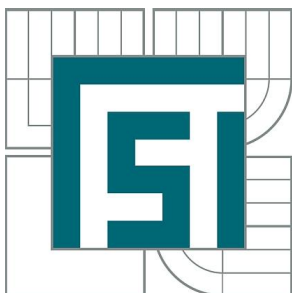


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

REALIZACE ŘÍZENÍ STEJNOSMĚRNÝCH ELEKTROMOTORŮ

IMPLEMENTATION OF CONTROL A DC MOTORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MIROSLAV ROZKOŠNÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PAVEL HOUŠKA, Ph.D.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automatizace a informatiky

Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Miroslav Rozkošný

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Aplikovaná informatika a řízení (3902R001)**

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

Realizace řízení stejnosměrných elektromotorů

v anglickém jazyce:

Implementation of control a DC motors

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá problematikou řízení stejnosměrných elektromotorů, včetně snímání natočení, polohy a měření odebíraného proudu motorem. Cílem práce je zpracovat jednoduchou metodiku, jak zvolit motor a potřebné snímače, provést jejich identifikaci a na základě výsledků identifikace navrhnout řízení motoru.

Cíle bakalářské práce:

1. Prostudujte problematiku řízení stejnosměrných motorů
2. Realizujte snímání natočení rotoru a měření proudu motorem
3. Proveďte identifikaci parametrů stejnosměrného motoru pro potřeby návrhu řízení
4. Navrhněte a realizujte řízení stejnosměrného motoru
5. Realizované řízení ověřte.

Seznam odborné literatury:

- [1] Pavelka J., Čěřovský Z., Javůrek J., Elektrické pohony, Nakladatelství ČVUT, Praha 2003
- [2] Noskiewič, P.: Modelování a identifikace systémů, Montanex a.s., Ostrava 1999, ISBN 80-7225-030-2
- [3] Skalický J., Elektrické servopohony, Nakladatelství VUT, Brno
- [4] National Instruments: LabVIEW Control Design User Manual[online], June 2009, 371057G-01, dostupné z URL:<<http://www.ni.com>>
- [5] National Instruments: LabVIEW Fundamentals, August 2005, 374029C-01, dostupné z URL:<<http://www.ni.com>>

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Houška, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 18.11.2009

L.S.

Ing. Jan Roupec, Ph.D.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá základním rozdělením stejnosměrných elektromotorů a principy jejich řízení. V další části práce jsou rozebrány způsoby měření proudu a polohy. Dále jsou zde rozebrány základní způsoby regulací, které jsou následně realizovány pomocí vývojového prostředí NI LabVIEW a experimentálně ověřeny. Výsledky jednotlivých experimentů s různými typy regulátorů jsou porovnány a analyzovány.

Abstract

The bachelor thesis deals with the basic classification of DC electromotors and with the principles of their operation. Another part of the thesis describes ways of measuring current and position. Consequently, it describes basic ways of regulation which are then realised with the help of the developing environment NI LabVIEW and experimentally verified. The results of individual experiments with different types of regulators are compared and analysed.

Klíčová slova

Stejnoseměrný elektromotor, snímač, regulátor, řízení

Keywords

DC motors, sensor, regulátor, kontrol

Bibliografická citace mé práce:

ROZKOŠNÝ, M. *Realizace řízení stejnosměrných elektromotorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 48 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Houška, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma: „Realizace řízení stejnosměrných elektromotorů“, vypracoval samostatně pod vedením Ing. Pavla Houšky, Ph.D., na základě dostupné literatury a dostupných informačních zdrojů, které jsem všechny odcitoval v seznamu použité literatury.

V Brně dne

podpis.....

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Pavlu Houškovi Ph.D., za odborné vedení, ochotné poskytnutí cenných rad a zkušeností při vypracování mé bakalářské práce

Obsah

1	Úvod.....	15
2	Stejnoseměrný elektromotor.....	16
2.1	Princip stejnosměrného elektromotoru	16
2.2	Konstrukce stejnosměrných elektromotorů	17
2.3	Rozdělení elektromotorů podle říditelnosti rychlosti otáčení.....	18
2.4	Rozdělení stejnosměrných elektromotorů podle zapojení	19
3	Řízení rychlosti otáčení stejnosměrných elektromotorů	21
3.1	Změnou celkového odporu v obvodu kotvy	21
3.2	Změnou magnetického toku Φ	21
3.3	Změnou napětí na kotvě.....	22
3.3.1	Pomocí řízeného tyristorového usměrňovače	22
3.3.2	Pulzní šířkovou modulací – PWM	22
3.4	Řízením napětím kotvy i budícího proudu statoru	25
4	Snímače	27
4.1	Snímání proudu.....	27
4.1.1	Odporový bočník.....	27
4.1.2	Proudový transformátor	27
4.1.3	Snímače proudu s Hallovou sondou.....	28
4.2	Snímání otáček motoru	29
4.2.1	Tachodynamo	29
4.2.2	Resolvery	30
4.2.3	Inkrementální rotační snímače (IRC).....	30
4.2.4	Absolutní enkodéry	32
5	Principy řízení	33
5.1	PSD regulátory.....	33

5.2	Kaskádové regulátory	34
6	Realizace řízení stejnosměrného motoru	35
6.1	Struktura realizovaného software.....	37
6.1.1	Začlenění řízení do software	37
6.2	Realizace řízení	38
6.2.1	Zapojení PID regulátoru.....	38
6.2.2	PSD regulátor	38
6.2.3	PSD s lichoběžníkovou metodou	39
6.2.4	PSD s aproximovanou derivací a filtrem	40
6.2.5	PSD s rekurzivní integrací.....	41
6.2.6	Regulace pomocí kaskádového zapojení regulátorů	42
6.3	Ověření řízení.....	43
7	Závěr	45
8	Literatura	47

1 Úvod

Stejnoseměrné elektromotory je velmi rozšířeným zdrojem krouticího momentu. Tyto motory mají proti spalovacím motorům výhodu, že při chodu nejsou zdrojem plodit, mají nízkou úroveň hluku a mohou pracovat ve všech čtyřech kvadrantech. Naopak značnou nevýhodou elektromotorů je jejich závislost na nepřetržité dodávce elektrické energie.

Základní rozdělení stejnosměrných elektromotorů je podle způsobu zapojení rotoru a budicího vynutí. V dnešní době se používají čtyři způsoby těchto zapojení: stejnosměrný motor s cizím buzením, s paralelním buzením, se sériovým buzením a s kompoundním buzením.

Stejnoseměrné elektromotory lze řídit pomocí změny napětí na kotvě, které lze realizovat několika způsoby. Jeden z nejnovějších způsobů je použití PWM modulace, pomocí které lze motor řídit ve všech čtyřech kvadrantech momentotočkové charakteristiky motoru.

Aby bylo možné motor spolehlivě řídit je zapotřebí snímání rychlosti a natočení rotoru a také proudu protékajícího motorem. Pro snímání natočení rotoru lze použít absolutní nebo inkrementální snímače. Inkrementální snímače jsou schopny snímat pouze otáčky a rychlost rotoru, při jejich opětovném zapnutí si nepamatují předchozí polohu na rozdíl od absolutních, které si tuto polohu pamatují a tím jsou schopny určovat přesnou polohu rotoru. Pro měření proudu se dá použít odporový bočník, který je jeden z nejznámějších způsobů pro měření proudu, ale také například snímač s Hallovoú sondou, který je přesnější a pro jeho použití není zapotřebí elektrický obvod rozpojovat.

V další kapitole je popsán diskreútní PSD regulátor, který je díky rozšiřování diskreútních systému častěji používán než spojitý PID regulátor.

V této práci je pomocí grafického vývojového prostředí LabVIEW od firmy National Instruments realizováno zapojení několika druhů regulátorů. Tyto zapojení byly nejdříve odzkoušeny virtuální úloze a následně prakticky realizovány na dvou motorech.

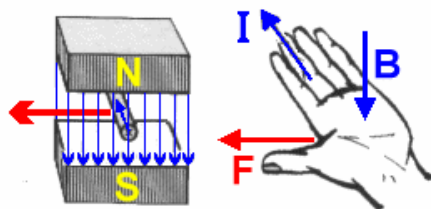
2 Stejnosměrný elektromotor

Stejnosměrný elektromotor je elektrický točivý stroj, který převádí elektrickou energii na mechanickou.

2.1 Princip stejnosměrného elektromotoru

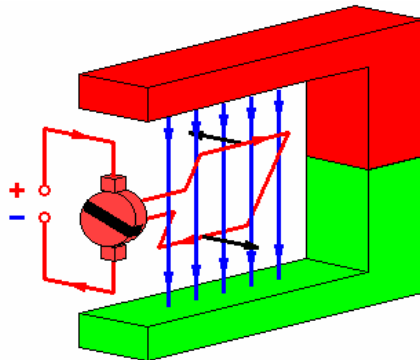
Stejnosměrný elektromotor pracuje na elektromagnetickém principu, jehož základem je vzájemné silové působení magnetických polí magnetu a magnetického pole vytvořeného vodičem, kterým protéká elektrický proud.

Flemingovo pravidlo: Položíme-li levou ruku na vodič tak, aby indukční čáry vstupovaly do dlaně a natažené prsty ukazovaly směr proudu, ukazuje odchylený palec směr působící síly. Tento princip je znázorněn na obr. 2.1.[1]



Obr. 2.1 Síla působící na vodič v magnetickém poli [1]

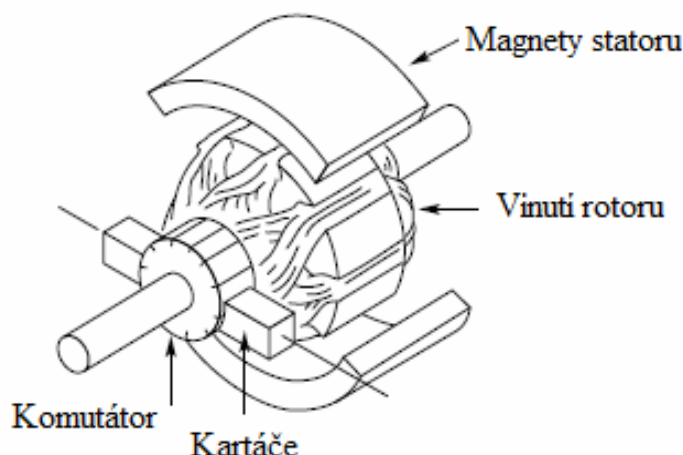
Tento jediný vodič nahradíme smyčkou, umístěnou v homogenním magnetickém poli, a její konce připevníme ke dvěma segmentům zhotovených z rozříznutého vodivého válce. Jednotlivé segmenty válce jsou od sebe odizolovány a jsou na ně přiloženy uhlíky tzv. kartáče a to v poloze naznačené v obr. 2.2. Poloha těchto kartáčů je velmi důležitá pro správnou funkci motoru. Přes kartáče je smyčka vodivě připojena ke svorkám zdroje stejnosměrného napětí a začne jí protékat elektrický proud. Protékající proud vytváří okolo vodiče magnetické pole, interakcí magnetického pole vodiče a magnetického toku homogenního magnetického pole statoru působí na vodič síla. Síla má směr kolmý k magnetickým siločárám a zároveň k směru proudu, působí tedy vždy „do stran“. Síla způsobuje točivý moment sil a jeho působením se smyčka začne otáčet ve směru působení momentu. Jakmile se smyčka dostane do vodorovné polohy tak se pomocí válce na chvíli odpojí od zdroje stejnosměrného napětí, pohybuje se setrvačností, a následně se změnil směr proudu procházejícího smyčkou a celý děj se opakuje.



Obr. 2.2 Pohybující se smyčka v homogenním poli [2]

2.2 Konstrukce stejnosměrných elektromotorů

Hlavní části stejnosměrného elektromotoru jsou znázorněny na obr. 2.3. Nosné části jsou ložiska, ložiskové štiny, hřídel, ventilátor a držáky kartáčů. Motor má dva magnetické obvody – magnetický obvod rotoru a magnetický obvod statoru. Magnetický obvod statoru vytváří magnetické pole působící na magnetický obvod rotoru. Vinutí magnetického obvodu rotoru jsou připojena na komutátor, který je napájen prostřednictvím kartáčů.

