

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

**OVĚŘENÍ PRINCIPŮ ZPĚTNOVAZEBNÍHO ŘÍZENÍ – ŘÍZENÍ
OTÁČEK VENTILÁTORU**

Pavel Kubelka

Bakalářská práce

2015

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavel Kubelka**
Osobní číslo: **I12075**
Studijní program: **B2646 Informační technologie**
Studijní obor: **Řízení procesů**
Název tématu: **Ověření principů zpětnovazebního řízení - řízení otáček ventilátoru**
Zadávací 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 prakticky ověřit principy zpětnovazebního řízení na příkladu řízení otáček ventilátoru. Řídicí systém bude realizován pomocí analogových elektronických součástek. Bude provedena analýza regulačního obvodu a vlastností analyticky navrženého nastavení regulátoru budou prakticky ověřeny. Regulátor bude navržen na základě přechodové charakteristiky. Teoretická část bude obsahovat shrnutí principů a zapojení využitých pro sestavení řízeného systému včetně regulátoru, popis použité metody nastavení regulátoru.

Praktická část bude obsahovat konkrétní schémata odpovídající řízenému systému a regulátoru, analýzu regulačního obvodu, změřené charakteristiky, výpočty nastavení, výsledky v podobě grafů - časové odezvy zpětnovazebního systému.

Kroky realizace:

- 1) Návrh zapojení zpětnovazebního systému a jeho konstrukce. PI regulátor bude realizován s využitím operačních zesilovačů. Pro realizaci zpětné vazby bude využit převodník kmitočtenapětí. K napájení systému bude využit běžně dostupný univerzální zdroj usměrněného napětí 12V, s napětím vyšším než 12V nebude manipulováno.
- 2) Měření přechodové charakteristiky.
- 3) Analýza regulačního obvodu, návrh regulátoru a ověření vlastností nastavení.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

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

Seznam odborné literatury:

HLAVA, J. Prostředky automatického řízení II: Analogové a číslicové regulátory, elektrické pohony, průmyslové komunikační systémy. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000.

LÁNÍČEK, R. Elektronika, obvody, součástky, děje, Praha: BEN, technická literatura, 1998.

CVEJN, J. Řízení procesů [online]. Univerzita Pardubice, FEI, 2012. Elektronický studijní materiál k předmětu Automatizace 1.

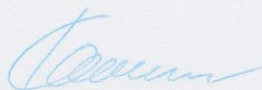
Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Jan Cvejn, Ph.D.

Katedra řízení procesů

Datum zadání bakalářské práce: **9. prosince 2014**

Termín odevzdání bakalářské práce: **11. května 2015**



prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.
děkan



L.S.



Ing. Daniel Honc, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 31. března 2015

Prohlášení

Prohlašuji:

Tuto práci jsem 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 11. 5. 2015

Pavel Kubelka

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce, doc. Ing. Janu Cvejnovi Ph.D. za všestrannou pomoc při řešení této práce a také za jeho trpělivost. Dále bych chtěl poděkovat mé rodině za povzbuzování a podporu po celou dobu studia.

V Pardubicích dne 11. 5. 2015

Pavel Kubelka

ANOTACE

Účelem práce je navrhnout elektronický obvod s pomocí analogových součástek pro řízení ventilátoru. Obvod sestavit a oživit, dále do obvodu zakombinovat PI regulátor. Poté vyzkoušet a ověřit principy zpětnovazebního řízení.

KLÍČOVÁ SLOVA

ventilátor, regulační obvod, PI regulátor, identifikace.

TITLE

TESTING PRINCIPLES OF THE FEEDBACK CONTROL – CONTROL OF VELOCITY OF AN ELECTRIC FAN

ANNOTATION

The purpose of this work is to design an electronic circuit using analog components for fan control. Further, to assemble and revive the circuit, then incorporate the PI controller. Finally, to test and validate the principles of feedback control.

KEYWORDS

fan, control circuit, PI controller, identification.

Obsah

| | |
|--|----|
| Seznam zkratk | 9 |
| Seznam značek | 10 |
| Seznam ilustrací | 11 |
| Seznam tabulek | 12 |
| ÚVOD | 13 |
| 1 TEORETICKÁ ČÁST | 14 |
| 1.1 REGULACE | 14 |
| 1.1.1 Regulační obvod | 14 |
| 1.1.2 PI regulátor | 15 |
| 1.1.3 Regulovaná soustava | 16 |
| 1.1.4 Nastavení regulátoru | 18 |
| 1.2 TECHNICKÉ PROSTŘEDKY VYUŽITÉ PRO PRAKTICKOU ČÁST | 19 |
| 1.2.1 Ventilátor | 19 |
| 1.2.2 Zapojení s operačními zesilovači | 20 |
| 2 PRAKTICKÁ ČÁST | 27 |
| 2.1 NÁVRH A POPIS FUNKCE SCHÉMATU | 27 |
| 2.2 MĚŘENÉ CHARAKTERISTIKY SOUSTAVY | 31 |
| 3 ZÁVĚR | 35 |
| Literatura | 36 |
| Seznam příloh | 37 |

Seznam zkratek

| | |
|-----|---------------------------|
| AČ | akční člen |
| DPS | deska plošného spoje |
| I | integrační |
| MČ | měřicí člen |
| OZ | operační zesilovač |
| P | proporcionální |
| PI | proporcionálně-integrační |
| R | regulátor |
| RČ | řídící člen |
| S | regulační soustava |
| ÚČ | ústřední člen |

Seznam značek

| | |
|----------|----------------------------|
| e | regulační odchylka |
| w | žádaná veličina |
| y | regulovaná veličina |
| u | akční veličina |
| d | poruchy |
| $h(t)$ | přechodová charakteristika |
| T_k | kritická frekvence |
| r_0 | kritické zesílení |
| A_U | napěťové zesílení |
| R | elektrický odpor, Ω |
| U | elektrické napětí, V |
| I | elektrický proud, A |
| C | elektrická kapacita, F |
| ω | závisle proměnná, V |
| K | zesílení |

Seznam ilustrací

| | |
|---|----|
| Obrázek. 1.1 – Blokové schéma regulačního obvodu | 14 |
| Obrázek. 1.2 – Blokové schéma regulátoru | 15 |
| Obrázek. 1.3 – Regulovaná soustava | 16 |
| Obrázek. 1.4 – Přechodová charakteristika | 17 |
| Obrázek. 1.5 – Identifikace soustavy 1. řádu | 17 |
| Obrázek. 1.6 – Metoda Zieglera – Nicholse | 18 |
| Obrázek. 1.7 – Axiální ventilátor | 19 |
| Obrázek. 1.8 – Schématická značka operačního zesilovače | 20 |
| Obrázek. 1.9 – Napěťový sledovač | 21 |
| Obrázek. 1.10 – Invertující zapojení | 21 |
| Obrázek. 1.11 – Neinvertující zapojení | 22 |
| Obrázek. 1.12 – Sumátor | 23 |
| Obrázek. 1.13 – Napěťové závislosti sumátoru | 24 |
| Obrázek. 1.14 – Rozdílové zapojení zesilovače | 25 |
| Obrázek. 1.15 – Integrovní zesilovač | 25 |
| Obrázek. 1.16 – Derivační zesilovač | 26 |
| Obrázek. 2.1 – Napájecí část | 27 |
| Obrázek. 2.2 – Schéma snímání otáček | 28 |
| Obrázek. 2.3 – Signál kondenzátoru C1 | 29 |
| Obrázek. 2.4 – Signál na kondenzátoru C2 | 29 |
| Obrázek. 2.5 – Schéma PI regulátoru | 30 |
| Obrázek. 2.6 – Deska plošného spoje | 30 |
| Obrázek. 2.7 – Osazená DPS | 31 |
| Obrázek. 2.8 – Přechodová charakteristika ventilátoru | 31 |
| Obrázek. 2.9 – Napěťový signál při změně žádané veličiny | 32 |
| Obrázek. 2.10 – Regulační odchylka při změně žádané veličiny | 33 |
| Obrázek. 2.11 – Činnost integrační složky při změně žádané veličiny | 33 |
| Obrázek. 2.12 – Soustava na mezi stability | 34 |

Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tabulka. 1.1 – Nastavení regulátoru dle Zieglera – Nicholse..... | 18 |
| Tabulka. 2.1 – Regulační odchylka P regulátoru | 32 |

ÚVOD

Cílem této bakalářské práce je navržení obvodu pro zpětnovazební řízení ventilátoru a ověření principu tohoto druhu řízení.

V teoretické části jsou vysvětleny základní funkce pro chápání problematiky. Je zde vysvětlena funkce ventilátoru a jeho rozdělení dle použití. Regulační obvod, který tvoří regulátor a regulovaná soustava, je detailně popsán. Jedna z nejpoužívanějších metod nastavení regulátoru, která je důležitá pro správné nastavení regulátoru. Dále jsou zde uvedena jednotlivá zapojení s operačními zesilovači, které jsou důležitým stavebním prvkem regulátoru.

Praktická část práce obsahuje samotné navržení schématu s jeho popisem funkce, desku plošného spoje a kompletní dokumentaci pro výrobu. Je zde změřena přechodová charakteristika systému, měření regulační odchylky regulátoru a znázorněné chování integrační složky v podobě grafu.

