



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

NÁVRH A VÝROBA MODULU PRO ŘÍZENÍ MOTORŮ NA NÍZKÁ NAPĚTÍ

DESIGN AND FABRICATION OF THE MODULE USED FOR THE LOW VOLTAGE ELECTRIC MOTORS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Stanislav Ludva

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Dalibor Šulc, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Bc. Stanislav Ludva
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Mechatronika
Vedoucí práce:	Ing. Dalibor Šulc, Ph.D.
Akademický rok:	2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh a výroba modulu pro řízení motorů na nízká napětí

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Navrhněte řídicí jednotku určenou k ovládání elektrických motorů malých napětí - elektronicky komutovaný, stejnosměrný a krokový motor.

Cíle diplomové práce:

- navrhněte modulární platformu pro řízení stejnosměrných, elektronicky komutovaných nebo krokových motorů,
- vyberte vhodné komponenty,
- zařízení realizujte,
- navrhněte zařízení využívající tohoto modulárního zařízení,

Seznam literatury:

Horowitz Paul and Winfield Hill, The art of electronics. Cambridge [England]: Cambridge University Press, 1989

Grepl Robert: Modelování mechatronických systémů v Matlab SimMechanics. Praha: BEN - Technická literatura, 2007. ISBN 978-80-7300-226-8.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je navrhnout a realizovat univerzální řídicí jednotku určenou k ovládní elektrických motorů malých napětí – elektronicky komutovaného, stejnosměrného a krokového. To zahrnuje vytvoření vhodné topologie zapojení a výběr patřičných součástí na základě požadovaných parametrů. Nedílnou součástí je také výroba desky plošných spojů (DPS), její osazení a ve finále naprogramování potřebných řídicích funkcí. Práce obsahuje mimo jiné i rešerši vybraných typů motorů – princip fungování, zapojení a řízení. V závěru práce bylo provedeno testování a odzkoušení funkčnosti jednotky.

KLÍČOVÁ SLOVA

stejnosměrný, kartáčový, BLDC, bezkartáčový, elektronicky komutovaný, krokový, motor, řídicí jednotka

ABSTRACT

The aim of this diploma thesis is to design and implement a universal driver unit designed to control electric motors of small voltages – electronically commutated, DC and stepper. This involves creating topology and selecting appropriate components based on the required parameters. It also includes the manufacture of printed circuit board (PCB), soldering of the components and programming of the necessary functions. Thesis contains the analysis of three selected types of motors – the principle of operation, wiring and control. Testing of the control unit was performed at the end of the work.

KEYWORDS

DC, brushed, BLDC, brushless, electronically commutated, stepper, motor, driver

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Návrh a výroba modulu pro řízení motorů na nízká napětí“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Daliboru Šulcovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, ochotu a podnětné návrhy k práci. Mé poděkování patří také jeho kolegovi Ing. Pavlu Wertheimerovi, Ph.D. za věcné připomínky a cenné rady, které mi při práci velice pomohly. Zároveň bych chtěl poděkovat celé své rodině, všem kamarádům a především přítelkyni za podporu během studia a trpělivost při psaní této práce.

OBSAH

1	Úvod	11
2	Rešerše motorů	13
2.1	Kartáčový stejnosměrný motor	13
2.1.1	Princip chodu motoru	13
2.1.2	Zapojení motoru	14
2.1.3	Řízení spínání tranzistorů v měniči	16
2.2	Bezkartáčový stejnosměrný motor	18
2.2.1	Zapojení motoru	19
2.2.2	Elektronická komutace	19
2.2.3	Snímání polohy rotoru	20
2.3	Krokový motor	22
2.3.1	Unipolární zapojení	22
2.3.2	Bipolární zapojení	24
2.3.3	Mikrokrokování	25
3	Řízení a regulace	27
3.1	Řízení bez zpětné vazby	27
3.2	Zpětnovazebné řízení	28
4	Hardware	31
4.1	Řídicí mikrokontrolér	31
4.2	Výkonové spínací prvky	32
4.3	Měření proudu	33
4.4	Komunikace	35
4.5	Deska plošných spojů	35
4.5.1	Návrh schématu	35
4.5.2	Výroba DPS	36
5	Software mikrokontroléru	37
5.1	Trvalá paměť – EEPROM	37
5.2	Řízení	38
5.2.1	DC motor	38
5.2.2	BLDC motor	40
5.2.3	Krokový motor	40
5.3	Komunikace	41
6	Ovládací program pro PC	43
7	Testování	45
7.1	PWM signál	45
7.2	Hallovy sondy	46
7.3	Ladění regulátorů	47

7.4	Měření proudu	50
7.5	Zahřívání	51
8	Cenová kalkulace a využití na konkrétních projektech	53
8.1	Cenová kalkulace	53
8.2	Stroj pro navíjení bužírky	54
8.3	Uživatelská ovládací jednotka pro krokový motor	55
9	Závěr	57
	Literatura	59
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	61
	Seznam příloh	63

1 ÚVOD

Elektromotory jsou elektrické točivé stroje sloužící k přeměně elektrické energie na mechanickou. S rostoucími požadavky na automatizaci systémů a zařízení v posledních několika desítkách let došlo v oblasti elektrických motorů a jejich řízení k velkému rozmachu. V dnešní době je nejen v průmyslu nespočet strojů, ale také v běžném životě mnoho spotřebičů, které využívají větší či menší motory různého typu a konstrukce pro svou funkčnost. Ve všech těchto zařízeních je také obsažena řídicí elektronika, která zajišťuje požadovaný chod motoru.

Diplomová práce je zpracována ve spolupráci se společností Coconut Systems, s.r.o., zabývající se především vývojem jednoúčelových strojů. Většina vyvíjených zařízení využívá hned několika různých motorů a každý z nich i různou jednotku pro řízení. Vývoj a výroba řídicí elektroniky na míru podle typu, velikosti a způsobu řízení motoru znamená nejen finanční, ale i časovou náročnost. Proto je cílem této diplomové práce navrhnout a vyrobit univerzální modul pro řízení běžně používaných motorů ve společnosti Coconut Systems.

V následujícím textu budou popsány požadavky na řídicí jednotku. Schopnost ovládat základní typy motorů – kartáčový stejnosměrný motor (Brushed DC motor), bezkartáčový stejnosměrný motor (BLDC motor) a krokový motor (Stepper motor). Dále možnost volby způsobu řízení od základní regulace napětí bez zpětné vazby přes proudovou a rychlostní řídicí zpětnovazební smyčku až po polohovou regulaci. V neposlední řadě rozsah výkonu řízených motorů a to konkrétně napětí 12 až 48 V a proud tekoucí motorem do 30 A.



Obr. 1.1: Finální podoba řídicí jednotky.

2 REŠERŠE MOTORŮ

Základním principem elektromechanických strojů je přeměna elektrické energie na mechanickou, případně naopak. Od vzniku prvního elektromotoru uplynulo už téměř dvě stě let a bylo vynalezeno mnoho různých principů fungování a provedení. Některé typy se už téměř nevyužívají a jiné se hojně používají dodnes. Zde je možno vidět základní rozdělení elektrických motorů. Případné další informace lze nalézt v [1]:

- kartáčový stejnosměrný motor
 - sériové buzení
 - derivační (paralelní) buzení
 - kompaundní buzení
 - s cizím buzením
 - s permanentními magnety
- bezkartáčový stejnosměrný motor (elektronicky komutovaný)
- střídavý motor (jednofázový, třífázový)
 - synchronní
 - asynchronní
 - komutátorový
- univerzální motor
- speciální motor
 - krokový

Každý princip a konstrukce motoru má své výhody a nevýhody. Podle požadavků dané aplikace je třeba vždy zvolit ten nejvhodnější. Ve společnosti Coconut Systems nejčastěji využívají a s největší pravděpodobností budou i nadále využívat tři typy motorů:

- kartáčový stejnosměrný motor (Brushed DC motor),
- bezkartáčový stejnosměrný motor (BLDC motor),
- krokový motor (Stepper motor).

Tyto motory budou v následujících kapitolách detailněji popsány a v rámci diplomové práce je pro ně vyvinuta jednotka umožňující jejich řízení.

2.1 Kartáčový stejnosměrný motor

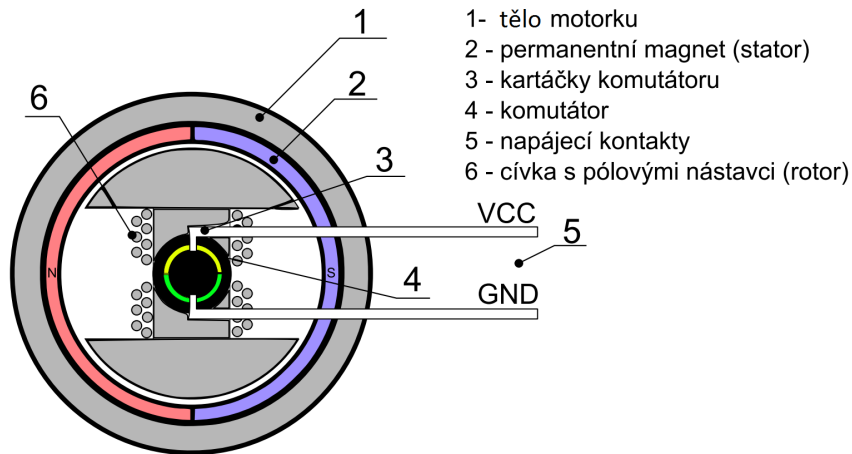
Kartáčový stejnosměrný motor, označován jako DC motor je jeden z nejstarších typů elektromotorů. I v dnešní době je velice rozšířený a to hlavně díky základnímu jednoduchému řízení bez složité řídicí elektroniky. Tento typ motoru má rovněž nevýhody, například nižší životnost a nutnou údržbu – především lamel a kartáčků komutátoru.

Rychlost otáčení se jednoduše řídí velikostí napětí, nejčastěji pomocí pulsní šířkové modulace generované mikrokontrolerem.

2.1.1 Princip chodu motoru

Připojením stejnosměrného napětí ke svorkám motoru začne cívkou na rotoru procházet proud, který vytváří magnetické pole. Jelikož se rotor nachází v magnetickém poli vytvořeném permanentními magnety statoru, začne se otáčet tak, aby byl magnetický odpor

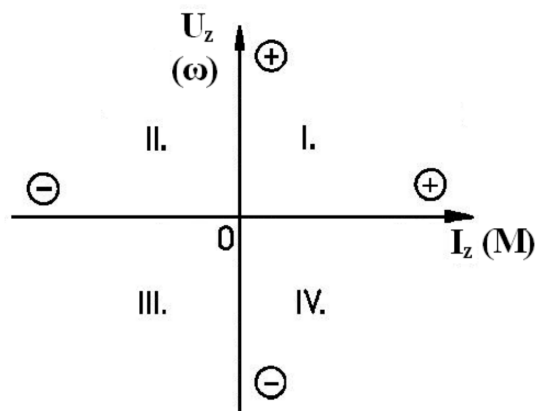
(reluktance) co nejmenší – opačné magnetické póly se začnou přitahovat. Jakmile se rotor pootočí do polohy s nejmenším magnetickým odporem, díky komutátoru dojde k přepnutí polaroty napájení na cívce rotoru. Proud začne protékat cívkou opačným směrem, vytvoří magnetické pole orientované taktěž opačně než doposud a rotor začne být přitahován na protilehlou stranu. Obrázek 2.1 znázorňuje schéma vnitřního uspořádání DC motoru.



Obr. 2.1: Schéma vnitřního uspořádání DC motoru.
 (převzato z [2])

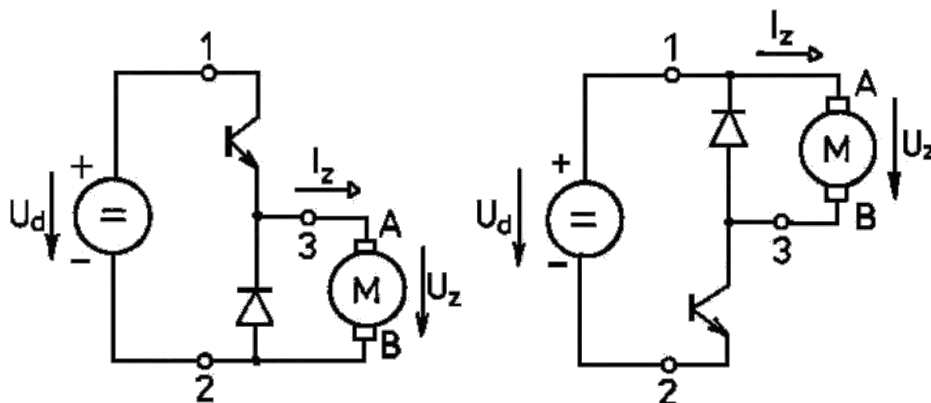
2.1.2 Zapojení motoru

Řídicí elektronika, ke které je motor připojen, může být více či méně složitá. Běžně se používají jedno, dvou nebo čtyř kvadrantové měniče. Každý z nich vyhovuje jinému způsobu využití motoru. Každý motor může pracovat v různých režimech (ve čtyřech kvadrantech VA roviny viz obrázek 2.2) – motorický (I. a III. kvadrant) nebo generátorický režim (II. a IV. kvadrant).



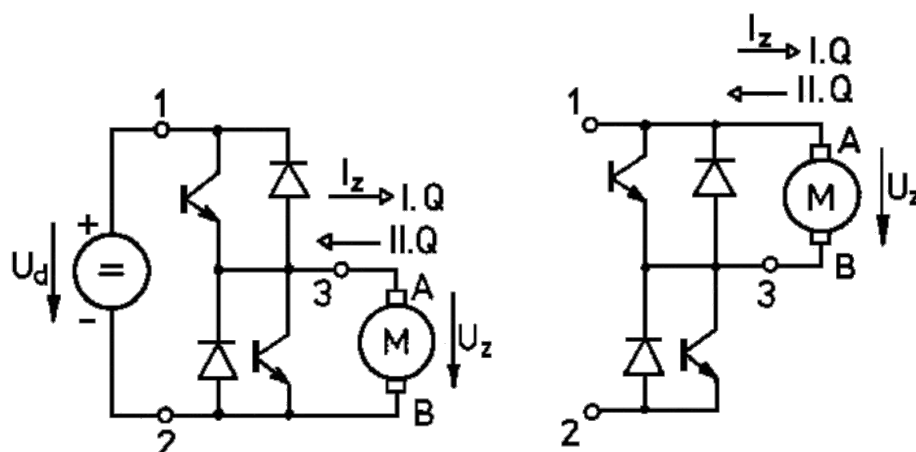
Obr. 2.2: Čtyři kvadranty VA roviny.
 (převzato z [3])

Připojením DC motoru k jednokvadrantovému pulznímu měniči (viz obrázek 2.3) jsme schopni dosáhnout jednoho směru napětí (rychlosti otáčení) a jednoho směru proudu (krouťícího momentu). Tento měnič lze tedy využít v případě, pokud je požadováno řídit rychlost motoru pouze v jednom směru a není potřeba elektrického brzdění.



Obr. 2.3: Jednokvadrantový měnič pracující v I. kvadrantu.
(převzato z [3])

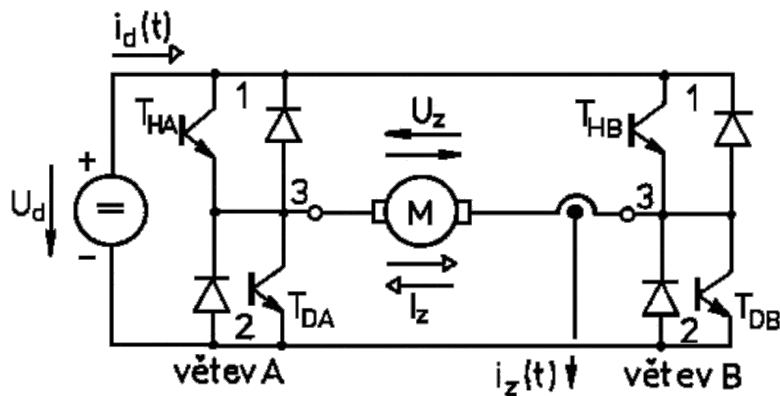
Na obrázku 2.4 jsou zobrazeny dvoukvadrantové pulzní měniče – schopny pracovat v I. a II. kvadrantu. Zapojení se využívá, jestliže je potřeba motor používat jak v brzděném, tak v motorickém režimu. Umožňuje pouze jeden směr napětí (otáčení pouze v jednom směru), avšak oba směry proudu. Tento typ měniče se někdy označuje také jako „poloviční H-můstek“, viz [3].



Obr. 2.4: Dvoukvadrantový měnič pracující v I. a II. kvadrantu.
(převzato z [3])

Čtyřkvadrantový měnič (znázorněný na obrázku 2.5), označovaný také jako H-můstek, je pro řízení DC motorů nejrozšířenější a to především díky jeho univerzálnosti. Dokáže

pracovat ve všech čtyřech kvadrantech. Motor lze používat jak v brzděném, tak i v motorickém režimu a to při obou směrech napětí (umožňuje oba směry otáčení, a dokonce jejich reverzaci za chodu).

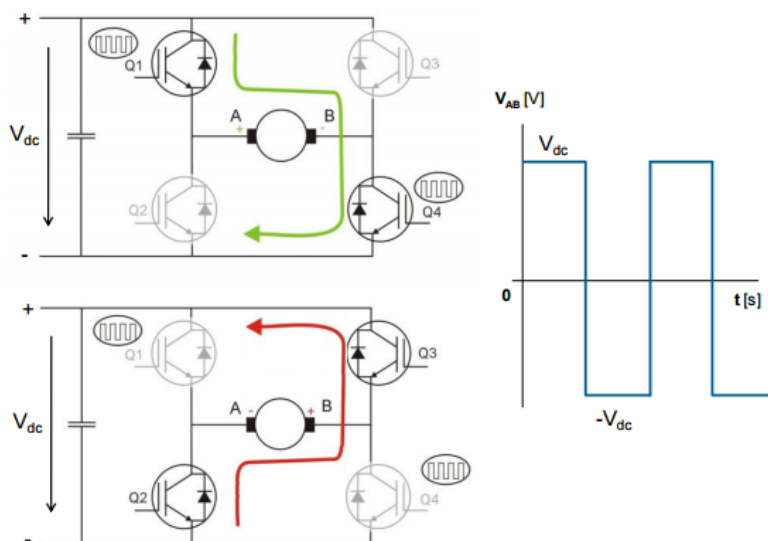


Obr. 2.5: Čtyřkvadrantový měnič pracující ve všech čtyřech kvadrantech.
(převzato z: [3])

2.1.3 Řízení spínání tranzistorů v měniči

Existují dvě možnosti spínání cívek motoru – bipolární nebo unipolární. To souvisí s napětím připojeným na svorkách motoru.