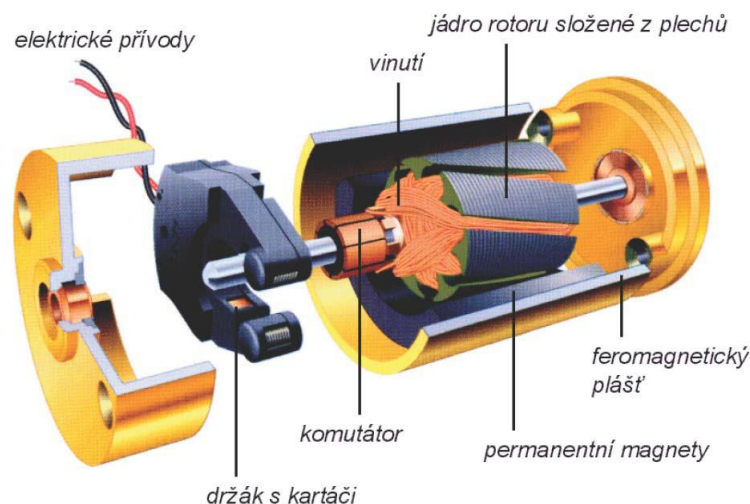


Obr. 2.3 Hlavní části stejnosměrného elektromotoru [3]

Stator je nehybná část motoru, na které je upevněn magnetický obvod statoru. Tento magnetický obvod může být tvořen buď permanentními magnety, nebo budícím vynutím. Statory mohou být z lité oceli, svařovány z ocelových plechů nebo profilového železa. Stator stejnosměrných elektromotorů je většinou válcový, jiný tvar statoru mají např. trakční motory, které mají čtvercový průřez.

Rotor neboli kotva má válcový tvar. Může být složen z elektrických plechů, které jsou mezi sebou odizolovány papírem nebo lakem. Plechy rotorů malých motorů jsou nalisovány přímo na hřídel, u větších na svařovanou nebo litinovou hvězdici. Po obvodu je stator rovnoměrně drážkovaný, což je znázorněno na obr. 2.4. V drážkách jsou umístěny cívky stejnosměrného vinutí. Začátky a konce vinutí jsou čelními vývody vyvedeny na lamely komutátoru, tyto lamely jsou od sebe odizolovány.

Sběrací ústrojí se skládá z komutátoru a kartáčů. Přes toto sběrací ústrojí se zajišťuje přívod a odvod proudu vinutí otáčejícího se rotoru. Komutátor se skládá z lamel klínového tvaru sestavených do dutého válce. Lamely jsou vyrobeny z tvrdé tažené mědi. Na obr. 2.4 je vidět že lamely jsou od sebe i proti nosné kostře odizolovány. Na komutátor dosedají uhlíkové kartáče, které jsou umístěny v tzv. drážkách kartáčů, ve kterých se volně pohybují. Kartáče je možné natáčet do nejvýhodnější polohy. Kartáče se používají grafitové, elektrografitové nebo kartáče se směsí grafitu a kovu, např. měďografitové nebo bronzografitové. Druh kartáčů je závislý na provozních podmínkách.

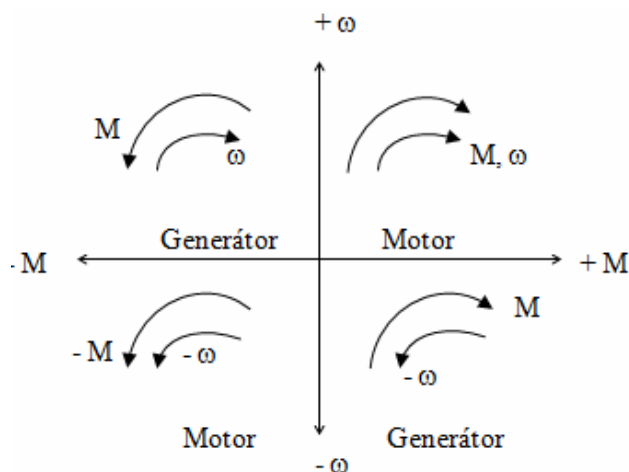


Obr. 2.4 Řez stejnosměrným elektromotorem [4]

Ventilátor je jedna z nedílných součástí motorů, které pracují v horších podmínkách nebo jsou přetěžovány a je nutno je aktivně chladit. Ventilátor je připevněn na hřídeli rotoru, ale má-li motor pracovat v celém rozsahu otáček s plným momentem, je nutné takový motor chladit, nezávisle na otáčkách, přídatným ventilátorem.

2.3 Rozdělení elektromotorů podle řiditelnosti rychlosti otáčení

Motory rozdělujeme na jedno, dvou nebo vícerychlostní a na motory s plynule nastavitelnou rychlostí. Vztah mezi momentem a úhlovou rychlostí je znázorněn v diagramu na obr. 2.5.



Obr. 2.5 Momento-otáčková charakteristika [5]

V tomto diagramu je na vodorovné ose vynesena moment M a na svislé ose úhlová rychlost ω . Osy rozdělují rovinu na čtyři kvadranty, které se číslovají proti směru hodinových ručiček.

VI. a III. kvadrantu je součin momentu a úhlové rychlosti kladný a proto tyto kvadranty nazýváme motorické. Podobně je ve II. a IV. kvadrantu je součin těchto dvou složek záporný a proto tyto kvadranty nazýváme generátorové.

Jednokvadrantové motory

Pracovní bod jednokvadrantových motorů se nalézá v I. kvadrantu. Proto tyto motory mohou pracovat pouze s jedním směrem otáčení a nelze je elektricky brzdit.

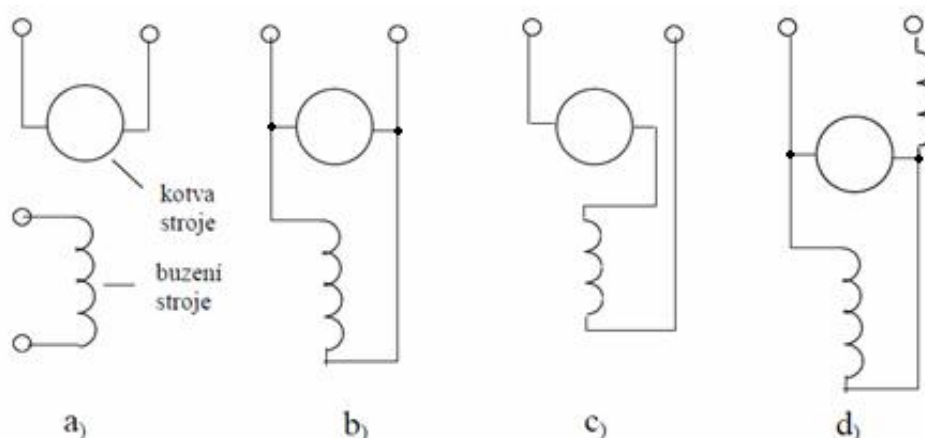
Dvoukvadrantové motory

Tyto motory dovolují měnit smysl momentu při jednom směru otáčení tj. v I a II kvadrantu, nebo naopak dovolují měnit smysl otáčení bez možnosti změny smyslu momentu tj. v I a IV kvadrantu. Pracovní bod těchto motorů se vždy nalézá ve dvou sousedních kvadrantech.

Čtyřkvadrantové motory

U těchto motorů lze měnit smysl momentu i směr otáčení, a proto se pracovní bod může nacházet ve všech čtyřech kvadrantech diagramu. [5]

2.4 Rozdělení stejnosměrných elektromotorů podle zapojení



Obr. 2.6 Druhy zapojení stejnosměrných motorů: a) s cizím buzením, b) s paralelním buzením c) se sériovým buzením, d) s kompoundním buzením [5]

Motor s cizím buzením

Tyto motory mají dva elektrické obvody. Obvod buzení je od obvodu rotoru oddělen a každý z nich je napájen ze samostatného vnějšího zdroje, které mohou mít odlišnou velikost napětí. Schéma motoru s cizím buzením je na obr. 2.6a. Řízení rychlosti otáček je umožněno v maximálním rozsahu při optimální účinnosti. Otáčky jsou stabilní i při kolísání napětí. Před připojením rotoru ke zdroji musí být motor nabuzen, jinak nebezpečně narůstají oráčky a může dojít k mechanickému poškození rotoru.

Motor s paralelním buzením

Schéma zapojení motoru s paralelním buzením je na obr. 2.6b. Budicí vinutí je připojeno paralelně k vinutí rotoru, nesmí rovněž dojít k odbuzení rotoru. Motor má menší rozsah regulace otáček než motor s cizím buzením. Motor s paralelním buzením se v praxi používá jen tehdy, není-li nutné měnit rychlost otáček v širokých mezích. Oproti motoru s cizím buzením má výhodu jednoduššího napájení. K provozu stačí pouze jediný zdroj napětí U , realizovaný zpravidla jako neřízený usměrňovač.

Motor se sériovým buzením

Zapojení motoru je naznačeno na obr. 2.6c. Budící vynutí o velkém průřezu a několika závitech je zapojeno do série s kotvou. Jedna z nejzávažnějších nevýhoda tohoto motoru je že při chodu naprázdno rotor dosáhne nebezpečně velkých otáček, musíme proto zajistit, aby motor se sériovým buzením pracoval vždy alespoň s minimální zátěží. Otáčky jsou velmi závislé na zatížení, sériový motor je značně přetížitelný, používá se tam, kde je nutný velký moment po krátkou dobu a kde přitom nevádí pokles otáček. Nevýhodou sériového motoru je nemožnost brzdění pomocí rekuperace.

Motor s kompoundním buzením

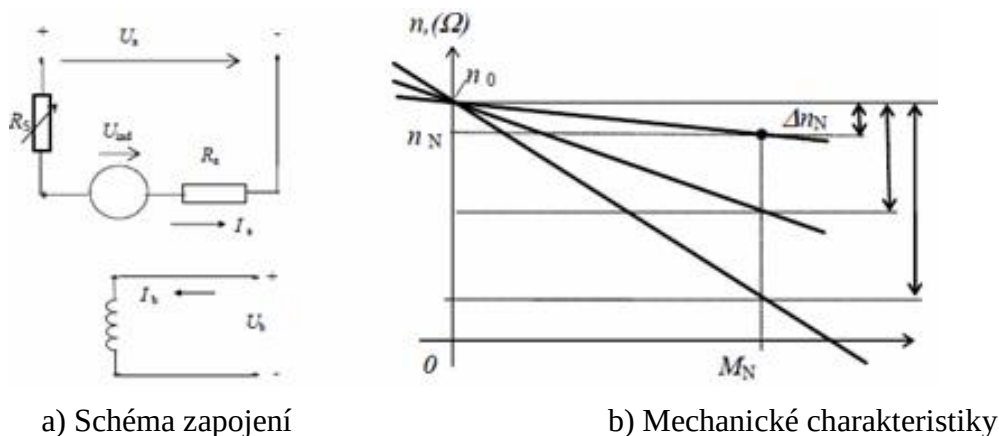
Tyto typ motorů má sériové i paralelní budící vinutí, což vidíme na obr. 2.5d, při chodu naprázdno se chová jako derivační motor. Při zatížení klesají otáčky rychleji než u derivačního motoru. Díky kombinaci je umožněn vyšší výkon. [5]

3 Řízení rychlosti otáčení stejnosměrných elektromotorů

V následujících kapitolách jsou popsány používané způsoby řízení rychlosti otáčení stejnosměrných motorů. Některé způsoby se již nepoužívají pro nové stroje, protože jsou energeticky nevýhodné, ale stále se s nimi můžeme setkat ve starších zařízeních.