Obsahem příloženého CD je dokumentace plošného spoje pro případnou úpravu součástek z důvodu jiného rozložení pinů. Pro úpravu schématu je důležité mít nainstalovaný software Eagle. Dále jsou zde umístěny datové soubory všech provedených měření v případě další potřebné práce.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 REGULACE

Regulace je proces, při kterém je snahou udržet požadovanou veličinu na stanovenou hodnotu nebo hodnotu co nejbližze veličině stanovené. Pro jednodušší regulování soustavy je nejeфекtivnější použít zapojení se zápornou zpětnou vazbou. Díky tomuto zapojení je možné na vstupu regulátoru porovnat regulovanou veličinu s veličinou žádanou a získat regulační odchylku, viz následující oddíl.

1.1.1 Regulační obvod

Regulační obvod je soustava, která je tvořena dvěma bloky. První z nich je regulátor, do regulátoru vstupuje regulační odchylka, která je potřebná pro nastavení regulátoru. Regulační odchylka je dána vztahem

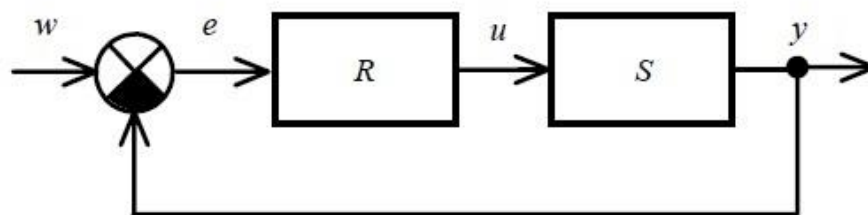
$$e = w - y, \quad (1.1)$$

kde e – regulační odchylka,

w – žádaná veličina,

y – regulovaná veličina.

Druhým blokem je regulovaná soustava, do soustavy vstupuje akční veličina a výstupem soustavy je veličina regulovaná. Schéma regulačního obvodu je znázorněno na následujícím obrázku (Cvejn, 2007)



Obrázek 1.1 – Blokové schéma regulačního obvodu

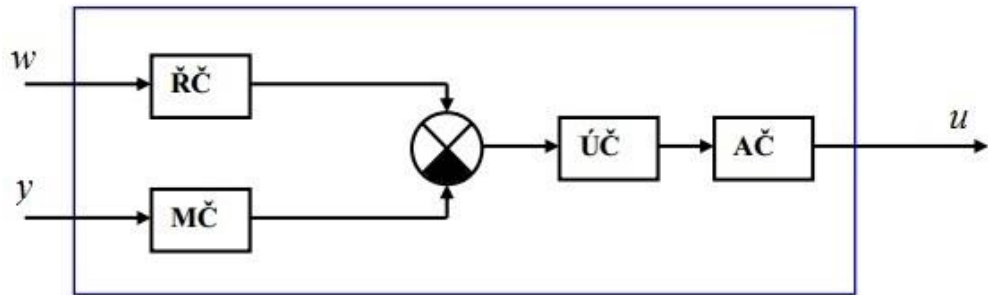
kde R – regulátor,

u – akční veličina,

S – regulovaná soustava.

1.1.2 PI regulátor

Regulátor je část systému, která má za úkol nastavit akční veličinu tak, aby po vstupu do regulované soustavy nám tato soustava na výstupu vykazovala takovou veličinu, která by v ideálním případě byla totožná s žádanou veličinou nebo se minimálně lišila. Blokové schéma regulátoru je na obrázku 1.2 (Automatizace 2, 2008)



Obrázek 1.2 – Blokové schéma regulátoru

kde ŘČ – řídicí člen,
MČ – měřící člen,
ÚČ – ústřední člen,
AČ – akční člen.

Proporcionální (P) složka je v podstatě zesilovač, který nám zesiluje regulovanou veličinu. Použitím samostatného proporcionálního regulátoru by vedlo k vytvoření trvalé regulační odchylky. Tuto odchylku je možno zmenšit v případě zvětšení zesílení, ale vzniká zde nebezpečí, že dojde k nestabilitě regulačního obvodu. Proporcionální složka je dána vztahem

$$u(t) = r_0 e(t), \quad (1.2)$$

kde r_0 – parametr proporcionální složky.

Integrační (I) složka má za úkol odstranit trvalou regulační odchylku, avšak za cenu delší doby regulace. Integrační složka je dána vztahem

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

kde r_i – parametr integrační složky.

Proporcionálně-Integrační (PI) regulátor, jak již název napovídá, se skládá z proporcionální a integrační složky. PI regulátor je dán obecným vztahem.

$$u(t) = r_0 e(t) + r_1 \int_0^t e(t) dt \quad (1.4)$$

V praxi se většinou pracuje s tvarem

$$u(t) = r \left[e(t) + \frac{1}{T_1} \int_0^t e(t) dt \right], \quad (1.5)$$

kde r – zesílení,

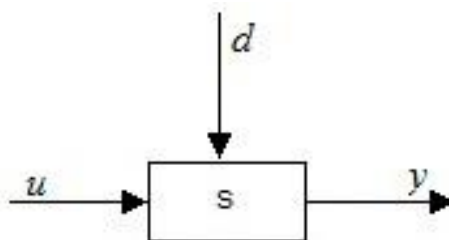
T_1 – časová konstanta integrační složky.

Důvodem je, že práce s tímto tvarem je jednodušší pro praktickou realizaci díky časové konstantě T_1 , kterou je možno získat z přechodové charakteristiky systému. Poté výsledný přenos regulátoru je

$$R(s) = r \cdot \left(1 + \frac{1}{T_1 \cdot s} \right). \quad (1.6)$$

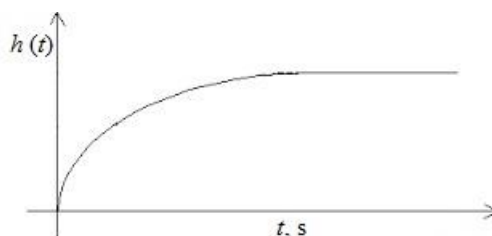
1.1.3 Regulovaná soustava

Regulovaná soustava (Miekisch, 2011) je systém, na kterém se provádí regulace a v němž se ovlivňuje regulovaná veličina. Vstupem do soustavy je akční veličina (u) a poruchy (d), které mají být vlivem regulace odstraněny nebo minimalizovány. Výstupem soustavy je veličina regulovaná (y). Regulované soustavy je možno rozdělit do dvou kategorií, jedním z nich je soustava statická. Tato soustava má vlastnost se po skokové změně akční veličiny sama ustálit, tato schopnost se nazývá autoregulace. Soustava, která tuto vlastnost nemá, se nazývá astatická.



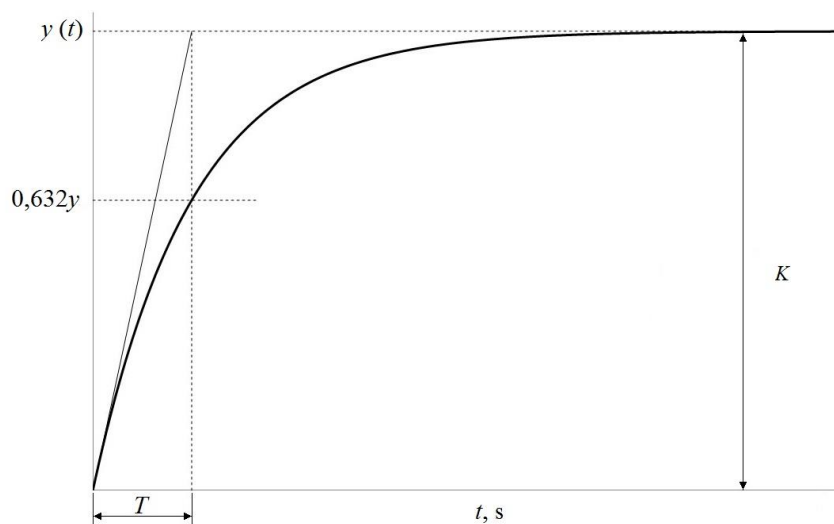
Obrázek 1.3 – Regulovaná soustava

Abychom získali další informace a vlastnosti o soustavě, je potřeba využít tzv. identifikace soustavy. Nejjednodušším způsobem, jak tuto identifikaci soustavy provést, je skokově změnit vstupní veličinu a sledovat veličinu výstupní. Tímto krokem získáme přechodovou charakteristiku soustavy, která se značí $h(t)$. Charakteristika je znázorněna na obrázku 1.4.



Obrázek 1.4 – Přechodová charakteristika

Z přechodové charakteristiky soustavy je možné zjistit hned několik parametrů např. řád soustavy, časové konstanty a zesílení. V případě soustavy prvního řádu zjistíme parametry tak, že vytvoříme přímkou k danému průběhu, která je tečnou vůči bodu, kde přechodová charakteristika protne 63,2% ustálené hodnoty. Tento bod se volí z důvodu přesnější aproximace. Díky této přímce je možné zjistit časovou konstantu T , dále je také patrné zesílení K viz obrázek 1.5.



