

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Bakalářská práce

Bakalářská práce
2013

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Servomechanismus s analogovým PID regulátorem

Ondřej Daniš

Bakalářská práce

2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ondřej Daniš**
Osobní číslo: **I09328**
Studijní program: **B2646 Informační technologie**
Studijní obor: **Řízení procesů**
Název tématu: **Servomechanismus s analogovým PID regulátorem**
Zadávající katedra: **Katedra řízení procesů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem práce je návrh a realizace servomechanismu se stejnosměrným motorem. Práce bude koncipována jako modulární laboratorní úloha. To znamená, že konstrukční řešení bude umožňovat laborování a demonstraci návrhu servomechanismu se stejnosměrným motorem ve výuce předmětů specializace. Důležité nastavovací prvky a měřící body budou snadno přístupné pro případné nastavování a měření. Zpětná vazba bude realizována například potenciometrickým snímačem. Regulace polohy natočení hřídele motoru bude zajištěna analogovým PID regulátorem. Ke konstrukci analogového PID regulátoru budou použity operační zesilovače. Výsledkem návrhu bude příslušná výrobní dokumentace této konstrukce.

Teoretická část:

- rešerše tématu,
- popis činnosti servomechanismu,
- popis realizace pohonu stejnosměrného motoru,
- opis struktury analogového PID regulátoru.

Implementační část:

- návrh konstrukčního řešení,
- realizace servomechanismu,
- testování servomechanismu.

Požadavky na studenta: Základní orientace v návrhu elektronického a mechanického systému. Práce s CAD softwarem pro návrh plošných spojů Eagle. Základní dovednosti v osazování a oživování plošných spojů.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Punčochář Josef, Operační zesilovače v elektronice, BEN - technická literatura, Praha 2002

Dostál Jiří, Operační zesilovače, BEN - technická literatura, Praha 2005

Kabeš Karel, Operační zesilovače v automatizační technice, Praha, Stát. nak. techn. lit., 1989

Záhlava Vít, Návrh a konstrukce DPS, BEN - technická literatura, Praha 2011

Plíva Zdeněk, Eagle Prakticky, BEN - technická literatura, Praha 2010

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Libor Havlíček, Ph.D.

Katedra řízení procesů

Datum zadání bakalářské práce:

20. prosince 2012

Termín odevzdání bakalářské práce:

10. května 2013



prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.

děkan



L.S.



Ing. Daniel Honc, Ph.D.

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 29. března 2013

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 15.8.2013

Ondřej Daniš

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Liboru Havlíčkovi Ph.D, za poskytnuté odborné rady, dále pak všem ostatním lidem, kteří mě podporovali během studia.

Anotace

Cílem této práce byl návrh a realizace analogového PID regulátoru, který bude pomocí PWM signálu ovládat servopohon.

Klíčová slova

PID regulátor, regulace, H-můstek, generátor pilovitého napětí

Title

Servomechanism with analog PID controller

Annotation

Aim of this thesis was creating of analog PID controller that/which will by PWM signal control servopohon.

Keywords

PID regulator, regulation, H-bridge, sawtooth voltage generator

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK.....	11
ÚVOD.....	12
1 TEORETICKÁ ČÁST.....	13
1.1 REŠERŠE TÉMATU	13
1.2 REGULÁTORY	15
1.2.1 <i>P-regulátor</i>	15
1.2.2 <i>I-regulátor</i>	15
1.2.3 <i>D-regulátor</i>	16
1.2.4 <i>PID regulátor</i>	16
1.3 ZAPOJENÍ OPERAČNÍCH ZESILOVAČŮ	18
1.3.1 <i>Invertující (proporcionální) zesilovač</i>	18
1.3.2 <i>Součtový zesilovač – sumátor</i>	19
1.3.3 <i>Rozdílový (diferenční) zesilovač</i>	19
1.3.4 <i>Komparátor</i>	20
1.3.5 <i>Integrační zesilovač</i>	21
1.3.6 <i>Derivační zesilovač</i>	21
1.4 H-MŮSTEK	22
1.5 ZDROJ STABILIZOVANÉHO NAPĚTÍ	23
1.6 PWM.....	24
1.6.1 <i>Pulsně šířková modulace</i>	24
1.6.2 <i>PWM ve výkonové elektronice</i>	25
1.7 BLOKOVÉ SCHÉMA REGULAČNÍHO OBVODU	25
1.8 STEJNOSMĚRNÝ MOTOR.....	26
1.9 ROZDĚLENÍ SS MOTORŮ.....	27
2 PRAKTICKÁ ČÁST	28
2.1 BLOKOVÉ SCHÉMA OVLÁDÁNÍ.....	28
2.2 ROZDÍLOVÝ ZESILOVAČ.....	29
2.2.1 <i>LM358N</i>	29
2.3 P-REGULÁTOR.....	29
2.4 I-REGULÁTOR.....	30
2.5 D-REGULÁTOR	30
2.6 SUMATOR	31
2.7 GENERÁTOR PILOVITÉHO NAPĚTÍ	31

2.7.1	CA3140N	32
2.8	KOMPARÁTOR	32
2.8.1	LM311N.....	33
2.9	LOGICKÉ OBVODY	33
2.9.1	HEF40106B.....	34
2.10	H-MŮSTEK	34
2.11	MOTOR	35
2.12	ZDROJ STABILIZOVANÉHO NAPĚTÍ	36
2.13	PLOŠNÝ SPOJ PID REGULÁTORU	36
2.14	PLOŠNÝ SPOJ VÝKONOVÉHO ČLENU	38
2.15	TESTOVÁNÍ	40
3	ZÁVĚR	42
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	43
	PŘÍLOHA A – SCHÉMA ZAPOJENÍ ZDROJE STABILIZOVANÉHO NAPĚTÍ	1
	PŘÍLOHA B – SCHÉMA ZAPOJENÍ PID REGULÁTORU	1
	PŘÍLOHA C – SCHÉMA ZAPOJENÍ VÝKONOVÉHO ČLENU	1

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Třicestný ventil s regulátorem	13
Obrázek 2 - Elektrický pohon SIEMENS.....	13
Obrázek 3 - Schéma zapojení servomechanismu	14
Obrázek 4 - Servopohon SE4M24	14
Obrázek 5 - Blokové schéma PID regulátoru	16
Obrázek 6 - Odezva regulátorů na jednotkový skok.....	17
Obrázek 7 - Invertující zapojení operačního zesilovače	18
Obrázek 8 - Součtový operační zesilovač	19
Obrázek 9 - Diferenční operační zesilovač	20
Obrázek 10 - Komparátor	20
Obrázek 11 - Integrátor.....	21
Obrázek 12 - Derivační operační zesilovač	22
Obrázek 13 - Vypnutý H-můstek.....	22
Obrázek 14 - Sepnutý H-můstek.....	23
Obrázek 15 - Opačně sepnutý H-můstek	23
Obrázek 16 - Blokové schéma zdroje stabilizovaného napětí	23
Obrázek 17 - PWM modulace	24
Obrázek 18 - Blokové schéma regulačního obvodu	25
Obrázek 19 - Princip stejnosměrného motoru	26
Obrázek 20 - Blokové schéma ovládání	28
Obrázek 21 - Zapojení diferenčního operačního zesilovače.....	29
Obrázek 22 - Zapojení pinů LM358	29
Obrázek 23 - P-regulátor.....	30
Obrázek 24 - I-regulátor	30
Obrázek 25 - D-regulátor	30
Obrázek 26 - Sumátor	31
Obrázek 27 - Generátor pilovitého napětí.....	32
Obrázek 28 - Zapojení pinů CA3140N.....	32
Obrázek 29 - Komparátor	33
Obrázek 30 - Zapojení pinů LM311	33
Obrázek 31 - Logické obvody	34
Obrázek 32 - Zapojení pinů 40106	34

Obrázek 33 - H-můstek.....	35
Obrázek 34 - Zapojení svorkovnic zdroje stabilizovaného napětí.....	36
Obrázek 35 - Zdroj stabilizovaného napětí.....	36
Obrázek 36 - Zapojení svorkovnic PID regulátoru.....	37
Obrázek 37 - PID regulátor.....	38
Obrázek 38 - Zapojení svorkovnic výkonového členu	38
Obrázek 39 - Výkonový člen	39
Obrázek 40 - Závislost úhlu natočení servomechanismu podle žádané hodnoty	41
Obrázek 41 - servomechanismus s analogovým PID regulátorem	41

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Stabilizátory.....	24
Tabulka 2 - Úhel natočení servomechanismu podle žádané hodnoty.....	40

Úvod

Cílem této bakalářské práce byla realizace servomechanismu se stejnosměrným motorem. Servomechanismus se ovládá potenciometrem, který udává úhel natočení servomechanismu. Jako regulátor je použit analogový PID regulátor. Každá složka PID regulátoru se nastavuje samostatně a lze tedy demonstrovat vliv jednotlivých složek na výslednou kvalitu regulace. Výstup PID regulátoru se pomocí komparátoru a generátoru pilovitého napětí zakóduje do PWM signálu. Dále se PWM signál zpracovává pomocí logických obvodů do stavu, že když je střída PWM signálu 50 - 50 tak se stejnosměrný motor netočí. Pokud je střída jiná motor se otáčí na jednu nebo na druhou stranu.

V úvodu práce jsou uvedeny 3 příklady servomechanismů od různých firem. Tyto servomechanismy se od sebe liší dobou přestavení a řídicími signály. Každý se ovládá jinými unifikovanými signály, některé mají možnost si vybrat i z více druhů ovládání. Dále je zde popis a funkce jednotlivých regulátorů a poté jejich realizace pomocí operačních zesilovačů plus další použitá zapojení operačních zesilovačů. Poté je zde vysvětlena funkce a úloha H-můstku.

V druhé části je blokové schéma zdroje stabilizovaného napětí, princip PWM modulace i její použití ve výkonové elektronice a v poslední části první kapitoly je vysvětlen princip funkce stejnosměrného motoru a jejich rozdělení.

V druhé části praktické části je uvedena možná realizace jednotlivých plošných spojů i se schémata zapojených svorkovnic.

V přílohách se nacházejí schémata zapojení jednotlivých plošných spojů i s hodnotami součástek.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 REŠERŠE TÉMATU

Spojitém ovládáním servomechanismu se zabývá dnes celá řada firem.

Příkladem může být firma ZEFIN s.r.o. která nabízí ventily se servomechanismem. Regulátor je umístěn přímo na ventilu a ovládá se unifikovaným signálem 0 - 10 VDC, 4 - 10 VDC nebo 4 - 20 mA DC a napájen je 24 VAC. Doba přestavění takového ventilu je menší než 2 s. Takovýto ventil se hodí například pro míchání topné a chladicí kapaliny. Celá sestava obsahuje směšovací nebo přímý ventil, na kterém je namontován magnetický pohon a elektrický modul pro řízení polohy ventilu a zpětnou vazbu od polohy (př.: MXG 461.15-0,6) [1].

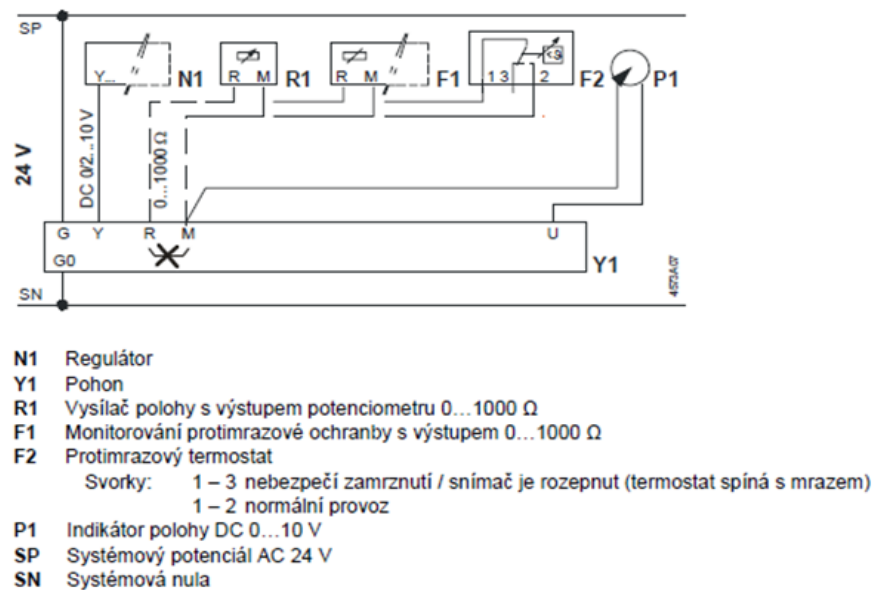


Obrázek 1 - Třícestný ventil s regulátorem

Firma UNIMAR CZ s.r.o. nabízí servopohon SIEMENS SQS 65.5. Tento pohon se řídí unifikovaným signálem 0 - 10 VDC a je napájen napětím 24 VAC. Montáž se provádí přímo na ventil. Celý servopohon je vybaven regulátorem, pohonem, vysílačem polohy 0 - 10 VDC a protimrazovým termostatem. Servopohon se dá použít jak na přímý tak na třícestný regulační ventil se zdvihem 5,5 mm [2].



