

UNIVERZITA PARDUBICE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

LEVITUJÍCÍ KULIČKA

Ondřej Welsch

Bakalářská práce

2009

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektrotechniky
Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ondřej WELSCH**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**

Název tématu: **Levitující kulička**

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 konstrukce přípravku regulace polohy kuličky ve skleněném válci, obtékané vzduchem. V teoretické části bude proveden rozbor přípravku z hlediska teorie regulace a rozbor dostupných řešení bezdotykového snímání polohy kuličky. Regulace bude probíhat formou změn otáček motoru a klapkou omezující průtok vzduchu. Navržené zařízení bude schopno předávat aktuální polohu do vyhodnocovacího PC, kde bude vytvořen vhodný software pro ovládání.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

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

Seznam odborné literatury:

Pinker J.: "Mikroprocesory a mikropočítače", BEN Praha 2004, ISBN: 80-7300-110-1 Hrabáček J.: "Komunikace mikrokontroléru s okolím", BEN Praha 1999, ISBN: 80-86056-73-2 Burkhard M.: "C pro mikrokontroléry", BEN Praha 2003, ISBN: 80-7300-077-6 Kubík S., Kotek Z., Šalamoun M.: "Teorie regulace", Praha SNTL 1974

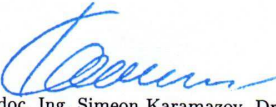
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Dobrovolný, Ph.D.**
Katedra elektrotechniky


Datum zadání bakalářské práce: **15. ledna 2009**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15. května 2009**



L.S.


doc. Ing. Simeon Karamazov, Dr.
děkan


Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 31. března 2009

Poděkování

V úvodu bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Martinu Dobrovolnému za užitečné připomínky a rady týkající se této práce. Dále bych rád poděkoval Miroslavu Šedivému a Ondřeji Karasovi za zapůjčení vývojového hardware a za pár užitečných rad.

SOUHRN

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a konstrukcí přípravku regulace polohy kuličky ve skleněném válci, (obtékaném vzduchem). Teoretická část popisuje rozbor přípravku z hlediska teorie regulace a rozbor dostupných řešení bezdotykového snímání polohy kuličky. Regulace probíhá formou změn otáček motoru a klapkou omezující průtok vzduchu. Navržené zařízení je schopno předávat aktuální polohu do vyhodnocovacího počítače, kde je vytvořen vhodný software pro ovládání.

KLÍČOVÁ SLOVA

Regulace; Bezkontaktní měření polohy; PID

TITLE

Levitation ball

ABSTRACT

This bachelor work deals with scheme and construction of product, which regulate the position of a ball in glass roll. The theoretical part of the bachelor thesis describes analysis of this product based on the theory of regulation and analysis of current solutions of touchless sensing position of the ball. Regulation takes place changing engine speed and valve restricting flow. This device is able to transmit the current location to PC, where is a suitable software control.

KEYWORDS

Regulation; Contactless position measurement; PID

OBSAH

1	Úvod	11
2	Přehled čidel pro měření polohy	12
2.1	Ultrazvukové senzory	12
2.1.1	Dosah ultrazvukových čidel	12
2.1.2	Princip ultrazvukové detekce	12
2.2	Infračervené senzory	13
2.2.1	Infračervené reflexní senzory	13
2.2.2	Triangulační IR senzory	14
2.2.3	Line-detection senzory	14
2.3	Laserové senzory	15
3	Infra senzor SHARP GP2D120	15
3.1	Vlastnosti a princip detekce	15
3.2	Výstupní charakteristika senzoru	17
3.3	Linearizace výstupu	17
3.3.1	Inverzní křivkou	17
3.3.2	Lineární aproximací	18
3.3.3	Linearizační funkcí	18
4	Regulace	21
4.1	Struktura zpětnovazebních regulačních obvodů	21
4.1.1	Regulovaná soustava	22
4.1.2	Regulační obvod	22
4.2	Regulátor	23
4.2.1	Měřící člen (MČ)	23
4.2.2	Akční člen (AČ)	24

4.3	Druhy a typy regulátorů	25
4.3.1	Dvoustavový regulátor	25
4.3.2	Regulátor PID	26
4.4	Kriteria jakosti regulace	28
4.4.1	Integrální kriteria	29
4.4.2	Kriteria nepřímá - podle průběhu regulačního pochodu	30
4.5	Optimální nastavení regulátorů	30
4.5.1	Metoda kritického stavu:.....	31
4.5.2	Metoda výpočtová.....	32
4.5.3	Doladění regulačních parametrů.....	33
5	Přípravek a jeho realizace	34
5.1	Regulace za pomoci výkonu ventilátoru	34
5.2	Regulace škrticí klapkou pomocí servomotoru	35
5.2.1	Servomotory	36
6	Závěr	39

SEZNAM OBRÁZKŮ

OBRÁZEK 1 : DETEKCE ODRAZU.....	12
OBRÁZEK 2 : IR REFLEXNÍ SENZOR.....	14
OBRÁZEK 3: TRIANGULAČNÍ IR SENZOR SHARP	14
OBRÁZEK 4: SHARP GP2D120.....	15
OBRÁZEK 5: PRINCIP TRIANGULACE.....	16
OBRÁZEK 6: PŘIPEVNĚNÉ ČIDLO	16
OBRÁZEK 7: ANALOGOVÝ VÝSTUP Z ČIDLA.....	17
OBRÁZEK 8: LINEARIZOVANÝ VÝSTUP DETEKTORU	19
OBRÁZEK 9: ZPĚTNOVAZEBNÍ REGULAČNÍ OBVOD	22
OBRÁZEK 10: SCHÉMA REGULÁTORU	23
OBRÁZEK 11: DVOUSTAVOVÝ REGULÁTOR	25
OBRÁZEK 12: PŘECHODOVÁ CHARAKTERISTIKA A STRUKTURA IDEÁLNÍHO PID REGULÁTORU	27
OBRÁZEK 13: PŘECHODOVÁ CHARAKTERISTIKA A STRUKTURA REÁLNÉHO PID REGULÁTORU.....	28
OBRÁZEK 14: DIAGRAM PRO URČENÍ REGULÁTORU.....	31
OBRÁZEK 15: PŘÍPRAVEK.....	34
OBRÁZEK 16: TURBÍNOVÝ VENTILÁTOR.....	35
OBRÁZEK 17: SERVO S KLAPKOU	36

SEZNAM TABULEK

TABULKA 1: KLAIBRAČNÍ HODNOTY	20
-------------------------------------	----

SEZNAM ZKRATEK

IR	Infra Red	infračervené
LED	Light Emitting Diode	svítící dioda
LDR	Light Dependent Resistor	fotocitlivý odpor
CCD	Charge-Coupled Device	zařízení s vázanými náboji
ADC	Analog to digital convertor	převodník analog na Digital
PWM	Pulse Width Modulation	pulzní šířková modulace
PID	Proportional Integral Derivative	Proporcionální Integroační Derivační
PVC	Polyvinylchlorid	
CNC	Computer Numerical Control	Počítačově číselně řízený
RC	Radio Control	Radiově řízený
EEPROM	Electronically Erasable Programmable Read-Only Memory	Elektricky mazatelná paměť pouze pro čtení

1 ÚVOD

Elektronická regulace za pomoci mikroprocesorů se dnes hojně používá téměř všude, kam se podíváme. Regulovat se dá dnes téměř vše, počínaje vytápěním, osvětlením, až po otáčky motoru Vašeho automobilu.

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout a vytvořit přípravek, na kterém by bylo možné si regulaci názorně předvést. Jedná se zde o regulaci polohy kuličky ve skleněném válci, obtékanou vzduchem. Klíčem regulace je měnit průtok vzduchu tak, aby nadnášená kulička byla pokud možno ve stejné pozici. A to i při vnesení poruchové veličiny, například pomocí škrticí klapky, či snížení otáček ventilátoru.