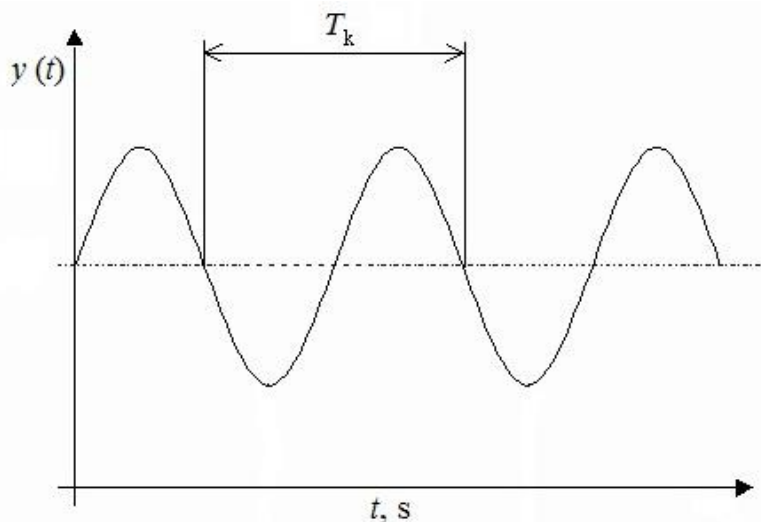
Obrázek 1.5 – Identifikace soustavy 1. řádu

1.1.4 Nastavení regulátoru

V následujícím oddílu je vysvětlena metoda nastavení regulátoru pro statickou soustavu 1. řádu. Metod pro nastavení regulátoru je mnoho, proto je zde vybrána jedna z nejpoužívanějších metod pro dnešní dobu.

Metoda dle Zieglera a Nicholse

Metoda Zieglera a Nicholse (Hlava, 2000) spočívá v zavedení a nastavení pouze proporcionální složky regulátoru. Proporcionální část regulátoru je třeba postupně zvyšovat, než se soustava rozkmitá, neboli dostane na mez stability. Poté co je nastavena proporcionální složka tak, že soustava kmitá s konstantní amplitudou, je nalezena kritická frekvence (T_k) viz obrázek 1.6. Dalším parametrem, který je zjištěn tímto krokem, je tzv. kritické zesílení (r_0), které odpovídá zesílení nastavené v proporcionální složce.



Obrázek 1.6 – Metoda Zieglera – Nicholse

Po získání parametrů T_K a r_0 lze jednoduše vypočítat hodnoty pro nastavení regulátoru pro danou soustavu. Výpočet hodnot lze provést dle přiložené tabulky 1.1.

Tabulka 1.1 – Nastavení regulátoru dle Zieglera – Nicholse

| Typ regulátoru | r_0 | T_I | T_D |
|----------------|------------|------------|------------|
| P | $0,5 r_0$ | | |
| PI | $0,45 r_0$ | $0,85 T_K$ | |
| PD | $0,6 r_0$ | | $0,06 T_K$ |
| PID | $0,6 r_0$ | $0,5 T_K$ | $0,12 T_K$ |

1.2 TECHNICKÉ PROSTŘEDKY VYUŽITÉ PRO PRAKTICKOU ČÁST

V této části nalezneme důležité technické poznatky, které je nutné ovládat, jelikož se hojně využívají v praktické části práce.

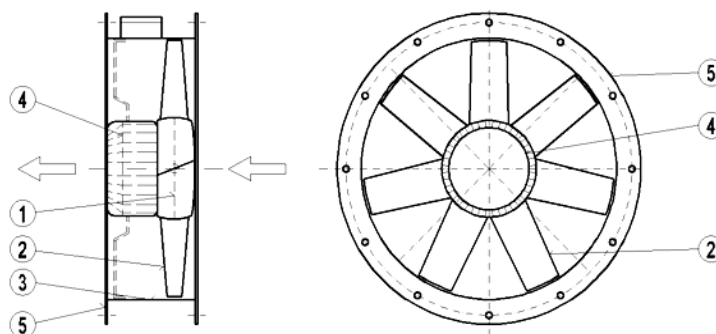
1.2.1 Ventilátor

Ventilátor je lopatkový stroj, který je primárně určen pro dopravu a stlačení plynů. Ventilátor je tvořen motorem, jenž se skládá ze statoru a rotoru, na kterém jsou umístěny lopatky nebo vrtule. Ventilátory (Šřitr, 2001) je možné rozdělit do několika kategorií podle potřeby použití:

- dle dopravního tlaku
 - Nízkotlaký systém
 - Středotlaký systém
 - Vysokotlaký systém
- dle průtoku vzduchu rotorem
 - Radiální systém
 - Axiální systém
 - Diagonální systém

Axiální systém

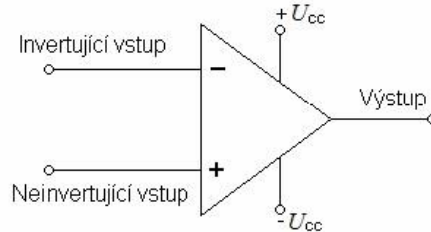
Axiální systém je takový druh ventilátoru, jenž dopravovaný plyn vstupuje a také vystupuje ve směru osy otáčení ventilátoru. Tento druh ventilátoru je používán hlavně v místech s požadavkem pro velký průtok plynů, přičemž není zapotřebí velkého dopravního tlaku. Na obrázku 1.7 (Šřitr, 2001) je možné vidět části ventilátoru. Rotor (1), který je osazen lopatkami (2) a jako celek uchycen v plášti (3). Tento celek je poháněn elektromotorem (4) a v případě potřeby je ventilátor zasazen do příruby (5).



Obrázek 1.7 – Axiální ventilátor

1.2.2 Zapojení s operačními zesilovači

Operační zesilovač (Operační zesilovače, 2000) je polovodičová součástka, která se především vyznačuje velkým napět'ovým zesílením vstupního napětí. Zesilovat je možné jak střídavé, tak stejnosměrné signály. Napět'ové zesílení A_U bývá řádově 10^4 až 10^9 .



Obrázek 1.8 – Schématická značka operačního zesilovače

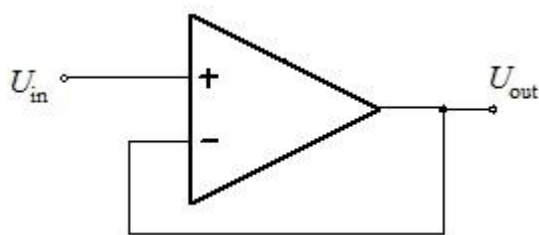
Operační zesilovač má dva vstupy (invertující a neinvertující) a jeden výstup. Dále musí disponovat vstupy pro napájení, které může být jak symetrické tak nesymetrické. Jestliže přivedeme vstupní signál na invertující vstup (-), signál na výstupu bude zesílen, ale také fázově posunut o 180° . V případě přivedení signálu na vstup neinvertující (+), výstup bude pouze zesílen. Mezi hlavní vlastnosti, které by měl operační zesilovač ideálně mít, patří:

- Nekonečně velké napět'ové zesílení
- Nekonečně velký vstupní odpor
- Nulový výstupní odpor
- Nekonečnou šířku pásma
- Dokonalá linearita a symetrie
- Nulové offsetové napětí

V praxi bohužel není možné ničeho takového dosáhnout, ale díky dnešním technologiím je do jistých mezí OZ tak přesný, že lze v některých případech a v závislosti na druhu použití říci, že je ideální.

Napět'ový sledovač

Zapojení napět'ový sledovač je nejjednodušší zapojení operačního zesilovače, jedná se v podstatě o zapojení neinvertujícího zesilovače, kde $R_1 = \infty$ a $R_2 = 0$. Tímto dosáhneme napět'ového zesílení $A_U = 1$. Tedy po přivedení napět'ového signálu na vstup se téže hodnota objeví i na výstupu zesilovače.



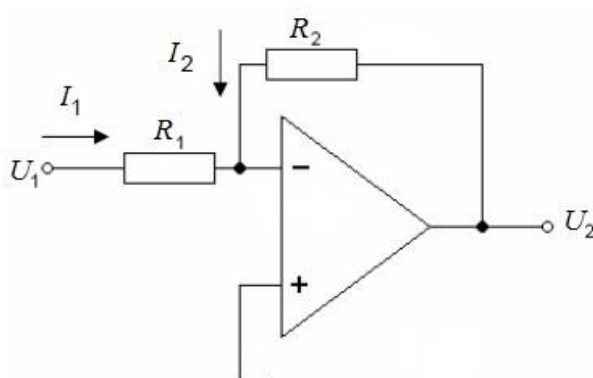
Obrázek 1.9 – Napěťový sledovač

$$U_{in} = U_{out}, \quad (1.7)$$

kde U – elektrické napětí, V.

Invertující zapojení

Jak již název napovídá, toto zapojení nejen zesiluje, ale také posouvá fázi o 180° . Pokud je tedy na vstupu zesilovače kladné napětí, poté se na výstupní části objeví napětí záporné. Zapojení zesilovače je patrné na obrázku 1.10.



