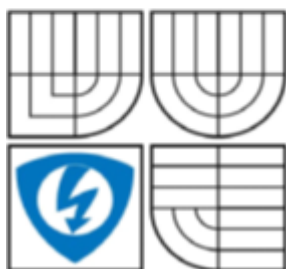




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

POUŽITÍ BEZKARTÁČOVÉHO STEJNOSMĚRNÉHO MOTORU PRO POHON LINEÁRNÍHO SERVOPOHONU S BEZPEČNOSTNÍ FUNKCÍ

USING BRUSHLESS D.C. MOTOR TO DRIVE SERVO-UNIT WITH SAFETY FUNCTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. LADISLAV RUDOLF

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. VÁCLAV PRAJZNER



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Ladislav Rudolf

ID: 16516

Ročník: 2

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Použití bezkartáčového stejnosměrného motoru pro pohon lineárního servopohonu s bezpečnostní funkcí

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s lineárními pohony pro HVAC aplikace firmy Honeywell a jejich elektrickomechanickými koncepty. Navrhněte řídicí systém pro pohon stejnosměrným bezkartáčovým motorem. Porovnejte navržený koncept se současným řešením zejména z pohledu - regulace rychlosti, polohy, limitace síly a ceny.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Microchip Technology Inc., http://www.microchip.com/en_US/technology/motorcontrol/

[2] Freescale Semiconductor Inc., <http://www.freescale.com/>

[3] SKALICKÝ, J.: Elektrické servopohony, skriptum VUT FEKT, 1999

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 24.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Václav Prajzner

Konzultanti diplomové práce:

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ANOTACE

V této práci je diskutován návrh řízení BLDC motoru, který bude využit jako pohon lineárního servopohonu. Řízení pomocí mikrokontroléru se zaměřuje hlavně na aspekty jako jsou motorický režim, generátorický režim, měření polohy rotoru senzory a měřením proudu motoru, který bude odpovídat jeho momentu. Výsledek práce je zaměřen na inovaci stávajícího servopohonu firmy Honeywell, kde by procesorově řízený BLDC motor měl nahradit stávající systém servopohonu a převzít jak funkce provozní tak havarijní.

Klíčová slova: BLDC motor, servopohon, mikrokontrolér, hallové sondy, měření proudu, síla stall, síla impact, síla break away, superkapacitor, PWM, třífázový můstek, superkapacitor

ABSTRACT

In this work, a BLDC motor control is discussed. This motor will be used as a drive linear actuator. The control with microcontroller focuses mainly to aspects such as motor mode, regenerative mode, measuring rotor position sensors and measuring the motor current corresponding to the moment. The result of the work is focused on upgrading the existing Honeywell actuator where the processor-controlled BLDC motor to replace the existing system and take over the actuator working function and emergency function.

Keywords: BLDC motor, the actuator, microcontroller, hall sensors, current measurement, stall force, impact force, break away force, supercapacitor, PWM, three-phase bridge, supercapacitor

RUDOLF, L. *Použití bezkartáčového stejnosměrného motoru pro pohon lineárního servopohonu s bezpečnostní funkcí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. XY s. Vedoucí diplomové práce Ing. Václav Prajzner.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma POUŽITÍ BEZKARTÁČOVÉHO STEJNOSMERNÉHO MOTORU PRO POHON LINEÁRNÍHO SERVOPOHONU S BEZPECNOSTNÍ FUNKCÍ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 24. 05. 2012

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Ing. Václavu Prajznerovi za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování diplomové práce.

V Brně dne 24.05.2012

.....
podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	7
2	TEORIE SERVOPOHONU	8
2.1	BLDC MOTOR JAKO SERVOPOHON	8
2.2	KONSTRUKCE, PARAMETRY A CHARAKTERISTIKA BLDC MOTORU	9
3	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU	11
3.1	KONCEPT	11
3.2	PROVOZNÍ A BEZPEČNOSTNÍ FUNKCE SERVOPOHONU	11
3.2.1	<i>Provozní funkce - mikropsínače</i>	11
3.2.2	<i>Bezpečnostní funkce – odpojení motoru od převodovky pomocí elektromagnetu</i>	12
3.3	POUŽITÍ	12
3.4	ZHODNOCENÍ	12
4	VÝBĚR VHODNÉ ČI OPTIMÁLNÍ VARIANTY ŘEŠENÍ	14
4.1	PRACOVNÍ STAV – MOTORICKÝ REŽIM – NAHRAZENÍ MIKROSPÍNAČŮ	14
4.1.1	<i>Síla STALL</i>	15
4.1.2	<i>Síla IMPACT</i>	16
4.1.3	<i>Síla BREAK AWAY</i>	17
4.2	HAVARIJNÍ STAV – GENERÁTORICKÝ REŽIM – ELEKTROMAGNET SPOJKY	18
5	TEORETICKÁ ČÁST	19
5.1	BLOKOVÉ SCHÉMA – NÁVRH	19
5.2	MIKROKONTROLÉR	21
5.3	TŘÍFÁZOVÝ MŮSTEK	22
5.4	URČOVÁNÍ POLOHY ROTORU – HALLOVY SNÍMAČE	24
5.5	SUPERKAPACITOR	25
6	PRAKTICKÁ ČÁST	26
6.1	ODVOZENÍ PARAMETRŮ MOTORU Z PŮVODNÍHO AKTUÁTORU	26
6.2	ODVOZENÍ PARAMETRŮ SUPERKAPACITORU	28
6.3	MĚŘENÍ PROUDU MOTORU	28
6.4	VÝKONOVÝ MŮSTEK	30
6.5	ANALOGOVÝ VSTUP 0 AŽ 10V – Y SIGNÁL	31
6.6	DETEKCE PŘÍTOMNOSTI NAPÁJENÍ IS_POWER	32
6.7	ZDROJ ALTERNATIVNÍ ENERGIE BACK_POWER	33
6.8	SCHÉMA ZAPOJENÍ	34
6.9	DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ	36
7	PROGRAMOVÁ SMYČKA	37
7.1	STAVOVÝ DIAGRAM	37
7.2	ELEKTRONICKÁ KOMUTACE	38
7.3	RYCHLOSTNÍ P REGULÁTOR	39
7.4	PWM MODULACE - DUTY CYCLE - STŘÍDA	40
7.5	MĚŘENÍ PROUDU	41
7.6	MĚŘENÍ RYCHLOSTI	41

7.7	MĚŘENÍ POLOHY	42
7.8	BEZPEČNOSTNÍ FUNKCE.....	43
8	VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT	44
8.1	TESTER	44
8.1.1	<i>Impact Force</i>	45
8.1.2	<i>Stall force</i>	46
8.1.3	<i>Break Away force</i>	46
8.2	IMPACT FORCE – GRAFICKÝ PRŮBĚH.....	47
8.3	IMPACT FORCE - ZHODNOCENÍ.....	48
8.4	STALL FORCE – GRAFICKÝ PRŮBĚH	49
8.5	STALL FORCE - ZHODNOCENÍ	50
8.6	BREAK AWAY FORCE – GRAFICKÝ PRŮBĚH	51
8.7	BREAK AWAY FORCE - ZHODNOCENÍ	52
8.8	ZHODNOCENÍ VÝLEDKŮ Z POHLEDU LIMITACE SÍLY	52
8.9	ZHODNOCENÍ VÝLEDKŮ Z POHLEDU REGULACE POLOHY	53
8.10	ZHODNOCENÍ VÝLEDKŮ Z POHLEDU REGULACE RYCHLOSTI.....	54
8.11	ZHODNOCENÍ VÝLEDKŮ Z POHLEDU CENY	55
9	SPECIFIKACE PROTOTYPU AKTUÁTORU	56
10	ZÁVĚR.....	57
11	SEZNAM OBRÁZKŮ	58
12	SEZNAM LITERATURY	59
13	SEZNAM ZKRATEK, VELIČIN A SYMBOLŮ.....	60
14	SEZNAM PŘÍLOH	62
14.1	SOUBOR NA CD TESTER.RAR – HODNOTY Z MĚŘENÍ NA TESTERU.	62
14.2	SOUBOR NA CD ANALYZATOR.RAR – PRŮBĚHY PWM,HALL,PHASE	62
14.3	SOUBOR NA CD ACTUAL_FW.RAR – PROGRAMOVÁ SMYČKA	62
14.4	SOUBOR NA CD SCHEMA.RAR – ELEKTRICKÉ SCHÉMA.....	62
14.5	SOUBOR NA CD DPS.RAR – DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ	62
14.6	SOUBOR NA CD ROZPISKA.HTM – ROZPIS ELEKTRONICKÝCH SOUČÁSTEK.....	62

1 ÚVOD

Cílem této diplomové práce je ověření konceptu servopohonu/actuátoru s bezpečnostní funkcí nazvanou „spring return“ na bázi BLDC (*Brushless Direct Current*) motoru. Úkolem je seznámit se současným způsobem řešení omezení síly na výstupním dřívku servopohonu včetně řídicí elektroniky a se způsoby řízení BLDC motoru. Je třeba provést stručnou rešerši stávajícího principu a jeho následného porovnání s novým řešením. Z dostupných komponentů (motor, elektronika, mechanika) se sestaví funkční prototyp, přičemž celý koncept se ověří na testovacím zařízení. Výsledkem tedy bude vyvinutí funkčního řídicího softwaru pro BLDC motor, přičemž reálné nasazení tohoto algoritmu lze uplatnit ve firmě Honeywell, kde by mohl nahradit současné řešení.

Celek je tvořen ze tří hlavních částí: z motoru, elektroniky a mechaniky. Motor představuje stejnosměrný bezkartáčový motor a elektronika je tvořena řídicí a silovou částí. Řídicí část je osazena signálovým procesorem/mikrokontrolérem a výkonová část z výkonových prvků, které nejsou sestavovány jednotlivě, ale ve formě již prefabrikovaných produktů. Tato funkční sestava může figurovat jako soupeř stávajícímu řešení servopohonu/aktuátoru používaných v kompaktních nebo konvenčních stanicích pro přímé či nepřímé připojení dálkového vytápění, klimatizačních jednotek, střešních jednotek a vzduchotechniky, které patří mezi produktové portfolio firmy Honeywell.

2 TEORIE SERVOPOHONU

Servomotory jsou pohony, u kterých lze, na rozdíl od běžného motoru, nastavit přesnou polohu natočení osy. Servomotorem lze chápat jakýkoli motor sloužící k motorickému řízení polohy nahrazující práci člověka. Do této kategorie lze zařadit elektromagnet, elektromotor, pneumatický či hydraulický píst, topný odporový drát na bimetalu, které slouží například jako posuv u CNC strojů nebo pro nastavení čtecí hlavičky u pevného disku.

Řízení a regulace servopohonu lze řešit bez zpětné vazby nazývané též jako „sensorless“ podle počtu impulzů vyslaných do krokového motoru nebo podle času, po který byl pohon zapnutý. Vlastnosti servomotoru vylepšuje použití snímačů pro odečet polohy. Signál těchto čidel lze využít k dalšímu řízení pohonu, například vypnutím motoru po dojezdu do krajní polohy. Zavedením lineární záporné zpětné vazby lze servomotorem řídit polohu zařízení v celém rozsahu jeho pracovní dráhy. Je k tomu zapotřebí řídicí systém zvaný regulátor.

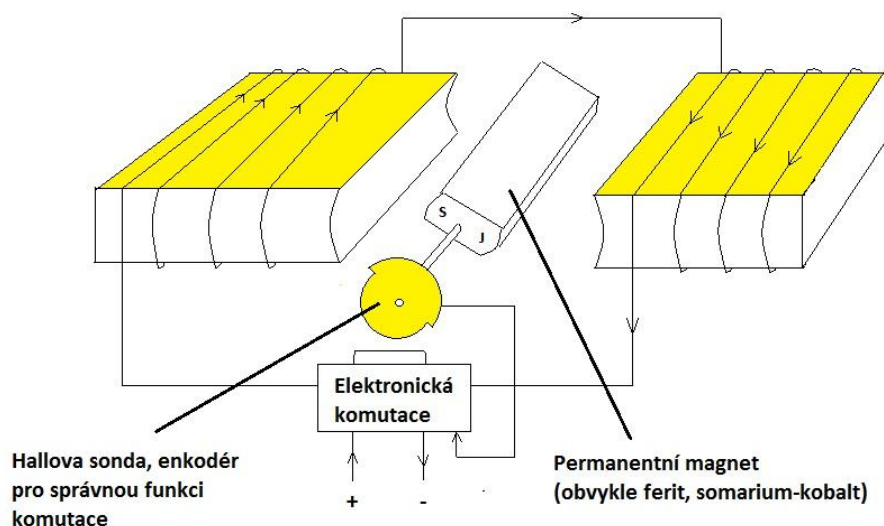
Zároveň lze servopohon řešit se zpětnou vazbou. Poloha hřídele servomotoru se tak ve většině případů zjišťuje elektricky pomocí fotoelektrického snímače (enkodér) nebo pomocí Halloových sond. Signál snímače polohy je přiveden pomocí zpětné vazby na regulátor, který porovnává skutečnou polohu motoru se žádanou polohou. Na základě rozdílu žádané a skutečné polohy regulátor řídí měnič a tak nastavuje motor na žádanou polohu.

2.1 BLDC motor jako servopohon

BLDC motory jsou synchronní stroje, které mají rotor opatřen permanentními magnety. Magnetický tok rotoru je vytvářen pomocí permanentních magnetů a nikoliv elektrickým proudem tekoucím vinutím, jako je tomu u klasických stejnosměrných motorů. BLDC motor tak nepotřebuje komutátor s kartáčky. Z této skutečnosti vznikl i název motorů: brushless - bezkartáčový (též bezkomutátorový). Spolu s komutátorem byly odstraněny i největší nevýhody stejnosměrných motorů, kterými bývají spolehlivost a elektromagnetická kompatibilita. Mezi další příznivé vlastnosti patří také lepší momentová charakteristika, rychlejší odezva, životnost a poměrně tichý chod. Navzdory potřebě podstatně složitějšího řízení v porovnání s klasickými komutátorovými motory se BLDC stávají stále více rozšířeným typem pohonu. K častějšímu nasazování těchto motorů přispěly především výrazné pokroky v oblasti vývoje permanentních magnetů, výkonové elektroniky a v neposlední řadě i dostupnost mikroprocesorů, popř. DSP používaných pro jejich řízení. Dnešní konstrukce používají permanentní magnety na bázi vzácných zemin (nejčastěji typ neodým - železo - bór). Motory lze několikanásobně momentově přetížit, a proto jsou vhodné pro dynamicky náročné úlohy.

2.2 Konstrukce, parametry a charakteristika BLDC motoru

Konstrukčně je BLDC motor tvořen statorem, na kterém je navinuto statorové vinutí, obvykle třífázové. Rotor je tvořen permanentním magnetem, který vytváří konstantní magnetické pole ve vzduchové mezeři. BLDC motory se vyrábějí jako dvoupólové nebo n-pólové. BLDC motor na rozdíl od klasického DC motoru nemá mechanický komutátor. Komutaci je tedy zapotřebí provádět elektronicky. Abychom byli schopni provádět komutaci ve správném okamžiku, je zapotřebí znát informaci o poloze rotu. V koncepci řízení se zpětnou vazbou se toto obvykle řeší pomocí Hallových sensorů v případě aplikací, kde záleží na ceně. Nebo pomocí inkrementálního snímače v případě vyšších nároků na pohon. Existují i řešení bez použití snímače a takováto řešení se pak nazývají obecně "sensorless řízení"[1]. Základní princip BLDC motoru je vyobrazen na Obr. 2.1.



Obr. 2.1 Princip BLDC motoru

Pro charakterizování BLDC motoru jsou kromě jmenovitého napětí, proudu, otáček a výkonu důležité konstanty K_v [ot/V] a K_t [Nm/A]. Když se rotor motoru otáčí, permanentní magnet prochází kolem statorových cívek a indukuje v nich napětí. Toto napětí je přímo úměrné rychlosti otáčení motoru (viz Rovnice 2.2.1),

$$U_i = B \cdot N \cdot l \cdot r \cdot \omega \quad (2.2.1)$$

kde B je magnetická indukce, N počet závitů cívky, l délka rotoru, r poloměr rotoru a ω úhlová rychlost otáčení rotoru.

Indukované napětí lze také vyjádřit jako (viz Rovnice 2.2.2):

$$U_i = \frac{\omega}{K_v} \quad (2.2.2)$$

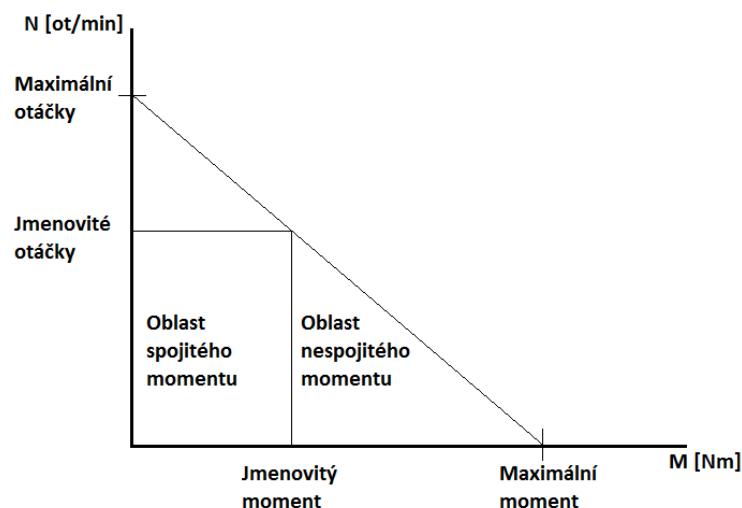
Konstanta K_v tedy vyjadřuje poměr mezi otáčkami naprázdno a svorkovým (špičkovým) napětím. Druhá uvedená konstanta slouží pro určení průběhu momentu motoru v závislosti na proudu podle následujícího vztahu (viz Rovnice 2.2.3):

$$M = K_t \cdot I \quad (2.2.3)$$

Moment je tedy přímo úměrný proudu, který motor odebírá. Poměrně zajímavým faktem je, že součin konstant K_v a K_t je totožný pro všechny motory a platí pro ně Rovnice 2.2.4.

$$K_v \cdot K_t = 1 \quad (2.2.4)$$

Na Obr. 2.2 je vyobrazena mechanická charakteristika BLDC motoru. Tato charakteristika popisuje následující jevy, při kterých motor v oblasti plynulého provozu lze zatěžovat až do jmenovitého momentu. Moment zůstává konstantní v celém rozsahu rychlostí od 0 až do jmenovitých otáček. Motor však může být provozován i na vyšších otáčkách, než jsou jmenovité (až 150% jmenovitých), ale důsledkem toho začne točivý moment klesat. V aplikacích, kde je častý rozběh, zastavování nebo reversování směru otáčení, je vlivem setrvačnosti zátěže po určitou dobu požadován vyšší moment než jmenovitý. Průběh momentu v této oblasti provozu bývá výrazně více zvlněný než v oblasti do jmenovitého momentu. Parametry odpovídající vyznačeným bodům na mechanické charakteristice jsou rozhodující při výběru vhodného motoru pro danou aplikaci.

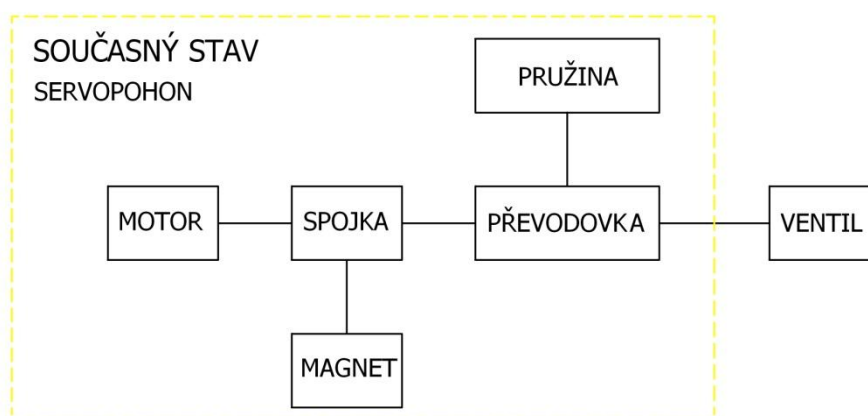


Obr. 2.2 Charakteristika momentu M v závislosti na otáčkách $N = f(M)$

3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU

3.1 Koncept

V současnosti se pro pohon servopohonu používá koncept neřízeného dvoufázového synchronního motoru. Pohyb synchronního motoru je převáděn přes spojku, která tvoří bezpečnostní funkci a je pospána v Kapitole 3.2. Spojka je dále spojena s převodovkou a zpětnou pružinou. Lineární pohyb pohonu ventilu je vykonáván pomocí čelní převodovky přímo na výstupní hřídel, která je maticí spojena s ventilem. Ventil je opatřen pružinou vytvářející moment, který zajistí potřebnou sílu působící zpětně proti otvírání ventilu. Od servopohonu se očekávají dvě hlavní funkce pracovní a havarijní. Pracovní je obsluhována mikrospínači, které chrání mechanickou sestavu proti vznikajícím momentům v průběhu pohybu servopohonu. Havarijní funkce má za úkol odpojení motoru od převodovky v případě ztráty napájecího napětí. Schéma současného konceptu je vyobrazeno na Obr. 3.1.