3.1 Změnou celkového odporu v obvodu kotvy

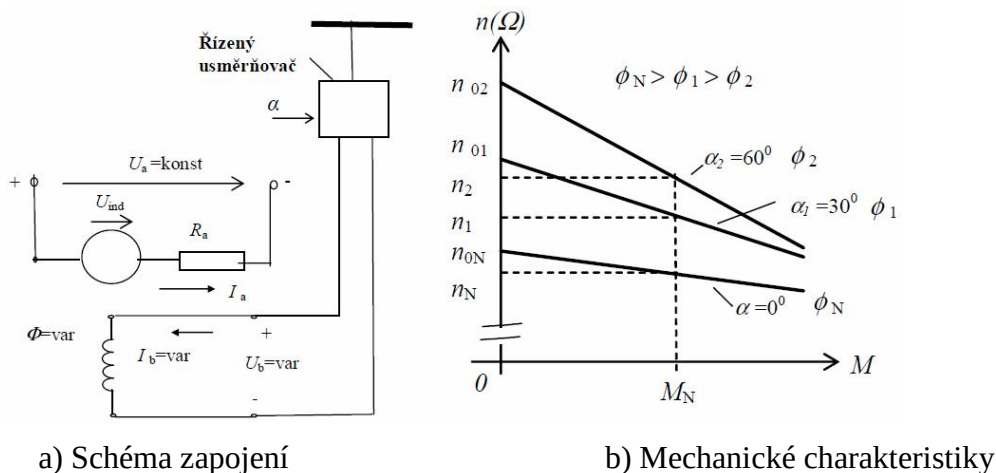
K řízení rychlosti je použit rezistor R_s , který je zapojený do obvodu kotvy motoru tak jako na obr. 3.1a. Napětí U_s i magnetický tok Φ se nemění. Rychlost naprázdno Ω_0 je konstantní a sklon charakteristiky se nastavuje velikostí odporu R_s . Na tomto odporu vznikají trvale ztráty. Pro svoji ne hospodárnost lze řízení pomocí odporu použít jen u motoru velmi malých výkonů, nebo pouze pro rozběh motoru. [6]



Obr. 3.1 Řízení rychlosti změnou odporu R_s v obvodu kotvy. [6]

3.2 Změnou magnetického toku Φ

K řízení rychlosti je použit rezistor R_s , který je zapojený do obvodu kotvy motoru tak jako na obr. 3.1a. Napětí U_s i magnetický tok Φ se nemění. Rychlost naprázdno Ω_0 je konstantní a sklon charakteristiky se nastavuje velikostí odporu R_s . Na tomto odporu vznikají trvale ztráty. Pro svoji ne hospodárnost lze řízení pomocí odporu použít jen u motoru velmi malých výkonů, nebo pouze pro rozběh motoru. [6]



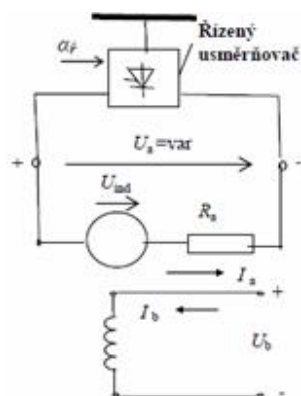
Obr. 3.2 Řízení rychlosti změnou budícího napětí [6]

3.3 Změnou napětí na kotvě

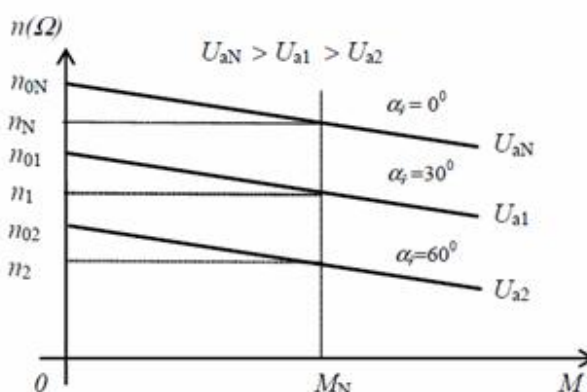
V této části kapitoly jsou rozepsány dva způsoby změny napětí na kotvě. Při této změně napětí nedochází k poklesu proudu ani magnetického toku. Tyto způsoby řízení jsou hospodárnější než již zmíněné způsoby řízení rychlosti otáčení stejnosměrných elektromotorů.

3.3.1 Pomocí řízeného tyristorového usměrňovače

Změna velikosti přiváděného svorkového napětí U na svorky kotvy motoru lze provést pomocí fázově řízeného tyristorového usměrňovače. Schéma zapojení je znázorněno na obr. 3.3a. Změnou řídicího úhlu α u tyristoru lze řídit střední hodnotu výstupního napětí usměrňovače tj. napětí na kotvě motoru, proud I_b i magnetický tok Φ se nemění, čímž se mění pouze rychlost naprázdno. Na obr. 3.3b vidíme, že sklon mechanických charakteristik zůstává zachován. Výhodou tohoto řízení je plynulá změna rychlosti otáčení motoru v širokém rozsahu od nuly až do jmenovité rychlosti. Maximální moment motoru je dán nastaveným proudovým omezením v usměrňovači. Pro možnost řízení rychlosti a toku výkonu v obou směrech (motor - brzda) se používá k napájení kotvy motoru antiparalelní spojení usměrňovačů. Toto řízení je v důsledku velmi malých ztrát v motoru hospodárné. [6]



a) Schéma zapojení



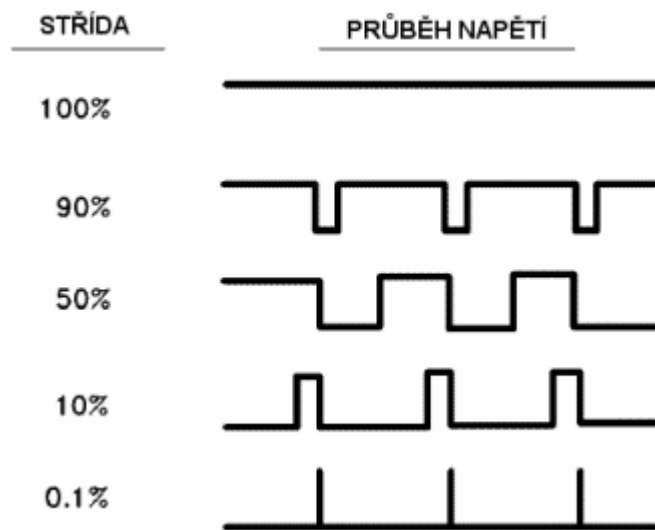
b) Mechanické charakteristiky

Obr. 3.3 Řízení rychlosti změnou napětí na kotvě U_a [6]

3.3.2 Pulzní šířkovou modulací – PWM

Je to nejvíce používaný způsob řízení. Na obr. 3.4 je vidět že, základem této modulace je pevná nosná vlna $f_{op} = 1/T_{op}$ a měřonosnou veličinou je šířka impulsu T .

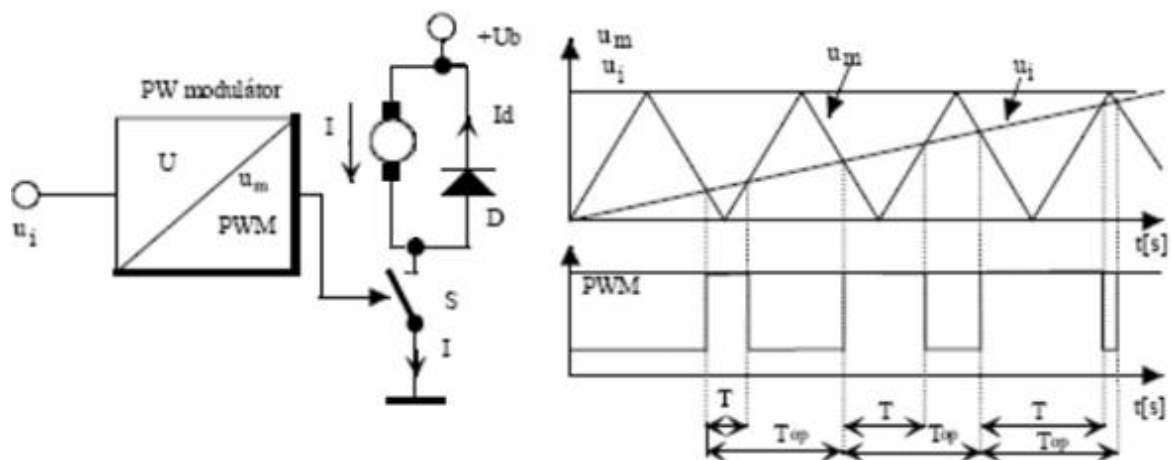
PWM se modifikuje podle požadavků dané aplikace. Jednou z nejdůležitějších okolností je výběr počtu kvadrantů, se kterými se bude v dané aplikaci operovat. Aplikace mohou být jednokvadrantové, dvoukvadrantové a čtyřkvadrantové. [7]



Obr. 3.4 Průběh PWM modulace [7]

Jednokvadrantové řízení

PWM modulátor převádí vstupní napětí u_i na interval T , a pomocí spínače periodicky řídí příkon motoru. Antiparalelní ochranná dioda je zapojena z důvodu vyloučení napěťové špičky při vypnutí spínače. Jednokvadrantovým řízením nelze řídit brzdění (obr. 3.5).



Obr. 3.5 Jednokvadrantové řízení unipolární PWM modulací [7]

Dvoukvadrantové řízení

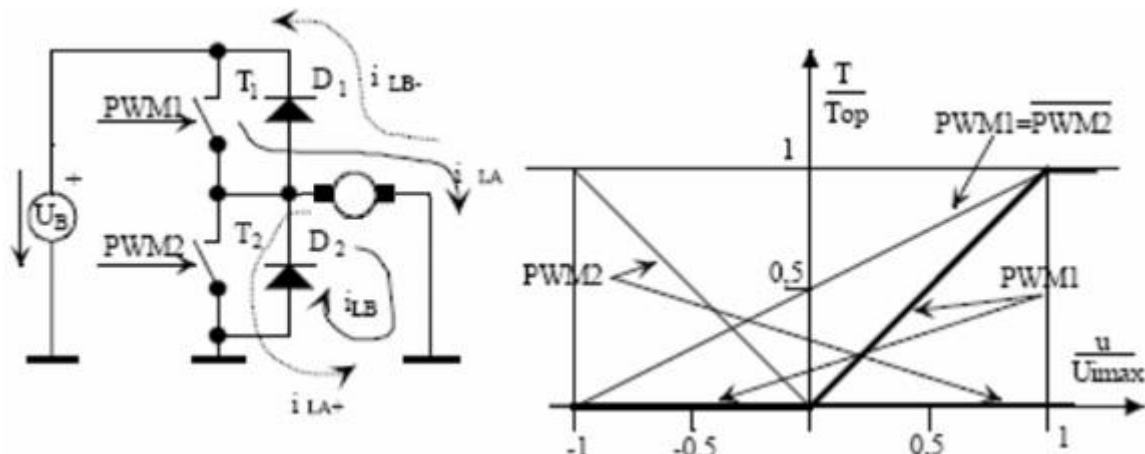
Toto řízení dává obecnější možnosti řízení výkonu oproti řízení jednokvadrantovému. Dvoukvadrantové řízení umožňuje nejen řídit velikost výkonu, ale také určovat směr řízeného výkonu. Řídicí napětí se pohybuje v rozsahu

$-U_{i\max} \leq u_i \leq +U_{i\max}$. Při dvoukvadrantovém řízení se používají dva spínače, které se řídí pulzní šířkovou modulací s několika možnými formáty, existuje několik možností, jak oba spínače řídit vhodnou PWM. Když je přívod energie na hřídel motoru z vnějšího zdroje větší, motor se změní v generátor a dvoukvadrantové řízení umožňuje řízené brzdění motoru. Základní zapojení dvojice spínačů pro dvoukvadrantové řízení je na obr. 3.6.

Unipolární modulace pro $u_i \geq 0$, kdy spínač T_1 je ovládán unipolární modulací PWM1 při zavřeném spínači T_2 (tlustá charakteristika obr. 3.6) a pro $u_i \leq 0$ je T_2 ovládán unipolární modulací PWM2 při zařazeném spínači T_1 (tenká charakteristika obr. 3.6).

