

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

ŘÍDICÍ JEDNOTKA PRO MALÉ EC MOTORY S UNIVERZÁLNÍM SOFTWAROVÝM ROZHRANÍM

CONTROL UNITS FOR SMALL EC MOTORS WITH UNIVERSAL SOFTWARE INTERFACE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. JAN VETIŠKA
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. PAVEL HOUŠKA, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2008

Zadání diplomové práce

Poděkování

Za odbornou pomoc při řešení problému, získání cenných informací a zkušeností dekuji vedoucímu diplomové práce Ing. Pavlu Houškovi Ph.D. Dále chci tímto poděkovat svým rodičům za vytrvalou podporu během celého mého studia.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma Řídicí jednotka pro malé EC motory s univerzálním softwarovým rozhraním vypracoval samostatně pod vedením Ing. Pavla Houšky, Ph.D a na základě použité literatury a dostupných informačních zdrojů, které jsem ocitoval v seznamu použité literatury

V Brně …… ……..

Bc. Jan Vetiška

Bibliografická citace mé práce:

VETIŠKA, J. *Řídicí jednotka pro malé EC motory s univerzálním softwarovým rozhraním.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 75 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Houška, Ph.D.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a realizací univerzální řídící jednotky pro elektricky komutovaný motor (EC motor). V práci byl proveden průzkum trhu s řídícími jednotkami pro EC motory a srovnání parametrů řídících jednotek s požadavky na univerzální řídící jednotku EC motorů. Z průzkumu vyplynulo, že na trhu není jednotka s otevřeným systémem která by umožňovala nahradit jednotlivé řídicí smyčky smyčkami vlastními. Na základě toho bylo přistoupeno k vlastní konstrukci univerzální jednotky.

Pro návrh byl použit přístup hardware int the loop a software in the loop. Byl proveden návrh jednotlivých částí jednotky, vyrobena výkonová část a pomocí vývojového a simulačního software LabVIEW byla výkonová část odzkoušena. Poté se přistoupeno k realizaci celé řídící jednotky a k doplnění existujícího software řídicí jednotky o odpovídající ovladače a byla provedena modifikace řídicího algoritmu pro potřeby EC motoru. V poslední části práce se testovaly dosažené parametry řídící jednotky.

Abstrakt

This graduation thesis deals with the design and realisation of the universal control unit for the electrically commutated motor (EC motor). Was to accomplish the market research of control units for EC motors and compare of parameters of control units with requirements for the universal control unit of EC motors. From the research ensued that on the market it is no unit with the open system which could enable substitute particular control loops by own loops. Based on this evidence it was approached to own construction of the universal unit.

For the design it was used the access hardware in the loop a software in the loop. It was performed the design of particular sections of the unit, manufactured the power section and this power part was tested by the help of the developmental and simulation software LabVIEW. Furthermore it was proceeded for the realisation of the integral control unit and for supplementation of the existing software of the control unit about appropriate drivers and it was undertaken the modification of the control algorithm for the need of EC motor. On the end of this project we tested achieved parameters of the control unit.

KLÍČOVÁ SLOVA
EC motor, řídící jednotka pro malý EC motor, LPC 2103

KEYWORDS
EC motor, control units for small EC motors, PLC 2103

Obsah

1. Úvod 15
2. Stenosměrné motory 17
2.1.1 Mechanická komutace 17
2.1.2 Princip elektronické komutace 17
2.2 Stejnosměrný komutátorový motoru 19
2.3 Elektricky komutovaný stejnosměrný motor 20
2.3.1 Uspořádání EC motoru 20
2.4 Možnosti provozování motorů 21
2.5 Regulační smyčky 21
2.5.1 Rychlostní regulační smyčka 21
2.5.2 Proudová regulační smyčka 22
2.5.3 Polohová regulační smyčka 23
3. Řídící jednotky pro EC motory 25
3.1.1 Produkty MAXON 25
3.1.2 Produkty firmy Anaheim automation 26
3.1.3 Produkty firmy Aveox 26
3.1.4 Shrnutí 27
3.2 Struktura řídících jednotek 27
3.2.1 Řídící část 27
3.2.2 Výkonová část 28
3.2.3 Měřící část 28
4. Snímače 29
4.1 Měření elektrického proudu 29
4.1.1 Měření pomocí měřícího odporu 29
4.1.2 Měření pomocí snímače s Hallovým jevem 31
4.1.3 Měření pomocí měřícího transformátoru 33
4.2 Snímače rychlosti a natočení rotoru 33
4.2.1 Tachodynamo 33
4.2.2 Inkrementální rotační snímače (IRC) 34
5. Návrh řídicí jednotky pro EC motory 37
5.1 Metody vývoje nového produktu 37
5.1.1 Klasický vývoj nového produktu 37
5.1.2 Vývoj nového produktu pomocí modelování 37
5.2 Softwarové nástroje pro podporu vývoje produktu 38
5.3 Použitý software 39
5.3.1 Modelování a simulace 39
5.3.2 Návrh elektroniky 39
5.3.3 Vývojový software pro mikrořadič a pro PC 39

5.4 Požadavky na řídicí jednotku 39
5.4.1 Řídicí jednotka UMCU-DC S24/7 40
5.4.2 Zapojení jednotky 40
5.5 Volba mikrořadiče 41
5.6 Návrh zapojení 42
5.6.1 UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) 43
5.6.2 I^2C – bus 43
5.7 Výkonová část řídicí jednotky 44
5.8 Měření výstupního proudu 44
6. Vývoj řídicí jednotky pro EC motory 47
6.1 První etapa – realizace výkonové části jednotky a její ověření 47
6.1.1 Zapojení výkonové části řídicí jednotky 47
6.1.2 Ověření výkonové části řídicí jednotky 49
6.2 Druhá etapa – realizace procesorové části jednotky a její ověření 54
6.2.1 Zapojení procesorové části řídicí jednotky 54
6.2.2 Ověření procesorové části řídicí jednotky 57
6.3 Třetí etapa – propojení mikrořadičové a výkonové části pomocí kabelů 58
6.3.1 Řídicí program jednotky 59
6.4 Ovládací program univerzální jednotky pro PC 61
6.4.1 Hlavní formulář komunikačního rozhraní jednotky 62
6.4.2 Nastavení parametrů EC motoru 62
6.4.3 Nastavení parametrů regulátorů 64
6.5 Čtvrtá etapa – realizace řidící jednotky 64
6.5.1 Řídicí program jednotky 66
6.5.2 Mód ruční řízení 66
7. Experimentální ověření funkčnosti řídicí jednotky 69
7.1 Výsledky z labview 69
7.2 Problémy se snímači 69
7.3 Výsledky z řídicí jednotky 70
8. Závěr 73
9. Použitá literatura 75
10. Seznam obrázků 77

1. Úvod

Elektrický motor je v dnešním technickém světě nepostradatelným zdrojem krouticího momentu. Výhodou je, že je proveditelný prakticky pro jakýkoli výkon a široký rozsah momentů, přizpůsobitelný vnějším podmínkám, není při své práci zdrojem zplodin, má nízkou úroveň hluku, je prakticky okamžitě provozuschopný, jednoduchá údržba, snadná řiditelnost a ovládatelnost, možnost práce ve všech čtyřech kvadrantech, dlouhá životnost. Nevýhodou je jeho závislost na okamžité dodávce elektrické energie a nízký ukazatel výkon/hmotnost.

Abychom mohli motor správně řídit je zapotřebí řídící jednotky. Tyto jednotky vyrábí celá řada firem s různými parametry. Prakticky neexistuje žádná standardizace parametrů ani chování řídících jednotek. Největším problémem je rozdílná kvalita regulace, nemožnost měnit nastavení regulátorů a většinou chybí komunikace s nadřazeným systémem např. po RS232 nebo CAN BUS.

Protože není na trhu opravdu volně programovatelná jednotka, proto vzniklo zadání diplomové práce na tvorbu univerzální řídící jednotka pro malé EC motory.

Cílem této diplomové práce je vypracovat studijní rešerši a na základě této rešerše navrhnou univerzální řídící jednotku pro malé EC motory s napájecím napětím 6 – 48V a s maximálním výstupním proudem 2,5A. Po provedení návrhu jednotku simulačně ověřit pomocí softwarového produktu firmy National Instrument LabVIEW. Jakmile bude hotová ověřovací část, přistoupit k vlastní realizaci a k vytvoření řídícího software pomocí Microsoft Visual studio. Na závěr se provést revizi, jestli bylo dosaženo všech zadaných parametrů.

Návrh řídicí jednotky pro EC motory vychází z již realizovaných řídicích jednotek pro DC motory, u kterých byl proveden návrh univerzálního komunikačního rozhraní a realizována velká část software a ovládacího programu řídicí jednotky. Tato práce řeší doplnění software řídicí jednotky o potřebné ovladače periferií zvoleného mikrořadiče, zlepšení měření proudu a řídicích algoritmů.

Paralelně s touto prací je řešena práce, zabývající se inovací řídicí jednotky pro DC motory.

2. Stejnosměrné motory

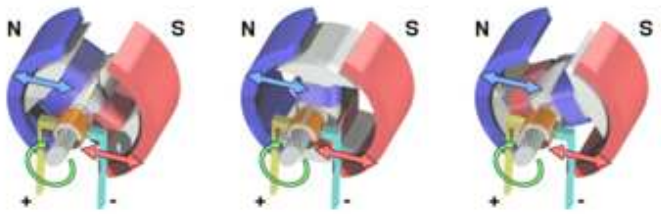
Stejnosměrný motor je založen na principu minimální energie. V magnetickém poli statoru se nachází vinutí rotoru, kterým protéká elektrický proud (dále již jen proud). Průchodem proudu se ve vinutí rotoru indukuje magnetické pole, které je orientováno stejně jako magnetické pole statoru. Tímto vzniká moment.

Aby se rotor motoru začal otáčet, musí se měnit magnetické pole rotoru. Tuto změnu zajišťuje komutace.

Komutace spočívá v přepínání napájecího proudu do jednotlivých sekcí vinutí v závislosti na poloze rotoru a statoru. Tím se dosahuje optimální polohy magnetického pole rotoru a magnetického pole statoru. Při optimální poloze se dosahuje největšího záběrného momentu.

2.1.1 Mechanická komutace

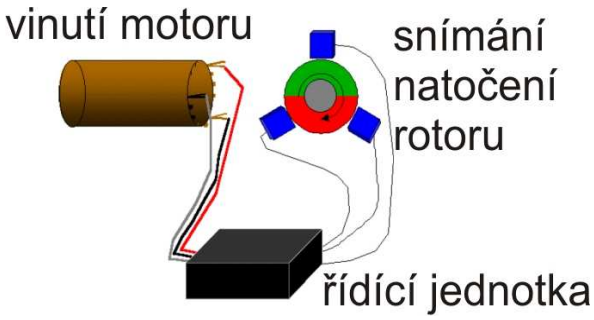
Mechanická komutace je realizována komutátorem, který je připevněn na hřídeli motoru a kartáči které jsou umístěny nepohyblivě. Komutátor je rozdělen na lamely, které jsou od sebe vzájemně izolovány a jsou spojeny s konci vinutí. Počet lamel určuje kolika pólový je motor. Na komutátor dosedají kartáče proti sobě. Jakmile je přes kartáče na lamely komutátoru přiveden proud, začnou magnetická pole rotoru a statoru působit proti sobě a pootočí hřídelí. S hřídelí se pootočí i komutátor a dojed k přepnutí proudu do další sekce vinutí a celý proces se opakuje.



Obr. 1. Princip mechanické komutace [11]

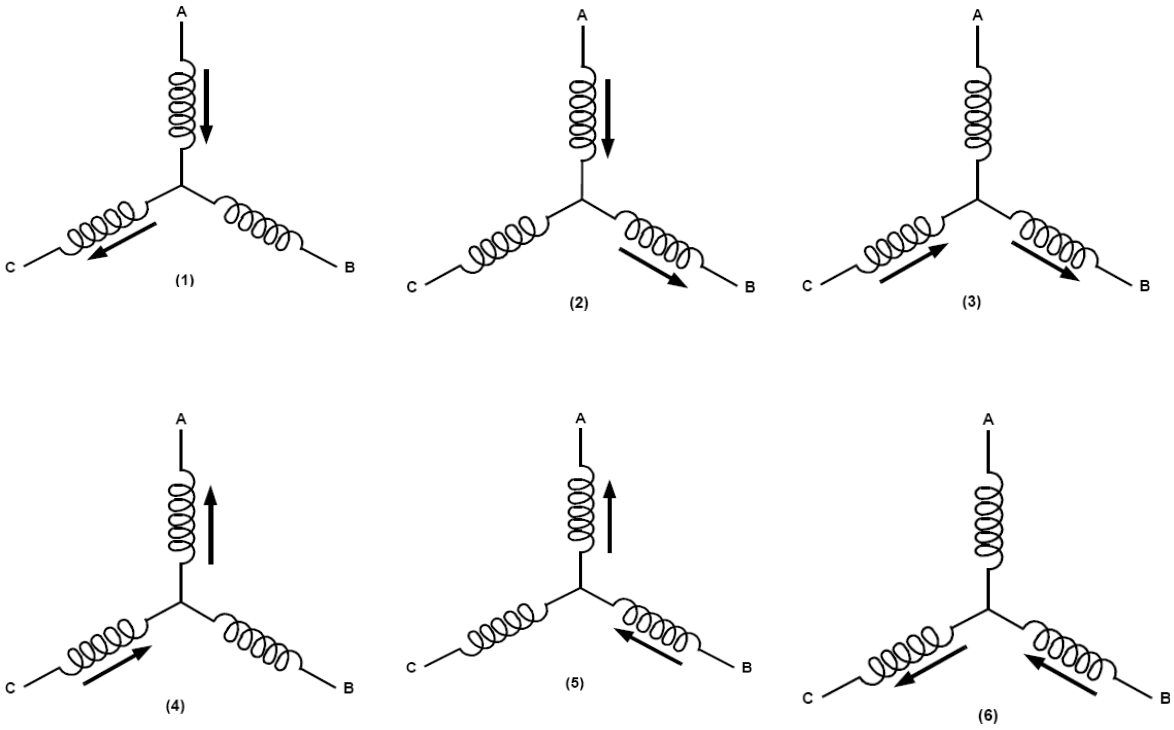
2.1.2 Princip elektronické komutace

Elektrickou komutaci zajišťuje řídicí jednotka. Ta přepíná proud do jednotlivých sekcí vinutí. Přepínání se děje na základě informací ze snímače natočení rotoru. Snímač je tvořen třemi Hallovými sondami, které snímají magnetické pole speciálního magnetu umístěného na rotoru. Každá Hallova sonda řídí jednu cívku vinutí. Po zapnutí řídící jednotky je vyhodnocen stav halových sond a puštěn proud do příslušných vinutí. Magnetická pole statoru a rotoru začnou působit proti sobě a dojde k pootočení rotoru a ke změně stavu Hallových sond. Tuto změnu řídicí jednotka vyhodnotí a přepne proud ve vinutích statoru.



Obr. 2. Uspořádání[4]

Máme li motor se třemi halovými sondami, dochází ke komutaci proudu 6x za jedno otočení rotoru. Proud vždy prochází dvěma vinutími a třetí je bez proudu. Jednotlivé kroky komutace ukazuje následující obrázek [4].



Obr. 3. Směry proudu ve vinutích během komutace

Elektrická komutace může být buď obdélníková, nebo sinusová.

Obdélníková komutace je jednoduchá a umožňuje motoru vytvářet velký záběrný moment. Průběh momentu během otáčky je zvlněný o 14 %, protože rotor se v úseku mezi dvěma přepnutími proudu otočí o 60° a úhel magnetických polí se odchyluje od ideálních 90° o ±30°. Se změnou úhlu magnetických polí se mění i moment.

Sinusová komutace je náročná, protože vyžaduje spoustu výpočtů aktuálních hodnot výstupního napětí na jednotlivé sekce vinutí. Pro tyto výpočty potřebujeme znát polohu rotoru mnohem přesněji, než jak ji poskytuje snímač s Hallovými sondami. Proto musí být motor doplněn ještě o jeden přesnější snímač polohy. Hodnota výstupního sinusového napětí se tvoří pulzní šířkovou modulací. Průběh momentu během jedné otáčky je plynulý a motor má klidný chod v malých otáčkách.

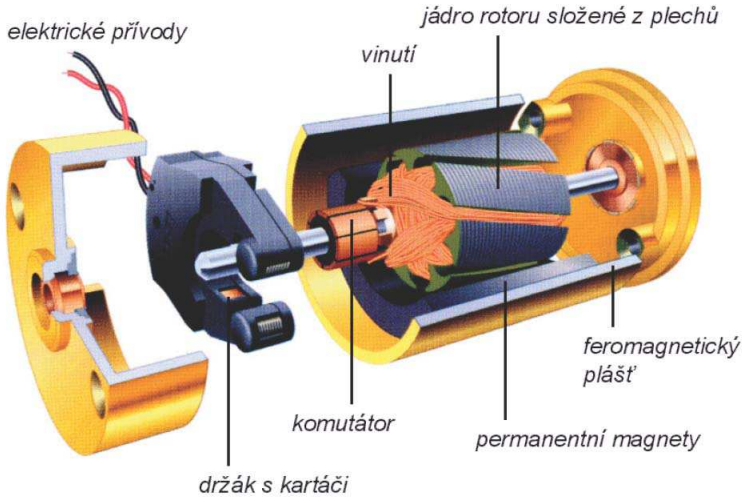
2.2 Stejnosměrný komutátorový motoru

U stejnosměrných komutátorových motorů se využívá principu mechanické komutace. Používají se grafitové nebo kovové kartáče.

Grafitové kartáče doléhají na válcový povrch komutátoru podstatně větší plochou než kovové a přenášejí vyšší proudy. Vyžadují větší přítlačnou sílu čímž, způsobují větší mechanické brzdění rotoru a vetší ztráty při chodu na prázdno. Grafitové kartáče se používají při vyšších proudech, které se vyskytují v aplikacích s častými rozběhy a provozem s krátkodobým přetížením velkými mechanickými momenty.

Kovové kartáče doléhají na válcový povrch komutátoru vlastní pružností. Malá přítlačná síla stačí pro dokonalý elektrický kontakt. Přechodový elektrický odpor kontaktu během otáčení motoru je malý a stejnoměrný. Malé je i mechanické brždění rotoru a proud při běhu naprázdno. Motor se navíc lehce rozběhne i po dlouhé době stání. Opalování kovových kartáčů a komutátoru je malé.

Předností motorů s mechanickým komutátorem je jednoduché nastavení rychlosti otáček v širokém rozsahu hodnotou napájecího napětí, velký záběrný moment, velká přetížitelnost. Jejich slabím místem je omezená doba životnosti komutátoru. Životnost konvenčních komutátorových motorů jen zřídka odpovídá požadavkům aplikací. Opotřebení komutátoru je způsobeno jiskřením mezi komutátorem a kartáčem, obvodovým házením atd.. Tyto problémy s životností kartáčů a komutátoru odstraňuje EC motor.



Obr. 4. Konstrukce DC motoru [4]

Stejnosměrné komutátorové motory mohou mít magnetické pole statoru tvořeno dvěma způsoby.

- Statorovým vinutím – stejnosměrné motory větších výkonů. Vinutí statoru může být zapojeno buď sériově s kotvou (sériové motory) nebo paralelně s kotvou (derivační motory) a nebo mohou být napájeny z jiného zdroje než kotva motoru (motory s cizím buzením).
- Permanentními magnety – používá se pro převážně u malých motorů, z pohledu chování motoru toto řešení odpovídá motoru s cizím buzením.

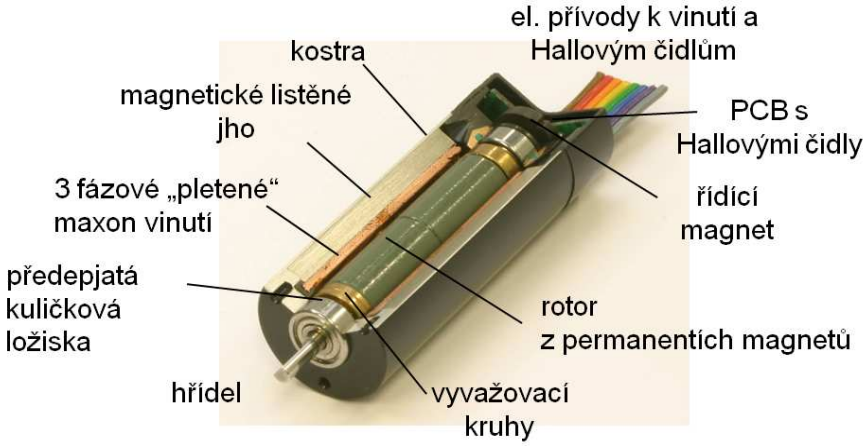
Každá varianta motorů má své výhody a nevýhody a své specifické aplikace.

2.3 Elektricky komutovaný stejnosměrný motor

Elektricky komutovaný stejnosměrný motor je označován jako EC motor, nebo BLDC motor. Název EC motor je zkratka Electronically commutated motors, název BLDC motor je zkratka Brushless DC motors. Jde stejnosměrný motor bez komutátoru a kartáčů. Důvodem pro vývoj EC motorů bylo odstranění mechanického komutátoru. Komutátor většinou omezuje délku života aplikace, je zdrojem elektromagnetického rušení a omezuje maximální otáčky motoru. Při vývoji EC motorů bylo důležité zachovat význačné vlastnosti DC motoru, jako je několikanásobná přetížitelnost, velký záběrný moment, nízká časová konstanta a malé rozměry. Tyto záměry se daří plnit a v současnosti dosahují EC motory násobně vyšších výkonů při stejných rozměrech a hmotnosti než DC-motory [maxon]

2.3.1 Uspořádání EC motoru

EC motor má na rozdíl od DC motoru umístěné vinutí ve statoru a na rotoru má připevněné permanentní magnety. EC motory mohou být ve tvaru válce nebo disku. Permanentní magnet má dva nebo více pólů a je vyroben ze vzácných zemin. Tím se zmenší rozměry motoru a dosáhne se malé setrvačnosti rotoru. Vinutí statoru je rozděleno na tři sekce, do kterých je postupně pouštěn napájecí proud tak, aby vzniklo točivé magnetické pole. Vinutí je zapojeno buď do hvězdy, nebo do trojúhelníka. Dále EC motor obsahuje snímač s Hallovými sondami pro snímání polohy rotoru (malé EC motory mohou být i bez sond). Diskové provedení EC-motoru je velmi zajímavé řešení, protože motor výrazně kratší a tím pádem zkracuje potřebnou zástavnou délku.