Obrázek 1.10 – Invertující zapojení

Odvození rovnice pro celkové zesílení invertujícího zapojení

$$I_1 + I_2 = I_0, \quad (1.8)$$

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

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1}, \quad (1.10)$$

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2}, \quad (1.11)$$

$$\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} = 0 \Rightarrow \frac{U_1}{R_1} = -\frac{U_2}{R_2}, \quad (1.12)$$

$$A_U = \frac{U_2}{U_1} = -\frac{R_2}{R_1}, \quad (1.13)$$

kde I – elektrický proud, A,

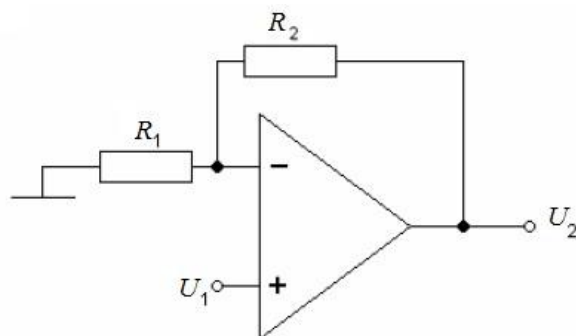
R – elektrický odpor, Ω ,

A_U – napět'ové zesílení.

Z odvození je patrné, že poměr odporů $R_2 : R_1$ udává velikost zesílení invertujícího zapojení.

Neinvertující zapojení

Operační zesilovač v tomto zapojení zesiluje vstupní signál a zároveň ponechává fázi jako je na vstupním signálu. Jestliže na vstupu zesilovače je kladné napětí, na výstupu bude napětí zesílené téže polarity. Neinvertující zapojení je na obrázku 1.11.



Obrázek 1.11 – Neinvertující zapojení

$$U_1 = R_1 \cdot I \quad (1.14)$$

$$U_2 = I \cdot (R_1 + R_2) \quad (1.15)$$

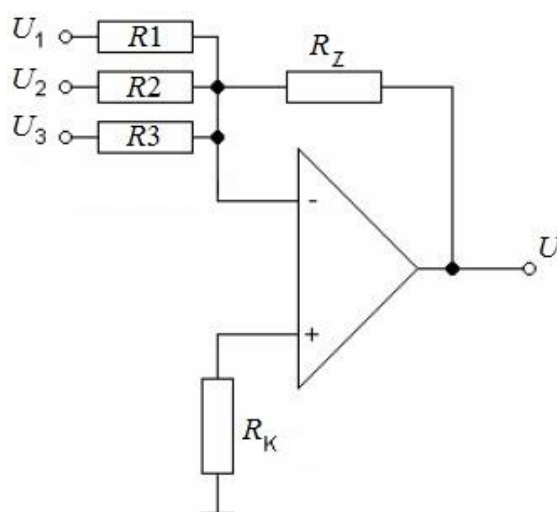
$$A_U = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I \cdot (R_1 + R_2)}{R_1 \cdot I} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \quad (1.16)$$

$$A_U = \frac{R_1}{R_1} + \frac{R_2}{R_1} \quad (1.17)$$

$$A_U = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (1.18)$$

Sumátor

Pokud je potřeba sečíst více signálů, je možnost použít zapojení typu sumátor viz obrázek 1.12. Na invertující vstup zesilovače jsou přivedeny napěťové signály, poté do operačního zesilovače poteče takový proud, který se rovná součtu jednotlivých proudů připojených větví. Velikost proudu, který větvemi teče, je dána Ohmovým zákonem.



Obrázek 1.12 – Sumátor

Výstupní napětí je dáno následujícím vztahem

$$U = -\left(\frac{R_Z}{R_1} \cdot U_1 + \frac{R_Z}{R_2} \cdot U_2 + \frac{R_Z}{R_3} \cdot U_3\right). \quad (1.19)$$

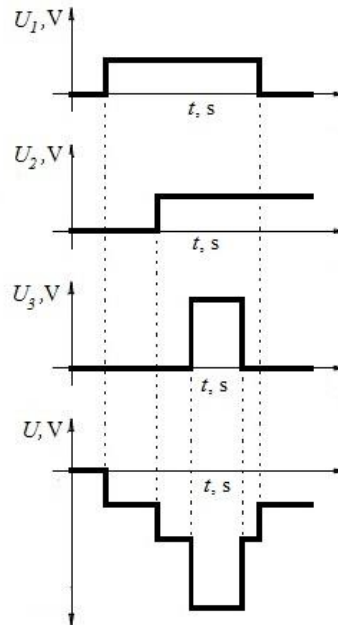
Pokud jsou hodnoty všech odporů stejné, je výstupní napětí U dáno přímo vztahem

$$U = -(U_1 + U_2 + U_3). \quad (1.20)$$

Dále je v obvodu nutno zapojit tzv. kompenzační odpor (R_K) a to z důvodu zachování nulového potenciálu, který je ve společném bodu vstupních větví signálu. Tento odpor vypočítáme následujícím vztahem

$$\frac{1}{R_K} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_Z}. \quad (1.21)$$

V následujícím obrázku 1.13 (Operační zesilovač, 2007) je patrné, jak vypadá výstupní signál po součtu třech různých napěťových úrovní po přivedení na invertující vstup.

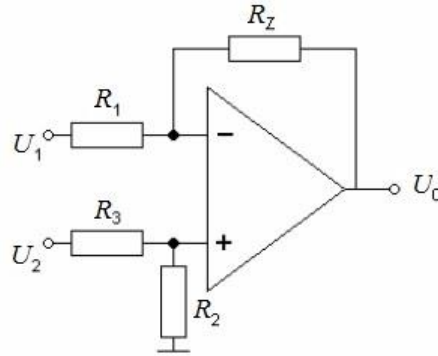


Obrázek 1.13 – Napěťové závislosti sumátoru

Rozdílové zapojení

Rozdílové (diferenciální) zapojení zesilovače se používá v případě, že je potřeba signály od sebe odečíst. Signály přivedené na vstupy U_1 a U_2 jsou zesíleny a následně odečteny. Pro podmínku, aby výstupem zesilovače byl skutečně rozdíl, je potřeba dodržet následující vztah

$$\frac{R_Z}{R_1} = \frac{R_2}{R_3}. \quad (1.22)$$



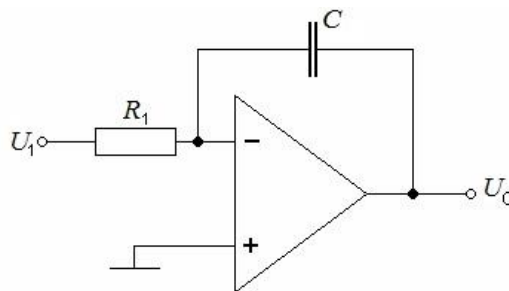
Obrázek 1.14 – Rozdílové zapojení zesilovače

Poté výstupní napětí rozdílového zesilovače je

$$U_0 = \frac{R_Z}{R_1} \cdot (U_2 - U_1). \quad (1.23)$$

Integrační zapojení

Integrační zapojení zesilovače je obdobné jako invertující, liší se pouze v připojení kondenzátoru do zpětné vazby. Tímto krokem získáme integrátor, který nám integruje vstupní napětí v čase. Důležitým prvkem je správně zvolit integrační časovou konstantu RC , musí být zvolena tak, aby nedocházelo ke stavu nasycení (saturaci). Kdyby tento jev nastal, zapojení už by dále nedokázalo integrovat. Zapojení je patrné na obrázku 1.15.



Obrázek 1.15 – Integrační zesilovač

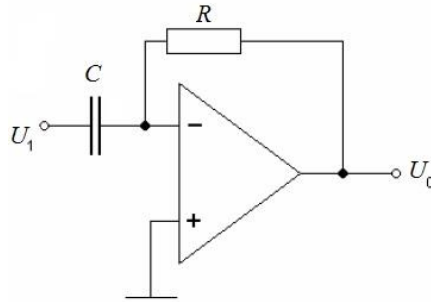
Výstupní napětí zesilovače lze určit dle vztahu 1.24.

$$U_0 = U_{20} - \frac{1}{RC} \int_0^t U_1 dt, \quad (1.24)$$

kde U_{20} – výstupní napětí před integrací, V.

Derivační zapojení

Derivační zapojení zesilovače se používá velmi málo, jelikož vstupní signál obsahuje šum, který by se také derivoval. Výstup zesilovače by obsahoval příliš zvlněný signál, tudíž hrozí saturace. Díky tomuto jevu je derivace vstupního signálu nepřesná a je nutno signál filtrovat. Zapojení je uvedeno na obrázku 1.16.



Obrázek 1.16 – Derivační zesilovač

$$U_0 = -RC \cdot \frac{dU_1}{dt} \quad (1.25)$$

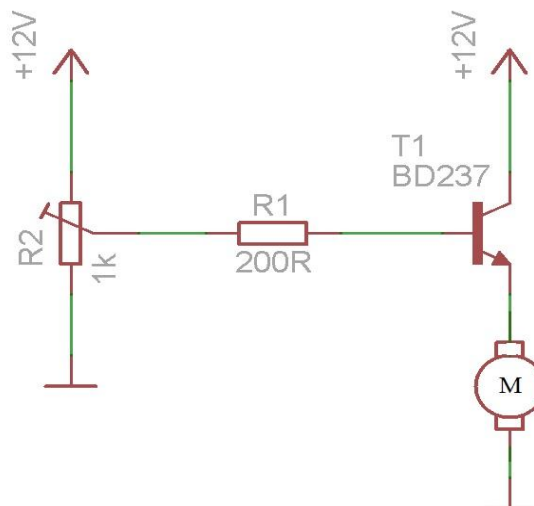
2 PRAKTICKÁ ČÁST

Při praktické realizaci obvodu nastal problém s napájením soustavy. Jelikož je regulátor tvořen operačními zesilovači, které většinou pracují se symetrickým napájením. Tento druh napájení nebyl k dispozici. Problém byl tedy vyřešen tím, že do obvodu je vložen stabilizátor napětí 5 V. Tato hodnota napětí odpovídá velmi nízké rychlosti otáček ventilátoru. Tudíž veškeré výpočetní operace, které prováděly operační zesilovače, byly měřeny vůči této úrovni napětí. Bylo tedy nutné na konci obvodu využít rozdílový zesilovač, který odečetl od napěťového signálu zvolené referenční napětí.