Bipolární modulace, kdy v celém rozsahu napětí $-U_{i\max} \leq u_i \leq +U_{i\max}$ platí:

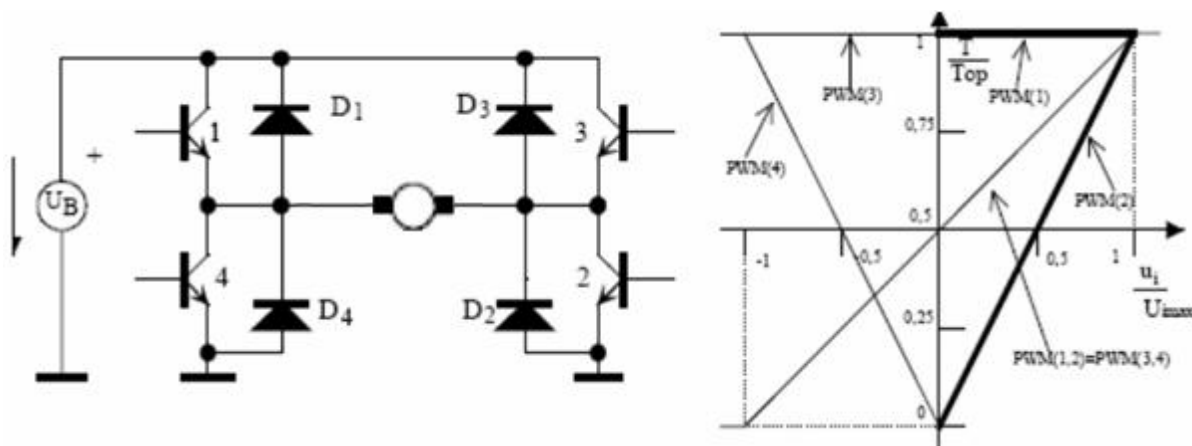
$PWM1 = \overline{PWM2}$ (středně tenká charakteristika obr. 3.6). Při této modulaci platí pro $u_i = 0$, že poměr $T/T_{\text{top}} = 0,5$. [7]



Obr. 3.6 Dvoukvadrantové řízení výkonu na zátěži s modulací PWM [7]

Čtyřkvadrantové řízení

Čtyřkvadrantové řízení pomocí PWM umožňuje příkonu v obou směrech otáčení motoru a umožňuje řízené rekuperační brzdění. Čtyřkvadrantové řízení je důležitým základem všech rychlostních i polohových servomechanismů. Nejběžnější zapojení tvoří můstkové uspořádání čtyř hlavních spínačů tak jako v obr. 3.7. Spínače 1 až 4 jsou tvořeny pomocí tranzistorů a podle aplikace buď unipolárních, nebo bipolárních. Nedílnou součástí každého spínače je antiparalelně zapojená dioda, která je u většiny používaných spínačů již obsažena v pouzdru. H můstek lze několika typy PWM. Nejčastěji se požaduje, aby se smysl otáčení řídil podle znaménka řídicího napětí u_i . Použít lze PWM unipolární nebo bipolární.



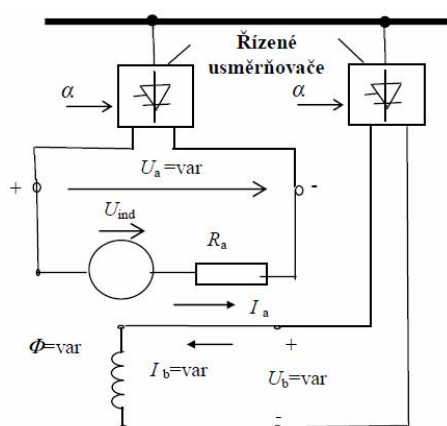
Obr. 3.7 Čtyřkvadrantové řízení PWM modulací [7]

Unipolární modulace je na obr. 3.7 znázorněna středně tenkou charakteristikou. Při tomto druhu modulace se v první části periody sepnou současně spínače 1,2 a v druhé části spínače 3,4. Důležitým stavem této modulace je stav kdy $U_i = 0$, při níž je poměr aktivní části periody k délce periody PWM rovna 1. $T/T_{op} = 1$. Při tomto stavu se střední hodnota napětí na zátěži rovná nule, ale efektní nikoliv. Při tomto stavu se křídél motoru neotáčí, ale protéká jím proud, který se mění na teplo.

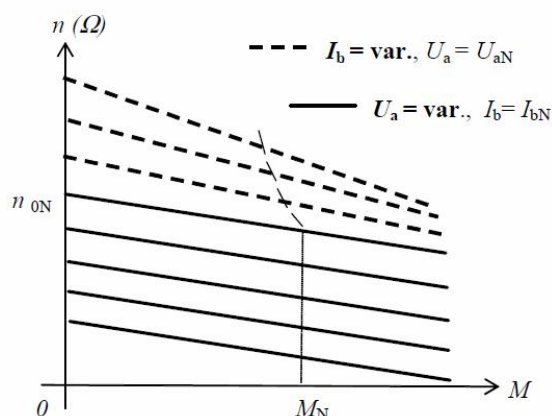
Bipolární modulace PWM je na obr. 3.7 znázorněna tlustou čarou. Spínač 1 je pro kladné řídicí napětí trvale sepnut $T/T_{op} = 1$, spínač 2 je řízený PWM podle obr. 3.7 a spínače 3 a 4 jsou vypnuty. Pro záporná řídicí napětí je trvale sepnut spínač 3 a PWM řídí spínač 4, spínače 1 a 2 jsou vypnuty. Při této modulaci je při nulovém řídicím napětí všechny spínače vypnuty a řízení je téměř ideální. [7]

3.4 Řízením napětím kotvy i budícího proudu statoru

Řízení se provádí změnou magnetického toku. Používá se pro řízení rychlosti motoru ve dvou rozsazích. V rozsahu od nuly po jmenovitou rychlost jde o řízení napětím kotvy při konstantním buzení. Nad rychlost jmenovitou jde o řízení zmenšováním budícího při konstantním jmenovitém napětí, kdy dojde k odbuzování. K realizaci se používá dvou řízených usměrňovačů, jejich zapojení je na obr. 3.4a.



a) Schéma zapojení



b) Mechanické charakteristiky

Obr. 3.4 Řízení rychlosti napětím kotvy U_a a budícím proudem I_b [6]

4 Snímače

Pro řízení stejnosměrných komutátorových motorů je třeba snímat rychlost jejich otáčení, natočení a proud. Které z těchto veličin bude potřeba snímat, závisí na řízené veličině (rychlost/poloha) a na požadované dynamice řízení.

4.1 Snímání proudu

4.1.1 Odporový bočník

Bočník je nejznámější snímač proudu, který je tvořený úsekem vodiče s malým odporem R_b , zařazené do série s měřeným obvodem. Aby měřené napětí na bočníku nezáviselo na kmitočtu proudu, je nutné minimalizovat jeho parazitní indukčnost a kapacity. Proto jsou bočníky pro široké pásmo kmitočtu konstrukčně značně náročné. Dosažení frekvenční chyby převodu menší než 0,1% pro vysoké kmitočty je jen velmi obtížné.

Snímače pro měření velmi malých proudů, řádově pA, se principem neliší od bočníku, avšak jejich odpory dosahují hodnot až TΩ. Aby zapojením velkého R_b nedošlo k ovlivnění činnosti zdroje měřeného proudu, je nutné dodržet nerovnost $R_i \gg R_b$, kde R_i je vnitřní odpor zdroje. Základním požadavkem je, aby spád minimálního měřeného proudu na R_b byl větší než šumové napětí zesilovače, použitého pro zesílení napětí na bočníku. Pro vstupní odpor zesilovače musí platit $R_v \gg R_b$.

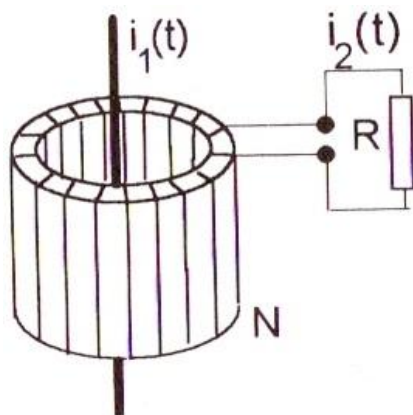
4.1.2 Proudový transformátor

Průvlečný proudový snímač je realizován proudovým transformátorem, který je zobrazen na obr. 4.1. V cestě měřeného proudu je primární vinutí transformátoru s malým počtem závitů, pro velké proudy stačí průvlek vodiče jádrem transformátoru. Jádro transformátoru je odklápěcí, aby nebylo nutné rozpojovat měřený obvod před měřením proudu. Pro průvlečný proudový snímač platí

$$R I_2(t) = M \frac{dI_1(t)}{dt} - L_2 \frac{dI_2(t)}{dt} - R_2 I_2(t) \quad (4.1)$$

kde M je vzájemná indukčnost mezi primárním vodičem a sekundárním vinutím s počtem závitů N , indukčností L_2 a odporem R_2 .

Proudové transformátory se obvykle užívají při měření v rozvodných sítích, pro účely snímačů proudu musí být doplněny obvody pro získání aritmetické střední hodnoty nebo efektivní hodnoty měřeného proudu. Napájení těchto obvodů je většinou odvozeno přímo z měřeného zdroje. Výstupní veličinou je stejnosměrný proud. Tvarové zkreslení a přetížení mohou vést ke značným chybám. [8]



Obr. 4.1 Průvlečný snímač proudu [8]

4.1.3 Snímače proudu s Hallovou sondou

Snímače proudu s Hallovou sondou je jeden z nejpřesnějších snímačů. Magnetické pole vyvolané proudem v okolí vodiče má ve vzdálenosti r od středu tangenciální složku o hodnotě

$$H = \frac{1}{2\pi r} \quad (4.2)$$

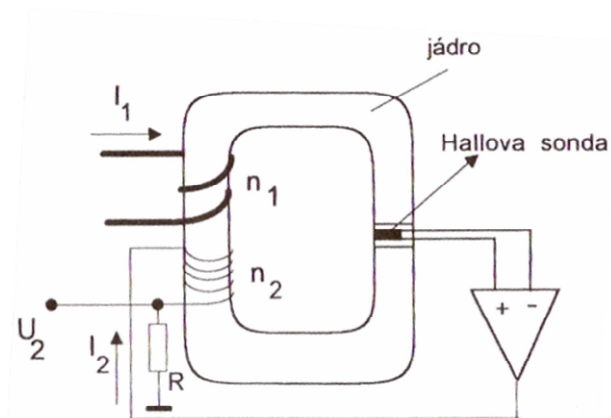
Tangenciální složka H je měřena buď jednou sondou, nebo pro zvýšení citlivosti celou řadou symetricky rozložených Hallových sond. Takto lze měřit pouze velké proudy I , výhodou je linearita a jednoduchá konstrukce.

Známe dva principy takto měřeného proudu:

- princip uzavřené smyčky
- princip otevřené smyčky

Princip uzavřené smyčky

Při tomto principu snímač detekuje odchylku od vyvážené polohy, kterou oproti magnetickému toku primárního vnutí vyrovnává vnutí kolem magnetického obvodu. Výhodou je vysoká přesnost v celé jeho velké šířce pásma a to s vysokou přesností měření (Obr. 4.2a)



Obr. 4.2a Hallová sonda s uzavřenou smyčkou [8]

Indikuje-li Hallova sonda nulové pole v mezeře feromagnetického obvodu, pak platí

$$I_1 n_1 + I_2 n_2 = 0 \quad (4.3)$$

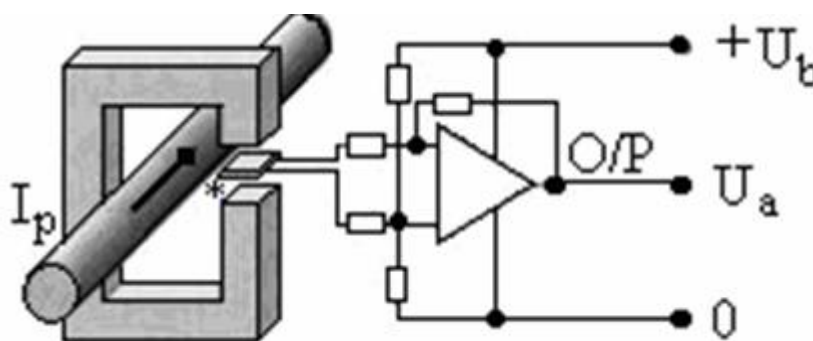
a výstupní napětí U_2 je určeno vztahem

$$U_2 = -R \frac{n_1}{n_2} I_1 \quad (4.4)$$

Kompenzační metoda je vhodná i pro měření malých proudů a vyšší přesnost. Velké proudy v rozsahu jednotek A až několik kA jsou měřeny snímačem bez zpětné vazby, tj. měřením výstupního napětí Hallovy sondy z GaAs nebo InSb umístěné v mezeře o rozměrech 0,2 až 1 mm. Je nutno počítat s chybami nelinearitou a magnetickou remanencí materiálu feromagnetického obvodu. [8]

Princip otevřené smyčky

Pro tento princip je důležitá lineární závislost mezi Hallovým napětím a magnetickým tokem. Výhodou je nízká proudová spotřeba, která není závislá na měřené hodnotě. Tento princip neobsahuje sekundární vinutí, tak jako uzavřená smyčka. Tato smyčka je velmi odolná proti přetížení. (Obr 4.2b)



Obr. 4.2b Hallova sonda s otevřenou smyčkou [8]

4.2 Snímání otáček motoru

Mezi tzv. „snímače otáček“ řadíme absolutní i inkrementální snímače natočení a snímače úhlové rychlosti. Snímače natočení se velmi často používají i k určování rychlosti otáčení (úhlové rychlosti), kdy se počítá rozdíl aktuálního a předchozího natočení. Ale většinu snímačů rychlosti otáčení nelze použít k určování celkového natočení, protože šum těchto snímačů znehodnocuje výsledky integrace.

