

**UNIVERZITA PARDUBICE**  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

**ČÍSLICOVÝ ŘÍDICÍ SYSTÉM PRO REGULACI OTÁČEK  
VENTILÁTORU**

Petr Langer

Bakalářská práce  
2017

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Akademický rok: 2016/2017

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr Langer**  
Osobní číslo: **I14047**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Řízení procesů**  
Název tématu: **Číslicový řídicí systém pro regulaci otáček ventilátoru**  
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 ověřit principy zpětnovazebního řízení na příkladu řízení otáček ventilátoru s napájecím napětím do 12V. Řídicí systém typu PI, popř. PID, bude realizován s využitím zvolené univerzální vývojové platformy s jednočipovým počítačem. Bude změřena statická charakteristika a ve vhodně zvoleném pracovním bodě přechodová charakteristika. Na základě přechodové charakteristiky bude navržen číslicový regulátor a chování bude prakticky ověřeno. Teoretická část bude obsahovat uvedení do problematiky, popis použitého hardware, zejm. jeho využitých funkcí a popis zvolené metody nastavení regulátoru. Praktická část bude obsahovat naměřené charakteristiky a zprávu o experimentálně ověřených vlastnostech nastavení, včetně grafických ilustrací.

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.**

**CVEJN, J. Řízení procesů [online]. Pardubice: 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:

**8. prosince 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**12. května 2017**



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.  
děkan



L.S.



Ing. Daniel Honc, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. prosince 2016

## **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.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne

Petr Langer

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce, doc. Ing. Janu Cvejnovi, PhD, který mi poskytl cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Děkuji také svoji rodině za podporu po dobu mého studia.

V Pardubicích dne

Petr Langer

## **ANOTACE**

*Práce se věnuje zpětnovazebnímu řízení. V teoretické části jsou vysvětleny principy řízení s využitím PID regulátorů. V praktické části je popsán návrh číslicového řídicího systému s mikropočítačem řady ATmega pro regulaci otáček ventilátoru, který je následně prakticky ověřen.*

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

*číslicový regulátor, PID, zpětnovazební řízení, mikropočítač.*

## **TITLE**

*DIGITAL CONTROL SYSTEM FOR REGULATION OF FAN RPM*

## **ANNOTATION**

*The work is dedicated to the closed-loop control. The theoretical part explains the principles of control using PID controllers. The practical part describes the design of a digital control system with ATmega microcontroller for fan speed control, which is afterwards verified in practice.*

## **KEYWORDS**

*Digital controller, PID, Closed-loop control, Microcomputer.*

## OBSAH

|   |    |
|---|----|
| Seznam zkratk a značek .....                                      | 9  |
| Seznam symbolů proměnných veličin a funkcí .....                  | 10 |
| Seznam ilustrací .....  | 12 |
| Seznam tabulek .....  | 13 |
| ÚVOD .....  | 14 |
| 1 TEORETICKÁ ČÁST .....   | 15 |
| 1.1 Regulační obvod .....   | 15 |
| 1.2 Algebra přenosů .....   | 16 |
| 1.3 PID regulátor .....   | 18 |
| 1.3.1 Význam složek PID regulátoru .....                          | 19 |
| 1.3.2 Číslicový PID regulátor .....                               | 20 |
| 1.4 Metody nastavení parametrů PID regulátoru .....               | 23 |
| 1.4.1 Metoda Zieglera-Nicholse pomocí kritického zesílení .....   | 23 |
| 1.4.2 Metoda Zieglera-Nicholse z přechodové charakteristiky ..... | 25 |
| 1.4.3 Metoda přímé syntézy .....                                  | 26 |
| 1.5 Pulzně šířková modulace .....                                 | 28 |
| 1.5.1 Režimy PWM v mikropočítačích .....                          | 29 |
| 2 PRAKTICKÁ REALIZACE .....                                       | 31 |
| 2.1 Použitý hardware .....  | 31 |
| 2.1.1 Ventilátor .....  | 32 |
| 2.1.2 Mikropočítač ATmega32 .....                                 | 32 |
| 2.1.3 Spínací obvod ULN2803 .....                                 | 33 |
| 2.1.4 LCD displej .....   | 34 |
| 2.2 Změřené charakteristiky ventilátoru .....                     | 34 |
| 2.2.1 Statická charakteristika .....                              | 34 |
| 2.2.2 Dynamická charakteristika .....                             | 35 |
| 2.2.3 Přechodová charakteristika .....                            | 35 |
| 2.3 Model ventilátoru .....                                       | 36 |
| 2.4 Programování mikropočítače .....                              | 37 |
| 2.4.1 Konfigurace PWM .....                                       | 37 |
| 2.4.2 Konfigurace časovače T0 jako čítače .....                   | 38 |
| 2.4.3 Konfigurace časovače T2 .....                               | 39 |

|       |                                   |    |
|-------|-----------------------------------|----|
| 2.4.4 | Nastavení regulátoru .....        | 40 |
| 2.4.5 | Algoritmus PI regulátoru .....    | 40 |
| 2.5   | Regulační pochod.....             | 41 |
| 2.5.1 | Kritéria regulačního pochodu..... | 43 |
| 2.5.2 | Regulační pochod s poruchou ..... | 44 |
| 3     | ZÁVĚR .....                       | 45 |
|       | POUŽITÁ LITERATURA .....          | 46 |
|       | PŘÍLOHY .....                     | 47 |



## SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

|      |   |
|------|---|
| GND  | uzemnění  |
| H    | vysoká logická úroveň                           |
| I/O  | vstup/výstup                                    |
| L    | nízká logická úroveň                            |
| P    | proporcionální (regulátor)                      |
| PI   | proporcionálně integrační (regulátor)           |
| PID  | proporcionálně integračně derivační (regulátor) |
| PWM  | pulzně šířková modulace                         |
| RISC | redukovaná instrukční sada                      |
| RPM  | otáčky za minutu                                |

## SEZNAM SYMBOLŮ PROMĚNNÝCH VELIČIN A FUNKCÍ

|                  |   |
|------------------|---|
| $\sigma$         | maximální přeregulování, %                |
| $D$              | střída, %                                 |
| $F$              | obrazový přenos                           |
| $f_{\text{clk}}$ | frekvence hodin, Hz                       |
| $F_R$            | obrazový přenos regulátoru                |
| $F_S$            | obrazový přenos regulované soustavy       |
| $F_{\text{wy}}$  | obrazový přenos regulačního obvodu        |
| $I$              | integrační složka                         |
| $k$              | počet vzorků                              |
| $k_p$            | proporcionální zesílení regulátoru        |
| $N_P$            | počet přetečení časovače                  |
| $P$              | proporcionální složka                     |
| $P_S$            | hodnota předděličky                       |
| $q_0$            | parametr regulátoru                       |
| $q_1$            | parametr regulátoru                       |
| $q_2$            | parametr regulátoru                       |
| $r_0$            | proporcionální konstanta regulátoru       |
| $r_1$            | integrační konstanta regulátoru           |
| $r_2$            | derivační konstanta regulátoru            |
| $r_k$            | kritické zesílení                         |
| $S$              | suma                                      |
| $T$              | časová konstanta soustavy                 |
| $T_D$            | derivační časová konstanta regulátoru, s  |
| $T_I$            | integrační časová konstanta regulátoru, s |
| $T_k$            | kritická perioda, s                       |
| $T_n$            | doba náběhu, s                            |
| $T_{\text{OFF}}$ | doba rozepnutí, s                         |
| $T_{\text{ON}}$  | doba sepnutí, s                           |
| $t_p$            | doba regulace                             |
| $T_R$            | rozlišení časovače                        |
| $T_u$            | doba průtahu, s                           |
| $T_{\text{vz}}$  | vzorkovací perioda, s                     |