Obr. 5. Konstrukce EC motoru

2.4 Možnosti provozování motorů

Možnost provozu pohonů nejlépe ukazuje ω - M diagram. V tomto diagramu je na vodorovné ose velikost momentu M a na svislé ose úhlová rychlost ω. Tyto osy rozdělují rovinu na čtyři kvadranty. V I a III kvadrantu je součin M*ω který vyjadřuje výkon kladný → motorické kvadranty, II a IV záporný → brzdové kvadranty.

Jednokvadrantové – nejjednodušší pohony s jedním směrem otáčení nedovolující elektrické brždění. Pracovní bod se nalézá v I kvadrantu

Dvoukvadrantové – mohou měnit smysl momentu v jednom směru otáčení I a II kvadrant nebo měnit smysl otáčení bez možnosti měnit smysl momentu I a IV kvadrant.

Čtyřkvadrantové – mohou měnit jak smysl momentu, tak smysl otáčení a jejich pracovní bod může ležet v kterémkoli kvadrantu.

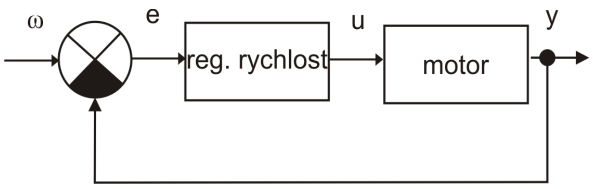
2.5 Regulační smyčky

Řízení EC motoru obvykle tvoří několik regulačních smyček. Jedná se především o regulační smyčka pro regulaci otáček (rychlostní smyčka) a o smyčku pro řízení proudu motorem (proudová smyčka).

Regulační smyčky mohou být realizovány spojitě s PID regulátory (starší řídící jednotky dnes už jen zřídka používané), využívající operačních zesilovačů. Mohou být realizovány pomocí diskrétních regulátorů (nejčastěji PSD), které jsou realizovány pomocí mikropočítačů a regulátor je tvořen programově. Výhodou diskrétních (číslicových) regulátorů je jejich variabilita, kdy se činnost regulátoru specifikuje programem. V současnosti je to i nižší cena z důvodu hromadné výroby.

2.5.1 Rychlostní regulační smyčka

Úkolem rychlostní smyčky je regulovat otáčky motoru na hodnotu ω (obr. 7). Na bor. 7 je zobrazeno schéma rychlostní regulační smyčky, kterou v nejjednodušším případě tvoří regulátor, motor a zpětná vazby (snímač rychlosti otáčení rotoru).



Obr. 6. Rychlostní regulační smyčka

ω – požadovaná rychlost otáčení rotoru
y – skutečná hodnota otáček
e – rozdíl požadované hodnoty otáček a skutečné hodnoty otáček
u – akční veličina (velikost napětí)

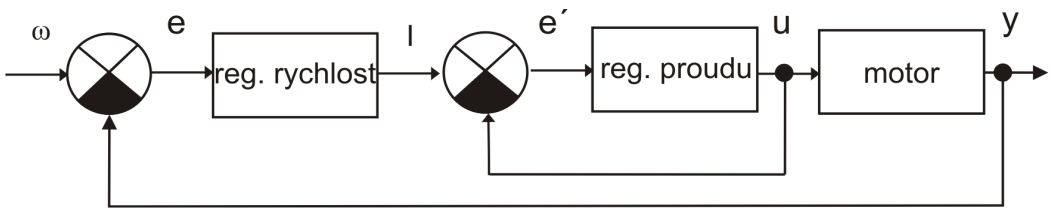
Tato smyčka může být použita jako hlavní řídicí smyčka, v případě kdy požaduje řídit pouze otáčky, nebo jako podřízená pro polohovou smyčku, které pomáhá zlepšovat dynamiku regulace. Rychlostní regulační smyčka se jako hlavní řídicí smyčka se používá například u pohonů vřeten obráběcích strojů apod.

2.5.2 Proudová regulační smyčka

Ke zlepšení kvality regulace volíme často složitější uspořádání regulačního obvodu s větším počtem regulačních smyček. K hlavnímu regulátoru se přidává ještě pomocný regulátor. Vhodným propojením je možné dosáhnout vyšší dynamiky regulace a větší stability.

Pro regulaci motoru je vhodné použít rozvětvený obvod s pomocnou regulovanou veličinou. Zapojení regulátorů je na obr 7. Podmínkou použití tohoto typu zapojení je, že se pomocná regulovaná veličina musí dát měřit. Je to veličina, kterou nemusíme z technologického hlediska regulovat, ale co je důležité, musí podstatně rychleji reagovat na vstupy poruchové veličiny než hlavní regulační smyčka.

Hlavní regulační smyčkou je regulace rychlosti otáček (polohy). Pomocným regulátorem je regulace proudu. Pomocný regulátor proudu nejen zvyšuje dynamiku celého systému, ale dále se pomocí něj ošetřují stavy překročení maximálního odběru proudu. Tato funkce proudového regulátoru je velmi důležitá pro řízení EC motoru.



Obr. 7. Rozvětvený regulační obvod

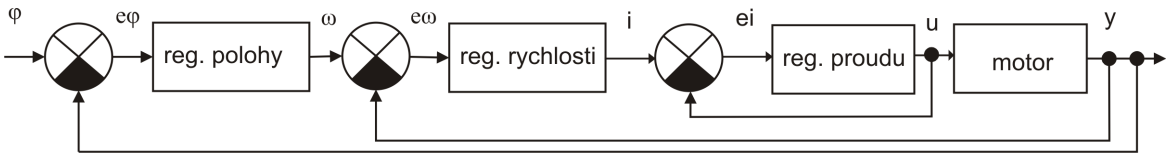
ω – požadovaná rychlost otáčení rotoru
e - rozdíl požadované hodnoty otáček a skutečné hodnoty otáček
i – požadovaný proud

e´ - rozdíl požadovaného a skutečného proudu
u – akční veličina a zároveň skutečná hodnota proudu
y – skutečná hodnota otáček

Dojde li k zablokování hřídele, zastaví se i komutace, stejnosměrný proud prochází stále stejnými vinutími motoru. Vlivem průchodu stejnosměrného proudu vinutím se neprojeví reaktance, ale jen ohmický odpor a ten je poměrně malý. Proto dochází k velkému odběru proudu a nadměrnému zahřívání vinutí, které může motor vážně poškodit. [2]

2.5.3 Polohová regulační smyčka

Polohová regulační smyčka má za úkol regulovat polohu natočení hřídele φ. Na obr. 8 je schéma polohové regulační smyčky, která obsahuje několik podřízených regulačních smyček. Hlavní regulační smyčkou je regulace polohy φ. Té je podřízena regulace rychlosti ω, a té je zase podřízena regulace proudu I. Na celou regulační smyčku působí poruchové děje jako měna momentu na hřídeli, kolísání napájecího napětí atd [1].



Obr. 8. Rozložení kvadrantů provozu motoru

φ - požadovaná hodnota polohy
eφ - rozdíl požadované a skutečné polohy
ω - požadovaná rychlost otáčení rotoru
eω - rozdíl požadované hodnoty otáček a skutečné hodnoty otáček
i - požadovaný proud
ei - rozdíl požadovaného a skutečného proudu
u – měřená hodnota proudu
y – měřená hodnota otáček

3. Řídící jednotky pro EC motory

Na trhu je celá řada řídících jednotek od různých výrobců. Liší se velikostí napájecího napětí, maximálním výstupním proudem, možnostmi řízení motoru a komunikačními prostředky. Jedním z velmi známých výrobců je švýcarská firma Maxon motor (www.maxonmotor.com). Dále jsou na trhu firmy Anaheim automation (www.anaheimautomation.com) nebo Aveox (www.aveox.com) a další.

3.1.1 Produkty MAXON

Firma Maxon vyrábí celou radu řídících jednotek pro EC motory. Její nabídka je velmi pestrá. Od jednotek pro nejmenší EC motory bez snímačů natočení rotoru s jednokvadrantovám provozem až po univerzální jednotky se čtyřkvadrantovým provozem, které jsou schopny řídit DC i EC motory, a mají možnost pomocí komunikační sběrnice ovládat další podřízené jednotky. Nevýhodou jednotek maxon je, že jsou vyvíjeny pro motory maxon, a výrobce nedoporučuje použití s motory jiných výrobců.

Řídící jednotky EPOS typ DES pracují čtyřkavadrantově a mají na výstupu sinusové průběhy napětí do jednotlivých sekcí vinutí, vytvářené metodou PWM. Mechanický moment na výstupu nekolísá a motor přesně pracuje i při velmi malé rychlosti. Pro informaci o poloze rotoru se požaduje výstup z Hallových sond doplněný signálem inkrementálního snímače. Jednotky jsou osazeny komunikačním rozhraním RS232 a CAN BUS. [5]

Tab1. Srovnání produktů MAXON [5]

	Digitální4-kvadrantová	
	DES 50/5 (205679)	**DES 70/10 (228587)**
Vybavení řízeného motoru EC snímači	3 Hallovy sondy inkrementální snímač s vnitřní elektronikou LINE DRIVER	
Napětí Vcc zdroje pro napájení jednotky	12 – 50 V DC	
Výstupní napětí jednotky Uout	90% Vcc – 2V	
Tvar napájecího napětí Uout	sinusový	
Výstupní proud Iout: trvale Krátkodobě· Omezení	5 A 10 A potenciometrem Imax	10 A 30 A
Zadání požadované hodnoty	• -10…0…+10 V SET VALUE externím napětím • 0…+2,5…+5 V SET VALUE externím napětím	

	• externím potenciometrem volitelné přepínači • RS232 • CAN BUS	
Zabudovaná tlumivka PWM	3 x 160 uH	nutná externí
Vyřazení výkonového stupně z činnosti a nulování	Vstupním napětím ENABLE	
Spojitě potenciometry nastavitelné parametry	• Nejvyšší rychlost nmax • Nulová rychlost OFF SET • Nejvyšší proud Imax • Zisk regulátoru CAN	
Zabrždění motoru zkratováním vinutí	Vstupním signálem na svorce STOP. Jednotka zkratuje vinutí a proud omezí na nastavený Imax.	
Omezení proudu k ochraně motoru před tepelným přetížením	• Krátkodobého potenciometrem Imax. Trvání proudu je závislé na jeho velikosti. Při cyklickém provozu se doba pulsu omezí podle doby cyklu. • Trvalého na 1/3 krátkodobého proudu	
Monitorování stavu motoru	• Napětím úměrným okamžité • Napětím úměrným okamžitému Na svorce MONITOR Volitelné napětí DIGITAL	

3.1.2 Produkty firmy Anaheim automation

Firma Anaheim automation vyrábí řadu jednotek s výstupním proudem 5 – 30A. Jednotky jsou napájeny stejnosměrným napětím 10 – 50V nebo střídavým 85 – 135V. Pracují dvoukvadrantově a mají rychlostní regulační smyčku a ochranu proti nadproudu. Velkou nevýhodou těchto jednotek je možnost ovládání pouze analogovým signálem.

3.1.3 Produkty firmy Aveox

Produkty firmy Aveox jsou parametry podobné produktům Anaheim automation. Jsou vyráběny v mnoha variantách s širokým rozsahem výstupních proudů, ale opět jsou ovládány pouze analogovým signálem.

3.1.4 Shrnutí

Všechny jednotky jsou schopny poměrně kvalitní regulace rychlosti otáčení s dobrými dynamickými vlastnostmi (mají implementovánu podřízený proudový regulátor). Pouze řídicí jednotky EPOS od firmy maxon mají implementovánu i regulaci polohy a komunikační rozhraní RS232 a CAN.

Další problém který se během průzkumu komerčně vyráběných jednotek objevil, je uzavřenost řídicích systémů. Na trhu se nepodařilo najít řídící jednotku, která by umožňovala přidat další regulační smyčky do řídicího systému.

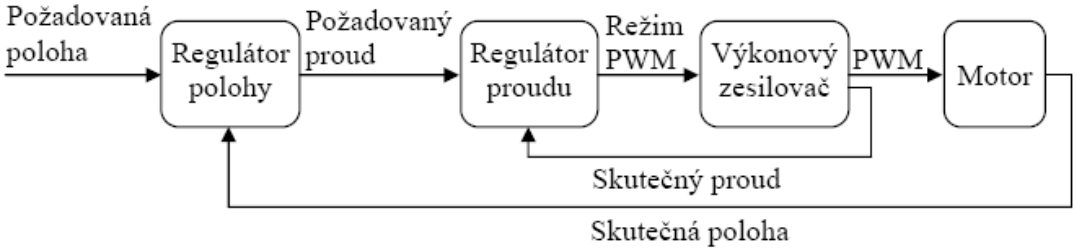
3.2 Struktura řídících jednotek

Řídicí jednotka pro EC motory má za úkol podle informací ze snímače úhlového natočení rotoru přepojovat proud do příslušných sekcí vinutí statoru. Malé EC motory je možné roztáčet i bez informace o poloze rotoru, ale toto nelze použít pro nízké hodnoty otáček. Pro zpřesnění komutace je řídící jednotka doplněna o vstup z inkrementálního snímače polohy.

Dalším úkolem řídící jednotky je udržovat nastavené parametry jako např. rychlost otáček, maximální proud, moment na hřídeli, křivku zrychlení atd. A dále komunikovat s nadřazeným systémem.

3.2.1 Řídící část

Řídicí část obsahuje logické obvody pro spínání prvků ve výkonové části. Dále obsahuje regulátor proudu, regulátor rychlosti a polohy. Celé řízení funguje následovně: prvním prvkem v řídicí smyčce je regulátor rychlosti. Jeho vstupem je požadovaná hodnota otáček a skutečná rychlost otáček snímaná snímačem úhlového natočení. Výstupem je požadovaný proud. Dále následuje regulátor proudu. Jeho vstupem jsou: požadovaný proud z regulátoru rychlosti a skutečný proud odebíraný jednotlivými vinutími motoru. Výstupem jsou tři obdélníkový signál s pulsně šířkovou modulací tzv. PWM (Pulse width modulation). Celé zapojen ukazuje následující obrázek.

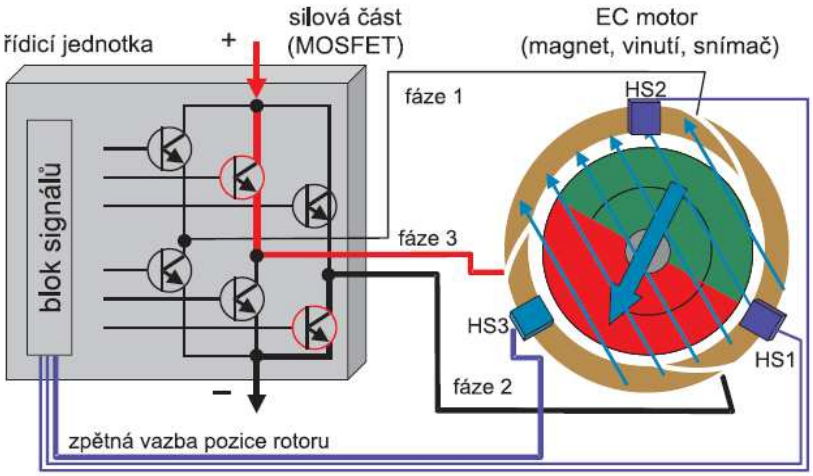


Obr. 9. Uspořádání řídící jednotky

Řídicí část jednotky je buď analogová (starší řídicí jednotky, dnes jen velmi zřídka) nebo digitální (převážně), která je realizována pomocí mikropořítače.

3.2.2 Výkonová část

Výkonová část obsahuje výkonové spínací tranzistory zapojené do tzv. můstků. Na její vstup jsou přivedeny tři signály z regulátoru proudu. Každý signál je veden na dva tranzistory (obr. 10). Přes horní tranzistor je přiveden na jeden konec vinutí kladný pól napájení a přes spodní tranzistor je na druhý konec vinutí přiveden záporný pól napájení. Tím se uzavře obvod, vinutím prochází elektrický proud a indukuje se magnetické pole. Spínání je prováděno na základě sledování polohy rotoru.



Obr. 10. Uspořádání výkonové části [5]

3.2.3 Měřící část

Měření řízených veličin je velmi důležitou částí celé řídící jednotky. Na přesnosti měření řízených veličin závisí přesnost regulace jednotlivých smyček. Přesnost měření je dána přesností použitého snímače a kvalitou vyhodnocení naměřených hodnot.

Řídící jednotky zpravidla realizují měření polohy (rychlosti) rotoru, velikost výstupního proudu případně napájecí napětí.

.

4. Snímače

4.1 Měření elektrického proudu

Snímače proudu se pro měření aktuální velikosti proudu protékajícího jednotlivými vinutími motoru. Informace o velikostech proudů v jednotlivých vinutích využívá proudová regulační smyčka, ochrana motoru a řídící jednotky před poškozením. Dále se využívá pro určování krouticího momentu na hřídeli.

Měření proudu se dá realizovat několika principy, hlavní z nich jsou měření úbytku napětí na rezistoru, měření pomocí Hall snímače a měřícím transformátorem. Jejich srovnání je shrnuto v tab. 2.[6]

Tab. 2. Srovnání parametrů snímačů proudu [6]

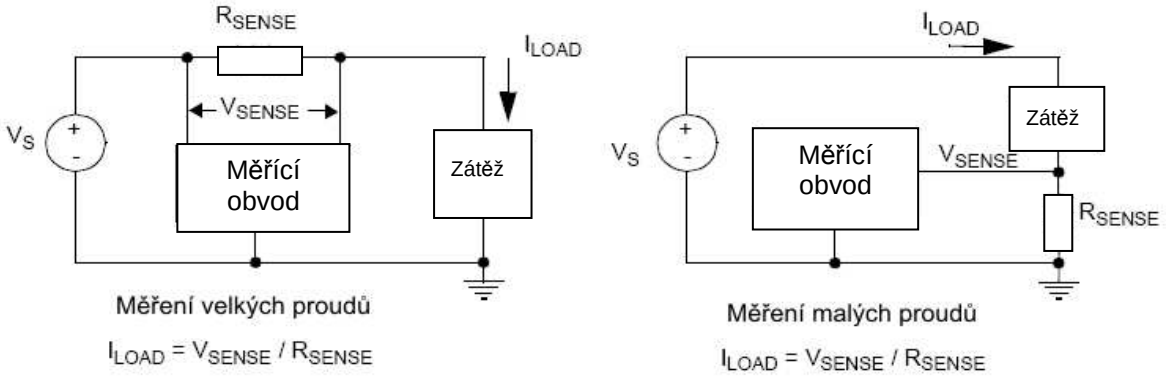
Metoda měření proudu	**rezistor**	**Hall senzor**	**měřící transformátor**
Přesnost	dobrá	dobrá	střední
Přesnost v závislosti na teplotě	dobrá	špatná	dobrá
Cena	nízká	vysoká	střední
Galvanické oddělení	ne	ano	ano
Měření velkých proudů	špatné	dobré	dobré
Problém s DC ofsetem	ano	ne	ne
Problém se saturací / hysterezí	ne	ano	ano
Spotřeba	vysoká	nízká	nízká
Měření AC/DC	obojí	obojí	jen AC

4.1.1 Měření pomocí měřícího odporu

Jde o nepřímou měřící metodu. Do cesty proudu je vložen měřící rezistor malé hodnoty. Průchodem proudu vzniká na měřícím rezistoru úbytek napětí. Toto napětí se měří a přepočítává na velikost proudu podle Ohmova zákona. Převodní charakteristika I→U je lineární. Pomocí této metody je možné měřit stejnosměrný i střídavý proud.

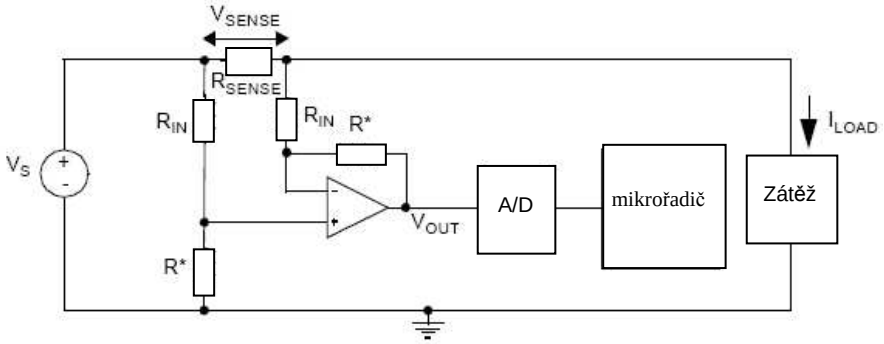
Nevýhodou je, že vlivem průchodu proudu se měřící rezistor zahřívá, proto je nutné používat pro měření větších proudů odpory s velkou výkonovou ztrátou. Další nevýhodou metody je že se napětí za měřícím rezistorem se snižuje právě o úbytek na měřícím odporu. Aby tento úbytek byl co nejmenší je nutné použít pro měření odpory s malou hodnotou

ohmického odporu (~1Ω). To má za následek malou hodnotu napětí na měřícím odporu a pro další použití je nutné tuto malou hodnotu napětí zesílit. Měřící odpor je možné do obvodu zapojit několika způsoby, podle toho jestli chceme měřit velké nebo malé proudy. Zapojení pro velké a malé proudy ukazují následující obrázek.



Obr. 11. Zapojení měřícího odporu do obvodu [6]

Pro měření velkých proudů se používá diferenčního zapojení. Sleduje se rozdíl napětí před a za měřícím odporem. Toto rozdílové napětí se přivádí na operační zesilovač, kde je upraveno na požadovaný rozsah. Dále je převáděno A/D převodníkem na číslicovou hodnotu, protože k výpočtu hodnoty proudu se používá mikroprocesor. Celé zapojení ukazuje obr. 12.