4.2.1 Tachodynamo

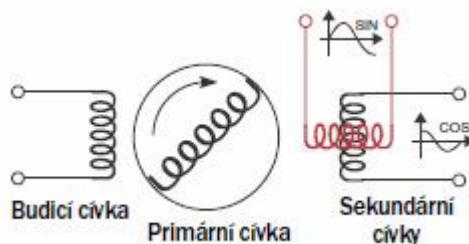
Tachodynamo (obr. 4.3) je stejnosměrný komutátorový generátor obvykle s kovovými kartáči, jehož rotor bývá nasazen na prodlouženém hřídeli motoru. Na kartáčích tohoto generátoru naměříme stejnosměrné napětí úměrné rychlosti otáčení rotoru generátoru.



Obr. 4.3. Rozložené tachodynamo [9]

4.2.2 Resolvery

Resolver je transformátor se dvěma sekundárními cívkami ve statoru, natočenými o 90° , jeho zapojení je na obr 4.4. Primární cívka je součástí rotoru, budicí cívka s externím napájením, která indukuje střídavé napětí. Napětí obou sekundárních cívek se s otáčením rotoru mění podle sinusovky s fázovým posunutím 90° elektrických. Resolver poskytuje přesnou informaci o poloze i rychlosti rotoru. [10]



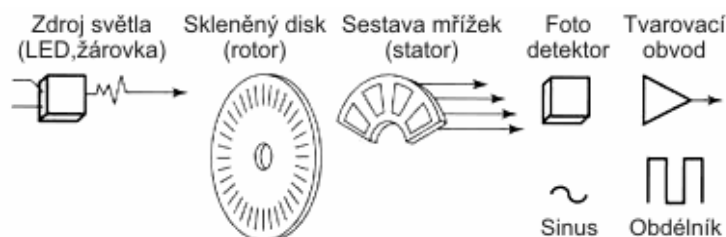
Obr. 4.4. Elektrické schéma revolveru [10]

4.2.3 Inkrementální rotační snímače (IRC)

Rotační inkrementální snímač neboli enkodér, převádí rotační pohyb na elektrické impulzy. Je realizovaný kotoučem se značkami a příslušným snímačem na detekování přítomnosti a nepřítomnosti značky.

Enkodér se používá v jednu, dvou nebo tří-kanálovém provedení. Pro zjištění informace o rychlosti otáčení stačí zjistit počet impulzů za určitý časový úsek, k čemu nám postačí použít pouze jediný kanál. Abychom zjistili i směr otáčení je nutno použít dvou signálů A a B, které jsou od sebe vzájemně posunuty o 90° elektrických stupňů. Třetí kanál se nazývá nulový impuls, který se provede vždy jednou za otáčku. Slouží k zjištění uhlu natočení.

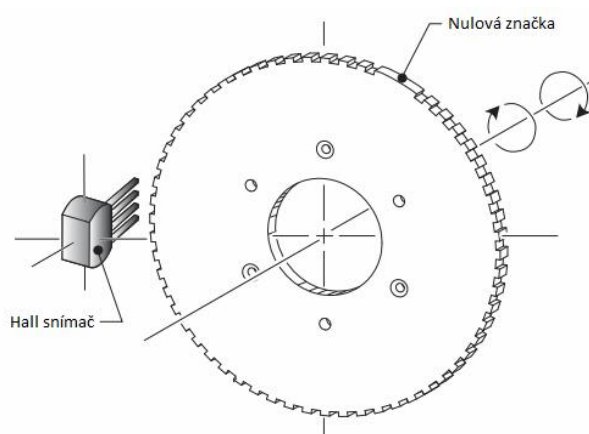
Optický snímač pracuje na principu přerušování paprsku světla mezi zdrojem a snímačem. Světlo je vyzařováno diodou nebo laserem. Pro přijímání signálu jsou využity fotovoltajické součástky, kterou je například fototranzistor. K přerušování paprsku světla se využívá disku, který má po svém obvodu štěrbinu. Tento disk je spojen s hřídelí snímače. Při přerušování světelného paprsku dochází na fotovoltajickém prvku ke generování impulsu. Princip snímače je znázorněn na obr. 4.5. Optické snímače jsou nejpreciznější z používaných snímačů.



Obr. 4.5. Princip funkce inkrementálního rotačního snímače [11]

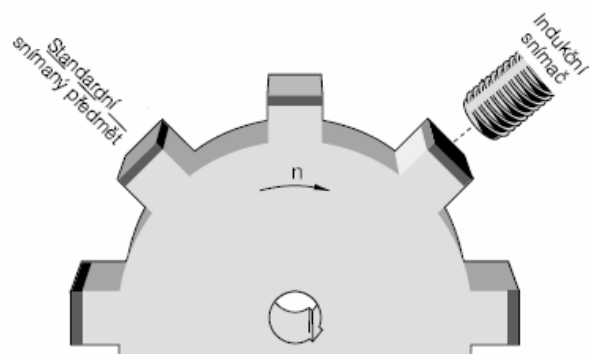
Hall snímače a magnetické značky. Tyto snímače se používají tam, kde optické nejsou vhodné z důvodů náročných pracovních podmínek. Základem snímače jsou dva díly, čip s maticí hallových sond a dvoupólový magnet. Snímač reaguje pouze na složky kolmé k povrchu čipu, takže se snímače dají použít i v prostředí s magnetickým rušením. Hallové sondy snímají změnu magnetického toku a vytvářejí napětí úměrné této změně.

Hall snímače a ozubené kolo. Snímač zde detekuje změnu vzdálenosti, která je způsobena otáčením ozubeného kola kde se střídají výstupky a prohlubně. Měření je realizováno pomocí permanentního magnetu umístěného za Hallovým snímačem. Magnet generuje magnetické pole, jehož velikost se mění podle vzduchové mezeny před snímačem (obr. 4.6).



Obr. 4.6 Hall snímače a ozubené kolo [12]

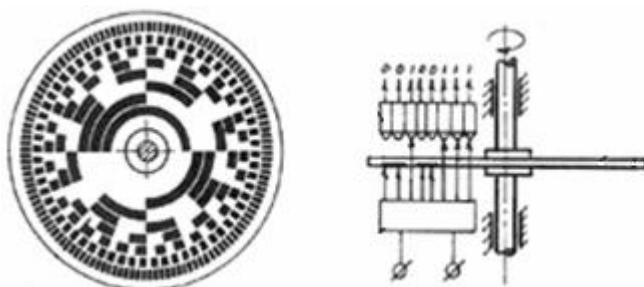
Indukční snímače a ozubené kolo. Tento snímač je založen na vzájemném působení mezi střídavým elektromagnetickým polem a kovovými vodiči. Indukční snímač vyhodnocuje změnu velikosti oscilační amplitudy, která je způsobena odebráním energie z pole vlivem indukovaní vířivých proudů ve snímaném kovovém materiálu (obr. 4.7).



Obr. 4.7 Indukční snímače a ozubené kolo [13]

4.2.4 Absolutní enkodéry

Kromě *inkrementálních* enkodérů máme i tzv. *absolutní*. Zatím co inkrementální enkodéry detekují pouze změnu polohy o pevně daný minimální krok, absolutní enkodéry nám udávají polohu v rámci 360 stupňů. Toho je dosaženo zakódováním každé polohy natočení kotouče, tzn. že každému určitému úhlovému rozsahu odpovídá určitá jedinečná kombinace impulsů. Absolutní enkodéry v optickém provedení potřebují větší počet optických snímačů, jejichž počet odpovídá požadovanému rozlišení. Nejběžnější je provedení dle obr. 4.8, kde kotouč obsahuje 8 paralelních drah. Pro detekci je zapotřebí 8 optických snímačů, kde každý má vlastní dráhu. Pak informace o natočení může být binární posloupnost 11001110. [14, 15]



Obr. 4.8 Princip absolutního optického rotačního enkodéru [15]

5 Principy řízení

5.1 PSD regulátory

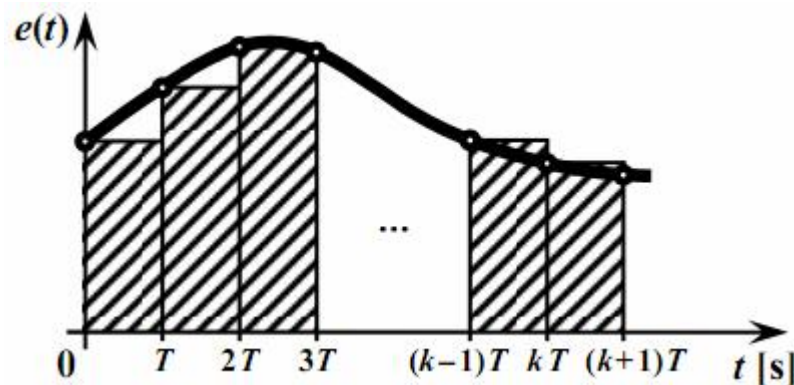
PSD regulátor je odvozen z PID regulátoru [16, 17]. Tvoří jeho diskretní formu a uplatňuje se v diskretních systémech. Spojitý řídicí algoritmus PID regulátoru

$$u(t) = r_0 e(t) + r_1 \int_0^t e(\tau) d\tau + r_2 \frac{de(t)}{dt} \quad (5.1)$$

je pomocí metody zpětné difference nahrazen diskretní verzí

$$u(kT) = r_0 e(kT) + r_1 T \sum_{i=0}^{k-1} e(iT) + r_2 \frac{e(kT) - e[(k-1)T]}{T} \quad (5.2)$$

Značnou nevýhodou tohoto řídicího algoritmu je nutnost si pamatovat veškerou historii regulační odchylky $e(iT)$. Tuto nevýhodu lze obejít pomocí výpočtu akčního zásahu $u(kT)$ v aktuálním k -tém kroku. Náhrada PID regulátoru je znázorněna na obr. 5.1.



Obr. 5.1 Diskretní náhrada regulátoru [16]

Výpočet difference

$$\nabla u(kT) = u(kT) - u[(k-1)T] = b_0 e(kT) + b_1 e[(k-1)T] + b_2 e[(k-2)T] \quad (5.3)$$

kde

$$b_0 = r_0 + \frac{r_2}{T}, \quad b_1 = r_1 T - r_0 - \frac{2r_2}{T}, \quad b_2 = \frac{r_2}{T}$$

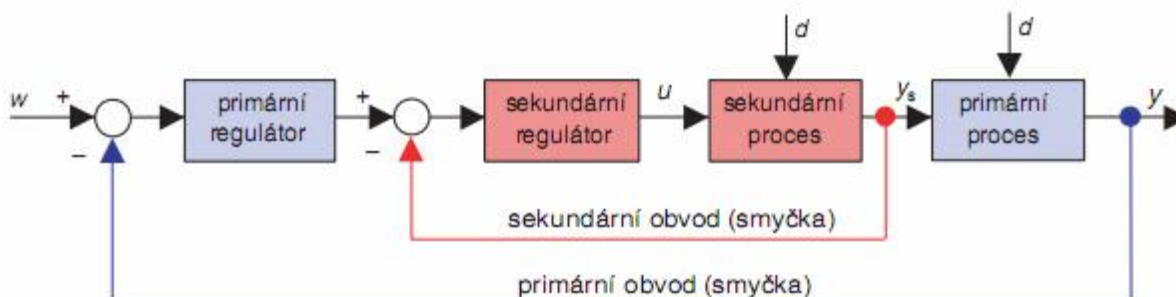
Následným přičtením vypočítané difference k minulé hodnotě akční veličiny získáme její aktuální stav

$$u(kT) = u[(k-1)T] + \nabla u(kT) = u(k) \quad (5.4)$$

Tento upravený algoritmus potřebuje k výpočtu aktuální veličiny pouze dvě starší a současnou hodnotu, čímž se výpočet značně urychluje a odpadají nároky na paměť počítače. Známe-li nastavení spojitého PID regulátoru, tak lze jednoduše nalézt jeho ekvivalent pro PSD regulátor.