|           |                                    |
|-----------|------------------------------------|
| $T_w$     | volitelná časová konstanta, s      |
| $u$       | akční veličina                     |
| $U_H$     | napětí v sepnutém stavu, V         |
| $U_{PWM}$ | napětí odpovídající PWM signálu, V |
| $v$       | poruchová veličina                 |
| $y$       | regulovaná veličina                |
| $y_m$     | maximální přeregulování            |
| $w$       | žádaná hodnota                     |
| $Z$       | zesílení regulované soustavy       |

## SEZNAM ILUSTRACÍ

|   |    |
|---|----|
| Obr. 1.1 – Otevřený regulační obvod .....           | 15 |
| Obr. 1.2 – Uzavřený regulační obvod.....            | 16 |
| Obr. 1.3 – Sériové zapojení .....                   | 16 |
| Obr. 1.4 – Paralelní zapojení .....                 | 17 |
| Obr. 1.5 – Zpětnovazební zapojení.....              | 17 |
| Obr. 1.6 – Přejchodová char. P regulátoru.....      | 19 |
| Obr. 1.7 – Přejchodová char. I regulátoru.....      | 19 |
| Obr. 1.8 – Přejchodová char. D regulátoru .....     | 20 |
| Obr. 1.9 – Levá obdélíková metoda.....              | 21 |
| Obr. 1.10 – Lichoběžníková metoda.....              | 22 |
| Obr. 1.11 – Určení kritické periody.....            | 24 |
| Obr. 1.12 – Určení doby náběhu a doby průtahu.....  | 25 |
| Obr. 1.13 – Signály PWM s různou střídou.....       | 28 |
| Obr. 1.14 – Fast PWM.....                           | 29 |
| Obr. 1.15 – Phase Correct PWM .....                 | 29 |
| Obr. 2.1 – Realizovaný systém .....                 | 31 |
| Obr. 2.2 – Schéma ventilátoru .....                 | 32 |
| Obr. 2.3 – Pouzdro mikropočítače ATmega32 .....     | 32 |
| Obr. 2.4 – ULN2803 .....                            | 33 |
| Obr. 2.5 – Zapojení kanálu .....                    | 33 |
| Obr. 2.6 – Statická charakteristika.....            | 34 |
| Obr. 2.7 – Dynamická charakteristika .....          | 35 |
| Obr. 2.8 – Přejchodová charakteristika.....         | 35 |
| Obr. 2.9 – Registr TCCR1A .....                     | 37 |
| Obr. 2.10 – Registr TCCR1B.....                     | 37 |
| Obr. 2.11 – Registr TCCR0 .....                     | 38 |
| Obr. 2.12 – Registr TIMSK .....                     | 38 |
| Obr. 2.13 – Registr TCCR2 .....                     | 39 |
| Obr. 2.14 – Regulační pochod pro $T_w = 5$ s.....   | 41 |
| Obr. 2.15 – Regulační pochod pro $T_w = 1$ s.....   | 42 |
| Obr. 2.16 – Regulační pochod pro $T_w = 0,1$ s..... | 42 |
| Obr. 2.17 – Regulační pochod s poruchou.....        | 44 |

## **SEZNAM TABULEK**

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| Tab. 2.1 – Kritéria regulace ..... | 44 |
|------------------------------------|----|

# ÚVOD

Zpětnovazební regulace je jedním ze základních způsobů řízení. Využívá se ve většině regulačních obvodů napříč všemi odvětvími. Nejčastěji se pracuje s PID regulátory, které je jednoduché realizovat pomocí operačních zesilovačů a jejich univerzálnost je umožňuje použít ve většině aplikací.

Číslicovou variantu PID regulátoru je možné implementovat na jednočipovém počítači, jehož hlavní výhody jsou jednoduchost, nízké pořizovací náklady a nízká provozní cena. Takovéto systémy je možné dále snadno rozšiřovat o další periférie, jako jsou vstupně výstupní zařízení, sériová komunikace apod.

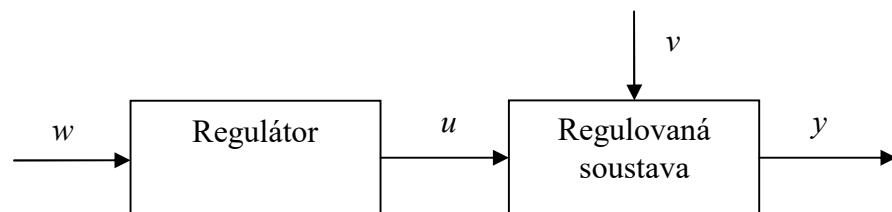
Cílem práce je vytvořit číslicový řídicí systém pro regulaci otáček ventilátoru na bázi jednočipového počítače, na kterém budou následně ověřeny principy zpětnovazebního řízení.

# 1 TEORETICKÁ ČÁST

## 1.1 REGULAČNÍ OBVOD

Funkce regulačního obvodu je udržovat regulovanou veličinu na žádané hodnotě, která může být konstantní nebo se v průběhu času může měnit. Nejčastěji se regulační obvod skládá ze dvou částí a to z regulované soustavy a regulátoru.

V případě otevřeného regulačního obvodu, který je zobrazen na obr. 1.1, provede regulátor akční zásah na základě přivedené žádané hodnoty. Pokud dojde k působení poruchové veličiny na regulovanou soustavu, kvůli které dojde ke změně regulované veličiny, regulátor nedokáže tuto poruchu odstranit z důvodu chybějící zpětné vazby. Regulaci v takovémto obvodu se říká dopředné řízení.

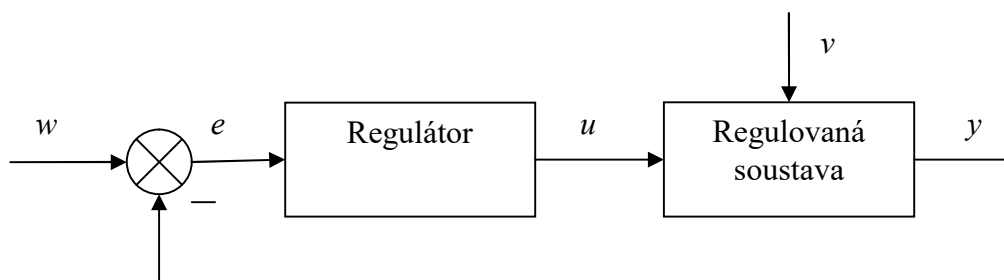


$w$  – žádaná hodnota,  $u$  – akční veličina,  $y$  – regulovaná veličina,  $v$  – poruchová veličina

Obr. 1.1 – Otevřený regulační obvod

V případě, kdy je do regulačního obvodu zavedena zpětná vazba, se jedná o uzavřený regulační obvod, který je zobrazený na obr. 1.2. Do regulátoru je přivedena regulační odchylka, která se vypočítá jako rozdíl žádané hodnoty a regulované veličiny. Regulátor se snaží upravovat akční veličinu tak, aby bylo dosaženo nulové regulační odchylky. Z toho vyplývá, že regulátor může odstranit vliv poruchové veličiny na žádanou veličinu.