Obrázek 2 - Elektrický pohon SIEMENS



Obrázek 3 - Schéma zapojení servomechanismu

Firma Hydronic Systems Prague s. r. o. nabízí servopohon SE4M24. Tento regulátor se spojitě řídí signály 0 - 10 V, 2 - 10 V, 0 - 4 V, 6 - 10 V, 4 - 20 mA a doba přestavění je 70 s. Ovládací pohon má sílu 400 N je napájen 24 VAC a příkon je 7,5 AV. Pracovní zdvih činí 5,5 mm. Servopohon je vybaven multifunkčním LED indikátorem. Zařízení se montuje přímo na ventil pomocí 3/4 " matice [3].



Obrázek 4 - Servopohon SE4M24

1.2 REGULÁTORY

1.2.1 P-REGULÁTOR

P-regulátor je jen zesilovač, který zesiluje regulační odchylku. Proto nejjednodušší realizace P-regulátoru je zapojení s operačním zesilovačem se zápornou zpětnou vazbou. P-regulátor má v ideálním případě na skokovou změnu skokovou odezvu. Používá se jen v jednodušších případech regulací, kde regulovaná soustava vykazuje astatické chování [4].

Rovnice přenosu

$$u = r_0 e \quad (1.1)$$

kde u - akční veličina
 r_0 - činitel zesílení
 e - regulační odchylka

Za použití Laplaceovy transformace

$$F_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = r_0 = K_R \quad (1.2)$$

kde $F_R(s)$ - obraz funkce
 $U(s)$ - obraz akční veličiny
 $E(s)$ - obraz regulační odchylky
 K_R - konstanta zesílení

1.2.2 I-REGULÁTOR

Akční veličina vystupující z I-regulátoru je přímo úměrná integrálu regulační odchylky. I-regulátor umožňuje trvalé odstranění regulační odchylky. V regulované soustavě většinou dochází k překmitům, a proto se hodí spíše pro soustavy s velkou setrvačností [4].

$$u = r_i \int_0^t e \, d\tau \quad (1.3)$$

kde r_i - integrační konstanta

$$F_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{r_i}{s} = \frac{1}{T_i s} \quad (1.4)$$

kde T_i - časová konstanta

1.2.3 D-REGULÁTOR

Akční složka D-regulátoru je přímo úměrná derivaci regulační odchylky. Čistý D-regulátor nelze realizovat, protože by výstupem musel být Diracův impulz (a ten není možné technicky realizovat). D-regulátor se používá pro zrychlení regulačního děje, ale zesiluje šum. D-regulátor se nikdy samostatně nepoužívá [4].

$$u = r_d \cdot \frac{de}{dt} \quad (1.5)$$

kde r_d - derivační konstanta

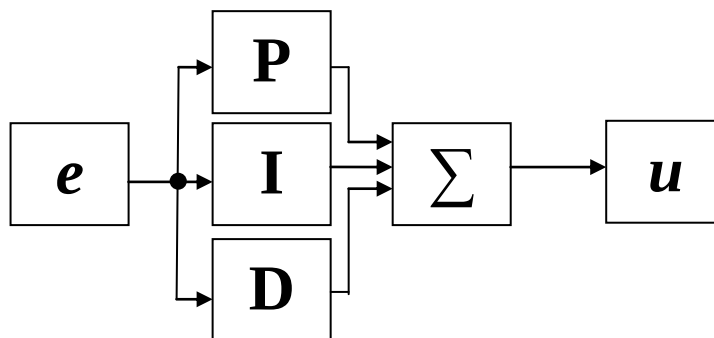
$$F_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = r_d s \quad (1.6)$$

1.2.4 PID REGULÁTOR

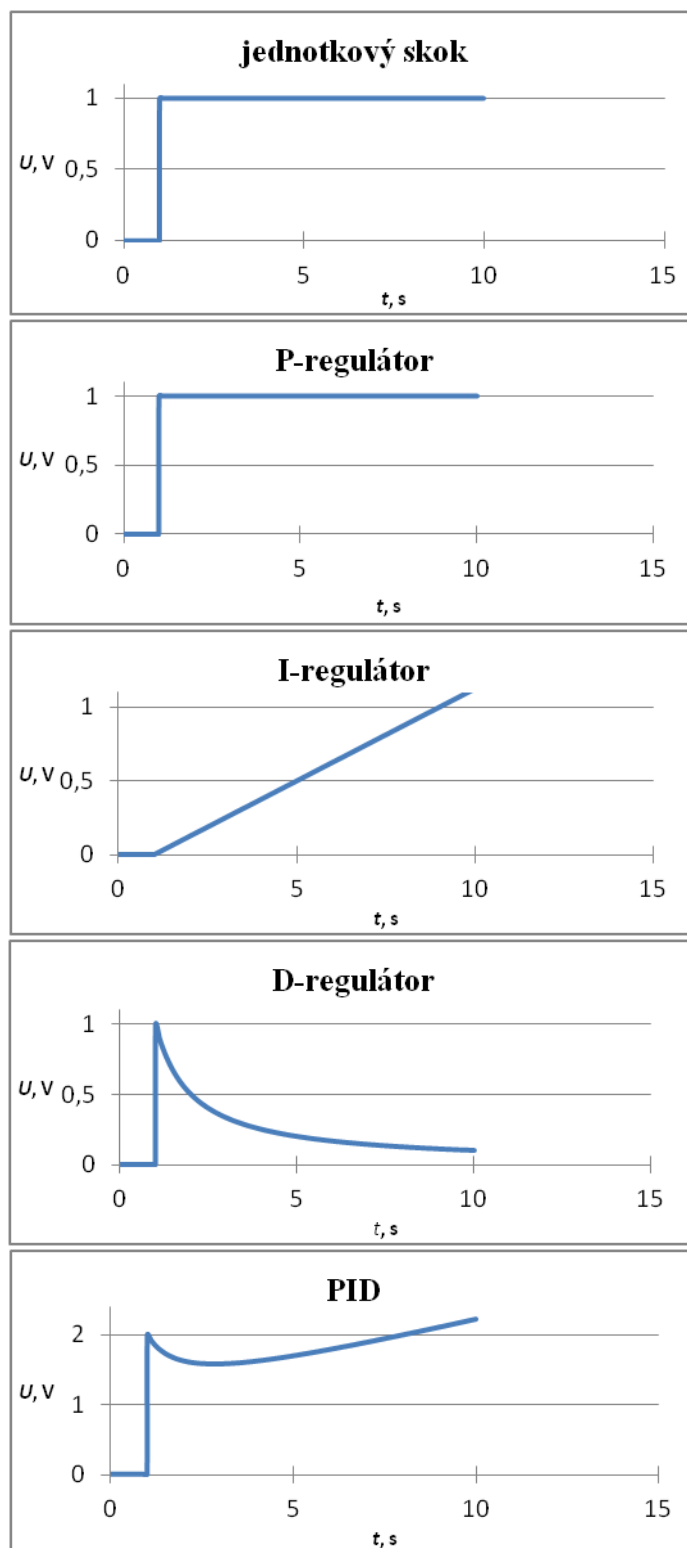
PID regulátor se skládá z P-regulátoru, I-regulátoru a D-regulátoru. Výstupy z těchto regulátorů se sečtou a tím vznikne PID regulátor [4].

$$u = r_0 e + r_i \int_0^t e \, dt + r_d \frac{de}{dt} \quad (1.7)$$

$$F(s) = r_0 + \frac{r_i}{s} + r_d s = K_R \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (1.8)$$



Obrázek 5 - Blokové schéma PID regulátoru



Obrázek 6 - Odezva regulátorů na jednotkový skok

1.3 ZAPOJENÍ OPERAČNÍCH ZESILOVAČŮ

1.3.1 INVERTUJÍCÍ (PROPORCIONÁLNÍ) ZESILOVAČ

Jedno ze základních zapojení operačního zesilovače. Vstupní napětí přivádíme přes rezistor na invertující vstup. Ve zpětné vazbě je zapojený rezistor, kterým protéká proud. A pro výpočet výsledného zesílení musíme vycházet z předpokladu, že ideální operační zesilovač má nekonečný vstupní odpor. Poté platí rovnice kde je proud protékající invertujícím vstupem operačního zesilovače. A tento proud se u ideálního operačního zesilovače rovná 0 [5].

$$I_1 + I_2 = 0 \quad (1.9)$$

$$I_1 = \frac{U_{\text{vst}}}{R_1}, I_2 = \frac{U_{\text{výs}}}{R_2} \quad (1.10)$$

$$\frac{U_{\text{vst}}}{R_1} + \frac{U_{\text{výs}}}{R_2} = 0 \Rightarrow \frac{U_{\text{vst}}}{R_1} = -\frac{U_{\text{výs}}}{R_2} \quad (1.11)$$

$$Au = \frac{U_{\text{výs}}}{U_{\text{vst}}} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (1.12)$$

kde I_1 - proud protékající rezistorem

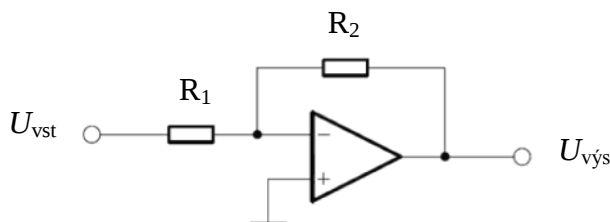
I_2 - proud protékající rezistorem

U_1 - napětí na rezistoru

U_2 - napětí na rezistoru

Au - zesílení

Výsledné zesílení je dáno poměrem rezistorů a ale dojde k posunu fáze signálu o 180° .



Obrázek 7 - Invertující zapojení operačního zesilovače

1.3.2 SOUČTOVÝ ZESILOVAČ – SUMÁTOR

Sumátor vznikne ze základního invertujícího zapojení zesilovače, jestliže vstupní odpor nahradíme rezistorovou sítí , , . Vstupní proud I vstupující do invertujícího vstupu se rovná součtu dílčích proudů protékajících rezistory , , .

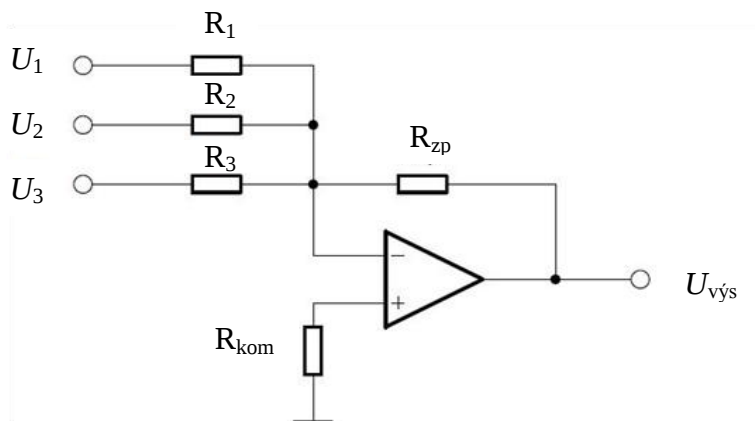
$$I = I_1 + I_2 + I_3 = \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3} \quad (1.13)$$

$$U_{\text{vys}} = - \left(\frac{R_{\text{zp}}}{R_1} U_1 + \frac{R_{\text{zp}}}{R_2} U_2 + \frac{R_{\text{zp}}}{R_3} U_3 \right) \quad (1.14)$$

Jsou li hodnoty všech rezistorů stejné $R_1 = R_2 = R_3 = R_{\text{zp}}$ tak výstupní napětí U_{vys} je dáno vztahem $U_{\text{vys}} = - (U_1 + U_2 + U_3)$.