5.2 Kaskádové regulátory

Kaskádovou regulaci lze použít jen tehdy, můžeme-li regulovaný proces rozdělit na více samostatných částí. Na část s rychlejší dynamikou a na část s dopravním zpožděním. Základem pro použití kaskády je schopnost měřit výstupy všech částí regulovaného procesu. Kaskádové zapojení působí podstatně rychleji a kvalitněji potlačuje vliv poruchy působící na regulovanou soustavu oproti klasickému jednosmyčkovému PID regulátoru. Kaskádní regulace využívá všechny měřené veličiny jednoho procesu, tím pádem máme větší množství informací než u jednoduchého zapojení. Větší množství informací se projevuje na lepší kvalitě regulace. Při kompenzaci poruchy se projeví až desetinásobně menším přeregulováním a více než třikrát kratší dobou ustálení [18]. Kaskádní zapojení většinou tvoří dvě smyčky: vnější neboli primární smyčka a vnitřní neboli sekundární. Blokové schéma pro dvousmyčkovou kaskádní regulaci je na obr. 5.1.



Obr. 4.8 Uspořádání smyček pro dvoustupňovou kaskádní regulaci [19]

Tři základní výhody při použití kaskády:

První výhodou je potlačení chyby sekundárního procesu před tím, než začne ovlivňovat primární proces. Chyba na primárním procesu bude minimální.

Druhou výhodou je urychlení reakce sekundárního procesu. Časová konstanta přenosu sekundární smyčky je menší než u klasického zapojení regulátoru, a tím se zvýší rychlost odezvy v primární smyčce.

Třetí výhodou je tlumení sekundárního procesu pomocí sekundárního regulátoru a tím se tím se zlepšuje celková regulace.

Z těchto tří důvodů je vidět jasné zlepšení kaskádního zapojení regulátoru oproti klasickému. U smyčkové regulace je vhodné, aby hlavní poruchy celého obvodu působily na sekundární obvod, protože zde je můžeme poměrně rychle a efektivně potlačit. Také je vhodné, aby sekundární smyčka byla rychlejší než primární. Poměr doby ustálení regulačních odezev v primární oproti sekundárním měl být 5. [19]

6 Realizace řízení stejnosměrného motoru

Řízení stejnosměrného motoru jsem realizoval na real-time řídicím systému CompactRIO firmy National Instruments, v grafickém vývojovém prostředí LabVIEW od stejné firmy. Řídicí systém CompactRIO se skládá z real-time počítače s 32bitovým mikroprocesorem, šasi pro připojování modulů typů vstupů, výstupů a komunikačních rozhraní. Propojení real-time počítače s moduly je realizováno prostřednictvím hradlového pole (FPGA) osazeného v šasi. Řízení jsem ověřil na stejnosměrných motorech firmy MAXON a firmy BAUTZ.

Použitá zařízení

Motory a snímače

MOTORY	MAXON DC	BAUTZ DC
Jmenovité napětí [V]	24	24
Průměr [mm]	36	57
Max. otáčky [ot/min]	12000	5300
Jm. krouticí moment [nNm]	70	71
Jmenovitý výkon [W]	70	100

ENKODÉR	AVAGO HEDS-5605#A13
Dílky na otáčku	500
Počet kanálů	2

ZDROJ	COUTANT LAMBAD
Výstupní napětí [V]	24
Max. proud [A]	20
Max výkon [W]	480

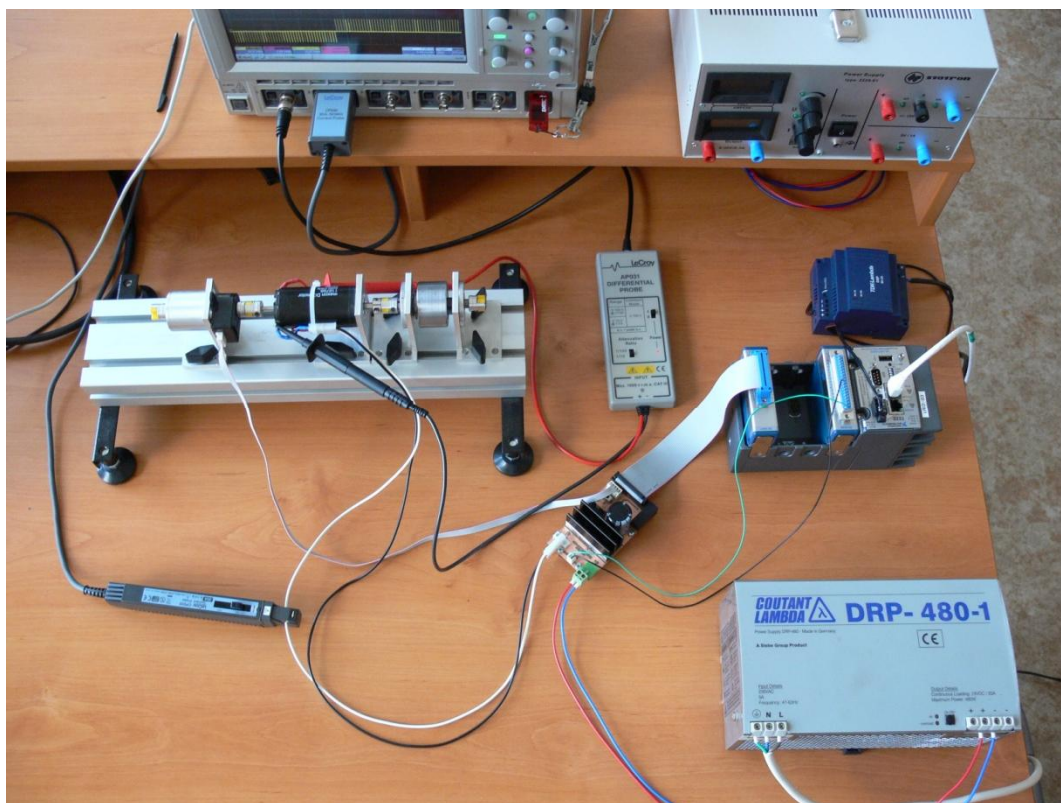
CompactRIO

Procesorový modul	NI cRIO-9022
Processor	32bit, 533 MHz
Vnitřní paměť	FLASH 2GB, RAM 256MB DDR2
USB Port	Hi-Speed
Síťové připojení	2

Chassis	NI cRIO-9111
Sloty pro moduly	4
FPGA	Virtex-5 LX30

Analogové vstupy	NI 9205
Počet vstupů	16
Rozlišení/rychlost	16-bit, 250kS/s
Programovatelné vstupní rozsahy	± 200 mV, ± 1 , ± 5 a ± 10 V

Digitální výstup a pulzní generátor	NI 9401
Počet kanálů	8
Rychlost kanálu	100ns



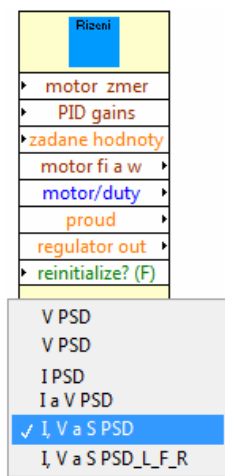
Obr. 6.1 Konfigurace experimentů

6.1 Struktura realizovaného software

Software je rozděleno na dvě aplikace, aplikace pro ovládání vstupů a výstupů je realizována na FPGA a řídicí aplikace, které je realizována na real-time počítači a ovládá motor prostřednictvím FPGA. Komunikace FPGA a real-time aplikace probíhá přímo v režii LabVIEW bez nutnosti realizovat další programový kód. [20]

6.1.1 Začlenění řízení do software

K porovnání různých druhů regulátorů, je třeba tyto regulátory implementovat do hlavního VI „ovládání motoru“. Aby nebylo nutné při každé změně regulátoru přepojovat ostatní komponenty, tak bylo použito polymorfní VI, do kterého lze načíst VI s hotovými regulátory, které pak lze rychle a jednoduše zaměňovat. Polymorfní VI s výběrem některých regulátorů je na obr. 6.3.



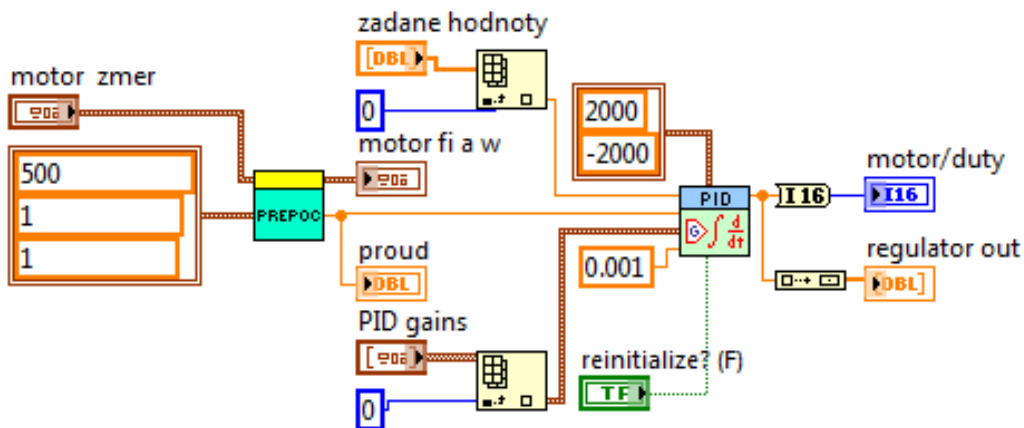
Obr. 6.3 Polymorfní VI

6.2 Realizace řízení

Z důvodu že na počítači nelze sestavit PID regulátor je v LabVIEW realizován PSD regulátor, ale je zde představován jako PID. Tento regulátor jsem použil pro realizaci první regulace. Pro další regulace jsem si sestavil vlastní verze PSD regulátorů.

6.2.1 Zapojení PID regulátoru

Zapojení PID regulátoru je na obr. 6.4. Regulátor má omezený akční zásah, aby nedošlo k případnému poškození hardwaru. Do obvodu vstupuje informace o aktuálním proudu a PID regulátor reaguje na rozdíl zadané a naměřené hodnoty.



Obr. 6.4 Zapojení PID regulátoru

6.2.2 PSD regulátor

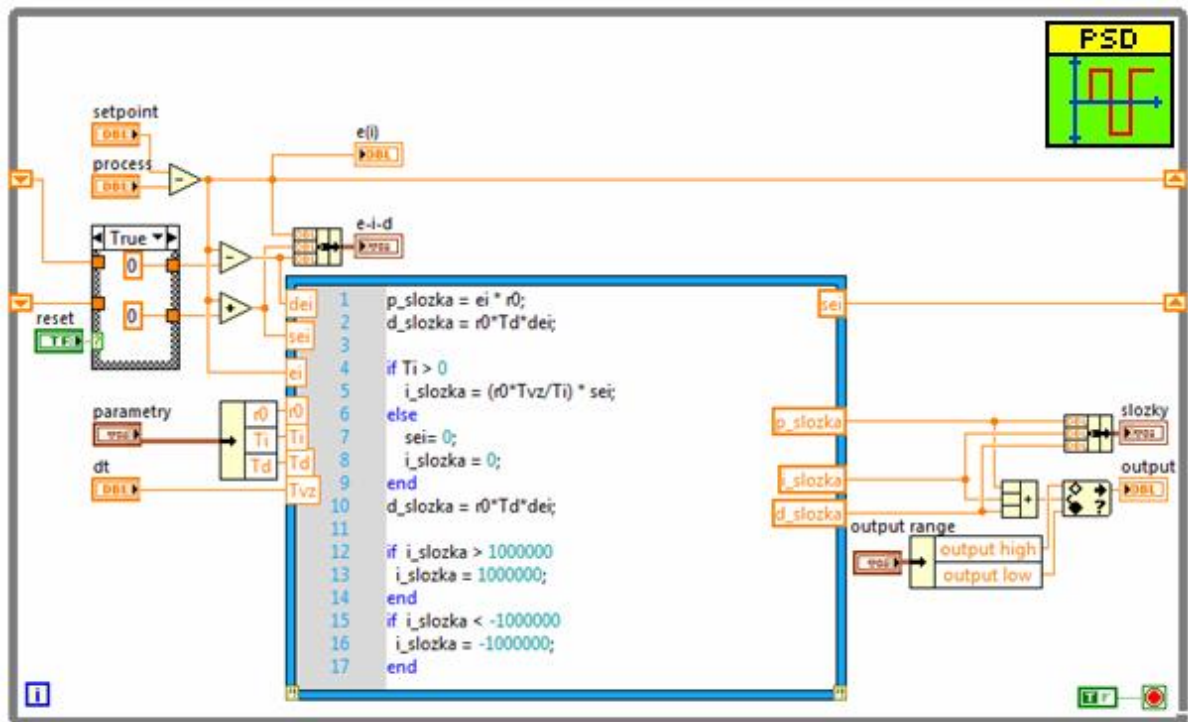
Vlastní PSD regulátor jsem si sestavil pomocí rovnic. K aproximaci integrálu za pomoci obdélníkové metody jsem použil vztah

$$\frac{r_o}{T_i} \int_0^t e(\tau) \approx \frac{r_o T_v}{T_i} \sum_{i=1}^k e(i) = I_O(k) \quad (6.1)$$

Pro derivaci jsem využil aproximaci zpětnou diferencí

$$r_o T_d \frac{de}{dt} \approx r_o T_d (e(k) - e(k-1)) / T_v = D(k) \quad (6.2)$$

Tyto vztahy jsem pomocí matematických bloků a aplikace MathScript zadal do programu a tak si vytvořil VI PSD regulátor (obr. 6.5).