2.1 NÁVRH A POPIS FUNKCE SCHÉMATU

Prvním krokem je potřeba si opatřit ventilátor, který bude obsahovat funkci snímání otáček. Ventilátor byl zvolen od firmy SUNON, model ME80251V1 s napájecím napětím 12 V stejnosměrných.

Dalším krokem je potřeba zajistit napájení ventilátoru. Bylo tedy navrženo schéma s výkonovým spínacím bipolárním tranzistorem BD237, který napájí ventilátor. Pro možnost volby regulace otáček ventilátoru, byl do obvodu použit potenciometr ($R2$), kterým lze tyto otáčky nastavit. Později tento potenciometr bude odstraněn a nahrazen zpětnou vazbou obvodu. Schéma zapojení je na obrázku 2.1.



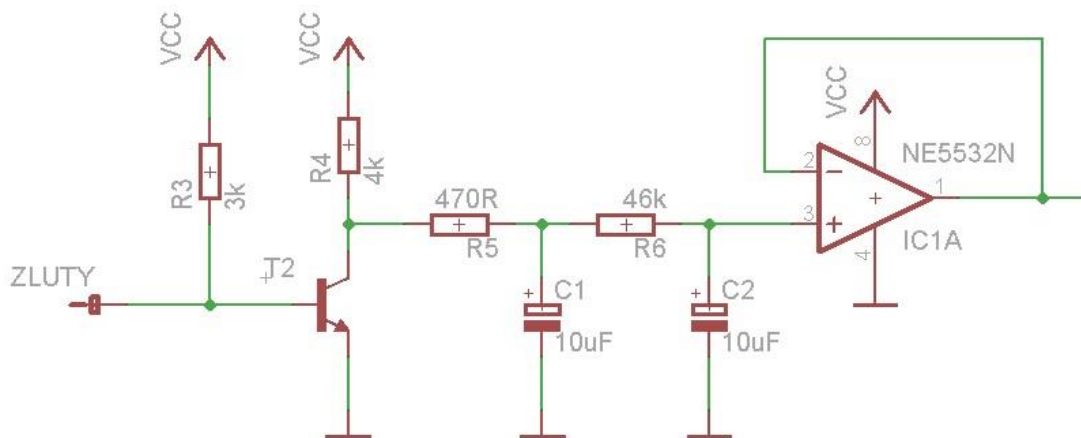
Obrázek 2.1 – Napájecí část

V dalším kroku je potřeba navrhnout obvod pro snímání otáček ventilátoru. Vodič ventilátoru je běžně značen žlutou barvou, ale může být jinak, dle dokumentace výrobku.

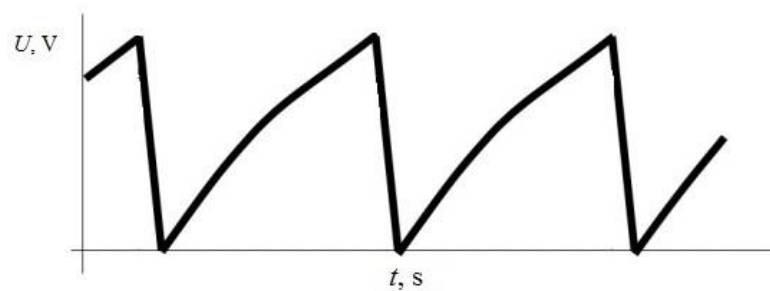
Z následujícího obrázku 2.2 je patrné zapojení pro snímání otáček. Vstupní signál ze žlutého vodiče ventilátoru je přiveden na bázi tranzistoru $T2$, který je spínán v závislosti na velikosti otáček.

Dle dokumentace výrobce je nutné připojit vodič pro spínání otáček přes odpor ($R3$) k napájecímu napětí, v tomto případě 12 V stejnosměrných. Hodnota tohoto odporu ($R3$) je dána také z dokumentace, jelikož proud (I) tekoucí tímto odporem může být maximálně 5 mA. Pro výpočet hodnoty tedy použijeme Ohmův zákon, čímž zjistíme, že minimální hodnota tohoto odporu je 2 400 Ω .

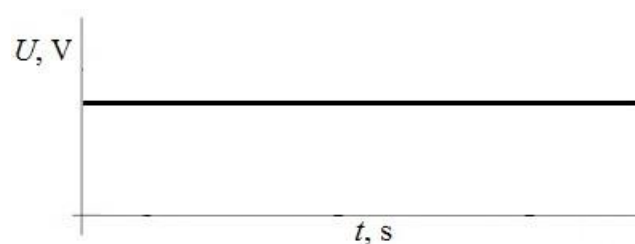
Kombinací odporu ($R5$) a kondenzátoru ($C1$) získáme průběh, z kterého je zřetelné nabíjení a vybíjení kondenzátoru ($C1$) viz obrázek 2.3. Kombinace těchto součástí je volena v závislosti na hodnotě napětí, kterou kondenzátor nabije. Tento průběh pomocí druhé kombinace odporu ($R6$) a kondenzátoru ($C2$) upravíme na signál, který bude nepřímo úměrný rychlosti otáčení ventilátoru. Čím bude rychlost otáček vyšší, tím bude napěťový signál menší, což je znázorněno na obrázku 2.4. Operační zesilovač v zapojení napěťového sledovače poskytuje oddělení bloku měření otáček ventilátoru z důvodu vráceného napětí, které by ovlivňovalo odběr proudu regulátoru.



Obrázek 2.2 – Schéma snímání otáček



Obrázek 2.3 – Signál kondenzátoru C1



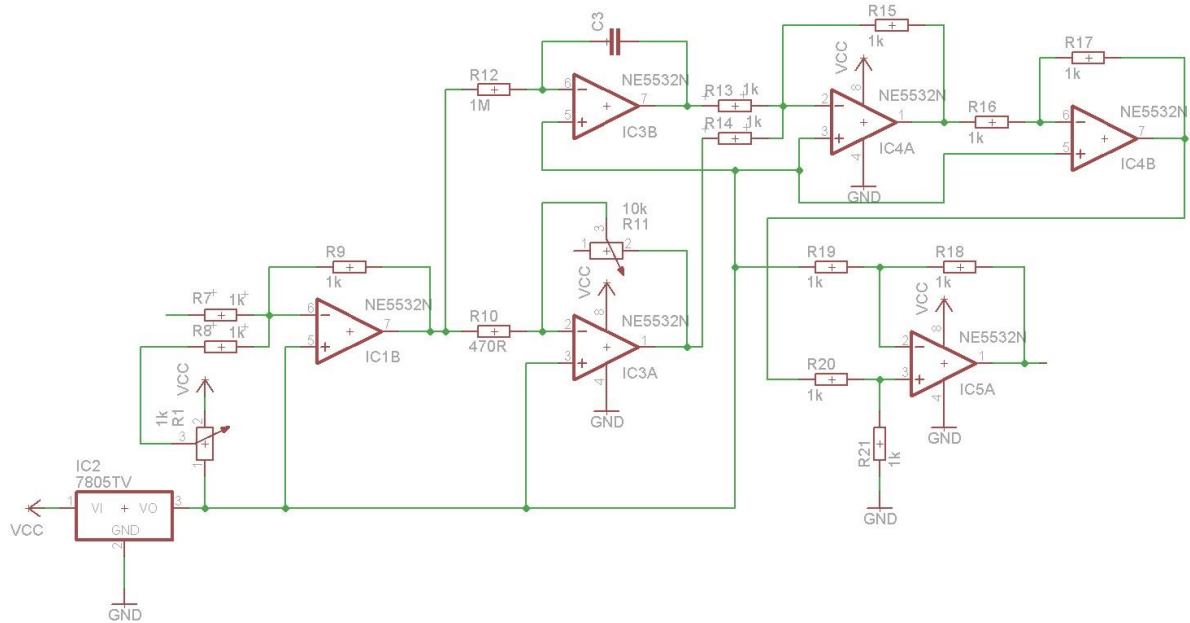
Obrázek 2.4 – Signál na kondenzátoru C2

Následující částí obvodu je zapojení samotného PI regulátoru, které je patrné z obrázku 2.5. Z podkapitoly 1.2 je už známo, co tato zapojení operačních zesilovačů provádí. Zesilovač IC1B, který je sumátorem, sčítá a zároveň inverzuje signály $-\omega + U_{\text{Ref}}$ a $w + U_{\text{Ref}}$, jehož výsledkem je $-(w - \omega) + U_{\text{Ref}}$.

kde ω – napěťový signál úměrný otáčkám ventilátoru, V,
 U_{Ref} – Referenční napětí stabilizátoru, V.