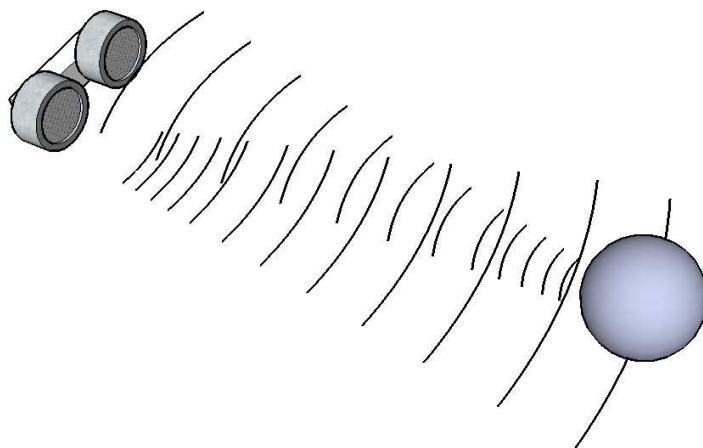
Jedná se o průhlednou trubici, kterou proudí vzduch z turbínového ventilátoru a unáší předmět. O polohu předmětu se stará navrhnutá a vyrobená regulační elektronika. Regulace je možná dvěma způsoby. A to formou změn otáček motoru, kde klapkou omezující průtok vzduchu vnášíme poruchovou veličinu. A ve verzi druhé formou změny natočení škrticí klapky, kdy má ventilátor stabilní otáčky. Případně změnami otáček vnášíme poruchovou veličinu.

2 PŘEHLED ČIDEL PRO MĚŘENÍ POLOHY

Měření polohy je pro tuto regulaci klíčový prvek. Při volbě čidla jsem se zaměřil na schopnost měření v daných podmínkách, tudíž v trubce. Měření musí probíhat bezkontaktně, tudíž jsou vyloučená například inkrementální čidla apod.

2.1 Ultrazvukové senzory

Ultrazvuková čidla pracují na podobném principu jako radar. Tudíž měří dobu mezi vysláním a zachycením odraženého signálu od překážky.



Obrázek 1 : Detekce odrazu

2.1.1 Dosah ultrazvukových čidel

Důležitým prvkem výběru je dosah čidla a s tím spojené 3rozměrné šíření signálu prostorem. Dosah určuje, do jaké vzdálenosti může ultrazvukové čidlo měřit běžné odrazivé předměty s dostatečnou rezervou spolehlivé funkce. U předmětů s dobrou odrazivostí, lze čidlo použít až k jeho mezní hodnotě dosahu.

2.1.2 Princip ultrazvukové detekce

Ultrazvukové čidlo vysílá opakovaně impulsy o vysoké frekvenci, pro člověka neslyšitelné, které se šíří rychlostí zvuku. Pokud narazí na nějaký dostatečně velký

předmět, šíří se zpět k čidlu jako ozvěna, ovšem s podstatně menší intenzitou. Z časového intervalu mezi vysláním impulsu a návratem ozvěny, čidlo vyhodnotí vzdálenost předmětu. Ovšem přesnost této vzdálenosti může být ovlivněna hned několika faktory. A to sice teplotou vzduchu, neboť zvuk se šíří v hustším prostředí rychleji, a také pohybem vzduchu například vlivem větru. Jsou to ovšem vlivy, které se projevují spíše na delší vzdálenosti.

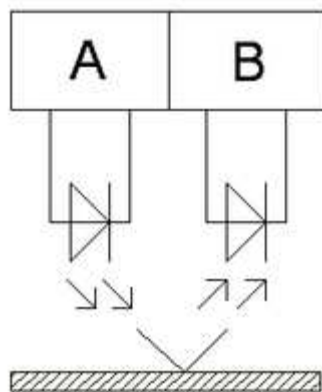
Vzhledem k tomu, že ultrazvuková čidla měří vzdálenost na principu časové odezvy na vyslaný zvukový impuls při konstantní rychlosti šíření zvuku a ne pomocí měření intenzity, mají vynikající schopnost potlačení pozadí. Téměř všechny materiály, které odrážejí zvuk, lze detekovat bez ohledu na jejich barvu. Lze je použít i na průhledné materiály. Ovšem tato čidla nejlépe fungují ve volném prostoru, tudíž se pro měření polohy předmětů v malých uzavřených prostorách nehodí, tudíž jsem možnost použití těchto čidel zavrhl.

2.2 Infračervené senzory

Infračervená čidla jsou, díky své ceně a jednoduchosti s poměrně dobrými výsledky, jedny z nejpoužívanějších a nejrozšířenějších snímačů polohy. Rozdělují se do tří základních skupin, podle principu vyhodnocování polohy.

2.2.1 Infračervené reflexní senzory

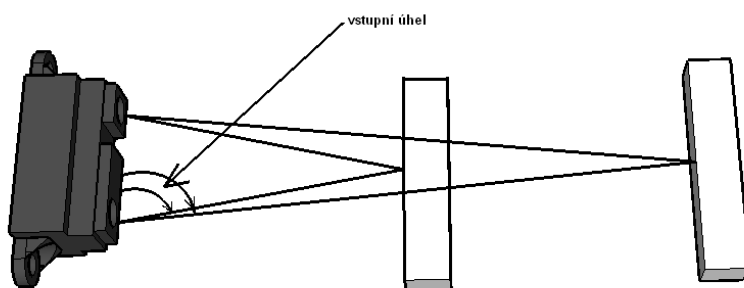
Tento typ používá IR-LED a IR-diodu nebo fototranzistor. V případě, že je objekt v blízkosti dopadá odražené IR záření na IR-diodu. Použití modulovaného IR-světla a filtrování vstupního signálu z IR-diody výrazně zlepšuje odolnost proti rušení okolním světlem. Tyto senzory se používají spíše než pro měření vzdálenosti, pro detekci přítomnosti. Jejich dosah je v řádu jednotek centimetrů.



Obrázek 2 : IR reflexní senzor

2.2.2 Triangulační IR senzory

Tato čidla vyhodnocují vzdálenost předmětu podle úhlu, pod kterým dopadá odražené IR světlo. Tyto čidla jsou tvořeny diodou, která emituje IR světlo usměrněné čočkou do poměrně úzkého paprsku a IR-citlivým LDR-senzorem. LDR je zkratka pro light dependent rezistor neboli fotocitlivý odpor, který je v čidle ve formě úzkého pásku. Míra světla, která na něho dopadá, závisí na úhlu, pod kterým vstupuje do senzoru. Jelikož se s narůstající vzdáleností předmětu, úhel mění čím dál méně, je charakteristika výstupního napětí v závislosti na vzdálenosti, nelineární. Je tudíž potřeba její následná linearizace.



Obrázek 3: Triangulační IR senzor sharp

2.2.3 Line-detection senzory

Jedná se o senzory, které detekují ponejvíc vodící linku. Tyto senzory se používají převážně v robotice. Princip je podobný jako u reflexních IR-senzorů. Tento senzor využívá rozdílu v odrazivosti bílého pozadí a černé linky.

2.3 Laserové senzory

Laserové měřiče vzdálenosti jsou jedny z nejpřesnějších senzorů. Laserovým měřicím systémem lze měřit standardně rozsahy 0 - 40 m s rozlišením 1,25nm. Rychlost měření dosahuje standardně $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, resp. $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Měřiče jsou vhodné pro delší vzdálenosti v rozsahu od cca 1m, až po statisíce kilometrů. Např. pro měření pohybu kontinentálních desek, nebo i vzdálenosti měsíce od Země. Jejich velkou nevýhodou je samozřejmě cena.

3 INFRA SENZOR SHARP GP2D120

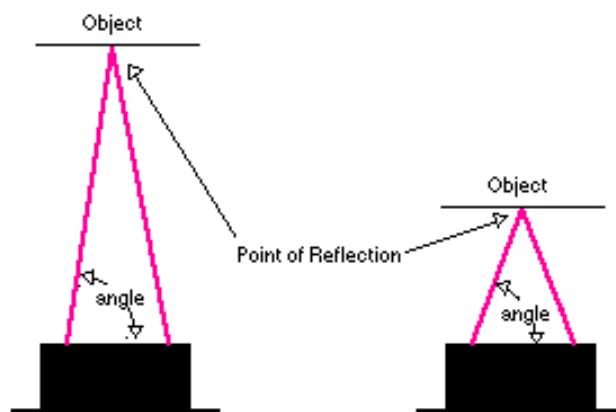
Tento senzor jsem vybral jako hlavní čidlo pro měření vzdálenosti. Čidlo pracuje na bázi infračerveného záření a je triangulačního typu. Díky této vlastnosti ho lze použít i pro měření v úzkém prostoru.