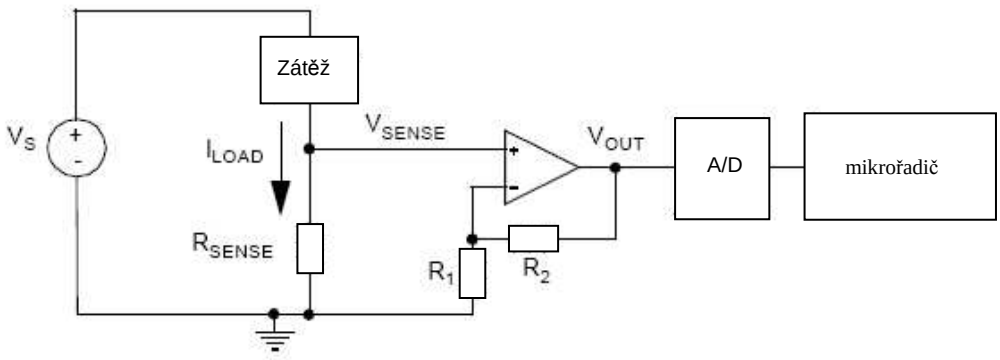


Obr. 12. Zapojení měřícího odporu pro měření velkých proudů [6]

Výstupní napětí z operačního zesilovače je dáno vztahem

$$V_{out} = V_{SENSE} \cdot \left(\frac{R^*}{R_{IN}}\right) = (I_{LOAD} \cdot R_{SENSE}) \cdot \left(\frac{R^*}{R_{IN}}\right)$$

U měření malých proudů je měřící rezistor zapojen mezi spotřebič a zem. Používá se také diferenčního zapojení ale s tím rozdílem že invertující vstup operačního zesilovače je připojen přes rezistor na zem. Celé zapojení ukazuje následující obrázek.



Obr. 13. Zapojení měřícího odporu pro měření malých proudů [6]

Výstupní napětí z operačního zesilovače je dáno vztahem

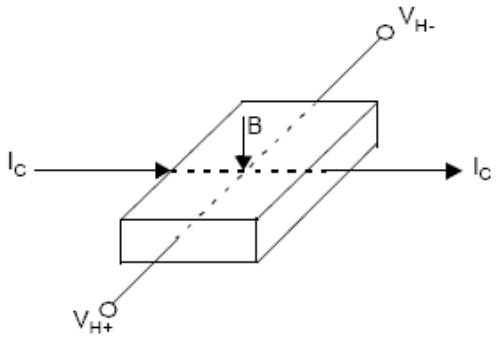
$$V_{OUT} = V_{SENSE} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = (I_{LOAD} \cdot R_{SENSE}) \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

Shrnutí

- Univerzální metoda (AC/DC)
- Přesná (v závislosti na použitých komponentech)
- Možnost měření rychlých jednorázových dějů
- U měření větších proudů je rozměrově náročná
- Ovlivňuje obvod (snižuje výstupní napětí)
- Levná
- Lineární převodní charakteristika
- Není galvanicky oddělena silová a ..

4.1.2 Měření pomocí snímače s Hallovým jevem

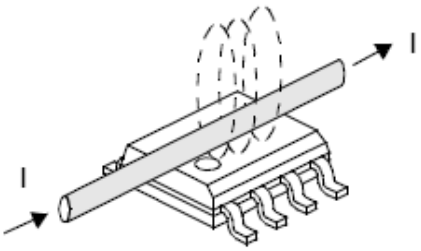
Protéká li vodičem proud I_C a zároveň působí magnetické pole B, které je kolmé na protékající proud vzniká na stranách vodiče Hallovo napětí V_H , jak ukazuje obrázek 14. Zdrojem magnetického pole je vodič kterým prochází elektrický proud.



Obr. 14. Princip Hallova jevu [6]

Snímače na principu Hallova jevu vyrábí několik výrobců např. Allegro, Lem a další. Jsou vyráběny jako integrované obvody (snímač + vyhodnocovací část). Výstupem snímače je stejnosměrné napětí úměrné protékajícímu proudu. Jsou vyráběny ve dvou provedeních. U prvního provedené je měřený proud veden přes snímač. U druhého je snímač přiložen na vodič, kterým protéká elektrický proud.

Oblast použití snímačů na tomto principu je velmi široká. Jejich hlavní nevýhodou je maximální frekvence, kterou jsou schopny měřit. Omezení frekvence je způsobeno saturací snímače.



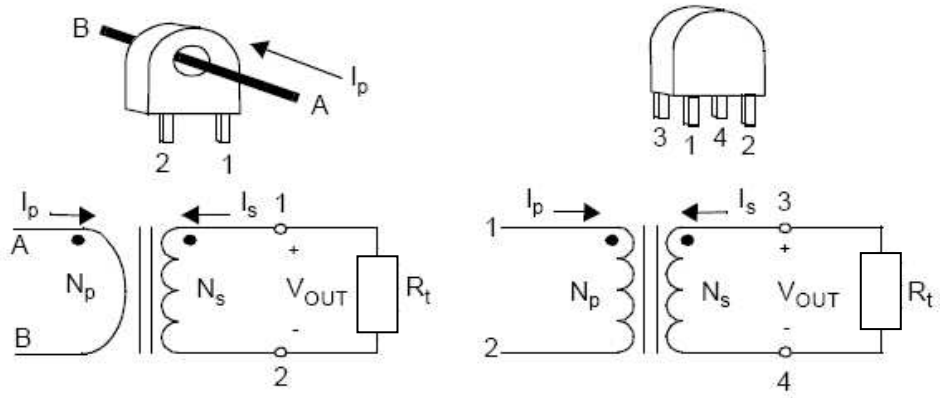
Obr. 15. Použití integrovaných Hall snímačů [6]

shrnutí

- Univerzální metoda (AC/DC)
- Přesná
- Omezená maximální frekvence
- Malé i pro měření velkých proudů
- Neovlivňuje obvod
- Dražší
- Lineární převodní charakteristika
- Galvanické oddělení

4.1.3 Měření pomocí měřícího transformátoru

Měřící transformátor, další možnost jak je možné měřit elektrický proud. Jedná se o speciální transformátor, který má primární vinutí zapojené do obvodu kde chceme měřit proud, a na sekundárním vinutí se měří naindukované napětí. Výhodou je galvanické oddělení. Nevýhodou měřících transformátorů je, že jsou schopny měřit jen střídavý proud. Další nevýhodou je malý rozsah měřící frekvence. Jejich použití je hlavně pro měření velkých proudů.



Obr. 16. Typy měřících transformátorů [6]

shrnutí

- Pouze AC
- Přesná
- Omezená maximální frekvence
- Malé i pro měření velkých proudů
- Neovlivňuje obvod
- Dražší
- Lineární převodní charakteristika
- Galvanické oddělení

4.2 Snímače rychlosti a natočení rotoru

4.2.1 Tachodynamo

Pro měření rychlosti otáčení rotoru se používala celá řada elektrických točivých strojů provozovaných v generátorických režimech napěťo-proudové charakteristiky. Stroje musí být pro tento režim upraveny. V současnosti se používají stále méně často, z důvodu analogového výstupu a nevhodnosti pro snímání polohy.

Tachodynamo je stejnosměrný komutátorový generátor, konstrukčně podobný komutátorovému motoru s permanentními magnety. Skládá se ze statoru tvořeného permanentním magnetem a vinutého rotoru s komutátorem (obr.17). Otáčením rotoru se na svorkách komutátoru vytváří elektrické napětí, které je přímo úměrné otáčkám.

Konstrukčně musí být optimalizován tak, aby dával spojitý minimálně rušený výstupní signál. To se týká především komutátoru, mít minimalizováni jiskření mezi lamelami a kartáči a odskakování kartáčů.



Obr. 17. Tachodinamo [12]

4.2.2 Inkrementální rotační snímače (IRC)

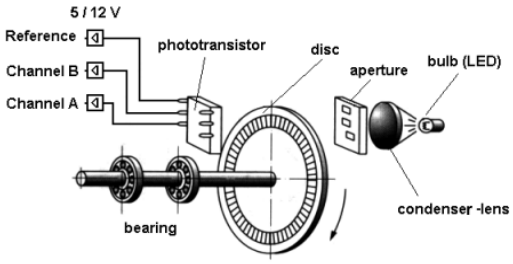
Rotační inkrementální snímač (enkoder) je elektromechanický převodník, který převádí rotační pohyb na sekvence elektrických digitálních impulzů. Realizují se pomocí kotouče se značkami a snímací částí. Výstup snímací části se mění v závislosti na přítomnosti / nepřítomnosti značky.

V praxi se nejčastěji používají dva principy - kotouč s otvory (optický detektor) nebo kotouč s permanentními magnety (Hall snímač).

Enkodery jsou realizovány jako jedno, dvou anebo tří kanálové snímače. Jednokanálové snímače používají jen jednu snímací soustavu a jsou schopni snímat pouze rychlost otáčení. Pro snímání polohy a rychlosti se používají dvoukanálové snímače, ty mají dvě snímací soustavy s dvěma výstupními kanály A a B, které jsou od sebe vzájemně posunuty o 90 elektrických stupňů. Tímto posunutím je možné vyhodnocovat natočení 4x přesněji. Směr otáčení lze rozeznat podle sekvence stavů generovaných oběma kanály. Tříkanálové snímače jsou v podstatě dvoukanálové snímače, ke kterým je přidán ještě jeden kanál, ten je nazýván jako nulový nebo referenční a označován písmenem Z nebo I. Tento kanál udává referenční (nulovou) polohu snímače. Impulz je proveden vždy jednou za otáčku.

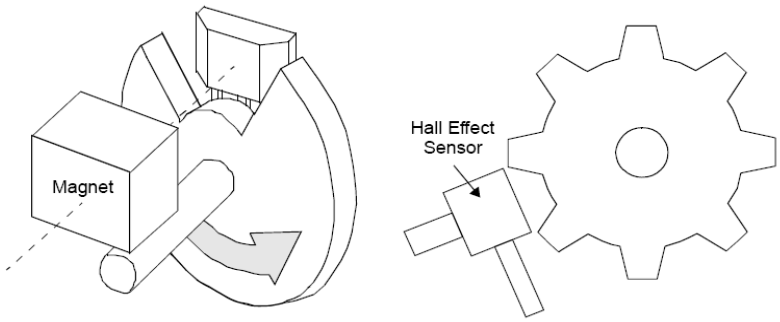
Optický snímač – je založený na principu clonění světelného paprsku mezi zdrojem světla (infra, led, nebo laser dioda) a fotocitlivým detektorem, tvořeným nejčastěji fototranzistorem.

Ke clonění se používá rotující disk, který je pevně spojen s hřídelí snímače. Disk se vyrábí plastový, kovový nebo skleněný. Rotující disk má po obvodu štěrbiny, kterými buď světlo prochází do detektoru, nebo je cloněno. Při otáčení dochází k pravidelnému přerušování světelného toku. Výstupním signálem z fotocitlivého prvku jsou pak elektrické impulzy. Výsledné natočení je pak dáno obsahem čítače, který inkrementuje tyto impulzy. Princip snímače je znázorněn na obr.18 Přesnost, neboli rozlišení snímače je dáno počtem štěrbin po obvodu disku.



Obr. 18. Funkce inkrementálního senzoru

Hall snímač - Na obr.19 jsou zobrazeny dva typy Hallových snímačů, vlevo je zobrazen snímač, který je schopen měřit pouze počet otáček bez směru otáčení, protože na jeho výstupu je pouze jeden impuls na otáčku. V praxi se ale tyto snímače používají i s větším počtem výřezů, takže je možné snímat i polohu. Tento typ snímače pracuje tak, že mezi magnetem a snímačem rotuje disk, který obsahuje výřezy. Pokud je mezi magnetem a snímačem tělo rotujícího disku, obvod se rozladí. Impulzy jsou generovány při každém průchodu výřezu mezi magnetem a snímačem. Na obr.19 vpravo je zobrazen snímač, u něhož se mění vzduchová mezera mezi Hallovým snímačem a rotujícím diskem.



Obr. 19. Funkce inkrementálního senzoru

Každá taková změna má za následek vygenerování pulzů na výstupu snímače. Tento typ snímače je schopen měřit i natočení hřídele, jeho přesnost je ale menší, než u optických snímačů. V praxi se používají i snímače, které pracují tak, že na obvodu kotouče (v případě snímání polohy na pásce) jsou po stejně velkých úsecích rozmístěny magnetické domény, které jsou pak Hallovým snímačem detekovány.

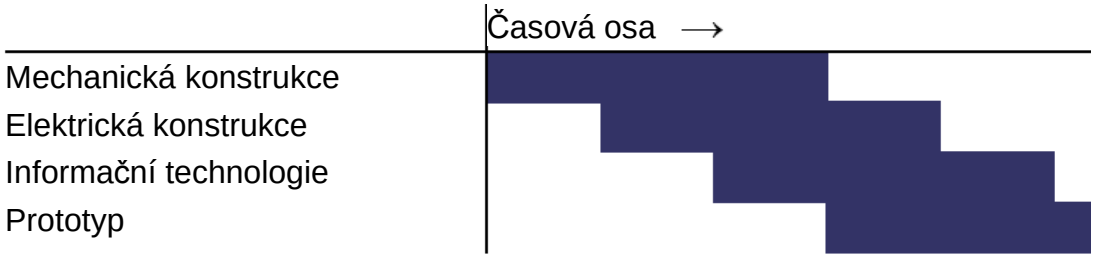
5. Návrh řídicí jednotky pro EC motory

5.1 Metody vývoje nového produktu

K vývoji nového produktu je možné přistoupit několika způsoby. Lze použít metodu tzv. Klasického způsobu, jak popisuje kapitola 5.1.1, nebo lze vývoj nového produktu realizovat pomocí počítačového modelování 5.1.2.

5.1.1 Klasický vývoj nového produktu

Klasický vývoj nového produktu postupuje od návrhu mechanické části, přes návrh elektrické části až k vývoji programové části produktu a výrobě prototypu. Prototyp je realizován a otestován, v případě, že testům nevyhovuje, musí být překonstruován a opraven nebo znovu vyroben. Je to velmi zdlouhavý a drahý proces, protože každý zásah do prototypu, nebo výroba nového prototypu představuje další náklady na vývoj a testování.



Obr. 20. Diagram klasického vývoje nových produktů [3]

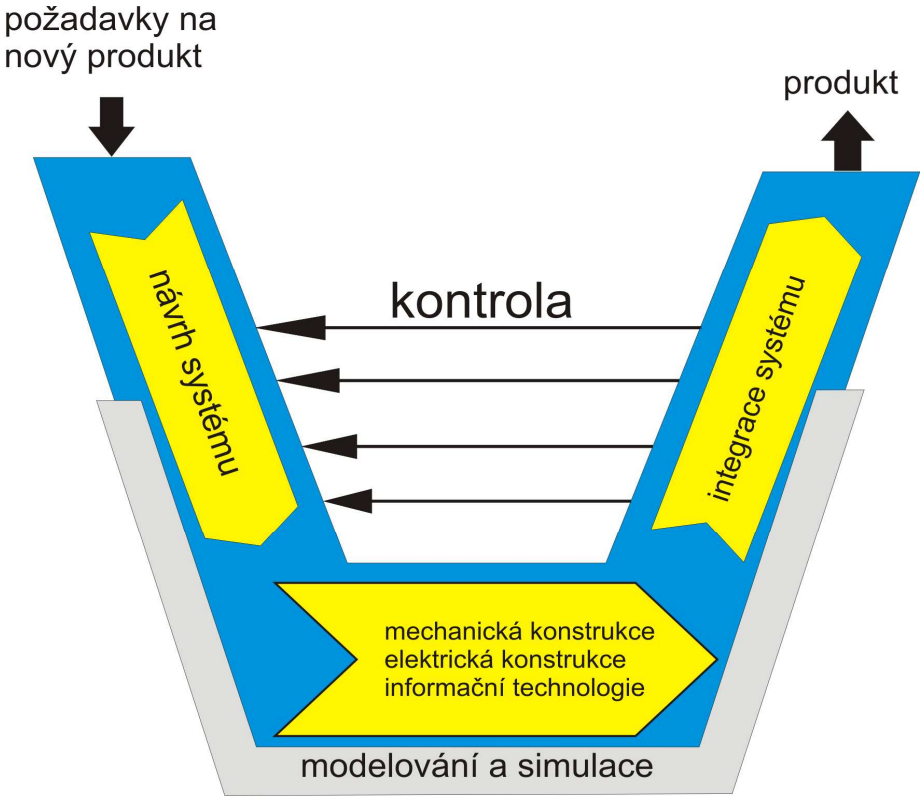
5.1.2 Vývoj nového produktu pomocí modelování

Aby se celý vývoj nového produktu urychlil a „zlevnil“, je v současné době preferováno použití modelování daného problému. K modelování se používá různých přístupů, které využívají tzv. "virtuálních" modelů. Existuje celá řada definicí modelů. Jedním z nich je např. „A model“

„A model reverts substantive characteristics of an original in a suitable manner“ lépe „A model is the representation of substantive aspects of an abstract, a panned o ran existing systems. A model can exist as a theoretical imagination, as an abstact systém of signs or in reality a determined material-energetic basis …“ (Brockhaus abc Automatisirung Leipzig 1975 [3]) volně přeloženo „Model je reprezentací podstatných hledisek (stránek) obecných, plánovaných nebo skutečných systémů. Může existovat jako teoretická představa, jako obecný systém znaků, nebo reálně vymezený v materiálovo-energetickém základu …“

Celý vývoj nového produktu znázorňuje obr. 21. Na začátku celého vývoje je stanovení požadavků na nový produkt. Jakmile jsou stanoveny požadavky, přichází na řadu návrh systému. Po návrhu systému následuje tvorba modelů a jejich analýza. Najednou se pracuje na modelování mechanických, elektrických modelů a návrhu řídicího systému. Tyto práce mohou probíhat paralelně, čímž se urychlí celý vývoj. Po ukončení této fáze

následuje integrace systémů do jednoho celku a výroba produktu. Během systémové integrace stále probíhá sledování, jestli jsou dodrženy všechny vlastnosti, které byly na začátku stanoveny. Celý postup je možné několikrát opakovat. U tohoto postupu odpadá výroba prototypů a jejich testování.



Obr. 21. V model postupu při vývoji nového produktu s využitím modelování [3]

5.2 Softwarové nástroje pro podporu vývoje produktu

K modelování, simulování a ověřování konstrukčních návrhů existuje celá řada prostředků. Dělí se podle použití.

Tab. 3. Vývojové softwary [3]

nejčastěji používané nástroje	výrobce	typ
MATLAB/Simulink	The Math Works	Multi oborový simulační nástroj
Dymola	Dynasim	Multi oborový simulační nástroj

EAGLE	CadSoft	Návrh PCB
OrCAD	Cadence	Návrh PCB
ANSYS Multidhysics	ANSYS	Metoda konečných prvků
LabVIEW	National Instruments	Tvorba měřících a řídicích aplikací
Inventor	Autodesk	3D Cad

5.3 Použitý software

5.3.1 Modelování a simulace

K simulaci řídící části řídící jednotka bylo použito prostředí LabVIEW firmy National Instrunents. Jde o grafické vývojové prostředí, ve kterém je možné velmi rychle realizovat nejrůznější projekty. Každý projekt se skládá z jednoho nebo více VI („virtuální přístroj“). Každé VI má dvě okna. Jedním je okno uživatelského rozhraní a ve druhém je samotný kód tvořený pomocí spojování jednotlivých bločků. Toto vývojové prostředí je postaveno na použití programovacího jazyka G.

5.3.2 Návrh elektroniky

Pro tvorbu elektrických schémat a desek plošných spojů byl použit softwarový produkt firmy CadSoft EAGLE. Jedná se o jednodušší program, který neumožňuje simulaci zapojení, ale jeho výhodou je jeho jednoduché ovládání, snadný převod schémat na PCB a také nízká cena.

5.3.3 Vývojový software pro mikrořadič a pro PC

Pro vývoj software řídicí jednotky a pro vývoj ovládací aplikace bylo použito vývojové prostředí Microsoft Visual Studio 2005. Protože tato práce využívá již existujícího software univerzální řídicí jednotky, který byl realizován pro jednotku UMCU S24/7, byla volba vývojového prostředí dána předem.

Software řídicí jednotky je psán v jazyce C tak, aby jej bylo možné přeložit jak pro běh na PC (simulační režim), tak pro běh na mikrořadiči (reálný režim). V tomto případě je použit pro překlad pro mikrořadič "open source" překladač GNU GCC 4.2 pro architekturu ARM.

Software pro ovládání řídicí jednotky tvoří několik dynamických knihoven, z něchž některé jsou realizovány v jazyce C# a některé v jazyce C++ s využitím rozšíření pro platformu Microsoft .NET Framework 2.0.

5.4 Požadavky na řídicí jednotku

Řídicí jednotka je určena pro řízení rychlosti otáčení motoru (otáček) anebo pro řízení polohy (natočení), které definuje a předává nadřazený systém pomocí sériového

komunikačního rozhraní. Pro zajištění této činnosti musí ovládat průběh napětí (proudu) jednotlivých vynutím motoru a snímat otáčky anebo natočení rotoru motoru.