Regulaci v uzavřeném regulačním obvodu se říká zpětnovazebné řízení.

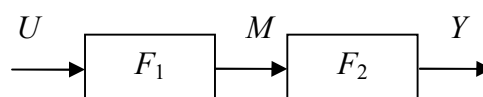


$w$  – žádaná hodnota,  $e$  – regulační odchylka,  $u$  – akční veličina,  $y$  – regulovaná veličina,  
 $v$  – poruchová veličina

Obr. 1.2 – Uzavřený regulační obvod

## 1.2 ALGEBRA PŘENOSŮ

Při řešení regulačních obvodů, které se skládají z více jednorozměrných soustav, které jsou navzájem propojeny, je možné pro výpočet dílčích přenosů použít algebru přenosů, viz (Navrátil, 2011, s. 127)



Obr. 1.3 – Sériové zapojení

Pro sériové zapojení na obr. 1.3 platí

$$Y = MF_2 = UF_1F_2 \Rightarrow F = \frac{Y}{U} = F_1F_2, \quad (1.1)$$

kde  $U$  – vstupní přenos,

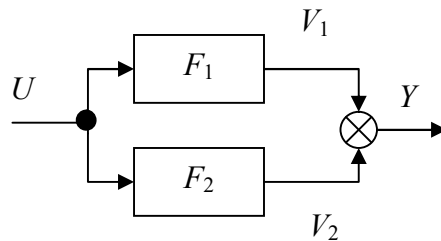
$M$  – dílčí přenos,

$Y$  – výstupní přenos,

$F_1$  – přenos bloku  $F_1$ ,

$F_2$  – přenos bloku  $F_2$ .



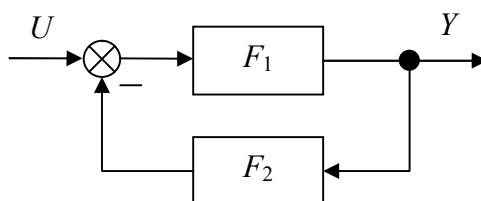


Obr. 1.4 – Paralelní zapojení

Pro paralelní zapojení na obr. 1.4 platí

$$Y = V_1 + V_2 = UF_1 + UF_2 = U(F_1 + F_2) \Rightarrow F = \frac{Y}{U} = F_1 + F_2, \quad (1.2)$$

kde  $V_1$  – dílčí přenos,  
 $V_2$  – dílčí přenos.



Obr. 1.5 – Zpětnovazební zapojení

Pro zpětnovazební zapojení na obr. 1.5 platí

$$Y = F_1 F_2 (U - Y) \Rightarrow Y(1 - F_1 F_2) = F_1 F_2 U \Rightarrow F = \frac{Y}{U} = \frac{F_1 F_2}{1 - F_1 F_2}. \quad (1.3)$$

Toto zapojení je v podstatě zpětnovazební regulační obvod proto je možné jeho přenos zapsat jako

$$F_{wy} = \frac{F_R F_S}{1 - F_R F_S}. \quad (1.4)$$

kde  $F_{wy}$  – přenos regulačního obvodu,  
 $F_R$  – přenos regulátoru,  
 $F_S$  – přenos regulované soustavy.

### 1.3 PID REGULÁTOR

Podle (Cvejn, 2012) patří mezi hlavní výhody PID regulátorů jejich jednoduchost, univerzálnost a snadná realizace pomocí elektrických obvodů. Díky tomu jsou dnes PID regulátory prakticky nejrozšířenějším typem regulátorů.

PID regulátor může být zapsán v obecném tvaru

$$u(t) = r_0 e(t) + r_1 \int_{\tau=0}^t e(\tau) d\tau + r_2 \frac{de(t)}{dt}, \quad (1.5)$$

kde  $t$  – průběžný čas, s,

$u(t)$  – akční veličina,

$e(t)$  – regulační odchylka,

$r_0$  – proporcionální konstanta,

$r_1$  – integrační konstanta,

$r_2$  – derivační konstanta.

Pak je jeho obrazový přenos

$$F_R(s) = r_0 + r_1 \frac{1}{s} + r_2 s. \quad (1.6)$$

V praxi se ale většinou pracuje s tvarem

$$u(t) = k_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_I} \int_{\tau=0}^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right], \quad (1.7)$$

kde  $k_p$  – proporcionální zesílení regulátoru,

$T_I$  – integrační časová konstanta regulátoru, s,

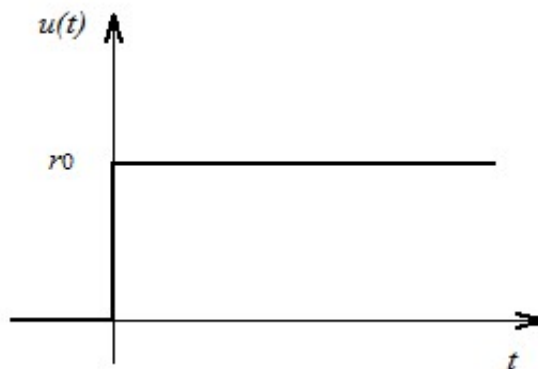
$T_D$  – derivační časová konstanta regulátoru, s.

Obrazový přenos regulátoru má potom tvar

$$F_R(s) = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right). \quad (1.8)$$

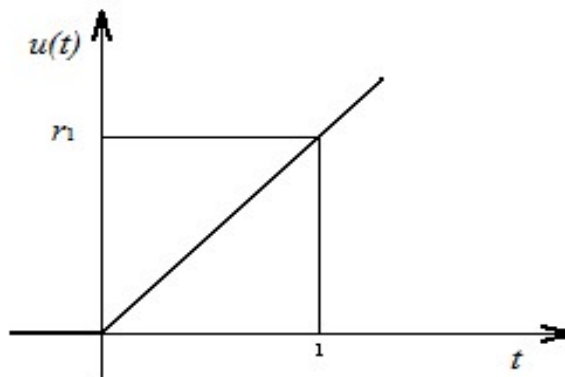
### 1.3.1 Význam složek PID regulátoru

Proporcionální složka zesiluje zpětnou vazbu regulátoru. Čím je vyšší proporcionální zesílení, tím je regulační pochod rychlejší. Pro příliš vysoké hodnoty může být ale kmitavý nebo dokonce nestabilní (rozkmity regulované veličiny narůstají do nekonečna). U statických systémů samotná proporcionální složka nezaručí dosažení žádané hodnoty.