Obr. 3.1 Současný stav sestavy servopohonu

3.2 Provozní a bezpečnostní funkce servopohonu

3.2.1 Provozní funkce - mikrospínače

Servopohon zajišťuje přímou ochranu před mechanickým poškozením zařízení a mechanickými rázy nebo obecně proti vznikajícím momentům pomocí mikrospínačů. V provozním režimu se zaměřuje hlavně na výstupní sílu dřívku, která může naznačovat následující jevy: již plně otevřený ventil, mechanické zanesení ventilu nebo obecně sílu větší nežli provozní. Toto se řeší pomocí integrovaného mechanismu na bázi detekce deformace pružiny. Ta je ovlivňována omezující silou výstupního dřívku. Tento mechanismus (pružina) se stává přímo akčním členem, který

vytváří svým mechanickým pohybem impuls pro instalované mikrospínače, které elektricky vypínají pohon aktuátoru/ servopohonu.

3.2.2 Bezpečnostní funkce – odpojení motoru od převodovky pomocí elektromagnetu

Cílem této funkce je návrat ventilu do výchozí polohy při nepřítomnosti elektrického napájení. Způsob řešení spočívá v mechanické spojce s pohonem pružiny, která je součástí servopohonu. Tato sestava vytváří bezpečnostní funkci servopohonu při ztrátě napájecího napětí. V případě nepřítomnosti procházejícího elektrického proudu elektromagnet odpojí spojku pomocí pružiny od převodovky.

Důvodem je, že současný motor servopohonu má příliš velký detent torque (moment potřebný k otočení hřídelí, když motor není napájený) a pružina není schopna otočit s nenapájeným motorem.

3.3 Použití

Tato kombinace ventil-servopohon je vhodná zejména pro integraci do kompaktních nebo konvenčních stanic pro přímé nebo nepřímé připojení dálkového vytápění, klimatizační jednotky či střešních jednotek.

3.4 Zhodnocení

Mechanická část:

Současný stav provedení servopohonu je koncipován pomocí mechanického řešení, které omezuje výstupní síly díky a zároveň řeší i jeho bezpečnostní funkci. Mezi hlavní nevýhody této koncepce řešení je mechanické opotřebení, což může mít nemalý vliv na garanci plnění těchto funkcí. Mechanické provedení má další negativní vliv na mechanické rozměry celého zařízení. Na rozdíl od mechanického provedení, kde porucha nebo omezení funkčnosti se s časem zhoršuje, se u softwarového řešení jedná spíše o náhodný jev.

Elektrická část:

Současné řešení v pracovní fázi servopohonu je, že nelze snadno a spolehlivě nastavit stejnou Stall, Impact a Breakaway force - blížíci se Nominal Force, což je situace, kterou potřebujeme vytvořit. Současný koncept osazený synchronním motorem toto neumožňuje. Dále u synchronních motorů se rychlost při napájení ze sítě regulovat nedá, poloha se může odhadovat z doby chodu a pro limitaci síly musí být přítomen speciální měřicí systém.

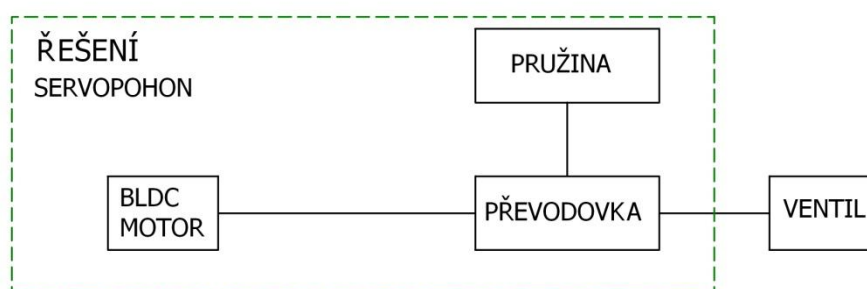
Pokud sestavu nahradíme BLDC motorem můžeme měnit proud BLDC motorem a tím měnit jeho moment. Zároveň můžeme měnit jeho otáčky, a přesně víme polohu servopohonu. Zkráceně můžeme říci, že poslední vyjmenované nevýhody BLDC motor vyřeší.

Ekonomická a provozní část:

Další nevýhodou je i výrobní cena, která je s každým jednotlivým vyrobeným kusem stejná, v porovnání s nahrazením těchto funkcí pomocí navrhovaného řešení. V tomto případě lze předpokládat, že cena bude s každým vyrobeným kusem levnější, jelikož použité „know-how“ bude rozprostřeno.

4 VÝBĚR VHODNÉ ČI OPTIMÁLNÍ VARIANTY ŘEŠENÍ

Nový způsob řešení nahrazuje stávající synchronní dvoufázový motor BLDC motorem vybaveného Hallovými sondami, řídicí částí a výkonovou elektronikou. Veškeré provozní a bezpečnostní funkce převezme algoritmus, který je obsažen v řídicí části. Jsou předpokládány dva hlavní stavy: pracovní a havarijní. V pracovním stavu se využívá motorického režimu motoru, v havarijním generátorického režimu. Blokové schéma navrhované sestavy je na Obr. 4.1.



Obr. 4.1 Navrhovaná sestava servopohonu

4.1 Pracovní stav – motorický režim – nahrazení mikrospínačů

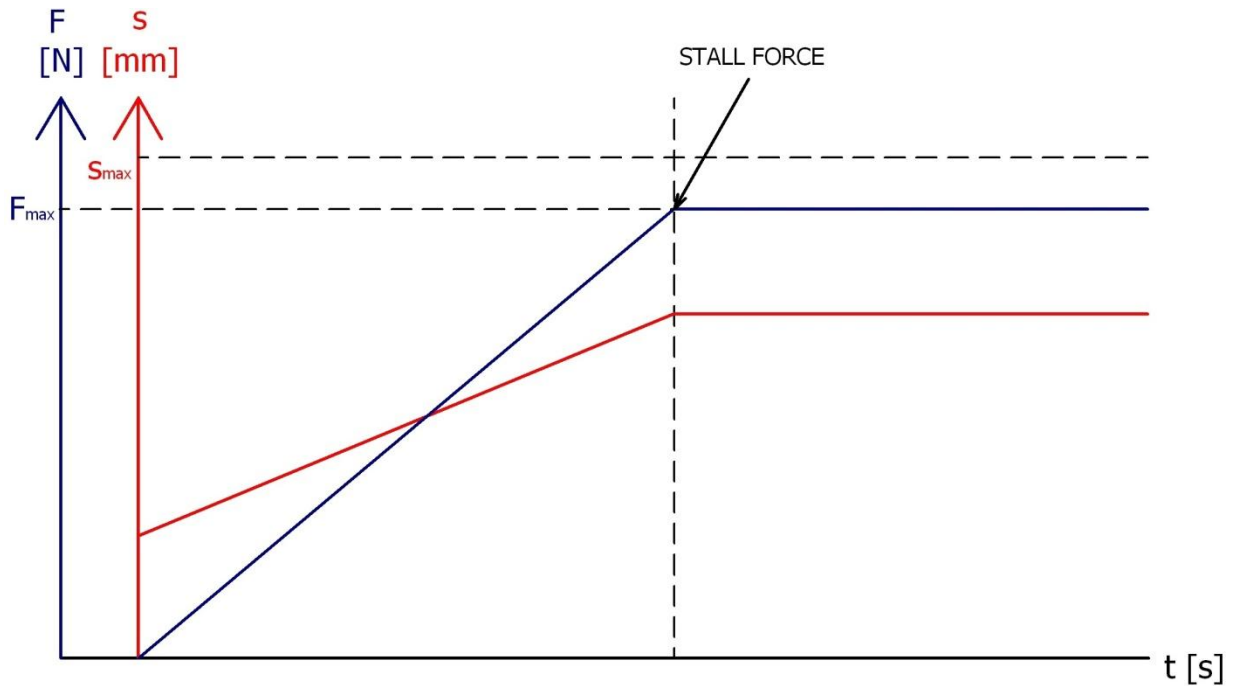
Motorický režim obslouží všechny stávající funkce servopohonu. Tato funkce se doplní o možnosti čtení stavu polohy servopohonu a vyhodnocení pracovních stavů. Pracovní stavy se v této fázi rozdělují na tři hlavní momenty (viz níže), které se pohybují v motorickém režimu BLDC motoru ten je přitom napájen síťovým zdrojem.

Detekci síly deformace původní pružiny nahradíme měřením proudu BLDC motoru, který bude odpovídat jeho momentu, a ten přes převodový poměr a účinnost převodovky zase výstupní síle na jeho hřídeli.

Dle těchto stavů je BLDC motor korektně obsluhován pomocí řídicí části, čímž se nahradí stávající mechanické řešení. Každý stav pracovního režimu se vyhodnocuje, přičemž následné stavy logicky odpovídají stavům předchozím. Tyto stavy jsou zahrnuty do experimentu, popřípadě budou nasazeny v simulovaném prostředí, kde se zjistí, zda je řízení schopno rozpoznat pracovní stavy a provést jejich vyhodnocení.

4.1.1 Síla STALL

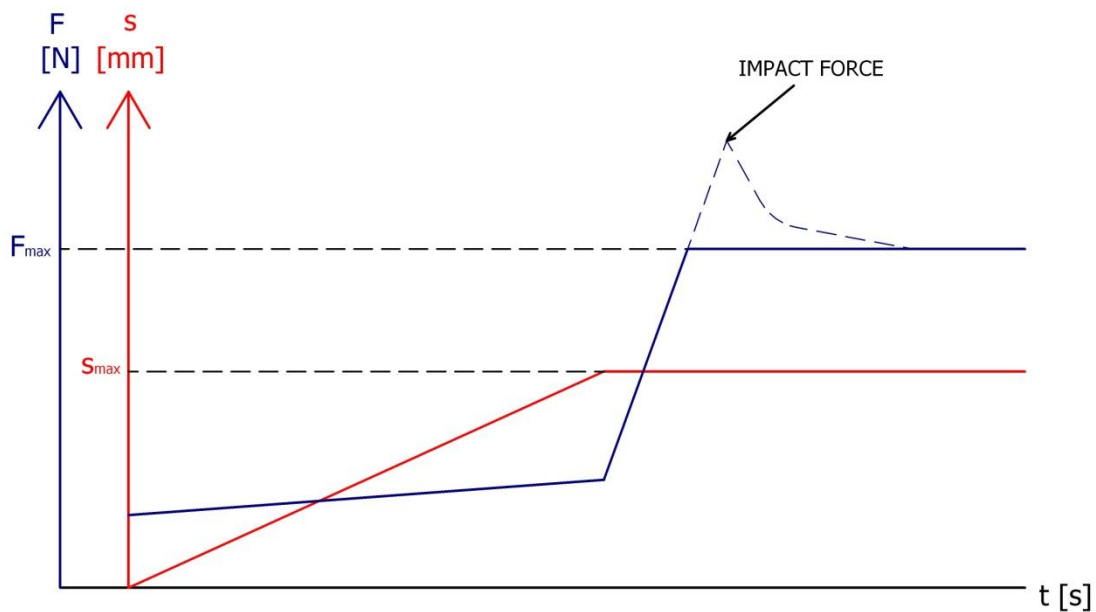
Tato síla nazývaná též „STALL Force“ je síla potřebná k zastavení servopohonu. Je charakterizována plynulým nárůstem momentu až k jeho maximální hranici F_{\max} . Při dosažení F_{\max} dochází k zastavení motoru. Průběh momentu je zobrazen na Obr. 4.2.



Obr. 4.2 Charakteristika soustavy v režimu STALL

4.1.2 Síla IMPACT

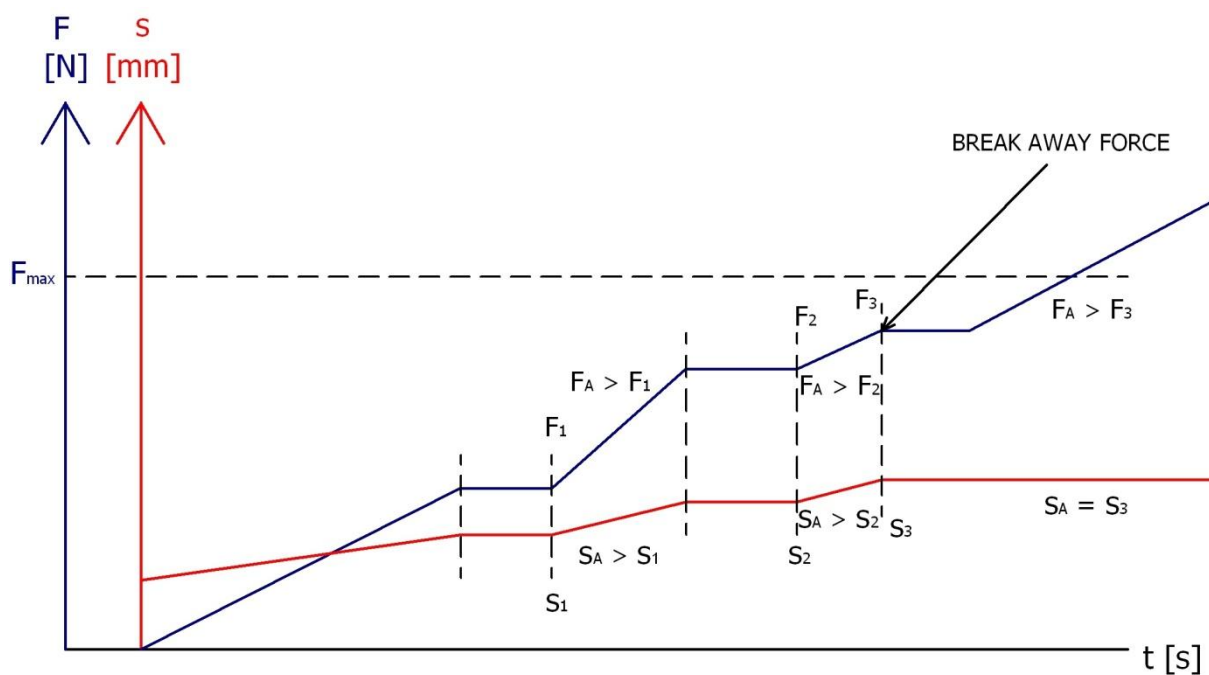
Tato síla nazývaná též „Impact Force“ je síla, kterou vyvolal běžící aktuátor při nárazu na pevnou překážku. Průběh je charakterizován plynulým nárůstem síly. Na konci dráhy dříku nastává náraz do pevné překážky. Dráha je od této doby konstantní a síla prudce roste až k F_{max} , po této hranici vzhledem k rychlosti děje má aktuátor snahu vyvíjet ještě větší sílu. Tento stav je nežádoucí a je snaha ho eliminovat. Dochází k zastavení motoru a odeznění dynamických jevů. Průběh je vyobrazen na Obr. 4.3.



Obr. 4.3 Charakteristika soustavy v režimu IMPACT

4.1.3 Síla BREAK AWAY

Poslední síla z řady pracovních stavů nazývaná „BREAK AWAY force“ je maximální síla, proti které je aktuátor schopen se ještě rozjet. Řízení je charakterizováno nárůstem momentu a následnému zastavení aktuátoru. Následuje postupné zvyšování síly, proti které se musí aktuátor rozjet. BREAK AWAY force je tedy v momentě, kdy aktuátor je schopen se proti síle je schopen rozjet ale další navyšování síly už má za výsledek nerozjetí aktuátoru – nárůst polohy Průběh je vyobrazen na Obr. 4.4.



Obr. 4.4 Charakteristika soustavy v režimu BRAKE-AWAY

4.2 Havarijní stav – generátorický režim – elektromagnet spojky

Řízení se pohybuje v generátorickém režimu motoru. Soustava není napájena ze sítě, ale je napájena generátoricky. V tomto režimu je žádoucí, aby všechny akční členy ventilu zaujaly výchozí polohu bez větších mechanických rázů. Pomocí tohoto režimu získaná elektrická energie pro mikrokontrolér umožní elektricky brzdit servopohon a plynulým chodem ho přesunout do výchozí polohy.

K regenerativnímu režimu se využije můstkového zapojení, které se také běžně používá k usměrňování střídavého třífázového proudu. Ve funkci spínacích prvků bývají často použity diody, u řízených usměrňovačů pak tyristory resp. tranzistory. Pomocí řízených usměrňovačů je možné se změnou úhlu otevření spínače měnit střední hodnotu napětí na výstupu usměrňovače. Usměrňovače složené z diod se vyznačují jednoduchou strukturou a nízkými konstrukčními náklady. Na druhou stranu, ale nedokážou přenést tolik energie na výstup jako řízené usměrňovače. Zde jsou v roli spínacích prvků použity MOSFET s integrovanou diodou. Bez jejich řízení se obvod bude chovat jako diodový třífázový usměrňovač. Jak již bylo naznačeno, tento typ není úplně optimálním řešením pro napájení řídicího obvodu. Lepších parametrů je možné dosáhnout řízeným usměrňovačem. Vzhledem k tomu, že jsou zapojeny všechny tranzistory jednotlivě, je možné je řídit nezávisle na ostatních. Též lze provozovat třífázový můstek i v režimu zvyšujícího měniče. BLDC generátor není schopen při nízkých otáčkách dodat dostatečně vysoké napětí, které je potřebné pro napájení řídicího obvodu.

Alternativou ke generátorickému režimu je umístění záložního zdroje energie přímo v elektronice aktuátoru. Je řeč o superkapacitorech, které začínají být v dnešní době nejen velice cenově zajímavé, ale jsou dobře dostupné. Jejich kapacity, které dosahují jednotek až desítek Faradů, je předurčují k použití do těchto aplikací. V této práci budou postupně diskutovány obě varianty, přičemž výsledná varianta se právě přiklání k použití superkapacitorů a to z několika důvodů. V generátorickém režimu je nutná přítomnost pružiny, která by BLDC motor roztáčela. Ventil i přes velkou sílu na dřívku není schopen lineární převodovku přetočit vlastní silou.

V případě použití superkapacitorů odpadá přítomnost pružiny. BLDC využije naakumulované energie v superkapacitorech pro návrat. Výhodou je, že v návratovém režimu je BLDC motor provozován naprázdno, kryje vlastní ztráty a roztáčí převodovku naprázdno. Ventil už je ze svého principu vrácen samovolně (obsahuje pružinu). Tudíž není ani potřeba velkých superkapacitorů. I řízení této akce je nenáročné jak na aplikaci softwarovou tak hardwarovou.

5 TEORETICKÁ ČÁST

V této části je popsána podoba celého systému servopohonu, alternativních postupů a použití jednotlivých komponent. Je nutné zvážit dané výhody a nevýhody, čímž lze v praktické části předejít fatálním chybám.

5.1 Blokové schéma – návrh

Řešení se skládá ze dvou hlavních celků: z mechanické části a elektrické části. Základní blokové schéma je vyobrazeno na Obr. 5.1. V části mechanické je BLDC motor napojen na stávající převodovku. Část elektrickou tvoří několik funkčních bloků, které jsou popsány níže.

Elektrická část:

Je zde základní blok pro úpravu napájecího napětí, který je napájen v rozmezí 12-24V DC/ AC pro zachování kompatibility s původním servopohem. Blok obsahuje usměrnění, filtraci a stabilizaci napájecího napětí.