Následující OZ (IC3A) je proporcionální složka, která svým poměrem $R_{11} : R_{10}$ nastavuje zesílení K a zároveň signál invertuje. Výsledkem je $K(w - \omega) + U_{\text{Ref}}$. Výsledný signál ze sumátoru také vstupuje do integrační složky (IC3B), která nám toto napětí integruje v čase. Zesilovač IC4A, který opět funguje na principu sumátoru, sečte signály z integrační a proporcionální složky. Jelikož je výsledkem tohoto zesilovače záporné napětí, je nutno tento signál zase převést na signál kladný, tudíž je zapojen invertující zesilovač IC4B.

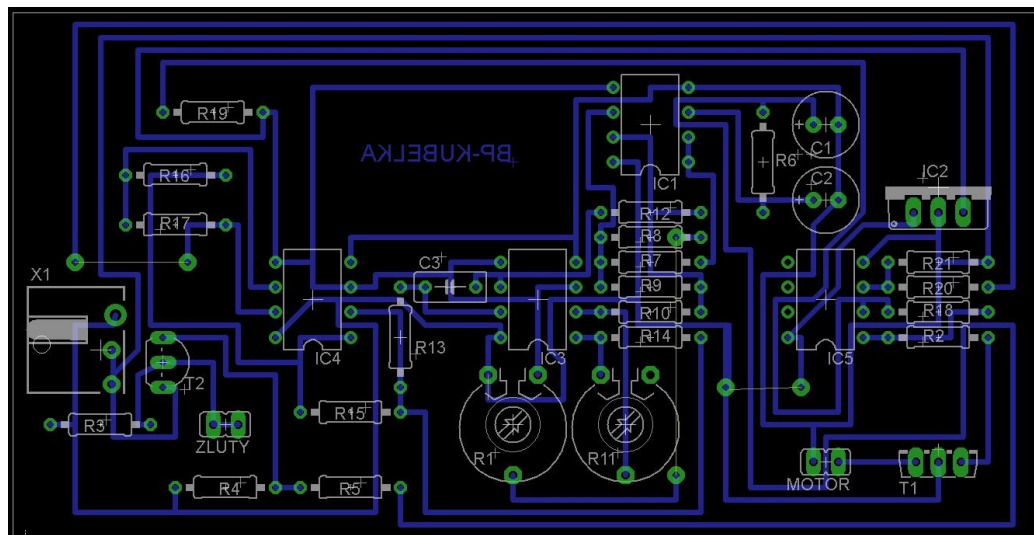
Zesilovač IC5A v zapojení rozdílového zesilovače zajišťuje odečtení U_{Ref} od napěťového signálu tak, aby výsledkem byl signál $K(w - \omega)$.



Obrázek 2.5 – Schéma PI regulátoru

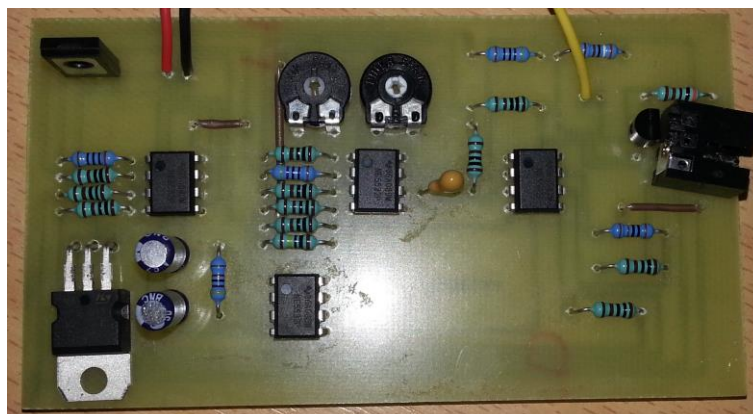
Pro dokončení tohoto zapojení se výstupní signál zesilovače IC5A přivede na bázi výkonového spínacího tranzistoru BD237 ($T1$). Tímto krokem jsme zajistili zpětnou vazbu soustavy pro nadcházející regulaci. Celkové schéma viz příloha.

Dle celkového schématu byla následně navržena a vyrobena deska plošného spoje, která je zobrazena na obrázku 2.6.



Obrázek 2.6 – Deska plošného spoje

Na obrázku 2.7 je možné vidět již vyrobenou a osazenou desku plošného spoje.

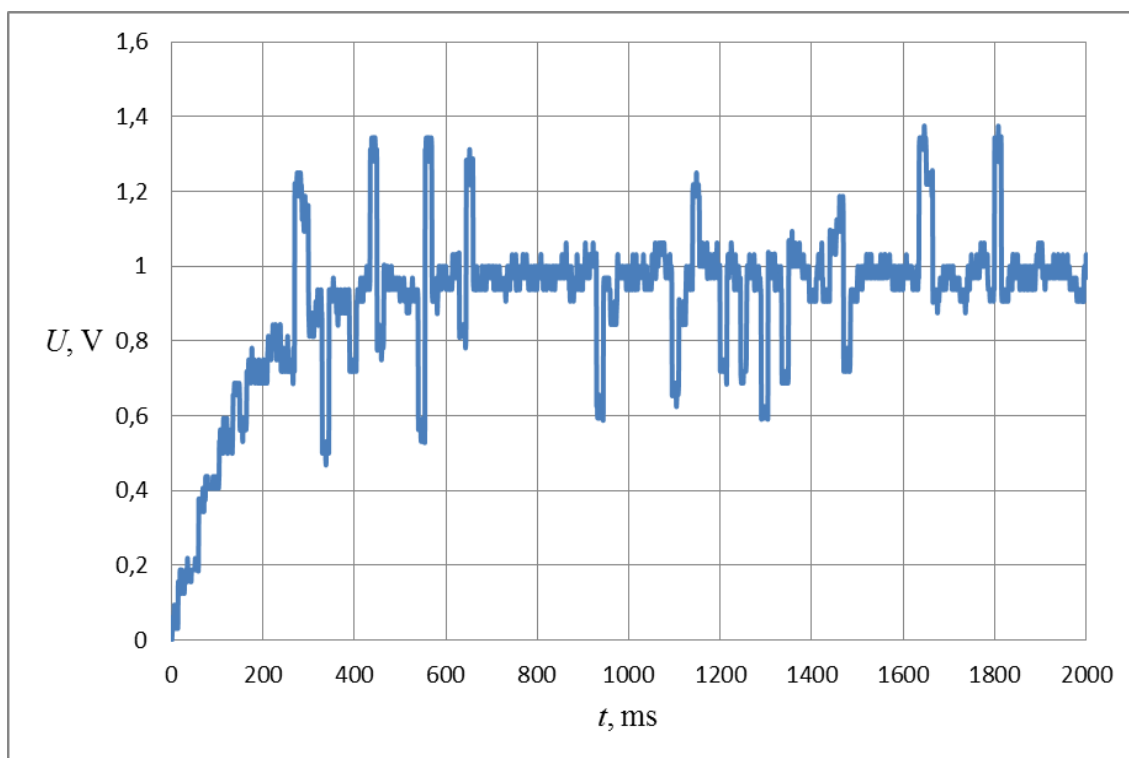


Obrázek 2.7 – Osazená DPS

2.2 MĚŘENÉ CHARAKTERISTIKY SOUSTAVY

Pro měření následujících charakteristik, byl využit digitální osciloskop firmy Voltcraft model 2090 USB.

První krok po oživení obvodu vedl ke splnění cíle této práce. Tedy změření přechodové charakteristiky soustavy. Z obrázku 2.8 je patrné, že při skokové změně vstupního napětí byla na výstupu zesilovače (obrázek 2.2) změřena přechodová charakteristika 1. řádu.



Obrázek 2.8 – Přechodová charakteristika ventilátoru

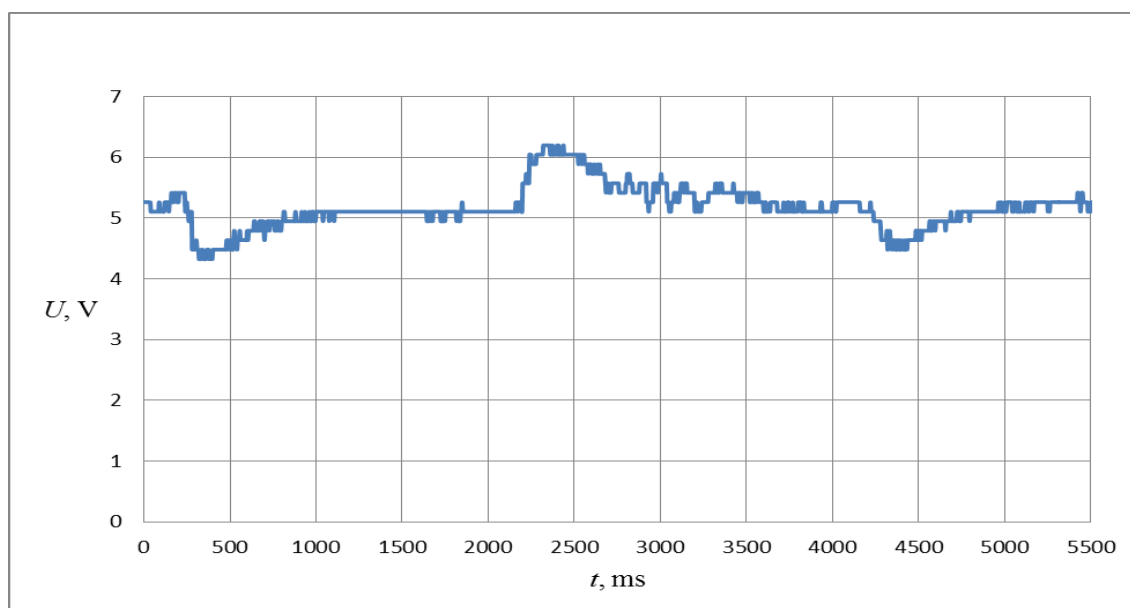
Při měření proporcionální složky regulátoru s různou velikostí zesílení byla sledována regulační odchylka. Na základě této odchylky byla sestrojena tabulka 2.1. Z tabulky je patrné, že čím větší je zesílení K , tím menší je regulační odchylka e .