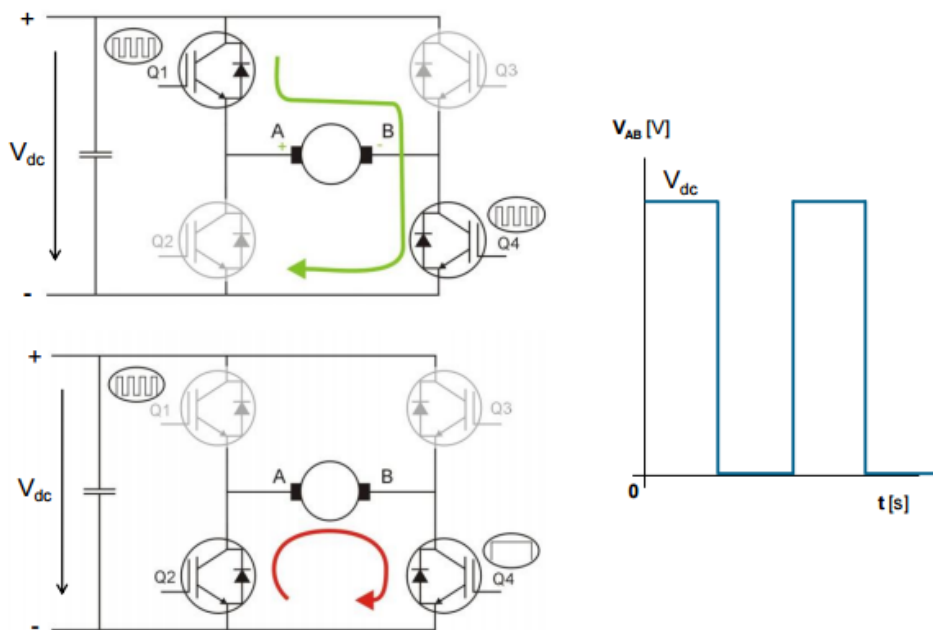
Bipolárním spínáním vychází z přepínání zátěže mezi větvemi v obou polaritách. Tedy $Q1$ a $Q4$ se v první části periody řídicího signálu pulsní šířkové modulace zapnou, $Q2$ a $Q3$ jsou vypnuty. V druhé části periody je stav opačný. $Q1$ a $Q4$ se vypnou a zapínají se $Q2$ a $Q3$ – viz obrázek 2.6.



Obr. 2.6: Bipolární spínání tranzistorů čtyřkvadrantového měniče.
(převzato z [4])

Při tomto typu spínání proud motorem prochází střídavě a při střídě 0,5, kdy jsou obě části periody stejně dlouhé, motor stojí. Probíhá aktivní brzdění a spotřebovává se tím energie ze zdroje. Jakmile začne převažovat některý sepnutý stav, střední hodnota napětí na motoru nebude nulová a motor se roztočí daným směrem.

Druhým typem je unipolární spínání, které vychází z přepínání v jedné větvi a to střídáním tranzistoru Q1 a Q2 – viz obrázek 2.7. Střídá těchto dvou tranzistorů (poměrná doba sepnutí během jedné periody) poté tvoří požadovanou střední hodnotu napětí na motoru.



Obr. 2.7: Unipolární spínání tranzistorů čtyřkvadrantového měniče.
(převzato z [4])

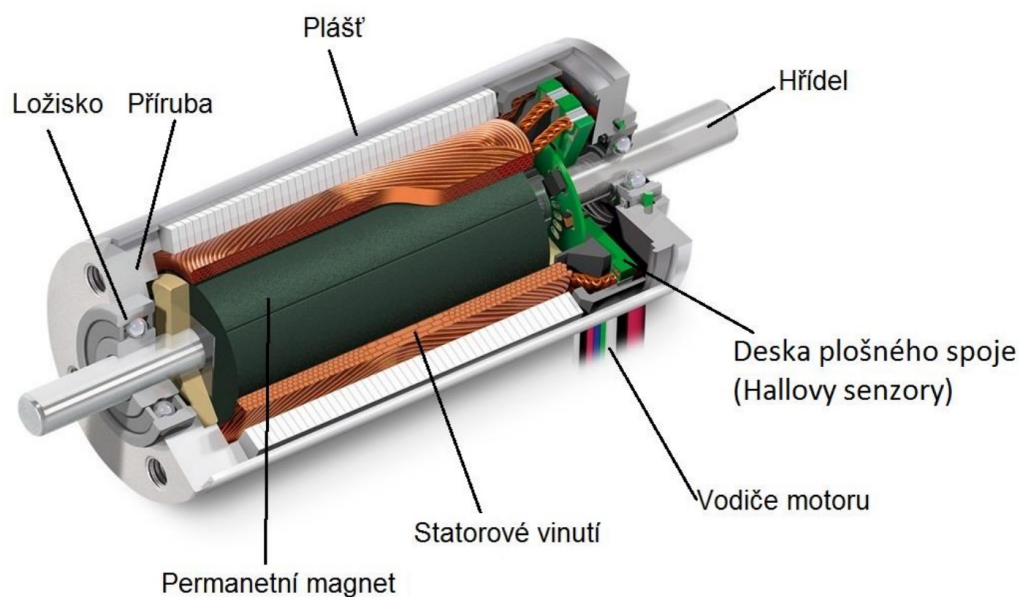
2.2 Bezkartáčový stejnosměrný motor

Bezkartáčový stejnosměrný motor (BLDC motor) patří do kategorie stejnosměrných, i když se strukturou podobá spíše střídavému 3-fázovému synchronnímu motoru. Na motor nelze připojit přímo stejnosměrné napětí ze zdroje jako u DC motoru, ale je nutné provádět jeho elektronické spínání.

Stator nejčastěji tvoří tři budící vinutí zapojené do hvězdy a rotor permanentní magnety, které vytvářejí konstantní magnetické pole ve vzduchové mezeře. Podle uspořádání rotoru a statoru lze BLDC motory dělit do následujících kategorií:

- s vnitřním rotorem
- s vnějším rotorem
- plochý (diskový) motor

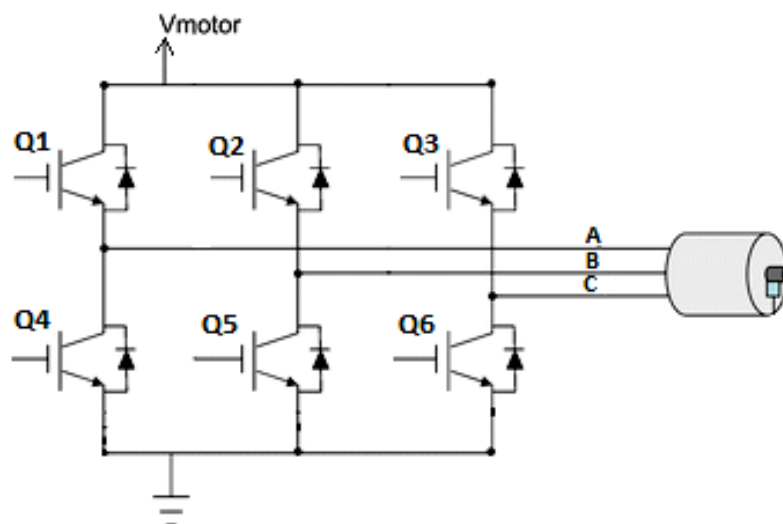
Nejvíce používanou konstrukcí bezkartáčových motorů je s vnitřním rotorem – vyobrazená v řezu na obrázku 2.8.



Obr. 2.8: Konstrukce motoru s vnitřním rotorem.
(převzato z: [5])

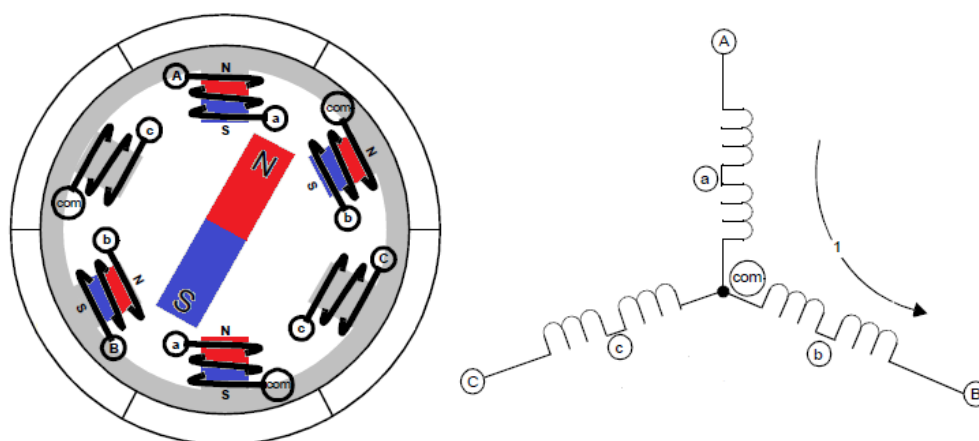
2.2.1 Zapojení motoru

Pro řízení BLDC motoru se využívá frekvenčního měniče, který ve statoru vytváří točivé magnetické pole. Toto zapojení vychází z polovičního H-můstku, který se připojí ke každé fázi motoru. Schéma zapojení je zobrazeno na následujícím obrázku 2.9.



Obr. 2.9: Schéma zapojení frekvenčního měniče pro řízení BLDC motoru.

Na obrázku 2.10 lze vidět detailnější zobrazení zapojení jednotlivých vinutí bezkartáčového motoru ve stavu sepnutí tranzistorů $Q1$ a $Q5$.



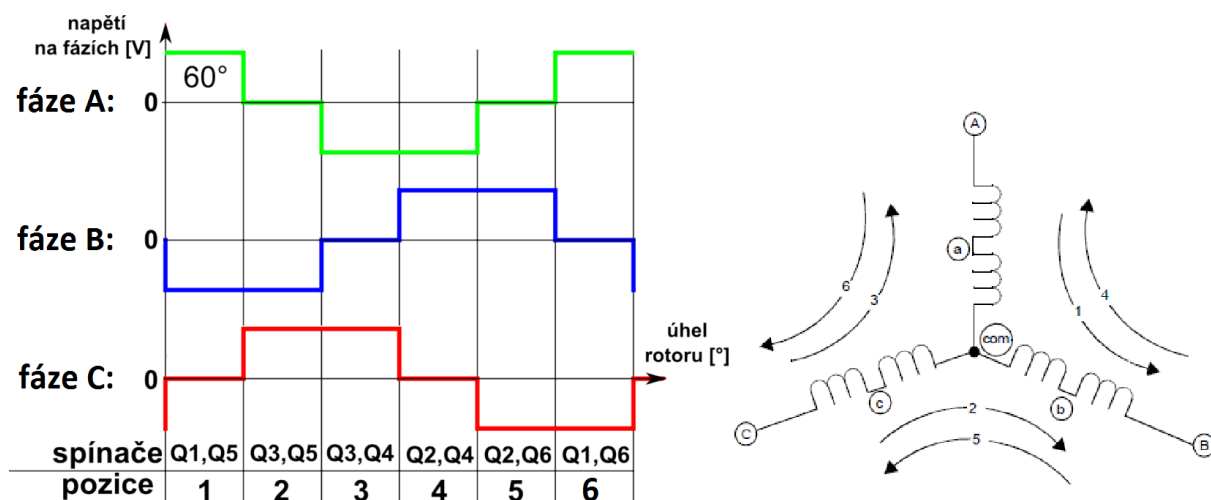
Obr. 2.10: Schématické zobrazení vinutí bezkartáčového motoru.

2.2.2 Elektronická komutace

Komutace – proces, při kterém dochází přepínáním fází ke změně směru toku proudu, je nezbytný pro běh všech stejnosměrných motorů. Na rozdíl od kartáčových motorů, kde

bývá komutace prováděna mechanickými kartáči, u bezkartáčových motorů je mechanický způsob komutace, vzhledem k jejich konstrukci, nemožný. Je zároveň nežádoucí, protože BLDC motory byly vyvinuty právě proto, aby eliminovaly nevýhody s mechanickou komutací spojené. Komutace v BLDC motorech bývá prováděna elektronicky. Díky tomuto faktu nedochází k mechanickému opotřebení a motor má tak vyšší životnost. Ovšem za cenu komplikovanějšího řízení.

Aby se motor mohl otáčet, musí být vytvořeno točivé magnetické pole. To vznikne správnou sekvencí spínání jednotlivých fází. Pro jeden směr otáčení je typická sekvence: $Q1Q5 - Q3Q5 - Q3Q4 - Q2Q4 - Q2Q6 - Q1Q6$ a opačná pro otáčení na druhou stranu. Obrázek 2.11 graficky znázorňuje spínání fází.



Obr. 2.11: Grafické znázornění spínání fází.

2.2.3 Snímání polohy rotoru

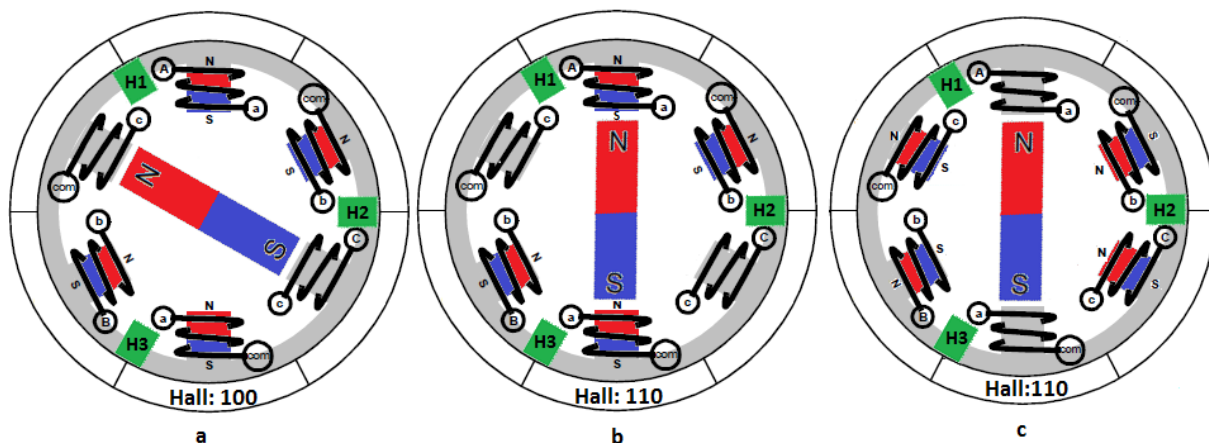
Pro optimální chod motoru je vhodné, aby magnetické pole statoru bylo natočeno o 90° před magnetickým polem rotoru. Z toho vyplývá potřebná znalost polohy rotoru vůči statoru. K její zjištění lze použít některou z následujících metod:

- bezsenzorová metoda
- senzorická metoda
 - Hallové sondy
 - inkrementální enkodér

Nejběžněji se pozice zjišťuje pomocí Hallových sond. Ty bývají často integrovány výrobcem přímo do motoru a jsou jeho nedílnou součástí. Používá se trojice Hallových sond rozmístěných na statoru nejčastěji po 120° (někdy i po 60°). Jak se permanentní magnety na rotoru nacházejí v blízkosti Hallových senzorů, generují tyto senzory napětí závislá na polaritě permanentních magnetů a odpovídající logické hodnotě 0 nebo 1. Kombinace trojice těchto binárních hodnot určuje pozici rotoru.

Na obrázku 2.12 lze vidět princip elektronické komutace na základě známé polohy rotoru pomocí Hallových sond. Pozice (a) znázorňuje motor ihned po elektronické komutaci

a je patrné, že výsledné magnetické pole statoru je natočené o 90° oproti magnetickému poli rotoru. Rotor se otáčí tak, aby byl magnetický odpor co nejmenší (opačné magnetické póly se přitahují). Aby se permanentní magnet dostal do pozice s nejmenším odporem, prochází pozicí (b). V této poloze detekuje Hallův senzor „H2“ náběžnou hranu – impuls pro další elektronickou komutaci, vyobrazenou na pozici (c). Vektory magnetického pole rotoru a statoru jsou na sebe opět kolmé.



Obr. 2.12: Princip elektronické komutace na základě známé polohy rotoru z Hallových sond.

Pro každou kombinaci signálů z Hallových sond je přesně dáno, které fáze statoru se mají sepnout, čímž je zajištěno otáčení motoru (viz tabulka 2.1).

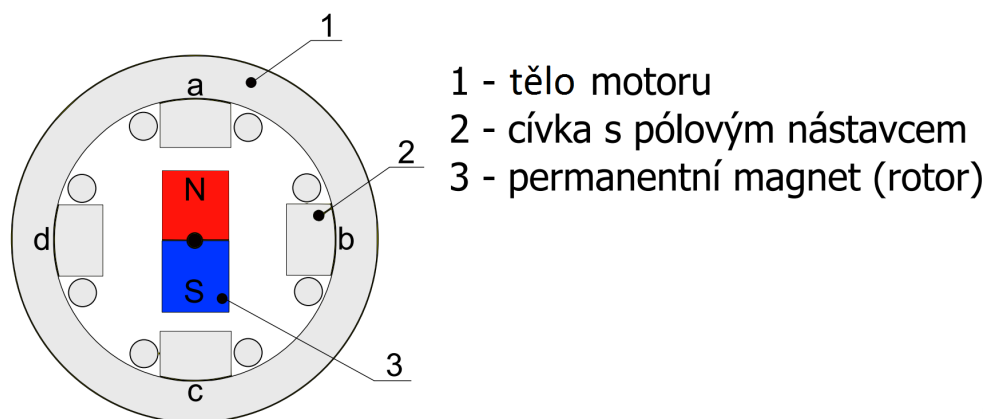
pozice	Hall A	Hall B	Hall C	fáze A	fáze B	fáze C	spínače
1	1	0	0	+	-	0	Q1,Q5
2	1	1	0	0	-	+	Q3,Q5
3	0	1	0	-	0	+	Q3,Q4
4	0	1	1	-	+	0	Q2,Q4
5	0	0	1	0	+	-	Q2,Q6
6	1	0	1	+	0	-	Q1,Q6

Tab. 2.1: Tabulka spínání jednotlivých fází na základě signálů z Hallových sond.