Obrázek 4: Sharp GP2D120

3.1 Vlastnosti a princip detekce

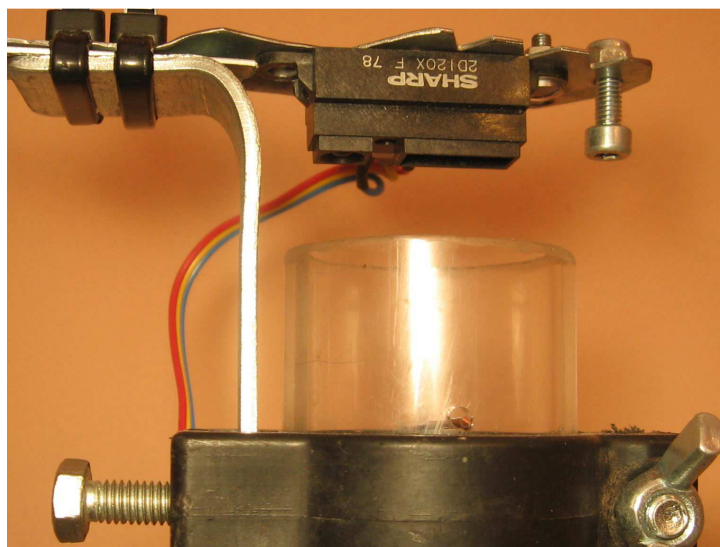
Tento senzor je analogový a jeho měřicí rozsah je od 4 cm (1,6 ") do 30 cm (12"). Jeden z kladů těchto detektorů je poměrně malá velikost, a velmi nízká aktuální spotřeba. Tento detektor má oproti jeho předchůdci mnohem lepší vlastnosti, například odolnost proti rušení vlivem okolních zdrojů IR světla, protože emitované IR světlo je modulované. Jako snímací prvek triangulace je zde použit malý lineární CCD snímač, neboli CCD pole.



Obrázek 5: Princip triangulace

Jak je vidět na obrázku 5. úhly trojúhelníku závisí na vzdálenosti předmětu. Snímací část tohoto detektoru je v podstatě přesný objektiv, který přenáší odražené IR světlo do různých částí lineárního CCD pole, dle již zmíněného úhlu. Podle toho CCD pole detektoru určí napětí, z kterého je následně možné vypočítat vzdálenost objektu.

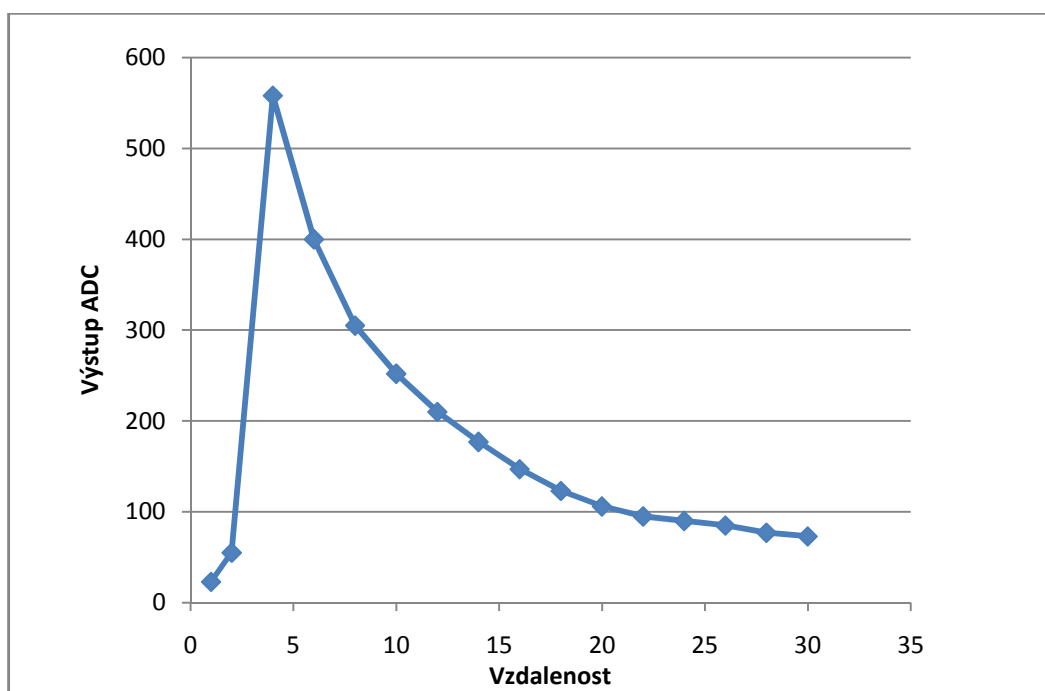
Tento nový způsob detekce je téměř imunní vůči rušení okolního světla a je téměř nezávislý na barvě předmětu, který detekuje. Dokáže určit i polohu černé stěny při plném slunečním svitu.



Obrázek 6: Připevněné čidlo

3.2 Výstupní charakteristika senzoru

Jak je již uvedeno výše, z důvodu trigonometrie je výstupní charakteristika detektoru nelineární. Na obrázku 7. je typický výstup detektoru GP2D120. Jak je vidět v rozsahu (4 cm - 30 cm) není lineární, ale spíše logaritmický, a v těsné blízkosti (0 cm – 4cm) odrážené světlo již nedopadá na CCD pole a proto detektor tuto polohu vyhodnotí tak jako by předmět byl v nedohlednu. Kvůli této vlastnosti je třeba zajistit, aby se buď předmět nemohl tak blízko přiblížit, nebo ošetřit jinak. V praxi se tento problém řeší například tím, že se přidá ještě jiné čidlo, pracující buď v jiném rozsahu, nebo na jiném principu. Pokud toto není ošetřeno, může dojít i k fatálním následkům, např. při dojíždění robotů k objektu apod.



Obrázek 7: Analogový výstup z čidla

3.3 Linearizace výstupu

3.3.1 Inverzní křivkou

Jedním z možných způsobů, jak se vyrovnat s nelineárním výstupem detektoru, který poměrně dobře funguje, je vygenerování vhodné křivky v nějakém sofistikovaném matematickém programu. Funkce, které tyto programy vytvářejí,

jsou většinou na celkem dobré úrovni, ovšem obvykle vyžadují plovoucí desetinnou čárku a tudíž i dobré matematické knihovny. To není moc vhodné pro použití v jednočipových procesorech, neboť samotný výpočet je dosti zdlouhavý a zabere podstatnou výpočetní kapacitu procesoru, a tudíž velice sníží frekvenci měření.

3.3.2 Lineární aproximací

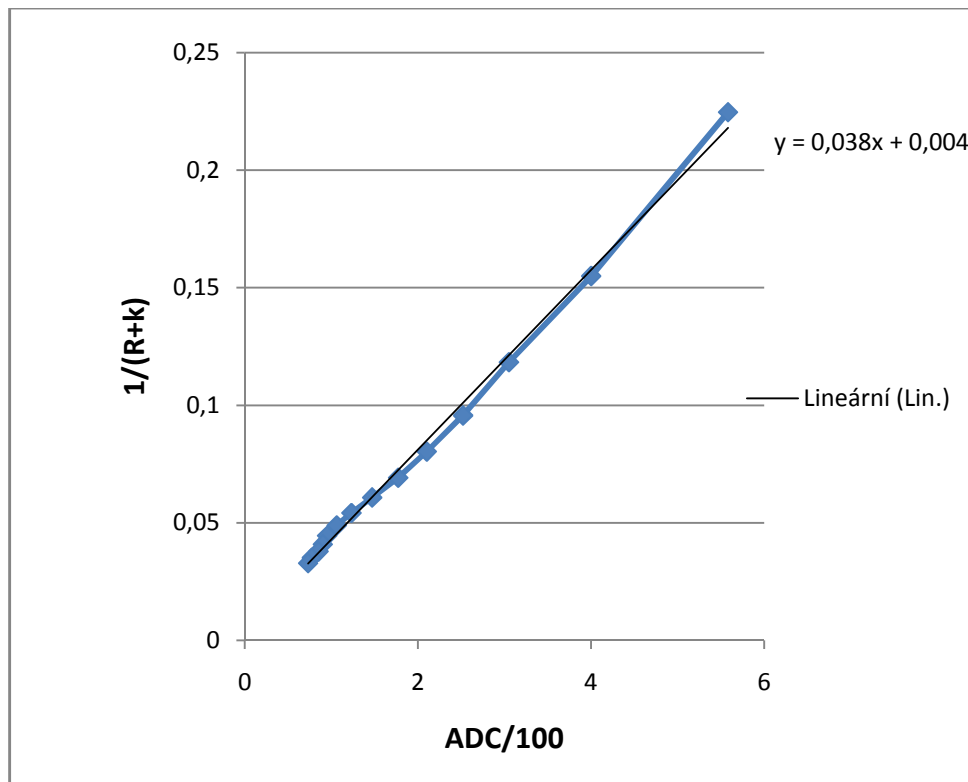
Další možností je použití po částech lineární aproximaci, kdy se křivka napětí konvertuje na řadu hodnot. V podstatě je to rozklad dané charakteristiky na jednotlivé přímky, a pro každou tuto přímku se vytvoří samostatná aproximace na samostatném řádku. Tyto lineárního aproximace jsou pro procesor jednoduše spočitatelné, a je pomocí nich možné provádět výpočty s poměrně dobrou přesností pomocí celočíselných funkcí. Nevýhodou je, že tabulka s těmito funkcemi zabírá velkou část kódu. Proto by bylo ideální mít jedinou aproximační funkci, která je jednoduše celočíselně zpracovatelná. Naštěstí existují jednoduché výpočty, které mohou "linearizovat" výstup tohoto senzoru.