Kompenzační rezistor (R_{kom}) na neinvertujícím vstupu je nezbytný pro zachování nulového potenciálu na společném bodě všech rezistorů. Kompenzační rezistor lze spočítat jako paralelní spojení všech rezistorů [5].

$$\frac{1}{R_{\text{kom}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_{\text{zp}}} \quad (1.15)$$



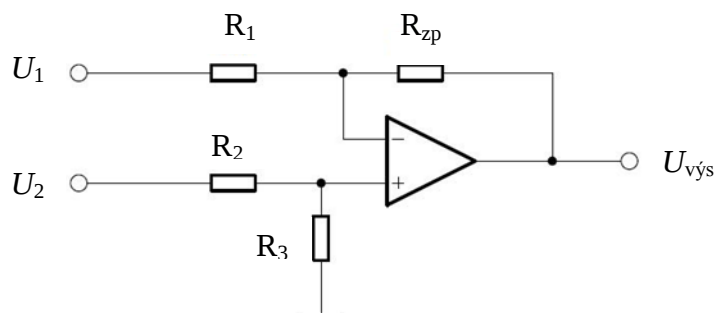
Obrázek 8 - Součtový operační zesilovač

1.3.3 ROZDÍLOVÝ (DIFERENČNÍ) ZESILOVAČ

Při tomto typu zapojení se zesiluje rozdíl vstupních napětí na vstupech operačního zesilovače. Invertující vstup zesiluje vstupní napětí a neinvertující vstup zesiluje vstupní napětí . Má-li se zesilovat jen rozdíl vstupních napětí, musí poměr rezistorů a být stejný jako poměr rezistorů a . To znamená že $\frac{R_{\text{zp}}}{R_1} = \frac{R_3}{R_2}$. Je-li tato podmínka dodržena pak

lze spočítat pomocí rovnice (1.16) [5].

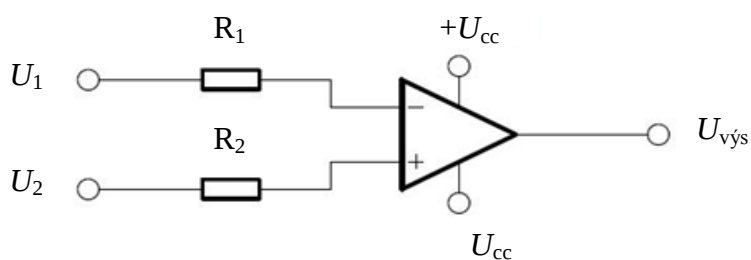
$$U_{\text{vys}} = \frac{R_{zp}}{R_1} \cdot (U_2 - U_1) \quad (1.16)$$



Obrázek 9 - Diferenční operační zesilovač

1.3.4 KOMPARÁTOR

Komparátor slouží k porovnání dvou signálů. Jedno napětí se obvykle volí konstantní neboli referenční (v našem případě U_2). Druhé napětí je časově proměnné a je porovnáváno s referenčním napětím. Absence zpětné vazby neomezuje zesílení zesilovače a ten se při rozdílných napětích U_1 a U_2 dostává do stavu saturace. Saturace je stav, kdy je zesilovač naplněn otevřen a již dále nereaguje na napěťové změny na vstupu. V tom případě je na výstupu zesilovače napájecí napětí tedy $+U_{cc}$ nebo $-U_{cc}$. To zda se zesilovač otevře do kladných či záporných hodnot, je dáno tím, zda vstupní napětí U_1 je větší či menší než referenční napětí U_2 [5].



Obrázek 10 - Komparátor

1.3.5 INTEGRAČNÍ ZESILOVAČ

Zapojení integračního zesilovače ve funkci integrátoru se od invertujícího zapojení liší tím, že ve zpětné vazbě je místo rezistoru zapojen kondenzátor. Pro odvození rovnice integrátoru musíme předpokládat, že kondenzátor je na začátku vybitý. Přivedením napětí začne rezistorem protékat proud $I_r = \frac{U_{vst}}{R_1}$. A jelikož operační zesilovač má nekonečný vstupní

odpor, proud začne protékat kondenzátorem a ten se začne nabíjet $I_c = C_1 \cdot \frac{dU_{vys}}{dt}$. Na invertujícím vstupu platí rovnice . Jelikož operační zesilovač má nekonečný vstupní odpor tak [5].

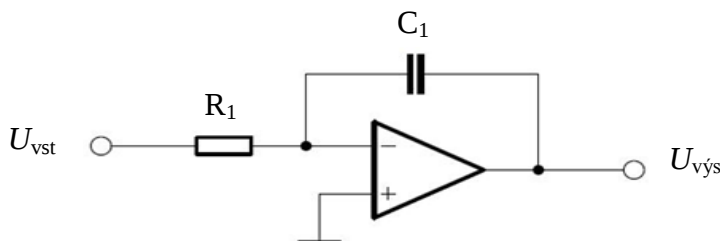
$$I_r + I_c = 0 \Rightarrow \frac{U_{vst}}{R_1} + C_1 \frac{dU_{vys}}{dt} \quad (1.17)$$

$$U_{vys} = -\frac{1}{R_1 C_1} \int_0^t U_{vst} d\tau \quad (1.18)$$

$$U_{vys} = -\frac{1}{b} \int_0^t U_{vst} d\tau \quad (1.19)$$

$$b = R \cdot C \quad (1.20)$$

kde b – časová konstanta



Obrázek 11 - Integrátor

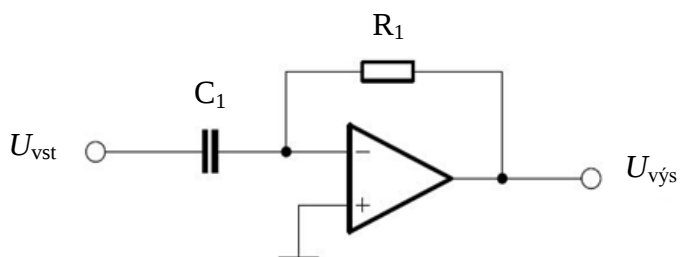
1.3.6 DERIVAČNÍ ZESILOVAČ

Derivační zesilovač má na invertujícím vstupu kondenzátor a ve zpětné vazbě rezistor. Předpokladem je nulový vstupní proud do operačního zesilovače. Všechny proudy tedy protéká kondenzátorem a rezistorem . Poté platí vztah na invertujícím vstupu zesilovače (1.21) [5].

$$C_1 \cdot \frac{dU_{vst}}{dt} + \frac{U_{vys}}{R_1} = 0 \quad (1.21)$$

Po vyjádření výstupního napětí dostáváme rovnici (1.22).

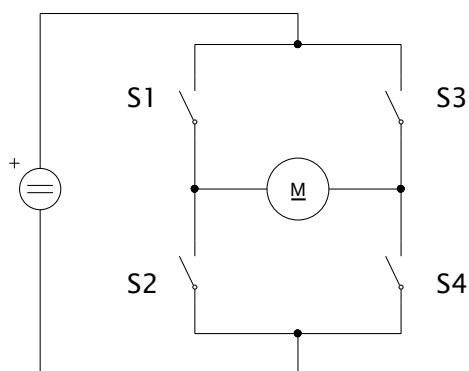
$$U_{\text{výs}} = -R_1 \cdot C_1 \cdot \frac{dU_{\text{vst}}}{dt} \quad (1.22)$$



Obrázek 12 - Derivační operační zesilovač

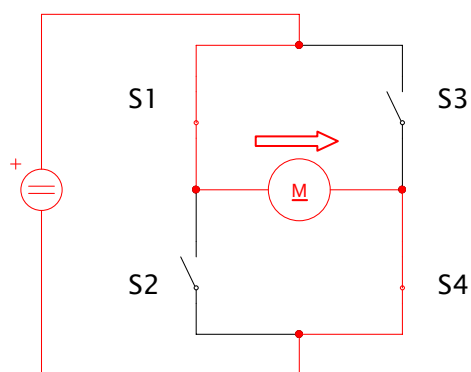
1.4 H-MŮSTEK

H-můstek se používá pro řízení stejnosměrného motoru. Je tvořen čtyřmi spínacími prvky (např. relé nebo tranzistory) které zajišťují otáčení motoru na obě strany.

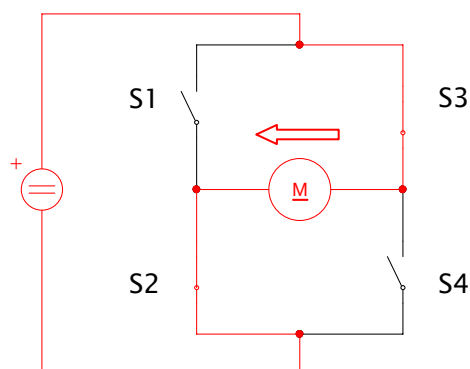


Obrázek 13 - Vypnutý H-můstek

Aby se motor začal točit na jednu stranu, je nutné sepnout spínače S1 a S4 (obr. 13). Pokud chceme, aby se motor točil na druhou stranu tak sepneme spínače S2 a S3 (obr. 14). Zde je nutné zajistit, aby zároveň nedošlo k sepnutí spínačů S1 a S2 nebo S3 a S4. Pokud tato situace nastane, vznikne v obvodu zkrat.

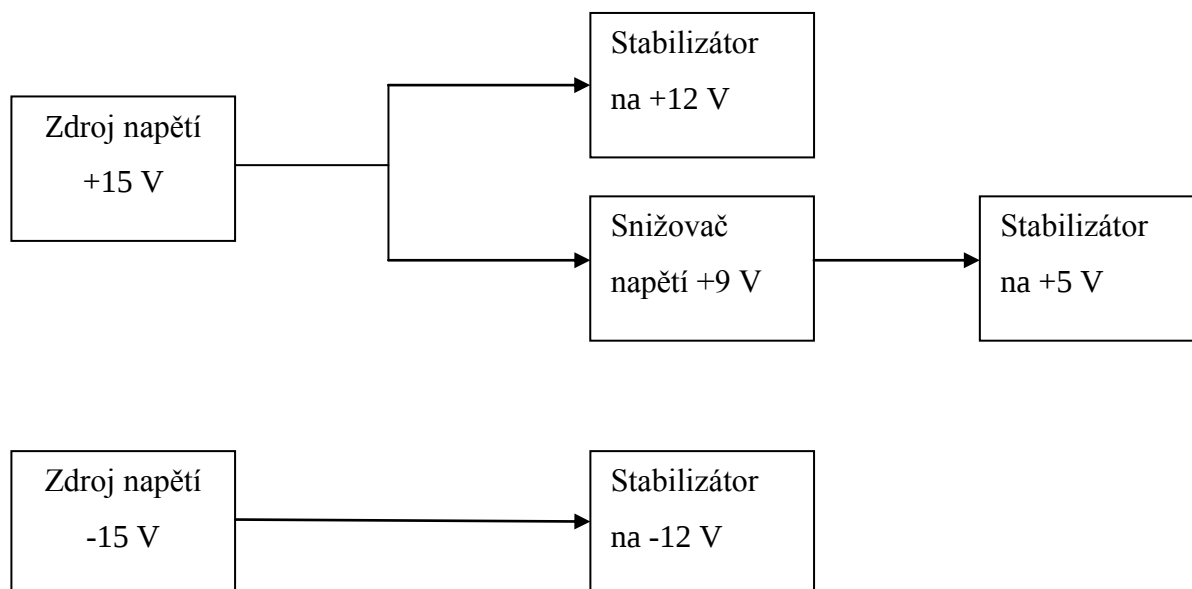


Obrázek 14 - Sepnutý H-můstek



Obrázek 15 - Opačně sepnutý H-můstek

1.5 ZDROJ STABILIZOVANÉHO NAPĚTÍ



Obrázek 16 - Blokové schéma zdroje stabilizovaného napětí

Tabulka 1 - Stabilizátory

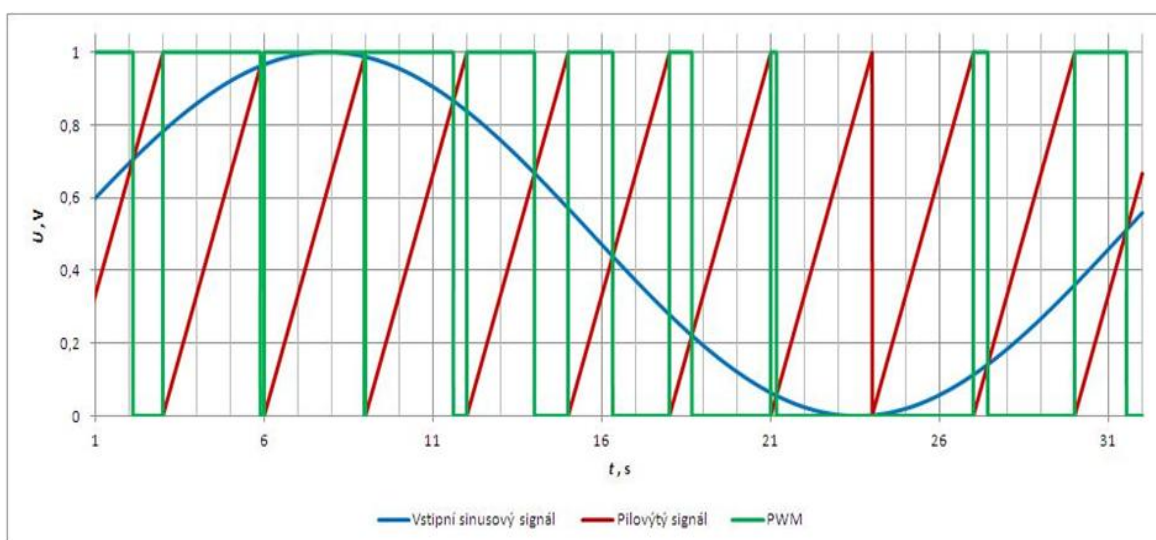
	max. vstupní napětí, V	výstupní napětí, V	max výstupní proud, A	úbytek napětí, V	proud nulovým pinem, mA
7812	35	12	0,7	2	8
7805	35	5	1	2	4,2
7912	-35	-12	1	1,3	6

1.6 PWM

1.6.1 PULSNĚ ŠÍŘKOVÁ MODULACE

(Pulse Width Modulation) je diskretní modulace signálu pro přenos analogového signálu pomocí dvouhodnotového signálu. Signál je přenášen pomocí změny střídy. Střída je poměr stavu log. 1 ku log. 0. Střída se mění v poměru 0 až 100 %. PWM lze použít jako levný A/D převodník za použití dolnofrekvenční propusti.