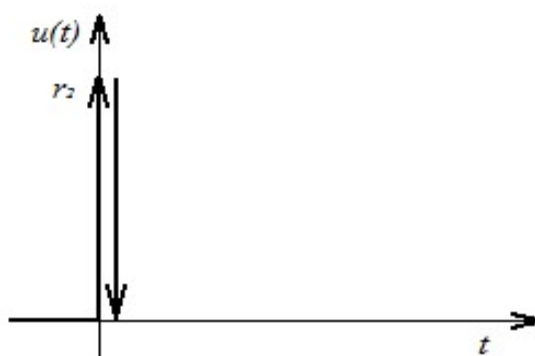
Obr. 1.6 – Přejchodová char. P regulátoru

Integrační složka přidává do regulátoru nulový pól, který umožňuje dosáhnout nulové regulační odchylky i pro statické soustavy. Integrační složka také ale zvyšuje řád regulátoru, čímž dojde k prodloužení doby regulačního pochodu.



Obr. 1.7 – Přejchodová char. I regulátoru

Derivační složka urychluje regulační pochod zvláště u systémů vyšších řádů, kdy zmenší prodlevu, než systém začne reagovat. V ustáleném stavu její vliv vymizí.



Obr. 1.8 – Přechodová char. D regulátoru

Podrobněji problematiku rozebírá (Navrátil, 2011, s. 205).

### 1.3.2 Číslicový PID regulátor

Při diskretizaci PID regulátoru se vychází z jeho analogového tvaru

$$u(t) = k_p \left( e(t) + \frac{1}{T_I} \int_{\tau=0}^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right), \quad (1.9)$$

kde  $u(t)$  – akční veličina,

$e(t)$  – regulační odchylka,

$k_p$  – proporcionální zesílení regulátoru,

$T_I$  – integrační časová konstanta regulátoru, s,

$T_D$  – derivační časová konstanta regulátoru, s.

Dále se předpokládá, že je zvolena konstantní vzorkovací perioda  $T_{vz}$ . Pro realizaci je nutné vhodně aproximovat integrál a derivaci.

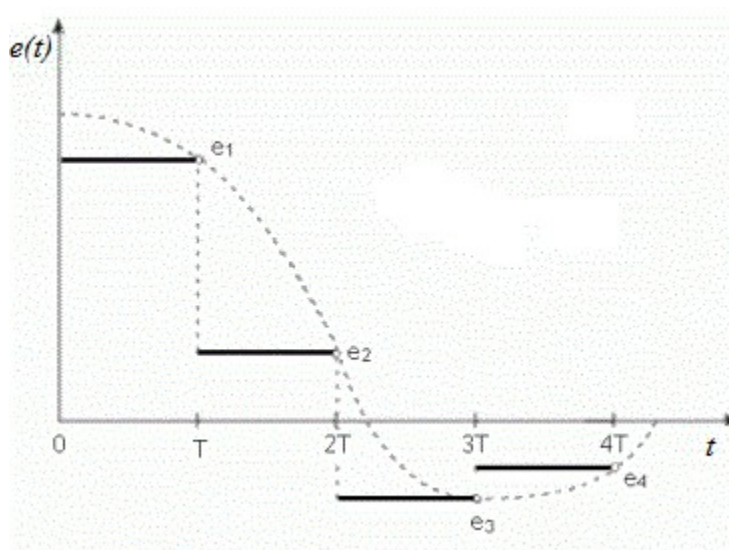
Pro aproximaci integrálu je možné zvolit levou obdélníkovou metodu

$$\frac{k_p}{T_I} \int_{\tau=0}^t e(\tau) d\tau \approx \frac{k_p T_{vz}}{T_I} \sum_{i=1}^k e(i), \quad (1.10)$$

kde  $k$  – počet vzorků,

$T_{vz}$  – perioda vzorkování, s,

$e(i)$  – regulační odchylka vzorku  $i$ .

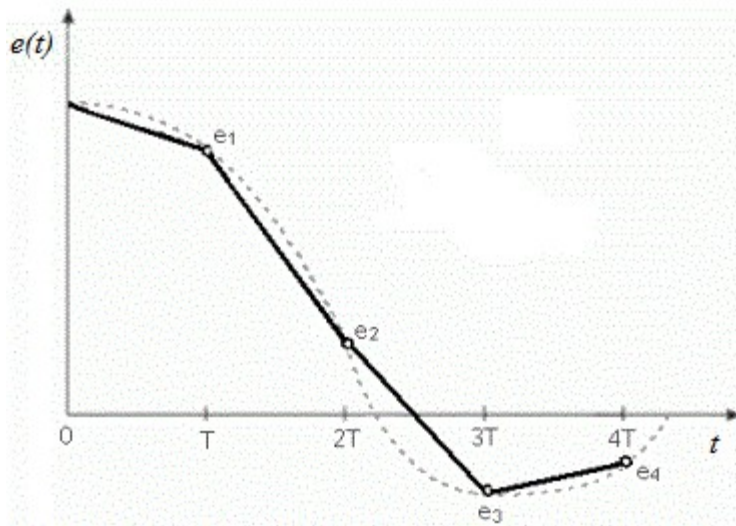


Obr. 1.9 – Levá obdélníková metoda

Pro větší přesnost je možné zvolit lichoběžníkovou metodu

$$\frac{k_p}{T_I} \int_{\tau=0}^t e(\tau) d\tau \approx \frac{k_p T_{vz}}{T_I} \sum_{i=1}^k (e(i) - e(i-1)), \quad (1.11)$$

kde  $e(i-1)$  je regulační odchylka vzorku  $i-1$ .



Obr. 1.10 – Lichoběžníková metoda

Derivaci je možné aproximovat podle vztahu

$$k_p T_D \frac{de(t)}{dt} \approx k_p T_D \frac{e(k) - e(k-1)}{T_{vz}}. \quad (1.12)$$

Dosazením rovnic (1.10) a (1.12) do rovnice (1.9) se získá diskrétní rovnice PID regulátoru v polohovém tvaru

$$u(k) = k_p \left[ e(k) + \frac{T_{vz}}{T_I} \sum_{i=0}^k e(i) + T_D \frac{e(k) - e(k-1)}{T_{vz}} \right]. \quad (1.13)$$

Protože někdy může být technicky obtížné realizovat sumaci, používá se také přírůstkový tvar, který vychází z rovnice (1.13)

$$u(k-1) = k_p \left[ e(k-1) + \frac{T_{vz}}{T_I} \sum_{i=1}^{k-1} e(i) + T_D \frac{e(k-1) - e(k-2)}{T_{vz}} \right], \quad (1.14)$$

Rovnice (1.14) se následně odečte od rovnice (1.13)

$$u(k) - u(k-1) = k_p \left[ e(k) - e(k-1) + \frac{T}{T_I} e(k) + T_D \frac{e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)}{T_{vz}} \right] = k_p e(k) \left( 1 + \frac{T_{vz}}{T_I} + \frac{T_D}{T_{vz}} \right) - k_p e(k-1) \left( 1 + \frac{2T_D}{T_{vz}} \right) + k_p e(k-2) \left( \frac{T_D}{T_{vz}} \right). \quad (1.15)$$

Tato rovnice se může dále upravit do tvaru

$$u(k) = u(k-1) + q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2), \quad (1.16)$$

kde  $q_0, q_1, q_2$  jsou parametry regulátoru.