2.3 Krokový motor

Stejně jako u předcházejícího typu se jedná o synchronní motor napájený stejnosměrným proudem. Vyznačuje se nespojitým pohybem a to především při nízkých rychlostech. V závislosti na konstrukci může zaujímat konečný počet definovaných poloh. Podobně jako u bezkartáčového stejnosměrného motoru je i u krokového motoru nutné zajišťovat komutaci pomocí řídicí elektroniky. Spínáním cívek v určité sekvenci dochází k roztočení rotoru motoru v jednom či druhém směru. Na rozdíl od BLDC motoru má krokový motor daleko více kroků na jednu otáčku.

Čtyřpólový krokový motor s permanentním magnetem na rotoru a čtyřmi póly na statoru je nejnázornější, proto na něm bude popsán princip fungování. Na obrázku 2.13 je vidět uspořádání krokového motoru. Permanentní magnet (rotor) se natáčí k jednotlivým cívkám *a* až *d* díky magnetickému poli vzniklému protékajícím proudem danou cívkou. Rotor se natočí vždy tak, aby byl výsledný magnetický odpor (reluktance) co nejmenší.



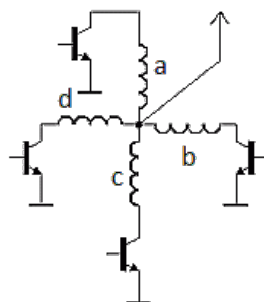
Obr. 2.13: Uspořádání krokového motoru s permanentním magnetem na rotoru.
(převzato z [2])

U běžných krokových motorů bývají vyvedeny všechny konce cívek (8 vývodů), na základě čehož si můžeme vybrat způsob zapojení a řízení, který nejlépe vyhovuje požadovaným provozním podmínkám. Můžeme se však setkat i s motory s 6-ti vývody (vždy 2 protilehlé cívky jsou spojeny uvnitř motoru a uzly vyvedeny ven), s 5-ti vývody (všechny 4 cívky jsou spojeny uvnitř motoru a uzel vyveden ven) a nebo se 4-mi vývody – pouze pro bipolární řízení (vždy 2 protilehlé cívky jsou spojeny uvnitř motoru, ale uzly nejsou vyvedeny ven), viz [2] a [6].

2.3.1 Unipolární zapojení

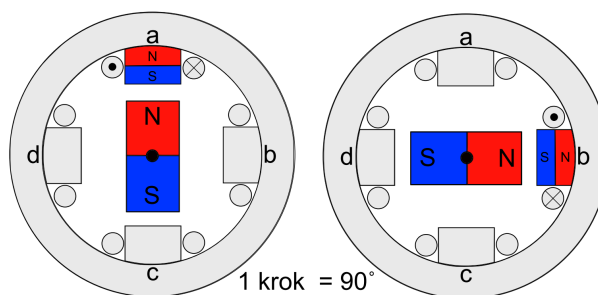
Na obrázku 2.14 je zjednodušené unipolární zapojení krokového motoru. Pro řízení nám stačí 4 spínací prvky. Při unipolárním zapojení může proud protékat cívkami pouze v jednom směru. Postupným spínáním jednotlivých cívek v určitém sledu se docílí otáčení

rotoru. V každém kroku lze spínat jednu (jednofázové řízení) nebo dvě (dvoufázové řízení) cívky podle požadovaného momentu. Je možno také kombinovat tyto dvě metody řízení a tím dosáhnout dvojnásobného počtu kroků na otáčku.



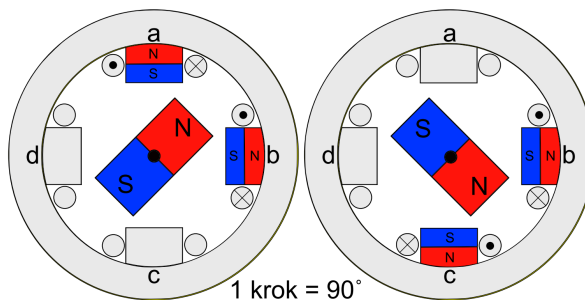
Obr. 2.14: Schéma unipolárního zapojení krokového motoru.
(převzato z [7])

Jednofázové řízení je velice jednoduché na realizaci, postupně se spínají jednotlivé cívky v opakující se sekvenci $a - b - c - d$ viz obrázek 2.15. Má to však nevýhodu – malý kroutící moment motoru.



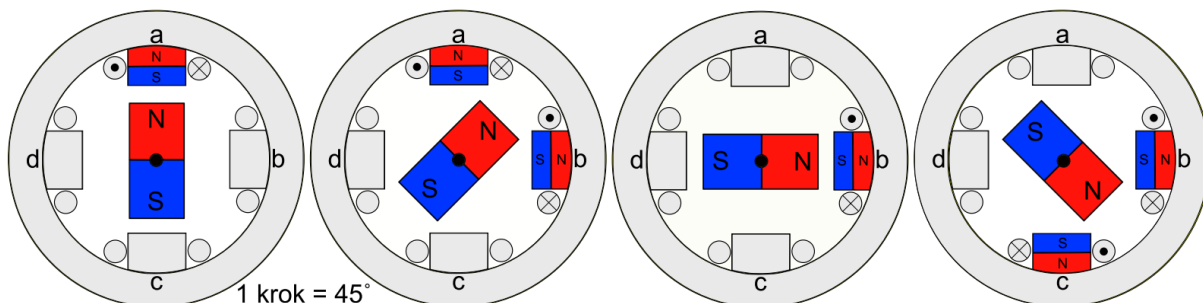
Obr. 2.15: Jednofázové řízení krokového motoru s plným krokem – unipolární zapojení.
(převzato z [2])

Spínáním vždy dvou sousedních cívek najednou v jednom kroku $ab - bc - cd - da$ dostaneme dvoufázové řízení (obrázek 2.16). Tento způsob je o něco složitější na řízení, motor při něm má vyšší spotřebu, zato větší kroutící moment.



Obr. 2.16: Dvoufázové řízení krokového motoru s plným krokem – unipolární zapojení.
(převzato z [2])

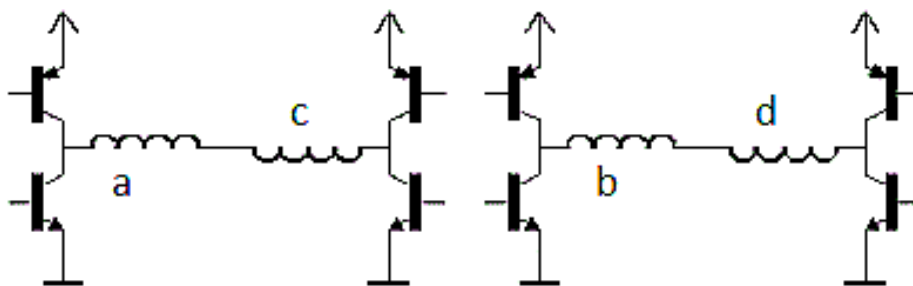
Kombinací předchozích dvou způsobů řízení lze dosáhnout dvojnásobného počtu kroků na otáčku – tím dvojnásobné přesnosti (obrázek 2.17). Sekvence pro spínání cívek je následující: $a - ab - b - bc - c - cd - d - da$. Moment motoru se při tomto typu řízení skokově mění při každém kroku mezi dvěma hodnotami, proto je třeba počítat s nižší z nich (stejnou jako u unipolárního řízení).



Obr. 2.17: Řízení krokového motoru s polovičním krokem – unipolární zapojení.
(převzato z [2])

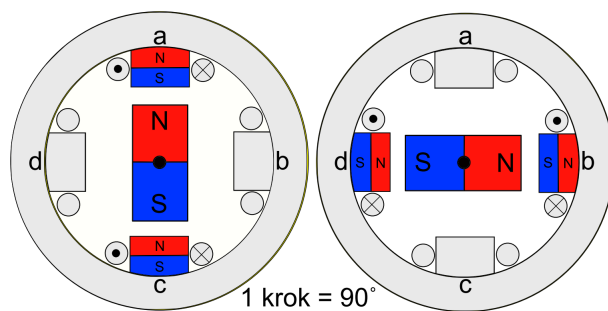
2.3.2 Bipolární zapojení

Při bipolárním řízení může protékat proud fázemi oběma směry. To zajišťuje buzení jednotlivých cívek pomocí H-můstek. Na obrázku 2.18 lze vidět způsob bipolárního zapojení krokového motoru, ze kterého je patrné, že se počet spínacích prvků (tranzistorů) oproti unipolárnímu zapojení zdvojnásobil na 8. Také narostl moment motoru, což umožní dosáhnout vyšších krokovacích frekvencí. Na druhou stranu došlo k zvýšení spotřeby motoru.

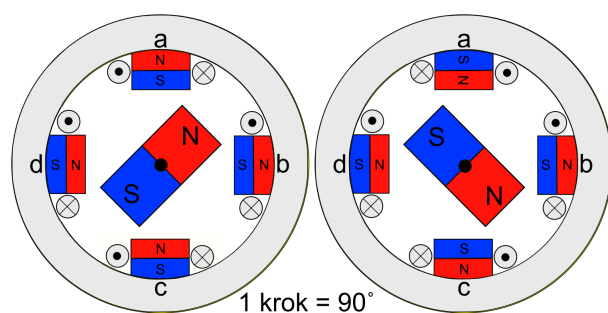


Obr. 2.18: Schéma bipolárního zapojení krokového motoru.
(převzato z [7])

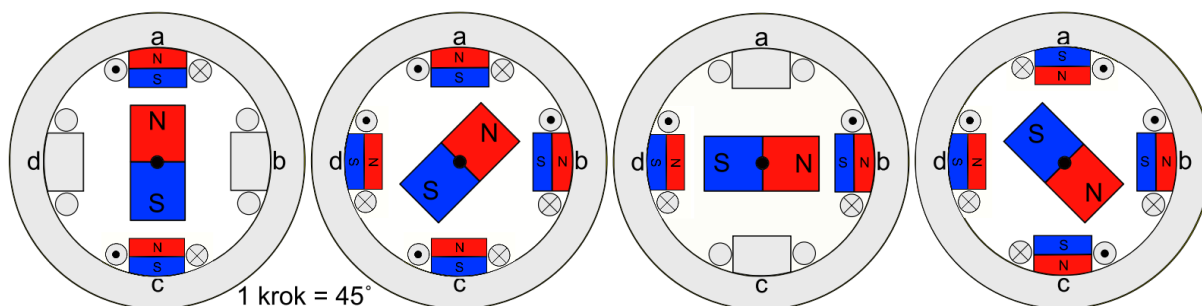
Opět lze aplikovat všechny možnosti řízení z předchozí kapitoly – jednofázové s plným krokem, dvoufázové s plným krokem a nebo kombinované s polovičním krokem. Jednotlivé schémata a sekvence těchto způsobů řízení je možno vidět na obrázcích 2.19, 2.20 a 2.21.



Obr. 2.19: Jednofázové řízení krokového motoru s plným krokem – bipolární zapojení.
(převzato z [2])



Obr. 2.20: Dvoufázové řízení krokového motoru s plným krokem – bipolární zapojení.



Obr. 2.21: Řízení krokového motoru s polovičním krokem – bipolární zapojení.

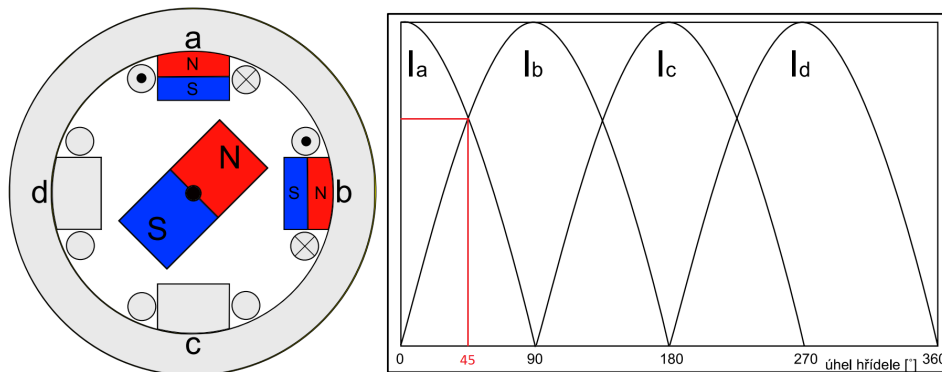
2.3.3 Mikrokrokování

Běžně dostupné krokové motory mají na otáčku 50, 100 nebo nejčastěji 200 kroků. Díky jednoduššímu řízení s polovičním krokem lze počet kroků na otáčku zdvojnásobit. Při rychlejší otáčce nemusí být krokování vůbec patrné. Co když však vyžadujeme menší rychlost a vyšší přesnost? Úhel jednoho kroku 1,8° (popřípadě 0,9°) může být pro určité aplikace příliš velký. Při pomalém chodu motoru jsou kroky patrné a mnohdy nežádoucí až rušivé. Vzniká tak kmitavý pohyb, který může rozvibrovat celou konstrukci stroje.

Výroba motoru s více kroky na otáčku by byla daleko obtížnější a finančně náročnější,

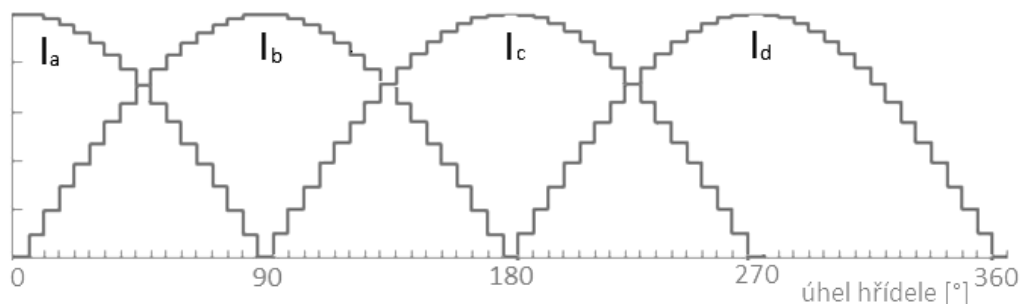
proto se využívá tzv. mikrokrokování (microstepping). Tento způsob řízení lze aplikovat jak na unipolární, tak na bipolární zapojení. Jejich výhody a nevýhody zůstávají stejné, jako u řízení s plným (polovičním) krokem. V následujícím odstavci bude vysvětlen princip na unipolárním zapojení motoru.

Mikrokrokování využívá „virtuálních“ kroků mezi dvěma plnými kroky. Toho se docílí tak, že do cívek se nebude pouštět pouze plná hodnota proudu, ale sinusový průběh (viz obrázek 2.22). Tím, že na jedné cívce proud klesá a zároveň na sousední narůstá, bude se měnit rozložení výsledného magnetického pole a rotor se plynule natočí od jednoho pólu k druhému.



Obr. 2.22: Princip krokového motoru s grafem průběhů proudů v jednotlivých cívkách. (převzato z [2])

Díky sinusovým průběhům proudů na jednotlivých cívkách lze dosáhnout zcela hladkého otáčení motoru. Ve většině případů se však motory řídí pomocí pulsně šířkové modulace generované z mikrokontroleru. Sinusový průběh je nutné diskretizovat několika kroky, nejčastěji 16, 32 nebo i více hodnotami, čímž se několikanásobně zmenší velikost kroku a tím je plynulost otáčení motoru pro většinu případů dostačující. Obrázek (2.23) znázorňuje aproximovaný průběh sinusových proudů jednotlivými cívkami. Jeden krok motoru je zde rozdělen na 16 mikrokroků.



Obr. 2.23: Diskretizovaný průběhů proudů při mikrokrokování.

3 ŘÍZENÍ A REGULACE

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2, řízení motorů může probíhat několika způsoby v závislosti na aplikaci, pro kterou je daný pohon využit.

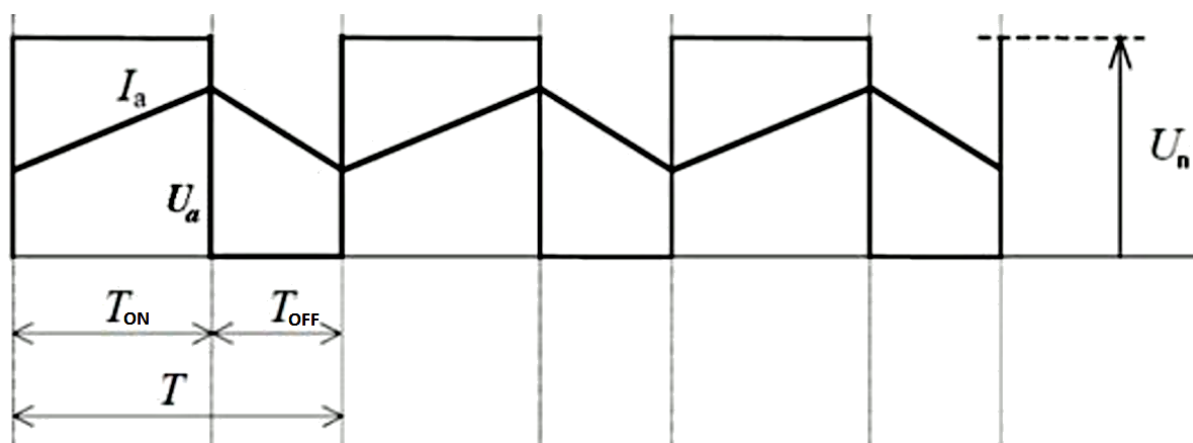
U krokového motoru je řízení velice jednoduché. Postupným spínáním vinutí se motor roztočí a jeho rychlost otáčení závisí na rychlosti přepínání kroků sekvence. Požadovanou pozici natočení rotoru jsme schopni dosáhnout díky známému počtu kroků na 1 otáčku a počítáním jednotlivých kroků.