Realizovat PWM modulátor lze pomocí generátoru pilovitého (nebo trojúhelníkového) napětí a komparátoru. Na invertující vstup komparátoru přivedeme pilovité napětí a na neinvertující vstup analogový signál, který chceme modulovat. Komparátor porovnává signál pily s analogovým signálem a vzhledem k absenci zpětné vazby, komparátor zesiluje rozdíl obou signálů až do stavu saturace (stav kdy zesilovač zesiluje na maximum, více v kapitole komparátor). Výstupem komparátoru je poté PWM signál jehož dva napěťové stavy odpovídají napájecímu napětí komparátoru (obvykle 0 až $+U_{CC}$).



Obrázek 17 - PWM modulace

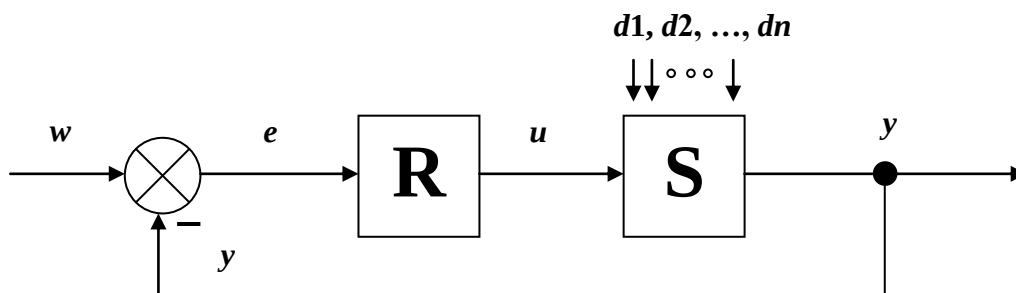
1.6.2 PWM VE VÝKONOVÉ ELEKTRONICE

Ve výkonové elektronice se používají tranzistory, které mají jen ve dvou stavech minimální ztráty. A to když je tranzistor plně sepnut nebo úplně rozepnut. Když je tranzistor plně rozepnut, je na něm napětí, ale neprotéká žádný proud, takže ztráty jsou nulové. A když je tranzistor plně sepnut tak sice protéká proud, ale je na něm pouze malé saturační napětí a proto jsou ztráty na tranzistoru minimální. K největším ztrátám dochází při přepínání ze stavu sepnuto do stavu vypnuto a naopak. To se na tranzistoru objevuje úbytek napětí a protéká i proud a dochází ke ztrátám energie na tranzistoru v podobě vyzařujícího tepla. Při nadbytku tohoto tepla, se může tranzistor nenávratně poškodit. Proto se doba mezi stavem sepnuto a vypnuto zkracuje na co nejmenší dobu a tranzistor se ještě umísťuje na chladič.

PWM modulace se používá také pro regulaci otáčení stejnosměrných motorů. Kde stačí zajistit modulaci signálu a demodulaci zajistí indukčnost motoru, která se chová jako dolnofrekvenční propust. Podobně lze PWM modulaci použít i u třífázových motorů. Zde je nutné připojit tři fáze motoru na tři PWM modulované signály. Nulový vodič motoru se nezapojuje a rozhodující je okamžité sdružené napětí všech fází. PWM modulace se používáno jako bezztrátová regulace rychlosti otáčení stejnosměrných motoru [6].

1.7 BLOKOVÉ SCHÉMA REGULAČNÍHO OBVODU

Vstupem do soustavy je požadovaná neboli řídicí veličina (w). Řídicí veličina se porovná pomocí zpětné vazby s aktuálním stavem výstupu regulované soustavy. Rozdíl mezi těmito veličinami se nazývá regulační odchylka (e) a ta je vstupem do regulátoru (R). Regulátor regulační odchylku zpracuje a na jejím základě vygeneruje akční veličinu (u) která zajistí dodávku energie do regulované soustavy (S). Do regulované soustavy vstupují poruchy ($d1$ až d_n) které negativně ovlivňují soustavu. Ze soustavy vystupuje regulovaná veličina (y) který je součástí zpětné vazby [7].



Obrázek 18 - Blokové schéma regulačního obvodu

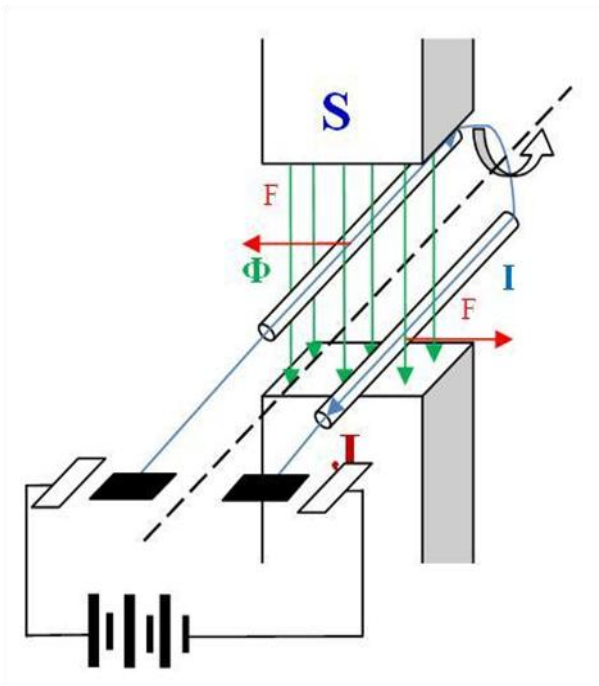
1.8 STEJNOSMĚRNÝ MOTOR

Princip stejnosměrného motoru vychází z chování vodiče v magnetickém poli. Na vodič, který je umístěn v magnetickém poli a prochází tímto vodičem proud, působí takzvaná Lorentzova síla. Tato síla způsobuje vychylování vodiče na stranu. Pro určení směru této síly se používá Flemingovo pravidlo levé ruky. Když položíme ruku na vodič, tak aby prsty ukazovaly směr protékajícího proudu a siločáry magnetického pole nám vstupovaly do dlaně, pak palec ukazuje směr Lorentzovy síly. Ve stejnosměrném motoru magnetické pole vytváří stator. Stator může být tvořen z permanentních magnetů ale i z elektromagnetu. Rotor je tvořen cívkou, která zastupuje vodič. Když se cívka pootočí a Lorentzova síla přestane vytvářet rotační pohyb, dojde pomocí komutátoru k přepnutí protékajícího proudu v cívce. V okamžiku než se změní směr protékajícího proudu v cívce, se motor otáčí pouze pomocí setrvačnosti. Poté už opět Lorentzova síla vytváří rotační pohyb cívky [8].

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha \quad (1.23)$$

$$B = \Phi \cdot S \quad (1.24)$$

kde F - Lorentzova síla
 B - Magnetická indukce
 I - Proud protékající cívkou
 l - Délka vodiče v magnetickém poli
 α - úhel který vodič svírá s indukčními čarami
 Φ - Magnetický tok
 S - Plocha



Obrázek 19 - Princip stejnosměrného motoru

1.9 ROZDĚLENÍ SS MOTORŮ

Stejnoseměrné motory lze rozdělit podle druhu budicího vinutí na motor s cizím buzením, paralelně buzený motor a sériově buzený motor. Motor s cizím buzením má buzení a motor elektricky oddělené takže se dají každý napájet jiným napětím. Rychlost otáčení se řídí změnou napětí buď na motoru, nebo na buzení. Směr otáčení se řídí změnou směru proudu v buzení nebo v motoru.

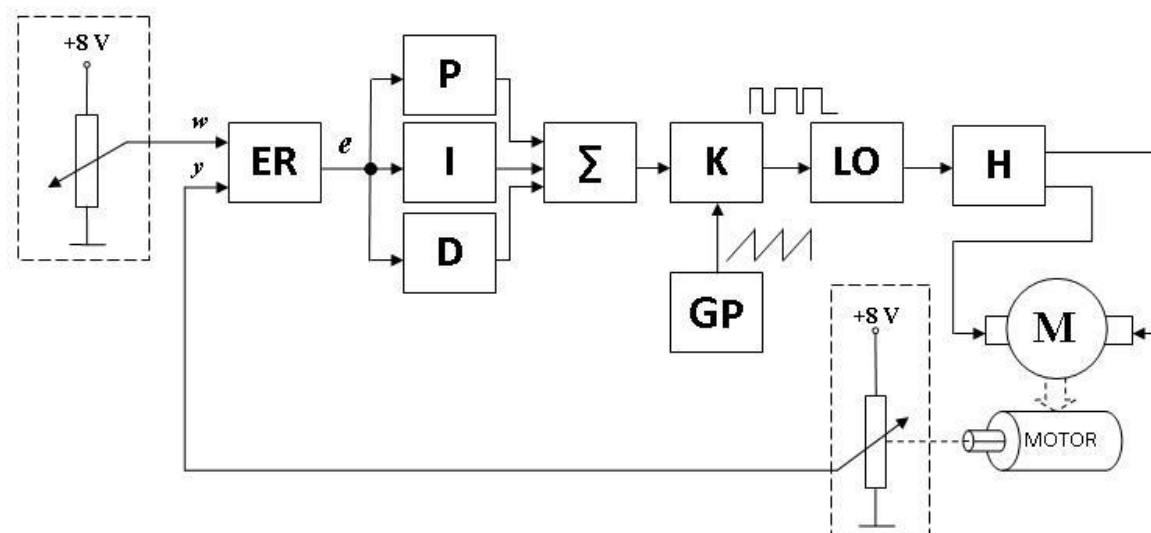
Paralelně buzený motor se skládá z motoru a k němu je paralelně zapojené buzení. Regulace otáček motoru se provádí pomocí potenciometru, který je v sérii s buzením. Směr otáčení se řídí změnou polarit napájecího napětí. Tento typ se používá při malých požadavcích na regulaci otáček.

Sériově buzený motor se skládá z motoru a k němu do série zapojené buzení. K buzení se přidává ještě paralelně potenciometr, kterým se ovládá rychlost otáčení motoru. Směr otáčení se řídí změnou polarit napájecího napětí.

2 PRAKTICKÁ ČÁST

2.1 BLOKOVÉ SCHÉMA OVLÁDÁNÍ

Vstupem do soustavy je potenciometr, kterým se nastavuje požadovaný úhel natočení servomechanismu. Výstupem z potenciometru je žádaná hodnota výstupu (w) která se pohybuje v rozsahu 0 - 8 V. Tento signál vstupuje do rozdílového zesilovače (ER) který od žádané hodnoty (w) odečte aktuální stav výstupu (y). Tím nám vznikne regulační odchylka (e) která vstupuje do tří regulátorů. Těmito regulátory jsou P-regulátor (P), I-regulátor (I) a D-regulátor (D). Každý regulátor samostatně zpracuje regulační odchylku a poté jsou jejich výsledky přivedeny součtového zesilovače (Σ). Součtový zesilovač všechny signály sečte a tím vznikne PID regulátor. Výstup PID regulátoru vstupuje do komparátoru (K) kde se porovnává s pilovitým signálem z generátoru (GP). Komparátor tyto signály porovnává a tím na jeho výstupu vzniká PWM signál. PWM signál poté prochází přes logické obvody (LO) které upraví PWM signál pro použití do H-můstku (H). H-můstek poté ovládá rychlost a směr otáčení motoru. Motor otáčí servomechanismem a i na něm umístěným potenciometrem, který snímá úhel natočení servomechanismu. Ze snímače vystupuje signál (y) o hodnotě 0 - 8 V, který vstupuje do rozdílového zesilovače (ER).