3.3.3 Linearizační funkcí

Sharp, výrobce tohoto detektoru, uvádí rovnici, podle níž lze výstup celkem jednoduše interpolovat:

$$V = \frac{1}{R + 0.42}$$

V rovnici „V“ představuje napětí a „R“ vzdálenost objektu od senzoru. Rovnice produkuje celkem rovnou přímku. Tato úprava funguje jako lineární funkce, která upraví nepravidelnou křivku v lineární. Tento poznatek je klíčem k nalezení jednoduché aproximační funkce pro tyto detektory.



Obrázek 8: Linearizovaný výstup detektoru

Konstanta v dané linearizační funkci závisí na typu senzoru, a na udaných kalibračních parametrech. Hodnota 0,42, jak je uvedeno výše, funguje pro GP2D120 dle kalibračních bodů uvedených v manuálu. Tato konstanta bude zastoupena jako „k“, neboť se může změnit. Prvním krokem pro získání dobré funkce pro převod napětí na vzdálenost je právě tato konstanta. Na obrázku 8 je vidět graf linearizované charakteristiky, již zmíněného čidla, pro konstantu $k = 0,42$.

Pro získání již zmíněných kalibračních konstant je třeba trochu měření. Kalibrační údaje lze získat experimentálně, nebo odečtením z charakteristiky „napětí-vzdálenosti“ daného čidla. Poté vytvoříme tabulku s napětím, v tomto případě s výstupem ADC, v závislosti na poloze.

vzdálenost [cm]	výstup ADC	ADC/100	linear	výpočet vzdálenosti z ADC
1	23	0,23	0,704225	78,07293564
2	55	0,55	0,413223	39,74064257
4	558	5,58	0,224719	4,20877245
6	400	4	0,155039	5,99025641
8	305	3,05	0,118343	7,92028357
10	252	2,52	0,095694	9,604057739
12	210	2,1	0,080321	11,51317422
14	177	1,77	0,069204	13,61311816
16	147	1,47	0,06079	16,28564651
18	123	1,23	0,054201	19,28831691
20	106	1,06	0,0489	22,16355917
22	95	0,95	0,044543	24,51765586
24	90	0,9	0,0409	25,75801047
26	85	0,85	0,037807	27,12820937
28	77	0,77	0,035149	29,64614552
30	73	0,73	0,032841	31,08598614

Tabulka 1: Klabrační hodnoty

Poté se z těchto hodnot dopočítá sloupec s hodnotami po linearizaci. Z takto získaných dat sestavíme graf (obrázek 8), který následně proložíme lineární regresí, pomocí které získáme konstanty. Jedná se o nalezení vhodných „m“ a „b“ konstant pro rovnici lineární funkce.

$$y = m \cdot x + b$$

Lineární rovnice

V tomto případě, y reprezentuje lineární rozsah modifikovaný již zmíněnou linearizační funkcí, a x nahradíme napětím „V“. A poté dostaneme následující rovnici:

$$\frac{1}{R + k} = m \cdot V + b$$

Jednoduchou úpravou dostaneme následující rovnici vzdálenosti, v závislosti na napětí:

$$R = \left(\frac{1}{m \cdot V + b} \right) - k$$

Tento výsledek však užitečný pouze pro jazyky, které podporují výpočty s plovoucí desetinnou čárkou, ale další jednoduchou úpravou můžeme získat tuto rovnici:

$$R = \left(\frac{m'}{V + b'} \right) - k; \quad m' = \frac{1}{m}; \quad b' = b/m$$

Tímto krokem navíc docílíme rovnice, která je použitelná pro celočíselné matematické operace.

Následný výsledek implementovaný v jazyku C:

```
vysledek = read_adc();  
vzdalenost = (2632 / (vysledek + 10.5)) - 0.42;
```

4 REGULACE

Regulace je udržování dané fyzikální veličiny na předem stanovených hodnotách. Skutečná hodnota této veličiny se zjišťuje měřením a porovnává se s hodnotou žádanou. Regulace je tedy řízení se zpětnou vazbou. Uskutečňuje se působením akční veličiny na regulovanou soustavu, za pomoci regulačního obvodu.

Cílem regulace je zajištění stability, kompenzace vnějších i vnitřních vlivů poruchových veličin. Na dynamický systém působí často celá řada poruchových veličin, jejichž vliv je zpravidla nežádoucí. A mnohdy regulace spočívá hlavně v kompenzaci účinků těchto poruchových veličin. Ovšem hlavní úkol regulace je dosažení požadovaných dynamických vlastností obvodu a hodnot regulované veličiny.

4.1 Struktura zpětnovazebních regulačních obvodů

Struktura zpětnovazebních regulačních obvodů vychází ze základní struktury zpětnovazebního řízení. Je však často modifikována v závislosti na požadovaných

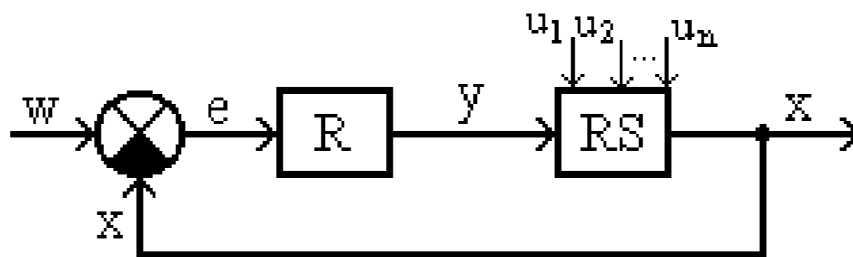
vlastnostech obvodu a vstupujících poruchových veličinách. Má-li splňovat více požadavků, kombinuje se i s přímo-vazebním řízením.

4.1.1 Regulovaná soustava

Je technické zařízení, (např. kotel, pec, destilační kolona) na kterém regulujeme jednu nebo více fyzikálních veličin tak aby na nich bylo dosaženo námi požadovaných hodnot. V našem případě je regulovaná soustava trubka s kuličkou a ventilátor.

4.1.2 Regulační obvod

Je tvořen regulovanou soustavou (RS) a regulátorem (R), které jsou vzájemně propojeny a tvoří tak zpětnovazební obvod (záporná zpětná vazba).



Obrázek 9: Zpětnovazební regulační obvod

Na obrázku 9 můžeme názorně vidět blokové schéma regulačního obvodu. Písmeno „W“ zde označuje námi žádanou hodnotu, na které chceme, aby regulátor danou veličinu udržoval. V našem případě je tato veličina poloha kuličky ve válci.

Další hodnotou je veličina „X“ což je aktuální skutečná změřená hodnota regulované veličiny, může to být libovolná fyzikální veličina, kterou můžeme změřit, a je závislá na regulované veličině. V případě naší soustavy je to vzdálenost kuličky od měřícího čidla.

Rozdílem dvou předešlých veličin je takzvaná regulační odchylka „e“, neboli chybová hodnota (error).

$$e = w - x$$

neboť chybu, vyvolanou měřením, není regulátor schopen zjistit a tudíž ani správně regulovat.

Převodník (PŘ) převádí hodnotu dané fyzikální veličiny, tzv. přirozený signál ze snímače, na jinou fyzikální veličinu, kterou dokážeme lépe zpracovat. Nejčastěji elektrické napětí nebo frekvenci.