Kontrola přítomnosti napájecího napětí rozhodne o zahájení bezpečnostní funkce, která představuje návrat dřívku do výchozí polohy.

Blok superkapacitorů poskytuje zásobu energie a informaci o jeho stavu.

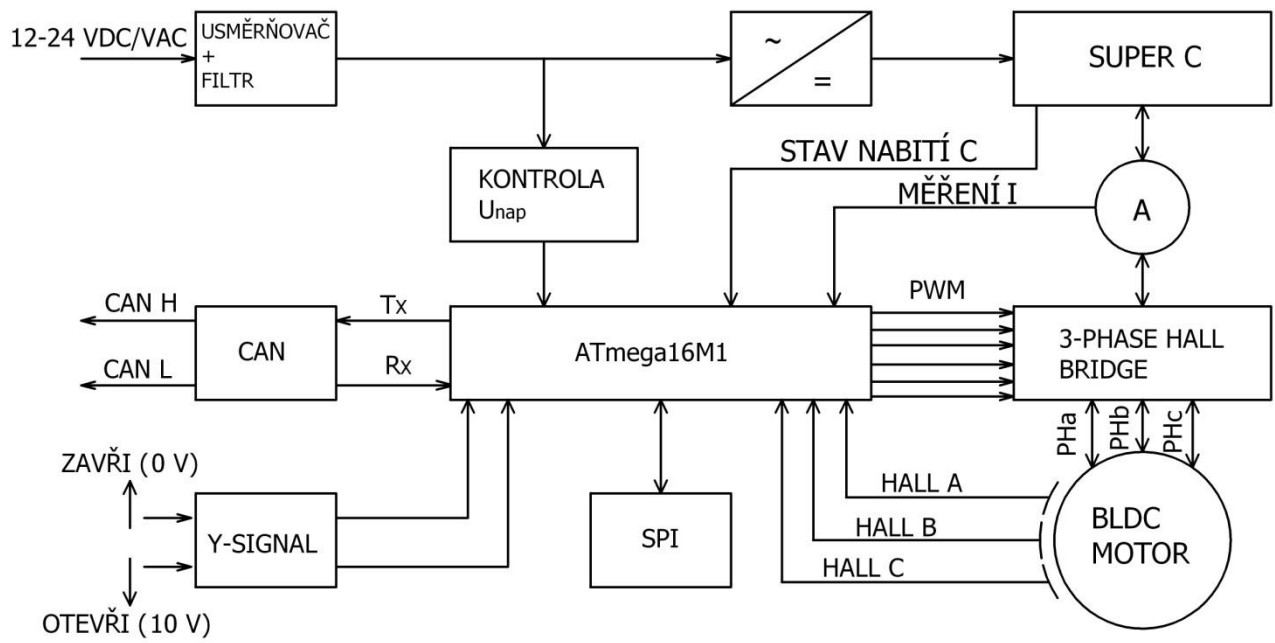
Dále je zde blokově naznačeno měření proudu, které je řešeno pomocí proudových zesilovačů a ADC mikrokontroléru.

BLDC motor je řízen mikrokontrolérem prostřednictvím tří-fázového můstku tak, že pro každý jeho spínač se generuje sekvence PWM signálů na základě kombinace stavů výstupů z Hallových snímačů. Změnou střídy řídicích signálů pak lze pomocí mikrokontroléru měnit velikost proudu tekoucího vinutím motoru a tím i točivý moment motoru.

CAN rozhraní slouží pro posílání diagnostických zpráv a je možné jej využít pro dálkové ovládání servopohonu.

SPI sériové rozhraní je použito k nahrání programu do FLASH paměti.

Hodnoty napětí pro 0V - zavřeno a 10V - otevřeno jsou použity pro ovládání aktuátoru.



Obr. 5.1 Blokové schéma navrhovaného řešení

5.2 Mikrokontrolér

Celý systém je řízen mikrokontrolérem ATmega16M1. Jedná se o 8-bitový mikrokontrolér, který je převzat od firmy ATMEL. Vybrané parametry jsou následující [5]:

- vysoký výkon, nízká spotřeba
- RISC architektura
- 32 x 8 pracovních registrů
- až 1 MIPS/MHz propustnost
- 16 kB programovatelné FLASH paměti 10.000 zápisů
- 2-taktní násobička
- CAN 2.0A/B
- PWM modul
- variabilní PWM duty_cycle a frekvence
- až 11 single a 3 plně diferenciálních ADC převodníků
- sériová komunikace: SPI
- 4 analogové komparátory s variabilním prahem detekce
- provozní napětí 2,7 – 5,5 V

Tento mikroprocesor byl vybrán na základě jeho integrovaného řešení pro pokročilé řízení motorových aplikací. ATmega16M1 s AVR-8bit RISC architekturou integruje všechny základní periferie pro dosažení vysokého výkonu. Integruje například analogové bloky, 10-bit ADC s diferenciálními zesilovači a programovatelnou možností zesílení.

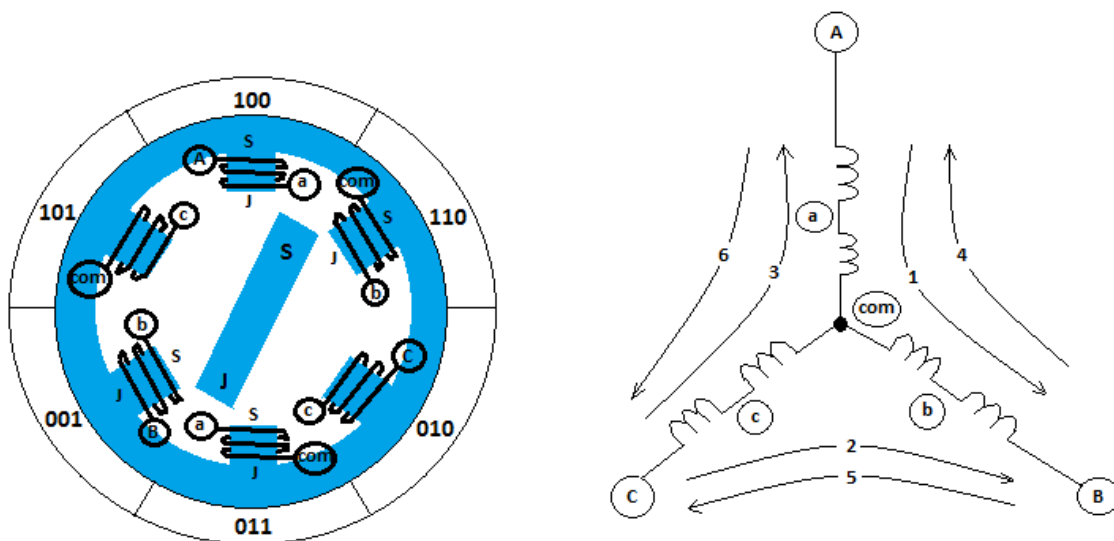
Analogové komparátory s volitelnou srovnávací úrovní a přerušení na pinu jsou použity pro detekci Hallových sond. K tomu dále poslouží srovnávací pozitivní nebo negativní vstupy bez další potřebné vnější komponenty.

Takt až 64 MHz, 12-bitový vysokorychlostní a přesné signály generující pulsy pro tři poloviční mosty motoru. Při maximální frekvenci 64 kHz je poskytováno rozlišení napětí asi 1/1000. Hardwarová detekce chyb je schopna motor zaparkovat do bezpečné polohy v případě poruchy.

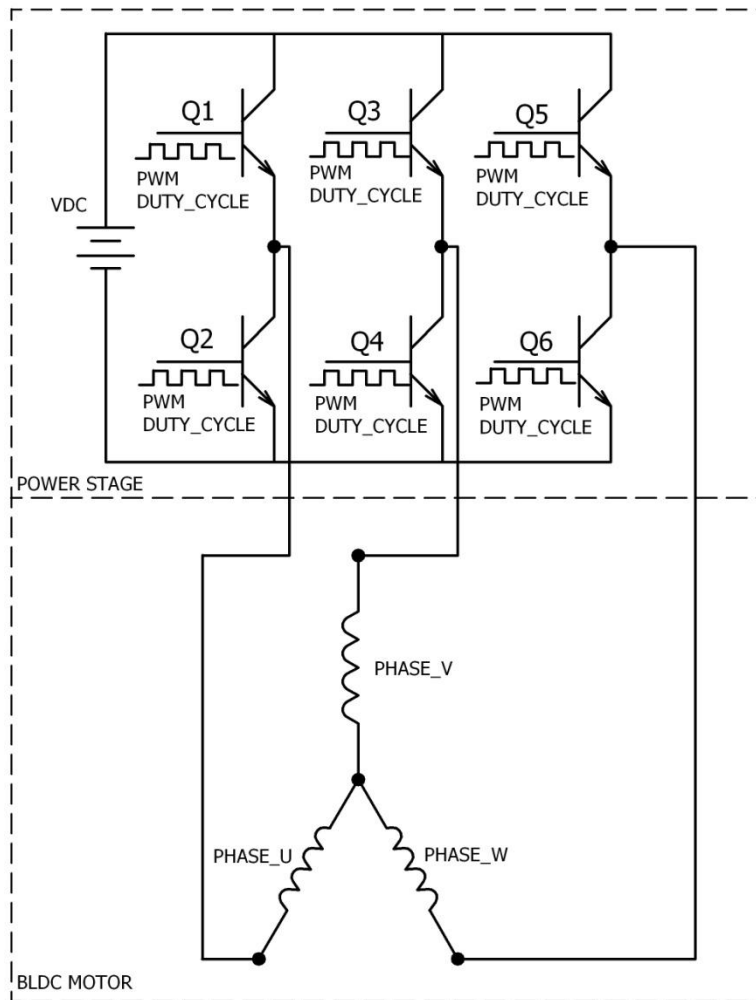
5.3 Třífázový můstek

Třífázový můstek se skládá z šestice spínacích prvků. Ke každé fázi vystupující z můstku jsou připojeny dva spínače. První umožňuje připojit fázi ke kladnému a druhý k zápornému pólu napájení. Účinným a nejrozšířenějším způsobem pro řízení elektromotorů všech typů je můstkové zapojení viz Obr. 5.3. Pro třífázový BLDC motor je ideální jeho třífázová varianta Obr. 5.3, která umožňuje řízení otáček v obou směrech a ztrátové i regenerativní brzdění.

U třífázového můstku výstup PWM modulu tvoří 6 výstupních pinů, které jsou seskupeny do dvojic tak, že každá dvojice přísluší jednomu generátoru střídy. Dvojici pinů lze nakonfigurovat buď způsobem, že budou poskytovat stejný průběh, nebo (v komplementárním módu) jako signály doplňkové. Mezi výstupní pin a generátory je zařazen ještě *Deadtime* generátor, který v případě potřeby (v komplementárním módu) vkládá při změně logické úrovně signálu mezi sestupnou a náběžnou hranu komplementárních signálů časovou prodlevu. Při aplikaci řízení můstku se tak dá zamezit sepnutí horního a dolního spínače ve stejný okamžik a tím ochránit spínací prvky.



Obr. 5.2 Třífázová varianta BLDC motoru

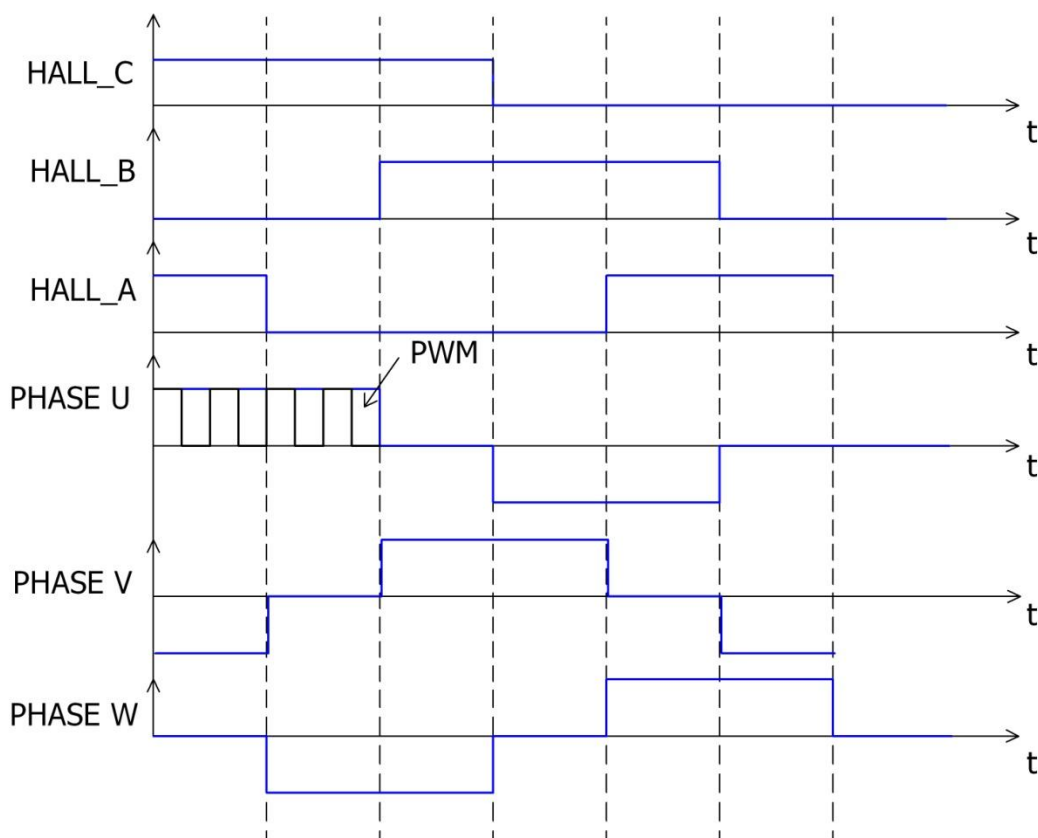


Obr. 5.3 Třífázový můstek se zapojením vinutí motoru

5.4 Určování polohy rotoru – Hallové snímače

Pro správné řízení můstku je důležitá znalost polohy rotoru vzhledem ke statoru, aby mohl být zajištěn přechod mezi jednotlivými kroky elektrického cyklu ve vhodný okamžik (viz Obr. 5.4).

Jak již bylo řečeno, snímání polohy rotoru se dělí na dvě základní skupiny. Jedná se tedy o metody sensorové a bez sensorové. Volba metody závisí na požadované přesnosti a také na ceně motoru. Do skupiny sensorových metod snímání polohy rotoru se řadí resolvery, optické inkrementální snímače a Hallové sondy. První dva jmenované snímače se vyznačují velmi dobrými rozlišovacími schopnostmi a vysokou cenou, díky čemuž nachází uplatnění jen u motorů určených pro přesné polohování. Snímače založené na Hallovu jevu jsou nejrozšířenějším způsobem snímání polohy rotoru BLDC motorů. Jsou citlivé na vnější magnetické pole (zde pole rotoru) a podle něj nastavují svůj výstup do vysoké nebo nízké úrovně. Všechny obvody potřebné pro jejich činnost (stabilizátor napětí, zesilovač, komparátor s hysterezí a budič) jsou umístěny do jednoho miniaturního pouzdra, což umožňuje jejich snadné použití. Navíc jsou velmi levné a jejich použití je jednoduché. Aby bylo rozpoznáno všech šest poloh komutace v rámci jednoho elektrického cyklu, musí být na stator umístěna vždy trojice Hallových snímačů.



Obr. 5.4 Řídící pulzy PWM modulu na základě Hallových snímačů

5.5 SUPERKAPACITOR

Mezi málo známé zdroje elektrické energie patří tzv. superkapacity. Jejich použití v praxi se ovšem čím dál více rozšiřuje. Používají se například u motorů automobilů na hybridní pohon, tramvají či elektrických lokomotiv, kde jejich úloha spočívá v tom, že při brzdění motoru vytvářejí elektrickou energii, která je okamžitě uložena do superkapacitoru a je použita ve vhodném okamžiku pro opětovný pohon vozidla. V našem případě bude superkapacitor zastávat funkci mikroakumulátoru, který bude zdrojem energie pro mikrokontrolér v době, kdy BLDC motor nebude v plně rekupertivním režimu. Zároveň bude i zdrojem energie pro brzdění motoru.

6 PRAKTICKÁ ČÁST

6.1 Odvození parametrů motoru z původního aktuátoru

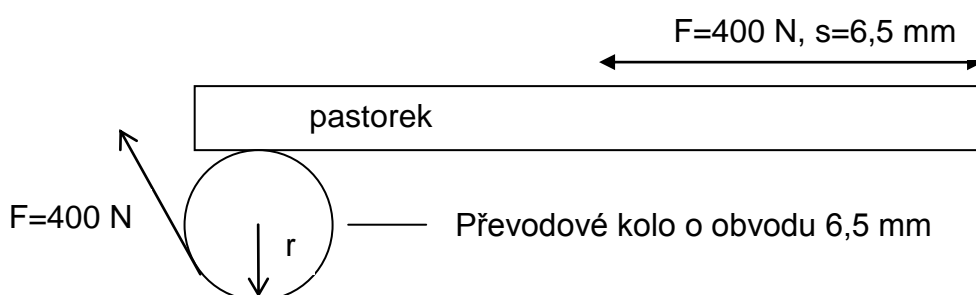
Celý servopohon má spotřebu při napájení 24 VAC 5 VA. V servopohonu je použit dvou-fázový synchronní motor. Doba přeběhu z výchozí pozice do koncové pozice je $t = 15$ s. Toto platí pro frekvenci napájecího napětí $f = 50$ Hz. Počet pólů motoru $p = 6$. Jmenovitý zdvih dříku je $s = 6,5$ mm a jmenovitá síla 400 N. Návrátový čas při nepřítomnosti napájecího napětí je zhruba 10 sekund.

Synchronní otáčky motoru lze vypočítat dle Rovnice 6.1.1.

$$n_s = \frac{f \times 60}{p} = \frac{50 \times 60}{6} = 500 [\text{ot./min}] \quad (6.1.1)$$

Pokud je čas $t = 15$ s potřebný pro přeběh dráhy $s = 6,5$ mm a je známo, že motor má $n_s = 500$ ot./min, lze dle Rovnice 6.1.2 spočítat, kolik otáček musí motor vykonat, aby urazil dráhu $s = 6,5$ mm.

$$n = \frac{t \times n_s}{60} = \frac{15 \times 500}{60} = 125 \text{ ot.} \quad (6.1.2)$$



Obr. 6.1 Zjednodušená představa dosedu pastorku a převodového kola

Převodové kolo musí vykonat 125 otáček, aby pastorek vykonal lineární pohyb 6,5 mm (viz Obr. 6.1). Podílem těchto hodnot lze stanovit obvod převodového kola (viz Rovnice 6.1.3). Z obvodu se vypočte poloměr r , ze kterého se vypočítá potřebný moment motoru. Tento moment je dán momentem na převodovém ozubeném kole. Je nutné připočíst ztráty v převodovce, které se uvažují 60% (viz Rovnice 6.1.4).

$$O = \frac{n}{s} = \frac{0,0065}{125} = 0,000052 [\text{mm}] \quad (6.1.3)$$

$$M = r \times F = \frac{O \times F}{2\pi \times \mu} = \frac{5,2 \times 10^{-5} \times 400}{2\pi \times 0.6} = 4,3 [\text{mNm}] \quad (6.1.4)$$

Výkon motoru P_2 na výstupu lze stanovit pomocí Rovnice 6.1.5[5]. Výkon motoru na vstupu P_1 je dán účinností převodovky, kterou uvažujeme 60%. Rovnicí 6.1.6[5] pro výpočet momentu lze ověřit výpočet v Rovnici 6.1.7[5].

$$P_1 = \frac{W}{t} = \frac{F \cdot s}{t} = \frac{400 \cdot 6,5 \cdot 10^{-3}}{15} = 0,221 [W] \quad (6.1.5)$$

$$\mu = \frac{P_2}{P_1} \rightarrow P_1 = \frac{P_2}{\mu} = \frac{0,221}{0,6} = 0,74 W \quad (6.1.6)$$

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{\frac{2 \cdot \pi \cdot f}{60}} = \frac{0,74}{\frac{2 \cdot \pi \cdot 500}{60}} = 7 [mNm] \quad (6.1.7)$$

Z důvodu zjednodušení elektroniky se použije motor s napájecím napětím U_n , které se určí dle následující Rovnice 6.1.8:

$$U_n = 5V \quad (6.1.8)$$

Zjednodušení se týká především buzení výkonového stupně a jmenovitého napětí superkapacitoru (2,5 V).