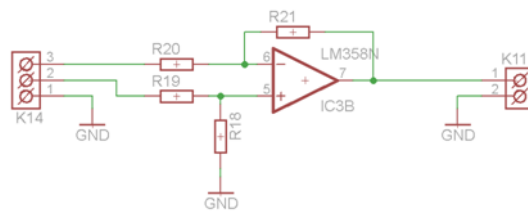
Obrázek 20 - Blokové schéma ovládání

2.2 ROZDÍLOVÝ ZESILOVAČ

Člen ER nám vytváří z žádané hodnoty a aktuálního stavu výstupu regulační odchylku. Tohoto je dosaženo pomocí diferenčního operačního zesilovače. Na invertující vstup je přivedena žádaná hodnota a na neinvertující vstup je přiveden výstup ze zpětné vazby. Zde je důležité, aby oba vstupy zesilovaly stejně silně. Je tedy důležité, aby byl dodržen poměr

$$\frac{R_{21}}{R_{20}} = \frac{R_{18}}{R_{19}}. \text{ V tomto případě to je poměr } 1 : 1. \text{ Takže rezistor } R_{21} \text{ a } R_{20} \text{ mají hodnotu } 100 \text{ k}\Omega$$

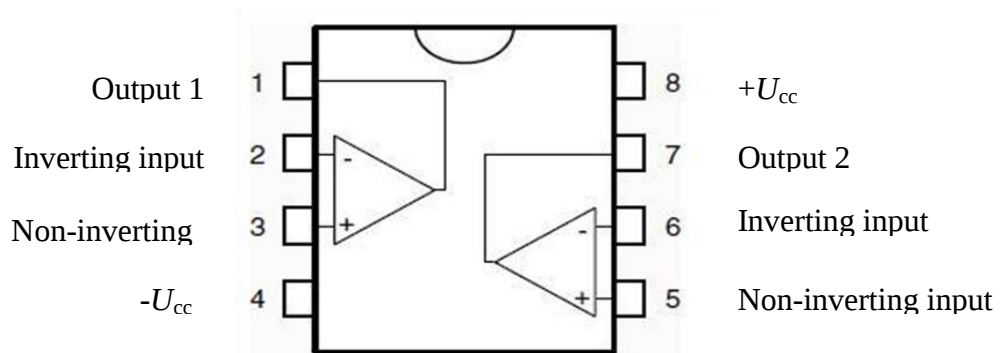
stejně jako rezistory R_{18} a R_{19} . Jako operační zesilovač jsme použili LM358N.



Obrázek 21 - Zapojení diferenčního operačního zesilovače

2.2.1 LM358N

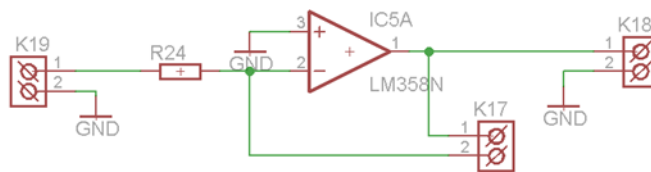
Na obrázku 22 je uvedeno vnitřní zapojení a zapojení pinů u operačního zesilovače LM358.



Obrázek 22 - Zapojení pinů LM358

2.3 P-REGULÁTOR

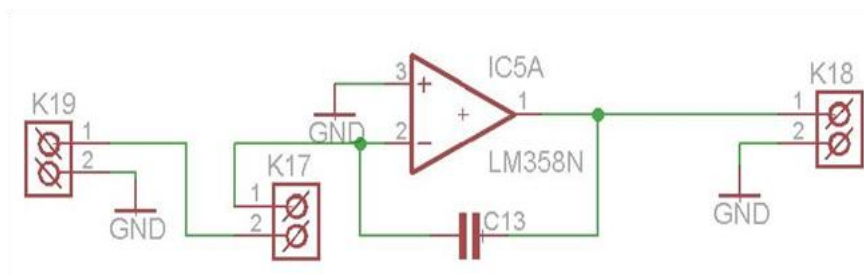
P-regulátor je tvořen operačním zesilovačem v invertujícím zapojení. Celkové zesílení zesilovače je dáno poměrem rezistorů R_{24} ku R_{zp} . Rezistor R_{24} má hodnotu $10 \text{ k}\Omega$ ale rezistor R_{zp} je nahrazen potenciometrem. Potenciometr bude nastavovat zesílení zesilovače a tím hledat nejvhodnější zesílení. Potenciometr bude měnit svůj odpor od $10 \text{ k}\Omega$ do $1010 \text{ k}\Omega$. To znamená, že zesílení se mění od 1 do 101. Potenciometr není umístěn přímo na desce plošných spojů, ale bude umístěn jinde. Jako operační zesilovač je použit LM358.



Obrázek 23 - P-regulátor

2.4 I-REGULÁTOR

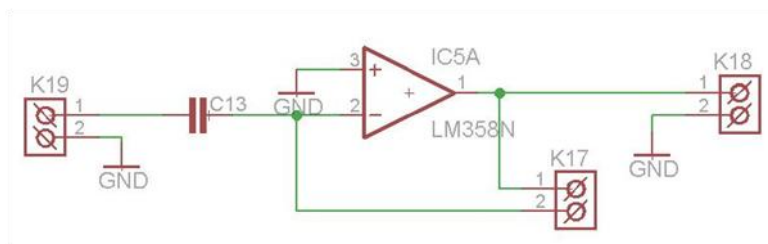
I-regulátor je tvořen integračním zesilovačem. Na vstupu je potenciometr, který mění svůj elektrický odpor od 4,7 k Ω až do 104,7 k Ω . Velikost kondenzátor je 1 μ F. Ze vzorce (1.20) lze spočítat, že časová konstanta se mění od 0,0047 s do 0,1047 s.



Obrázek 24 - I-regulátor

2.5 D-REGULÁTOR

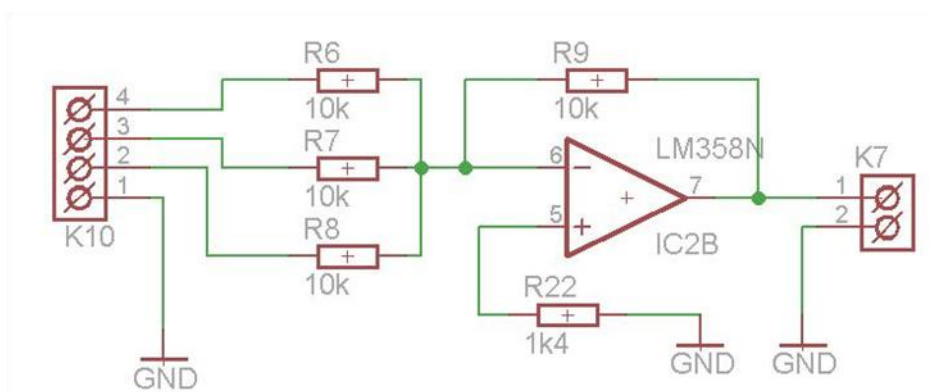
D-regulátor je tvořen derivačním operačním zesilovačem. Na vstupu je kondenzátor 1 μ F a zpětnovazební rezistor je nahrazen potenciometrem. Potenciometr má proměnný odpor od 1 k Ω do 1001 k Ω . Časová konstanta se tedy podle vzorce (1.20) mění od 0,001 s do 1,001 s.



Obrázek 25 - D-regulátor

2.6 SUMATOR

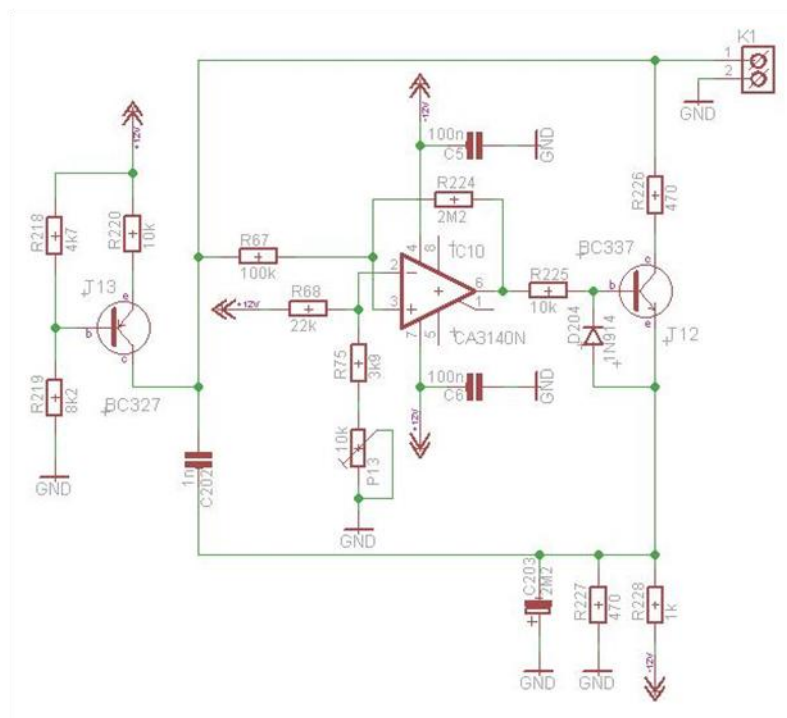
Sumátor neboli součtový operační zesilovač. V našem případě používáme sumátor se třemi vstupy bez dalšího zesílení signálu. Což znamená, že výstupní napětí ze sumátoru je součtem všech tří vstupních signálů. Tohoto záměru je dosaženo použitím stejně velkých rezistorů $R6 = R7 = R8 = R9 = 10\text{ k}\Omega$. Je zde použit operační zesilovač LM358 a kompenzační rezistor $1\text{ k}\Omega$.



Obrázek 26 - Sumátor

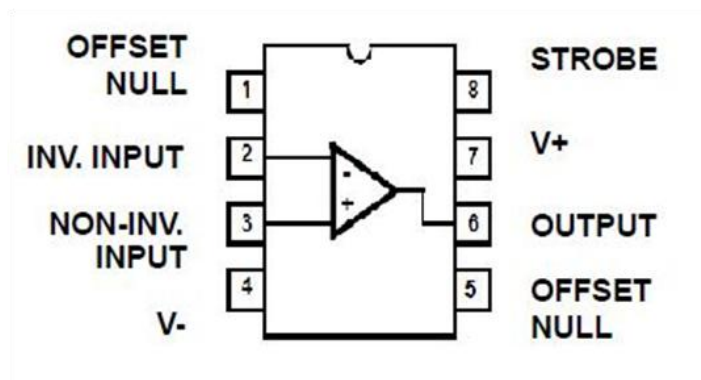
2.7 GENERÁTOR PILOVITÉHO NAPĚTÍ

Generátor pilovitého napětí se skládá ze dvou částí. První část je zdroj konstantního proudu, kterým se nabíjí kondenzátor. Druhou částí pak je obvod, který nám po určité době vybijе (vyszkratuje) nabíjený kondenzátor. Zdroj konstantního proudu je tvořen tranzistorem T13, který nabíjí kondenzátor C202. Operační zesilovač CA3140N je zapojen jako komparátor, který nám porovnává aktuální hodnotu napětí na nabíjeném kondenzátoru (neinvertující vstup) s hodnotou, kterou si můžeme nastavit pomocí potenciometru P13 a rezistory R75 a R68 (invertující vstup). Když napětí na kondenzátoru přesáhne naše referenční napětí, operační zesilovač se ze záporného stavu saturace překlápí do kladného stavu saturace. Tím proteče proud do báze tranzistoru T12 a tranzistor se otevře. Tím se nám začne nabíjený kondenzátor vybíjet přes odpory R226 a R228 a otevřený tranzistor T12 na -12 V . Po poklesu napětí na kondenzátoru se s určitým zpožděním operační zesilovač opět překlápí do záporného stavu saturace. Tím přestane téci proud do báze a tranzistor T12 a zavře se. Po uzavření tranzistoru se vybitý kondenzátor začne opět nabíjet.