Řídící člen (ŘČ) je část, v níž se nastavuje velikost žádané hodnoty. Tato hodnota musí být kvůli porovnání stejného fyzikálního charakteru jako výstup z převodníku snímače.

Porovnávací člen (PČ) vytváří regulační odchylku z hodnoty řídicího členu a hodnoty z převodníku. Nejčastěji je tvořen rozdílovým operačním zesilovačem, jenž porovnává dvě napětí, a zesiluje jejich odchylku.

Ústřední člen regulátoru (UČR) je vlastní regulátor. Zpracovává regulační odchylku, podle jejíž velikosti a smyslu mění velikost svého výstupního signálu.

4.2.2 Akční člen (AČ)

Pomocí akčního členu se provádí akční zásah do regulované soustavy. Jedná se o změnu řídicí fyzikální veličiny, např. příkonu energie, či řídicího signálu (snížení napětí na motoru, nebo směna střídy PWM signálu), nebo množství látky potřebné pro regulaci (např. změna přítoku kapaliny do nádrže, změna tlaku plynu v hořácích pece, množství mazutu do hořáku apod.). Akční člen může být také např. řízený usměrňovač, frekvenční měnič při regulaci otáček motorů, topné těleso při regulaci teploty vody apod.

Akční orgán (AO) nejčastěji bývá regulační ventil, šoupě, regulační klapka, spínací tranzistor, nebo stykač.

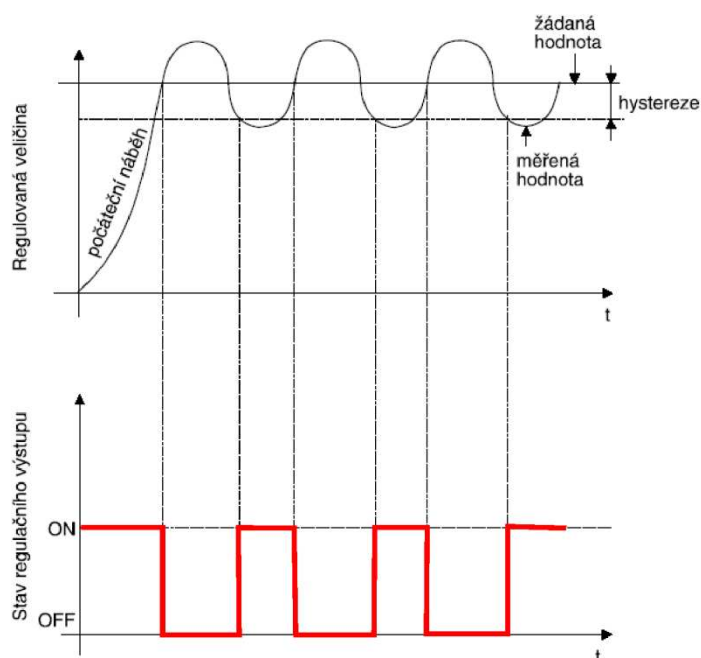
Pohon (PO) ovládá akční (regulační) orgán. Nejčastěji to bývá elektrický, pneumatický nebo hydraulický motor. V našem případě je to motor ventilátoru ve verzi první, kdy je soustava regulována pouze výkonem ventilátoru. A ve verzi druhé

kdy je soustava regulována natočením klapky pomocí servomotoru za konstantního výkonu ventilátoru.

4.3 Druhy a typy regulátorů

4.3.1 Dvoustavový regulátor

Využívá se pro méně náročné aplikace jako je například elektrické vytápění, tlakování vzduchových zásobníků kompresorů, jednoduchých plynových kamen apod. Regulátor má pouze dva stavy, a to vypnuto a zapnuto, a to podle toho je li regulační odchylka kladná či záporná. V podstatě se jedná o proporcionální regulátor s nekonečným zesílením.



Obrázek 11: Dvoustavový regulátor

Z principu regulace není možné dosáhnout nenulové regulační odchylky. Měřená hodnota charakteristickým způsobem kmitá kolem žádané hodnoty. Regulační odchylku lze snížit zmenšením hystereze. To se však projeví častějším spínáním výkonových členů, což má nepříznivý vliv na životnost elektromechanických spínačů (relé, stykače, apod.). Tento regulátor se používá výhradně v regulovaných soustavách s velkou setrvačností, řádově v desítkách sekund.

Výhody dvoustavové regulace:

- nižší nároky na životnost výkonových spínačů, v mnoha případech vyhovuje mechanické relé
- malé nároky na regulátor
- jednoduchá obsluha

Nevýhody dvoustavové regulace:

- nízká jakost regulace

4.3.2 Regulátor PID

Umožňuje mnohem přesnější řízení procesu než dvoustavová regulace. Například u topných soustav lze (podle charakteristiky regulované soustavy) dosáhnout regulační odchylky i menší než 1°C. Podle charakteru výkonového spínače je výstupní hodnota plně proporcionální nebo kvaziproporcionální.

Z hlediska cíle regulace, se využívá regulátorů umožňující nastavování parametrů regulačního algoritmu. Regulační algoritmus je tvořen základními regulačními funkcemi, které jsou proporcionální (P), integrační (I) a derivační funkce (D). V současné době převládá použití funkce PID, u níž se v případě potřeby některá složka potlačí. Vstupem PID regulátoru je regulační odchylka, a výstup tvoří vážený součet z regulační odchylky, jejího integrálu a derivace. Obrazový přenos regulátoru je možno vyjádřit následující rovnicí.

$$R(s) = K_R \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) = r_0 + \frac{r_1}{s} + r_2$$

K_R ... proporcionální zesílení všech složek regulátoru,

T_I ... integrační časová konstanta,

T_D ... derivační časová konstanta,

$r_0 = K_R$... proporcionální zesílení,

$r_1 = K_R / T_I$... proporcionální zesílení integrační složky,

$r_2 = K_R T_D$... proporcionální zesílení derivační složky.

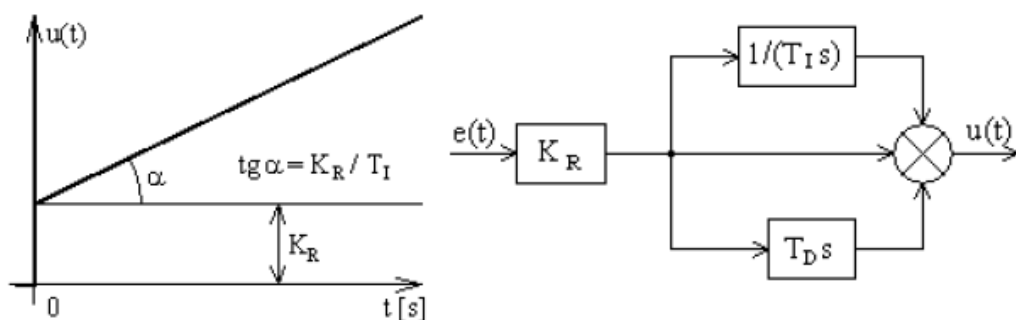
Obraz výstupu z regulátoru je

$$U(s) = R(s)E(s)$$

kde $E(s)$ je obraz regulační odchylky. Poté je výstup regulátoru v čase roven

$$u(t) = K_R \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] + u(0)$$

kde $u(0)$ je počáteční hodnota integrátoru v čase $t = 0$. Z rovnice je zřejmé, že takto definovaný regulátor vyžaduje použití ideálního derivačního členu (derivační člen bez setrvačnosti). Ideální derivační člen generuje na výstupu z regulátoru Diracův impuls, vstoupí-li do derivačního členu jednotkový skok. Je zřejmé, že ideální regulátor s přenosem je fyzikálně nerealizovatelný.