O něco složitěji probíhá regulace stejnosměrných kartáčových a bezkartáčových motorů. Oba typy motorů mají způsob řízení totožný a můžeme jej rozdělit do následujících skupin:

- řízení bez zpětné vazby
- zpětnovazebné řízení
 - regulace proudu
 - regulace rychlosti
 - regulace polohy

3.1 Řízení bez zpětné vazby

Regulace bez zpětné vazby, neboli také bezsenzorová regulace, se považuje za nejjednodušší typ řízení. Rychlost otáčení motoru bez zátěže je přímo úměrná velikosti připojeného napětí. Díky této závislosti můžeme jednoduše změnou napájecího napájení řídit otáčky motoru. V praxi se k nastavení požadovaného napětí využívá procesorem generovaný PWM¹ signál, který ovládá výkonové spínací prvky. Poměrem doby zapnutí (T_{ON}) a vypnutí (T_{OFF}) jsme schopni docílit požadované střední hodnoty napětí. Trojúhelníkový průběh proudu je dán vysokou indukčností vinutí rotoru.



Obr. 3.1: Průběh napětí a proudu vinutím motoru.

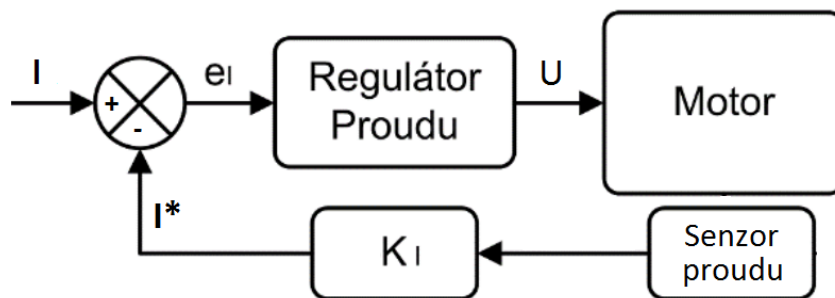
¹PWM (Pulse Width Modulation) – Pulsní šířková modulace

Výhodou tohoto typu regulace je její jednoduchost a cenová přístupnost – není třeba k motoru připojovat žádný senzor. To má ovšem i jisté nevýhody. Není možné řídit rychlost motoru s proměnnou zátěží, jelikož otáčky jsou závislé právě na velikosti zátěže. Při větším zatížení motoru (popřípadě jeho zaseknutí) dochází k výraznému poklesu rychlosti (může dojít až k zastavení). Tím dojde i k nárůstu protékajícího proudu, který může vinutí poškodit.

3.2 Zpětnovazebné řízení

Zpětnovazebná regulace probíhá ve zpětnovazební uzavřené smyčce, kdy do regulátoru přivedeme patřičnou regulační odchylku, tj. rozdíl požadované a měřené hodnoty. Pro regulaci se může využít různých typů regulátoru, nejčastěji to ovšem bývá Proporcionálně-Integračně-Derivační (PID) regulátor nebo některá z jeho odvozených verzí.

Základním zpětnovazebním regulátorem je regulátor proudu (obrázek 3.2), který pomocí senzoru snímá proud tekoucí vinutím motoru a změnou napětí na motoru zajišťuje, aby nepřekročil požadovanou hodnotu. Jelikož proud závisí přímo úměrně na kroutícím momentu, tento typ řízení bývá někdy nazýván jako regulátor momentu.



Obr. 3.2: Schéma regulátoru proudu.

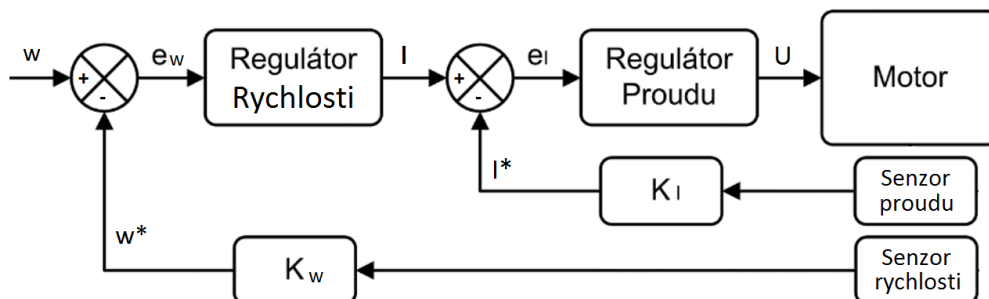
- I žádaný proud
- I^* měřený proud
- e_I regulační odchylka
- U akční zásah.

Pro měření proudu existuje několik metod. První z nich – pomocí LEM² čidla. Senzor se skládá z toroidu se vzduchovou mezerou, do které je vložen Hallův článek. Toroidem je provlečen vodič s protékajícím měřeným proudem. Magnetická indukce ve vzduchové mezeře vyvolá napětí na výstupu Hallova článku. Toto napětí přímo úměrně závisí na magnetické indukci a tedy i proudu.

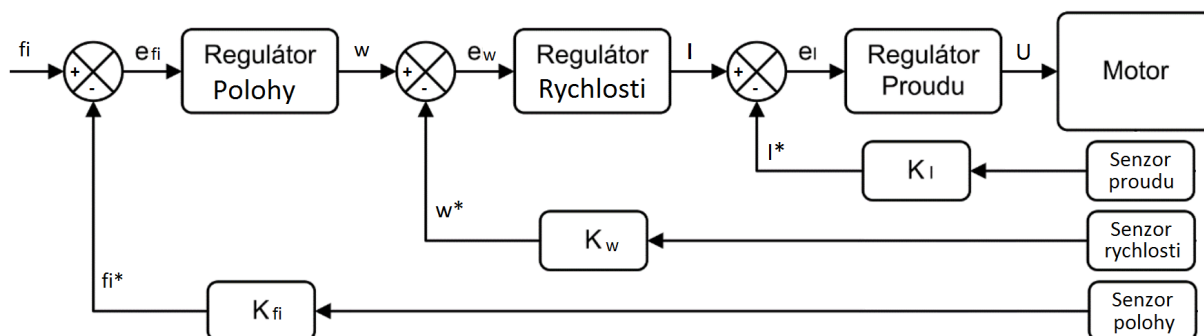
Druhá možnost – použití bočnicku. Bočník (rezistor) je zapojen sériově k vinutí motoru, aby přes něj tekla stejně velká síla jako přes motor. Na rezistoru kvůli procházejícímu proudu vznikne úbytek napětí, který je díky Ohmově zákonu přímo úměrný proudu.

²LEM (Liaisons Electroniques-Mécaniques)

Dalšími typy regulátorů jsou rychlostní a polohový. Jak můžete vidět na obrázcích 3.3 a 3.4, regulátory se často zapojují kaskádně za sebe. Podřízená proudová smyčka u rychlostního regulátoru slouží k eliminaci proudových špiček při rychlých změnách rychlosti. Podobně je tomu i u polohového regulátoru, u kterého ještě navíc rychlostní smyčka reguluje velké změny požadované polohy.



Obr. 3.3: Schéma regulátoru rychlosti.

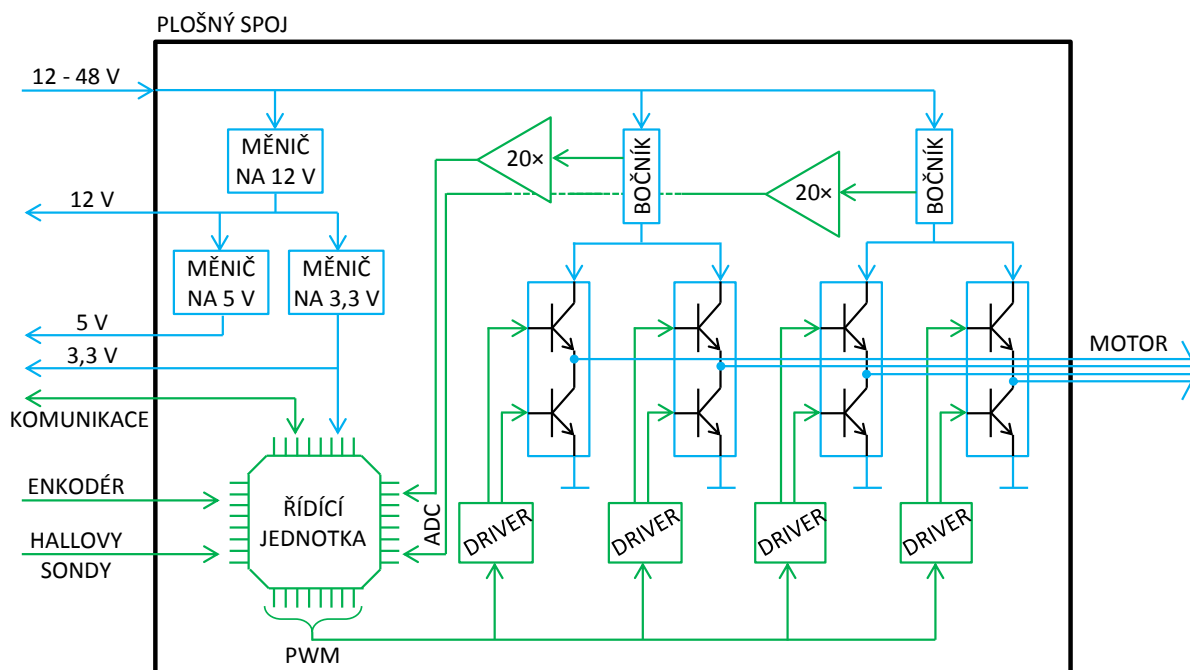


Obr. 3.4: Schéma regulátoru polohy.

Pro získávání informací o rychlosti otáčení se využívá např. tachodynamo, k určení polohy to může být rotační enkodér nebo resolver. V praxi je většinou dostačující použití pouze jednoho snímače, enkodéru, s tím, že se rychlost dopočítá pomocí diskretní časové derivace.

4 HARDWARE

Nejdůležitější pro následnou realizaci samotné řídicí jednotky je návrhí vhodné topologie a výběr patřičných součástek na základě požadovaných parametrů. Obrázek 4.1 zobrazuje tento zjednodušený návrh. Lze vidět barevné rozdělení výkonové (modré) a signálové (zelené) části řídicí jednotky. Oddělení těchto dvou částí je vhodné, aby nedocházelo k nežádoucím rušivým jevům. V následujících podkapitolách budou popsány vybrané základní součástky.



Obr. 4.1: Topologie řídicí jednotky.

4.1 Řídicí mikrokontrolér

Ze schématického návrhu topologie řídicí jednotky (na obrázku 4.1) je patrné, jaké signály musí mikrokontrolér zpracovávat. Při jeho výběru bylo třeba vzít v úvahu následující kritéria:

- dva A/D převodníky s dostatečnou vzorkovací frekvencí a rozlišením,
- generování PWM signálu na osmi výstupech,
- alespoň pět vstupů s přerušením pro připojení enkodéru a Hallových sond,
- několik časovačů pro řídicí smyčky,
- sériová komunikace – USART¹,
- dostatečná taktovací frekvence procesoru pro bezchybné a rychlé řízení.

Existuje několik výrobců mikrokontrolérů (Atmel, Microchip, Freescale aj.) a každý z nich vyrábí nespočet typů splňující předešlé požadavky. Na základě vyhovujícím para-

¹USART (Universal Synchronous and Asynchronous Receiver and Transmitter)

metrům a dřívějším zkušenostem s programováním mikroprocesorů od společnosti Atmel byl vybrán model ATxmega32D4 vyráběný právě touto společností.

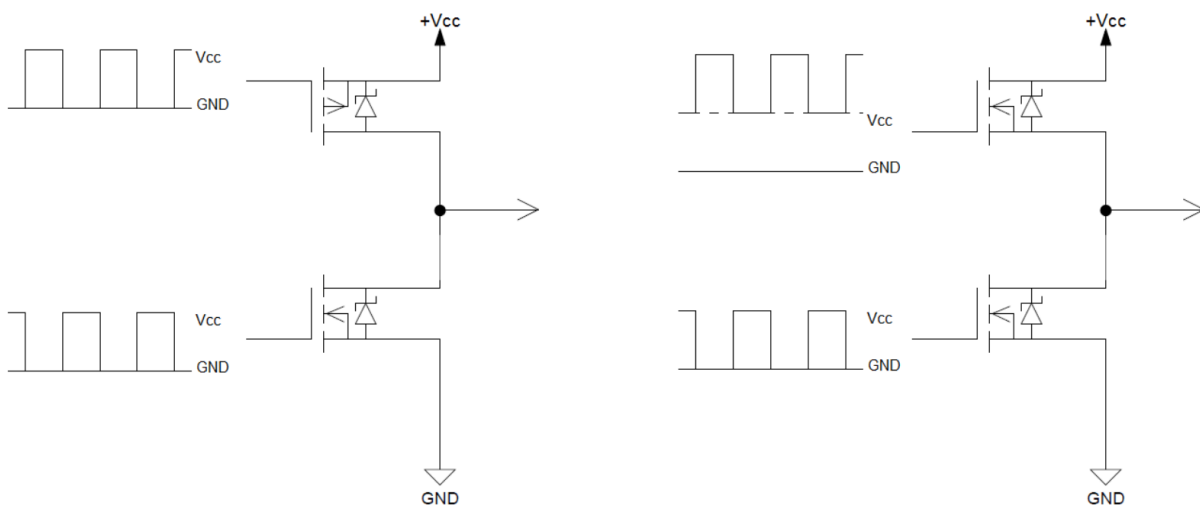
A/D převodník zvoleného mikrokontroléru má rychlost 200 kSPS (200 tisíc vzorků za sekundu) při 12-bitovém rozlišení. Taková rychlost i rozlišení 2^{12} (tj. 4096 hodnot) vyhovuje. Počet vstupních pinů dostačuje a navíc má procesor takzvaný „event system“ pro dekódování kvadratického signálu. Ten je vhodný pro připojení enkodéru, aby bylo bezpodmínečně zaručeno zaznamenání všech pulzů i při vyšších rychlostech otáčení motoru (enkodéru).

Mezi další potřebné periferie patří čtyři 16-bitové časovače / čítače, sériová komunikace (USART) a možnost generování PWM signálu na celém portu (osmi výstupních pinech). Dostačující výkon procesoru zajišťuje jeho taktovací frekvence 32 MHz. Více informací možno nalézt v [8].

4.2 Výkonové spínací prvky

Aby bylo možné motory řídit pomocí mikrokontroléru, je nutné převádět tyto řídicí signály na výkonové. K tomuto účelu slouží výkonové tranzistory, které jsou uspořádány do takzvaného H-můstku.

Existují dva typy tranzistorů, s P kanálem a s N kanálem, i dvě konfigurace H-můstku a jeho spínání. První možností je použití spodního tranzistoru typu N a horního typu P. Toto provedení nevyžaduje složitý způsob řízení, nevýhodou jsou horší vlastnosti horního tranzistoru (především jeho vyšší odpor v sepnutém stavu). Obrázek 4.2 vlevo znázorňuje zapojení polovičního H-můstku s potřebným budícím napětím.



Obr. 4.2: Konfigurace H-můstku s průběhy řídicích signálů.
(převzato z [5])

Další možností je použití pouze tranzistorů typu N – k vidění na obrázku 4.2 vpravo. Toto řešení se vyznačuje velmi nízkými ztrátami v sepnutém stavu, vyžaduje ovšem speciální buzení. Horní tranzistor ke svému sepnutí potřebuje vyšší napětí než je napájecí

napětí. K tomuto spínání se využívá speciální budič horního tranzistoru s integrovaným zvyšovačem napětí, pomocí tzv. „bootstrap“ kondenzátoru připojenému ke středu polomostu. Po vybití tohoto kondenzátoru dojde opět k vypnutí horního tranzistoru, což neumožňuje jeho kontinuální sepnutí. Více informací možno nalézt v [5].

Pro vyvíjenou řídicí jednotku byla vybrána druhá varianta pouze s tranzistory typu N a výkonovým budičem. Konkrétně MOS-FET² tranzistory BSZ110N08NS5 od společnosti Infineon a budič horního a dolního tranzistoru v jednom pouzdře IR2101SPBF od téže společnosti. Základní parametry vybraného MOS-FET tranzistoru jsou vypsány v následující tabulce 4.1 a podrobnější informace jsou v [9].

parametr	max. hodnota
typ tranzistoru	MOS-FET s N kanálem
napětí drain-source	$V_{DS} = 80 \text{ V}$
proud drainu	$I_D = 40 \text{ A}$
odpor v sepnutém stavu	$R_{DS(on)} = 11 \text{ m}\Omega$
ztrátový výkon	$P_{tot} = 50 \text{ W}$

Tab. 4.1: Parametry vybraného MOS-FET tranzistoru.

Každý z požadovaných motorů využívá jiný počet spínacích tranzistorů, viz tabulka 4.2. Ve výsledku bylo tedy použito dvou plných H-můstek pro umožnění řízení všech tří typů motorů.

typ motoru	počet H-můstek
DC motor	1
BLDC motor	1,5
krokový motor	2

Tab. 4.2: Počet potřebných H-můstek k řízení různých motorů.

4.3 Měření proudu

Pro zpětnovazebné řízení motoru je nutné znát proud procházející jeho vinutím. K měření proudu byla zvolena méně přesná, ale levnější a jednodušší varianta pomocí bočníku.