Výhodou tohoto tvaru je, že pro výpočet momentální hodnoty akční veličiny stačí znát její minulou hodnotu, současnou hodnotu regulační odchylky a dvě její předešlé hodnoty.

Podrobněji problematiku řeší (Hlava, 2000, s. 39) a (Navrátil, 2011, s. 210).

## 1.4 METODY NASTAVENÍ PARAMETRŮ PID REGULÁTORU

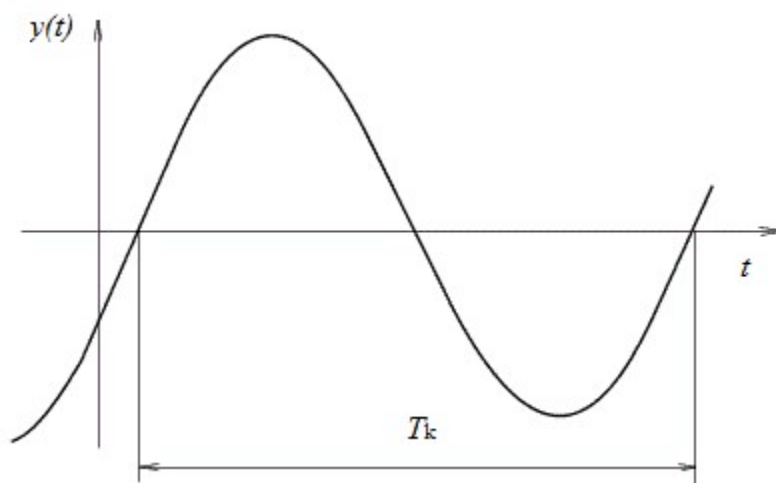
Nastavování parametrů PID regulátoru lze provádět mnoha způsoby. Ať už na základě vlastní zkušenosti, kdy se většinou vyřadí integrační a derivační složka a hledá se optimální hodnota proporcionální složky. Poté se běžně nastavuje integrační složka, což většinou vede ke zpětné korekci proporcionální složky.

Tento způsob nastavování parametrů regulátoru může být ale značně složitý a zdlouhavý. Pomoci může některá z níže uvedených metod, které jsou uvedeny také v (Navrátil, 2011, s. 219).

### 1.4.1 Metoda Zieglera-Nicholse pomocí kritického zesílení

Tato metoda vychází ze znalosti kritické periody  $T_k$  a kritického zesílení  $r_k$ . Tyto hodnoty je možné experimentálně určit v uzavřeném regulačním obvodu s P regulátorem, jehož zesílení se postupně zvětšuje až do doby, kdy se regulační obvod dostane na mez stability a bude kmitat netlumenými kmity s konstantní amplitudou. Perioda těchto kmitů je potom kritická perioda  $T_k$  a zesílení regulátoru je kritické zesílení  $r_k$ .

Po identifikaci hodnot kritické periody a kritického zesílení je možné podle následujících vztahů určit parametry regulátoru.



Obr. 1.11 – Určení kritické periody

Pro **P** regulátor platí

$$k_p = 0,5r_k, \quad (1.17)$$

kde  $k_p$  – proporcionální zesílení,  
 $r_k$  – kritické zesílení.

Pro **PI** regulátor platí

$$k_p = 0,45r_k; T_I = 0,85T_k, \quad (1.18)$$

kde  $T_I$  – integrační časová konstanta, s,  
 $T_k$  – kritická perioda, s.

Pro **PID** regulátor platí

$$k_p = 0,6r_k; T_I = 0,5T_k; T_D = 0,125T_k, \quad (1.19)$$

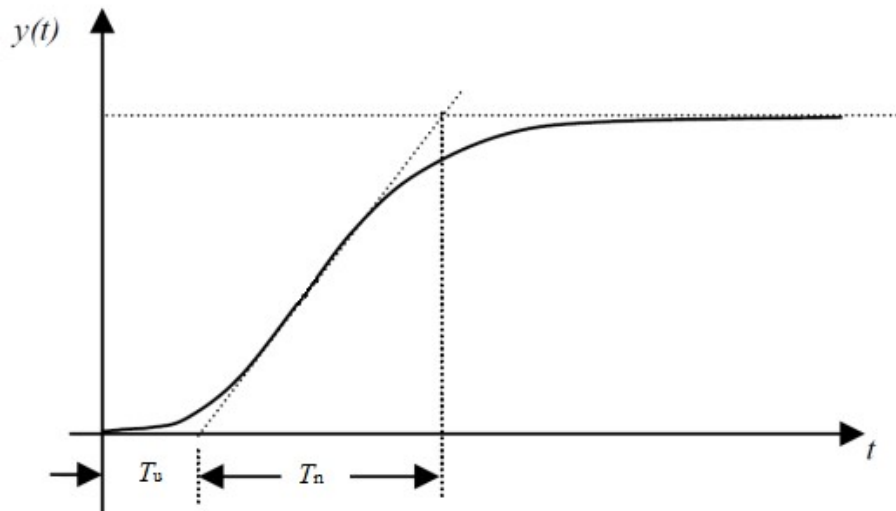
kde  $T_D$  – derivační časová konstanta, s.



### 1.4.2 Metoda Zieglera-Nicholse z přechodové charakteristiky

Jedná se o experimentální metodu, která vychází z předpokladu, že je možná změřit nekmitavou přechodovou charakteristiku regulované soustavy.

Na této přechodové charakteristice je nutné najít inflexní bod, proložit jím tečnu a odečíst dobu průtahu  $T_u$  a dobu náběhu  $T_n$ , tak jak je zobrazeno na obr. 1.12.



Obr. 1.12 – Určení doby náběhu a doby průtahu

Pro **P** regulátor pak platí

$$k_p = \frac{T_n}{ZT_u}, \quad (1.20)$$

kde  $k_p$  – proporcionální zesílení,

$T_n$  – doba náběhu, s,

$T_u$  – doba průtahu, s,

$Z$  – zesílení soustavy.

Pro **PI** regulátor platí

$$k_p = 0,9 \frac{T_n}{ZT_u}; T_I = 3,33T_u, \quad (1.21)$$

kde  $T_I$  – integrační časová konstanta, s.

Pro **PID** regulátor platí

$$k_p = 1,2 \frac{T_n}{ZT_u}; T_I = 2T_u; T_D = 0,5T_u, \quad (1.22)$$

kde  $T_D$  – derivační časová konstanta, s.

### 1.4.3 Metoda přímé syntézy

Tato metoda, kterou popisuje (Vítečková, 2009), je vhodná pouze pro nastavení regulátorů regulujících soustavy prvního řádu. Tedy je předpokládán přenos soustavy ve tvaru

$$F_S = \frac{Z}{Ts + 1}, \quad (1.23)$$

kde  $F_S$  – přenos regulované soustavy,

$Z$  – zesílení regulované soustavy,

$T$  – časová konstanta soustavy, s.

Dále je předpokládán přenos regulačního obvodu ve tvaru

$$F_{wy} = \frac{F_S F_R}{1 + F_S F_R}, \quad (1.24)$$

kde  $F_{wy}$  – přenos regulačního obvodu,

$F_R$  – přenos regulátoru.