Obrázek 12: Přejchodová charakteristika a struktura ideálního PID regulátoru

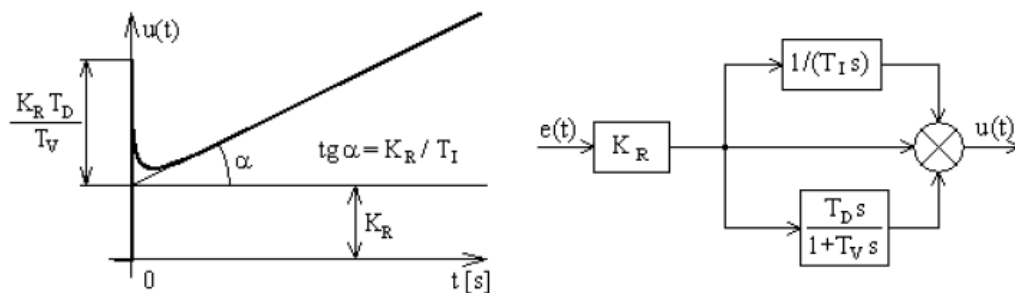
Reálný regulátor obsahuje vždy zpožďovací členy. Uvažujeme-li zpoždění pouze na derivační složce, pak obrazový přenos regulátoru má tvar

$$R(s) = K_R \left[1 + \frac{1}{T_I s} + \frac{T_D s}{1 + T_V s} \right]$$

kde T_V je časová konstanta zpožďovacího členu. Tato konstanta je dána konstrukcí regulátoru a není ji možno při seřizování regulátoru zpravidla nastavit.

Přechodová funkce reálného PID-regulátoru je

$$h_R(t) = K \left[1 + \frac{1}{T_I} t + \frac{T_D}{T_V} \exp\left(-\frac{t}{T_V}\right) \right] \eta(t)$$



Obrázek 13: Přechodová charakteristika a struktura reálného PID regulátoru

Výhody PID regulace:

- vysoká jakost regulace, zejména u soustav s proporcionálním výstupem

Nevýhody PID regulace:

- velké nároky na regulátor
- vyšší nároky na spínače (nedoporučují se elektromechanické)
- zdoluhavé manuální nastavování regulačních parametrů

4.4 Kriteria jakosti regulace

Na kvalitu regulačních pochodů se klade celá řada požadavků a omezení, které mohou být často i protichůdné. Odvozují se od požadavků, které jsou kladeny na regulovaný systém.

V technické praxi se jakost regulace posuzuje zpravidla podle průběhu regulačních pochodů a využívá se nepřímých kritérií (poloha pólů, fázová bezpečnost atd.). Celá řada metod návrhu regulátorů je na tomto kritériu založena (např. metoda optimálního modulu, frekvenční metody syntézy atd.). Na základě dlouhodobých zkušeností a experimentů, jejich vyhodnocování se pak formulovaly předpisy a vzorce pro seřízení regulátorů. Tyto metody budou také v dalším textu popsány a diskutovány. Kvalitu regulačního pochodu je možno též vyjádřit kvantitativně vhodným matematickým kritériem. U spojitých systémů se používá integrálních kritérií. Nejznámější jsou lineární a kvadratické integrály regulační odchylky. Zavedeme-li kritérium jakosti regulace, je možno úlohu optimálního seřízení regulátoru převést na optimalizační úlohu, jejíž řešení v současné době s vhodnou softwarovou podporou je možné, je-li znám matematický model regulované soustavy. Kritérium samo musí nejen kvantitativně popisovat regulační pochody, ale musí také obsahovat vhodné parametry, pomocí kterých můžeme ovlivňovat charakter průběhu (dostatečné tlumení akční veličiny, tlumení regulační odchylky atd.).

4.4.1 Integrální kritéria

Předpokládejme, že je dána:

- struktura regulátoru (zpravidla regulátor typu PID)
- matematický model regulované soustavy s poruchami (obrazové přenosy)
- model regulační odchylky a akční veličiny na definovaný vstupní signál, pak

Zobecněná kvadratická regulační plocha má následující tvar.

$$J(r_0, r_1, r_2) = \int_0^{\infty} \{ [e(t) - e(\infty)]^2 + k[u(t) - u(\infty)]^2 \} dt$$

- $e(t)$ - regulační odchylka,
- $e(\infty)$ - ustálená regulační odchylka ($\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = e(\infty)$)
- $u(t)$ - akční veličina
- $u(\infty)$ - ustálená akční veličina ($\lim_{t \rightarrow \infty} u(t) = u(\infty)$)
- k - váhový koeficient, jehož volbou se dosahuje požadovaného tlumení akční veličiny. Čím je větší, tím se dosahuje většího tlumení.
- r_0, r_1, r_2 - parametry regulátoru, jehož výstup je

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

4.4.2 Kriteria nepřímá - podle průběhu regulačního pochodu

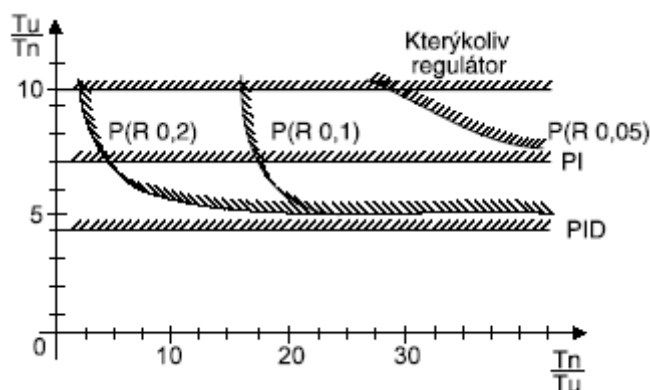
Za nepřímá kriteria jakosti regulace možno považovat polohu pólů charakteristické rovnice, průběh amplitudové charakteristiky a rezonanční zvětšení amplitudy, fázovou a amplitudovou bezpečnost a pásmo propustnosti uzavřeného obvodu.

4.5 Optimální nastavení regulátorů

Pro určení, jaký regulační pochod budeme považovat za nejpriznivější je celá řada hledisek, z velké části vycházející z technologických a provozních požadavků.

Mezi nejčastěji používané patří:

- Požadavek stability, který je vlastně základní a podmiňující realizaci regulačního okruhu.
- Velikost regulační odchylky v ustáleném stavu.
- Doba trvání přechodového regulačního pochodu při vstupu poruchy, říkáme ji doba regulace TR.
- Velikost překmitu během doby regulace.
- Počet překmitů během doby regulace.



Obrázek 14: Diagram pro určení regulátoru

- T_n - doba náběhu soustavy
- T_u - doba průtahu soustavy
- T_r - požadovaná doba regulace do praktického ustálení

Z diagramu na obrázku 14 plyne, že:

- Nelze dosáhnout kratší doby regulace než $4 T_u$
- Chceme-li dosáhnout kratší doby regulace než $6 T_u$, musíme použít PID regulátor, nebo P, avšak potom se musíme smířit s velkou regulační odchylkou v ustáleném stavu.
- Dobu regulace delší než $10 T_u$ je možno dosáhnout bez potíží kterýmkoliv regulátorem.

Pro splnění kritérií byla vypracována a ověřena řada metod, z nichž nejčastěji užívané jsou metoda kritického stavu a výpočet podle vlastnosti regulované soustavy.

4.5.1 Metoda kritického stavu:

Je to experimentálně zaměřený postup, při kterém nemusíme znát předem vlastnosti soustavy:

a) vyřadíme derivační složku ($T_D=0$) a integrační složku ($T_i=\infty$)

b) postupně zvyšujeme zesílení regulátoru, až poprvé nastanou netlumené kmity regulované veličiny. Zesílení nazýváme jako kritické a označujeme ho r_{okr} , dobu kmitu T_{kr} .

Doporučené nastavení regulátoru je pak:

- P regulátor: $r_o = 0,5 \cdot r_{okr}$
- PD regulátor: $T_D = 0,12 T_{kr}$ - zesílení nastavíme zkusmo
- PI regulátor: $r_o = 0,45 r_{okr}$, $T_i = 0,85 T_{kr}$
- PID regulátor: $r_o = 0,6 r_{okr}$, $T_i = 0,5 T_{kr}$, $T_D = 0,12 T_{kr}$

4.5.2 Metoda výpočtová

Vychází ze znalostí dynamických a statických vlastností regulované soustavy, to znamená T_u , T_n , $1/S_o$, případně u astatických soustav T_u a $1/C_s$ (převrácená hodnota rychlosti změny $1/C_s$ nahrazuje součin S_o, T_n).