Obrázek 27 - Generátor pilovitého napětí

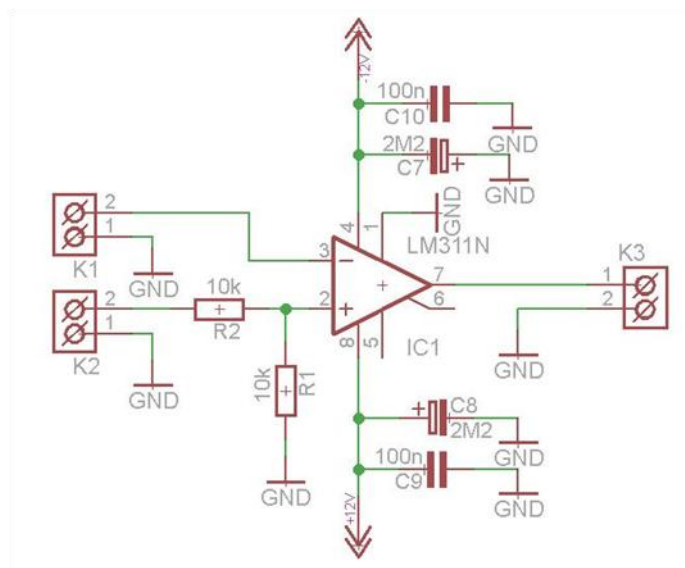
2.7.1 CA3140N



Obrázek 28 - Zapojení pinů CA3140N

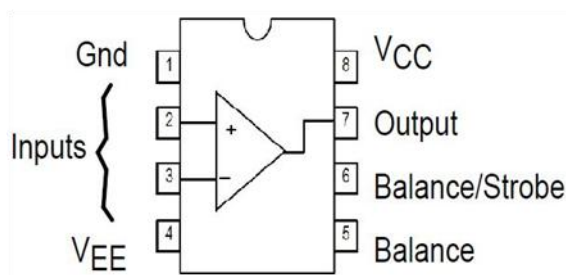
2.8 KOMPARÁTOR

Na invertující vstup komparátoru (K1) přivedeme pilovité napětí. Na neinvertující vstup přivedeme přes rezistor R2 výstupní signál ze sumátoru (K2). Na výstupu komparátoru (K3) máme zesílený PWM signál. Jako operační zesilovač je použit LM311N který se vyrábí přímo pro použití do komparátoru.



Obrázek 29 - Komparátor

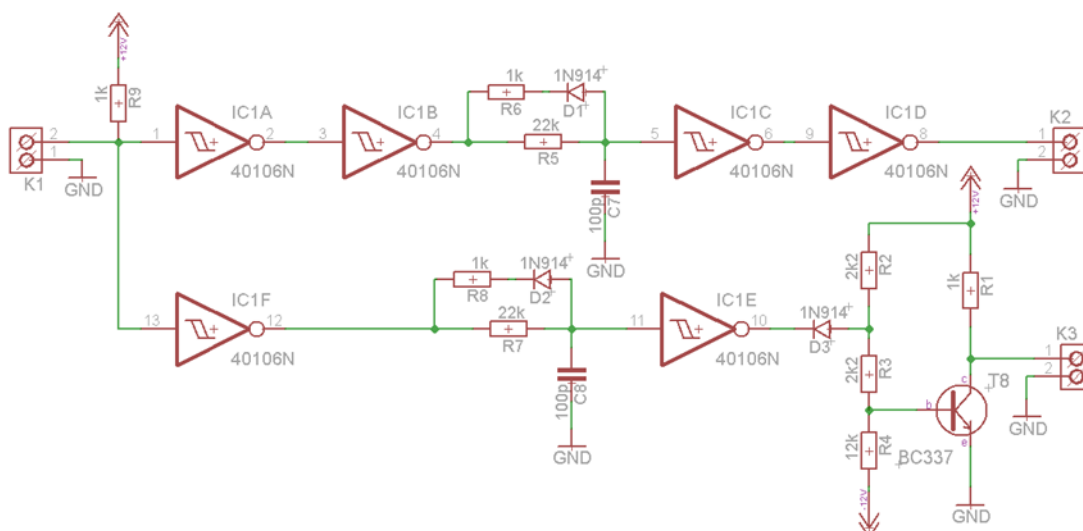
2.8.1 LM311N



Obrázek 30 - Zapojení pinů LM311

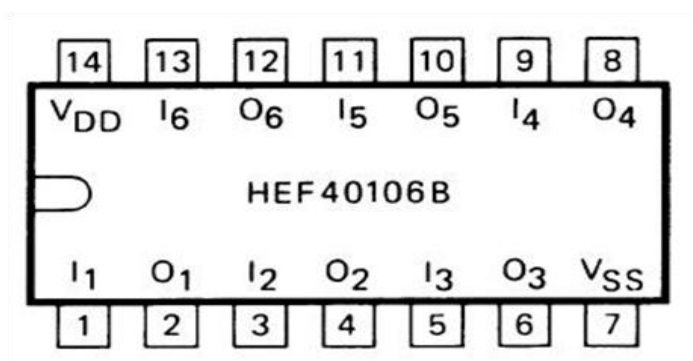
2.9 LOGICKÉ OBVODY

Logické obvody jsou realizovány pomocí Schmittova klopného obvodu. Schmittův oklopný obvod je klopný obvod, do kterého je uměle zavedena hystereze. Obvykle nám hystereze u elektrických součástek vadí a způsobuje zátky nebo zahřívání obvodů (př. CMOS), ale v tomto případě nám hystereze odstraňuje zátky vstupního signálu. Vstupní signál je zde rozdělen na dva a každý poté prochází přes Schmittovy klopné obvody zvlášť. Na výstupu je jeden signál ještě invertován. Tímto je signál připravený pro vstup do H-můstku.



Obrázek 31 - Logické obvody

2.9.1 HEF40106B

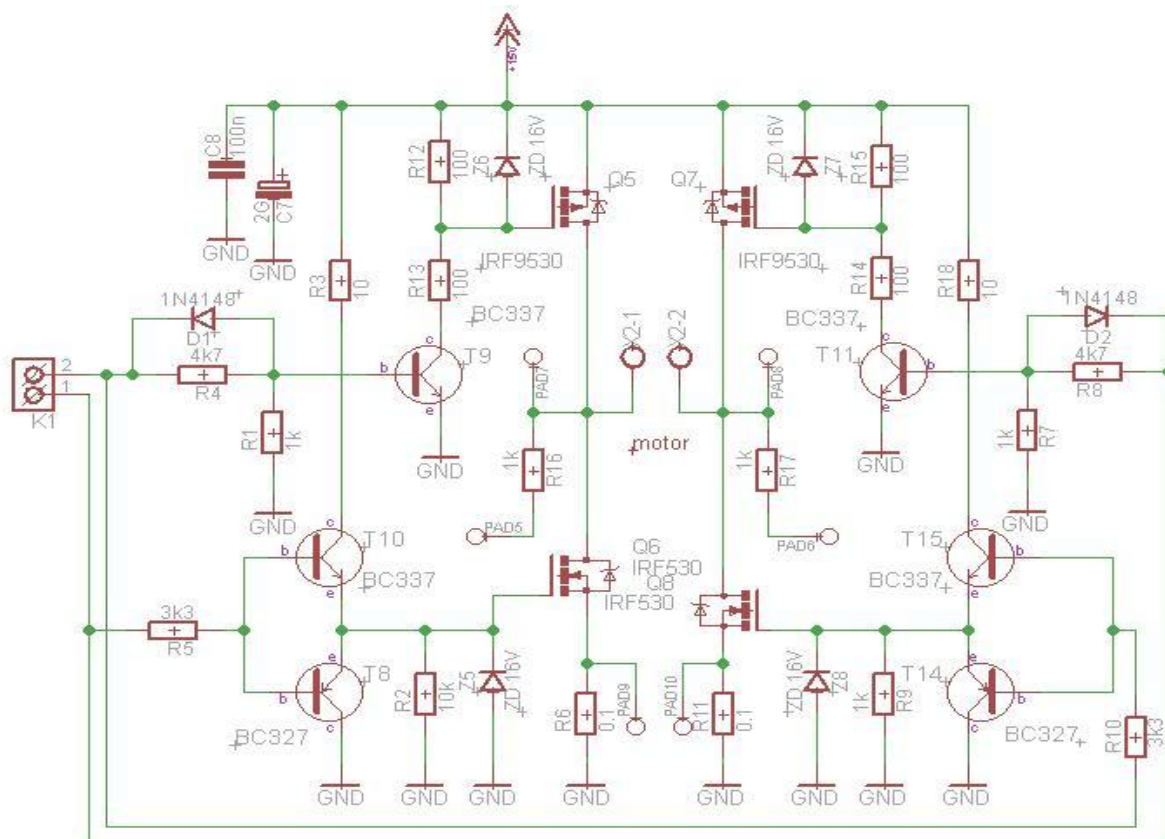


Obrázek 32 - Zapojení pinů 40106

2.10H-MŮSTEK

Jako hlavní spínací prvky jsou použity dva unipolární tranzistory IRF9530N (P-kanál) a IRF540N (N-kanál). Tranzistory IRF9530N (Q1 a Q3) jsou ovládány tranzistory BC337 (T2 a T4). Tyto tranzistory obrací fázi a ještě zesilují signál. Tranzistory IRF540N se ovládají dvojicí tranzistoru BC337 a BC327. Když přijde kladný signál na BC337 (př. T10) který je typu NPN tak se tranzistor otevře a tím nám zesílí kladnou část signálu a neobráti fázi. A v tuto chvíli je tranzistor BC327 (př. T8) typu PNP plně uzavřen ale tranzistor IRF540 který na nožičce brány má kladné napětí se plně otvírá. Když přijde záporný signál tak se tranzistor BC337 okamžitě uzavírá ale tranzistor BC327 se naplno otevře. Tímto se na nožičku brány tranzistoru IRF540 dostává záporné napětí a tranzistor Q6 se uzavírá.

H-můstek má dva vstupy přes svorkovnici K1. Každý vstup ovládá jeden tranzistor IRF9530 a IRF540. Zde je důležité, aby na oba vstupy nepřišel současně signál. To by způsobilo, že by se všechny čtyři tranzistory otevřely a v obvodu by vznikl zkrat.



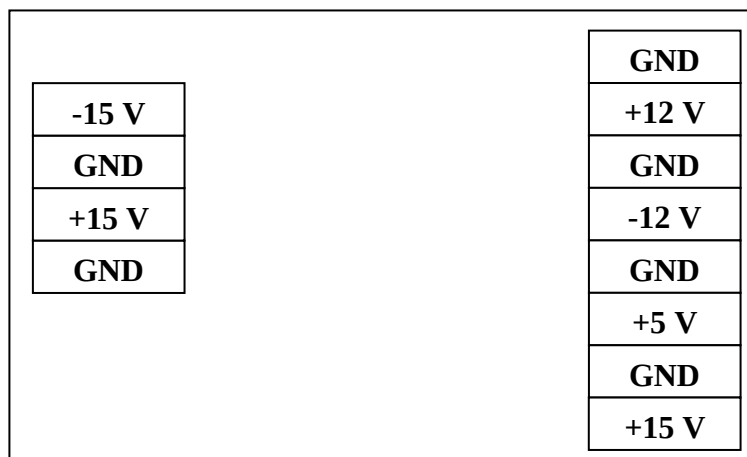
Obrázek 33 - H-můstek

2.11 MOTOR

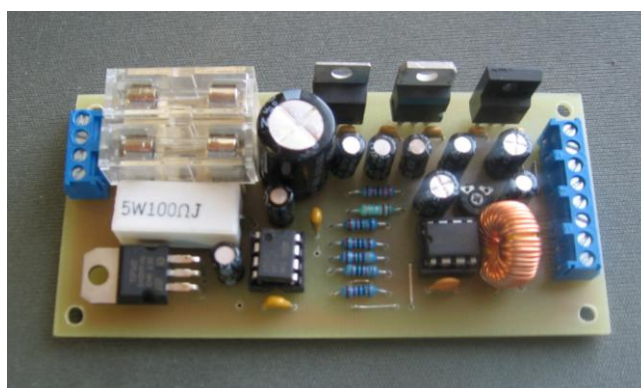
Stejnoseměrný motor je přímo připojen na výstup H-můstku. Motor se bude otáčet na obě strany a bude mechanicky přes převodovku spojen se servomechanismem a potenciometrem. Potenciometr je zapojen ve zpětné vazbě a měří nám úhel natočení. Potenciometr mění svůj elektrický odpor od 16 Ω do 1 k Ω .