Do cesty proudu procházejícího motorem je připojen rezistor, na kterém vzniká úbytek napětí. Toto napětí přímo úměrně závisí na proudu, který požadujeme. Lze ho tedy jednoduše dopočítat pomocí Ohmova zákona:

$$U = R \cdot I. \tag{4.1}$$

²Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

Je vhodné, aby napětí bylo co nejmenší (ale ne příliš), aby co nejméně ovlivňovalo zbytek obvodu, a aby na odporu nevznikal příliš velký ztrátový výkon. Nižší napětí se posléze jednoduše zesílí operačním zesilovačem a přivede na 12-bitový A/D převodník mikrokontroléru. Velké zesílení není vhodné, jelikož dochází i k zesilování šumu a to vede k zanesení chyby do měření. V našem případě byl použit dvacetinásobný zesilovač MAX4080 od společnosti Maxim Integrated.

Ztrátový výkon lze vypočítat pomocí vztahu 4.2 (popř. upraveného přímo pro ztráty na odporu – vztah 4.3). Tento výkon nesmí být vyšší než maximální ztrátový výkon odporu, který je dán výrobcem.

$$P = U \cdot I, \quad (4.2)$$

$$P = R \cdot I^2, \quad (4.3)$$

kde:

- I protékající proud,
- U úbytek napětí,
- P ztrátový výkon,
- R velikost odporu.

Aby bylo možné měřit proud v celém rozsahu (0 až 35 A) s dostatečnou přesností, bylo třeba zvolit různé měřicí rezistory pro jednotlivé části tohoto intervalu. Celý proudový rozsah byl rozdělen na 5 menších intervalů a pro každý z nich byl vybrán nejvhodnější odpor. Toto rozdělení shrnuje tabulka 4.3.

max. proud [A]	odpor [$m\Omega$]	ztrátový výkon [W]	max. ztrát. výkon [W]
1,8	68	0,22	3
4	30	0,48	3
8	15	0,96	3
17,5	7	2,14	3
35	3,5	4,29	6 (dva paralelně)

Tab. 4.3: Rozdělení proudového rozsahu a přiřazení vhodných odporů.

Pro výpočet velikosti odporu každého intervalu byl využit upravený vztah Ohmova zákona, kde referenční napětí A/D převodníku $U_{REF} = 2,5 V$ a zesílení operačního zesilovače $K = 20$:

$$R = \frac{U_{REF}}{\frac{K}{I}}. \quad (4.4)$$

4.4 Komunikace

Je nezbytné, aby řídicí jednotka mohla komunikovat s nadřízeným počítačem. Ve společnosti Coconut Systems se hojně využívá sériového rozhraní USART a komunikačního protokolu RS-485 u již dříve vyrobených zařízení. Byla tedy požadována kompatibilita a použití tohoto způsobu propojení i u této řídicí jednotky.

U vybraného mikrokontroléru lze rovněž využít sériovou komunikaci. Je to jedna z jeho periférií. Na rozdíl od vyžadovaného standardu RS-485, používá RS-232, proto byl do obvodu přidán převodník MAX1486 vyráběný společností Maxim.

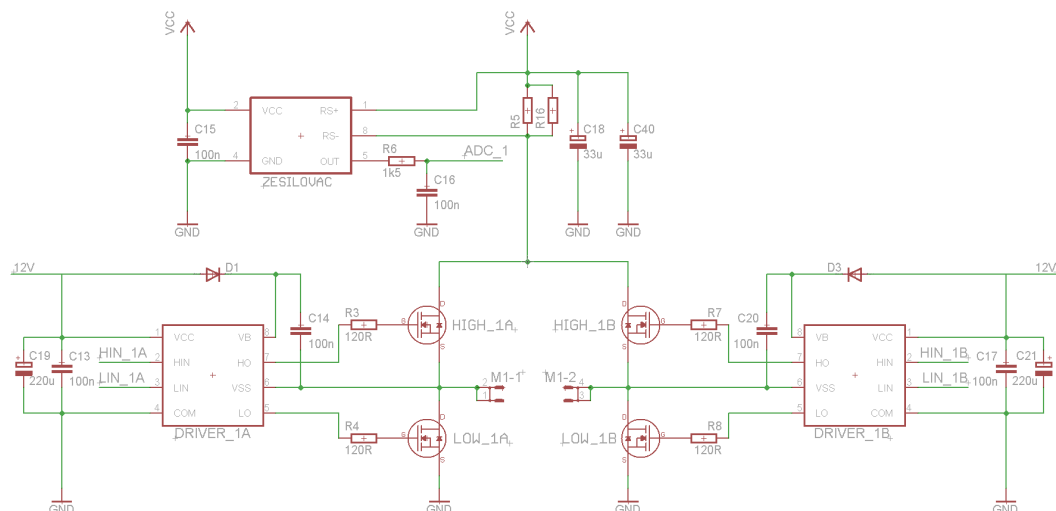
Výhodou používaného standardu je především možnost komunikace na mnohem větší vzdálenost než u RS-232 a to kvůli diferenciálnímu zapojení jednotlivých vodičů. Druhou podstatnou výhodou je možnost propojení více zařízení (až 32) s tím, že musí být zajištěno, aby více zařízení nevysílalo najednou.

4.5 Deska plošných spojů

Před návrhem samotné desky plošných spojů (DPS) bylo nutné vytvořit schéma zapojení jednotlivých součástek. K tomu byl využit software EAGLE. Schéma i navržená deska jsou zařazeny do příloh.

4.5.1 Návrh schématu

Vzhledem k tomu, že je návrh schématu rozsáhlý, obrázek 4.3 ukazuje jeho část. Konkrétně zapojení plného H-můstku se spínači jednotlivých MOS-FET tranzistorů. Vodiče „HIN_1A“, „LIN_1A“, „HIN_1B“ a „LIN_1B“ jsou připojeny na PWM výstupy z mikrokontroléru. Dále lze vidět bočník (paralelní zapojení odporů „R5“ a „R16“), na kterém při průchodu proudu vzniká úbytek napětí. Toto napětí je následně zesíleno a pomocí vodiče „ADC_1“ přivedeno na A/D převodník mikroprocesoru.

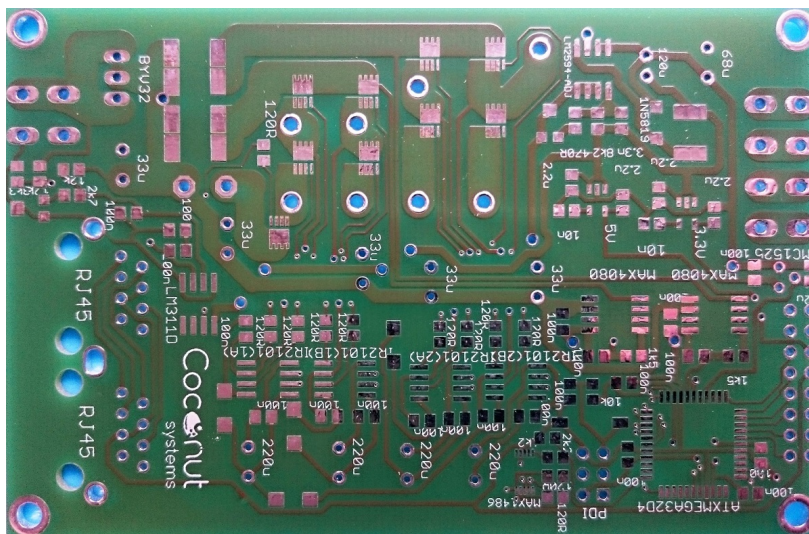


Obr. 4.3: Schéma zapojení jednoho plného H-můstku.

4.5.2 Výroba DPS

Freewarová verze zmiňovaného programu pro návrh DPS, EAGLE, má dvě podstatná omezení, jedná se o velikost desky (maximálně 100×80 mm) a o počet vrstev desky (nejvíce dvě). Popisovaný návrh DPS není větší než uvedený rozměr a využívá právě dvě vrstvy.

Jelikož je potřeba na desku osadit mnoho SMD³ součástek, byla zvolena metoda osazování pomocí pájecí pasty. Ta spočívá v nanesení malé vrstvy speciální pasty na pájené plošky. Tento krok byl proveden pomocí laserem vyřezané šablony do fólie. Následně byly na tyto plošky rozmístěny jednotlivé SMD součástky. Poté byla deska zahřáta na požadovanou teplotu, čímž se pájecí pasta přetavila. Nakonec byly zapájeny zbylé vývodové součástky a konektory.



Obr. 4.4: Vyrobena deska plošných spojů.

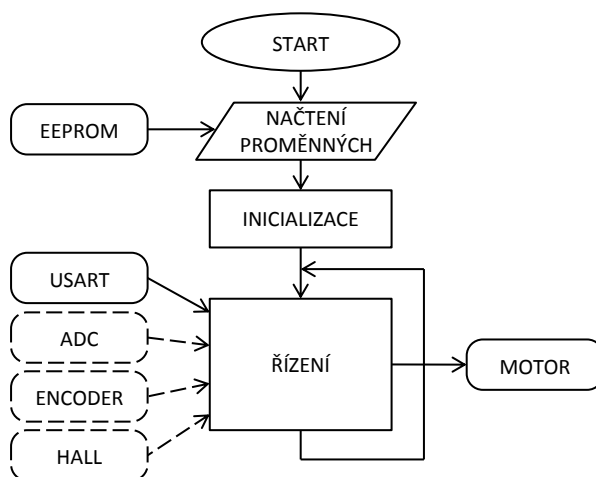
³SMD (Surface Mount Device) – povrchově montované součástky

5 SOFTWARE MIKROKONTROLÉRU

Jak už je zmíněno v kapitole 4, hlavním řídicím prvkem celé jednotky byl zvolen 8-bitový mikrokontrolér ATxmega32D3 od společnosti Atmel. Pro tvorbu programu posloužil software Atmel Studio, který vyvíjí taktéž společnost Atmel – především pro programování vlastních mikrokontrolérů. Program byl napsán programovacím jazykem C.

Nejprve byl pro každý typ motoru proveden vývoj řídicího programu zvlášť. Posléze byly jednotlivé části sloučeny, aby bylo řízení univerzální pomocí jednoho mikroprocesoru.

Na obrázku 5.1 lze vidět zjednodušený vývojový diagram řídicího programu. Po startu proběhne načtení proměnných a následně inicializace potřebných funkcí pro řízení zvoleného typu motoru a požadovaného způsobu řízení.



Obr. 5.1: Vývojový diagram řídicího programu.

5.1 Trvalá paměť – EEPROM

Důležitou požadovanou vlastností řídicí jednotky je pamatování si konfiguračních parametrů i při odpojení napájení. Je potřeba, aby po znovupřipojení napájecího konektoru bylo možné obnovit stav před jeho odpojením.

Proměnné se běžně při programování ukládají do volatilní operační paměti – SRAM¹, která po vypnutí napájení ztratí svůj obsah. Je třeba využít trvalou paměť – EEPROM². Ta sice není vhodná pro časté zapisování kvůli nižší rychlosti zápisu, ale zato uchová data i po odpojení od elektrické energie. Některé proměnné se tedy ukládají do této trvalé paměti, například: typ motoru, způsob řízení, velikost měřícího odporu, konstanty regulátorů a několik dalších. V následující ukázce lze vidět inicializaci, zápis a čtení proměnné v trvalé paměti EEPROM.

```
uint8_t EEMEM EEPROM_motor_type;  
eeprom_write_byte(&EEPROM_motor_type, motor_type);  
motor_type = eeprom_read_byte(&EEPROM_motor_type);
```

¹SRAM (Static Random Access Memory)

²EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory)

5.2 Řízení

Jak již bylo popsáno v kapitolách 2 a 3, každý z typů motorů lze řídit několika různými způsoby. Všechny popisované možnosti jsou implementovány do řídicího programu tak, aby si uživatel mohl jednoduše vybrat tu požadovanou.

5.2.1 DC motor

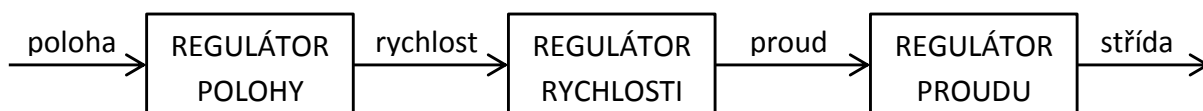
Nejjednodušší způsob řízení stejnosměrného motoru je regulací napětí. Změnou střídy PWM signálu se mění střední hodnota napětí na motoru, která je úměrná jeho rychlosti otáčení.

O něco složitější jsou zpětnovazebné regulátory popisované v kapitole 3. Ať už se jedná o proudovou, rychlostní nebo polohovou řídicí smyčku, vždy je potřeba znát aktuální velikost řízené veličiny. Zvolený PI (proporcionálně-integrační) regulátor se snaží docílit ideálně nulového rozdílu mezi měřenou a požadovanou veličinou. Následuje ukázka proudové regulační smyčky:

```
1 // inicializace a definice promennych
2 int16_t pozadovany_proud = 50;
3 int16_t adc_result = 0, odchylka = 0, ;
4 int32_t sum_odch = 0;
5 double P_i = 0.04, I_i = 0.02;
6
7 // regulacni odchylka
8 odchylka = pozadovany_proud - adc_result;
9
10 // pricitani regulacni odchylky do integracni slozky
11 sum_odch += odchylka;
12
13 // omezeni pretečení integracni slozky
14 if (sum_odch > 30000) sum_odch = 30000;
15 else if (sum_odch < -30000) sum_odch = -30000;
16
17 // vypocet akcniho zasahu - stridy PWM signalu
18 strida = (odchylka*P_i) + (sum_odch*I_i);
19
20
21 // zajisteni kladne stridy i pri zmene smeru otaceni
22 if(pozadovany_proud < 0) strida = -strida;
23
24 // normovani akcniho zasahu - strida ma rozsah <0;100)
25 if (strida > 99) strida = 99;
26 else if (strida < 0) strida = 0;
27
28 // zapsani hodnoty stridy do registru
29 TCC0.CCA = strida;
30 TCC0.CCB = strida;
```


Ve smyčce probíhá již dříve zmiňovaná PI regulace proudu. Hned z počátku se počítá regulační odchylka jako rozdíl požadované a změřené hodnoty proudu (viz řádek 8). Integrátor představuje proměnná *sum_odch*, do které se v každém kroku přičítá právě vypočtená regulační odchylka. Poslední část samotného regulátoru je výpočet akčního zásahu – střídy. Ten lze vidět na řádku 14 v předešlé ukázce. Díky konstantám P_i a I_i lze dosáhnout požadované rychlosti a přesnosti regulátoru. Zbytek kódu slouží už jen na saturování hodnot proměnných, aby se nedostaly mimo rozsah, nebo aby nedošlo k jejich přetečení. Na konci se proměnná *strida* zapíše do příslušných registrů tak, aby se změnila střída generované pulsní šířkové modulace.

Regulace otáček a polohy pracují podobně. Jsou však založeny na principu kaskády. To znamená, že například polohová regulační smyčka se skládá ze všech tří regulátorů (proudového, rychlostního a polohového), které jsou zapojeny kaskádně za sebou. Do polohové regulační smyčky vstupuje požadovaná pozice. Díky známé poloze měřené enkodérem se spočítá regulační odchylka a regulátor poté dopočítává akční zásah – rychlost otáčení motoru. Tato akční veličina je následně vstupem do podřízené rychlostní smyčky. Výstupem z ní je proud, který vstupuje do poslední úrovně, tedy regulace proudu popsané v předchozím odstavci (viz obrázek 5.2)



Obr. 5.2: Změny regulačních veličin u kaskádní regulace polohy.

Všechny regulační smyčky běží neustále dokola. Každá z nich má jinou frekvenci opakování. Jelikož se elektrické veličiny mění daleko rychleji než mechanické, byla vybrána regulace proudu jako ta nejrychlejší. Každý další nadřazený regulátor v kaskádě byl zvolen $10\times$ pomalejší než podřízený. Konkrétní frekvence jednotlivých regulátorů lze nalézt v následující tabulce 5.1.

regulační smyčka	frekvence [Hz]
proudová	4000
rychlostní	400
polohová	40

Tab. 5.1: Frekvence jednotlivých regulačních smyček.

Jak již bylo zmíněno výše, každý regulátor potřebuje znát aktuální velikost řízené veličiny. Měření proudu zajišťuje A/D převodník mokrokontroléru, na který je přivedeno zesílené napětí z měřícího bočníku. Hodnota převodu je poté přepočtena na odpovídající velikost proudu:

$$I = \frac{ADC \cdot U_{REF}}{K \cdot R} \cdot \frac{N}{N}, \quad (5.1)$$

kde:

I	měřený proud,
ADC	hodnota A/D převodníku,
$N = 2^{12}$	rozlišení A/D převodníku,
$U_{REF} = 2,5 \text{ V}$	referenční napětí A/D převodníku,
$K = 20$	zesílení operačního zesilovače,
$R = \{68; 30; 15; 7; 3, 5\} \text{ m}\Omega$	velikost měřicího odporu.

Pro měření polohy a rychlosti se používá rotační enkodér. Kvadrurní signál z něj následně zpracovává již předdefinovaná funkce mikrokontroléru. Z naměřených impulzů a známého počtu pulzů na otáčku se jednoduše spočítá aktuální úhel natočení. Ke zjištění rychlosti otáčení se využívá diskretní časové derivace polohy.

5.2.2 BLDC motor

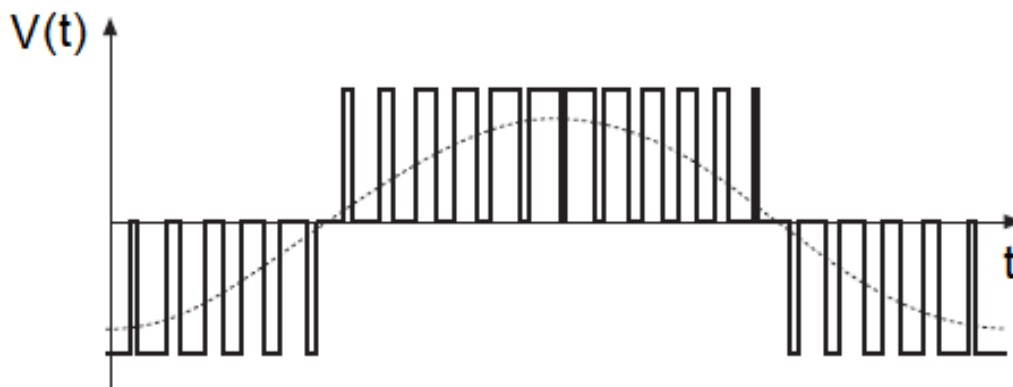
Řízení bezkartáčového stejnosměrného motoru probíhá téměř stejně jako kartáčového. Rozdíl spočívá pouze ve čtení proudu. Jelikož je ke každému plnému H-můstku připojen jeden měřicí rezistor, vzniká nutnost přepínat vstupy A/D převodníku podle aktivní fáze bezkartáčového motoru.