Tabulka 2.1 – Regulační odchylka P regulátoru

| K | e, V |
|-------|--------|
| 0,053 | 18,60 |
| 0,081 | 12,40 |
| 0,125 | 8,00 |
| 0,175 | 5,72 |
| 0,455 | 2,20 |

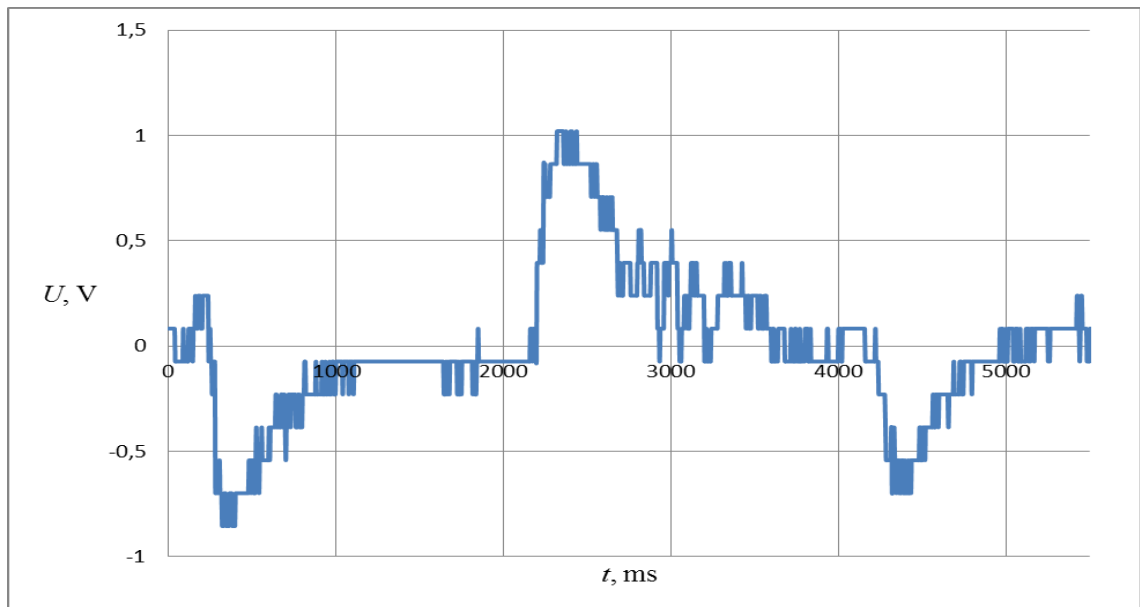
Následujícím krokem byla přidána integrační složka, pomocí které regulační odchylka klesá k nulové hodnotě. Časová konstanta integrační složky T_I je zvolena manuálně kombinací kondenzátoru ($C3$) a odporu ($R12$). Dle vztahu $T_I=RC$ je výsledná hodnota 0,5 sekund.

Na následujícím grafu (obrázek 2.9) je patrná změna napěťového signálu, při změně žádané veličiny. Ovšem pozor, v této části signálu je stále přičtené U_{Ref} , které je na vývodu napěťového stabilizátoru. V tomto případě 5 V. Dále je zde vidět funkce integrační složky regulátoru, která se nám snaží minimalizovat regulační odchylku a co nejvíce se přiblížit žádané hodnotě.



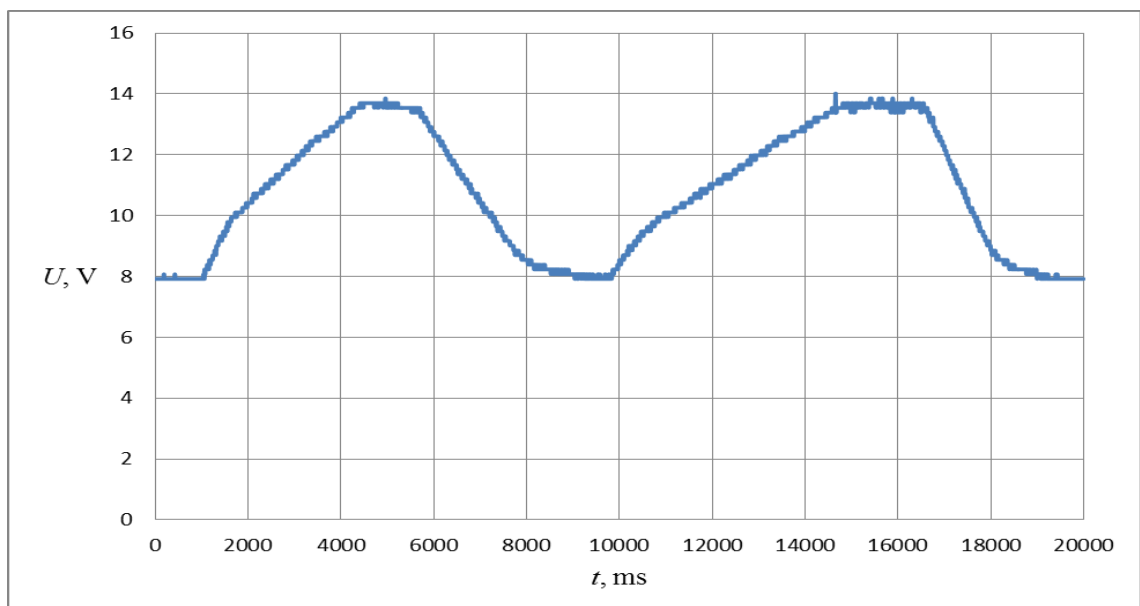
Obrázek 2.9 – Napěťový signál při změně žádané veličiny

Po jednoduché matematické úpravě předešlého obrázku 2.9 tak, aby byla zobrazena pouze regulační odchylka (e), je potřeba od napětíového signálu odečíst U_{Ref} . Tímto krokem je získána pouze hodnota regulační odchylky (e), která je zobrazena v následujícím obrázku 2.10.



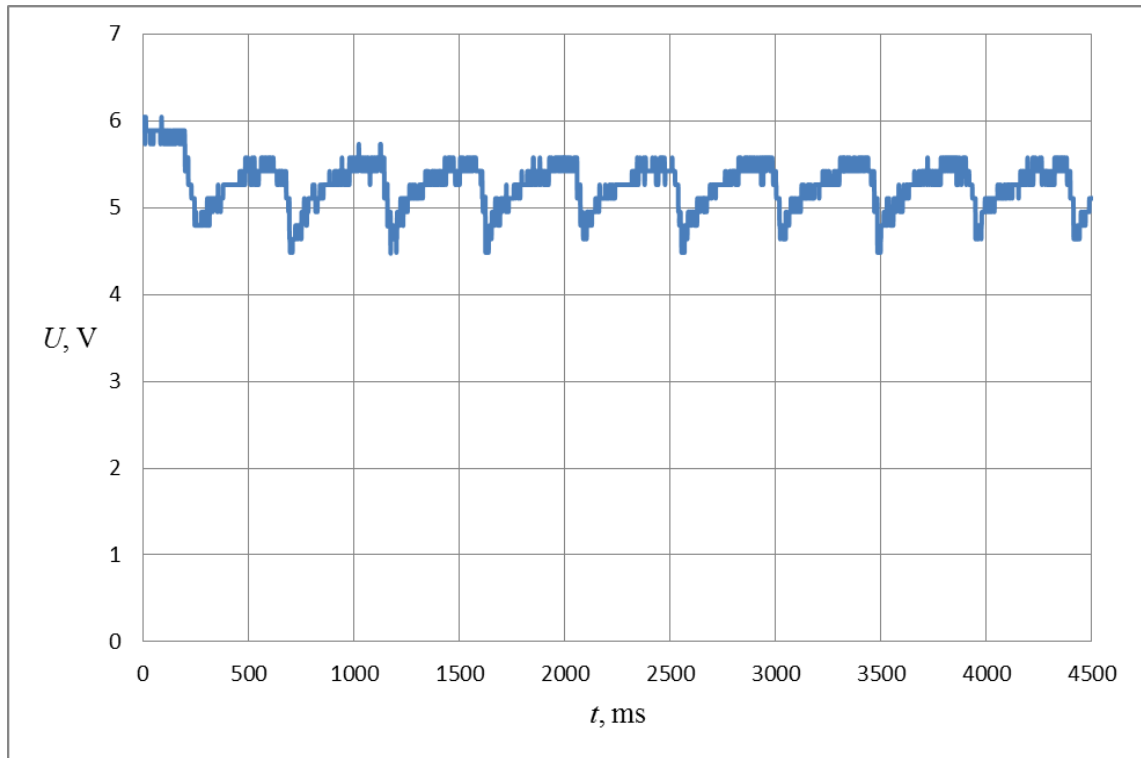
Obrázek 2.10 – Regulační odchylka při změně žádané veličiny

Další měření probíhalo na kondenzátoru ($C3$) integračního členu. Zde proběhlo měření napětí, při kterém se kondenzátor nabíjel/vybíjel. Velikost tohoto napětí při skokových změnách žádané veličiny je patrná z obrázku 2.11.



