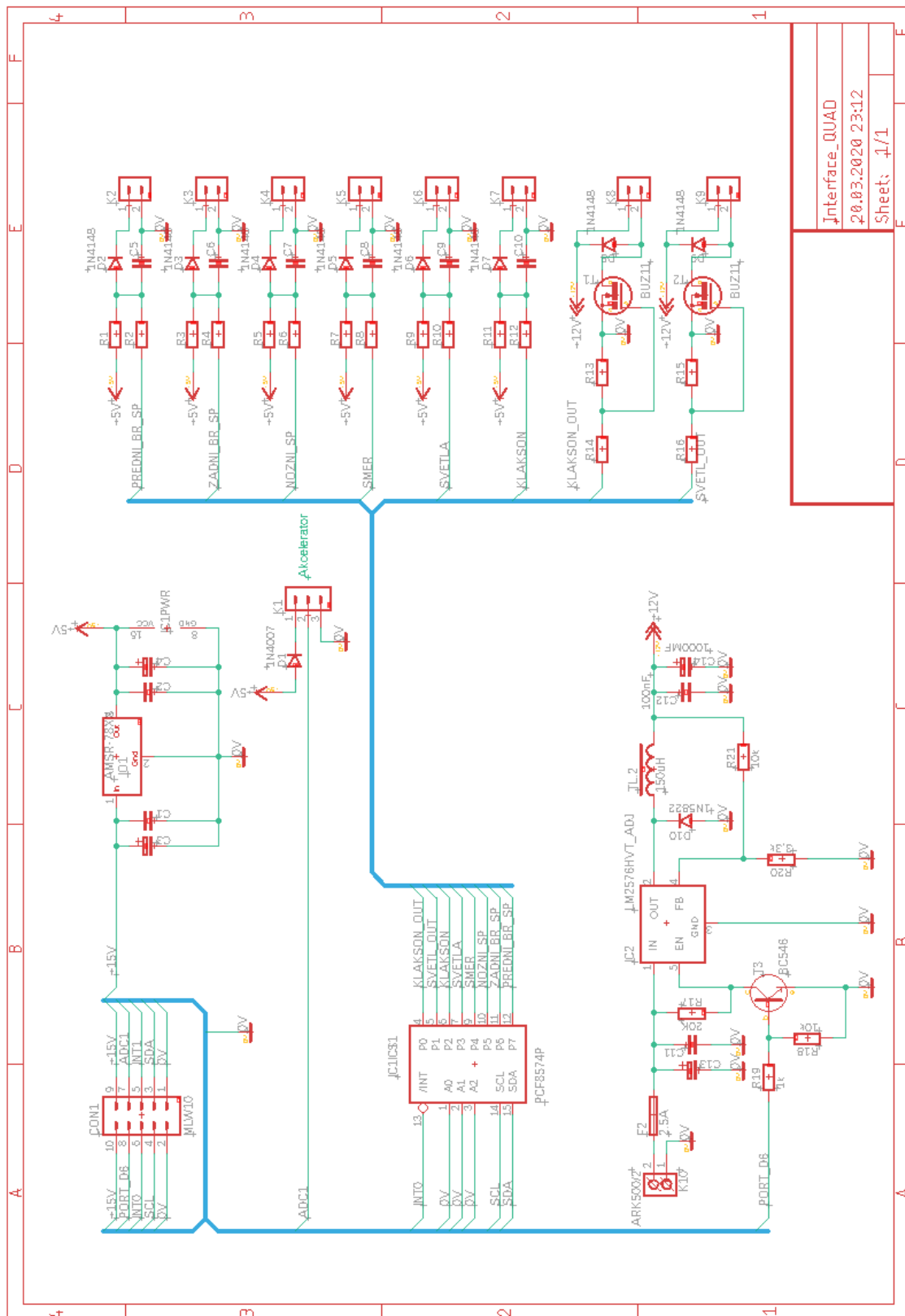
- [1] BRTNA, Stanislav. *Konstrukce měniče pro BLDC motor*. Plzeň, 2015. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky
- [2] PINKER, Jiří. *Mikroprocesory a mikropočítače*. Ben – technická literatura, Praha 2004. ISBN 80-7300-110-1
- [3] VÁŇA, Vladimír. *Mikrokontrolery Atmel AVR – programování v jazyce C*, Ben – technická literatura, Praha 2009. ISBN 80-7300-102-0
- [4] KREJČÍŘÍK, Alexander. *Spínané zdroje s časovačem 555*, Ben – technická literatura, Praha 2008. ISBN 80-86056-76-7
- [5] Typový list mikrokontroleru ATMEL - ATMEGA48-88-168. Dostupné z: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega48_88_168_megaA_VR-Data-Sheet-40002074.pdf
- [6] Explanation of Maxim RS-485 features. Dostupné z: <https://www.maximintegrated.com/en/design/technical-documents/app-notes/3/367.html>
- [7] Saturn PCB Design. Dostupné z: <https://saturnpcb.com/>
- [8] Doc. Ing. Voženílek, Petr. *Elektromechanické měniče*, Nakladatelství ČVUT, Praha 2007.
- [9] International Rectifier IR2104. Dostupné z: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IR2104-DS-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d462533600a4015355c7c1c31671
- [10] Current Transducer HLSR-P series. Dostupné z: https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/hlsr-p_series.pdf
- [11] MikroC PRO for AVR. Dostupné z: <https://www.mikroe.com/mikroc-avr>
- [12] Hercules terminal. Dostupné z: <https://www.hw-group.com/cs/software/aplikace-hercules-setup>
- [13] Eagle from Autodesk. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/products/eagle/overview?plc=F360&term=1-YEAR&support=ADVANCED&quantity=1>