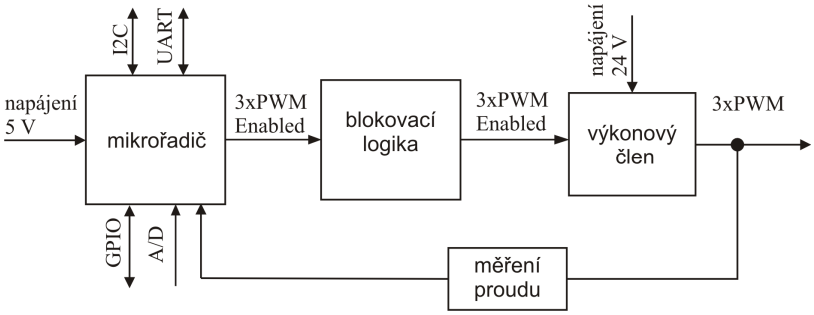
Pro ovládání průběhu napětí na jednotlivých vinutích motoru musí jednotka generovat PWM modulaci, kterou ovládá výkonový obvod. Pro řízení průběhu proudu je potřeba měřit okamžitý proud vinutími motoru. U motorů osazených Hallovými snímači natočení rotoru, je nutné využívat tuto informaci pro řízení komutace. Snímaní rychlosti otáčení a polohy je předpokládáno pomocí inkrementálních snímačů, ale v návrhu je připravena i možnost připojit tachodynamo. Dále pro zvýšení univerzality jednotky budou realizovány tři obecné analogové vstupy, použitelné např. pro tachodynamo, pomocný snímač polohy, snímač síly/kroutícího momentu. Ze stejného důvodu budou realizovány čtyři binární vstupy/výstupy např.: pro koncové spínače, referenční spínač. Komunikace bude realizována pomocí UART a I2C.

5.4.1 Řídicí jednotka UMCU-DC S24/7

Řídicí jednotka UMCU-DC S24/7 byla vyvinutá na ústavu ÚAI FSI. Původně byla vyvíjena pro tříkolový všesměrový autonomní robot OMR III [14]. Protože se velmi osvědčila, je používána i pro další projekty a stala se základem pro koncepci jednotek s univerzálním softwarovým rozhraním. Pro řízení je použit 8-bitový mikrořadič C8051F006 od firmy Silicon Laboratories. Jako výkonový prvek je použit integrovaný obvod TLE 6209 od firmy Infineon. Měření proudu je realizováno pomocí bočníku umístěného v sérii s napájením výkonové části, dále je také měřeno napětí tohoto napájení. Jednotka umožňuje připojení inkrementálního snímače otáček. Dále může být k jednotce připojen snímač teploty pro monitorování teploty na plášti motoru. Komunikace jednotky s okolím je řešena pomocí sériové sběrnice UART, jednotka se chová jako slave, tj. čeká a zpracovává příkazy nadřazeného systému.

5.4.2 Zapojení jednotky

Zapojení jednotky vychází z požadavků na řídicí jednotku. Schéma zapojení jednotky je rozděleno na několik částí: řídící část s mikrořadičem, blokovací logická jednotka, výkonová část, část pro měření proudů protékajících jednotlivými vinutím motoru, měření napájecího napětí výkonové části a pomocné obvody. Napájení desky je řešeno zvlášť pro výkonovou část a zvlášť zbytek jednotky.



Obr. 22. Blokové schéma řídící jednotky

Celá jednotka je napájena za dvou stran. Napájení procesorové části bude řešeno pomocí napájecího konektoru standardizovaného v rámci laboratoře. Konektor přivádí napětí 3,3V a 5V, dále obsahuje komunikační sběrnici UART. Výkonová část bude napájena 24V z druhého zdroje. Z 24V napájení bude odvozeno 5V napájení pro blokovací logiku. Blokovací logika zajistí bezpečné odpojení výstupu výkonového spínače, tak aby při výpadku napájení procesoru nemohlo dojít k samovolnému, nekontrolovatelnému roztočení motoru. Dále se předpokládá i možnost použití bateriového napájení, proto bude v jednotce implementováno sledování napájecího napětí.

Pro připojení dalších rozšiřujících zařízení budou vyvedeny na zvláštní konektory periferie GPIO a A/D převodníky, definované v rámci univerzální řídicí jednotky. Dalšími rozšiřujícími zařízeními mohou být snímače teplot pro sledování oteplení motoru nebo koncové spínače.

5.5 Volba mikrořadiče

Správný výběr mikrořadiče pro stavbu řídící jednotky EC motorů je klíčový. Je důležité, aby měl k dispozici tři programovatelné PWM výstupy, minimálně 6 rychlých A/D vstupů (alespoň 100 000 převodů za sekundu), byl schopen zpracovávat vstup z inkrementálních snímačů (nejlépe hardwarový kvadraturní enkodér).Implementoval sériová rozhraní UART a I2C.

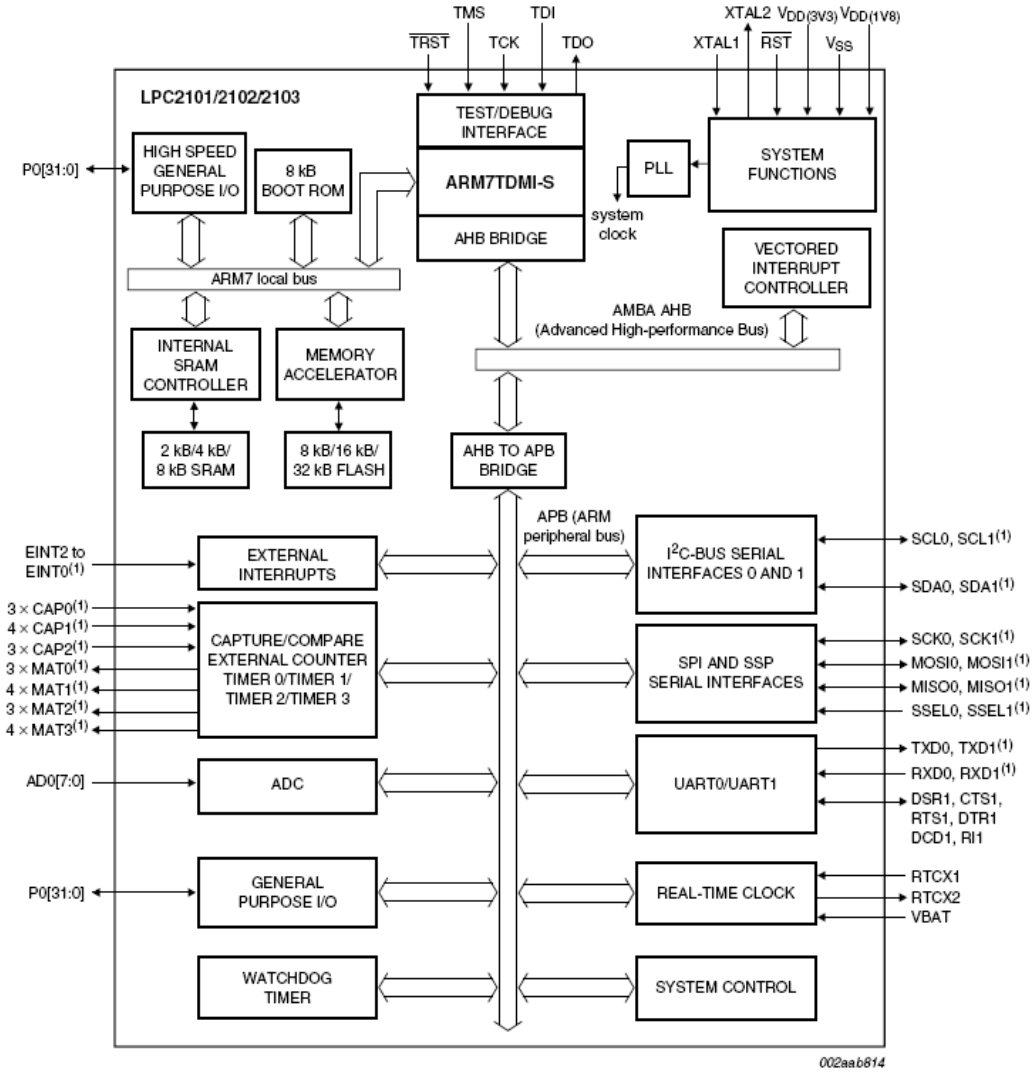
Dále při výběru byla požadována existence open-source překladače jazyka C/C++ pro zvolený mikrořadič, možnost zápisu programu do mikrořadiče pomocí rozhraní UART. Nízká cena a dostupnost v kusovém množství na českém trhu.

Po předchozí analýze a provedených simulacích problému byl vybrán mikrořadič od firmy NPX typ LPC 2103. Vybraný mikrořadič je realizován na jádru ARM7TDMI firmy ARM, které je 32-bitové a poskytuje vysoký výpočetní výkon a splňuje všechny výše uvedené požadavky. Mikrořadiče založené na ARM jádrech vyrábí celá řada firem a patří mezi komerčně velmi rozšířené. Výhodou je velmi nízká spotřeba a jednoduchá struktura mikrořadiče. Jsou velmi dobře podporovány jak komerčními výrobci vývojových nástrojů, tak open-source komunitou. ARM jádro používá v dnešní době např. většina mobilních telefonů, GPS navigací.

Nejdůležitější vlastnosti zvoleného mikrořadiče LPC 2103 (obr. 23) [10]:

- 16/32 jádro ARM7TDMI-S
- instrukční sada ARMv4T
- 4 GB adresný prostor
- pracovní frekvence do 70 MHz
- In- Systém/In-Aplication Programming (ISP/IAP)
- 64 pinové pouzdro LQFP64
- 8 kB on-chip statické RAM paměti
- 32 kB on-chip flash programové paměti
- 6 kanálový, multiplexovaný 10 bitoví A/D převodník
- 2x UART, Fast I^2C, SPI
- 2x 32 a 2x16 bitové časovače s PWM jednotkami
- hodiny reálného času
- 32 binárních vstupně/výstupních pinů (3.3V a 5V tolerantích)

- dvě napájecí napětí
  1,8V pro CPU
  3,3V pro periferie



Obr. 23. Vnitřní zapojení mikrořadiče LPC 2103[10]

5.6 Návrh zapojení

U zapojení byla snaha mít k dispozici co nejvíce periferií, které mikrořadič nabízí. Pro vlastní řízení motoru budou zapojeny periferie: 3x PWM, 6x A/D převodník, 11x GPIO,UART, I^2C. Programování je realizováno po sériové lince.

Protože má mikrokontroler jen 32 kB on-chip flash programové paměti tak je přidáno ještě dalších 32kB vnější paměti. Ta se k procesoru připojí přes rozhraní I2C.

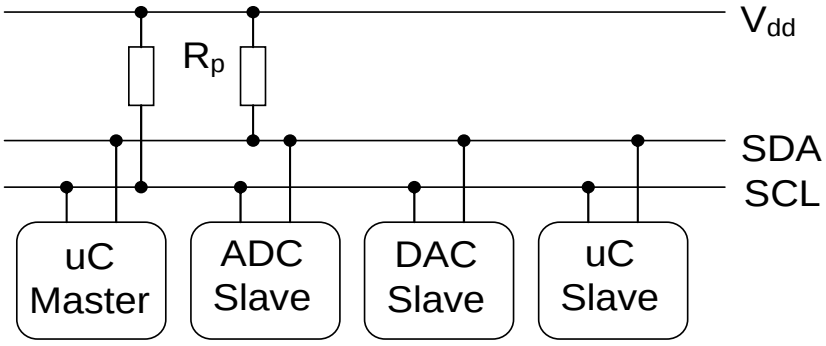
5.6.1 UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter)

Nejedná se v žádném případě o komunikační protokol, ale o typ komunikace. Základní hardwarová úroveň může být převáděná pomocí speciálních obvodů na další komunikační rozhraní RS232C, RS422, RS485. Základní 5V HW úroveň používá tři vodiče – GND, TXD, RXD. Napěťové úrovně mezi vodiči jsou 5 nebo 3,3V. Je li použita 3,3V logika, tak se maximální komunikační vzdálenost na kterou je zařízení schopno spolehlivě komunikovat omezuje na 3m. Potřebujeme li komunikovat na větší vzdálenost, můžeme prodloužit tuto vzdálenost např. pomocí RS232C (12m) nebo RS422, RS485 (1200m) [7].

5.6.2 I^2C – bus

Sběrnice I^2C byla definována v roce 1992 firmou Philips Semiconductor, v roce 1998 byla provedena její revize a byla definována verze 2.0, která vylepšuje a rozšiřuje především adresovací schopnosti použitého protokolu.

Jedná se o synchronní, obousměrnou půlduplexní sběrnici, používající tři vodiče – zem (GND), synchronizační signál (SCL), přenášená data (SDA). Maximální komunikační rychlost v režimu "standard" je 100kb/s, v režimu "fast" je povolena rychlosti až 400kb/s. Verze 2.0 doplňuje třetí režim – "high-speed", který umožňuje používat rychlost až 3,4Mb/s. Velkou výhodou této sběrnice je její jednoduchost a jednoduchost propojení jednotlivých komunikujících zařízení viz obrázek 24. Další výhoda je možnost připojení zařízení s rozdílným napájecím napětím na jednu sběrnici, bez nutnosti přizpůsobovacích obvodů, protože se používají V/V svorky s otevřeným kolektorem.



Obr. 24. Blokové schéma komunikace I2C [7]

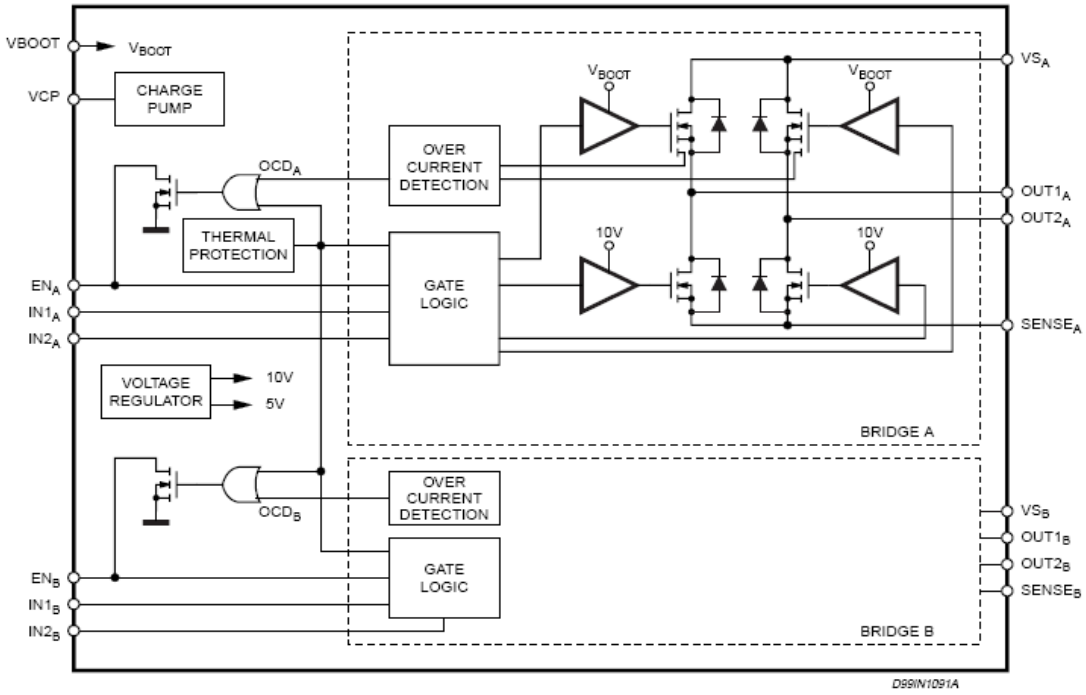
Na sběrnici je připojeno minimálně jedno zařízení v režimu master, které řídí komunikaci a 1 až 127 zařízení slave. Pro adresování slave zařízení se používá 7 bitová adresa (ve verzi 1), informace je přenášena po 8 bitech, devátý bit je potvrzovací. Obecně není doporučeno používat více jak jedno zařízení master na jedné sběrnici. [7]

5.7 Výkonová část řídicí jednotky

Jako výkonový budič byl zvolen integrovaný obvod L6205. Jedná se o speciální budič pro stejnosměrné a krokové motory. Integrovaný obvod obsahuje dva plné mosty z tranzistorů MOS, řídicí logiku a nábojovou pumpu viz obr.25. Napájecí napětí obvodu je v 8 – 52V a výstupní proud na jednu větev 2,8A (RMS). Provozní teplota -20 - +125°C a mezní spínací frekvence do 100kHz. Dále má možnost sledovat výstupní proud, ale tato možnost je pro naši aplikaci nepoužitelná. Budič je vyráběn v několika typech pouzdra. Pro Náš účel bylo zvoleno pouzdro PowerSO20.

Na trhu je celá řada speciálních budičů pro EC motory. Např. L6235 firmy STMicroelectronics, který je specielně určen pro krokové motory. Má přímé sledování Hallových sond, ale jeho nevýhodou je, že otáčky motoru se nastavují pomocí stejnosměrného napětí. Což vyžaduje u mikrořadiče D/A převodník a dále pro regulování otáček potřebuje analogový signál.

Dále by bylo možno použít výrobků firmy infineon např. TLE6280GP, ale nebyla by splněna podmínka maximálního proudu a napětí. Také je zde problém s dostupností [9].



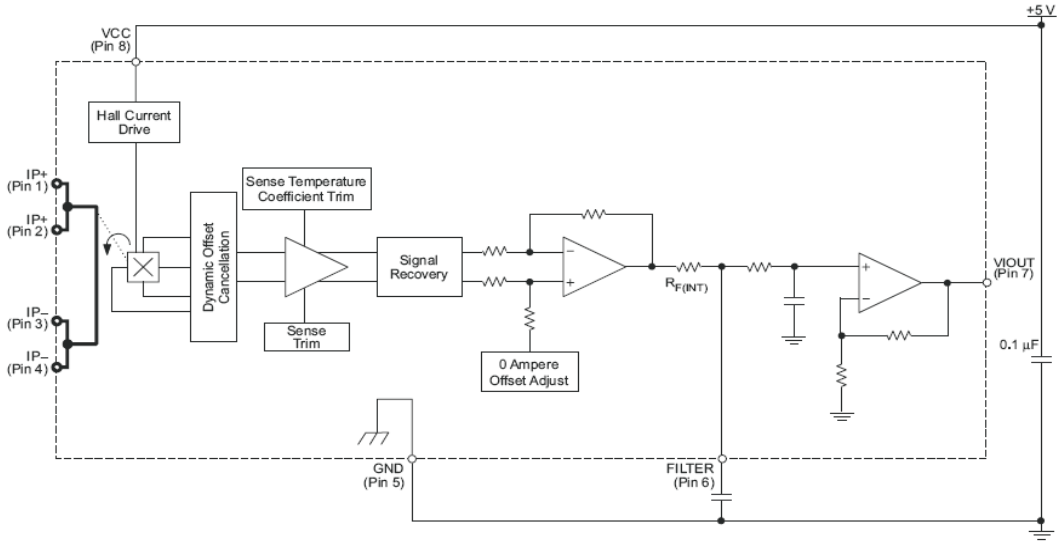
Obr. 25. Vnitřní zapojení budiče L6205 [9]

5.8 Měření výstupního proudu

Pro měření proudu byl zvolen plně integrovaný snímač proudu firmy Allegro typ ACS712, pracující na principu Hallova jevu. Snímač má lineární převodní charakteristiku (1A = 185mV), rozsah ±5A a je napájen 5V. Výstup snímače je závislý na teplotě obvodu, při velkém teplotním rozsahu je vhodné tuto závislost kompenzovat. Nutnost kompenzace

bude ověřena. Snímač je schopen měřit do 80kHz. Odpor mezi proudovými svorkami IP+ a IP- je 1,2mΩ. Pracovní teplota je v rozmezí -40 - +85°C.

Zapojení snímače je přizpůsobeno A/D převodníku s maximální hodnotou výstupního napětí 3,3V [8].



Obr. 26. Vnitřní zapojení ACS712 [8]

6. Vývoj řídicí jednotky pro EC motory

Vývoj jednotky byl rozdělen na etapy. V první etapě bude navrženo a ověřeno zapojení výkonové elektroniky a snímání proudů s využitím multifunkční DAQ karty a vývojového prostředí LabVIEW. V druhé etapě bude navržena a realizována vývojová deska (tzv. "starter kit") se zvoleným mikrořadičem. Po ověření její funkčnosti, bude ve třetí etapě provedeno propojení výkonové části a procesorové části a ověřena jejich funkčnost. V poslední etapě bude proveden finální návrh elektroniky řídicí jednotky.

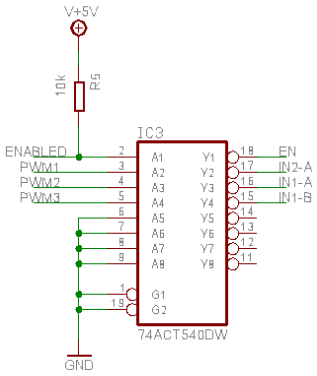
Během práce budou dodržovány standarty, které byly definované pro koncepci řídicích jednotek s univerzálním komunikačním rozhraním, tj. budou použity moduly pro připojení enkodéru, moduly pro další periferie, jako jsou koncové snímače, snímače kroutícího momentu a další.

6.1 První etapa – realizace výkonové části jednotky a její ověření

6.1.1 Zapojení výkonové části řídicí jednotky

Výkonová část řídicí jednotky (dále již jen výkonová část) je tvořena výkonovým integrovaným obvodem L6205. Její výstupy jsou připojeny přes snímače proudu ACS712 na konektor pro připojení EC motoru.

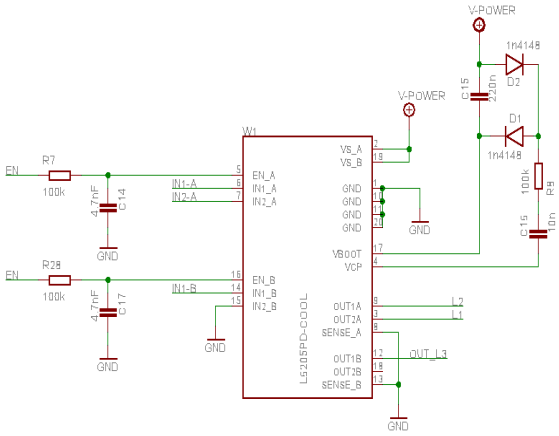
Vstupy L6205 musí být ošetřeny tak, aby se minimalizovala možnost samovolného nebo nechtěného sepnutí výstupu obvodu. Proto byla navrhnuta jednoduchá blokovací logika. Logika je tvořena osminásobným invertorem 74HCT540 v SMD pouzdře SO20W. Napájení logiky je realizováno napájením V+5V, které je tvořeno ze silového napájení přes pomocný obvod, tvořený parametrickým stabilizátorem se zenerovou diodou. Z napájení V+5V je napájen "pull up" rezistor, připojený na invertovaný signál /ENABLED pro L6205. Tím se zajišťuje že po připojení silového napájení, zůstane L6205 vypnut. Celé zapojení ukazuje obr.27.