Obrázek 2.11 – Činnost integrační složky při změně žádané veličiny

Poslední měření, které na této soustavě proběhlo, bylo měření, kdy soustava s konstantní amplitudou a frekvencí oscilovala. Tohoto děje bylo dosaženo tím, že bylo zvoleno dostatečně velké zesílení PI regulátoru, při kterém se soustava dostala na hranici stability obvodu. Průběh je zobrazen na obrázku 2.12, na kterém je signál $-\omega + U_{\text{Ref}}$.



Obrázek 2.12 – Soustava na mezi stability, signál $-\omega + U_{\text{Ref}}$

3 ZÁVĚR

Závěrem této bakalářské práce bych chtěl sdělit, že uvedené cíle práce jsou splněny a uvedeny v kapitole 2.

Největším problémem při realizaci obvodu bylo získání stejných hodnot součástek, z důvodu platnosti vztahů v teoretické části. Bohužel sehnat takové součástky je takřka nemožné, jelikož výrobci mají toleranci, v jaké se výrobek může pohybovat. Důsledkem těchto nepřesností je, že při měření výsledky nedosahují hodnot, které by dle vztahů měli být, ale mají minimální odchylky.

Dalším stěžejním problémem je nastavení regulátoru dle uvedené metody. Tato metoda je jednou z nejpoužívanějších, avšak pro toto nastavení regulátoru nevyhovující, jelikož obvod nebylo možné pouze proporčním regulátorem přivést ke stavu oscilace. Následně tedy nemohli být určeny hodnoty pro nastavení regulátoru dle popsané metody. Regulátor byl tedy nastaven manuálně dle schématu zapojení. Příčinou tohoto problému je zřejmě interní regulátor, který ventilátor již obsahuje.

Posledním problémem byla absence symetrického zdroje napájení, které bylo bohužel nedostupné. Jelikož operační zesilovač tedy nemohl pracovat se záporným napětím, byl tedy do obvodu zapojen stabilizátor napětí, k jehož hodnotě bylo měření prováděno.

Literatura

- Automatizace 2. 2008. *Střední průmyslová škola a Vyšší odborná škola Chomutov* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://web.spscv.cz/~madaj/skra4.pdf>
- CVEJN, J. 2007. Elektronický studijní materiál k předmětu Automatizace I. *Řízení procesů* [online]. Pardubice: Univerzita Pardubice, FEI. 1. 11. 2007, s. 112 [cit. 2015-05-05].
- HLAVA, J. 2000. *Prostředky automatického řízení II: analogové a číslicové regulátory, elektrické pohony, průmyslové komunikační systémy*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, Strojní fakulta. 160 s. ISBN 80-01-02221-8.
- Zieglerova-Nicholsova metoda kritických parametrů. 2009. *Katedra automatizační techniky a řízení* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://www.352.vsb.cz/uc_texty/synteza/text0302.htm
- Co znamená PID. 2003. *AUTOMA* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://automa.cz/index.php?id_document=28768
- Operační zesilovače. 2000. *Technická univerzita Ostrava* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~sla10/Elektronika/Elektronika4a.pdf>
- MIEKISCH, J. 2011. *Regulované soustavy* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://www.strojka.opava.cz/UserFiles/File/sablony/AUT_IV/VY_32_INOVACE_E-15-16.pdf
- ŠRITR, J. 2011. *Lopatkové stroje* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://dum.spsnome.cz/2011/tp/sr/sr-tp-sps-04-05-Cerpadla-a-ventilatory.pdf>
- Operační zesilovač. 2007. *Střední škola, Havířov-Šumbark* [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://www.outech-havirov.cz/skola/files/knihovna_eltech/ea/oz.pdf
- PUNČOCHÁŘ, J. 1996. *Operační zesilovače v elektronice*. Praha: BEN, 479 s. ISBN 80-901-9843-0.

Přílohy

A - Schéma zapojení

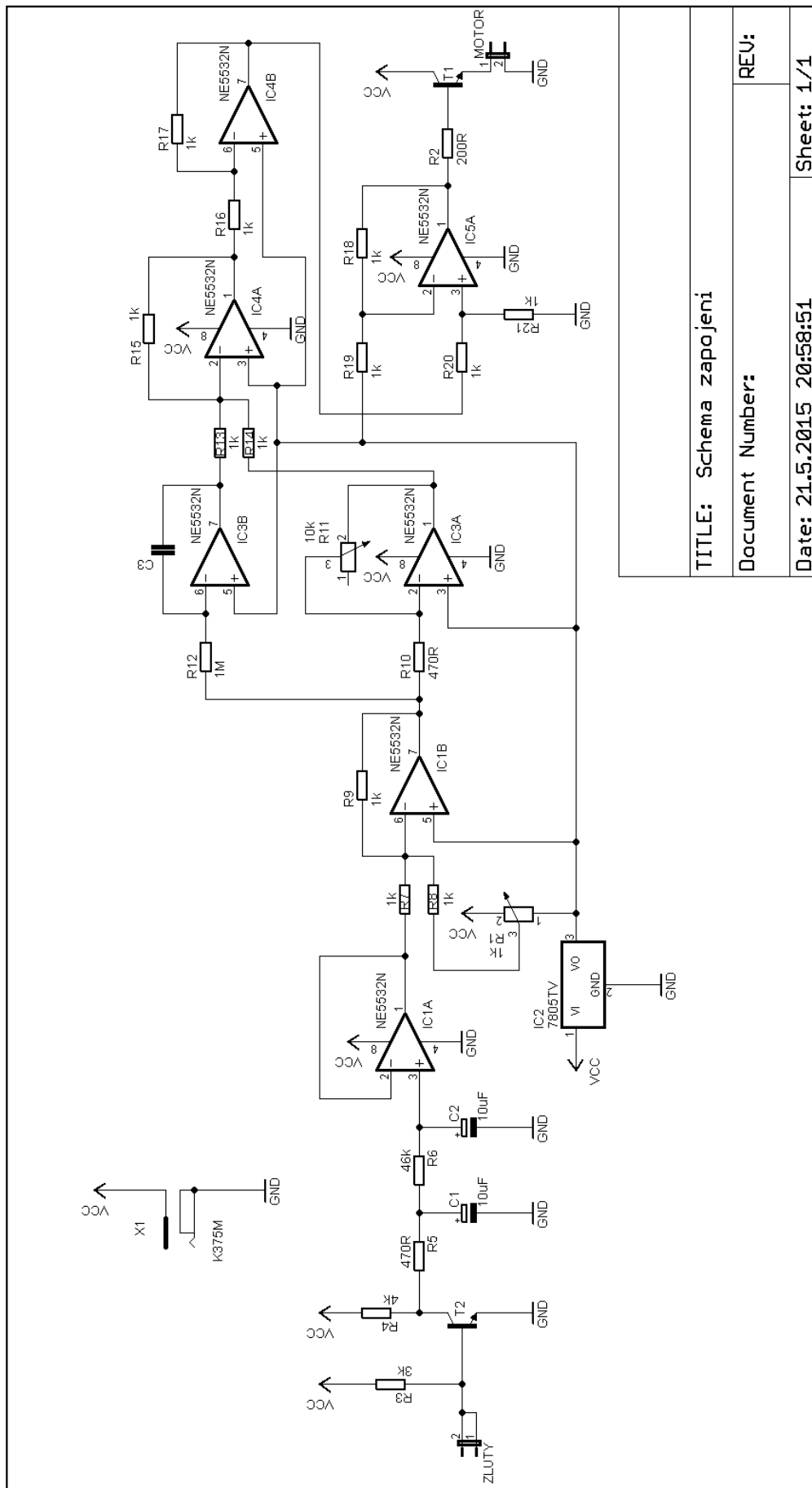
B - CD

Příloha k bakalářské práci

Ověření principů zpětnovazebního řízení – řízení otáček ventilátoru

Pavel Kubelka

Schéma zapojení



TITLE: Schema zapojeni

Document Number:

REV:

Date: 21.5.2015 20:58:51

Sheet: 1/1

Příloha k bakalářské práci

Ověření principů zpětnovazebního řízení – řízení otáček ventilátoru

Pavel Kubelka

CD

Příložené CD obsahuje napsanou práci se soubory schématu a desky plošného spoje. Dále jsou zde uvedeny datové soubory, které jsou uloženy v tabulkovém procesoru MS Excel. Soubory schématu a desky plošného spoje jsou uloženy v programu Eagle.