Na základě výše uvedených výpočtů byl vybrán motor od firmy MAXON s výrobním označením **EC20-FLAT-5W-351005**. [11]

Vybrané parametry motoru jsou shrnuty v následující Tab. 6.1:

Hodnoty při nominálním napětí	Hodnota	Jednotka
Nominal voltage	6	V
Otáčky bez zatížení	9350	ot./min.
Proud bez zatížení	102	mA
Otáčky nominální	5110	ot./min.
Nominální moment	7,01	mNm
Nominální proud (kontinuální)	1,22	A
Stall torque mNm	17,2	mNm
Startovací prod	2,93	A
Účinnost	67	%

Tab. 6.1 Parametry motoru EC20-FLAT-5W-351005

6.2 Odvození parametrů superkapacitoru

Energie nabitého kondenzátoru lze stanovit dle Rovnice (6.2.1):

$$W = \frac{1}{2} \times C \times U^2 \quad (6.2.1)$$

Výpočet energie potřebné k přeběhu dříku je následující:

$$W = F \times s = 400 \times 1,3 \times 6,5 \times 10^{-3} = 2,6[J] \quad (6.2.2)$$

Potřebná kapacita tedy je:

$$C = \frac{2 \times W}{U^2} = \frac{2 \times F \times s}{U^2} = \frac{2 \times 400 \times 6,5 \times 10^{-3}}{5^2} = 0,208[F] \quad (6.2.3)$$

Z výše uvedených výpočtů vyplývá, že potřebná kapacita pro přeběh dříku je 0,208 F. Na základě vypočtené síly byl vybrán superkapacitor SAMXON s výrobním označením **DRE-106-M-0E-F-05-RR**.

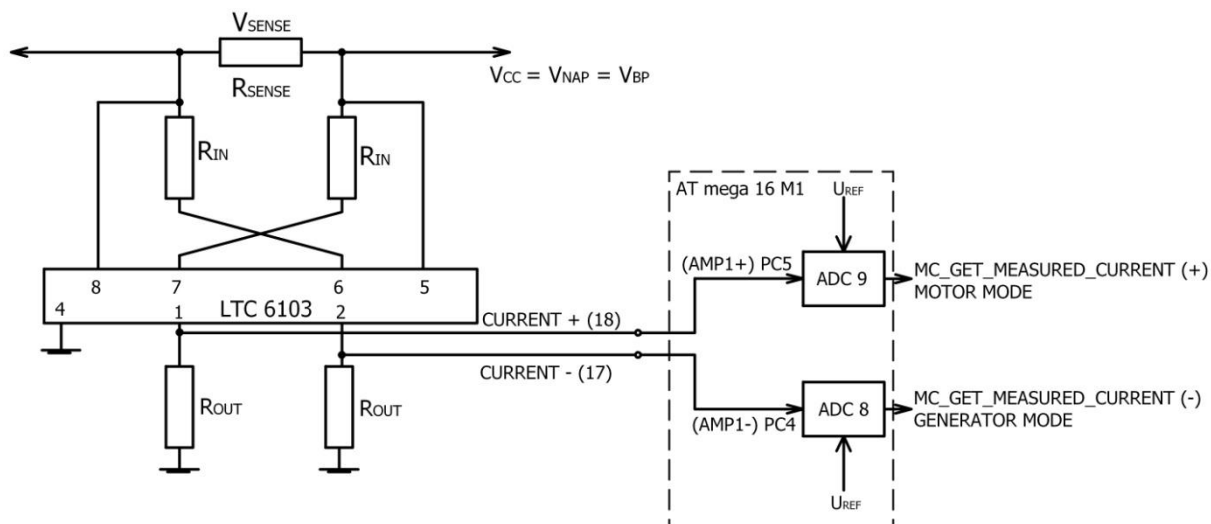
Vybrané parametry superkapacitoru jsou shrnuty v následující Tab. 6.2:

Série	Categorie	Pracovní teploty[°C]		Capacity[F]	Maximální provozní napětí [V]
		Min.	Max.		
DRE	High Energy, High power type, High temperature.	-25	70	22	2.5

Tab. 6.2 Parametry superkapacitoru DRE-106-M-0E-F-05-RR

6.3 Měření proudu motoru

Vzhledem k proudům nepřesahujících 2 A je vhodné využít snímání úbytku napětí na sériově vřazeném rezistoru V_{sense} . Jako proudový zesilovač se použije obvod LTC6103 v diferenciálním zapojení, což umožní sledovat proud tekoucí oběma směry. Proudový zesilovač LTC6103 je použit vzhledem k možnosti malého R_{sense} , čímž lze dosáhnout malého úbytku napětí a zároveň minimalizovat ztráty na tomto odporu. Zapojení měření proudů je na Obr. 6.2.



Obr. 6.2 Schéma zapojení měření proudů v obou směrech

Proud se měří do 2 A, aby byla zajištěna dostatečná rezerva při chybových stavech. Z důvodu možného poklesu napájecího napětí se použije interní referenční napětí procesoru $U_{REF} = 2,54V = V_{out}$ při 2 A pro ADC. Hodnota odporu R_{sense} se zvolí 10 m Ω , jelikož je to běžně dostupná a dostatečně nízká hodnota snímacího rezistoru (ztrátový výkon při 2 A je 40 mW). Úbytek napětí V_{sense} na R_{sense} je dán Rovnicí 6.3.1. Z katalogového listu výrobce LTC6103 [11] se pro výpočet výstupního napětí V_{out} použije Rovnice 6.3.2. Výrobce dle specifikace [odkaz na literaturu] doporučuje hodnotu výstupního odporu $R_{out} = 4,99$ k Ω . Je nutné ještě stanovit hodnotu vstupního odporu R_{in} (viz Rovnice 6.3.3), který lze vyjádřit dle Rovnice 6.3.2).

$$V_{sense} = R_{sense} * I = 0,01 * 2 = 0,02V \quad (6.3.1)$$

$$V_{out} = V_{sense} * \frac{R_{out}}{R_{in}} \quad (6.3.2)$$

$$R_{in} = \frac{R_{out} * V_{sense}}{V_{out}} = \frac{4999 * 0,02}{2,54} = 39\Omega \quad (6.3.3)$$

Výstup 1 z proudového zesilovače je následně připojen na pin 18(PC5) mikrokontroléru ATmega16M1. Tento vstup je vstupem pro ADC (AMP1+/ADC9), pomocí něhož se měří kladný směr proudu z napájení do motoru – motorický režim.

Hodnota 10-bitového převodu je uložena v 16-bitové proměnné (mc_get_measured_current). Tato proměnná je vstupem pro programovou smyčku, kde se vyhodnotí.

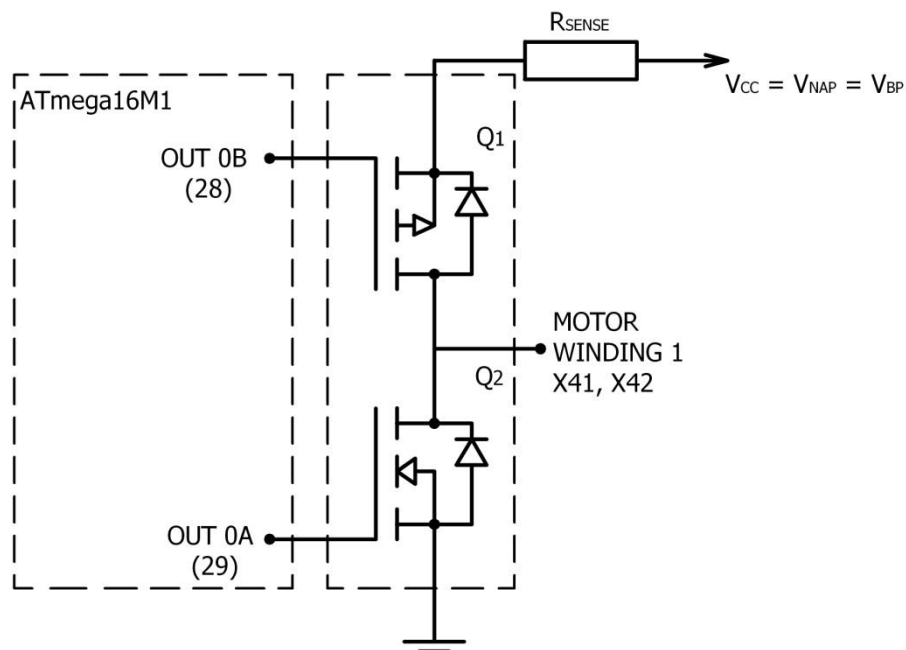
Výstup 2 na pinu 17(PC4) je analogický. (AMP1-/ADC8) měří záporný směr proudu tedy od motoru k napájení – generátorický režim.

6.4 Výkonový můstek

Jelikož je potřeba zabezpečit plnou kontrolu nad jednotlivými spínači v můstku, není vhodné použít integrovaného obvodu na řízení BLDC motoru. Tato nevhodnost je zapříčiněna obtížným hledáním takového obvodu, který tento způsob řízení umožňuje.

Malý výkon, který je v této aplikaci zapotřebí, vylučuje výhradní použití N-MOSFET tranzistorů (konstrukčně jednodušší a tedy mnohem dostupnější pro velké výkony). Pro horní spínač se tedy použije tranzistor typu P, a jelikož bylo zvoleno napájecí napětí celé aplikace na 5V, je možné bázi tranzistoru připojit přímo na pin procesoru.

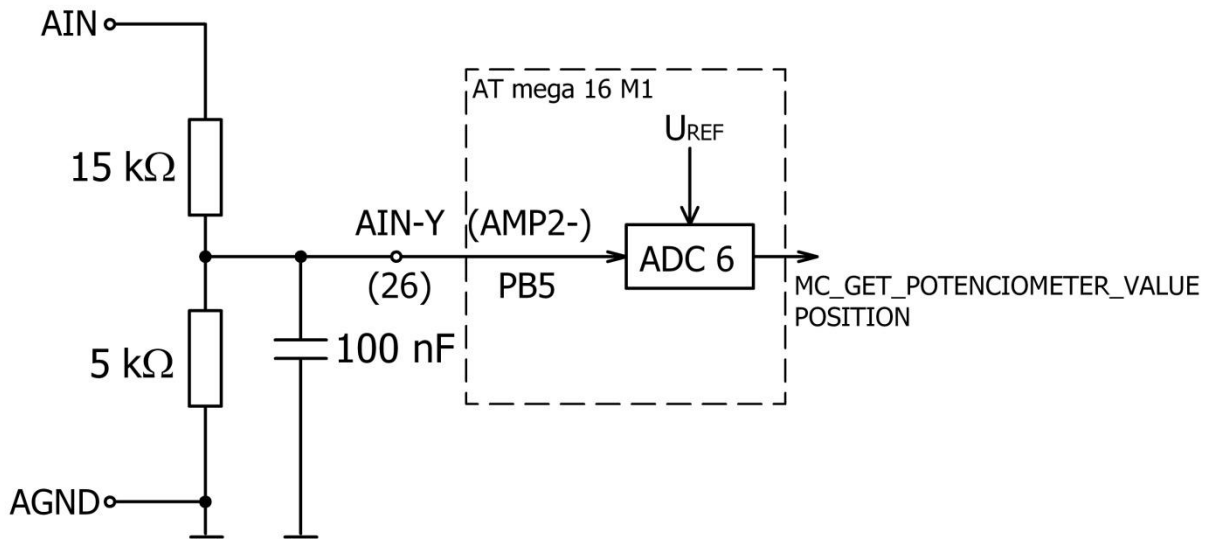
Oba tranzistory mají trvalý proud 6 A, špičkový až 11 A, což je dostačující. Navíc jsou zapouzdřeny v SOT-23, tudíž dojde k ušetření místa na DPS. Zapojení jednoho půl-můstku je vyobrazeno na Obr. 6.3 V tomto případě může půl-můstek spínat vinutí BLDC motoru (WINDING 1), buď k $+V_{CC}$ nebo $-V_{CC}$ (viz Kapitola 7.2 Elektronická komutace). Spínače Q1,Q2 jsou přímým vstupem pro programovou smyčku.



Obr. 6.3 Zapojení jednoho výkonového půl můstku

6.5 Analogový vstup 0 až 10V – Y signál

Pro komparaci je použito vnitřní napěťové reference 2,54 V. Při maximálním napětí $U=10\text{ V}$ na vstupu je nutné rozdělit napětí v poměru 1/4 ($10\text{ V} / 4 = 2,5\text{V}$). Schéma zapojení vstupního Y signálu je na Obr. 6.4



Obr. 6.4 Zapojení vstupního Y signálu

Vstupní impedance se u různých výrobců PLC a mikrokontrolérů obvodů liší, ale pohybuje v rozmezí $R = (10\text{ k}\Omega \dots 100\text{ k}\Omega)$. Pro potřeby naší aplikace se vezme v úvahu vstupní impedance 20 kΩ. Dle poměru 1/4 jsou stanoveny hodnoty rezistorů na $R_1=15\text{ k}\Omega$ a $R_2=5\text{ k}\Omega$. Hodnoty rezistorů jsou vybírány s ohledem na běžnou dostupnost rezistorů. Hodnota $R_2 = 5\text{ k}\Omega$ je nahrazena hodnotou $R_2 = 4,99\text{ k}\Omega$, která je běžně dostupná. Oba rezistory jsou použity s tolerancí 1%. Je nutné do obvodu zařadit ještě filtrační kondenzátor $C_F = 22\text{ nF}$, který zajistí imunitu vůči rušení. Kalibrace odchylek se provede v programové smyčce. Výstupem tohoto napěťového děliče je vstup AIN-Y na pin 26(PB5) mikrokontroléru ATmega16M. Tento vstup je vstupem ADC (AMP2-/ADC6). Hodnota 8-bitového převodu je uložena v 8-bitové proměnné (get_potenciometer_value), která je vyhodnocována v programové smyčce.

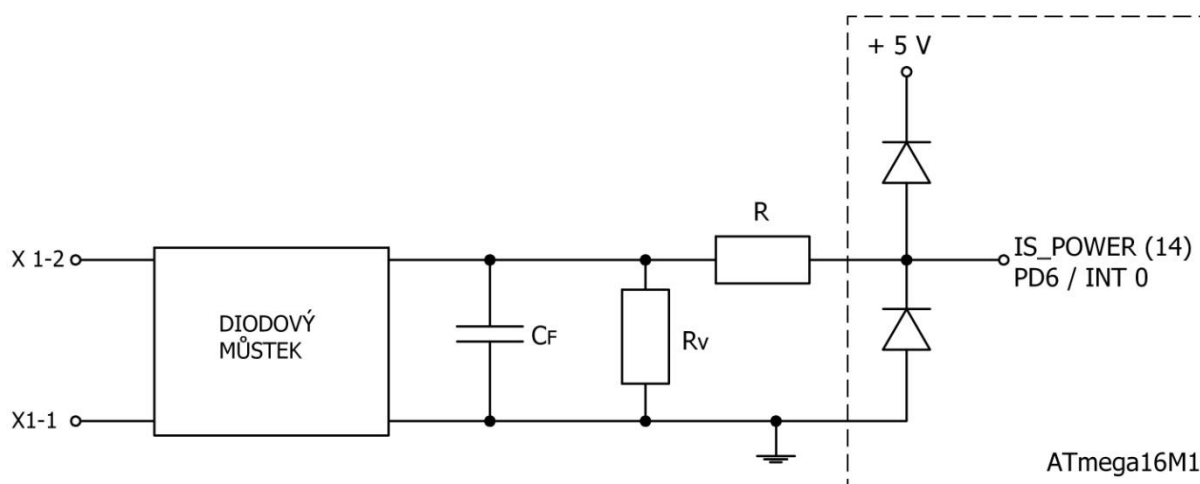
6.6 Detekce přítomnosti napájení IS_POWER

Maximální amplituda napájecího napětí nesmí překročit $U_{nmax} = 35 \text{ V}$, což je maximální napětí vstupního filtračního kondenzátoru C_1 viz Obr. 6.7. Minimální amplituda napětí by pak neměla podkročit hodnotu napětí $U_{nmin} = 8 \text{ V}$. Tato hodnota je ve specifikaci obvodu LM2596 [13] jako minimální hodnota napětí pro správnou funkci obvodu.

Ve specifikaci vzniklého prototypu je stanovena hodnota napájecího napětí $U_n = 12\text{-}24 \text{ V DC/AC}$. Takže výše uvedené stavy nenastanou.

Diodový můstek zajistí případné usměrnění v přítomnosti napájecího napětí DC/AC. Čím je napájecí napětí vyšší, tím větší je napěťový úbytek na odporu $R=47\text{k}\Omega$. Proud poteče přes odpor R a vnitřní diodu mikrokontroléru na +5 V pinu procesoru. Kolísání napětí pod rozhodovací hranici v případě napájení AC je vyřešeno pomocí kondenzátoru $C_F=100\text{nF}$ které se přes odpor $R_V = 100\text{k}\Omega$ vybíjí. Tím je zajištěna rozhodovací úroveň 5 V log „1“ na vstupu pinu 14(PD6/INT0).

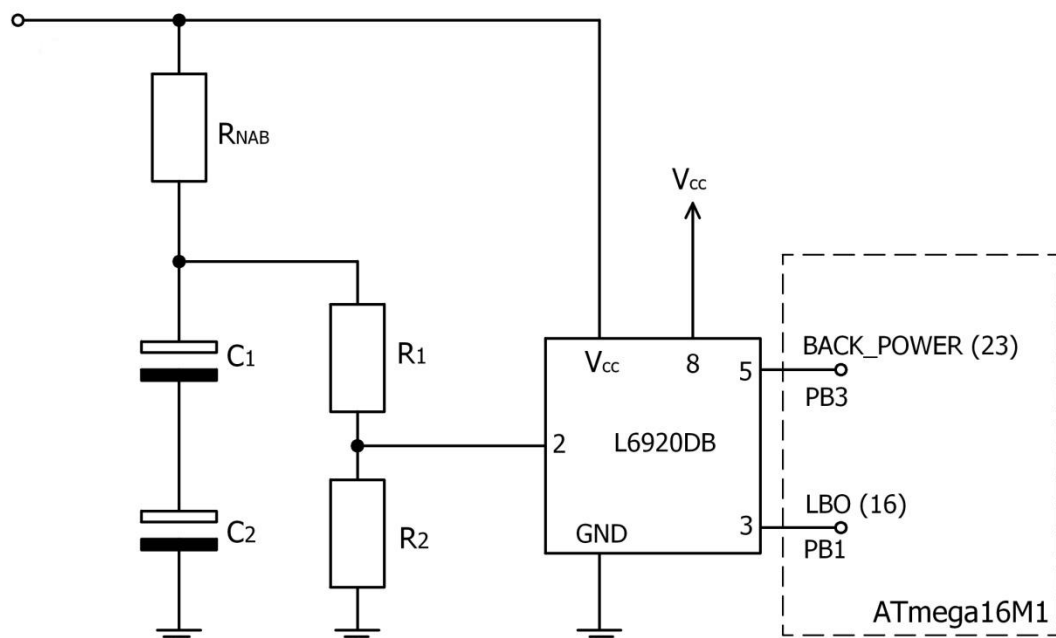
V nepřítomnosti napájecího napětí je C_F vybíjen přes odpor R_2 až do rozhodovací úrovně log „0“. Schéma zapojení je zobrazeno na Obr. 6.5



Obr. 6.5 Schéma zapojení detekce přítomnosti napájení

6.7 Zdroj alternativní energie BACK_POWER

Vypočtené superkapacitory $C_1 = 22\text{F}$ a $C_2 = 22\text{F}$ jsou zapojeny do série vzhledem k jejich hodnotě jmenovitého napětí 2,5 V a jsou nabíjeny přes odpor $R_{nab.}=5,2\Omega$ V nabitém stavu tvoří zásobník energie pro beznapěťový stav, kdy je nutné servopohon navrátit do výchozí pozice. Pokud je přítomno napájecí napětí, je zdrojem energie stabilizátor LM2596. V případě detekce ztráty napájecího napětí (IS_POWER) je aktivován DC-DC měnič L6920DB[12], který pomocí odporů $R_1 = R_2 = 100\text{k}\Omega$ nastaví na zdroj konstantního napětí hodnotu $U=5\text{ V}$ ($I_{\max} = 350\text{ mA}$). Pokud by byl odběr větší než 350 mA, přechází DC-DC měnič do režimu konstantního proudu na hodnotu 350 mA. Pokud již zásoba energie v superkapacitorech neumožní tento stav zajistit, dojde k vypnutí DC-DC měniče. Schématické zapojení je na Obr. 6.6 Schéma zapojení alternativního zdroje energie Obr. 6.6