Doporučené nastavení regulátoru:

P regulátor $r_o = \frac{T_n \cdot S_o}{T_u}$

PI regulátor $r_o = 0,8 \cdot \frac{T_n \cdot S_o}{T_u}$; $T_i = 3T_u$

PD regulátor $r_o = 1,2 \cdot \frac{T_n \cdot S_o}{T_u}$; $T_D = 0,25T_u$

PID regulátor $r_o = 1,2 \cdot \frac{T_n \cdot S_o}{T_u}$; $T_i = 2T_u$; $T_D = 0,42T_u$

Uvedené vztahy jsou přibližné a podle individuálních požadavků lze parametry regulátoru zkusmo dostavit, přitom:

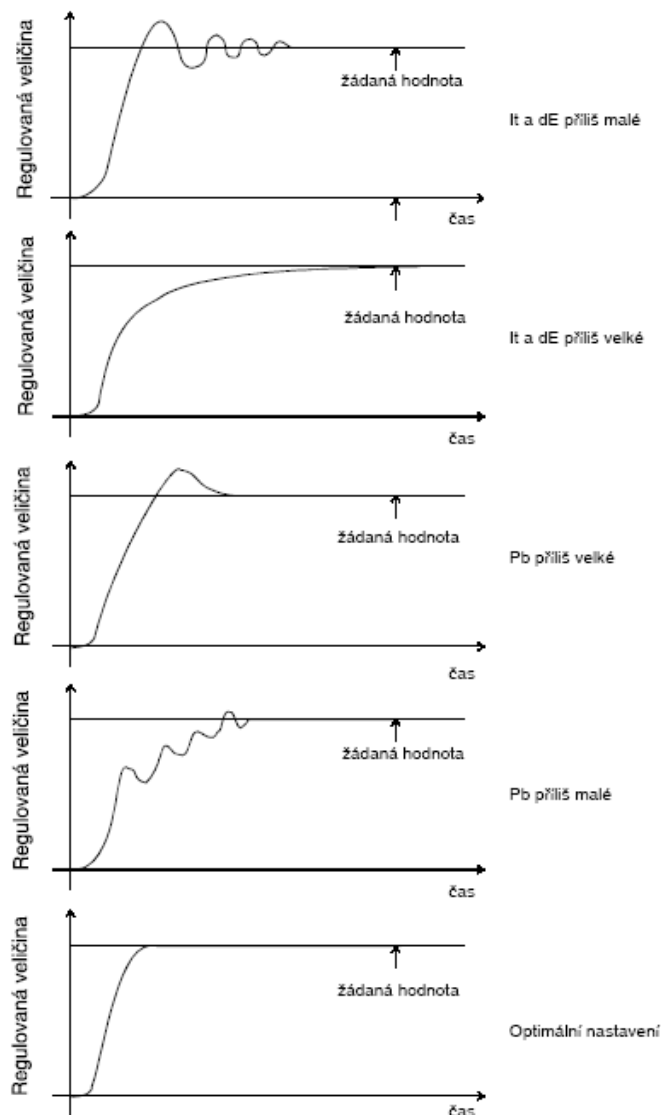
- zvyšování zesílení snižuje regulační odchylku v ustáleném stavu, zkracuje dobu regulace (pokud nedojde k zakmitání), avšak zhoršuje stabilitu regulačního obvodu.
- zvyšování integrační složky (snižování integrační časové konstanty) zkracuje dobu regulace, opět však zhoršuje stabilitu.

- Zvyšování derivační složky tlumí regulační pochod, při zakmitání tedy zkrátí dobu regulace, zlepšuje se stabilita regulačního obvodu.

Velmi často jsou regulované soustavy a akční členy nelineární, proto je nutno stabilitu případné optimální nastavení ověřit nejen v provozním rovnovážném stavu, ale i v dalších možných podmínkách.

4.5.3 Doladění regulačních parametrů

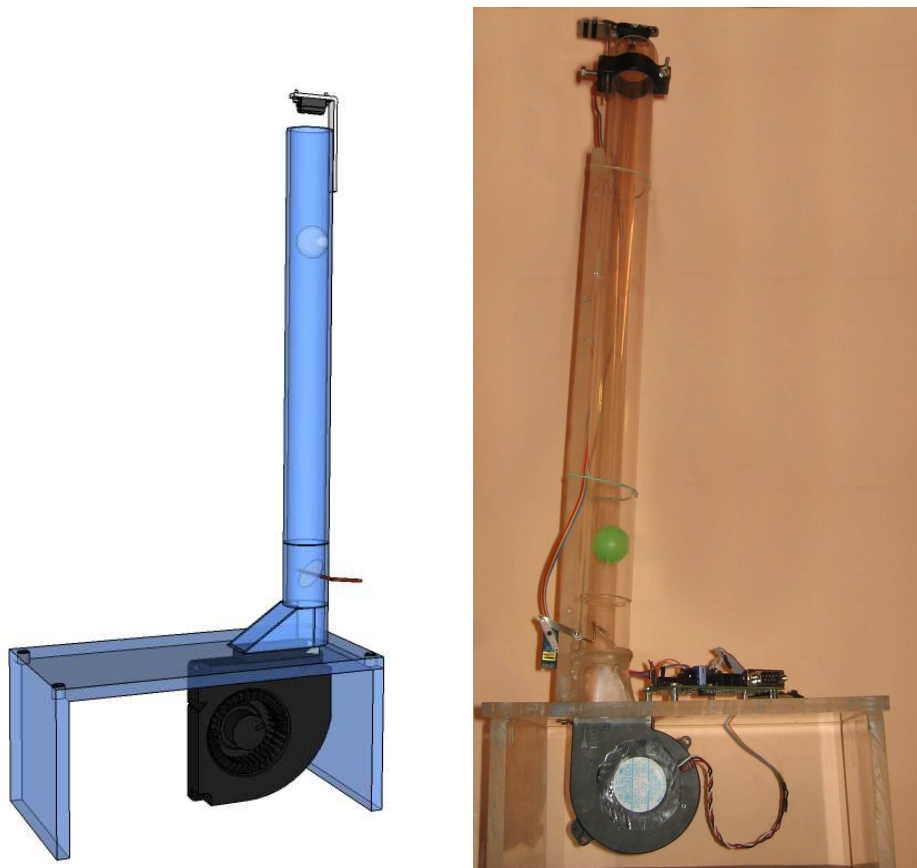
Následujících průběhy nám mohou pomoci s doladěním parametrů PID podle chování soustavy.



5 PŘÍPRAVEK A JEHO REALIZACE

Přípravek je zhotoven ze silného průhledného plastu. Hlavní prvek tvoří průhledná PVC trubka, která je připevněna svisle, tak aby v ní mohl levitovat míček. Proudění vzduchu v trubce je zajištěno turbínovým ventilátorem, původně určeným pro chlazení PC procesorů. Poloha míčku se snímá ze shora již zmíněným čidlem Sharp. Pro zasažení do vlastností proudění, tudíž ovlivnění chybové veličiny, je mezi trubkou a ventilátorem vložena klapka, kterou lze simulovat zhoršení průtoku vzduchu.

5.1 Regulace za pomoci výkonu ventilátoru



Obrázek 15: Přípravek

V této verzi regulace je míček regulován pomocí výkonu ventilátoru, chybová hodnota je vnášena škrticí klapkou. Jako regulační obvod je použita deska osazená procesorem ATmega32. Zde je implementován PID regulátor, který podle polohy kuličky uvnitř válce, reguluje otáčky ventilátoru pomocí PWM.

Toto provedení se vyznačuje poměrně velkým dopravním zpožděním a proto je regulace obtížnější. Velké Dopravní zpoždění je zde způsobeno poměrně těžkým rotorem ventilátoru.

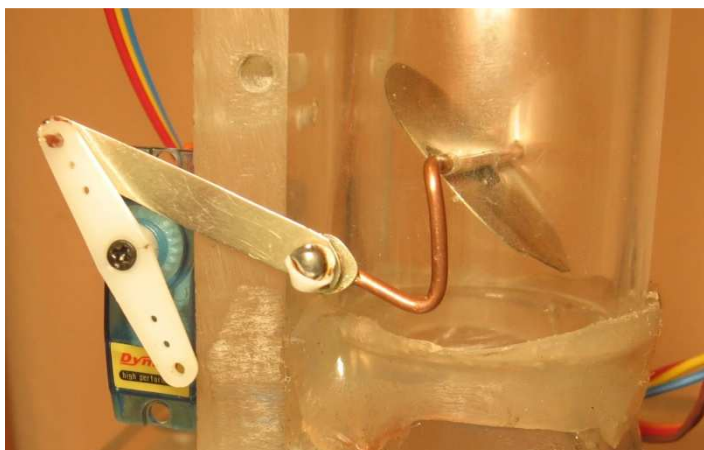


Obrázek 16: Turbínový ventilátor

Vlivem setrvačných sil se tento rotující ventilátor dlouho roztáčí, i zpomaluje. Na přesnost regulace polohy má vliv mnoho parametrů, jako například kolísání napájecího napětí ventilátoru, nebo i měnící se tlak vzduchu v místnosti. Další možné faktory ovlivňující polohu kuličky se týkají kuličky samotné. Například její tvarová nepřesnost způsobuje, při pohybu, měnící se plochu protékajícího vzduchu, a tudíž jeho rychlost a následné vynášení nebo propadání. Tento faktor se nejvíce projevoval při použití tělesa hruškovitého tvaru. Rychlá rotace kuličky může také způsobit, při doteku trubky, jakési vybíhání po stěnách nahou nebo dolu. Tomuto se dá částečně zabránit nehomogenním prostředím uvnitř kuličky. V tomto případě je v dutém míčku vstříknuta trocha kapaliny, která nedovolí rychlé roztočení.