Obr. 27. Schéma zapojení blokovací logiky

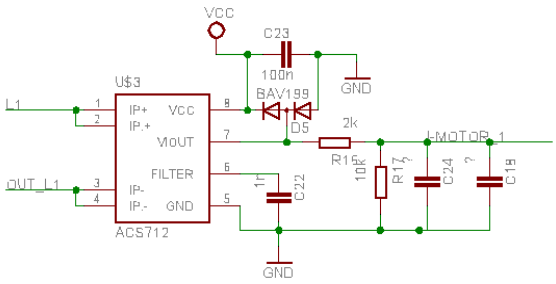
Z výkonového obvodu L6205 jsou použity tři půl-mosty pro připojení EC motoru se třemi vinutími zapojenými do hvězdy, čtvrtý půl-most zůstává nepoužit a jeho ovládání je zablokováno. Znamená to, že jsou použity výstupy (OUT1A, OUT2A, OUT1B), jim odpovídající vstupy (IN1-A, IN2-A, IN1-B) jsou připojeny k 74HCT540, čtvrtý vstup

(IN2-B) je připojen na zem. Řídící vstupy EN_A, EN_B jsou zapojeny každý zvlášť se svým blokovacím kondenzátorem, přestože jsou ovládány jedním řídícím signálem. Jde o doporučení výrobce, z důvodu rychlejšího vypínaní obvodu [9]. Mezi piny VBOOT a VCP je dle doporučení výrobce [9] zapojen pomocný obvod nábojové pumpy, sloužící pro tvorbu napájecího napětí 10V pro vnitřní obvody



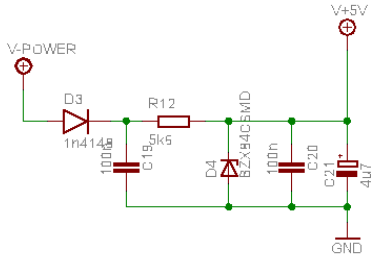
Obr. 28. Schéma zapojení výkonového zesilovače

Snímače proudu ACS712 jsou zapojeny dle doporučení výrobce [8]. K úpravě výstupního napětí pro rozsah A/D převodníku slouží napěťový dělič složený z odporů R16 a R17. Diodový pár D5 (BAV199) složí k definování nejnižší a nejvyšší hranice výstupního signálu.



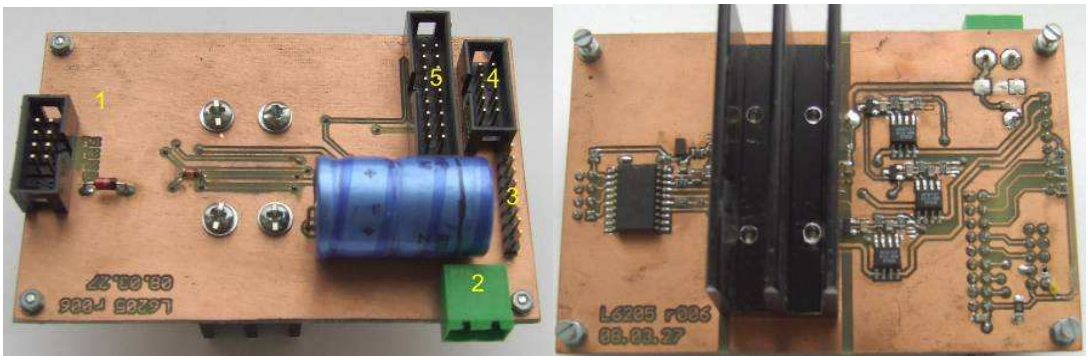
Obr. 29. Schéma zapojení snímače proudu s úpravou pro A/D převodník

Napájení blokovací logiky V+5V je řešeno pomocí 5,1V Zenerovy diody D4, zapojené v závěrném směru, ochrana proti přepólování je realizována pomocí diody D3. Rezistor R12 slouží jako pracovní odpor Zenerevy diody, celý obvod je ještě doplněn kapacitami C19 a C20 zabraňujícími rozkmitání obvodu a kapacitou C21 filtrující výstupní napětí.



Obr. 30. Schéma zapojení parametrického stabilizátoru

Pro uvedené zapojení jsem v programu Eagle navrhl desku tištěného spoje, kterou jsem realizoval. Osazená deska výkonové části je s popisem na obr. 31



Obr. 31. Deska výkonové části

1. Vstupní data z LabVIEW
2. Napájení 24V
3. Konektor pro připojení motoru
4. Konektor pro připojení enkodéru
5. Výstupy naměřených dat pro LabVIEW

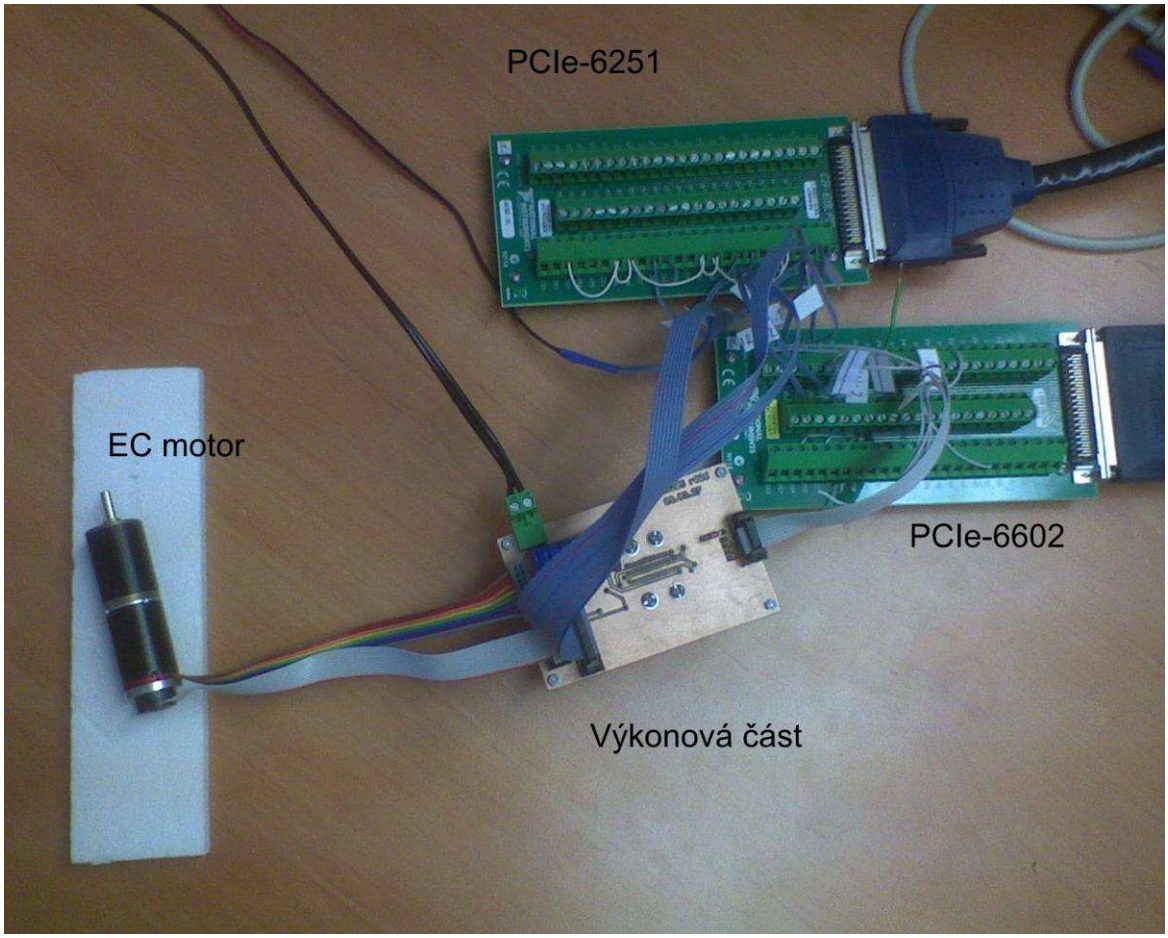
6.1.2 Ověření výkonové části řídicí jednotky

Pro ověření vlastností výkonové části řídicí jednotky bylo zvoleno vývojové prostředí NI LabVIEW a použití multifunkčních DAQ karet NI PCI-6602 a NI PCIe-6251.

Kombinace dvou karet musela být použita, protože karta PCIe-6251 (16x A/D a 2x D/A převodníků + binární vstupy, výstupy) má pouze dva čítače časovače, které lze použít pro generování PWM modulace nebo pro připojení enkodérů, karta PCI-6602 má osm čítačů/časovačů, ale nemá A/D převodníky potřebné pro měření proudu. Připojení výkonové části řídicí jednotky ke kartám a EC motoru je na obr. 32.

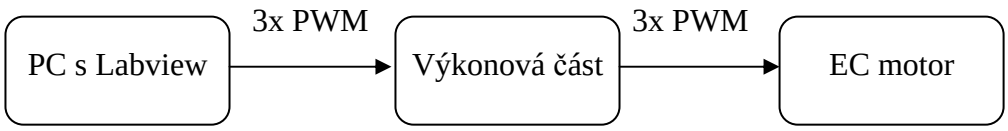
Pro ověřování byly k dispozici dva EC motory MAXON EC-max 22, 12W, KL, 2We, 24V (katalogové číslo 283840), každý osazený převodovkou MAXON GP O22C,

0.60Nm, 2St, KL, 14:1 (katalogové číslo 143974) a inkrementálním snímačem MAXON MR ENC Typ M, 512Imp 2K LD (katalogové číslo 201937) [15].

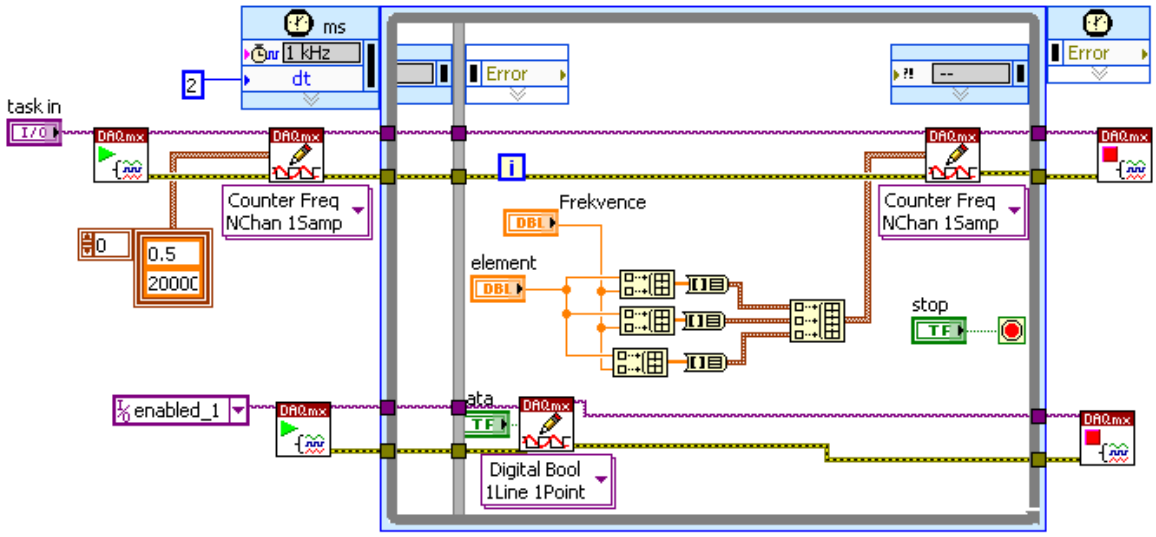


Obr. 32. Deska výkonové části propojená s DAQ kartami a EC motorem

Ověřování výkonové části probíhalo v několika krocích. Nejprve byl realizován kód pro generování PWM ve třech kanálech a ovládání signálu /ENABLED. Tento kód byl použit ve smyčce pro rozběh a zastavení motoru, jedná se o nejjednodušší způsob řízení EC motoru bez sledování polohy rotoru. Chod motoru byl nerovnoměrný, s malým krouticím momentem. Tato varianta se používá jen zřídka u malých EC motorů a neumožňuje řízení v malých hodnotách otáček.



Obr. 33. Nejjednodušší zapojení EC motoru bez zpětné vazby

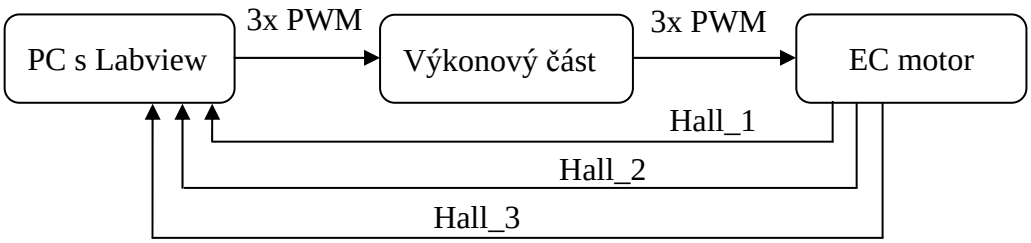


Obr. 34. Nejjednodušší zapojení EC motoru bez zpětné vazby kód LabVIEW

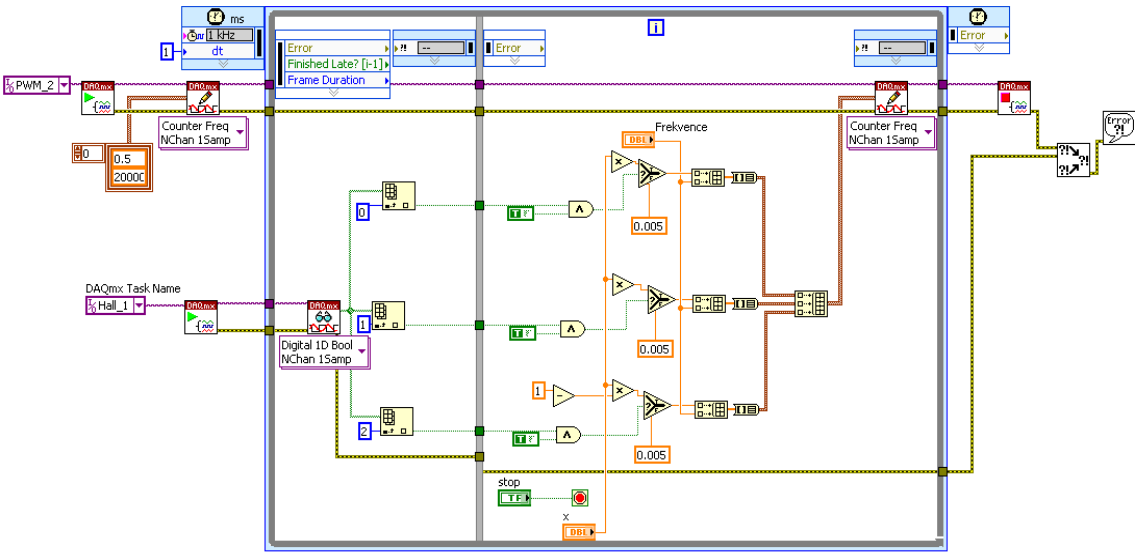


Obr. 35. Ovládání motoru v nejjednodušším režimu provozu

Ve druhém kroku bylo přidáno sledování polohy rotoru a vytvoření elektrické komutace s obdélníkovým průběhem. V tomto módu řízení se točivé magnetické pole uvnitř motoru mění po skocích, ale rotor se otáčí spojitě. Motor je možno řídit v celém rozsahu otáčel. Nevýhodou je zvlnění kroutícího mementu přibližně 14%.

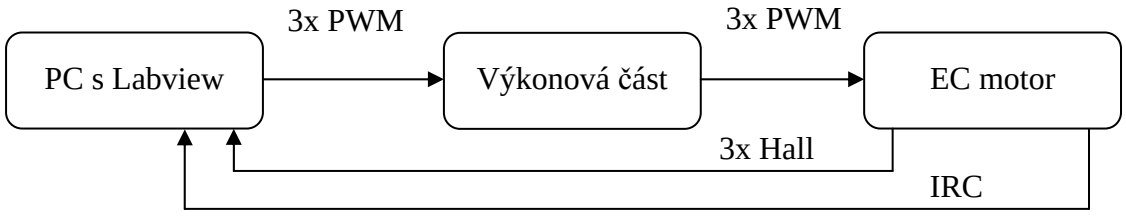


Obr. 36 Řízení EC motoru se sledováním polohy rotoru



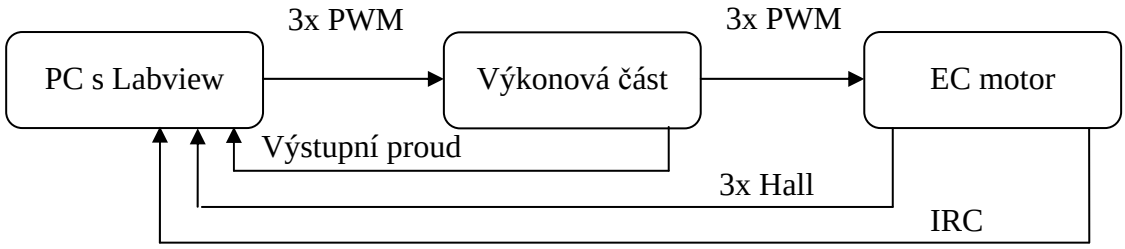
Obr. 37. Ovládání EC motoru s obdélníkovou komutací

Ve třetím kroku ověřování bylo realizován odečet encoderu (IRC) a sledování rychlosti otáčení rotoru. Informace z encoderu bylo použito jako zpětné vazby pro PID regulátor polohy otáček. Následovalo určení optimálních parametrů regulátoru Ziegler-Nicholsnovou metodou.



Obr. 38 Řízení EC motoru se sledováním polohy rotoru a čtení z IRC

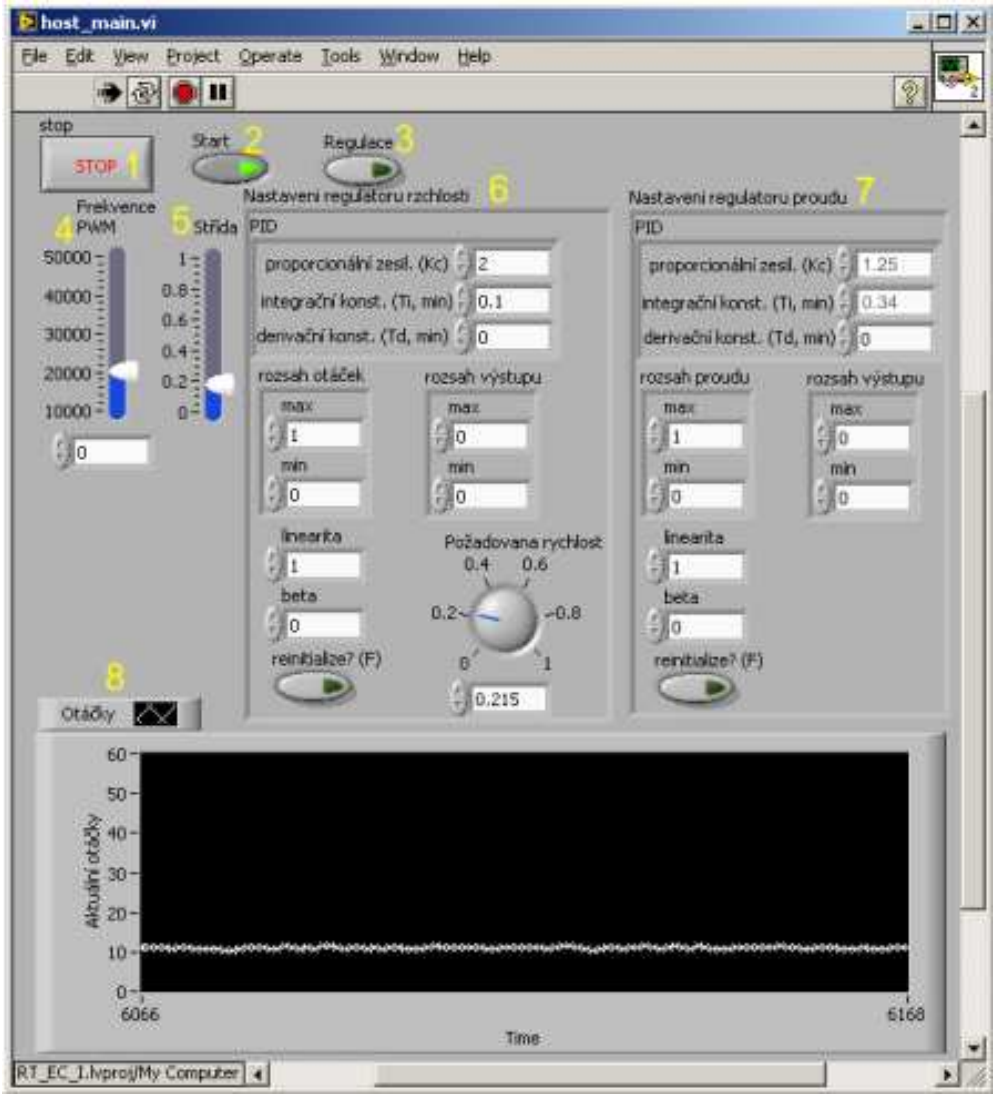
Po nastavení parametrů regulátoru otáček byl do řídící smyčky přidán ještě regulátor výstupního proudu. Důvodem přidání bylo zvýšení dynamiky celého systému a dále byl realizován algoritmus minimalizující odběr motoru s omezením maximálního proudu, který může protékat vinutím motoru. Omezení se ukázalo jako velmi důležitá vlastnost řídící jednotky a má li být jednotka univerzální, musí se dát nastavit pro každá motor zvlášť.