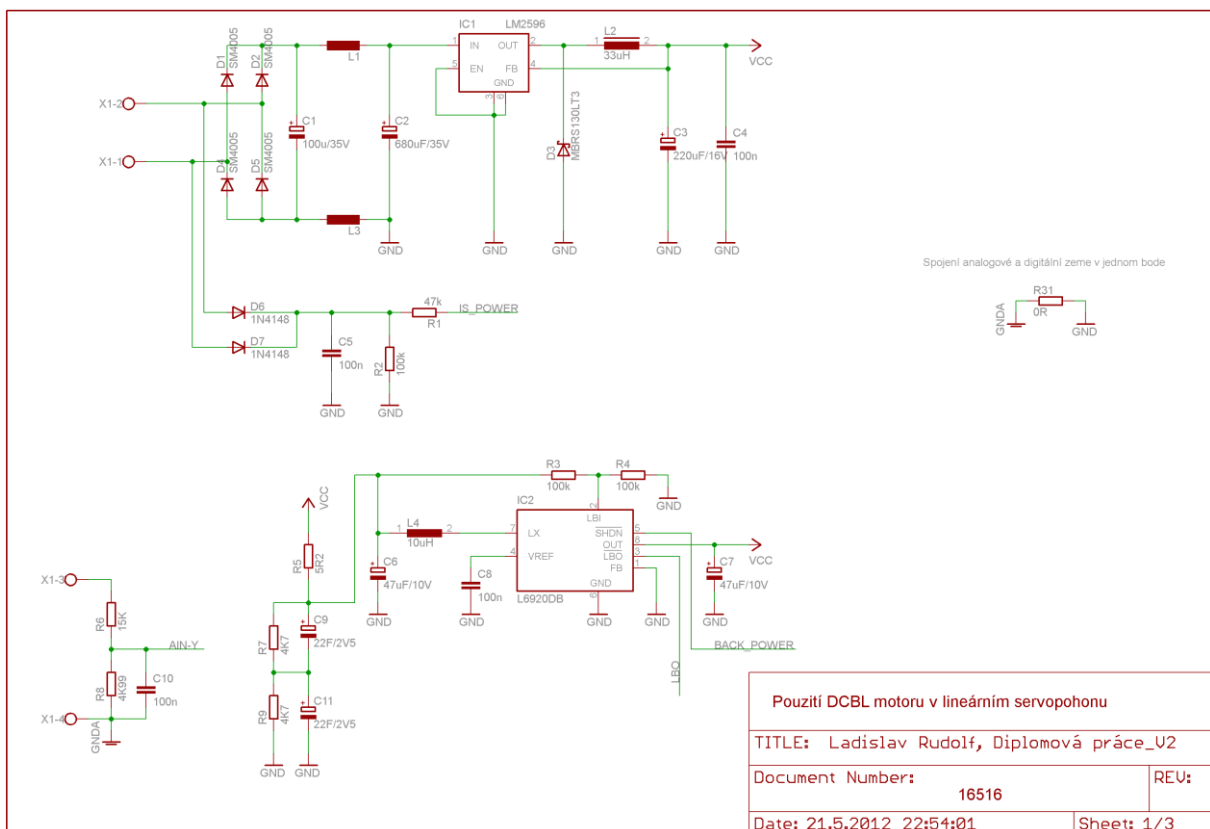
Obr. 6.6 Schéma zapojení alternativního zdroje energie

6.8 Schéma zapojení

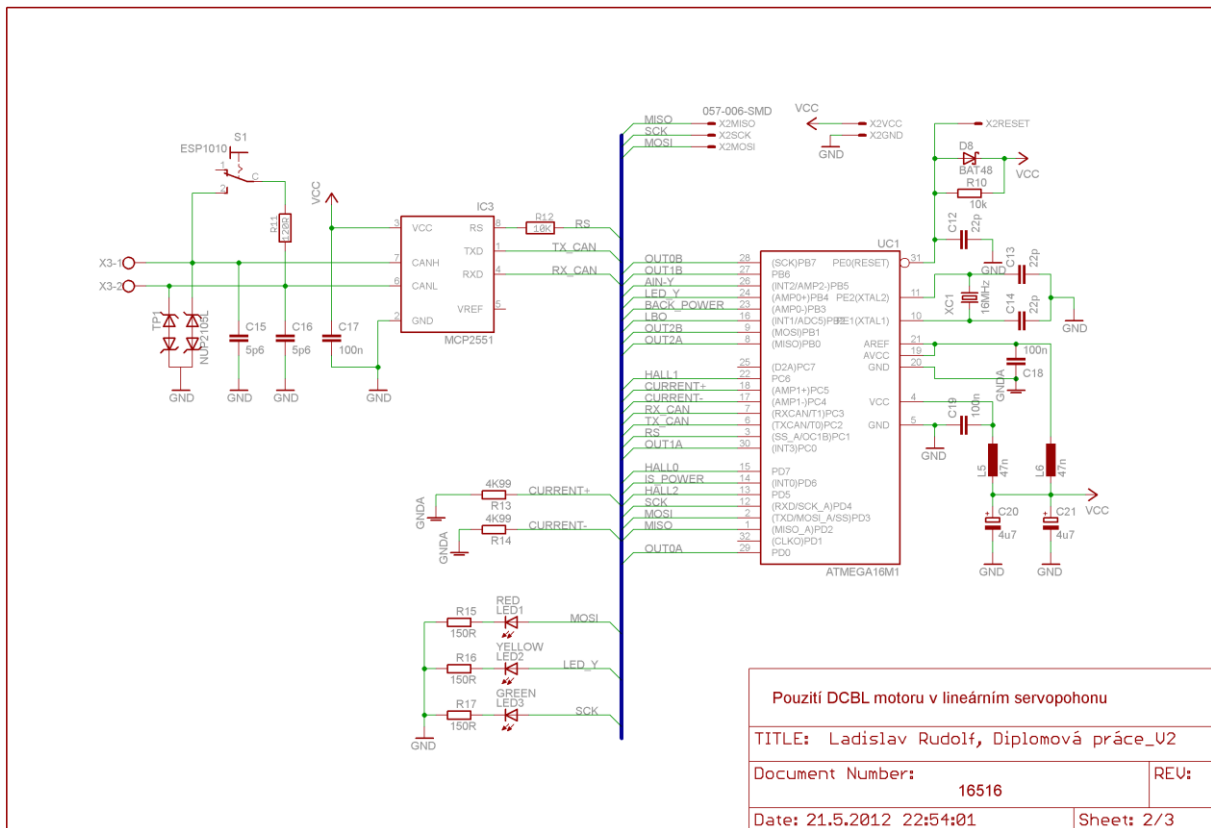
Jednotlivé funkční celky k sobě logicky propojené daly možnost vzniku celkovému schématu zapojení. V předešlých kapitolách byly odvozeny velikosti a zapojení jednotlivých součástek. Aby bylo zapojení kompletní, bylo nutné přidat napájecí a periferní obvody, které byly převzaty od doporučení výrobce (napájení ATmega16M1 apod.). Přidáním těchto celků, kterými jsou:

- vstupní můstek, filtrace, stabilizace pomocí LM2596 a filtry pro elektromagnetické rušení L1 a L3,
- napájení mikrokontroléru a zapojení jeho oscilátoru,
- pomocné led diody k případné signalizaci,
- CAN rozhraní,

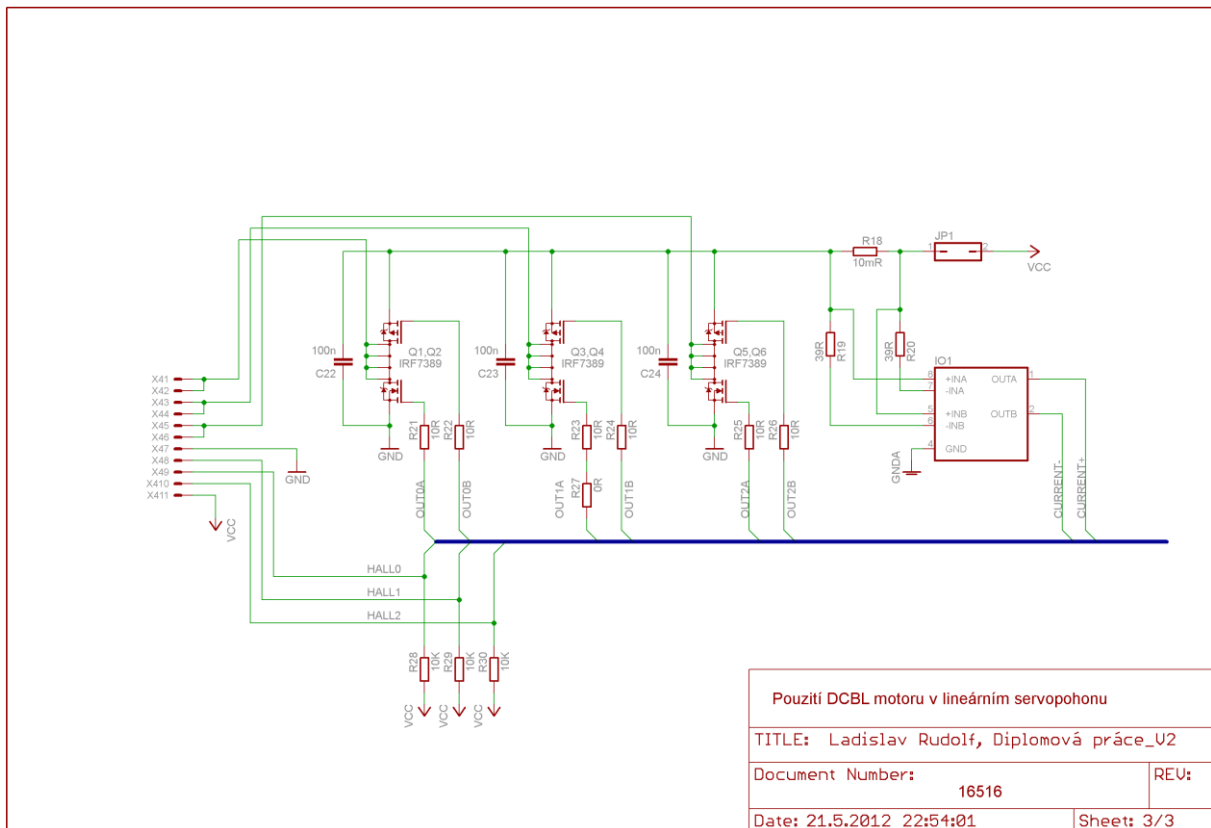
bylo doplněno výsledné schéma. Schéma na Obr. 6.7 ukazuje zapojení vstupního napájecího napětí, stabilizaci, filtraci. Dále pak zapojení vstupního signálu Y, zapojení superkapacitorů a DC-DC měniče jako záložního zdroje napájení.



Obr. 6.7 Schéma zapojení 1/3



Obr. 6.8 Schéma zapojení 2/3



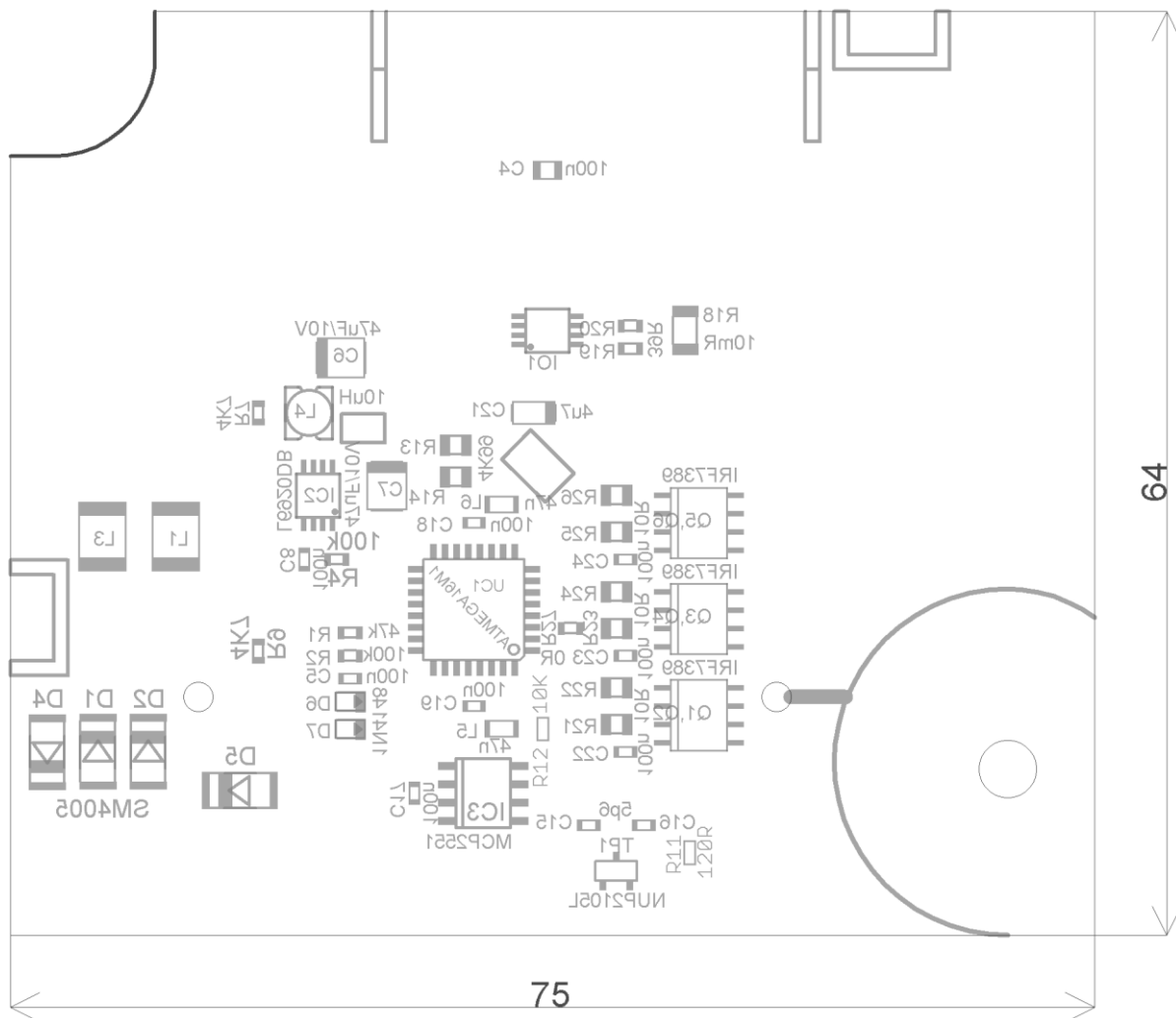
Obr. 6.9 Schéma zapojení 3/3

Na Obr. 6.8 je zobrazeno schéma zapojení mikrokontroléru ATmega16M1, jeho napájení a oscilátor. Dále pak rozhraní CAN a diagnostické LED.

Obr. 6.9 ukazuje zapojení výkonového můstku, měření proudů a zapojení konektorového rozhraní pro BLDC.

6.9 Deska plošných spojů

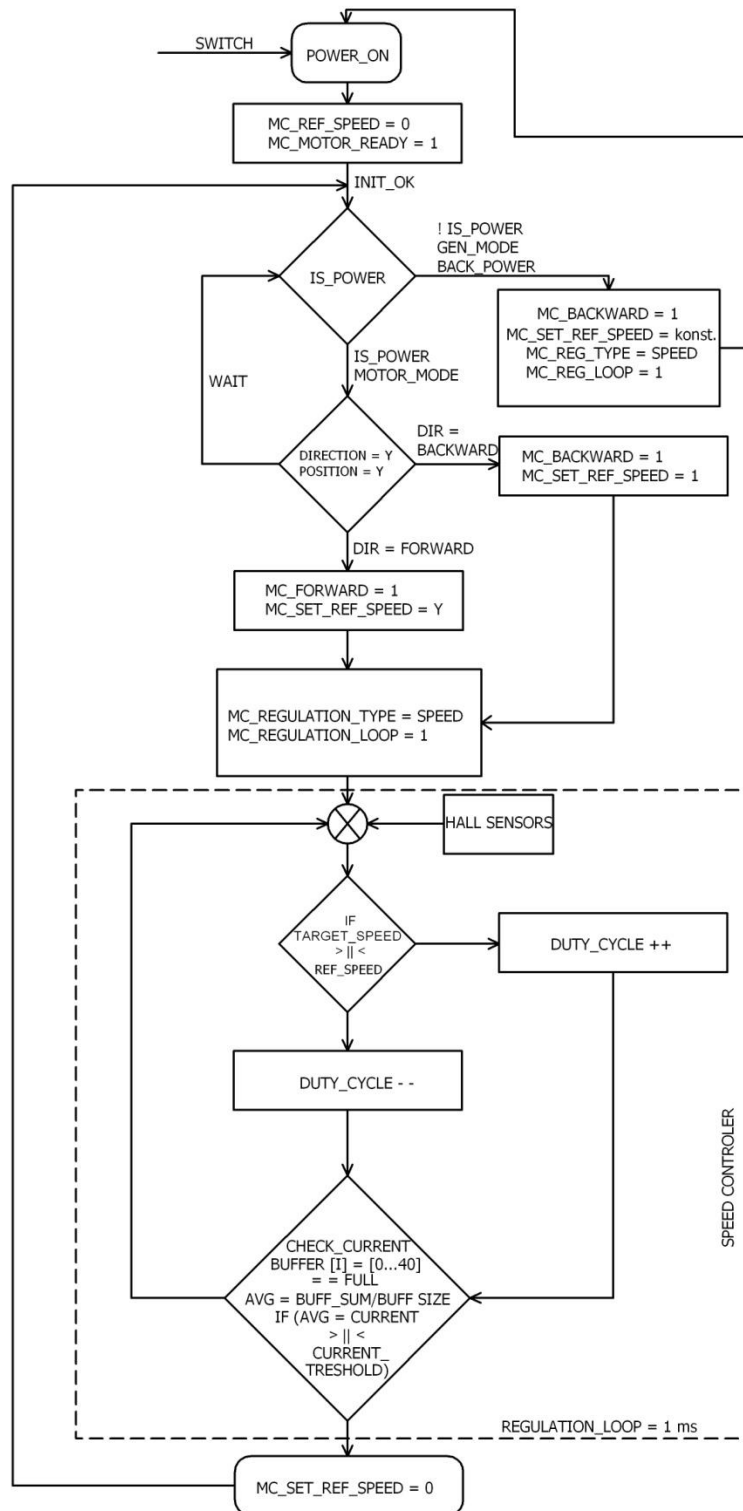
K schématu zapojení byla vytvořena deska plošných spojů. Na tu byly kladeny základní dva požadavky. Výroba by měla korespondovat se současným trendem a bylo nutné ji vyrobit do rozměrů, které odpovídají vnitřním rozměrům aktuátoru pro umístění řídicí elektroniky. Deska plošných spojů (viz Obr. 6.10) byla vyrobena na zakázku. Pro ukázkou je vložena jen část DPS, kompletní uspořádání DPS je k dispozici v příloze na CD.