2.12 ZDROJ STABILIZOVANÉHO NAPĚTÍ

Celá sestava je napájena ± 15 V, ale dále je zde potřeba zajistit ± 12 V. Toto napětí obdržíme pomocí stabilizátorů 7812 a 7912. Dále zde máme snižovač napětí, který nám $+12$ V sníží na $+9$ V a toto napětí poté stabilizujeme pomocí stabilizátoru 7805 na $+5$ V. Konkrétní schéma zapojení se nachází v příloze A.



Obrázek 34 - Zapojení svorkovnic zdroje stabilizovaného napětí

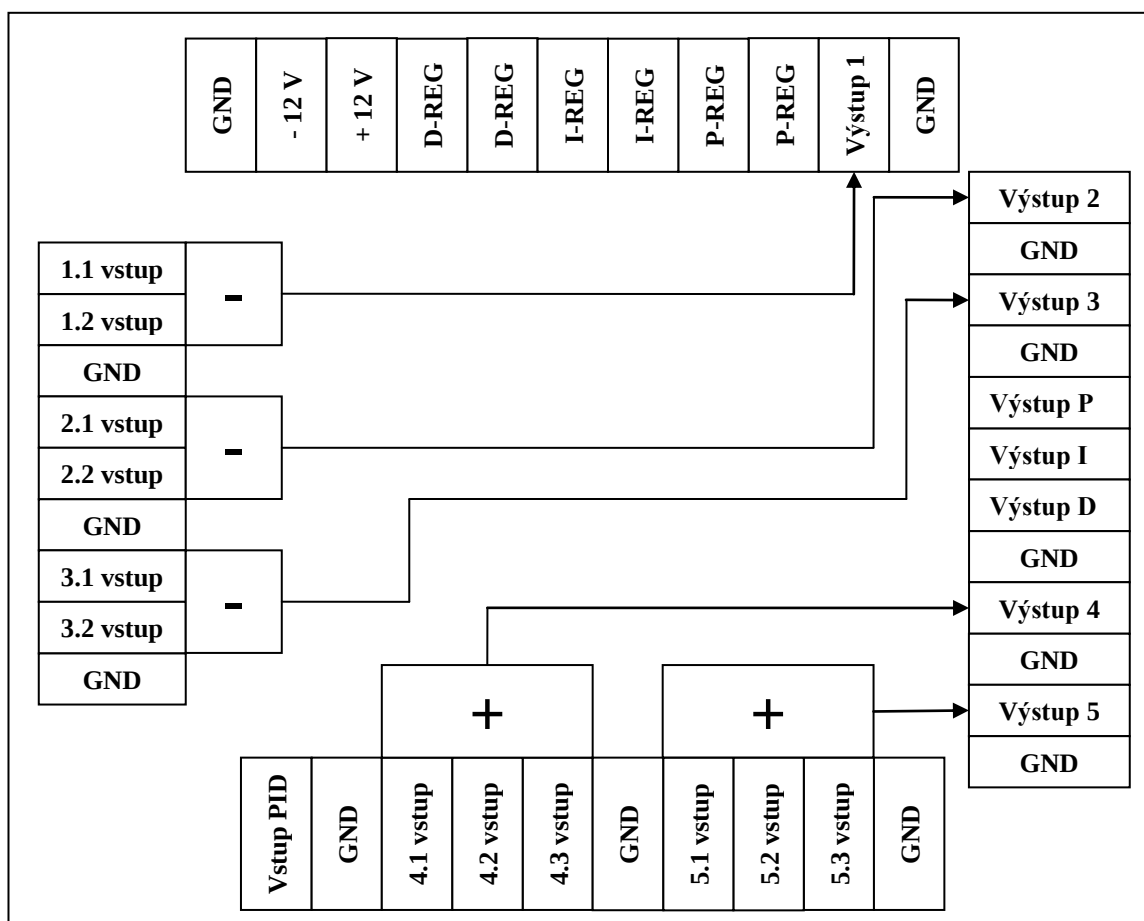


Obrázek 35 - Zdroj stabilizovaného napětí

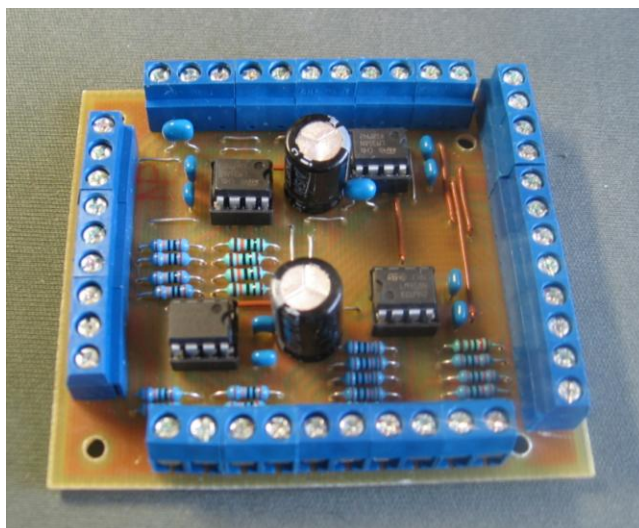
2.13 PLOŠNÝ SPOJ PID REGULÁTORU

Na tištěném spoji PID regulátoru je umístěn P, I a D regulátor. Dále zde jsou tři rozdílové zesilovače a dva sčítací zesilovače. Všechny obvody jsou napájeny napětím ± 12 V. Konkrétní schéma zapojení se nachází v příloze B. Na svorky P-REG se připojuje potenciometr, který řídí zesílení P-regulátoru. Totéž platí i pro svorky I-REG pro I-regulátor a D-REG pro D-regulátor. Vstup 1.1, 1,2 až 3.1, 3,2 označují vstupy rozdílových zesilovačů a jejich výstupy

jsou označeny 1, 2 a 3. Vstupy dvou sčítacích zesilovačů jsou označeny 4.1, 4.2, 4.3 a 5.1, 5.2, 5.3. Výstupy jsou 4 a 5. Vše je zobrazeno na obrázku 36.



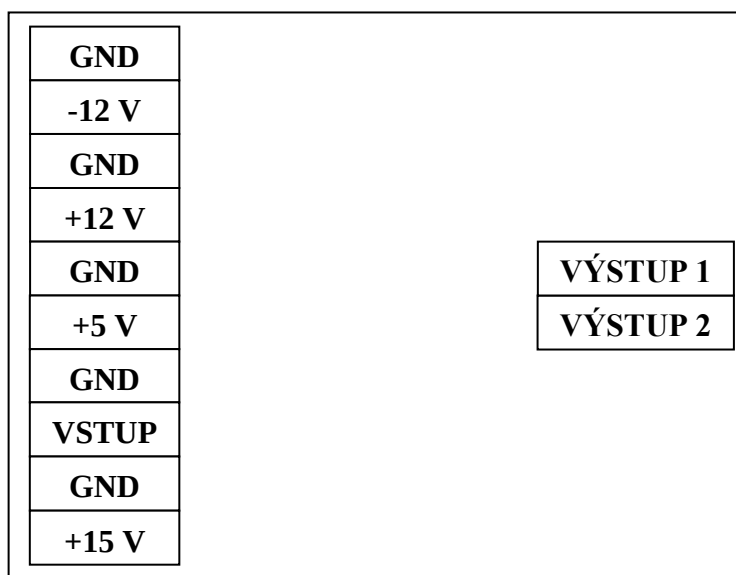
Obrázek 36 - Zapojení svorkovnic PID regulátoru



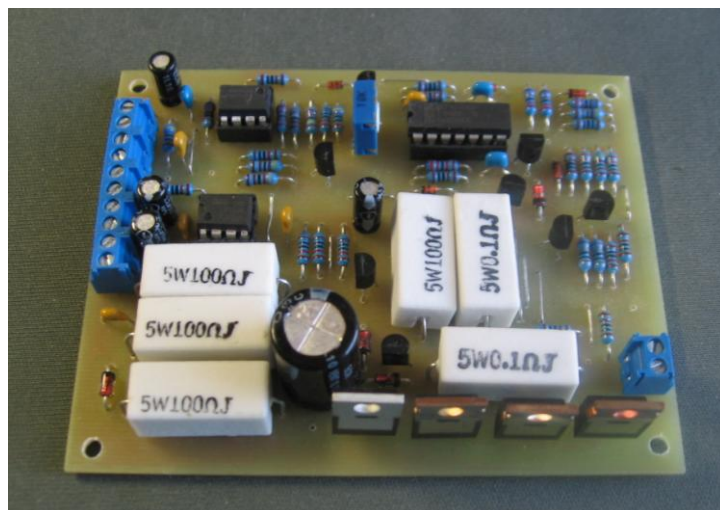
Obrázek 37 - PID regulátor

2.14 PLOŠNÝ SPOJ VÝKONOVÉHO ČLENU

Na tištěném spoji výkonového členu se nachází PWM modulátor (zdroj konstantního proudu a komparátor), logické obvody a H-můstek. Konkrétní schéma zapojení se nachází v příloze C.



Obrázek 38 - Zapojení svorkovnic výkonového členu



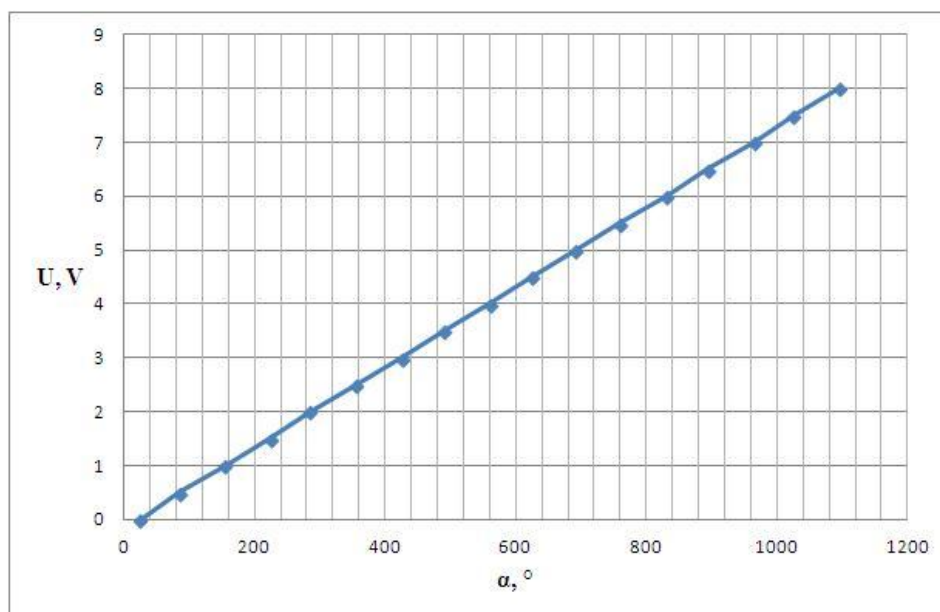
Obrázek 39 - Výkonový člen

2.15 TESTOVÁNÍ

Pro otestování zařízení byla změřena statická charakteristika systému. Měření bylo provedeno následujícím způsobem: řídicím potenciometrem se nastaví zvolené napětí (žádaná hodnota), poté se počká, až se soustava ustálí a následně se změří příslušný úhel natočení servomechanismu. Dále se měření opakuje pro další zvolené napětí. V tomto případě se napětí mění od 0 do 8 V po 0,5 V a výsledky měření jsou zapsány v tabulce 2. Na obrázku 40 je potom graficky zobrazena závislost žádané hodnoty na výsledném úhlu natočení servomechanismu. Z grafu je patrné, že soustava vykazuje lineární chování. Drobné odchylky jsou způsobeny chybou měření a nepřesností (nestabilitou) některých součástí, zvláště pak stabilitou a citlivostí potenciometrů.