Obr. 39 Řízení EC motoru se sledováním výstupního proudu

Výsledkem ověřování je několik drobných úprav v návrhu desky a jednoduchý program pro ovládání EC motoru z LabVIEW s několika pracovními režimy. Na obr 40. je realizovaný ovládací panel řízení EC motoru. Z ovládacího panelu je možné nastavovat všechny potřebné parametry řízení. Program umožňuje provoz s regulací i bez regulace.
Popis ovládacích prvků na obr 40:

1. Stop – ukončuje běh celého programu
2. Start – spouští chod motoru
3. Regulace – zapívá a vypíná rychlostní regulátor
4. Frekvence PWM – nastavuje frekvenci WM
5. Střída – nastavuje střídu výstupního obdélníkového signálu při ručním řízení
6. Nastavení regulátoru rychlosti – zde je možné nastavit všechny parametry rychlostní regulační smyčky
7. Nastavení regulátoru proudu – zde je možné nastavit všechny parametry proudové regulační smyčky kromě žádané hodnoty. Jako žádaná hodnota je použit výstup z rychlostního regulátoru.
8. Otáčky – graf ukazuje průběh aktuálních otáček rotoru v čase.

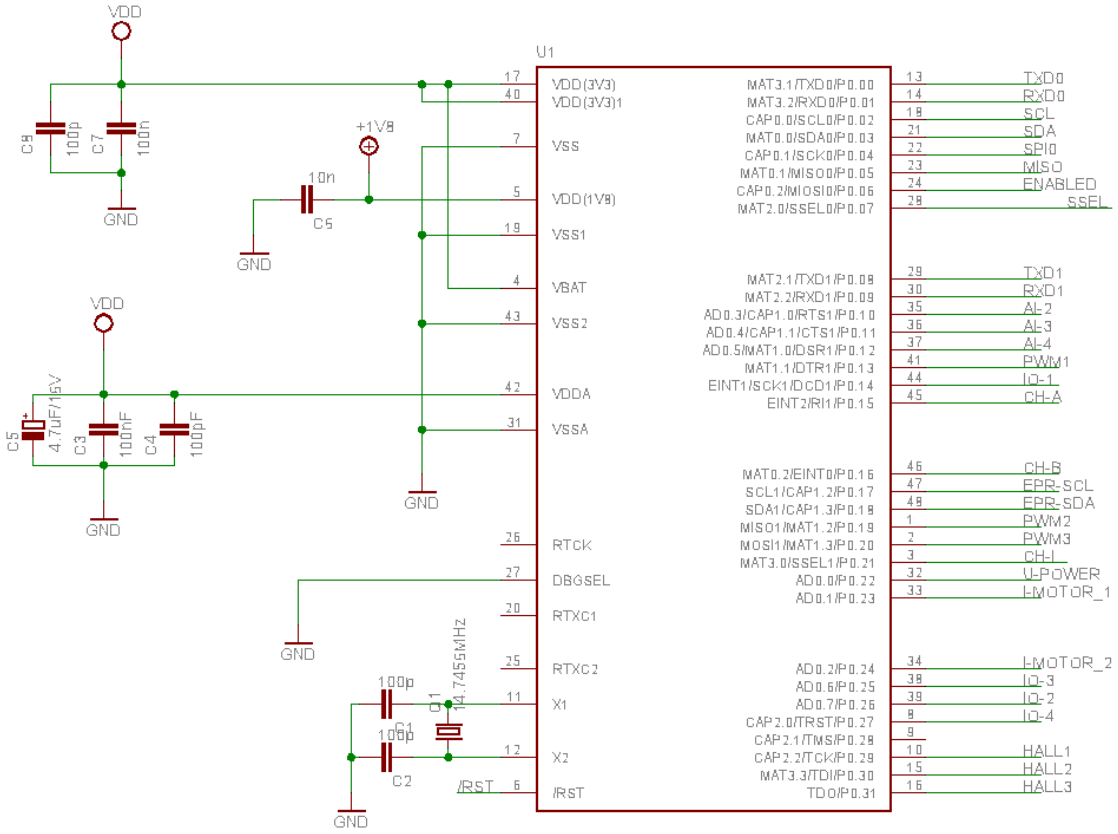


Obr. 40 Ovládací panel řízení EC motoru v LabVIEW

6.2 Druhá etapa – realizace procesorové části jednotky a její ověření

6.2.1 Zapojení procesorové části řídicí jednotky

Procesorová část řídící jednotky (dále již jen řídící část) je tvořena mikrořadičem LPC 2103. Potřebné periferie jsou vyvedeny na konektory pro připojení výkonové části a dalších zařízení.

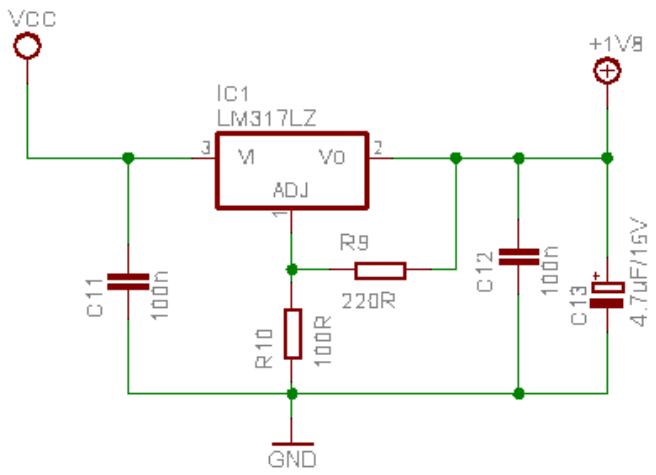


Obr. 41. Schéma zapojení mikrořadiče

Napájení mikrořadiče je navrženo tak, aby nemohlo dojít k jeho rozkmitání. To je realizováno kapacitami zapojenými mezi piny 5, 17 a 42 dle doporučení výrobce [10].

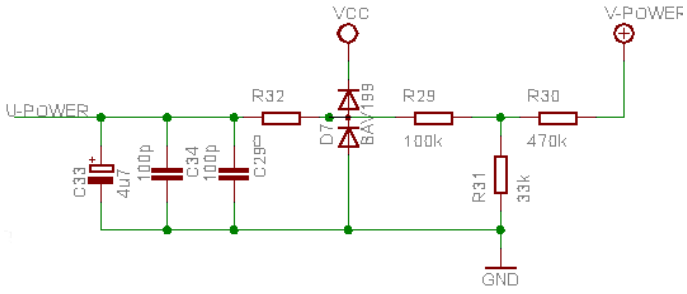
Napájecí napětí jádra mikrořadiče +1V8 je tvořeno pomocným obvodem z VCC který je realizován integrovaným stabilizátorem LM317. Krystalový oscilátor běží na frekvenci 14.7456MHz a je doplněn kapacitamiC1 a C2. Jednotlivé periferie jsou vyvedeny na konektory. Na desce plošných spojů se nachází konektory PWM výstupů, A/D vstupů, GPIO vstupů/výstupů, komunikační rozhraní I2C, SPI, UART a JTAG.

Napájení jádra mikrořadiče +1V8 je řešeno pomocí integrovaného stabilizátoru s nastavitelným výstupním napětím LM 317LZ. Výstupní napětí stabilizátoru se nastavuje pomocí napěťového děliče tvořeného rezistory R9 a R10. NA rezistoru R9 je referenční napětí 1,25V a zbytek výstupního napětí je na rezistoru R10 [13].



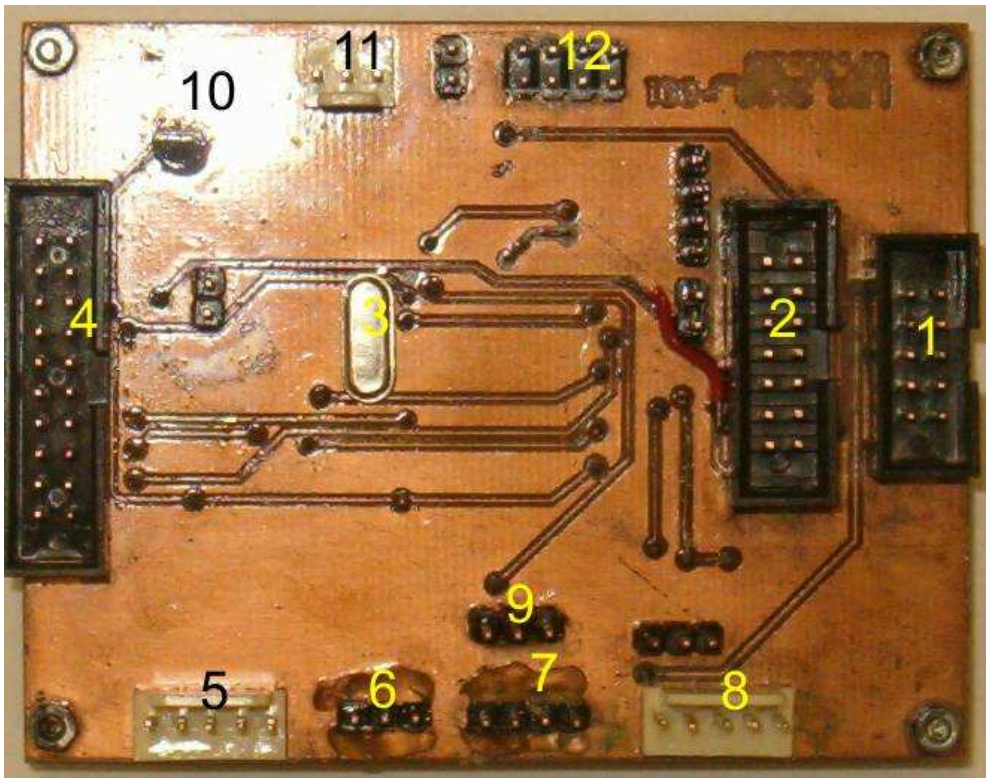
Obr. 42. Reálné zapojení obvodu

Měření napájecího napětí je důležité pro bateriové aplikace, kdy je potřeba znát stav baterií. Měření je realizováno přes odporový dělič, který upravuje napájecí napětí tak, aby je bylo možné přivést na A/D převodník (max. 3.3V). Dále je použit diodový pár a ochranný odpor, jako ochrana A-D převodníku. Celý obvod měření napájecího napětí je ještě doplněn několika kapacitami.



Obr. 43. Schéma zapojení děliče pro měření napájecího napětí

Pro uvedené zapojení jsem v programu Eagle navrhl desku tištěného spoje, kterou jsem realizoval. Osazená deska procesorové části je s popisem na obrázku 44.



Obr. 44. Reálné zapojení v obvodu

1. Konektor napájení a sériové komujikave
2. UART
3. Krystalový oscilátor
4. JTAG
5. SPI
6. 3x PWM
7. 4x GPIO
8. I2C
9. 3x A/D
10. LM 317
11. 3x Hall
12. IRC

6.2.2 Ověření procesorové části řídicí jednotky

Po dokončení a oživení zapojení bylo přistoupeno k realizaci řídícího softwaru pomocí vývojového prostředí Microsoft Visual Studio 2005 a GNU GCC 4.2 pro ARM.

Postupně byly realizovány ovladače jednotlivý periférií jednotky, které byly následně zakomponovány do software existující jednotky UMCU S24/7.

Řídicí systém jednotky se skládá ze dvou částí. Jedna část je nahraná v mirořadiči a má za úkol ovládat motor, realizovat řídící smyčky a komunikovat s nadřazeným systémem. Druhá část je v PC a umožňuje uživateli nastavovat jednotlivé parametry řídicí

jednotky a sledovat aktuální stav motoru. Obě části jsou spojeny sériovou linkou RS232. K tvorbě bylo použito vývojového nástroje Microsoft Visual Studio.

6.3 Třetí etapa – propojení mikrořadičové a výkonové části pomocí kabelů

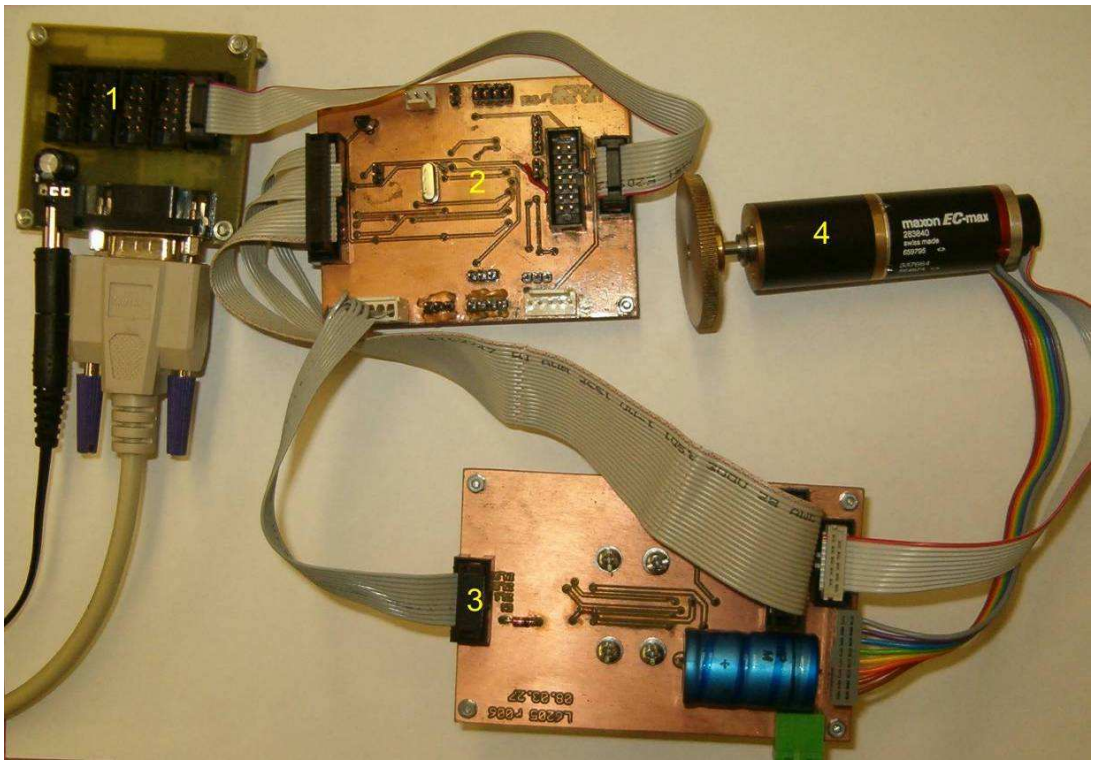
V tomto kroku byly obě samostatné části propojeny kabely, tak aby mohla být ověřena společná funkce obou částí jednotky.

Do existujícího software univerzální řídicí jednotky (UMCU S24/7), doplněného o ovladače jednotlivých periferií z druhé etapy, byly realizovány funkce potřebné pro řízení EC motorů. To znamená že bylo realizováno generování obdélníkové i sinusové komutace pomocí tří PWM generátorů a pomocí časovače, dále byla realizována synchronizace komutace s Hall snímači natočení rotoru a podle natočení enkodéru. Bylo realizováno řízení proudu jednotlivými vinutími a několik dalších drobných úprav potřebných pro řízení EC-motoru.

Následně byla ověřena rychlost běhu řídicích smyček, která se jeví jako velmi dobrá.

Popis obr. 45.

1. napájecí a komunikační modul
2. procesorová část
3. výkonová část
4. EC motor

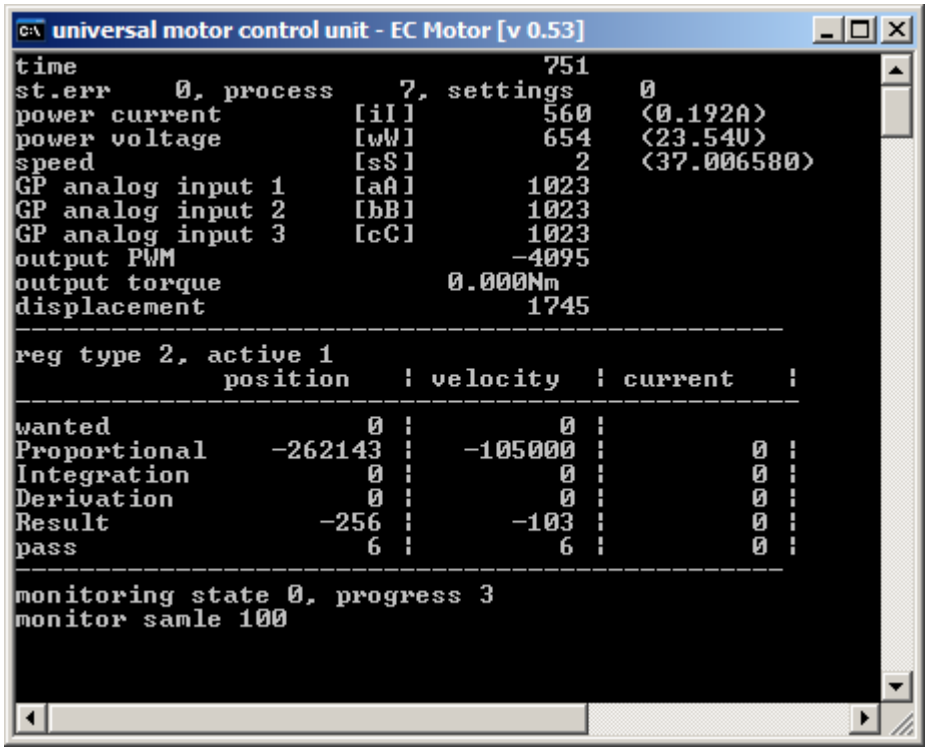


Obr. 45. Propojené obě samostatné části

6.3.1 Řídicí program jednotky

Program Univerzální řídicí jednotky je vyvíjen již několik let. Úkolem této práce bylo realizovat podporu pro řízení EC motorů. Vlastní program je navržen a realizován tak, aby byl přeložitelný pro zvolený typ jednotky a zvolený mikrořadič. Dále je v programu realizována podpora pro simulační provoz tohoto programu také na PC.

Výhodou simulačního provozu programu na PC je výrazně zjednodušený vývoj tohoto programu, neboť na PC je možné snáze ladit napsaný kód, lze nasimulovat stavy, které by znamenaly konstrukci speciálních přípravků pro to, aby je bylo možné opakovaně vyvolávat pro potřeby ověření správné funkce programu. V neposlední řadě se k těmto prostředkům přidává i možnost zápisu aktuálních stavů programu do souboru a ty následně analyzovat.



Obr. 46 Řídící program jednotky

Na obr.46 je uživatelské .rozhraní simulačního provozu jednotky, v reálném režimu toto uživatelské rozhraní chybí. Uživatelské rozhraní dává vývojáři rychlý přehled o stavu simulace a umožňuje jednoduše měnit stavy jednotlivých vstupů. Význam jednotlivých položek uživatelského rozhraní (obr.46):

time	– zobrazuje systémový čas jednotky v ms
st. err, ..	– zobrazuje provozní a chybové stavy (hexadecimálně)
power current	– měřený proud. První hodnota stav A/D převodníku, druhá proud se započítanou kalibrací
power voltage	– měření napětí. První hodnota stav A/D převodníku, druhá napětí se započítanou kalibrací
speed	– rychlost IRC skutečný počet dílků za vzorkovací periodu, skutečné otáčky
GP analog input 1 – 3	– stavy analogových univerzálních vstupů
output PWM	– hodnota požadované rychlosti přepočítaná na PWM
output torque	– kroutící moment
displacement	– aktuální poloha v dílcích IRC
reg type, aktive	– počet aktivních regulátorů
wanted	– aktuální žádané hodnoty jednotlivých regulátorů
Proportional	– aktuální stav proporcionální složky jednotlivých regulátorů
Integration	– aktuální stav integrační složky jednotlivých regulátorů
Derivation	– aktuální stav derivační složky jednotlivých regulátorů
Result	– aktuální stav výstupu jednotlivých regulátorů
pass	– počet průchodů hlavní smyčkou
monitoring state	– stav monitorování stavu jednotky

6.4 Ovládací program univerzální jednotky pro PC

Ovládání řídicí jednotky lze provádět z libovolného zařízení, které implementuje komunikační protokol jednotky. Pro ovládání na PC je již několik let vyvíjen ovládací program spolu s programem Univerzální řídicí jednotky. Úkolem této práce bylo dořešit několik problémů, které jsou specifické pro EC motory.

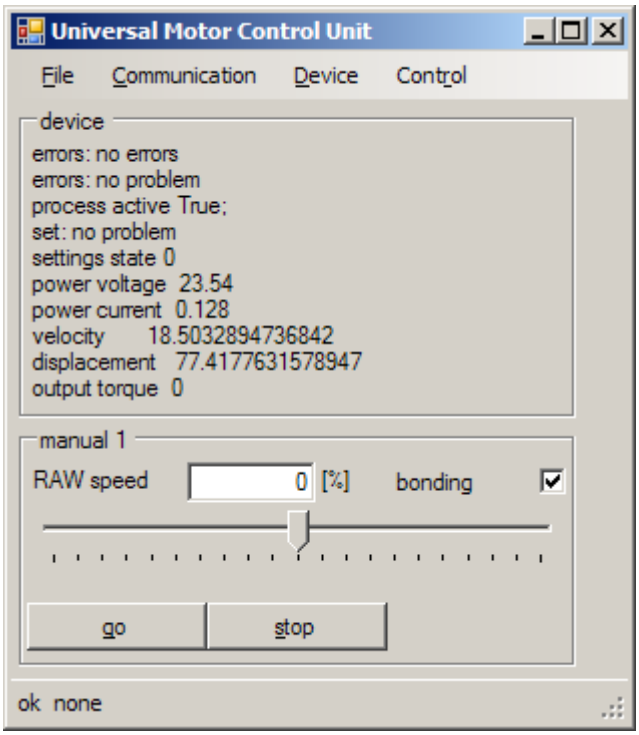
Vlastní ovládací program je tvořen několika dynamicky linkovanými knihovnami, které mají následující funkci:

mechLabControls.dll - je knihovna (.NET assembly), realizovaná v C#, obsahuje upravené obecné prvky uživatelského rozhraní, které zjednodušují a unifikují návrh a vzhled aplikace.

deviceInterface.dll - je knihovna (kombinovaná win32 dll a .NET assembly), realizovaná v C++ a C++ pro CLI, implementuje správu komunikačních zdrojů, komunikační protokol a komunikaci zařízení realizovaných v rámci laboratoře, včetně univerzální řídicí jednotky.