Obr. 6.10 Deska plošných spojů rozložení součástek

7 PROGRAMOVÁ SMYČKA

7.1 Stavový diagram

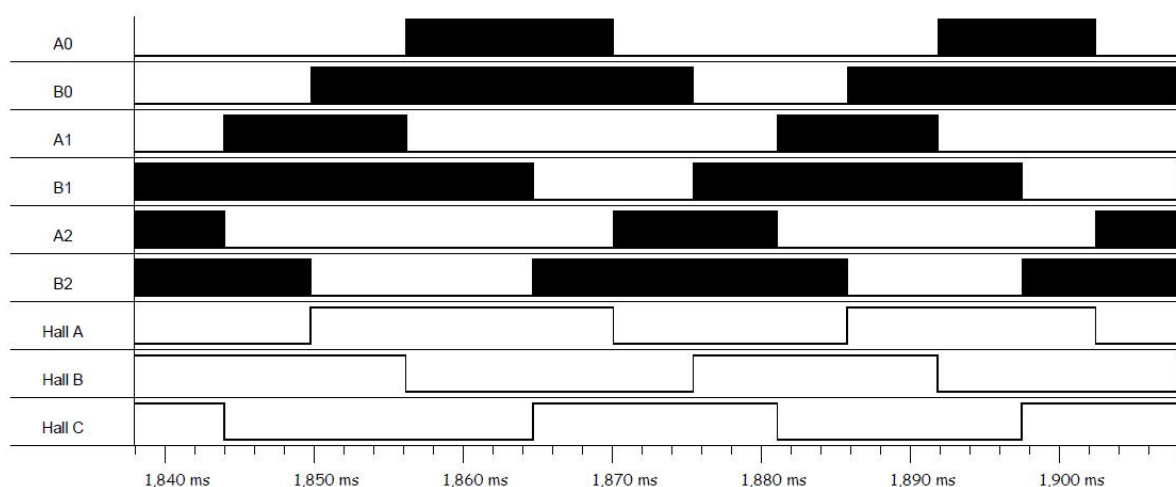


Obr. 7.1 Vývojový diagram programové smyčky

7.2 Elektronická komutace

Pro odhad polohy rotoru je motor vybaven třemi halovými snímači. Tyto Hallovy snímače jsou umístěny vždy po 120°. S těmito snímači je možné dosáhnout šesti různých stavů komutace. Sepnutí patřičných fází záleží právě na hodnotách Hallových snímačů.

Při detekci změny Hallových snímačů je volána funkce `mc_switch_commutation`, jejíž parametrem jsou stavy Hallových snímačů. Následně dochází k přepnutí správných fází. Se správnou synchronizací zůstává velikost točivého momentu téměř konstantní. Na Obr. 7.2 je průběh jednotlivých fází na stavu Hallových snímačů. Spínací Tab. 7.1 popisuje šesti stavovou komutaci v obou směrech.



Obr. 7.2 Průběh jednotlivých fází v závislosti na Hallových sondách

Direction	Commutation	Hall sensors			SWITCH						PHASE
		A	B	C	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	
Forward	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	U-V
	2	0	0	1	1	0	0	0	0	1	U-W
	3	0	1	1	0	0	1	0	0	1	V-W
	4	0	1	0	0	1	1	0	0	0	V-U
	5	1	1	0	0	1	0	0	1	0	W-U
	6	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0
Backward	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	V-U
	2	0	0	1	0	1	0	0	1	0	W-U
	3	0	1	1	0	0	0	1	1	0	W-V
	4	0	1	0	1	0	0	1	0	0	U-V
	5	1	1	0	1	0	0	0	0	1	U-W
	6	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1

Tab. 7.1 Šestistavová komutace v obou směrech

7.3 Rychlostní P regulátor

Programová smyčka obsahuje rychlostní P regulátor (`mc_control_speed`). Obecný PID regulátor (viz Obr. 7.3) se skládá ze tří hlavních částí proporcionální, integrační a derivační. Vzhledem k tomu, že se v praxi PID regulátor moc nepoužívá pro řízení motorů resp. rychlých dějů, dojde k omezení pouze na jeho P složku. P regulátor je vlastně prostý zesilovač, kde akční veličina je dána násobkem regulační odchylky K_P a určuje tak odezvu motoru právě na tuto odchylku (viz Rovnice 7.3.2). Prakticky se ukázalo, že rychlost regulace $t = 1$ ms je dostatečně rychlá. Systém bude stabilní i přesto, že P regulátor neodstraní regulační odchylku, což ovšem v malé míře nevádí. Pro tuto aplikaci je tedy P regulátor vyhovující.

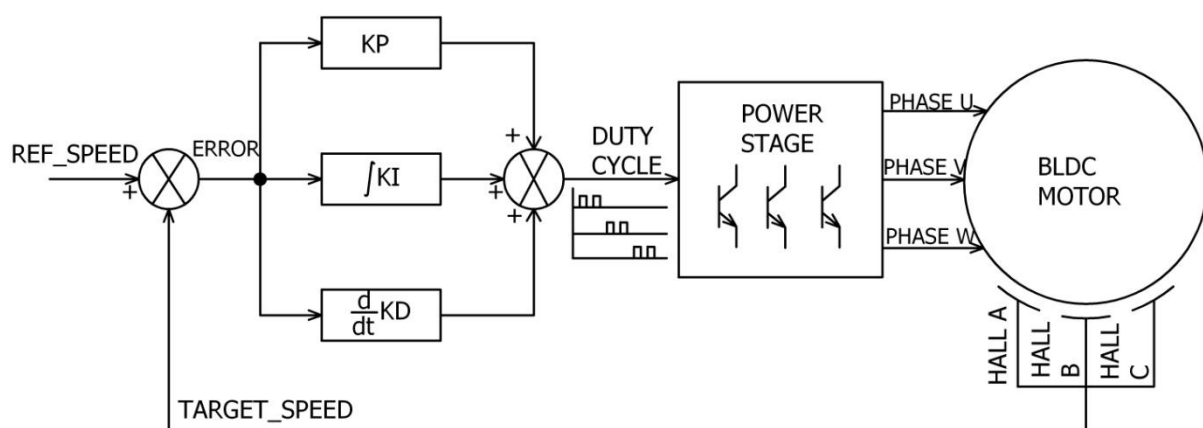
Prvním krokem regulace rychlosti je výpočet regulační odchylky dle Rovnice 7.3.1, která je dána rozdílem požadované hodnoty (`mci_get_ref_speed`) a hodnoty skutečné (`mci_get_measured_speed`) pro $t = 1$ ms (viz Kapitola 7.6 Měření rychlosti).

$$error_t = mci_get_ref_speed(t) - mci_get_measured_speed(t) \quad (7.3.1)$$

$$duty_cycle[-255..+255] = Kp * error_t \quad (7.3.2)$$

Tento výpočet je přímým zadáním pro PWM (pulzní šířková modulace). Zadání je omezeno v hodnotách -255 až 255, vlivem čehož je možné použít 8-bitovou proměnnou a zajistit tak maximální rychlost výpočtu a v budoucnu si ušetřit výpočetní výkon pro náročná přerušení například od Hallových sond.

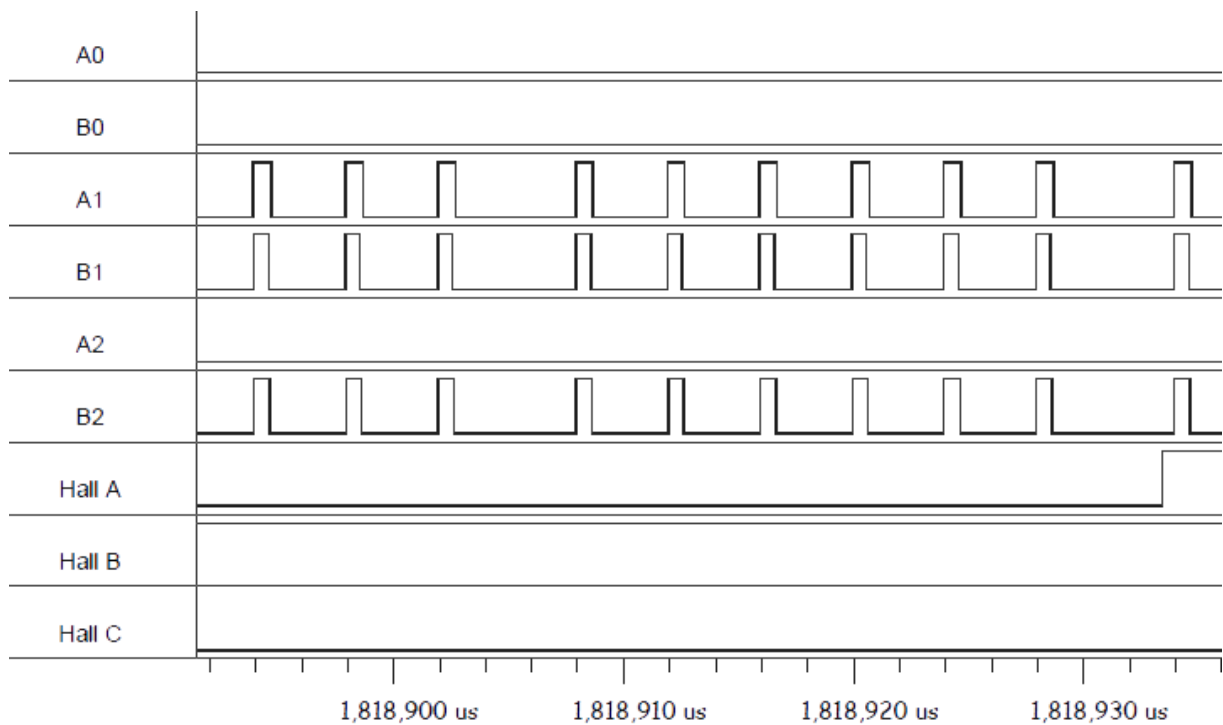
Duty_cycle (střída) je schopna v praxi regulovat velikost přiloženého napětí na jednotlivé větve BLDC motoru. Toto napětí je pak přímo úměrné protékajícímu proudu, který vytvoří potřebný moment a který je nutné regulovat. Tato závislost byla diskutována v teoretické části.



Obr. 7.3 Blokové schéma PID regulátoru

7.4 PWM modulace - duty cycle - střída

Jak již bylo zmíněno, výsledkem PID regulátoru je příkaz pro výkonový můstek v podobě PWM. Vlivem této modulace je možné regulovat přenášený výkon. Pomocí střídy PWM signálu se rozhodne o tom, v jakém poměru bude přiloženo stejnosměrné napětí na svorky příslušného vinutí. Střída je počítána jako poměr logické úrovně „1“ sepnutého tranzistoru a logické nuly „0“ vypnutého tranzistoru ku periodě signálu. Příklad průběhu PWM a jeho střídy modulovaného signálu je na Obr. 7.4. Z průběhu A1 je zřejmé, že doba trvání log „1“ je 1 μ s a doba trvání log „0“ jsou 3 μ s. Poté střída se spočítá dle Rovnice 7.4.1



Obr. 7.4 Průběh PWM signálu v sepnuté větvi

Konkrétní výpočet pro variantu jedné periody v průběhu A1 je následující:

$$\text{Perioda } T = 4\mu\text{s}$$

$$\text{Doba trvání log "1" } L1 = 1\mu\text{s}$$

$$\text{Doba trvání log "0" } L0 = 3\mu\text{s}$$

$$\text{střída} = \frac{L1}{T} = \frac{1}{4} = 0,25 * 100 = 25\% \quad (7.4.1)$$

Detailní střída PWM (viz Obr. 7.4) je při provozu nezatíženého BLDC motoru, proto je střída nízká cca 25%.

7.5 Měření proudu

Měření proudu probíhá v hlavní programové smyčce s periodou 1 ms. Po vyvolání funkce `check_current()` dojde k zajištění velikosti zásobníku (power buffer). Poté se do zásobníku vkládají hodnoty měřeného proudu (`mc_get_measurement_current`). Pokud je zásobník plný, provede se výpočet aritmetického průměru dle Rovnice 7.5.1.

$$avg = \frac{\overset{size\ of\ buffer}{0} mc_get_measured_current}{size\ of\ power\ buffer} \quad (7.5.1)$$

Tento průměr je poté předán k porovnání. Pokud je aktuální hodnota větší, než-li je hodnota spočítaného průměru, pak je vyhodnocen maximální proud který je úměrný maximálnímu momentu a ten je úměrný maximální výstupní síle. Hodnota proudového průměru neodpovídá skutečné hodnotě, která by mohla být měřena například ampérmetrem. Je přepočítána konstantou tak, aby mohla být obsloužena 8-bitovou proměnnou a zároveň její přepočítaná hodnota odpovídala reálným hodnotám 0 až 2 A. Hodnota proudu 1,22 A představuje kontinuální proud protékající motorem, který je doporučován výrobcem.

7.6 Měření rychlosti

Je důležité zmínit, že přepočet rychlosti je bezrozměrná veličina a její hodnota není v jednotkách [ot./min] nebo [ot./min]. Tento přepočet je možný, ale vzhledem k použití 8-bitového kontroléru a 8-bitových proměnných není efektivní. Pokud je potřeba znát reálné otáčky, je nutné systém měření rychlosti kalibrovat. Vzhledem k tomu, že hodnota rychlosti je vlastně hodnotou, která je žádoucí a zároveň je použit rychlostní regulátor, tak informace o skutečné rychlosti je vstupem pro P regulátor. Rychlost je tedy zvolena tak, aby byla dodržena rychlost přejezdu aktuátoru.

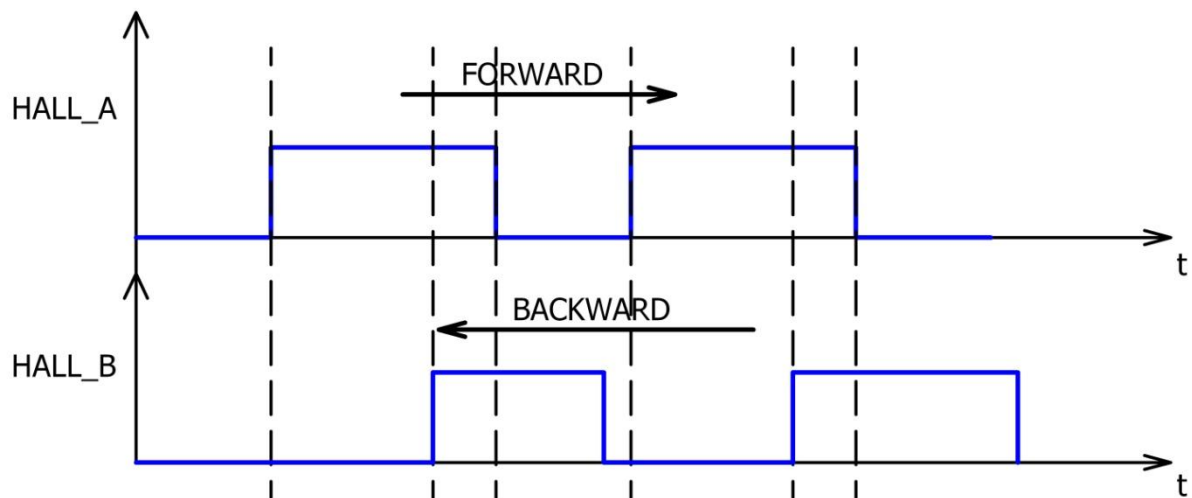
Měření rychlosti se provádí každým přerušením, které vyvolá snímač HALL_A na sestupné hraně. Dále necháváme samovolně běžet časovač T0, který spouštíme při INITu mikrokontroléru. Ten zajistí dodržení časové konstanty, která se pak použije pro výpočet rychlosti (viz Rovnice 7.6.1). Konstantní parametr K_{SPEED} je spočítán dle Rovnice 7.6.2, kde n je počet pólů dvojic motoru, rpm_{max} jsou maximální otáčky motoru a $16 \cdot 10^{-6}$ je perioda taktu časovače.

$$new_measured_speed = K_SPEED / timer_value \quad (7.6.1)$$

$$K_{SPEED} = \frac{60 \times 255}{n \times 16 \times 10^{-6} \times rpm_{max}} = \frac{60 \times 255}{4 \times 16 \times 10^{-6} \times 9350} = 102000 [-] \quad (7.6.2)$$

7.7 Měření polohy

Je realizováno pomocí Hallových sensorů. Jelikož je nutné měřit polohu oběma směry, postačí dvě Hallové sondy. Průběhy Hallových sensorů byly exaktně změřeny pomocí analyzátoru rychlých dějů a jejich průběhy byly znázorněny v kapitole 7.2 na Obr. 7.2. Překreslení průběhů na vstupech HALL0(HALL_A) pin 15 (PD7) a HALL1(HALL_B) pin 22(PC6) je zobrazeno na Obr. 7.5.



Obr. 7.5 Průběh HALL_A a HALL_B

Ze znalosti průběhů vyplývá následující pseudokód, který je prováděn při každém přerušení od Hallového sensoru (HALL_A):

```
If (HALL_A rising edge ) and (HALL_B) rotation - -  
    else rotation ++  
if(!HALL_A rising edge) and (HALL_B) rotation ++  
    else rotation - -
```

Pomocí tohoto pseudokódu lze přesně určit polohu resp. počet otáček, který servopohon vykonal. V budoucím použití tohoto prototypu se budou otáčky používat v souvislosti se vstupem Y, který bude přímým zadáním polohy.

7.8 Bezpečnostní funkce

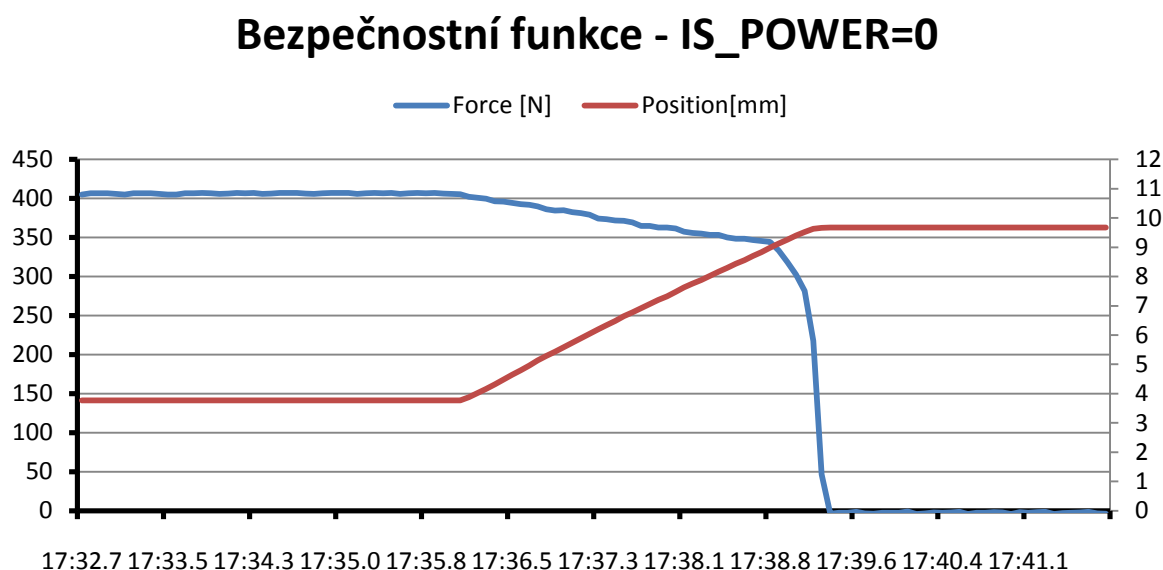
Prototyp servopohonu obsahuje bezpečnostní funkci. Ta spočívá v zavření ventilu v době, kdy servopohon není napájen síťovým napětím. V praxi je žádoucí, aby při tomto stavu byl ventil v plně zavřené poloze.

Na samém začátku programové smyčky algoritmus kontroluje stav napájecího napětí (IS_POWER). Pokud ten je přítomen, smyčka pokračuje dále v pracovním režimu. Pokud není signál o přítomnosti napájecího napětí přítomný, je aktivována bezpečnostní funkce servopohonu. Programová smyčka vykoná tři příkazy.

Nejprve si mikrokontrolér aktivuje zdroj záložní energie (BACK_POWER), který mu na úkor vyššího proudu zaručí konstantní napětí. Což je z důvodu toho, že pokud by kolísala úroveň napájecího napětí, nebylo by možno zaručit hodnoty logických úrovní. Zdrojem energie zde představují superkapacitory.

Dalším krokem k vykonání bezpečnostní funkce je nastavení směru k uzavření servopohonu (mci_forward).

Nastavení referenční rychlosti odpovídá rychlosti dřívku 1,6 mm/s. Tato rychlost je ideální pro plynulé zavření aktuátoru. Zásoba energie v superkapacitorech je dostačující a zároveň je plné uzavření provedeno v době 4 s. Poté je držen proud motorem na konstantní hodnotě 0,22 A až do vybití superkapacitorů. Dále dochází k odstavení mikrokontroléru z důvodu ztráty napájení. Po provedení INITu v následném přiložení napájecího napětí probíhá programová smyčka od samého začátku. Graf 7.1 představuje průběh bezpečnostní funkce.