Z rovnice (1.24) je poté vyjádřen přenos regulátoru

$$F_R = \frac{1}{F_S} \cdot \frac{F_{wy}}{1 - F_{wy}}. \quad (1.25)$$

Po aplikování metody přímé syntézy by mělo být dosaženo přenosu regulačního obvodu ve tvaru

$$F_{wy} = \frac{1}{T_w s + 1}, \quad (1.26)$$

kde  $T_w$  je volitelný parametr.

Dosazením rovnic (1.23) a (1.26) do rovnice (1.25) je získán přenos PI regulátoru

$$F_R = \frac{Ts + 1}{Z \cdot T_w s} = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right), \quad (1.27)$$

kde  $k_p$  – proporcionální zesílení regulátoru,

$T_I$  – integrační časová konstanta regulátoru, s,

ze kterého je dále určena integrační časová konstanta regulátoru

$$T_I = T \quad (1.28)$$

a proporcionální zesílení

$$k_p = \frac{T}{Z \cdot T_w}. \quad (1.29)$$

## 1.5 PULZNĚ ŠÍRKOVÁ MODULACE

Pulzně šířková modulace (PWM) je způsob generování analogového signálu pomocí veličiny, která může nabývat pouze dvou hodnot. Touto veličinou nejčastěji bývá napětí.

Výhodou PWM také je, že při spínání obvodových prvků téměř nedochází k vyzařování ztrátového výkonu v podobě tepla.

PWM je charakterizováno dvěma parametry a to frekvencí a střídou. Střída určuje kolik procent času vzhledem k periodě je signál v úrovni H a frekvence udává délku této periody.

Střídu je možné vypočítat jako

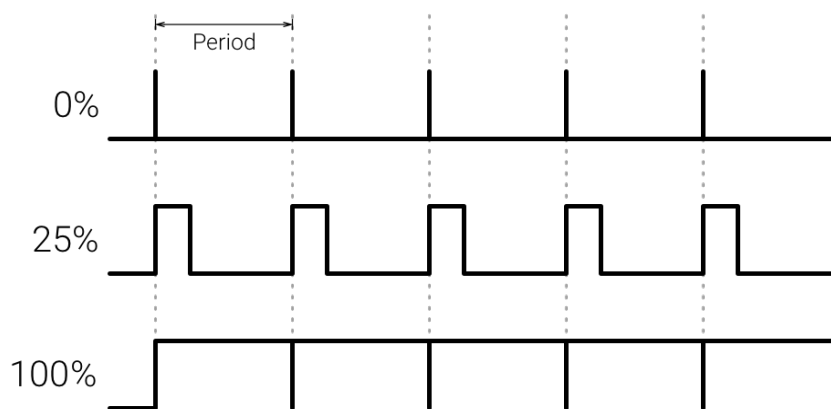
$$D = \frac{T_{\text{ON}}}{T_{\text{ON}} + T_{\text{OFF}}} \cdot 100, \quad (1.30)$$

kde  $D$  – střída, %,

$T_{\text{ON}}$  – doba v úrovni H, s,

$T_{\text{OFF}}$  – doba v úrovni L, s.

Vliv hodnoty střídy na podobu PWM signálu je vidět na obr. 1.13.



Obr. 1.13 – Signály PWM s různou střídou

Velikost odpovídajícího analogového signálu by se dala vypočítat jako

$$U_{\text{PWM}} = \frac{T_{\text{ON}}}{T_{\text{ON}} + T_{\text{OFF}}} \cdot U_{\text{H}}, \quad (1.31)$$

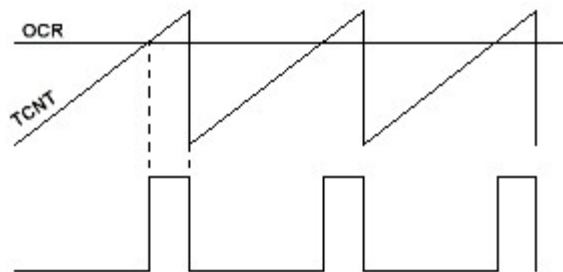
kde  $U_{\text{PWM}}$  – velikost odpovídajícího analogového napětí, V,

$U_{\text{H}}$  – velikost napětí v sepnutém stavu, V.

### 1.5.1 Režimy PWM v mikroočítačích

Mikroočítače řady ATmega generují signál PWM pomocí čítačů/časovačů. Tyto čítače/časovače jsou konfigurovány odpovídajícím registrem TCCR<sub>x</sub>, na zvolený režim. Střída je potom nastavována hodnotou příslušného komparačního registru OCCR<sub>x</sub>. V případě osmibitového čítače/časovače by střídě 50 % odpovídala hodnota registru OCCR<sub>x</sub> = 127.

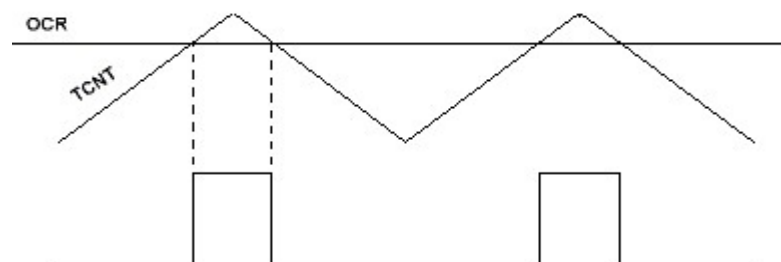
V režimu Fast PWM je výstup v logické úrovni L do doby, než je hodnota časovače rovna hodnotě komparačního registru. Při dosažení této hodnoty se výstup překlápí do logické úrovně H a v ní zůstane do doby, než přeteče časovač. Poté se výstup znovu překlápí do úrovně L a proces začíná znovu. Průběh signálů je zobrazen na obr. 1.14.



Obr. 1.14 – Fast PWM

Pulzy v tomto režimu jsou generovány tak, že končí na konci periody.

V režimu Phase Correct PWM se výstup překlápí do úrovně H, stejně jako v režimu Fast PWM, když je hodnota komparačního registru rovna hodnotě časovače. Časovač ale po přetečení nezačíná počítat znovu od nuly, ale postupně se zase snižuje. K překlopení do úrovně L tedy dojde při rovnosti komparačního registru a časovače při čítání směrem dolů. Průběh signálu je zobrazen na obr. 1.15.