Paralelně s řídicí funkcí ještě musí probíhat komutace. Podle signálů z Hallových sond jsou přepínány jednotlivé fáze, viz popis v kapitole 2.

5.2.3 Krokový motor

K řízení polohy a rychlosti krokového motoru není třeba žádného regulátoru. Polohu lze nastavit přesným odpočítáním kroků a rychlost otáčení změnou frekvence krokování. Je zde implementován pouze regulátor omezení proudu, aby nedošlo k jeho překročení a následnému poškození vinutí motoru. Jelikož je využito i tzv. mikrokrokování, mají proudy jednotlivých cívek sinusový průběh. Z toho důvodu vzniká požadavek na měření proudu vždy v pozici maxima (na začátku nebo na konci plného kroku).

Mikrostepping slouží především pro přesnější řízení a plynulejší chod motoru při nižších rychlostech. Pro docílení sinusového průběhu proudu se používá sinusově proměnná střída pulsní šířkové modulace. Tento PWM signál je zjednodušeně znázorněn na obrázku 5.3. Aby byl ušetřen výpočetní čas a díky periodické vlastnosti funkce sinus, mohl být její průběh diskretizován. Na jedné čtvrtině periody bylo definováno 19 vzorků. To znamená, že jeden plný krok byl rozdělen na 19 mikrokroků.

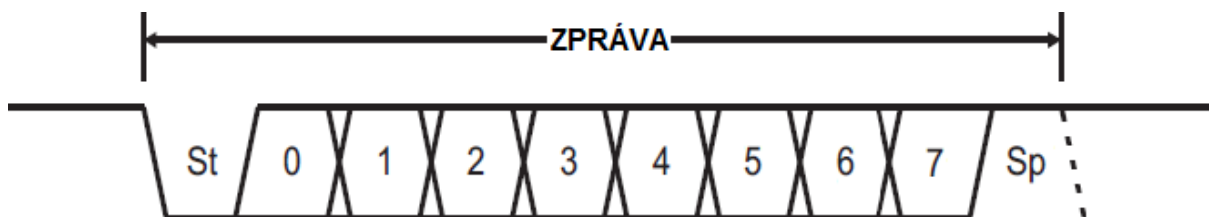


Obr. 5.3: Sinusově se měnící střída PWM signálu.

5.3 Komunikace

Komunikace probíhá přes sériové rozhraní USART. K přijímání a odesílání dat slouží dva piny na mikrokontroléru (RX – příjem a TX – vysílání).

Pro přijetí zprávy slouží vytvořená funkce, která vyvolá přerušení vždy, když jsou v příchozí paměti nepřechtená data. Formát komunikace lze vidět na obrázku 5.4. Po počátečním „start bitu“ (St) následuje 8 datových bitů (0 až 7) a zpráva je ukončena „stop bitem“ (Sp). Osm datových bitů představuje jeden znak z ASCII³ tabulky.



Obr. 5.4: Formát zprávy přijaté/odeslané přes sériovou linku.

Konkrétní parametry komunikace pomocí sběrnice USART specifikuje následující tabulka 5.2.

vlastnost	hodnota
rychlost	9600 bit/s
datové bity	8
parita	žádná
počet „stop bitů“	1
řízení toku	žádné

Tab. 5.2: Nastavení komunikace pomocí sběrnice USART.

³ASCII (American Standard Code for Information Interchange)

Celá zpráva (příkaz pro mikrokontrolér) je složena z několika znaků. Na první pozici se nachází identifikátor, který v případě více propojených jednotek zajišťuje komunikaci pouze s jednou. Dále následuje hlavní znak, který definuje prováděnou akci (například změnu některého parametru). Za tímto znakem může následovat číselná hodnota (hodnota zvoleného parametru). Ukončení provádí znak pro nový řádek (\n). Kompletní příkaz může mít například následující tvar: „AQ1\n“. Tato zpráva je určena pro jednotku „A“ a požaduje změnit parametr „typ motoru“ na hodnotu „1“, což znamená nastavit řízení pro DC motor.

Řídicí jednotka zprávy také posílá, ale pouze jako odpovědi na dotazy. Toto pravidlo zajišťuje, že nedojde k vysílání více zařízení najednou. Příkladem takového dotazu může být „Ab\n“, který požaduje odpověď s aktuální rychlostí otáčení motoru.

Základem posílání zpráv je odeslání jednoho znaku. K tomu slouží jednoduchá funkce, uvedená v následující ukázce. Opakovaným voláním této funkce lze odeslat celý řetězec nebo číselnou hodnotu různého datového typu.

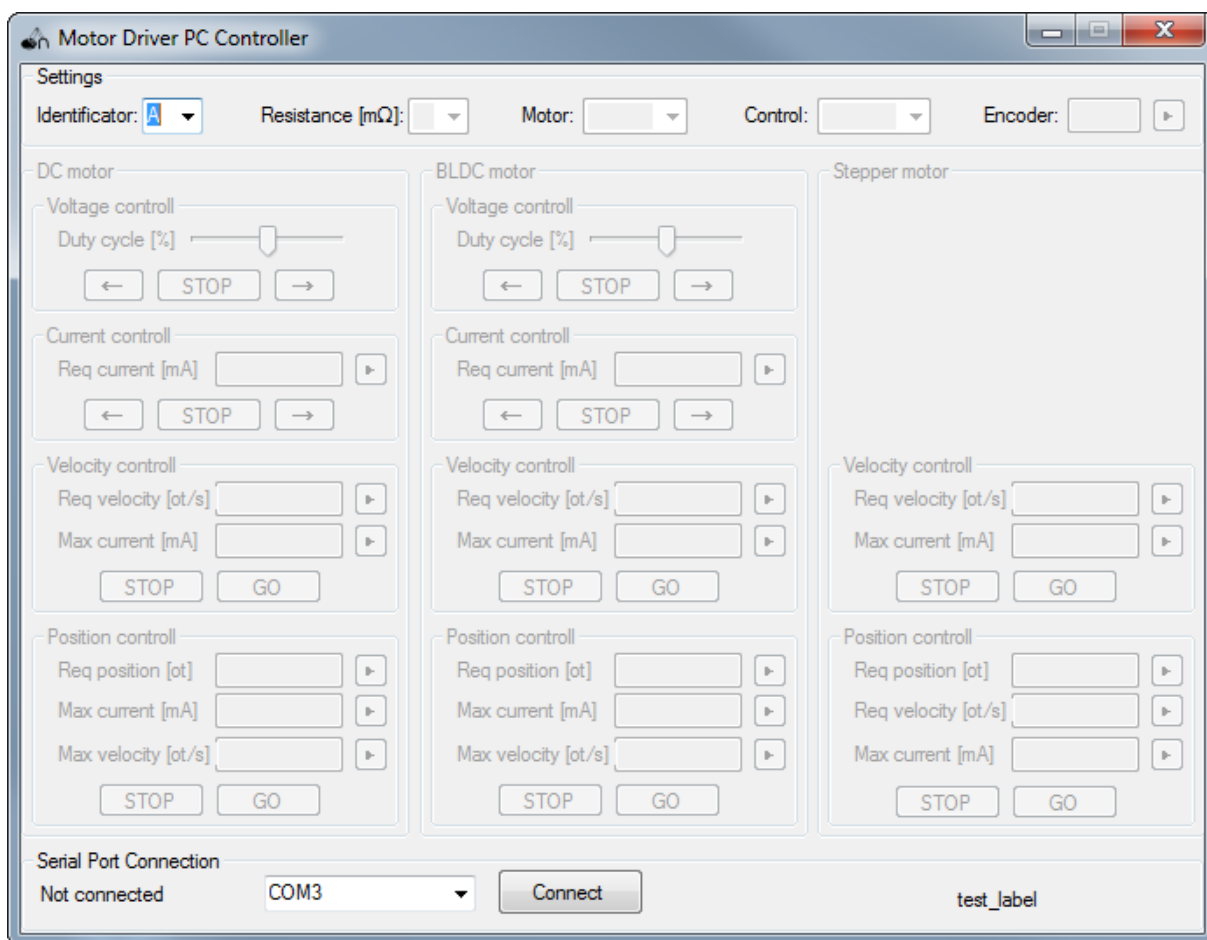
```
void usart_putchar (char c)
{
    // cekani nez bude datovy registr prazdny
    while ( !( USARTDO.STATUS & USART_DREIF_bm ) );

    // vlozeni znaku do datoveho registru pro odeslani
    USARTDO.DATA = c;
}
```

6 OVLÁDACÍ PROGRAM PRO PC

Pro jednodušší ovládání řídicí jednotky bylo vytvořeno grafické rozhraní. K jeho návrhu bylo využito vývojové prostředí Microsoft Visual Studio. Program slouží především k ručnímu řízení a testování potřebného motoru a také pro případné odladění některého z regulátorů (tzn. až šesti konstant).

Po spuštění programu se otevře okno, které lze vidět na obrázku 6.1. Nejprve je potřeba vybrat port sériové linky a identifikátor připojené jednotky. Po navázání komunikace program vyšle požadavek na zjištění hodnot všech uložených parametrů v trvalé paměti řídicí jednotky. Jakmile získá patřičné informace, povolí ovládací prvky pro zvolený typ motoru a požadovaný způsob regulace.

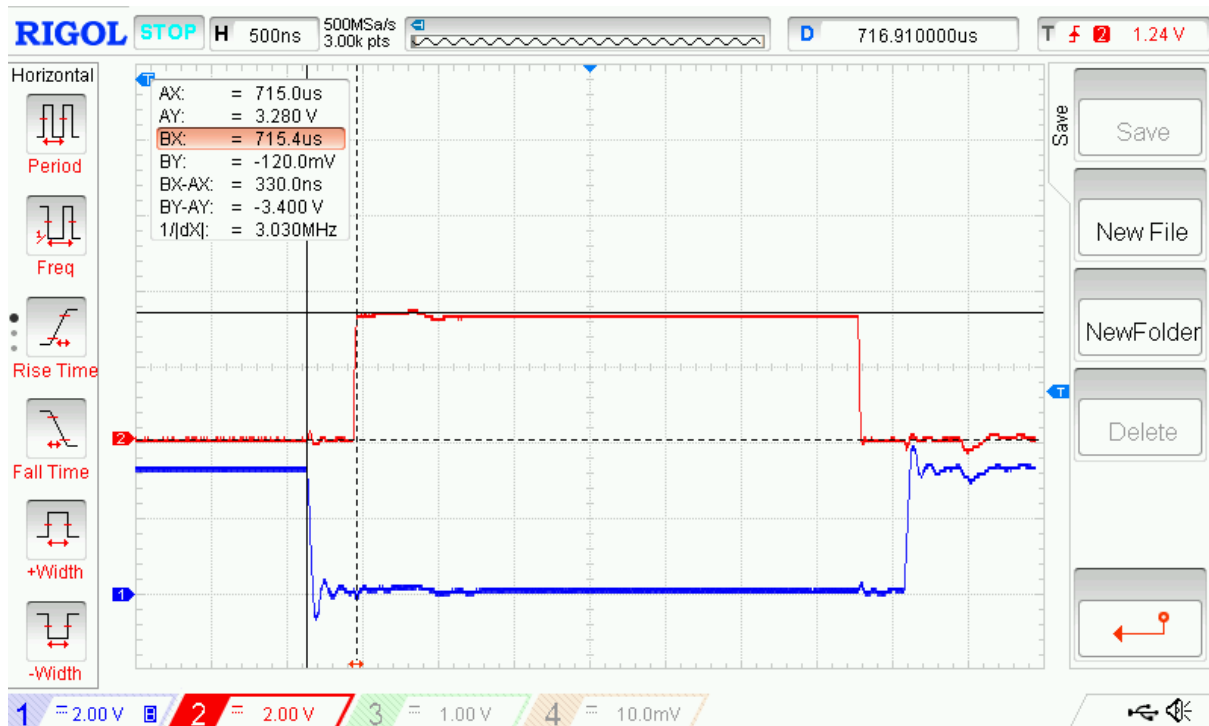


Obr. 6.1: Ovládací program pro PC.

7 TESTOVÁNÍ

7.1 PWM signál

Nejprve byl otestován generátor pulsní šířkové modulace. Frekvence tohoto PWM signálu je nastavena na 40 kHz. Mikrokontrolér nabízí možnost zapnutí tzv. „deadtime“ – ochranu při spínání. Náhled na spínání dvou výkonových tranzistorů polovičního H-můstku je na obrázku 7.1.

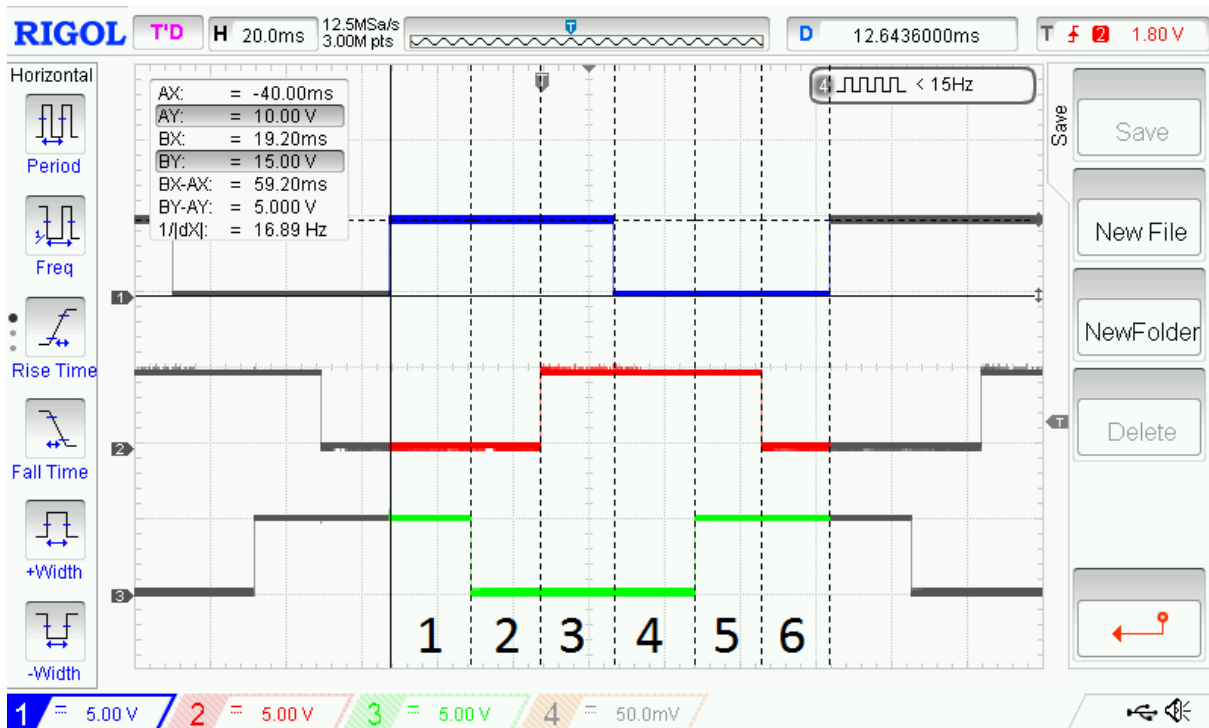


Obr. 7.1: PWM signály spínající výkonové tranzistory polovičního H-můstku.

Z tohoto obrázku je patrné posunutí spínacích průběhů přímo na pinech mikroprocesoru s výstupem PWM signálu. Mezi sestupnou hranou jednoho a nástupnou hranou druhého signálu je vždy patrný krátký časový interval (0,33 μ s), kdy jsou oba tranzistory vypnuty.

7.2 Hallové sondy

Další testování bylo provedeno s BLDC motorem. Byly měřeny průběhy signálů z Hallových sond, které lze vidět na obrázku 7.2.



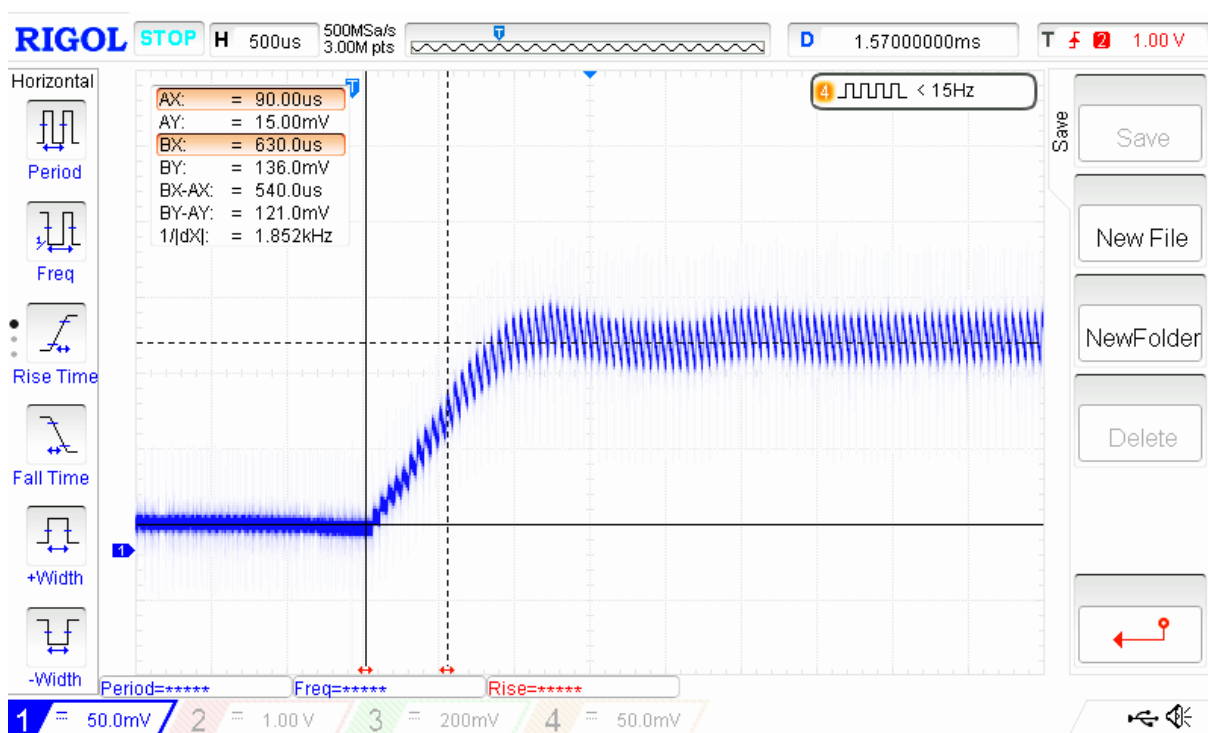
Obr. 7.2: Signály z Hallových sond.