Graf 7.1 Průběh síly a pozice aktuátoru při bezpečnostní funkci

8 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT

8.1 Tester

Měření probíhalo v laboratorním prostředí pomocí senzoru polohy a síly. Schéma zapojení je zobrazeno na Obr. 8.1. Prototyp servopohonu byl spojen se senzorem polohy a síly. Protisíla byla vytvořena testovacím ventilem, který obsahuje pružinovou zátěž. Dle stlačení pružiny byla vytvořena potřebná síla působící proti dřívku prototypu servopohonu.

Napájení bylo realizováno stejnosměrným napětím o hodnotě $U=20$ V. Vstupní Y-signal pomocí potenciometru nabýval hodnot 0 až 10 V stejnosměrného napětí. Význam hodnot Y-signálu je následující (8.1.1) a (8.1.2).

$$Y = 0V \sim \text{poloha dřívku } 0 \text{ mm} \quad (8.1.1)$$

$$Y = 10V \sim \text{poloha dřívku } 6 \text{ mm} \quad (8.1.2)$$

Senzor polohy a síly byl připojen přes ADC na vstup RS-232 počítače označeného jako PC_2. Na tomto PC_2 byl spuštěn program LabVIEW, který vyhodnocoval následující údaje o síle F (viz Rovnice 8.1.3) a poloze (viz Rovnice 8.1.4).

$$F - \text{Síla} - \text{Force } N \quad (8.1.3)$$

$$\text{Position} - \text{Pozice} - \text{poloha [mm]} \quad (8.1.4)$$

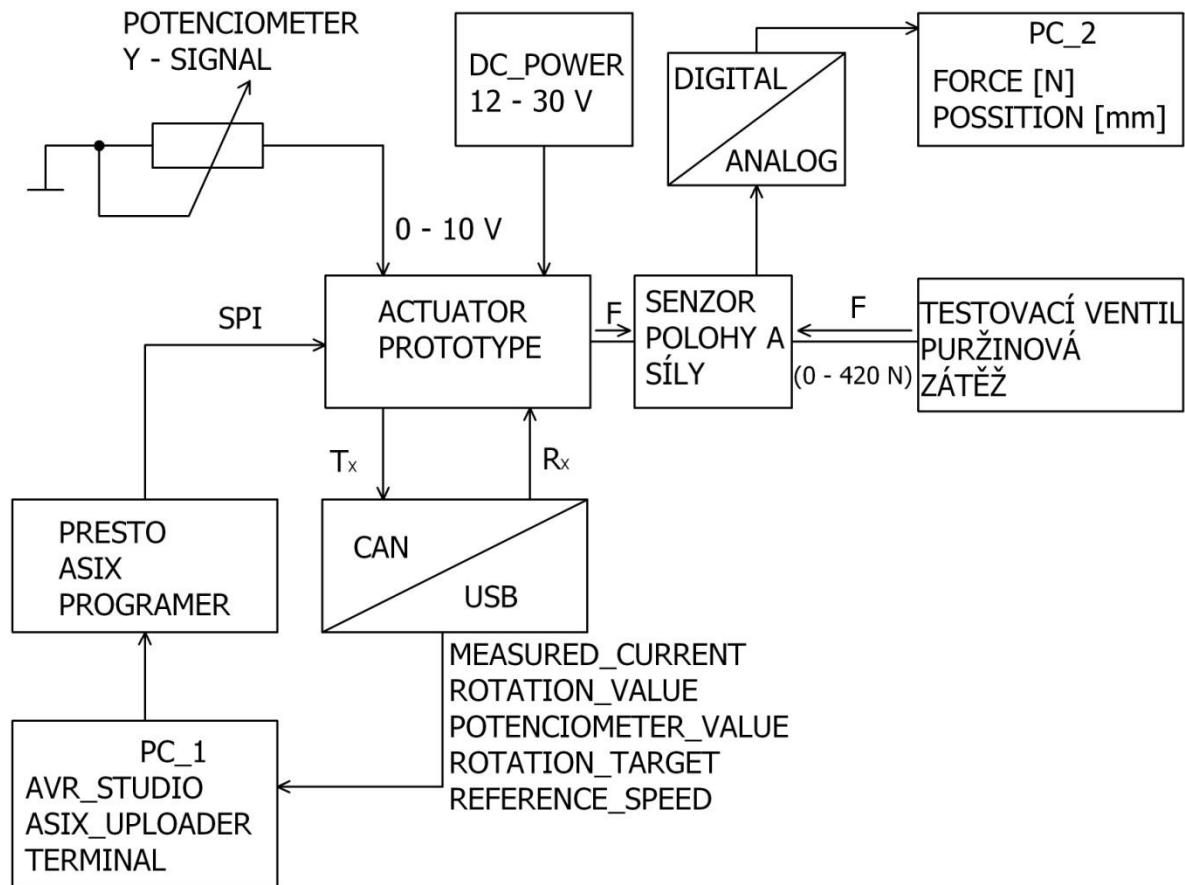
Osa „x“ byla reprezentována časovým údajem. Pro lepší orientaci ve výsledných grafech byl čas převeden do stejných časových intervalů.

Pin JP3, který se nachází na desce plošných spojů, slouží k zapojení digitálního ampérmetru do obvodu BLDC motoru. Díky tomu lze měřit reálný proud tekoucí motorem. Dle výrobce je hodnota nominálního proudu tekoucí motorem stanovena na $I_{nom} = 1,22$ A. Ideální je se pohybovat kolem této hodnoty.

Prototyp aktuátoru obsahuje rozhraní CAN, které bylo využito k odesílání diagnostických zpráv. Při použití v praxi je možné toto rozhraní použít například k přímému ovládní Y-signálu. Na rozhraní CAN se připojil převodník CAN/USB, který byl propojen s PC_1 a na kterém jsou pomocí terminálu vyhodnocovány posílané zprávy. Tento převodník posloužil k odesílání následujících diagnostických zpráv: `measured_current`, `rotation_value`, `potentiometer_value`, `rotation target`, `reference_speed`.

Na základě těchto výše uvedených informací jsou dle potřeby vykonávány patřičné změny v softwarové části řízení. Tyto změny jsou realizovány pomocí

PC_1, na kterém běží program AVR Studio sloužící jako kompilátor jazyka C. Program ASIX uploader slouží k nahrání přeloženého kódu do paměti mikroprocesoru ATmega16M1. Blokové schéma zapojení je zobrazeno na Obr. 8.1.



Obr. 8.1 Blokové schéma při testování aktuátoru

Měření probíhalo ve dvou fázích. Nejdříve byl změřen vyrobený prototyp aktuátoru (dále jen „prototyp“) a poté byla změřena původní verze aktuátoru firmy Honeywell pod označením ML6435B (dále jen „ML6435B“). V následujících kapitolách bude popisován postup měření pro tři průběhy: Impact force, BreakAway force a Stall force. Vzhledem k minimálním odlišnostem v průběhu měření jednotlivých modelů nebude postup popisován pro každý model zvlášť.

8.1.1 Impact Force

Aktuátor je ve výchozí zavřené poloze. Zkontroluje se funkčnost měření síly a pozice. Pružinová zátěž v testovacím ventilu se nastaví tak, aby vytvářela nulovou sílu oproti dřívku aktuátoru. Dá se povel aktuátoru k maximálnímu otevření ventilu. Dřívku aktuátoru by měl vykonat celou dráhu tedy 6 mm. Pokud se tomu tak nestane, je nutné provést nápravné opatření. Nejednalo by se pak o moment Impact, ale o moment Stall. Po dosažení koncové polohy aktuátor naráží na konec testovacího

ventilu. Průběh, který lze takto sledovat se nazývá Impact force. Jedná se tedy o sílu, kterou vykoná aktuátor při nárazu na pevnou překážku.

8.1.2 Stall force

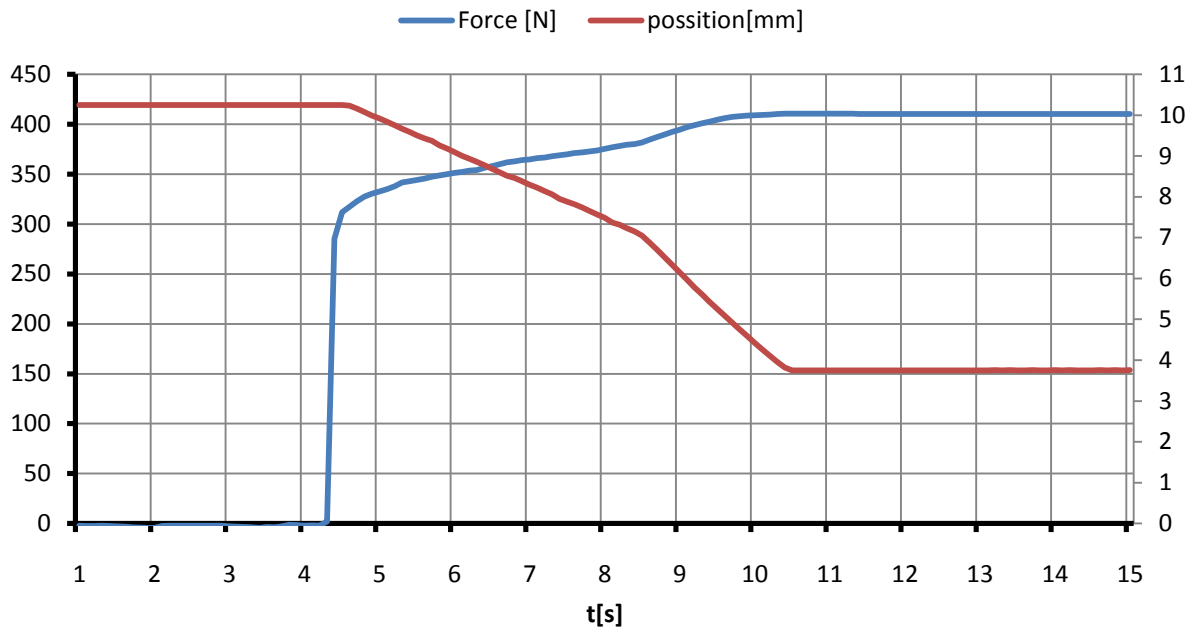
Aktuátor je ve výchozí zavřené poloze. Zkontroluje se funkčnost měření síly a pozice. Pružinová zátěž testovacího ventilu se nastaví tak, aby se aktuátor nezastavil na koncové poloze, ale uprostřed zdvihu. Běžící aktuátor vyvíjí maximální možný moment do doby zastavení. Tento stav lze na měřidle síly vyhodnotit jako Stall force.

8.1.3 Break Away force

Aktuátor je ve výchozí zavřené poloze. Zkontroluje se funkčnost měření síly a pozice. Pružinová zátěž se nastaví tak, aby se aktuátor rozběhl oproti zátěži. Po každém úspěšném rozběhu je nutné si zapamatovat nastavení síly F , která se postupně zvyšuje a opětovně se nechává aktuátor, aby překonal tuto sílu. Pokud síla, která je nastavená má za následek nerozběhnutí aktuátoru, pak je předchozí nastavená síla silou Break Away force.

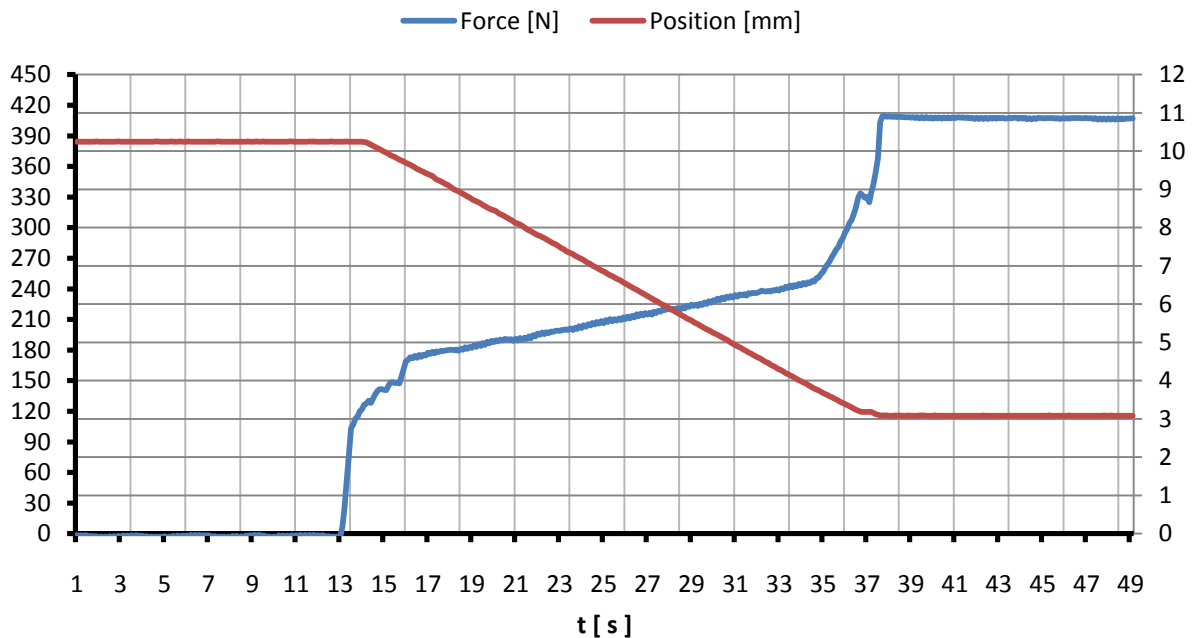
8.2 Impact force – grafický průběh

Impact force - prototyp



Graf 8.1 Průběh síly Impact force - prototyp

Impact force - ML6435B



Graf 8.2 Průběh síly Impact force – ML6435B

8.3 Impact force - zhodnocení

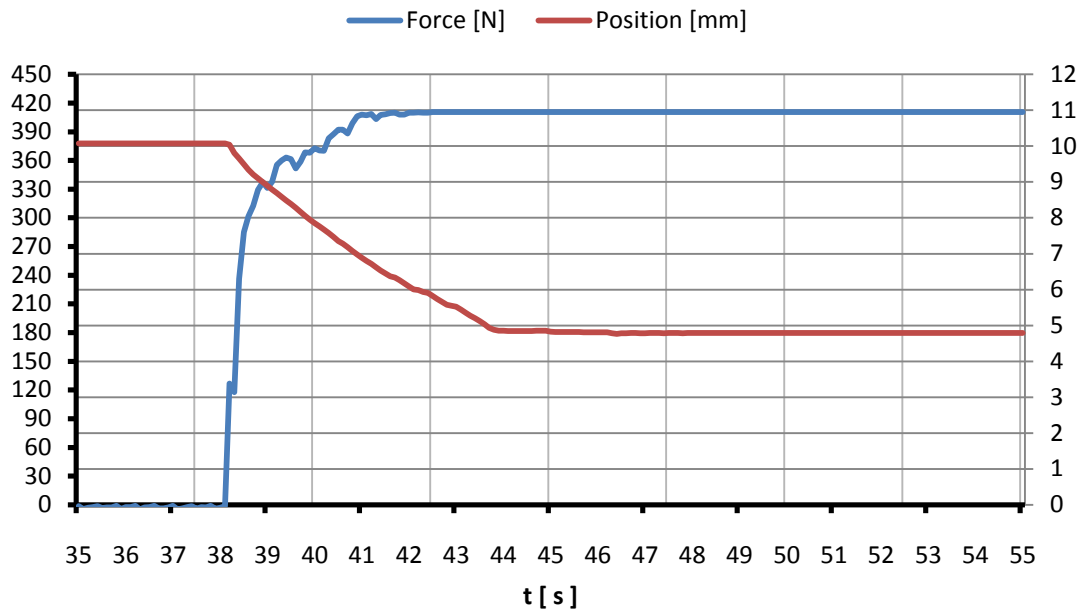
Z grafu je zřejmé, že síla nazvaná jako Impact force, která je diskutovaná v teoretické části, odpovídá tomuto výsledku. Průběh je charakterizován prudkým nárůstem síly, poté síla narůstá již plynuleji a to až k hranici 400 N. Na této hranici se nachází malý překmit, který je charakteristický právě pro sílu Impact. Limitaci síly Impact dokázal BLDC motor správně omezit.

Z grafu je dále zřejmé, že aktuátor otevřel ventil do maxima v čase 6 s, naproti původní verzi aktuátoru ML6435B, kde jej otevřel v čase 23 s.

Držení konstantního momentu/síly v případě nárazu aktuátoru na pevnou překážku byl jedním z bodů zadání této práce. Mezi hlavní výhodu prototypu patří schopnost předání momentu/síly jako požadované hodnoty mikrokontroléru pomocí CAN rozhraní.

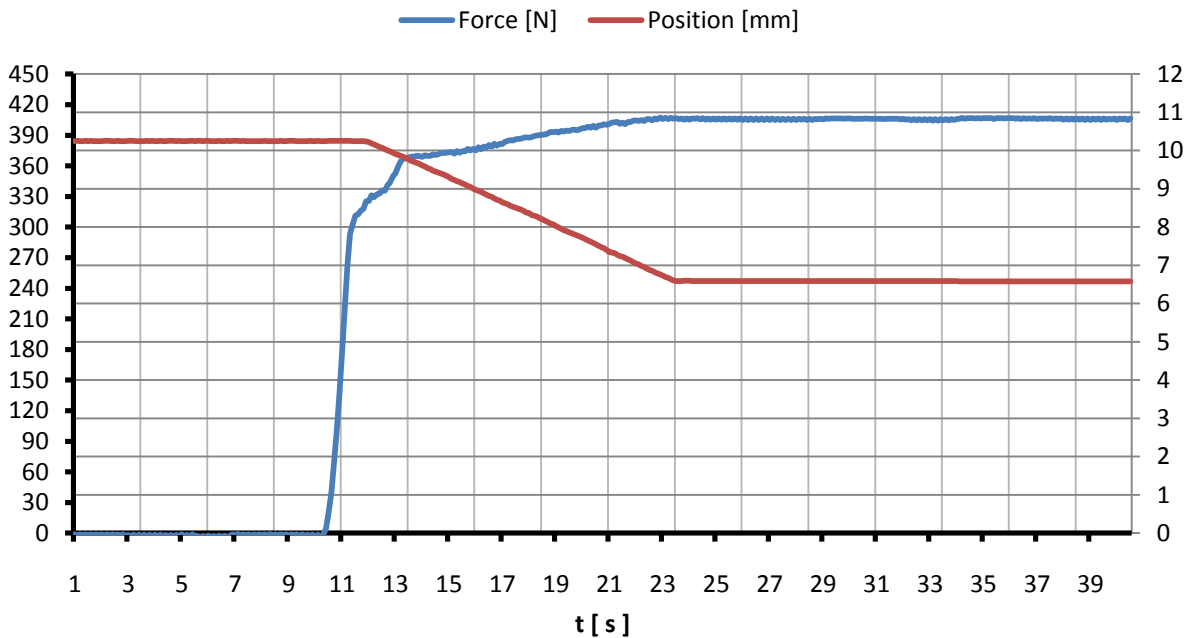
8.4 Stall force – grafický průběh

Stall force - prototype



Graf 8.3 Průběh síly Stall force - prototype

Stall force - ML6435B



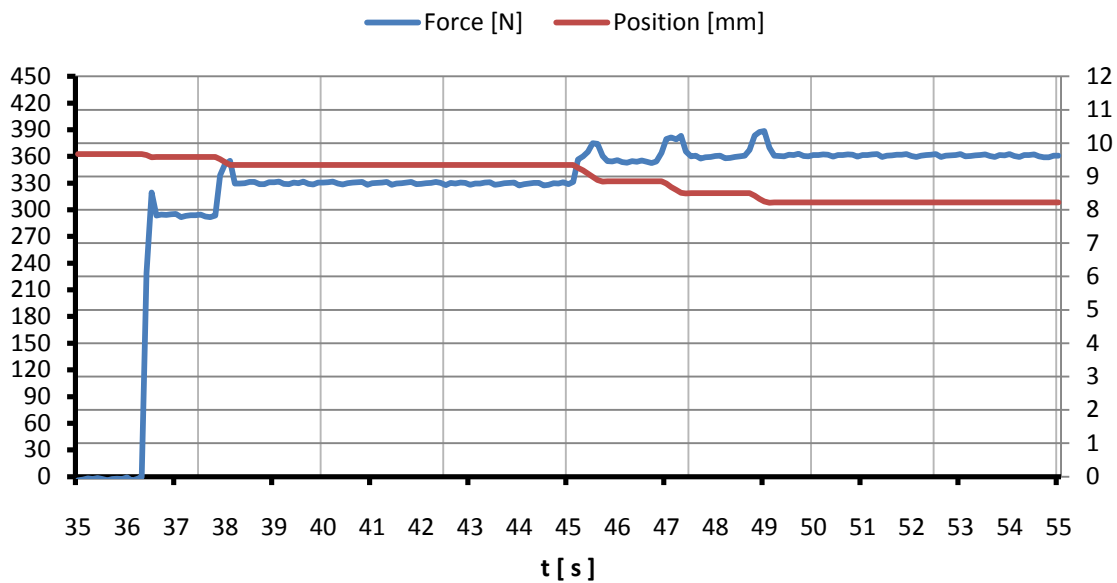
Graf 8.4 Průběh síly Stall force – ML6435B

8.5 Stall force - zhodnocení

Síla Stall je definována jako síla, která je potřebná k zastavení aktuátoru. Charakteristickým průběhem je Graf 8.3. Síla postupně narůstá až k hodnotě 410 N. Poté již aktuátor sílu nezvyšuje, dráha nenarůstá a aktuátor stojí. V porovnání s ML6435B je průběh identický. Pokud by se měl částečně zhodnotit výsledek prototypu, tak lze konstatovat, že při limitaci síly Break Away koncept řízeného BLDC motoru uspěl.