UMCUControls.dll - je knihovna (.NET assembly), realizovaná v C#, obsahuje uživatelské rozhraní pro komunikaci s jednotkou.

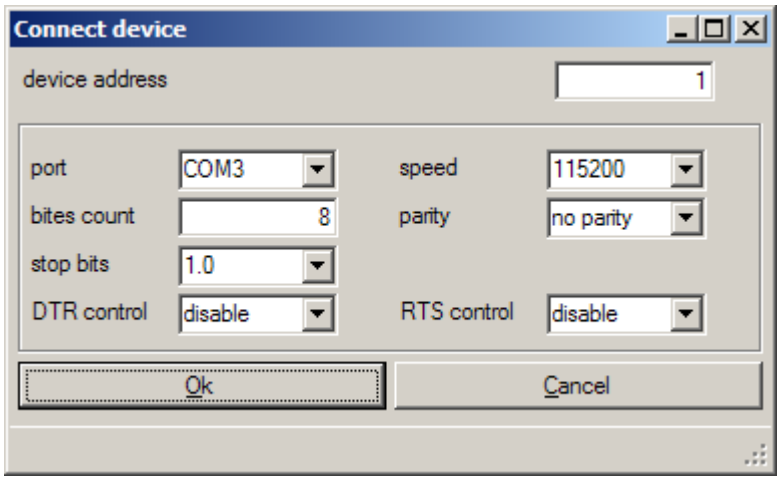
UMCU.exe - spustitelný soubor, realizovaný v C#, který zavádí knihovny do paměti a spouští hlavní formulář komunikačního rozhraní jednotky z knihovny " UMCUControls.dll"



Obr. 47 Hlavní formulář komunikačního rozhraní

6.4.1 Hlavní formulář komunikačního rozhraní jednotky

Po spuštění programu se pokusí hlavní formulář připojit jednotku na zadaném portu, v případě že, port není zadán, použije první volný sériový port PC. Je připojována jednotka, která má adresu 1. V případě že je jednotka nalezena, zobrazuje program aktuální stav zvolených veličin (obr. 47). V případě že se jednotku nepodař nalézt automaticky, je nožné použít ručního připojení pomocí formuláře Connect device.



Obr. 48 Formulář ručního připojení

Z hlavního okna je možné jednotku provozovat v ručním režimu. Je li zaškrtnuto políčko bonding, jednotka ihned reaguje na posunutí jezdce. Není li políčko zaškrtnuto, je nová hodnota otáček nastavena až po zmačknutí entru.

6.4.2 Nastavení parametrů EC motoru

Nastavení parametrů EC motoru se provádí ve formuláři devices settings (obr.49). Je možné nastavovat následující parametry:

motor - nastavení parametrů motoru

- motor type – výběr typy motoru (EC, DC, AS …), pouze když jednotka podporuje více typů motorů,
- windings – počet vinutí motoru
- poles count – počet pólových dvojic
- revolutikons – maximální povolená rychlost otáčení (počet otáček / min)

gear box - nastavení parametrů týkajících se převodovky

- units – jednotky používané ovládacím programem pro zobrazování polohy a rychlosti motoru (žádné, uhlová, délková)
- gear ratio – převodový poměr
- wheel diameter – průměr kola
- backlash – vůle převodovky

Encoder - nastavení enkodéru

- sampling time – vzorkovací interval

- channels – počet kanálů enkodéru
- resolution – počet dílků

voltage sensor – sledování napájecího napětí. Je li napájecí napětí nad nebo pod stanovenou hranicí, dojde k vypnutí motoru.

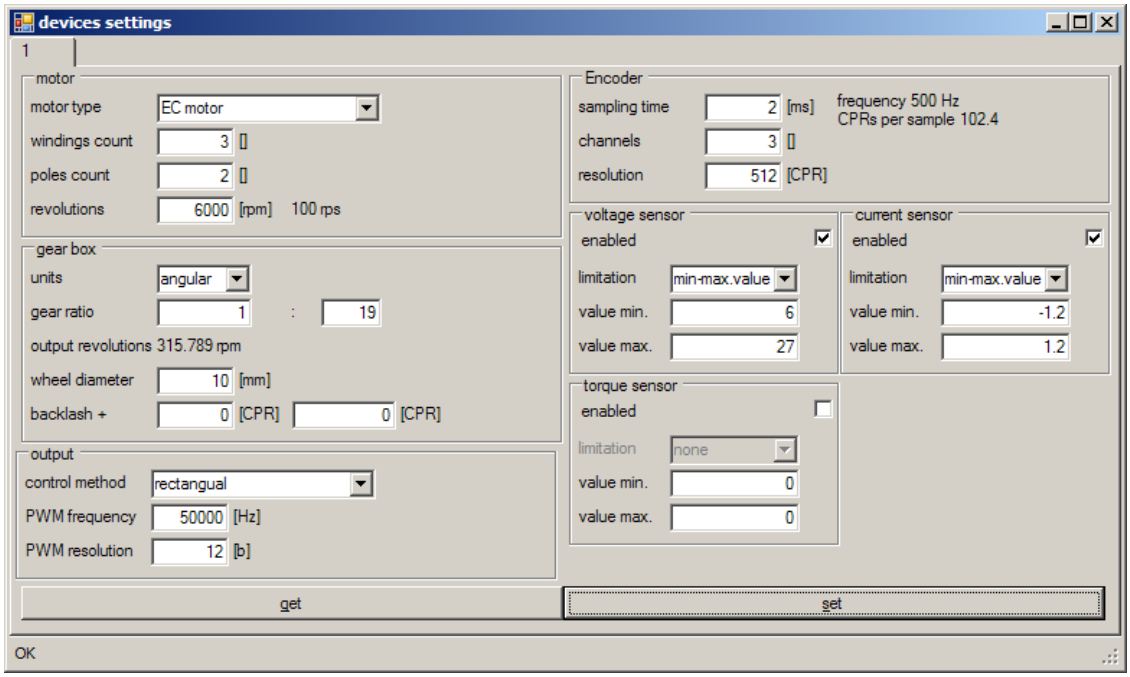
- enabled – zapnutí funkce
- limitation – nastavení možnosti sledování mezních stavů
- value min – minimální hodnota napětí
- value max – maximální hodnota napětí

current sensor – sledování výstupního produ. Je li výstupní proud nad nebo pod stanovenou hranicí, dojde k vypnutí motoru. Vrátí li se proud do určených mezí je zase zapnut (pulzování motoru).

- enabled – zapnutí funkce
- limitation – nastavení možnosti sledování mezních stavů
- value min – minimální hodnota napětí
- value max – maximální hodnota napětí

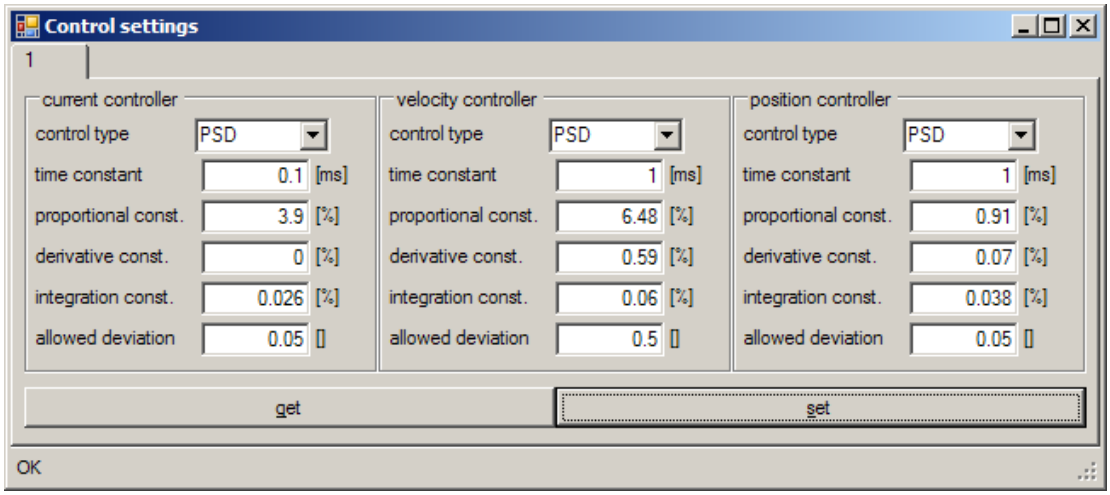
torque sensor – sledování krouticího momentu na hřídeli motoru. Je li kroutící moment nad nebo pod stanovenou hranicí, dojde k vypnutí motoru. Poklesne li krouticí moment do určených mezí je zase zapnut (pulzování momentu).

Tlačítko "set" je nastavení nastaveno (zapsáno do řídicí jednotky), tlačítkem "get" je nastavení získáno z jednotky.



Obr. 49 Formulář nastavení parametrů motoru a snímačů

6.4.3 Nastavení parametrů regulátorů



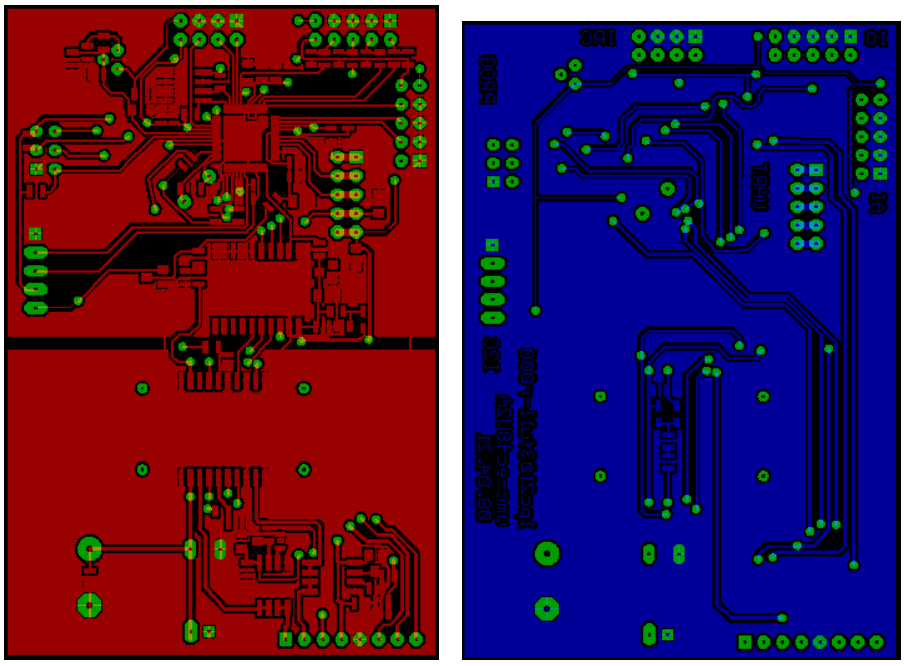
Obr. 50 Formulář nastavení parametrů regulátoru

Parametry jednotlivých regulátorů je možné nastavovat ve formuláři Control settings (obr.50). V současnosti jsou v jednotce realizovány tři řídicí smyčky - proudová (current), rychlostní (velocity) a polohová (position), do budoucna je plánována možnost přidání momentové smyčky. Pro každou řídicí smyčku je potřeba zvolit typ regulátoru a nastavit potřebné parametry:

- control type – typ regulátoru (žádný, PSD), je-li typ regulátoru žádný, je řídicí smyčka vypnuta
- time constant – časová konstanta, definuje vzorkování regulační smyčky
- proportional constant – proporcionální konstanta
- derivative constant – derivační časová konstant
- integration constant – integrační časová konstanta
- allowed deviation – dovolená odchylka, definuje povolenou nepřesnost smyčky, umožňuje potlačit různé problémy vznikající nepřesností snímačů a regulace.

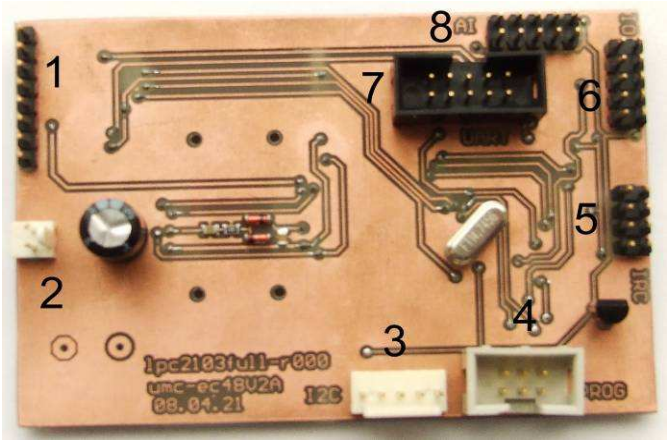
6.5 Čtvrtá etapa – realizace řídicí jednotky

Ve čtvrté fázi bylo přistoupeno k návrhu finálního zapojení jednotky. Obě odzkoušená části byly sloučeny do jedné desky plošných spojů. V návrzích finální verze došlo k úpravám některých zapojení. K mikrořadiči bylo připojeno ještě 16 kBytů paměti přes sběrnici I2C pro uložení nastavení řidicí jednotky. Dále byl upraven obvod měření proudu. Od původního návrhu, který měřil výstupní proud na třech výstupech bylo odstoupeno a na finální verzi měří proud jen na dvou výstupech (zapojení do trojúhelníku). Hotový návrh finální desky je na obr.51.



Obr. 51. Navrhnutá deska plošných spojů finální verze

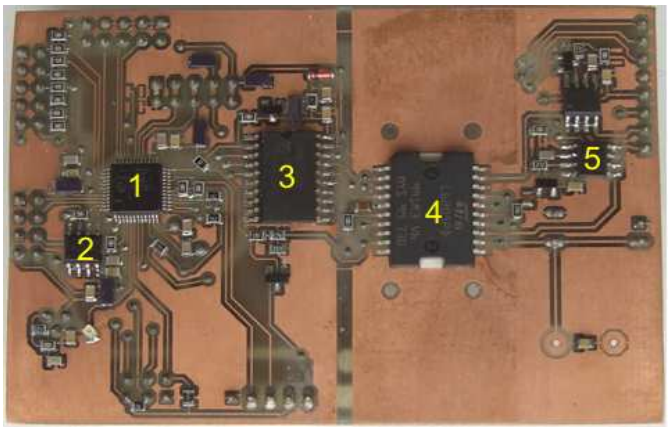
Po dokončení návrhu byla deska v laboratoři vyrobena, osazena a oživena obr. 52 a 53.



Obr. 52 Osazená deska řídící jednotky "bottom"

1. Konektor pro připojení vinutí EC motoru a Hallových sond
2. Napájení = 24V
3. Sběrnice I^2C
4. Připojení programátoru

5. Připojení enkodéru
6. Konektor volných binárních vstupů/výstupů
7. Konektor volných A/D převodníků
8. Sériové rozhraní pro komunikaci



Obr. 53 Osazená deska řídící jednotky topt"

1. Mikrořadič LPC 2103
2. Pomocné paměť (32 kB)
3. Obvod blokovací logiky HCT540DW
4. Výkonový budič L6205
5. 2 snímače měření proudu Allegro ACS712

6.5.1 Řídicí program jednotky

Řídicí program upravený v etapě 3, byl dopracován podle provedených v přrdchozích výše. Upravený software je funkční.

6.5.2 Mód ruční řízení

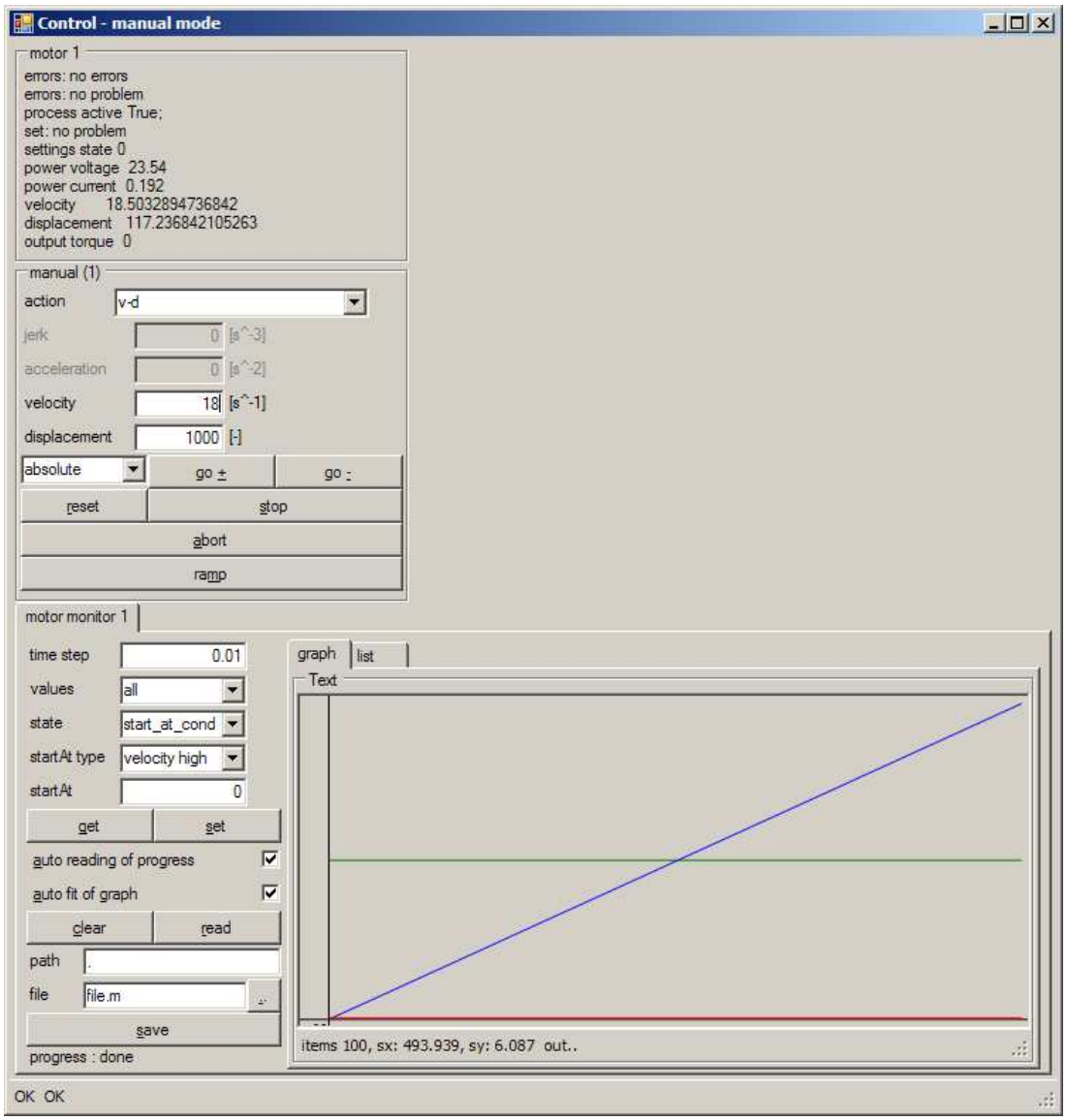
Celý formulář ručního řízení se skládá s několika bloků. Ve kterých se nastavují režimy provozu jednotky a motoru.

První blok je diagnostika, která sleduje aktuální stav jednotky. Zobrazuje chybová hlášení a aktuální stavy na výstupu jednotky.

Druhý blok je ruční nastavení provozu jednotky. V tomto bloku je možné nastavit action – funkce řízení, acceleration – zrychlení, velocity – rychlost a displacement – polohu. Dále je možnost absolutního nebo relativního odčítání hodnot. V bloku je ještě několik ovládacích tlačítek.

Třetím blokem je monitoring provozu. U monitorování provozu je možnost si nastavit krok s jakým boudou hodnoty do paměti zapisovány. Dále je možno si nastavit, zda chceme ukládat jen vybrané hodnoty nebo všechny. Na výběr je možnost, jestli chceme paměť stále dokola přepisovat novými hodnotami, nebo v případě plné paměti skončit se zápisem. Je zde také možnost volby podmínky pro ukládání. Podmínkou je např.

časový úsek, který se má ukládat, nebo od jaké hodnoty se bude ukládat. Zapsané hodnoty je možné uložit do souboru, nebo je vykreslit do grafu a nebo vypsat do tabulky.

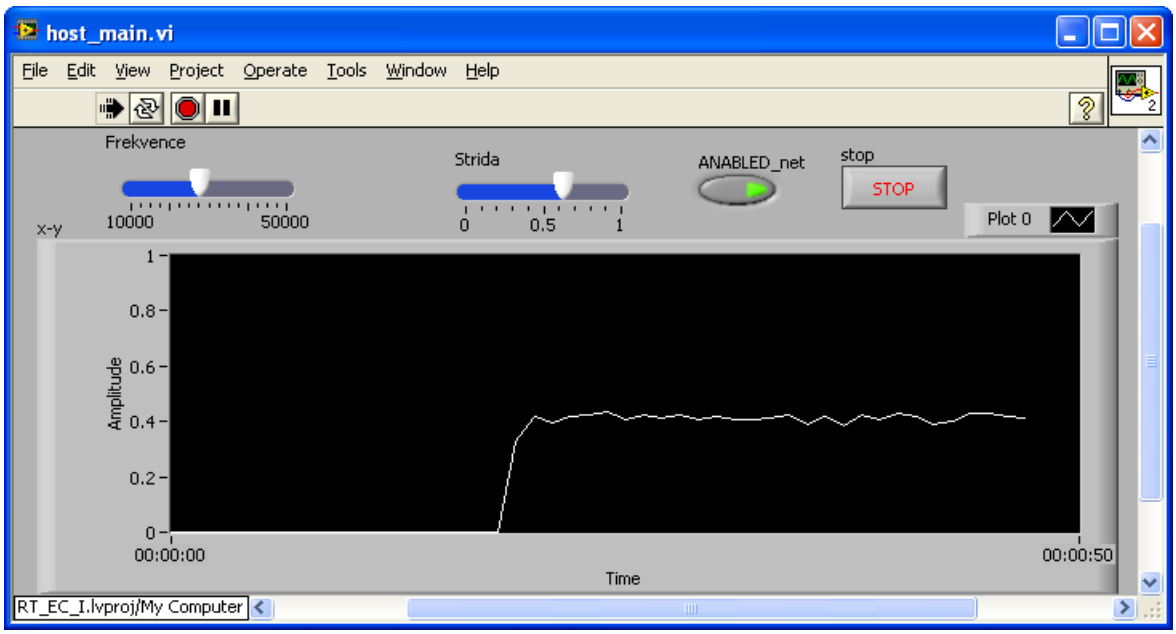


Obr. 54 Formulář ručního provozu jednotky se zobrazováním vybraných hodnot

7. Experimentální ověření funkčnosti řídicí jednotky

7.1 Výsledky měření pomocí LabVIEW

Při tvorbě řídícího kódu v LabVIEW se narazilo na problém přesného určování aktuálních otáček pro potřeby řízení. Při prvních pokusech byly hodnoty otáček v posobě jdoucích vzorcích značně rozdílné. Tento rozptyl se podařilo částečně snížit úpravou kódu a zpřesněním vzorkovací periody. Celý problém s nepřesným určováním otáček se nepodařilo zcela odstranit, protože použitý snímač otáček byl nepřesný. Proto regulace jednotlivých smyček v LabVIEW není optimální.