Na obrázku je zvýrazněná jedna perioda měřeného signálu, která odpovídá jedné mechanické otáčce motoru. Během tohoto intervalu se vystřídalo všech šest kombinací stavů signálů. Každá kombinace odpovídá sepnutí jiných tranzistorů – připojení napájení k různým fázím. Měřením byly ověřeny teoretické poznatky popsané v kapitole 2.2.

7.3 Ladění regulátorů

Regulační konstanty lze stanovit různými způsoby. V praxi se často používají rozličné výpočetní metody. Pokud není známá soustava, lze využít jednodušších, ale méně přesných výpočtů – např. Ziegler-Nicholsovu metodu. Jestliže je soustava známá, je možno využít složitějších výpočtů, které poskytnou přesný výsledek a lze tak dosáhnout požadovaného průběhu. Průmyslově prodávané regulátory využívají tzv. „auto-tuning“ parametrů regulátoru.

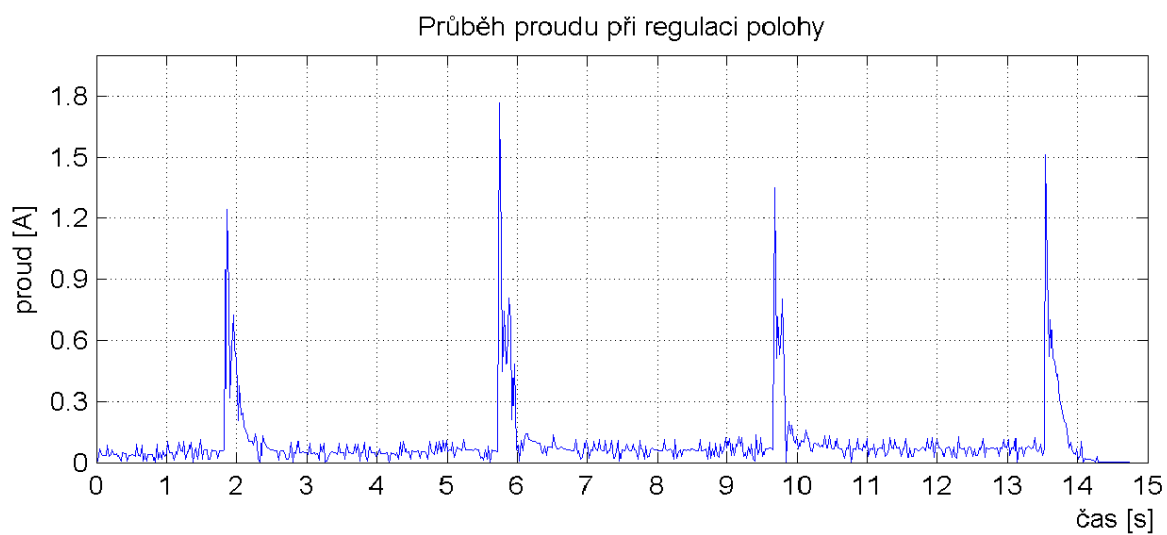
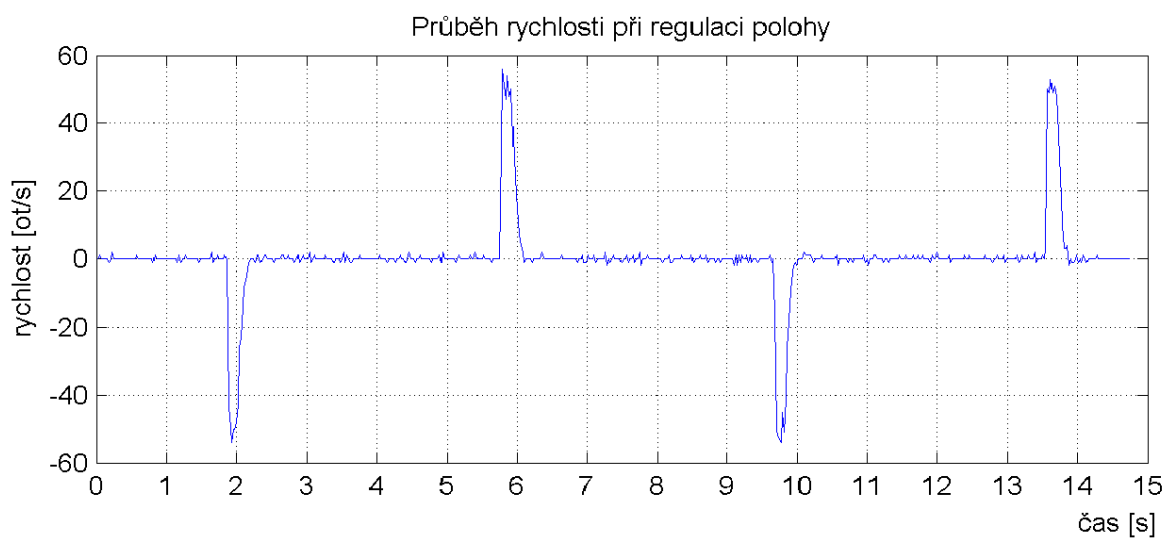
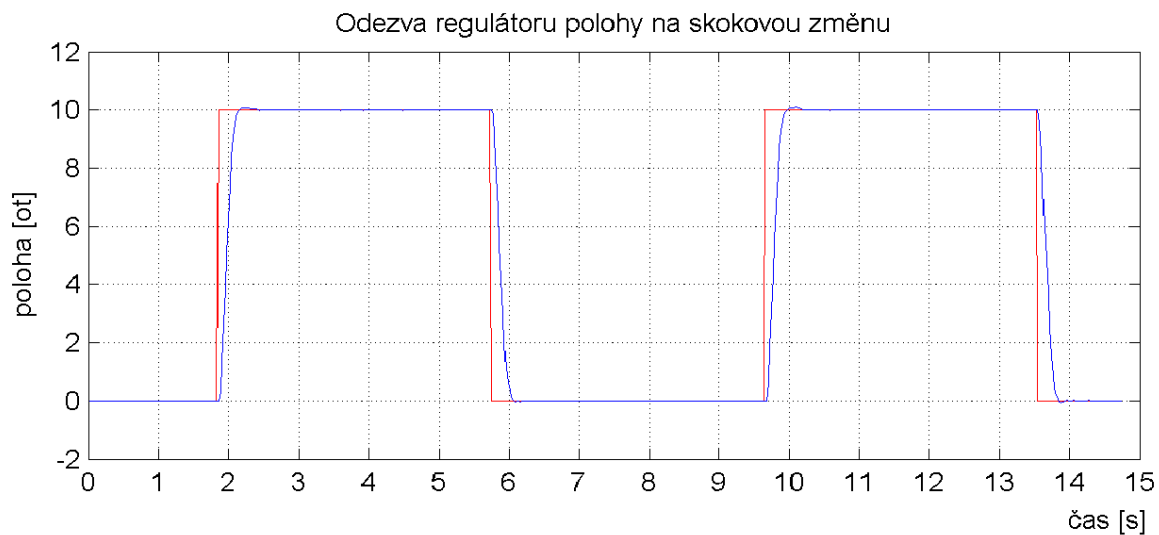
Naladění regulátoru se může lišit v závislosti na jeho požadovaných vlastnostech, především na rychlosti, přesnosti a velikosti překmitu. Pro přesnější ladění je vhodné regulovanou veličinu graficky zobrazit například na osciloskopu, viz obrázek 7.3. Tento graf znázorňuje odezvu proudu na skokovou změnu (z 10 na 100 mA) při mechanicky zabrzděném motoru. Naladěním konstant regulátoru bylo dosaženo odezvy téměř bez překmitu a časové konstanty¹ přibližně 0,5 ms.



Obr. 7.3: Odezva regulátoru proudu na skokovou změnu.

Jakmile má regulátor proudu požadované vlastnosti, je možno přejít k ladění rychlostního regulátoru – v kaskádě nadřazeného nad proudovým. Podobným způsobem je potřeba pokračovat i s regulací polohy. Zobrazení polohy, rychlosti a proudu bylo provedeno posíláním dat přes sériovou linku a následným vykreslením do grafů. Jednotlivé průběhy těchto veličin při polohové regulaci lze vidět na obrázku 7.4.

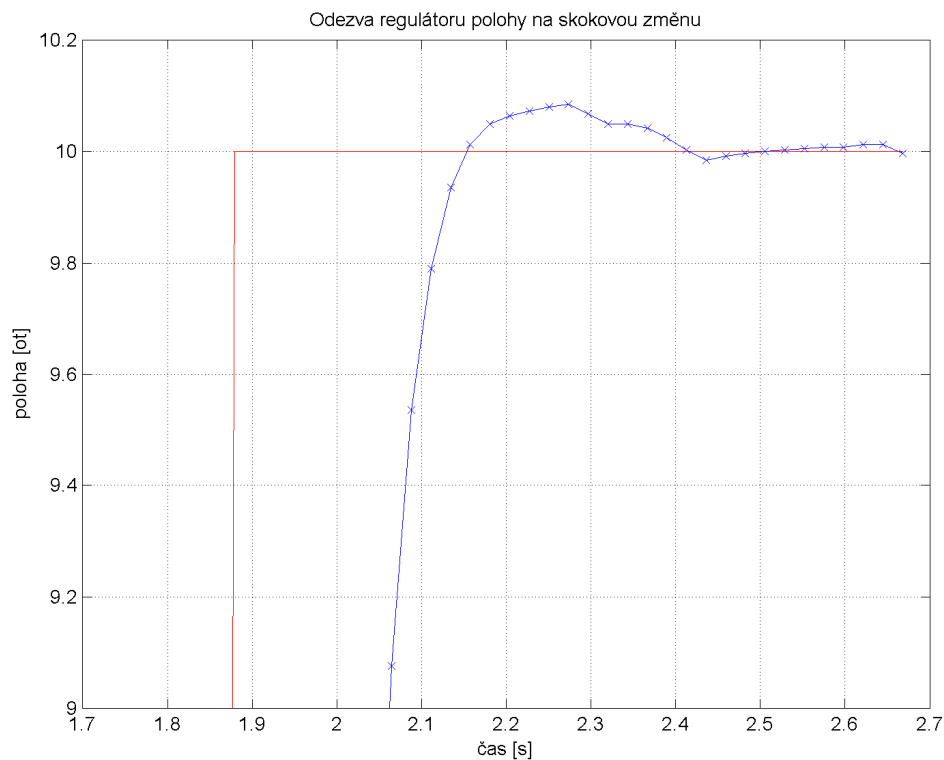
¹Časová konstanta regulátoru odpovídá době, za kterou regulovaná veličina dosáhne 63% požadované hodnoty.



Obr. 7.4: Průběhy měřených veličin při polohové regulaci.

První graf na obrázku 7.4 znázorňuje skokovou změnu polohy – 0 až 10 otáček (červená) a odezvu regulátoru (modrá). Bylo nastaveno omezení rychlosti na 50 ot/s (3000 ot/min), což je patrné z druhého grafu. Poslední graf vykresluje průběh proudu. Jsou zde zřetelné velké proudové špičky vždy v okamžiku rychlého nárůstu rychlosti. Pokud by byly příliš velké, mohl by se na měřicím odporu objevit úbytek napětí, který je mimo rozsah A/D převodníku. Tím by mohlo dojít k poškození mokrokontroléru. Proudové špičky lze omezit zpomalením rychlostního regulátoru.

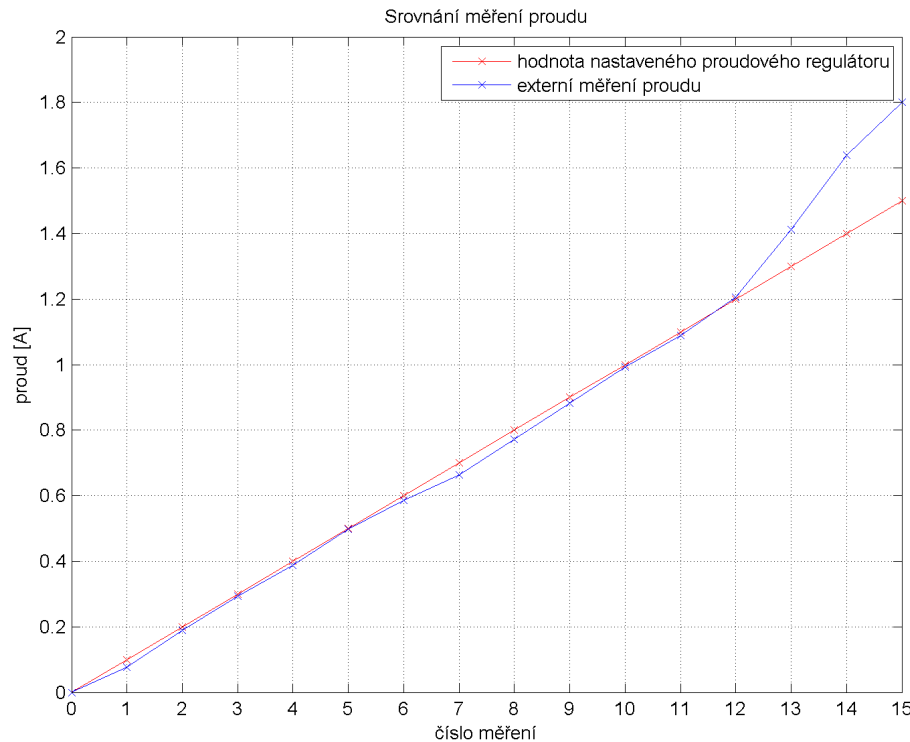
Obrázek 7.5 detailněji přibližuje poslední otáčku při regulaci polohy. Je zde lépe vidět přesnost a rychlost tohoto regulátoru. Žádaná hodnota je poprvé dosažena přibližně po 0,25 s. Dále následuje překmit o velikosti necelé desetiny otáčky a po dalším čase 0,25 s se poloha ustálí v požadované pozici.



Obr. 7.5: Detail překmitu při polohové regulaci.

7.4 Měření proudu

Pro správnou funkčnost proudového regulátoru je součástí řídicí jednotky i měření proudu. Přesnost tohoto měření a schopnost regulace na zadanou hodnotu byla zkoumána v následujícím měření. Na obrázku 7.6 je vidět srovnání požadované hodnoty proudu (červená) a hodnoty změřené externím zařízením (modrá).



Obr. 7.6: Srovnání měření proudu.

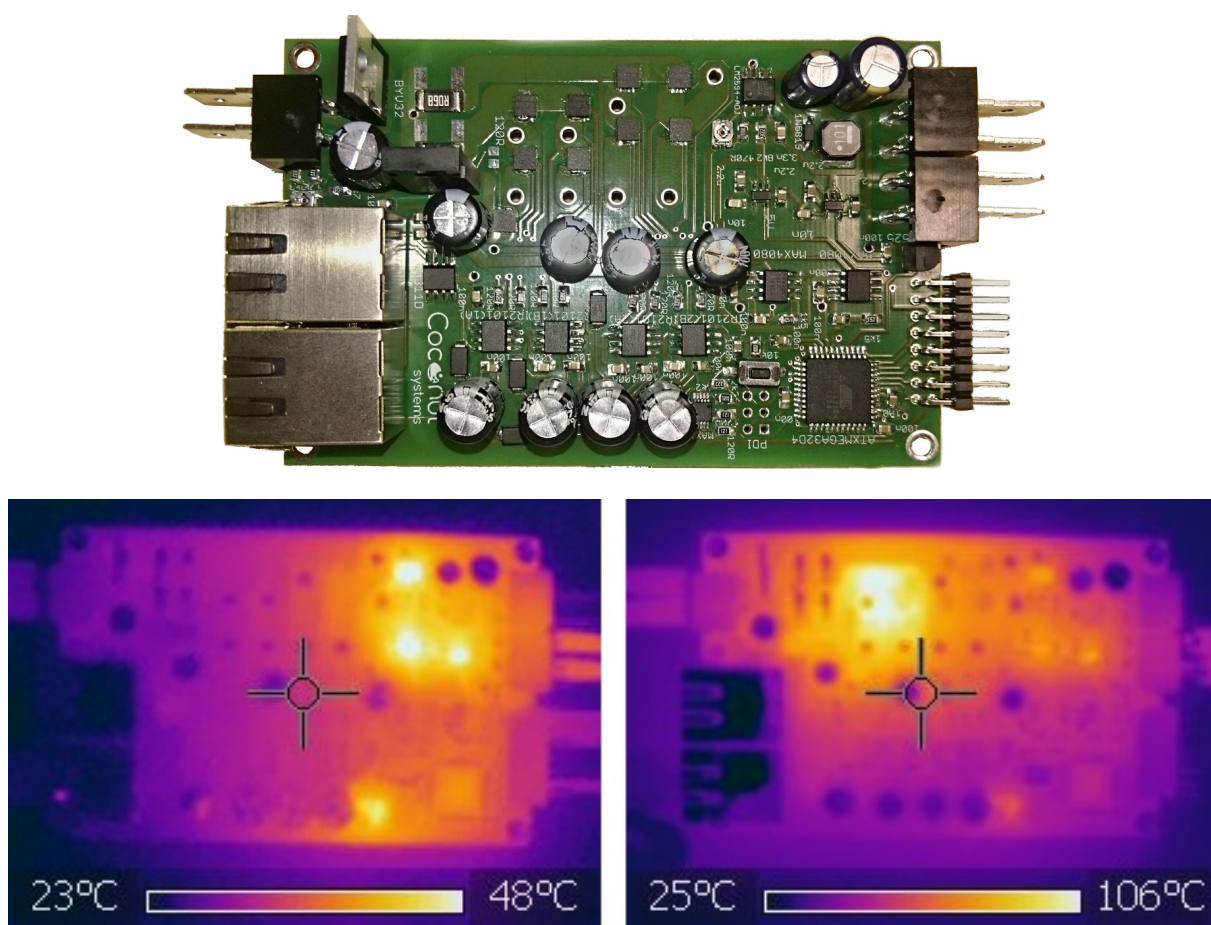
Měření probíhalo v rozsahu proudu 0–1,5 A s krokem 100 mA. Jednotlivé hodnoty byly zadávány proudovému regulátoru, který díky zpětné vazbě s měřeným proudem prováděl regulaci. Následně bylo provedeno nezávislé měření průměrného napětí na bočníku (osciloskopem) a to poté přepočítáno na velikost protékajícího proudu – podle Ohmova zákona.