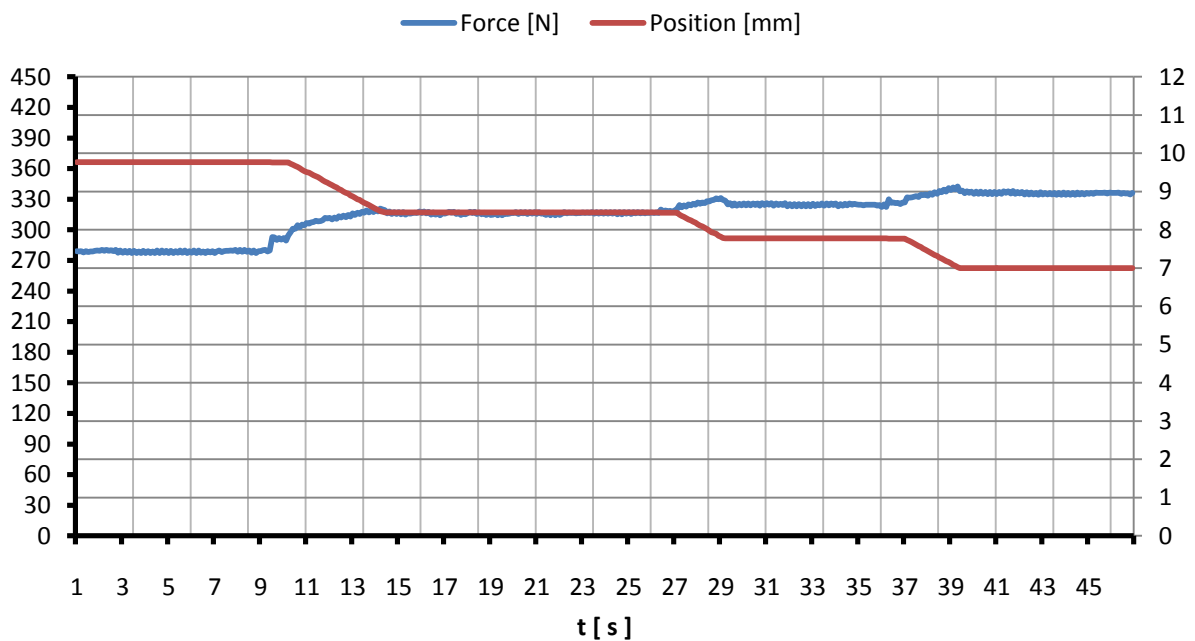
8.6 Break Away force – grafický průběh

Break Away force - prototype



Graf 8.5 Průběh síly Break Away force - prototype

Break Away force - ML6435B



Graf 8.6 Průběh síly Break Away force – ML6435B

8.7 Break Away force - zhodnocení

Síla Break Away je definována jako síla, proti které je ještě stojící aktuátor schopen se rozjet. Postupně se tedy zvyšuje síla a nechává se aktuátor rozjíždět do stále větší síly. Poslední síla, do které je aktuátor schopen se rozjet, je síla Break Away.

Limitaci této síly prototyp aktuátoru opět prokázal. Pokud je nutné zajistit stav, při kterém by všechny výše zmíněné síly měly stejnou hodnotu, je zapotřebí, aby i síla Break Away měla stejnou hodnotu. V praxi to znamená, že od stojícího aktuátoru se požaduje rozjetí až do síly 410 N nebo do síly této se blíží. Z grafu lze odečíst, že prototyp je schopen se rozjet do síly 360 N, kdežto původní ML6435B se rozjel pouze do síly 330 N.

8.8 Zhodnocení výsledků z pohledu limitace síly

Výsledkem měření jsou hodnoty uvedené v Tab. 8.1.

	Prototyp	ML6435B
Stall force [N]	410	410
Impact force [N]	410	410
Break Away force [N]	360	330

Tab. 8.1 Přehled velikostí jednotlivých sil

Hodnoty sil Stall a Impact jsou pro oba aktuátory stejné. Síla Break Away je o 30 N větší nežli u ML6435B. Důležité je poznamenat, že úkolem nebylo dosáhnout lepších výsledků, ale ověřit koncept servopohonu/aktuátoru s využitím BLDC motoru.

8.9 Zhodnocení výsledků z pohledu regulace polohy

Prototyp, jak ukazuje tabulka Tab. 8.2, umožňuje regulaci polohy díky přítomnosti Hallových snímačů. Ty jsou zapojeny do mikrokontroléru a tvoří zpětnou vazbu pro P regulátor. Ten na základě znalosti požadované polohy a skutečné polohy provádí akční zásah tak, aby žádaná poloha byla rovna poloze aktuální. ML6435B určuje polohu na základě doby sepnutí a počtu synchronních otáček motoru za tuto dobu. Neexistuje tedy zpětná vazba.

	Regulace polohy	
	<i>Prototyp</i>	<i>ML6435B</i>
Regulace	Zpětná vazba od Hallových snímačů	Doba sepnutí synchronního motoru.
Typ	Přesné pomocí halových sond	-
Rozlišení	4 pulsy na jednu otáčku rotoru	-

Tab. 8.2 Přehled možností regulace polohy u jednotlivých typů

8.10 Zhodnocení výsledků z pohledu regulace rychlosti

Regulace rychlosti je u prototypu možná změnou firmware v mikrokontroléru nebo pomocí řízení přes CAN rozhraní. Rychlost se pohybuje od 0 do jmenovitých otáček motoru. Změnu u ML6435B lze provést pomocí změny frekvence napájecího napětí nebo změnou počtu pólů synchronního motoru. Porovnání je v Tab. 8.3

	Regulace rychlosti	
	<i>Prototyp</i>	<i>ML6435B</i>
Regulace	Variabilní změnou firmware v mikrokontroléru nebo po sběrnici CAN	Změnou frekvence f [Hz] vstupního napětí
		Změnou počtu pólů[-]
Omezení	Není	Změna frekvence = měnič
		Změna počtu pólů = jiný motor
Rozlišení	0-5110ot./min	Póly = 3000/1500/500 apod.
		Frekvence = 0-3000ot./min

Tab. 8.3 Přehled možností regulace rychlosti u jednotlivých typů

8.11 Zhodnocení výsledků z pohledu ceny

V Tab. 8.4 je zobrazen přehled cenové bilance prototypu a původní verze servopohonu ML6435B. Jsou zde uvedeny pouze komponenty, které se na straně verze ML6435B mohou odebrat a na straně prototypu přidat. Zbylé komponenty, které nejsou odebírány, slouží jako základ pro prototyp. Ty nebudou tedy porovnávány. Uvedené ceny zahrnují několik aspektů. Na straně prototypu se jedná o ceny při odběru do desítek kusů. Na straně ML6435B se jedná o ceny, které je možné zjistit například z Internetu, nebo je možné je získat od firmy Honeywell. Při úvaze o sériové výrobě a produkci kusů v řádu tisíců bude cena nižší. Ovšem pokud se vezme v úvahu cena kusová na obou stranách, bude se tato cena snižovat poměrově. Z toho vyplývá, že přesný cenový rozdíl neurčíme, ale lze stanovit, v jakém bude přibližném poměru.

Prototyp		ML6435B	
Název	Cena přibližně	Název	Cena přibližně
Superkapacitor 2ks	120,00 Kč	Návratová pružina	200,00 Kč
ATmega16M1	36,00 Kč	Elektromagnet/solenoid	300,00 Kč
CAN bus	30,00 Kč	Koncové spínače 2ks	41,00 Kč
Pasivní součástky	50,00 Kč	Elektronické komponenty	50,00 Kč
LTC6103	60,00 Kč		
L6920DB	40,00 Kč		
LM2675	40,00 Kč		
IRF7389	60,00 Kč		
Výroba DPS	150,00 Kč		
Celkem	586,00 Kč		591,00 Kč
Rozdíl (+ úspora, -prodražení)	5,00 Kč		

Tab. 8.4 Cenová bilance prototypu a ML6435N

9 SPECIFIKACE PROTOTYPU AKTUÁTORU

V teoretické části bylo pojednáno o funkci aktuátoru. Bylo navrženo nové řešení nad původním. Byl stanoven cíl, v kterém má vzniknout nový prototyp aktuátoru. V praktické části byl tento nový model popsán prakticky a byla navržena jeho výroba. Výsledkem byla zhotovená deska plošných spojů osazená součástkami. Byla navržena programová smyčka, která byla odladěna. V testovací laboratoři vzniklo výsledné měření, které potvrdilo nejen funkčnost, ale i to že prototyp aktuátoru je schopen detekovat všechny tři síly zmíněné v teoretické části. Tím by se prototyp mohl dostat do sériové výroby a v praxi by mohl být nasazen. Proto je potřeba k tomuto produktu dodat popis pro budoucí uživatele. V praxi se běžně používá několika stránkového pdf. souboru.

Specifikace lineárního servopohonu DCBL6435B pro plynulou regulaci

Funkce:



- Snadná a rychlá instalace
 - Regulace rychlosti a polohy
 - Bezkartáčový stejnosměrný motor
 - Procesorově řízený
 - Možná limitace síly
 - Alternativní komunikační rozhraní CAN
- Návrátová bezpečnostní funkce při výpadku napájecího napětí

Specifikace:

Objednací číslo	DCBL6435B
Napájecí napětí	12 - 24VDC/VAC
Ovládací napětí	Vstup "Y" 0-10VDC
Ovládání polohy	0V = plně zavřeno, 10V = plně otevřeno
Ovládání pomocí CAN	ANO
Zdvih dřívku	6mm
Doba přeběhu	10s
Jmenovitá síla na dřívku	410N
Maximální doba přeběhu při ztrátě napájecího napětí	4s

10 ZÁVĚR

Primárním úkolem této práce bylo ověřit koncept lineárního servopohonu/aktuátoru s využitím bezkartáčového stejnosměrného motoru. Rekapitulace výsledků dosažených měření v bodě 8.8 ukazují, že hodnoty sil s výjimkou síly Break Away, která hovoří ve prospěch BLDC motoru jsou síly a jejich průběhy identické. Je možné tedy konstatovat, že použití bezkartáčového stejnosměrného motoru pro pohon lineárního servopohonu s bezpečnostní funkcí je možný.

Tím, že výše uvedený koncept byl ověřen, je možné porovnat současný servopohon a navrhované řešení z hlediska regulace rychlosti, polohy, limitace síly a ceny.

Vzhledem k tomu, že původní řešení obsahuje synchronní motor, tak regulace rychlosti lze provést dle Rovnice 6.1.1 změnou frekvence napájecího napětí nebo počtem pólů motoru. Regulace polohy je předávána pomocí signálu 0 až 10 V jako počet otáček nutných k vykonání. Co ale chybí, je zpětná vazba skutečně vykonaných otáček. Předpokladem je, že motor vykonal to, co mu bylo předáno. Limitace síly je prováděna pomocí mikrospínačů, které odpojují motor od napájecího napětí na základě vychýlení od osy soukolí převodovky při dosažení mezního napětí. Aktuátor ve své alternativní verzi obsahuje bezpečnostní/návratovou funkci nazývanou „spring return“. Servopohon je schopen v beznapěťovém stavu pomocí elektromagnetu a spojky odpojit motor od zátěže. Návratová pružina uvede servopohon do výchozí zavřené/bezpečné polohy.

Navrhované řešení obsahuje elektroniku pro řízení BLDC motoru s Hallovými snímači polohy, superkapacitorem jako zásobníkem energie pro beznapěťový/havarijní stav a měření proudu motorem. Již tato klíčová slova naznačují, že se jedná o plně nastavitelný servopohon z hlediska rychlosti, polohy i limitace síly. Přesná poloha rotoru je známa pomocí Hallových snímačů, kterými lze zároveň počítat otáčky. Vzhledem k přímé úměrnosti protékajícího proudu vinutím a momentu, lze pomocí PWM modulace měnit střídu sepnutého signálu daného půl můstku a tím měnit moment motoru v libovolném rozsahu. Díky měření proudu a jeho převodu do digitální podoby je možné jej limitovat. Superkapacity zajistí bezpečný a plynulý návrat servopohonu do výchozí/zavřené polohy.

Ekonomická úvaha byla zhodnocena v Tab. 8.4. Lze tedy konstatovat, že za cenu nepatrně vyšší, lze získat plně řízený servopohon s možností regulace polohy, rychlosti a plynule nastavitelnou limitací síly. Dále vzhledem k integrované bezpečnostní funkci není nutné produkovat dva typy servopohonů. Rozdíly ať už kladné nebo záporné jsou minimální, ovšem z hlediska inovace se jedná o krok vpřed.

11 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 Princip BLDC motoru	9
Obr. 2.2 Charakteristika momentu u v závislosti na otáčkách $N = f(M)$	10
Obr. 3.1 Současný stav sestavy servopohonu	11
Obr. 4.1 Navrhovaná sestava servopohonu	14
Obr. 4.2 Charakteristika soustavy v režimu STALL	15
Obr. 4.3 Charakteristika soustavy v režimu IMPACT	16
Obr. 4.4 Charakteristika soustavy v režimu BRAKE-AWAY	17
Obr. 5.1 Blokové schéma navrhovaného řešení	20
Obr. 5.2 Třífázová varianta BLDC motoru	22
Obr. 5.3 Třífázový můstek se zapojením vinutí motoru	23
Obr. 5.4 Řídící pulzy PWM modulu na základě Hallových snímačů	24
Obr. 6.1 Zjednodušená představa dosedu pastorku a převodového kola	26
Obr. 6.2 Schéma zapojení měření proudů v obou směrech	29
Obr. 6.3 Zapojení jednoho výkonového půl můstku	30
Obr. 6.4 Zapojení vstupního Y signálu	31
Obr. 6.5 Schéma zapojení detekce přítomnosti napájení	32
Obr. 6.6 Schéma zapojení alternativního zdroje energie	33
Obr. 6.7 Schéma zapojení 1/3	34
Obr. 6.8 Schéma zapojení 2/3	35
Obr. 6.9 Schéma zapojení 3/3	35
Obr. 6.10 Deska plošných spojů rozložení součástek	36
Obr. 7.1 Vývojový diagram programové smyčky	37
Obr. 7.2 Průběh jednotlivých fází v závislosti na Hallových sondách	38
Obr. 7.3 Blokové schéma PID regulátoru	39
Obr. 7.4 Průběh PWM signálu v sepnuté větvi	40
Obr. 7.5 Průběh HALL_A a HALL_B	42
Obr. 8.1 Blokové schéma při testování aktuátoru	45

12 SEZNAM LITERATURY

- [1] LEPKA, J.; GRASBLUM, P.: Mikroprocesorová technika v aplikacích řízení elektrických pohonů. Brno : VUT v Brně, 2011. BLDC motor, s. 64. Dostupné z WWW: <http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_09_1106.pdf>.
- [2] *Www.microchip.com* [online]. 2011 [cit. 2011-12-15]. Motor Control. Dostupné z WWW: <http://www.microchip.com/en_US/technology/motorcontrol/>.
- [3] SKALICKÝ, J.:*Elektrické servopohony*. 1. vydání. Brno : VUT FEKT, 1999. 132 s.
- [4] *Www.honeywell.com* [online]. 2011 [cit. 2011-12-15]. Actuator 3-ptfordistrictheating, DHWS, spring return, 6,5 mm 400 N, ML6435. Dostupné z WWW:<http://products.ecc.emea.honeywell.com/europe/ecatdata/pg_ml6435b.html>
- [5] KOLÁČNY, J.:*Elektrické pohony*. Brno : VUT FEKT, 125 s.
- [6] VRBA, J.:*Výkonová elektronika 1*. Brno : VUT FEKT, 138 s.
- [7] BOUSEK, J.:*Elektronické součástky*. Brno : VUT FEKT, 238 s.
- [8] KLIMA, B., Stupka, R.:*Mikroprocesorová technika v elektrických pohonech*. Brno : VUT FEKT, 2004 108 s.
- [9] *ATMEGA_16_32_64_M1*. 2009. 8209B-AVR-10/09. Dostupné z: www.atmel.com/literature. Diplomová práce. VUT FEKT.
- [10] LTC6103 *Dual High Voltage, High Side Current Sense Amplifier*. Dostupné z: www.linear.com.
- [11] *EC 20flat 20mm, brushless, 5Watt*. Dostupné z: www.maxon.com.
- [12] L6920DB *Synchronous step up converter*. Dostupné z: www.st.com.
- [13] LM2675 *Voltage regulartor*. Dostupné z: www.ti.com.
- [14] *AVR194: Brushless DC Motor Control using ATmega32M1*. Dostupné z: www.atmel.com.

13 SEZNAM ZKRATEK, VELIČIN A SYMBOLŮ

<i>Veličina</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Popis</i>
<i>Zkratka</i>		
ADC	-	Analog Digital Converter
μ	%	Účinnost
AC	-	Alternate Current
avg		Average
B	T	Magnetická indukce
BLDC	-	Brushless Direct Current
C	F	Kapacita
CAN	-	Control Area Network
CD	-	Compact Disk
CNC	-	Computer numeric Control
DC	-	Direct Current
DC-DC	-	Direct Current - Direct Current converter
DPS		Deska plošných spojů
DSP	-	Digital Signal Processor
EEPROM	-	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
F	[N]	Síla
f	Hz	Frekvence
FLASH	-	Elektricky programovatelná paměť
I	A	Elektrický proud
K_T	N.m/A	Konstanta
K_V	ot./V	Konstanta
l	-	Délka rotoru
LED	-	Light Emission Diode
M	N/m	Moment
MIPS	-	Milion Instruction Per Second
MTM	N/m	Motor Torque Maximum
MTR	N/m	Motor Torque Rated
n	ot./min.	Počet otáček za minutu
N	-	Počet závitů cívky
O	m	Obvod kružnice
P	W	Výkon
pi	-	Ludolfovo číslo
PWM	-	Pulse Width Modulation
r	m	Poloměr rotoru/kružnice
R	Ω	Elektrický odpor
s	m	Dráha
SPI	-	Seriál Peripheral Interfaces
t	s	Čas
T	s	Perioda signálu
U	V	Elektrické napětí
U_i	V	Jmenovité napětí

USART	-	Universal Synchronous Asynchronous Receiver and Transmitter
W	J	Práce
ω	rad/s	Úlová rychlost

14 SEZNAM PŘÍLOH

14.1 Soubor na CD tester.rar – hodnoty z měření na testeru.

14.2 Soubor na CD analyzator.rar – průběhy PWM,HALL,PHASE

14.3 Soubor na CD Actual_FW.rar – programová smyčka

14.4 Soubor na CD schema.rar – elektrické schéma

14.5 Soubor na CD dps.rar – deska plošných spojů

14.6 Soubor na CD rozpiska.htm – rozpis elektronických součástek