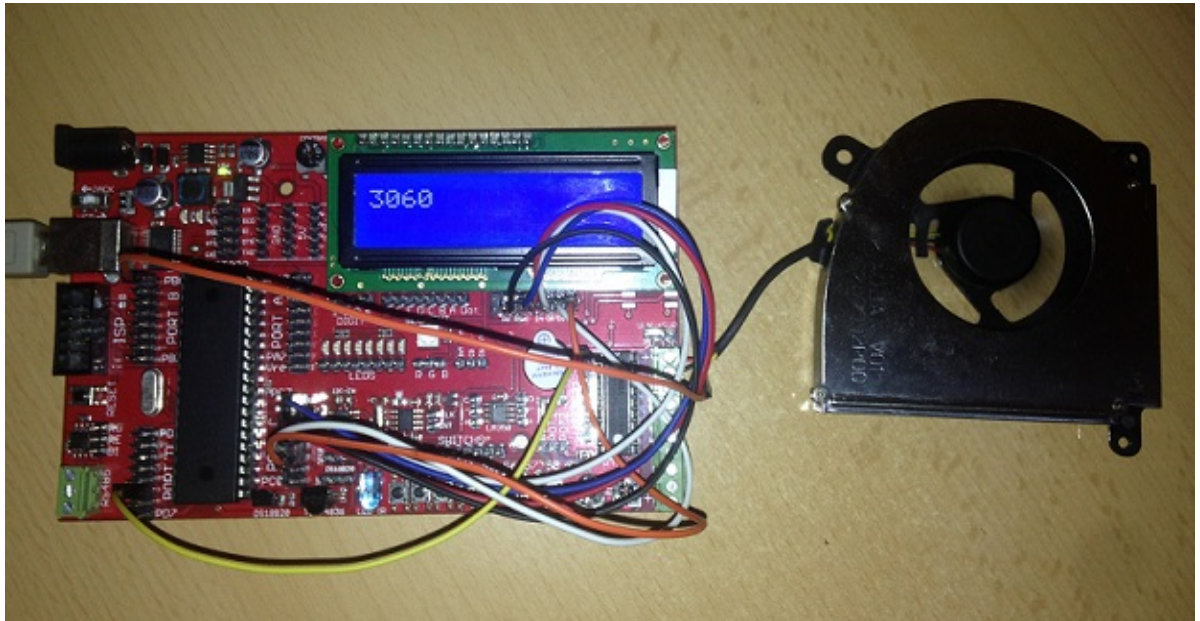


Obr. 1.15 – Phase Correct PWM

Pulzy jsou v tomto režimu situovány do středu periody, dochází zde ale ke snížení frekvence signálu na polovinu.

## 2 PRAKTICKÁ REALIZACE

Byl vytvořen číslíkový řídicí systém pro regulaci otáček ventilátoru na bázi jednočipového počítače řady ATmega. Realizovaný systém je na obr. 2.1.



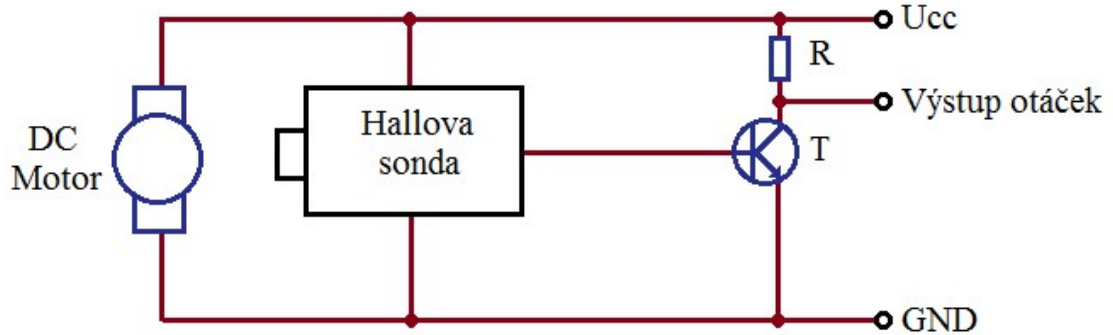
Obr. 2.1 – Realizovaný systém

### 2.1 POUŽITÝ HARDWARE

Při praktické realizaci byla využita univerzální vývojová deska pro mikro počítač ATmega32 And-Tech EvB 5.1. V následujících podkapitolách jsou popsány využité části desky a další hardware.

### 2.1.1 Ventilátor

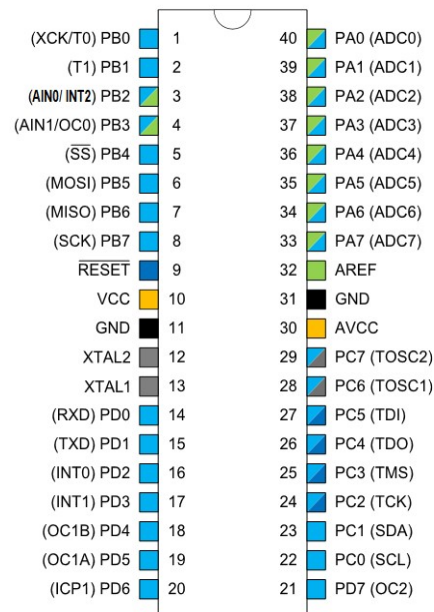
Jedná se o chladicí notebookový ventilátor, který je napájen napětím 5 V a udávaný odběr proudu je 270 mA. Z ventilátoru jsou vyvedeny tři vodiče (dva pro napájení, jeden pro snímání otáček). Ilustrační schéma ventilátoru je na obr. 2.2.



Obr. 2.2 – Schéma ventilátoru

### 2.1.2 Mikropočítač ATmega32

Základním stavebním kamenem regulačního systému byl mikropočítač od firmy Atmel ATmega32. Jedná se o osmibitový mikrokontrolér postavený na architektuře RISC.



Obr. 2.3 – Pouzdro mikropočítače ATmega32

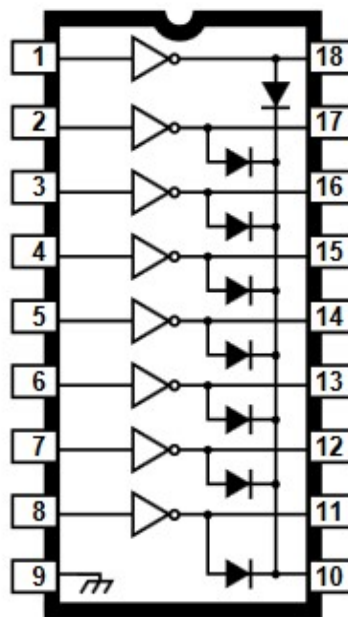


### 2.1.3 Spínací obvod ULN2803

Protože mikropočítač dovoluje odebrat proud z jednoho pinu do maximální hodnoty 40 mA a ventilátor udává, že je jeho odběr 270 mA, bylo nutné připojit ventilátor k mikropočítači přes silový spínací obvod.

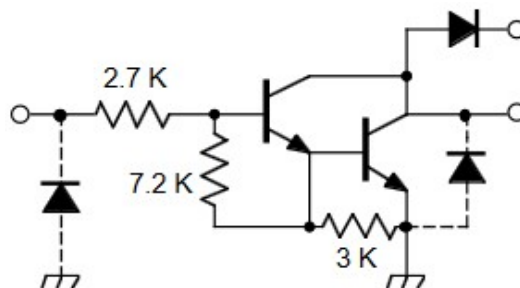
K tomuto účelu byl využit integrovaný obvod ULN2803, zobrazený na obr 2.4, který je přímo integrovaný na vývojové desce.

Tento obvod je přímo navržený aby plnil funkci prostředníka mezi nízkonapěťovým logickým systémem a silovým prvkem, přičemž dokáže spínat proudy až do 500 mA.



Obr. 2.4 – ULN2803

Na obr. 2.5 je zobrazeno zapojení jednotlivých kanálů obvodu ULN2803, jedná se o Darlingtonovo zapojení s otevřeným kolektorem.