Obr. 6.5 PSD regulátor

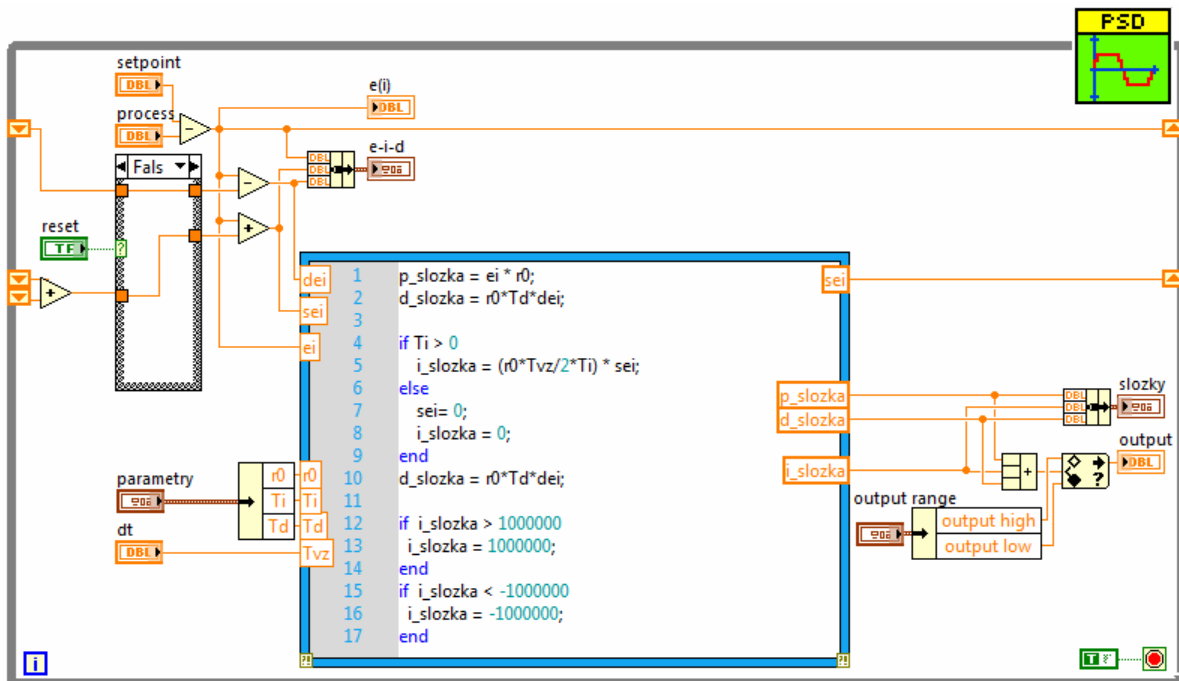
Při změně regulované hodnoty se regulátor snaží vykompenzovat rozdíl mezi zadanou a aktuální veličinou, je-li tento rozdíl příliš velký, tak integrace vzroste na příliš velkou hodnotu a při dosažení žádaného stavu nestihne regulátor tuto integraci eliminovat a překmitne. Z tohoto důvodu jsem integraci omezil.

6.2.3 PSD s lichoběžníkovou metodou

Při nahrazení obdélníkové metody za lichoběžníkovou jsem nezaznamenal výraznější změny v chování regulace. Pro úpravu PSD regulátoru na tento tvar jsem použil vztahu

$$\frac{r_o}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \approx \frac{r_o T_v}{2 T_i} \sum_{i=1}^k (e(i) + e(i-1)) = I_L(k) \quad (6.3)$$

Tato metoda je náročnější na paměť, protože si musíme pamatovat dva předchozí stavy. Tento problém je v LabVIEW jednoduše vyřešen za pomoci Shift Registru, který je schopen si zapamatovat mnoho předchozích stavů (obr 6.6).



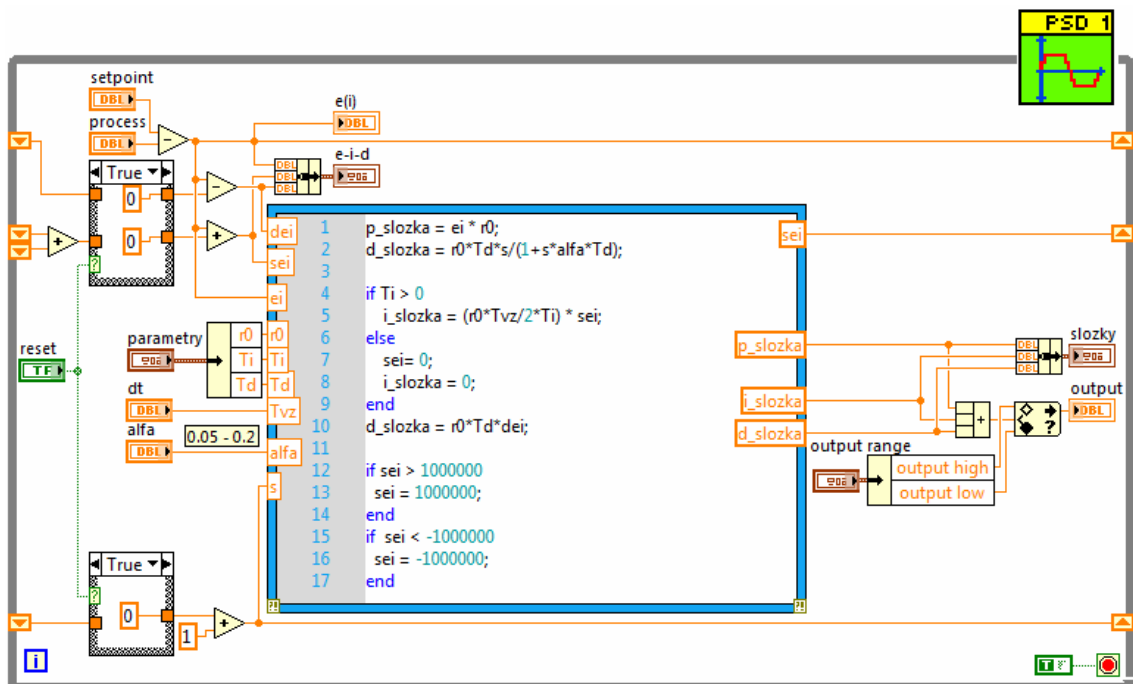
Obr. 6.6 PSD regulátor s lichoběžníkovou metodou.

6.2.4 PSD s aproximovanou derivací a filtrem

Další krok správným směrem přinesla aproximace derivace. Toto řešení je prakticky nepoužitelné z důvodu příliš vysoké citlivosti na šum a jiné rušivé vlivy. Tento problém lze vyřešit dolní propustí prvního nebo druhého řádu. Jako filtraci jsem použil nejjednodušší jednodukapacitní filtr.

$$D(k) = \frac{r_0 T_d k T z}{1 + k \alpha T_d} \quad (6.4)$$

Doporučený rozsah parametru α je mezi 0,05 a 0,2. Zapojení tohoto regulátoru je na obr. 6.7.



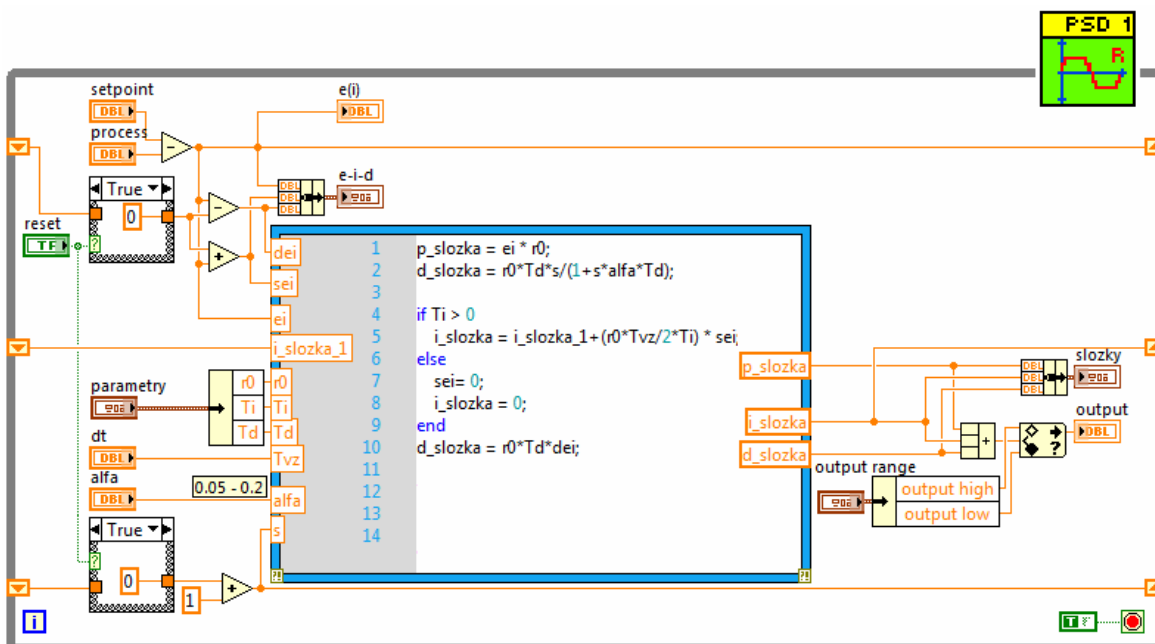
Obr. 6.7 PSD s aproximovanou derivací a filtrem.