7. Přílohy



MainBoard
10.06.2020 19:22
Sheet: 1/1

Příloha 1 Řízení s komunikačním rozhraním



Interface_QUAD
20.03.2020 23:12
Sheet: 1/1

Příloha 2 Rozhraní pro periferie

```

Ucc = 18; %napajeci napeti
i_w = 10; %pozadavek na I
krok = 1/18432000; %krok sim.
N = 2; %delicka f
f_pwm = 1 / (krok * N * 510); % str.142 vypocet frekvence PWM
t_sm = 10/f_pwm; %cas simulace bylo 30
kroku = round(t_sm/krok); %pocet kroku simulace
out = zeros(kroku,12); %nastaveni promene 1.cas 2.pila
sPila = 1; %pro vykresleni prubehu pily zacni kladnou smernici
pila = 0; %zacni od 0
top = 512; %hodnota pri ktere zacne dekrementace

Ui = 0; %PP pro indukovane napeti
i=0; %PP pro proud zatezi
ur = 0; %ridici napeti
urOld=ur;
R = 0.247; %Odpor vinuti motoru
L = 270e-6; %Indukcnost motoru
kr = 0.03; %zesileni reg. (parametr regulatoru)
Tr=1e-3;
uri=0;

for iKrok=1:kroku

    t = iKrok*krok; %spocti si casovou osu simulace
    pila = pila+sPila; %vypocet hodnot pro pilovy prubeh
    pila8 = int8(bitshift( pila , -2 ));
    if (pila<=0) || (pila>=top) %kontrola pro zmenu smernice
        sPila = -sPila; %zmena smernice pily

        urOld=ur;
        e = i_w - i; %vypocet regulacni odchylky
        ur = e*kr; %vypocet ridiciho napeti
        if abs(ur)<1
            uri=uri+kr*e/(Tr*f_pwm*2);
        end
        ur=ur+uri;
        if (ur <= -1) %omezeni na minimalni hodnotu
            ur = -1;
        end
        if (ur >= 1) %omezeni na maximalni hodnotu
            ur = 1;
        end
    end

    %ur1 = (urOld + 1)*(top/2); %prepocetene ridici napeti
    ur1 = (urOld + 1)*(256/4); %prepocetene ridici napeti
    %ur1 = round(top*3/4); %ridici U z reg. pro test

    %PWM_L_polomost
    if ur1 > pila8 %registr OCR0A str.135
        U10 = Ucc;
    else
        U10 = -Ucc;
    end

    %PWM_P_polomost
    ur2 = 128-ur1; %ridici U z reg.prepoceteno no druhou PWM
    if ur2 > pila8 %registr OCR0B str.135
        U20 = Ucc; %ridici napeti pro IR2104
    else
        U20 = -Ucc;
    end

    uz = U10-U20 %prubeh napeti na zatezi

    if t>t_sm/2 Ui=20; end; %pro ucely simulace aby byla videt zmena

    di = 1/L*(uz - R*i - Ui);
    i=i+di*krok; %mereni z LEM

    out(iKrok,:)=[t,pila,double(pila8),ur1,ur2,U10+18,U20+18,uz,i_w,i,ur,urOld];
end

```

Příloha 3 Program zjednodušeného simulačního modelu