Obr. 55 Přechodová křivka v LabVIEW

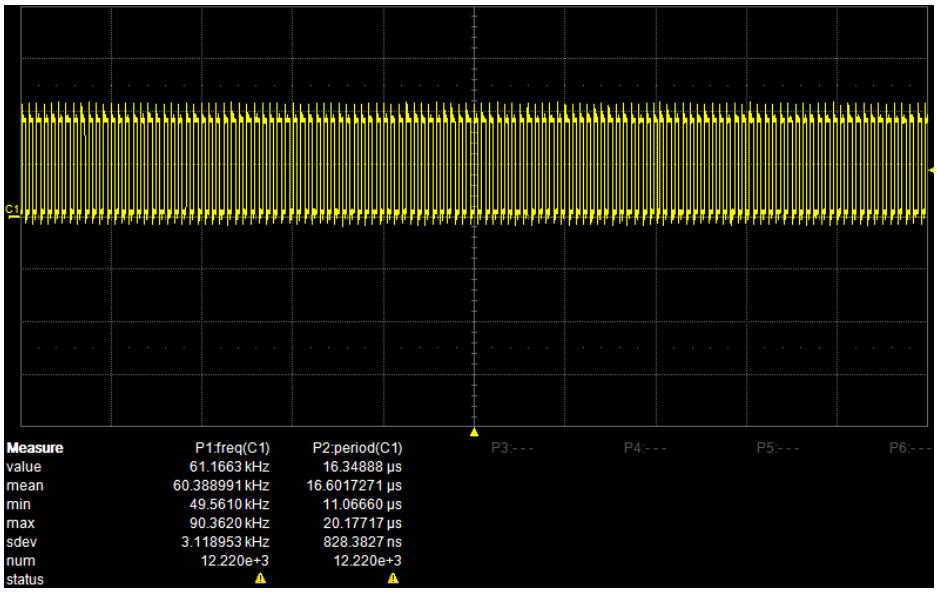
7.2 Problémy se snímači

Pro řešení práce byly použity motory MAXON (kapitola 6.1.2) osazené snímači MAXON MR ENC Typ M, 512Imp. Jedná se o enkodéry využívající Hallových sond a kotouče s magnetickými značkami. Během práce se vyskytoval problém s výpočtem rychlosti otáčení, kdy výsledek osciloval cca. ±40%, tento problém byl z části způsobován nesprávně řešenou synchronizací odečtu hodnot v LabVIEW.

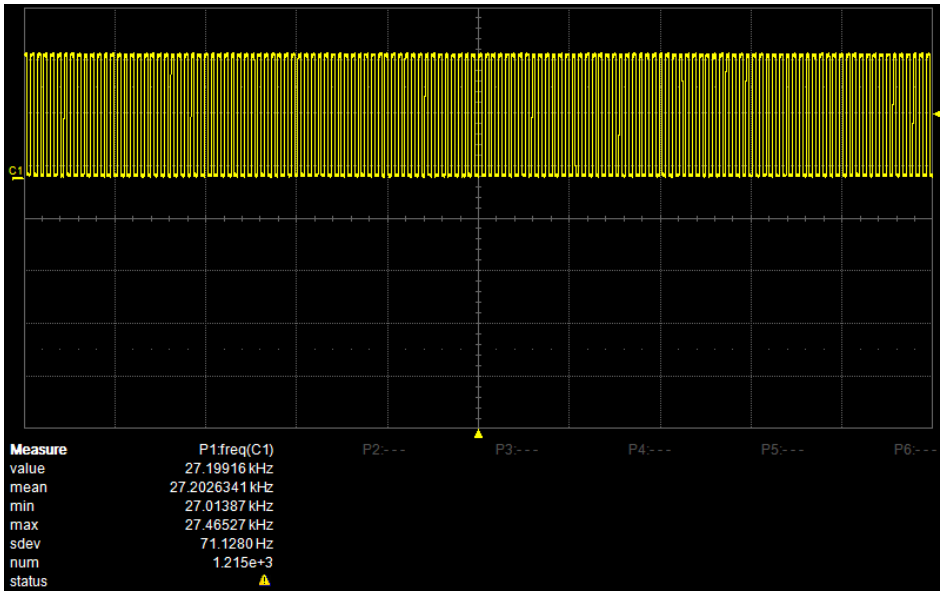
Stejný problém řešil i kolega pracující na inovované jednotce pro DC motory. V spolupráci s firmou National Instruments a kolegy se problém podařilo vyřešit. Pro řešení problému byl použit DC motor s enkodérem HEDS 5540, u kterého bylo možné zajistit konstantní rychlost otáčení bez potřeby řízení.

Po opravě řídicího kódu problém setrval. Následně se ale ukázalo že stejným problémem trpí i DC motor MAXON RE-36, osazený enkoderem MAXON MR ENC Typ L, 1024Imp 3K LD. Bylo proto provedeno měření rozptylu frekvence výstupního signálu

snímačů HEDS a MR ENC pomocí paměťového osciloskopu LeCroy Wave Surfer 44Xs. Průběhy signálů jsou na obr. 56 a 57, z nich je patrné, že signál enkodéru HEDS má rozptyl 2% a enkoder MR ENC má rozptyl 35%. Je tedy jasné, že problémy kolísání otáček jsou způsobeny enkoderem MR ENC a ne chybnou metodikou vyhodnocování signálu.



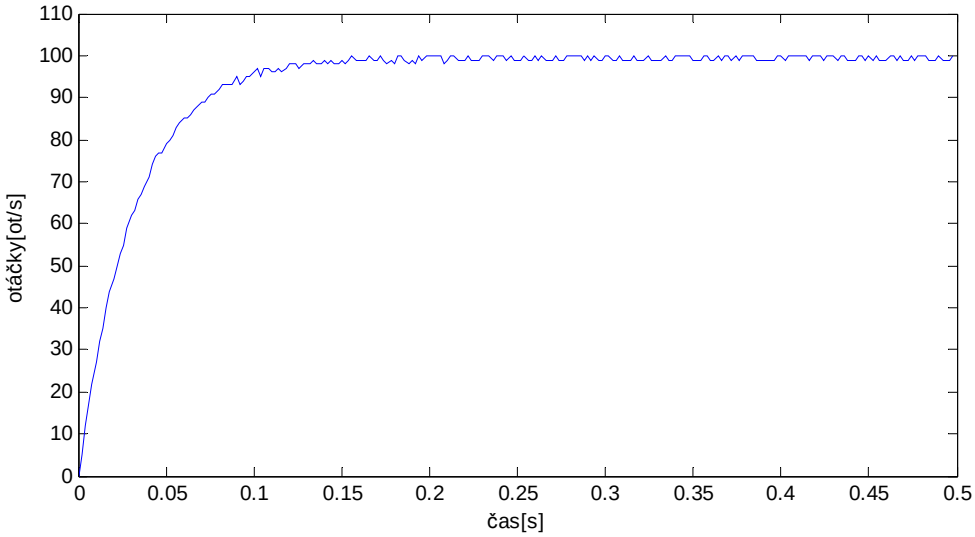
Obr. 56 Průběh výstupu enkodéru MAXON MR ENC Typ L, 1024Imp 3K LD



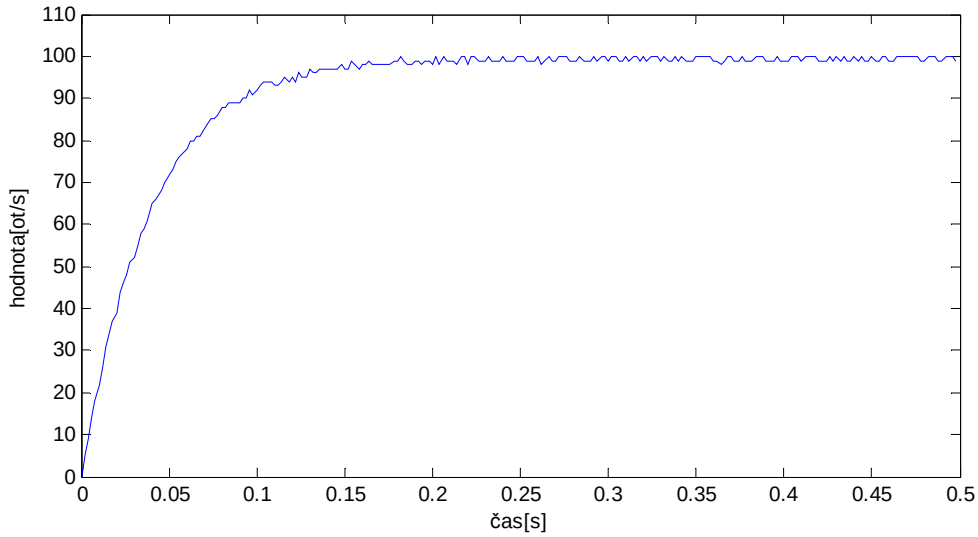
Obr. 57 Průběh výstupu enkodéru HEDS 5540

7.3 Výsledky měření pomocí řídicí jednotky

Pro ověření řídicí jednotky EC motorů bylo realizováno několik přechodových charakteristik, s různými setrvačníky na hřídeli převodovky. Výsledky jsou zobrazeny na obr 58 až 60.

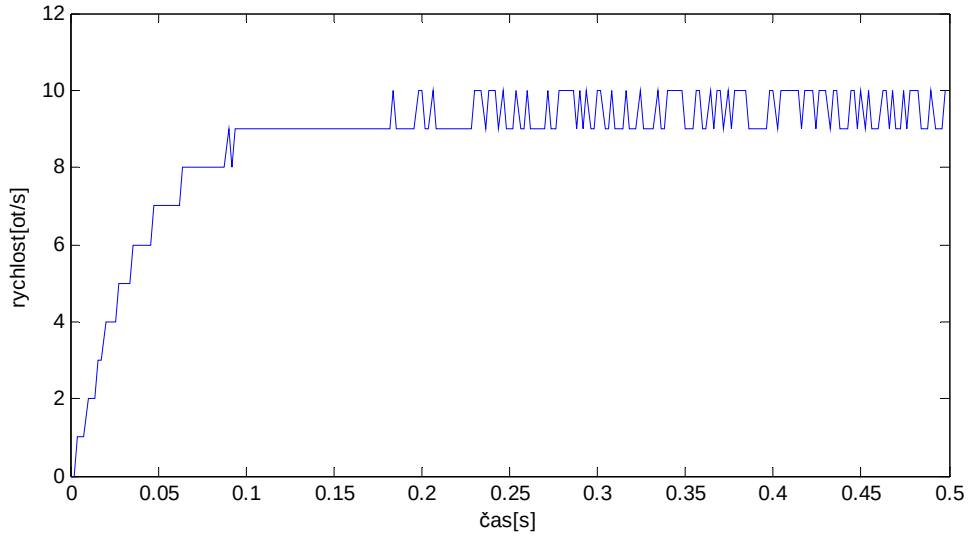


Obr. 58 Rozběhová charakteristika - rozběh na 100s^{-1}bez setrvačníku



Obr. 59 Rozběhová charakteristika - rozběh na 100s^{-1}, se setrvačníkem

Výrazné zvlnění charakteristiky na obr 60 je způsobeno nestabilitou výstupu snímač MAXON MR ENC Typ M, 512Imp, které je zvláště patrné při nízkých otáčkách.



Obr. 60 Rozběhová charakteristika - rozběh na $10s^{-1}$, se setrvačníkem

8. Závěr

Cílem práce bylo navrhnout a realizovat řídící jednotku pro EC motor s univerzálním uživatelským rozhraním s využitím zkušeností z již realizovaného software získaných během předchozích pracích na koncepci Univerzální řídicí jednotky pro elektromotory, realizovaných během posledních let v Laboratoři elektrických prostředků ÚAI.

Na začátku práce byl proveden krátký úvod do konstrukce EC motoru. Byly popsány rozdíly mezi mechanicky a elektricky komutovaným motorem, princip elektronické komutace, možnosti provozu motorů a typy regulačních smyček. V další části je zpracována krátká rešerše o řídících jednotkách dostupných na trhu. Následuje rozbor struktury řídicí jednotky a popis jednotlivých částí včetně snímačů potřebných pro provoz jednotky. Na základě rozboru byl proveden návrh řídicí jednotky pro EC motory a navržená jednotka byla ve čtyřech etapách realizována a ověřena.

Průzkum trhu potvrdil původní domněnku, že neexistuje řídicí jednotka s otevřeným systémem. Proto bylo rozhodnuto, v pokračování ve vývoji jednotek dle navržené koncepce Univerzální řídicí jednotky pro elektromotory. Výhoda této koncepce je její otevřenost a existence univerzálního softwarového rozhraní pro komunikaci s touto jednotkou.

Pro realizaci řídicí jednotky EC motorů byl použit mikrořadič LPC 2103 firmy NPX, výkonový budič L6205 firmy STMicroelectronic, a pro měření proudu vinutími motoru jsou použity Hallovy snímače ACS712 firmy Allegro. Realizovaná jednotka využívá prvků, které byly unifikovány v rámci koncepce Univerzálních řídicích jednotek.

Jednotka byla realizována ve čtyřech krocích. V prvním kroku byla navržena a odzkoušena výkonová část jednotky pomocí DAQ karet a vývojového prostředí NI LabVIEW. V druhém kroku byla navržena a odzkoušena řídicí elektronika s mikrořadičem, ve třetí etapě byly propojeny obě části jednotky a upraven software pro potřeby řízení EC motoru. Ve čtvrté etapě byla realizována celá jednotka.

Během vývoje jednotky jsem narazil na problém přesnosti snímače otáček motoru, který výrazně ovlivňuje kvalitu rychlostní i polohové smyčky. Proto je možné na změřených charakteristikách pozorovat zvlnění, které je způsobeno tímto problémem. Další prací na této jednotce by mělo být ověření její funkčnosti i s jinými EC motory, než které jsem měl k dispozici.

9. Použitá literatura

[1] Prof. Ing. Pavelka Jiří, DrSc.; *Elektrické pohony*. Prof. Ing. Čeřovský Zdeněk, DrSc., doc. Ing. Javůrek Jiří, CSc. 2. vydání. vyd. Praha: vydavatelství ČVUT, 2001. 221 s.

[2] doc. Ing. Ivan Švarc, CSc; *Automatické řízení*. doc. RNDr. Ing. Miloš Šeda, Ph.D., prof. Ing. Miluše Vítečková, CSc 1. vydání. vyd. CERM: vydavatelství VUT Brno, 2007. 221 s.

[3] Prof. Dr. Ing. Manfred Lohöfener, *Mechatronic systems and mechatronic design*, [PDF dokunent], 2008, [cit. 1. 5. 2008] dostupný z <http://www.hs-merseburg.de/~lohoefen/Brno05/ >

[4] MAXON, *Malé stejnosměrné motory*, [PDF dokument], 2002, [cit. 10.4.2008], dostupný z < http://www.uzimex.cz/soubory/20070103_maxon_serial.pdf>

[5] MAXON, *Motory a řízení pohonů*, [PDF dokument], 2007, [cit. 18. 4. 2008], dostupný z <http://www.uzimex.cz/soubory/20070928_motory_rizeni_1.4.pdf>

[6] Jim Lepkowski, *Motor Control Sensor Feedback Circuits*, [PDF dokument], 2003, Microchip Technology Inc., [cit. 15.4.2008], dostupný z <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00894a.pdf>

[7] Ondřej Andrš, *Řídicí systémy pro mobilní kolové robot.* Brno, 2007, Diplomová práce na fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně na ústavu Automatizace a informatiky. Vedoucí práce Ing. Pavel Houška, Ph.D.

[8] Allegro, *Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensorwith 2.1 kVRMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor*,[PDF dokument], [cit. 25. 3. 2008], dostupný z <http://www.allegromicro.com/en/Products/Part_Numbers/0712/0712.pdf>

[9] STMicroelectronics, *DMOS DUAL FULL BRIDGE DRIVER*, [PDF dokument], [cit. 22. 3. 2008], dostupný z <http://www.st.com/stonline/products/literature/ds/7616/l6205.pdf>

[10] Koninklijke Philips Electronics N.V., *Preliminary data sheet*, [PDF dokument] 2006, [cit. 20. 2. 2008], dostupný z http://www.keil.com/dd/docs/datashts/philips/lpc2101_2102_2103.pdf

[11] Wikipedie <www.wikipedie.com> Elektromotor, [HTML dokument], [cit.21.5.2008], dostupný z <http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrick%C3%BD_motor>

[12] maxon, [HTML dokument], [cit. 21. 5. 2008] dostupné z <http://www.uzimex.cz/Vyrobce/maxon-motor-ag/Snimace/Tachodynama.html>

[13] National Semiconductor, *LM117/LM317A/LM3173-Terminal Adjustable Regulator*, [PDF dokument], [cit. 22.3.2008], dostupný z <http://202.114.36.12/huan/PDF%5CpowerIC%5CLM317TK.pdf>

[14] Macek Jiří, *Řízení pohybu podvozku mobilního robotu OMR III*,Brno 2006, Diplomová práce na fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně na ústavu Automatizace a informatiky. Vedoucí práce Ing. Pavel Houška, Ph.D.

[15] MAXON, *Program 07/08*, 2007

10.Seznam obrázků

Obr. 1. Princip mechanické komutace [11].....17
Obr. 2. Uspořádání[4] 18
Obr. 3. Směry proudu ve vinutích během komutace.....18
Obr. 4. Konstrukce DC motoru [4] 19
Obr. 5. Konstrukce EC motoru 21
Obr. 6. Rychlostní regulační smyčka 22
Obr. 7. Rozvětvený regulační obvod 22
Obr. 8. Rozložení kvadrantů provozu motoru.....23
Obr. 9. Uspořádání řídící jednotky.....27
Obr. 10. Uspořádání výkonové části [5] 28
Obr. 11. Zapojení měřícího odporu do obvodu [6].....30
Obr. 12. Zapojení měřícího odporu pro měření velkých proudů [6].....30
Obr. 13. Zapojení měřícího odporu pro měření malých proudů [6] 31
Obr. 14. Princip Hallova jevu [6].....32
Obr. 15. Použití integrovaných Hall snímačů [6] 32
Obr. 16. Typy měřících transformátorů [6].....33
Obr. 17. Tachodinamo [12].....34
Obr. 18. Funkce inkrementálního senzoru 35
Obr. 19. Funkce inkrementálního senzoru 35
Obr. 20. Diagram klasického vývoje nových produktů [3].....37
Obr. 21. V model postupu při vývoji nového produktu s využitím modelování [3] 38
Obr. 22. Blokové schéma řídící jednotky 40
Obr. 23. Vnitřní zapojení mikrořadiče LPC 2103[10] 42
Obr. 24. Blokové schéma komunikace I2C [7].....43
Obr. 25. Vnitřní zapojení budiče L6205 [9].....44
Obr. 26. Vnitřní zapojení ACS712 [8].....45
Obr. 27. Schéma zapojení blokovací logiky 47
Obr. 28. Schéma zapojení výkonového zesilovače.....48
Obr. 29. Schéma zapojení snímače proudu s úpravou pro A/D převodník.....48
Obr. 30. Schéma zapojení parametrického stabilizátoru.....49
Obr. 31. Deska výkonové části 49
Obr. 32. Deska výkonové části propojená s DAQ kartami a EC motorem.....50
Obr. 33. Nejjednodušší zapojení EC motoru bez zpětné vazby.....51
Obr. 34. Nejjednodušší zapojení EC motoru bez zpětné vazby kód LabVIEW 51
Obr. 35. Ovládání motoru v nejjednodušším režimu provozu.....51
Obr. 36 Řízení EC motoru se sledováním polohy rotoru.....52
Obr. 37. Ovládání EC motoru s obdélníkovou komutací.....52
Obr. 38 Řízení EC motoru se sledováním polohy rotoru a čtení z IRC.....52
Obr. 39 Řízení EC motoru se sledováním výstupního proudu 53
Obr. 40 Ovládací panel řízení EC motoru v LabVIEW.....54
Obr. 41. Schéma zapojení mikrořadiče.....55
Obr. 42. Reálné zapojení obvodu.....56
Obr. 43. Schéma zapojení děliče pro měření napájecího napětí 56
Obr. 44. Reálné zapojení v obvodu.....57
Obr. 45. Propojené obě samostatné části 58

Obr. 46 Řídící program jednotky 59
Obr. 47 Hlavní formulář komunikačního rozhraní 61
Obr. 48 Formulář ručního připojení 62
Obr. 49 Formulář nastavení parametrů motoru a snímačů 63
Obr. 50 Formulář nastavení parametrů regulátoru 64
Obr. 51. Navrhnutá deska plošných spojů finální verze 65
Obr. 52 Osazená deska řídící jednotky "bottom" 65
Obr. 53 Osazená deska řídící jednotky topt" 66
Obr. 54 Formulář ručního provozu jednotky se zobrazováním vybraných hodnot . 67
Obr. 55 Přechodová křivka v LabVIEW 69
Obr. 56 Průběh výstupu enkodéru MAXON 70