6.2.5 PSD s rekurzivní integrací

Jako poslední úpravu jsem zvolil rekurzivní výpočet integrační složky.

$$I_L(k) = I_L(k-1) + \frac{r_o T_v}{2 T_i} (e(k) + e(k-1)) \quad (6.5)$$

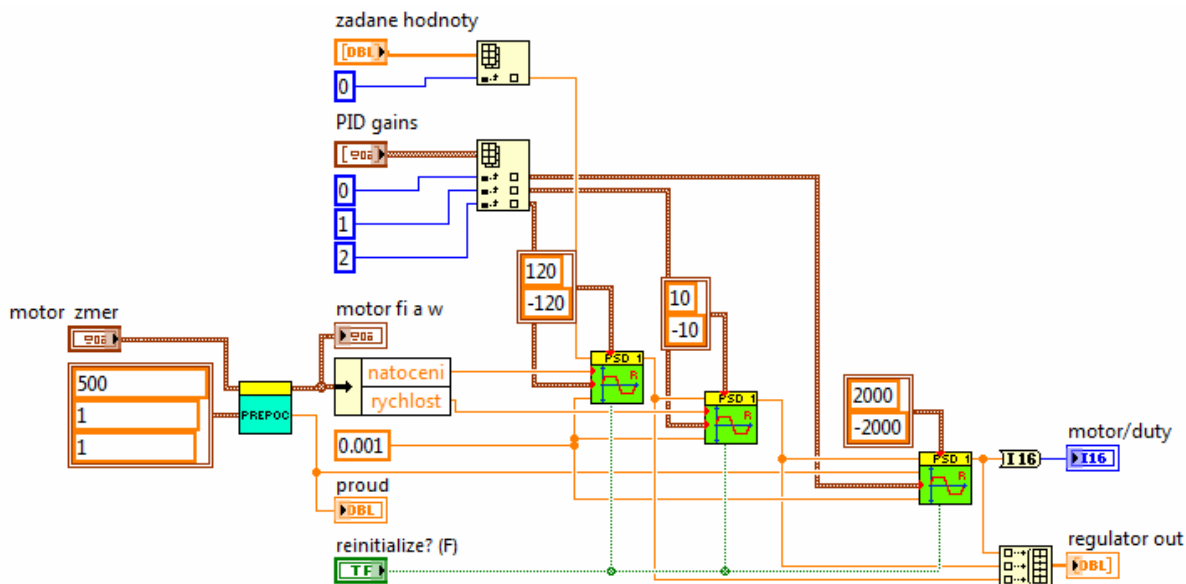
Tato modifikace nevyžaduje pamatování více předchozích stavů. Toto zapojení je na obr. 6.8.



Obr. 6.8 PSD s rekurzivní integrací

6.2.6 Regulace pomocí kaskádového zapojení regulátorů

Abych zlepšil dynamiku regulace, použil jsem kaskádní zapojení regulátorů, tak jako je tomu na obr. 6.8. Kaskádní zapojení lze použít jen za předpokladu, lze-li regulovaný obvod rozdělit na několik částí a je možné měřit výstupní hodnoty každé této části.

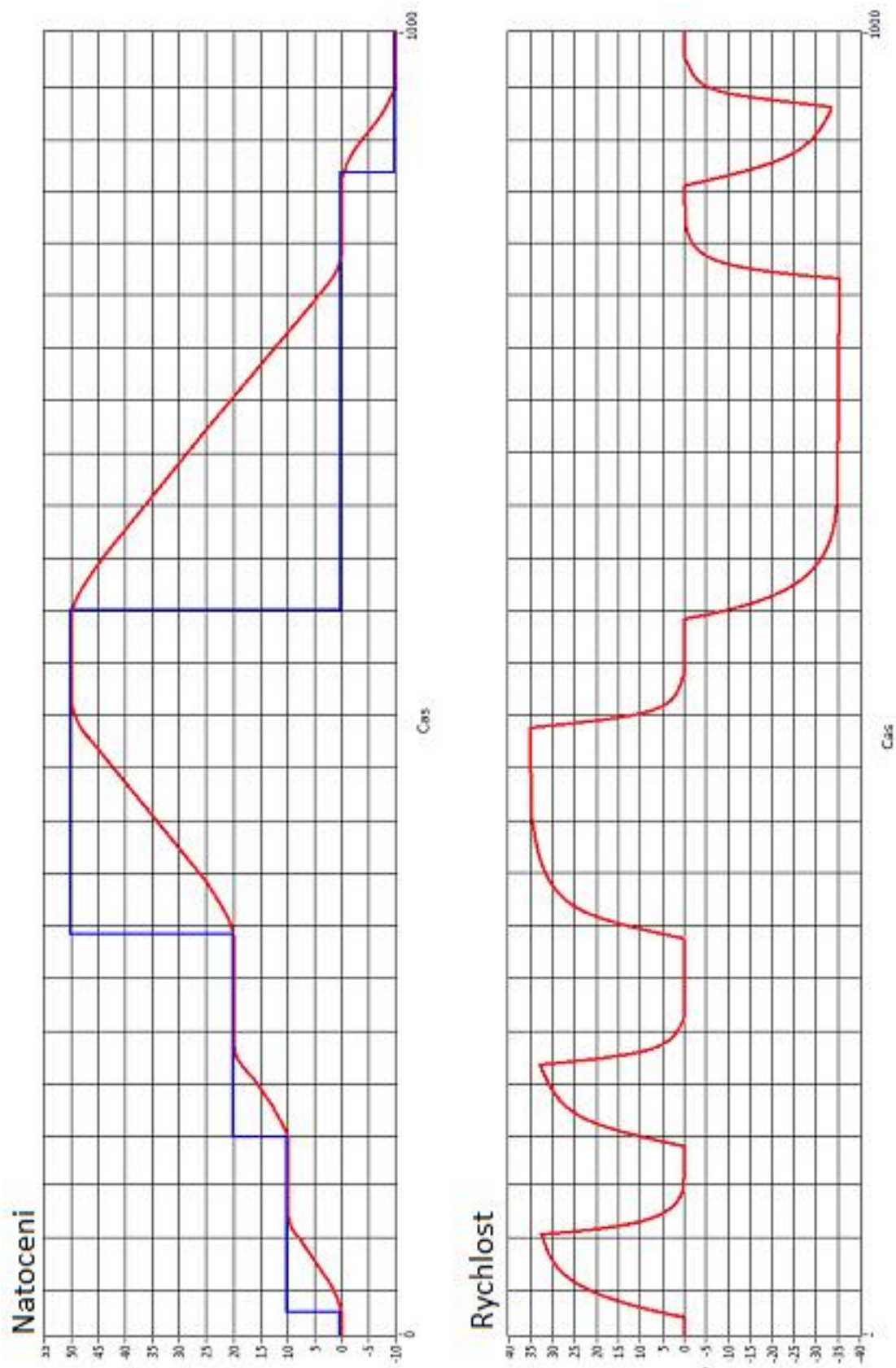


Obr. 6.8 Kaskádní zapojení regulátorů

Při realizaci kaskádového zapojení jsem soustavu rozdělil na tři části: regulace proudu, rychlosti a polohy. Toto zapojení přineslo značné zlepšení regulované soustavy.

6.3 Ověření řízení

Pro ověření správné regulace regulátoru jsem si do grafu vynášel zadanou a aktuální výstupní veličinu. Na obr. 6.9 jsou zobrazena poloha natočení hřídele a ve spodní části rychlost otáčení motoru. Červenou barvou je znázorněna aktuální hodnota dané veličiny a modrou je zakreslena požadovaná hodnota natočení. Při tomto měření jsem použil kaskádní zapojení PSD regulátoru s lichoběžníkovou metodou, aproximovanou derivací filtrem a rekurzivní integrací. Regulátor najíždí do cílové polohy s dobrou přesností a to bez jakýchkoli překmitů. Regulátor také dobře reguluje rychlost otáčení rotoru. Reakce na změnu požadované veličiny je vcelku rychlá a plynulá.



Obr. 6.9 Graf naměřených hodnot

7 Závěr

Práce se zabývá možnostmi řízení stejnosměrných motorů. Na začátku práce je krátký úvod do principu činnosti a konstrukce stejnosměrných elektromotorů, včetně základních typů zapojení statorového vinutí a vynutí kotvy. V další části jsou zpracovány principy řízení rychlostí otáčení rotoru. Řízení pomocí změny celkového odporu v obvodu kotvy se již skoro nepoužívá díky ztrátám, které při tomto způsobu vznikají. Ale rozhodl jsem se ho zmínit z důvodu jeho velkého využívání před příchodem výpočetní techniky. Nyní je mnohem výhodnější a efektivnější využít k řízení PWM modulaci, kterou jsem použil při realizaci řízení stejnosměrného elektromotoru.

Realizaci jsem provedl v grafickém vývojovém prostředí NI LabVIEW. Při sestavování jednotlivých regulátorů jsem vycházel z diskrétního PSD regulátoru a následně jsem ho pomocí získaných poznatků upravoval. Takto získané regulátory jsem nejdříve virtuálně a posléze i prakticky vyzkoušel a sledoval postupné změny v možnostech regulace. Finální regulátor jsem z důvodu dalšího vylepšení zapojil do kaskády, což mi umožnilo motor lépe regulovat za pomoci současné regulace proudu, rychlosti i polohy.

Při sestavování regulátoru jsem získanou integraci omezil z důvodů jejího velkého růstu při větších skokových změnách požadované veličiny. Tento problém by byl zapotřebí dále prostudovat a vyřešit jej efektivnějším způsobem než jsem aplikoval v této práci. Pro měření proudu by bylo vhodné sestavit filtr k eliminaci šumu, což by vedlo k získání přesnějších výsledků a bylo by možné soustavu lépe regulovat.

8 Literatura

- [1] KUSALA, J. Svět energie [online]. 2003 [cit. 2010-05-20]. Dostupné z: <<http://www.cez.cz/edee/content/microsites/elektrina/fyz7.htm>>
- [2] Elektrina a magnetismus [online], [cit. 2010-01-13]. Dostupné z: http://www.vossost.cz/svab/elektross/elmotor_magnet/dc_elmotor.html>
- [3] Step motor & Servo motor Systems and controls. Compumotor.1996/1997. 114 s. [cit. 2010-03-19].
- [4] MAXON, Malé stejnosměrné motory [online], poslední revize 18.07.2002, [cit. 201005-09]. Dostupné z: <http://www.uzimex.cz/soubory/20070103_maxon_serial.pdf>
- [5] PAVELKA, J. Elektrické pohony. Praha: ČVUT, 2007. 222 s. ISBN: 978-80-01-03588-7.
- [6] SKALICKÝ, J. Elektrické servopohony. Brno: VUT V Brně, 1999. 86 s. ISBN 80-214-1484-7
- [7] VYSOKÝ, O. Elektronické systémy II [online]. [cit. 2010-05-23]. Dostupné z: <<http://dce.felk.cvut.cz:8085/vysoky/skripta/e8.pdf>>
- [8] ĎAŘO, S. Senzory a měřicí obvody. ČVUT, 1996. 316s ISBN 80-01-02057-6
- [9] MAXON MOTOR, *Tachodynamá - Snímače - maxon motor agl*. [online], poslední revize 2006, [cit 18.05.2010] Dostupné z: <<http://www.uzimex.cz/Vyrobce/maxon-motor-ag/Snimace/Tachodynamata.html>>
- [10] MAXON MOTOR, *Resolvery - Snímače - maxon motor agl*. [online], poslední revize 2006, [cit 18.05.2010] Dostupné z: <<http://www.uzimex.cz/Vyrobce/maxon-motor-ag/Snimace/Resolvery.html>>
- [11] Ritek s.r.o. [online]. [cit. 2010-05-22]. Dostupné z: <<http://www.ritek.cz/odmerovani.htm>>
- [12] Allegro Microsystems, 2010, [online], [cit 2010-05-28]. Dostupné z: <http://www.allegromicro.com/en/Products/Part_Numbers/0616/0616.pdf>
- [13] Balluf [online], [cit 2010-05-12]. Dostupné z: <http://www.balluff.cz/bes_principy-funkce-definice.asp>
- [14] Avago Technologies, [online], 2010, [cit 2010-05-17]. Dostupné z: <http://www.avagotech.com/pages/en/motion_control_encoder_products/absolute_encoder/s/>
- [15] Schmachtl [online], 2009, [cit 2010-05-14]. Dostupné z: http://jonatan.spse.pilsedu.cz/~mazanec/opticke_ekodery.htm
- [16] Technická univerzita v Liberci, [online], 2010, [cit 2010-05-25]. Dostupné z: <<http://www.mti.tul.cz/files/zsr/cislicove-rizeni-PSD-regulator.pdf>>
- [17] HLAVA, J. TU Liberec, Číslicové PID regulatory, [online], [cit 2010-05-26]. Dostupné z: <<http://www.fm.tul.cz/~krtsub/fm/par/digitalPID.pdf>>

[18] SEBORG, D. – EDGAR, T. – MELLICHAMP, D. :Process Dynamics and Control. John Wiley-Sons 1989

[19] VELTERA, J. [online], 2010, [cit 2010-05-25], Dostupné z: <http://valter.byl.cz/Pdf/metody_pi.pdf>

[20] National Instruments Corporation, 2010, [2010-05-28], Dostupné z: <http://digital.ni.com/worldwide/czech.nsf/web/all/2CFA972502BEED1186256FF500494D65?OpenDocument&node=202268_cs>