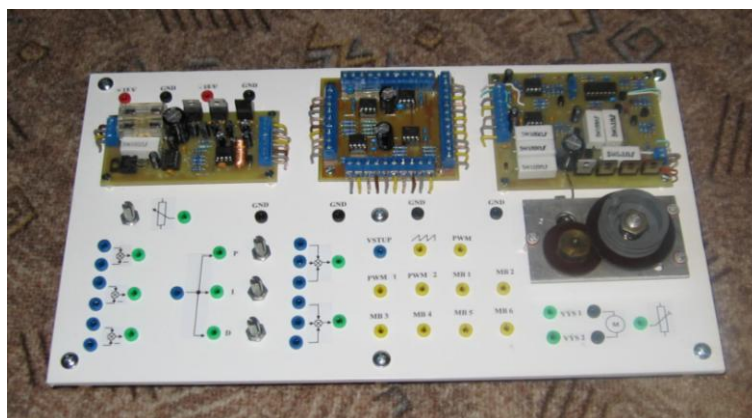
Tabulka 2 - Úhel natočení servomechanismu podle žádané hodnoty

Žádaná hodnota, V	Úhel natočení servomechanismu, °
0	25
0,5	85
1	155
1,5	225
2	285
2,5	355
3	425
3,5	490
4	560
4,5	625
5	690
5,5	760
6	830
6,5	895
7	965
7,5	1025
8	1095



Obrázek 40 - Závislost úhlu natočení servomechanismu podle žádané hodnoty

Dále jsem ověřil vliv jednotlivých složek PID regulátoru na regulační pochod. Při použití pouze P regulátoru docházelo k nedoregulování soustavy, takže nebyla trvale odstraněna regulační odchylka. K odstranění regulační odchylky se nejlépe hodí I regulátor. Při použití pouze I regulátoru regulační pochod trval velmi dlouho a docházelo v soustavě k velkým překmitům. Při použití PI regulátoru byla odstraněna regulační odchylka ale při velkém vlivu I regulátoru docházelo k rozkmitání celé soustavy. Přidáním D složky regulátoru se toto kmitání velmi omezilo a byl tak sestaven kompletní PID regulátor, který celou soustavu reguloval nejlépe.



Obrázek 41 - servomechanismus s analogovým PID regulátorem

3 ZÁVĚR

Cílem práce bylo vytvoření modulárního servomechanismu se stejnosměrným motorem. Jako první bylo potřeba zajistit ovládání motoru. Tedy aby se dokázal otáčet oběma směry a různou rychlostí. Toho bylo docíleno pomocí H-můstku. H-můstek se ovládá PWM signálem, který je upraven logickými obvody. PWM signál byl vytvořen pomocí zdroje konstantního proudu a komparátoru. Logické obvody jsou tvořeny Schmittovými klopnými obvody. Jako regulátor je použit analogový PID regulátor. Ten je tvořen jednotlivými složkami P, I, D a pomocí sumátoru se složky sčítají a vzniká PID regulátor. Regulační odchylka nám vzniká pomocí dvou potenciometrů a rozdílového zesilovače. Jeden potenciometr nám slouží jako řídící a druhý je mechanicky spojen se servomechanismem a tvoří nám zpětnou vazbu regulace.

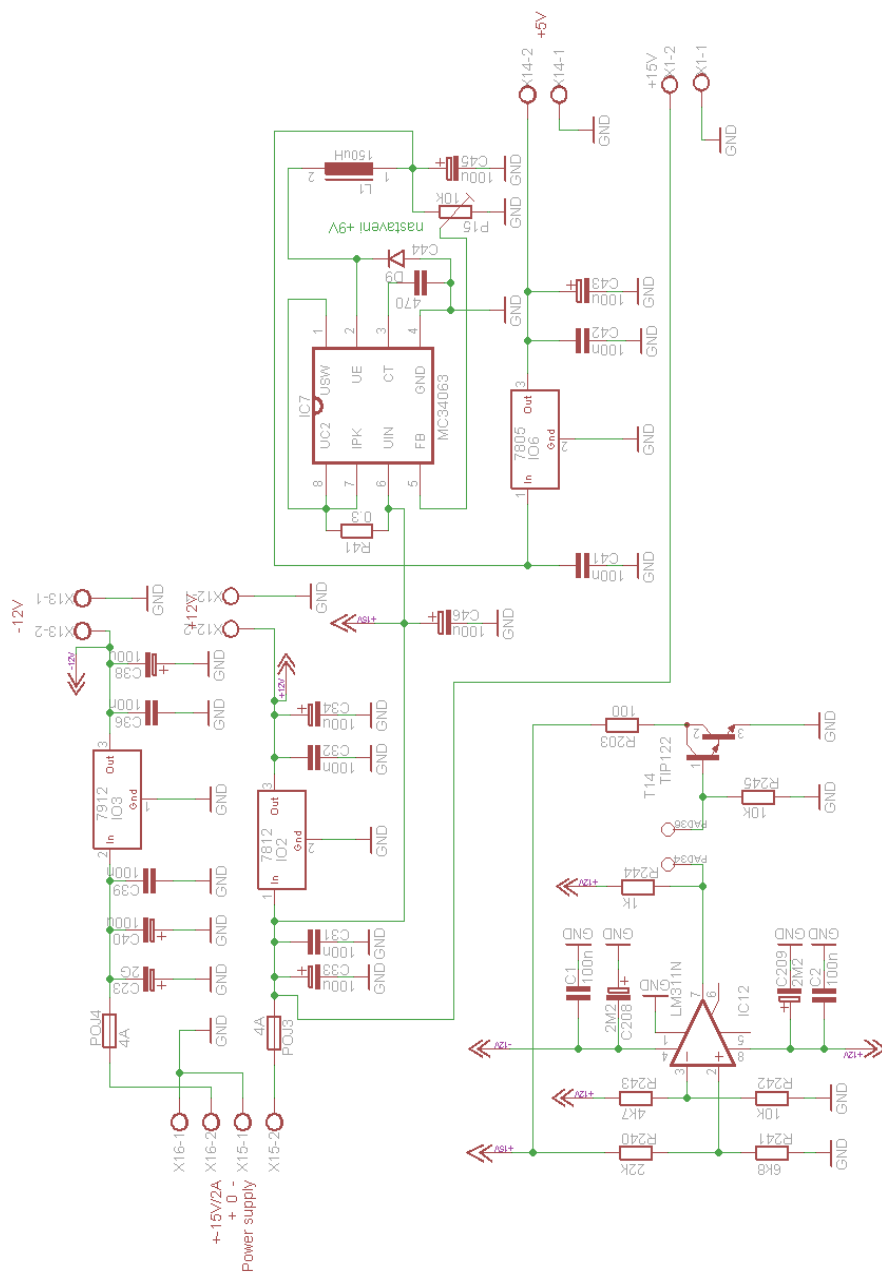
Praktická část je tvořena po blocích, kdy vždy několik bloků je umístěno na jedné desce plošných spojů. Na prvním tištěném spoji je zdroj stabilizovaného napětí. Na druhém bloku jsou tři rozdílové zesilovače, P-regulátor, I-regulátor, D-regulátor a dva sčítací zesilovače. Na třetím tištěném spoji je PWM modulátor, logické obvody a H-můstek. Všechny tištěné spoje jsou navrženy v návrhovém systému EAGLE.

Práce splnila všechny požadavky v zadání a to i modulární řešení. Práce je koncipována tak, že každá část lze vyměnit za jinou. Typickým příkladem může být PID regulátor, který může být nahrazen digitálním regulátorem.

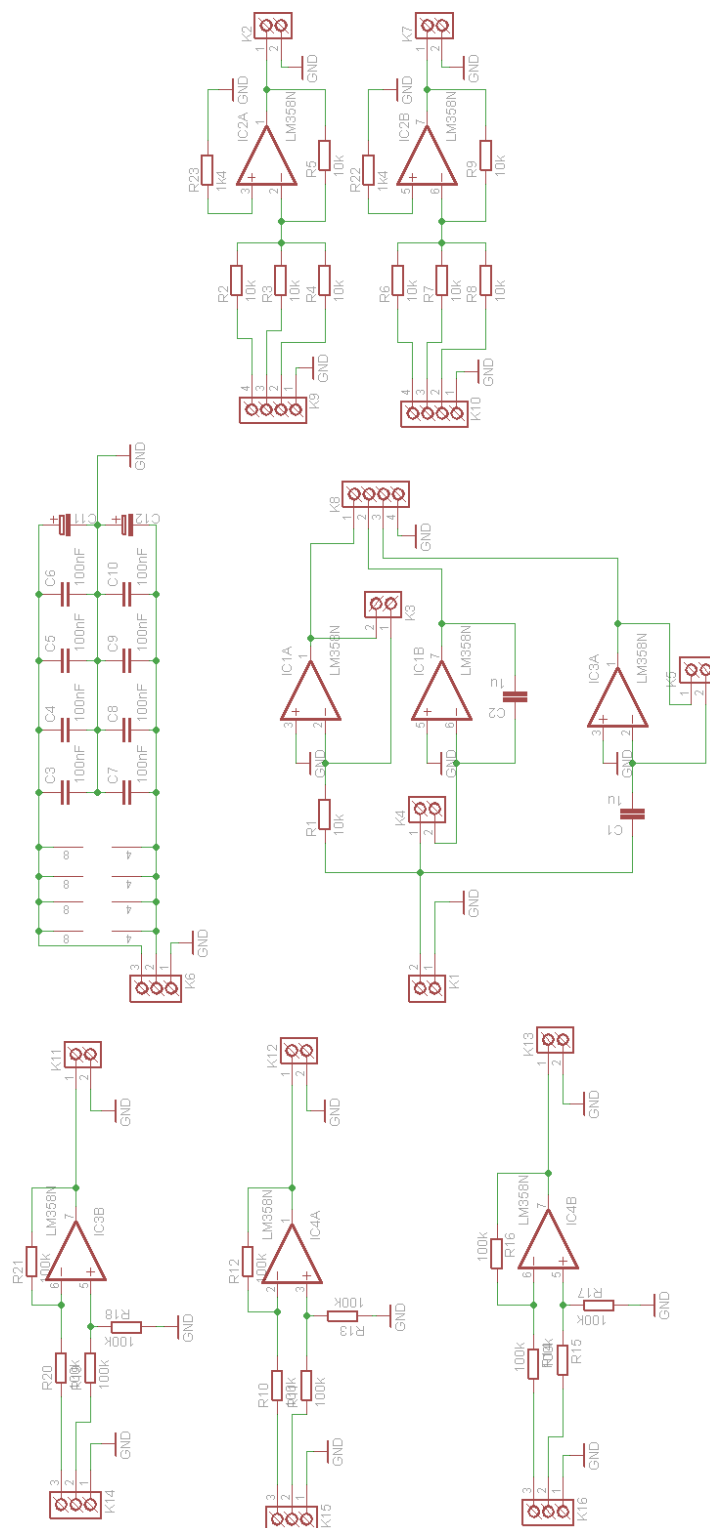
Seznam použité literatury

- [1] ZEFIN s.r.o. *MXG 461.15-0,6 magnetický ventil* [online]. [cit. 2013-04-24]. Dostupné z: http://www.zefin.cz/cs/produkty/siemens-regulace/regulacni-ventily/regulacni-ventily-s-magnetickym-pohonem/zavitove-3-cestne/mxg-461.15-0,6-magneticky-ventil__s833x1454p.html
- [2] Servopohony. UNIMAR CZ s.r.o. *Servopohon SIEMENS SQS 65.5* [online]. [cit. 2013-04-24]. Dostupné z: <http://www.unimarcz.cz/Servopohon-SIEMENS-SQS-65.5,135.html>
- [3] Regulační ventily a ovládací pohony. HYDRONIC SYSTEMS PRAGUE s.r.o. *Elektromechanické ovládací pohony SE4* [online]. [cit. 2013-04-24]. Dostupné z: <http://www.hydronic.cz/rubriky/prehled-produktu/regulacni-ventily-a-ovladaci-pohony/elektromechanicke-ovladaci-pohony-se4/>
- [4] NAVRÁTIL, Pavel. Syntéza. *Spojité typy regulátorů* [online]. UTB ve Zlíně, 02. 12. 2007 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: http://195.178.89.122/CAAC_PHP/CAAC/cesky/synteza/s_reg/s_reg.php
- [5] KABEŠ, Karel. *Operační zesilovače v automatizační technice*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1989.
- [6] Wikipedia: the free encyclopedia. *Pulzně šířková modulace* [online]. 10. 3. 2013 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/PWM>.
- [7] VORÁČEK, Rudolf, František ANDRÝSEK, Zdeněk BRÝDL, Luděk KOHOUT a Ladislav ŠMEJKAL. *Automatizace a automatizační technika 2*. dotisk prvního vydání. Brno: Computer Press a.s., 2007. ISBN 80-251-0796-5.
- [8] VOŽENÍLEK, Ladislav, Karel PETRÁK a František LSTIBŮREK. *Základy elektrotechniky II: pro 2. a 3. ročník elektrotechn. učebních a studijních oborů středních odb. učilišť*. 3., nezměň. vyd. Praha: SNTL, 1993, s. 314-324. ISBN 80-03-00446-2.

Příloha A – Schéma zapojení zdroje stabilizovaného napětí



Příloha B – Schéma zapojení PID regulátoru



Příloha C – Schéma zapojení výkonového členu