5.2 Regulace škrticí klapkou pomocí servomotoru

V této verzi je míček regulován pomocí natočení škrticí klapky uvnitř válce. Ventilátor má konstantní otáčky, případně jejich změnou můžeme vyvolat poruchovou veličinu.



Obrázek 17: Servo s klapkou

5.2.1 Servomotory

Servomotor zkráceně Servo je motor pro pohony (většinou elektrické, ale existují také hydraulická, pneumatická či dokonce parní serva), u kterých lze na rozdíl od běžného motoru nastavit přesnou polohu natočení osy. Ovládají se jím například posuvy u CNC strojů, nastavení čtecí hlavičky u pevného disku. Všechny RC modely používají malá modelářská serva stejně jako v této verzi přípravku.

Modelářské servo je zařízení, které má na vstupu tři vodiče a jejímž výstupem je osa, která se otáčí v rozsahu cca. 90° resp. 180°. Na vstupní vodiče je třeba připojit zem, +5V a řídicí signál. Servo se standardně ovládá 1-2ms dlouhými pulzy s frekvencí 50Hz (pozn. většina serv reaguje v širším rozsahu od 0.5ms do 2.5ms a rozsah otáčení pak může být až 180°). Šířka pulzu přímo úměrně odpovídá natočení výstupní osy. Tedy pokud budeme generovat pulz o šířce 1.5ms, přesune se servo do střední polohy. Změnou délky pulzu pak můžeme pootočit osou doleva či doprava. Krajním polohám natočení pak odpovídají krajní délky pulzů.

Kontrolér nebo RC přijímač modelářské soupravy posílá na řídicí vodič v pravidelném intervalu 50Hz (každých 20ms) kladný pulz, na jehož šířce závisí natočení serva. V drtivé většině případů je při délce pulzu 1500us servo v neutrální pozici (střed). Se zkracováním pulzu až k 600us se servo natáčí vlevo, s prodlužováním až k 2400us pak vpravo. V následujícím kódu je vidět generování 20ms pulzu a střídání.

```

ISR(TIMER2_COMP_vect)
{
    pulzy +=1;
    if (pulzy < aktualni_pulzy) PORTA |= (1<<PA1);
    else PORTA &= ~(1<<PA1);
    if (pulzy > 1999) //generace 20m pulsu pri preruseni 100000/s
    {
        pulzy = 0;
        PORTA &= ~(1<<PA1);
    }
}

```

Je dobré vědět, že každé servo má jiné krajní hodnoty a není vůbec dobré, pokud je budeme překračovat. Mechanika serva je pak nepříjemně zatěžovaná krouticím momentem serva a může se v takové situaci lehce poškodit. Právě proto je u zde uvedených kontrolérů serv možnost definovat minimální a maximální šířku pulzu a tyto hodnoty uložit do EEPROM obvodu. Tím zajistíte bezpečný provoz serva i v případech, že do kontroléru pošlete hodnoty, které tyto meze přesahují. Např. takto:

```

servo = (unsigned int)pid_Contr(15, (unsigned int)vzdalenost);
if (servo < 80) servo = 80;
if (servo > 250) servo = 250;
aktualni_pulzy = (unsigned char) servo;

```

Tento kód generuje řídicí pulzy každých 20ms. Pulzy jsou řízeny proměnnou „aktualni_pulzy“ a dále jsou hlídány již zmíněné kritické mezní hodnoty.

```
ISR(TIMER2_COMP_vect)
{
    pulzy +=1;
    if (pulzy < aktualni_pulzy) PORTA |= (1<<PA1);
    else PORTA &= ~(1<<PA1);
    if (pulzy > 1999) //generace 20m pulsu pri preruseni 100000/s
    {
        pulzy = 0;
        PORTA &= ~(1<<PA1);
    }
}
```

6 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout a vytvořit přípravek, pro levitaci kuličky, v průhledné trubici, unášený vzduchem. Poloha této kuličky se zde reguluje pomocí rychlosti proudění vzduchu uvnitř trubice. Klíčem regulace je měnit průtok vzduchu tak, aby nadnášená kulička byla pokud možno ve stejné pozici. A to i při vnesení poruchové veličiny, například pomocí škrticí klapky, či snížení výkonu ventilátoru.

V úvodní části práce jsem rozebral různé metody bezkontaktního měření polohy, různé principy a fyzikální vlastnosti měřících čidel a posouzení jejich vlastností, kladů, záporů a vhodnosti použití. Následně je podrobně popsáno vybrané čidlo Sharp GP2D120, a rozebrány různé možnosti linearizace čidla, a po úspěšném měření byla tato linearizace provedena.

V následující části se zabírám základní teorií řízení a regulací, kde popisují strukturu regulačního obvodu a následně různé typy regulací a regulátorů, doprovázené názornými obrázky. Ke konci této části jsou popsány způsoby nastavení parametrů P I D regulátoru, podle kterých je regulátor nastavován.

Regulátor celé této soustavy je osazen procesorem Atmel ATmega32 a pomocí sériové linky je zajištěna komunikace s PC kde je vytvořen jednoduchý ovládací software, pomocí něhož jsme schopni měnit veškeré parametry regulátoru, a sledovat aktuální naměřenou polohu kuličky a další údaje.

Literatura

- [1] HEROUT, Pavel. *Učebnice jazyka C*. 4. přeprac. vyd. České Budějovice : Koop, 2005. 270 s. ISBN 8072322206.
- [2] MAŘÍK, Vladimír, ZDRÁHAL, Zdeněk , KALAČOVÁ , Margita. *Teorie automatického řízení I : Příklady*. 1. vyd. Praha 1 : Ediční středisko ČVUT , 1982. 202 s.
- [3] BURKHAR, Mann. *C pro mikrokontroléry*. Praha : BEN, 2003. 280 s. ISBN 80-7300-077-6.
- [4] HRABÁČEK, Jiří. *Komunikace mikrokontroléru s okolím 2..* 1. vyd. Praha : BEN, 2000. 151 s. ISBN 80-86056-73-2.
- [5] MODRLÁK, Osvald. *Teorie automatického řízení I: SYNTÉZA REGULAČNÍCH OBVODŮ*. 1. vyd. Liberec : TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI, 2004. 61 s. Dostupný z WWW: <http://www.fm.vslib.cz/~krtsub/fm/modrlak/pdf/tar1_syn.pdf>.
- [6] VOLDÁN , Jiří. *Návrh a realizace jednoduché senzorické soustavy čtyřnohé robotu*. Brno, 2006. 42 s. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí bakalářské práce Věchet Stanislav. Dostupný z WWW: <http://autnt.fme.vutbr.cz/szz/2006/BP_Voldan.pdf>.
- [7] BOULDER, Sterling. *Acroname Robotics* [online]. Acroname, c1994 , 2009 [cit. 2009-08-28]. Dostupný z WWW: <<http://www.acroname.com/>>.
- [8] *ATMEL AVR221 : Discrete PID controller*. [s.l.] : [s.n.], 2006. 10 s. Dostupný z WWW: <http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2558.pdf>.
- [9] *Řízení serva : Teorie* [online]. c2008 [cit. 2009-08-28]. Dostupný z WWW: <<http://www.serva.cz/rizeni-serva-teorie/>>.
- [10] *Regulace* [online]. [2007] [cit. 2009-08-28]. Dostupný z WWW: <<http://www.mybox.cz/valter/Pdf/regulace.pdf>>.
- [11] *Teorie automatického řízení* [online]. 2006 [cit. 2009-08-28]. Dostupný z WWW: <<http://tar.fs.cvut.cz/index.php>>.

Příloha A – Elektrické schéma regulátoru