Ze srovnání těchto dvou metod (viz obrázek 7.6) je patrné, že téměř v celém měřeném úseku se hodnoty shodují. Větší rozdíly nastávají až ke konci intervalu. To mohlo být nejspíš způsobeno tím, že měření bylo prováděno s bočníkem velikosti 68 mΩ, který má měřicí rozsah 0 až 1,8 A. Měřený proud má zvlněný, průběh a přestože je jeho průměrná hodnota 1,3 A, špičkově může přesahovat horní hranici rozsahu (1,8 A). Na A/D převodníku dojde k saturaci, a proto je takto změřený proud nižší než skutečný – měřený externím zařízením.

7.5 Zahřívání

Nadměrné zahřívání řídicí jednotky ovlivňuje její funkčnost. Pokud dojde k přehřátí, může dojít k poškození některých prvků. Je potřeba zajistit, aby tato situace v běžném provozu nenastala. Nárůst teploty je nejvíce patrný u výkonových součástek s vyšší hodnotou odporu. Při zvýšení procházejícího proudu vzroste ztrátový výkon (viz vztah 4.3), který se přeměňuje na teplo a tím se daná součástka zahřívá.

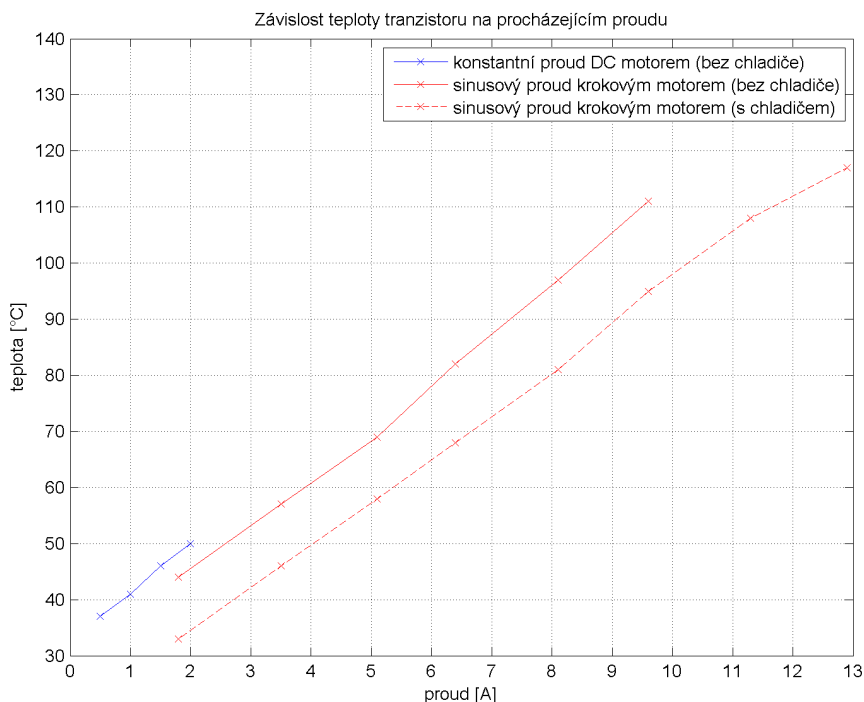
Na obrázku 7.7 lze vidět snímky desky plošných spojů z termokamery. Fotka na levé straně je pořízena před sepnutím motoru. V tomto okamžiku byly nejvíce zahřívány tři měniče napětí v pravém horním rohu DPS – teplota dosahovala až 50 °C. Po spuštění motoru a ustálení teploty (viz fotka vpravo) se mnohem více zahřívaly spínané tranzistory, kterými protékal proud – až na 100 °C. Teplota měničů napětí zůstala téměř neměnná.



Obr. 7.7: Snímky z termokamery před a po sepnutí motoru.

V technické dokumentaci použitého MOS-FET tranzistoru (viz [9]) lze nalézt jeho maximální provozní teplotu – 150 °C. Při této teplotě ovšem dochází ke změně ostatních charakteristických vlastností tranzistoru. Narůstá například odpor „drain-source“ v sepnutém stavu ($R_{DS(on)}$) a je sníženo maximální povolený proud ze 40 A (při 75 °C) až na nulu (při 150 °C). Aby nedošlo k výrazným změnám těchto parametrů, je třeba nepřesáhnout teplotu 120 °C.

Bylo provedeno měření teploty spínaného tranzistoru v závislosti na procházejícím proudu (při napájecím napětí 12 V). Tuto závislost znázorňuje graf na obrázku 7.8.



Obr. 7.8: Závislost teploty MOS-FET tranzistoru na velikosti procházejícího proudu.

Z obrázku je patrné, že výsledná závislost je lineární. Měření bylo prováděno nejprve s DC motorem (modrá závislost), jehož maximální hodnota proudu je 2 A. Jelikož nebyl k dispozici výkonnější stejnosměrný motor, byl připojen krokový motor (červená závislost) s horní hranicí proudu až 12 A. Na rozdíl od DC motoru, kde proud je konstantní, u krokového motoru má sinusový průběh. Je nutné aby amplituda proudu nepřesáhla požadovanou hodnotu, jelikož při pomalém krokování (otáčení motoru) by mohlo dojít k poškození motoru. Přibližně o 5 °C nižší teplota než u stejnosměrného motoru je dána menší průměrnou hodnotou sinusového proudu vůči amplitudě.

Dále je patrné, že při proudu 10 A se teplota tranzistoru přiblíží hranici 120 °C. Bez jeho chlazení není možné dále zvyšovat proud. Lze však využít chladič, který teplotu o několik stupňů sníží, a tím je lze dosáhnout většího proudu při stejné teplotě (viz čárkovaná červená závislost v grafu).

8 CENOVÁ KALKULACE A VYUŽITÍ NA KONKRÉTNÍCH PROJEKTECH

8.1 Cenová kalkulace

V tabulce 8.1 je přehledně rozepsaná cenová kalkulace řídicí jednotky. Celková cena byla vyčíslena na 1 260 Kč, z toho nejnákladnější položka činila 400 Kč – výroba desky plošných spojů. Cena všech součástek pro osazení DPS se vyšplhala na 860 Kč.

položka	cena
výroba DPS	400 Kč
mikrokontrolér ATxmega32D3U	101 Kč
měnič napětí na 12 V	127 Kč
převodník RS-232 – RS-485	75 Kč
MOS-FET tranzistor (9 ks)	135 Kč
spínač MOS-FET tranzistorů (4 ks)	88 Kč
zesilovač (2 ks)	84 Kč
ostatní součástky	250 Kč
cena celkem	1 260 Kč

Tab. 8.1: Cenová kalkulace.

Ne vždy je vyrobená DPS osazená kompletně. Například v případě předem požadovaného řízení jen DC motoru a zajištění napájení výhradně 12 V není třeba osazovat některé součástky (viz tabulka 8.2) a tím snížit náklady na výrobu řídicí jednotky téměř o 300 Kč.

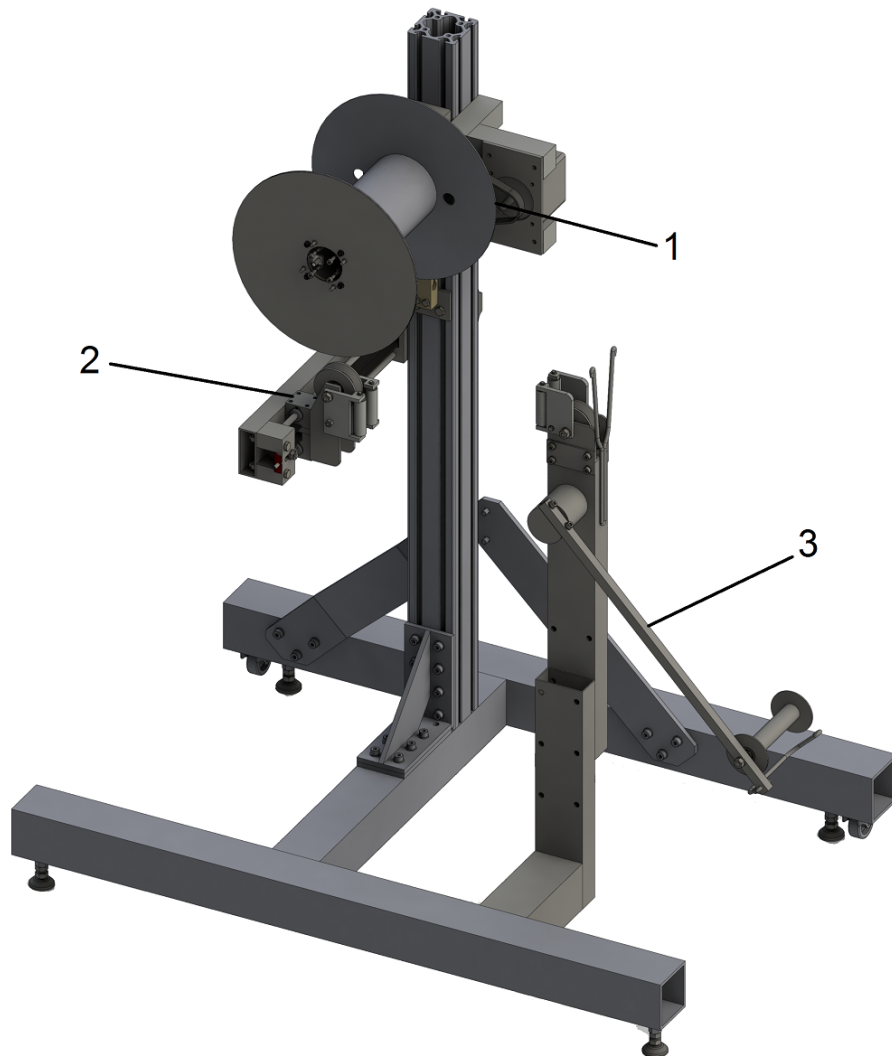
položka	cena
měnič napětí na 12 V	127 Kč
MOS-FET tranzistor (4 ks)	60 Kč
spínač MOS-FET tranzistorů (2 ks)	44 Kč
zesilovač (1 ks)	42 Kč
ostatní součástky	20 Kč
celkem ušetřeno	293 Kč

Tab. 8.2: Potenciální snížení nákladů neosazením některých součástek.

8.2 Stroj pro navíjení bužírky

První zařízení, které bude využívat vyvinutou jednotku, je stroj pro navíjení bužírky (viz obrázek 8.1). Jednotka bude konkrétně použita pro řízení EC motoru sloužícího k otáčení cívky (pozice 1), na kterou se navíjí bužírka. Rychlost navíjení udává enkodér, který měří prověšení přivedené bužírky (pozice 2).

Stroj je vybaven posuvným přivaděčem (pozice 3), který zajišťuje rovnoměrné rozložení navíjené bužírky po celé šířce cívky. Posuv je řízen krokovým motorem, jehož ovládání zajišťuje jiná řídicí jednotka.



Obr. 8.1: Model stroje pro navíjení bužírky.

8.3 Uživatelská ovládací jednotka pro krokový motor

Druhé dosavadní využití je pro uživatelské ovládání krokového motoru. Toto zařízení bude sloužit k přesnému polohování při řezání, vrtání či obrábění. Prozatím jde o polohování pouze v jedné ose.

Prostřednictvím minipočítače Raspberry Pi s připojeným 7 palcovým dotykovým displejem probíhá komunikace mezi uživatelem a jednotkou řídicí krokový motor. Na displeji lze zadávat příkazy s požadovaným posuvem. Dále je možné vytvářet sekvenci příkazů a tu posléze spustit.



Obr. 8.2: Uživatelská ovládací jednotka pro krokový motor.

9 ZÁVĚR

V rámci diplomové práce byla navržena univerzální řídicí jednotka určená k ovládání elektrických motorů malých napětí – elektronicky komutovaného, stejnosměrného a krokového. Tyto tři typy motorů jsou téměř výhradně používány ve společnosti Coconut Systems, pro kterou byla jednotka vyvíjena.

Společnost se zabývá především vývojem jednoúčelových strojů. Většina vyvíjených zařízení využívá hned několika různých motorů a každý z nich i různou jednotku pro řízení. Vývoj a výroba řídicí elektroniky na míru podle typu, velikosti a způsobu řízení motoru je nejen finančně, ale i časově náročná. Cílem této diplomové práce bylo navrhnout a vyrobit univerzální modul pro řízení běžně používaných motorů ve společnosti Coconut Systems.

Práce zahrnuje vytvoření vhodné topologie zapojení, výběr patřičných součástek na základě požadovaných parametrů a navržení desky plošných spojů (DPS). Nedílnou součástí je také její výroba a osazení. Dále bylo zapotřebí napsat software pro mikrokontrolér, který ovládá celou jednotku a komunikuje s nadřazeným počítačem. Pro snadné ovládání bylo vytvořeno grafické rozhraní. Pomocí něj má uživatel možnost jednoduše nastavit veškeré parametry, typ řízeného motoru i způsob řízení – od základní regulace napětí bez zpětné vazby přes proudovou a rychlostní řídicí zpětnovazební smyčku až po polohovou regulaci.

V závěru práce bylo provedeno testování a odzkoušení funkčnosti. Z výsledků jednotlivých testů lze vyvodit závěr, že jednotka pracuje téměř dle stanovených požadavků. Jediným nedostatkem je nadměrné zahřívání MOS-FET tranzistorů.

Řídicí jednotku je možné ještě zdokonalit například účinnějším chlazením výkonových tranzistorů. Mnohem širší možnosti vylepšení poskytuje vývoj softwaru. Lze například implementovat řízení BLDC motoru bez Halloových senzorů.

Celková cena řídicí jednotky vychází na 1 260 Kč, přičemž nejdražší položkou byla výroba desky plošných spojů (400 Kč). V některých případech použití není potřeba osazovat všechny součástky na DPS a tím lze snížit cenu téměř o 300 Kč.

LITERATURA

- [1] VOJÁČEK, A. *El. motory a jejich řízení - základní přehled - 1.díl* [online]. 2014, poslední aktualizace 7.7.2014 [cit.12.4.2017]. Dostupné z URL: <<http://automatizace.hw.cz/el-pohony-mereni-a-regulace/el-motory-a-jejich-rizeni-zakladni-prehled.html>>.
- [2] ŠULC, D. *Návrh řízeného pohonu paralaktické montáže*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 37 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Krejsa, Ph.D.
- [3] POŠTOLKA, M. *Řídicí jednotka pro čtyřkvadrantový tranzistorový pulzní měnič*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 69 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Procházka, Ph.D.
- [4] LEPKA, J; Grasblum, P. *Mikroprocesorová technika v aplikacích řízení elektrických pohonů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2011. 61 s.
- [5] PIJÁČEK, O. *Univerzální řídicí jednotka pro BLDC motory*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 69 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Libor Veselý, Ph.D.
- [6] MAŇÁK, P. *Řízení krokového motoru pomocí platformy Arduino*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2011. 46 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Vít Hlinovský, CSc.
- [7] ŘEZÁČ, K. *Krokové motory* [online]. 2002, poslední aktualizace 28.10.2002 [cit.12.4.2017]. Dostupné z URL:<<https://robotika.cz/articles/steppers/cs>>.
- [8] ATMEL. *Datasheet ATxmega32D4* [online]. 2015. Dostupné z URL: <http://www.atmel.com/images/Atmel-8135-8-and-16-bit-AVR-microcontroller-ATxmega16D4-32D4-64D4-128D4_datasheet.pdf>.
- [9] INFINEON TECHNOLOGIES. *Datasheet MOS-FET tranzistoru BSZ110N08NS5* [online]. 2014. Dostupné z URL: <http://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BSZ110N08NS5-DS-v02_01-en.pdf?fileId=5546d461454603990145ccd70d7261fe>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

ASCII	American Standard Code for Information Interchange
A/D	Analog/Digital
BLDC	Brushless Direct Current
DC	Direct Current
DPS	Deska Plošných Spojů
EC	Electronically Commutated
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
LEM	Liaisons Electroniques-Mécaniques
MOS-FET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
PID	Proporcionálně-Integračně-Derivační
PWM	Pulse Width Modulation
SMD	Surface Mount Device
SPS	Samples Per Second
SRAM	Static Random Access Memory
s.r.o.	Společnost s Ručením Omezeným
USART	Universal Synchronous and Asynchronous Receiver and Transmitter

SEZNAM PŘÍLOH

Obsah příloženého CD

schema	Složka se schématem a návrhem DPS. (Eagle 7.2.0)
programy	Složka s programy pro mikrokontrolér. (Atmel Studio 6.2)
prace	Složka s diplomovou prací vysázenou v programu \LaTeX .
DP.pdf	Diplomová práce v pdf verzi. (Adobe Reader)