Obr. 2.5 – Zapojení kanálu

### 2.1.4 LCD displej

Vizuálním výstupem regulačního obvodu je podsvícený LCD displej, který umožňuje zobrazit dva řádky o šestnácti znacích.

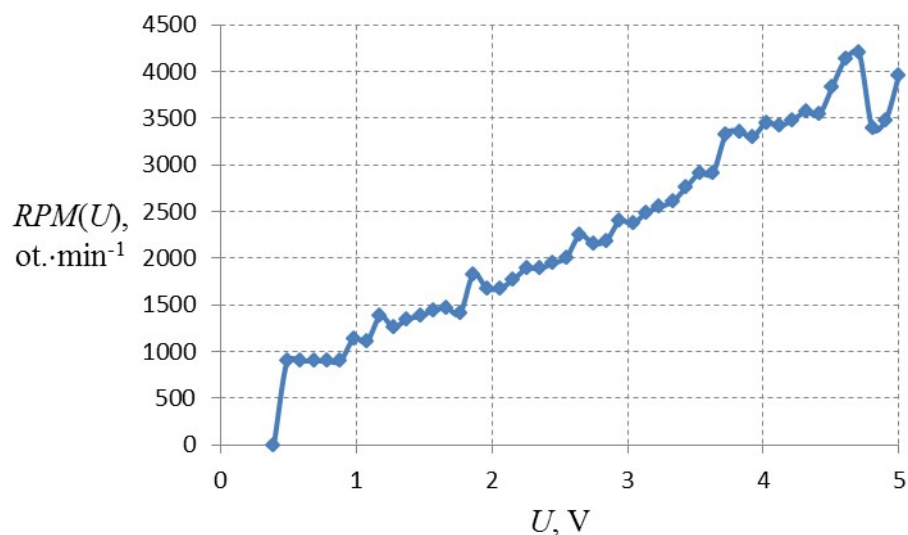
Mikropočítač komunikuje s displejem díky řadiči HD44780 ve čtyřbitovém režimu. K přenosu dat se tedy používají čtyři datové vodiče a dva vodiče řídicí.

Na displeji se potom zobrazují aktuální otáčky ventilátoru *RPM*, které se aktualizují se vzorkovací periodou.

## 2.2 ZMĚŘENÉ CHARAKTERISTIKY VENTILÁTORU

### 2.2.1 Statická charakteristika

Byla změřena statická charakteristika, která je zobrazen na obr. 2.6.

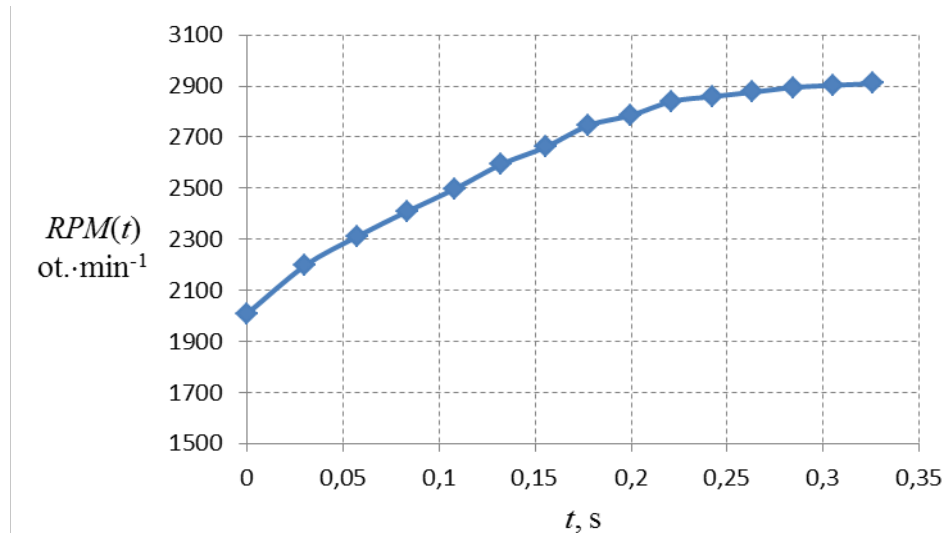


Obr. 2.6 – Statická charakteristika

Na této charakteristice byla zvolena lineární pracovní oblast pro změření dynamické charakteristiky.

## 2.2.2 Dynamická charakteristika

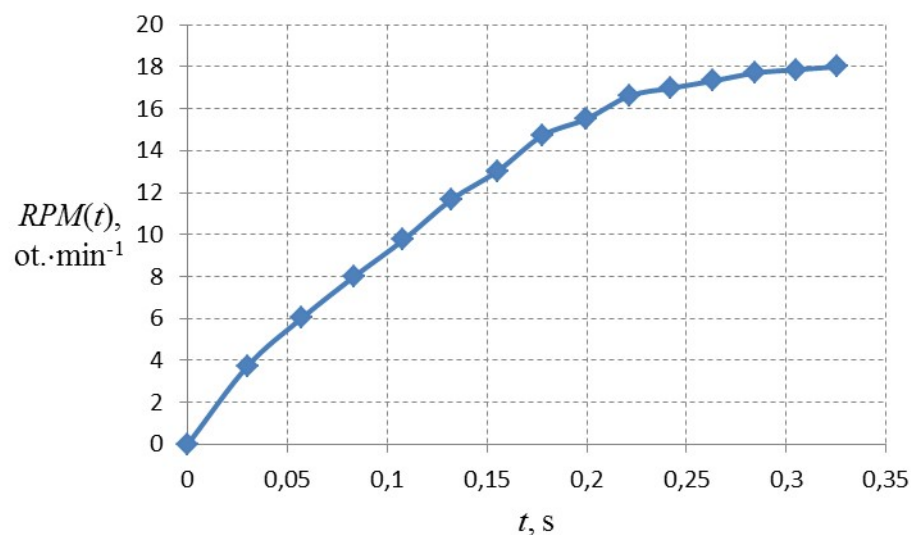
Byla provedena skoková změna změnou hodnoty registru *OCR1A* z hodnoty 130 na hodnotu 150. Změřená charakteristika je na obr. 2.7.



Obr. 2.7 – Dynamická charakteristika

## 2.2.3 Přejímová charakteristika

Z dynamické charakteristiky byla vyhodnocena přejímová charakteristiky. Ta je zobrazena na obr 2.8.



Obr 2.8 – Přejímová charakteristika

## 2.3 MODEL VENTILÁTORU

Podle tvaru přechodové charakteristiky bylo usouzeno, že se jedná o soustavu prvního řádu, která má přenos

$$F_S = \frac{Z}{Ts + 1} \quad (2.1)$$

kde  $F_S$  – přenos soustavy,  
 $Z$  – zesílení soustavy,  
 $T$  – časová konstanta soustavy, s.

Zesílení soustavy bylo vypočítáno podle následujícího vztahu

$$Z = y_\infty = 0,3 \text{ ot.} \cdot \text{s}^{-1}, \quad (2.2)$$

kde  $y_\infty$  – ustálená hodnota regulované veličiny,  $\text{ot.} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Časová konstanta  $T$  je doba, kdy regulovaná veličina dosáhne 63% své ustálené hodnoty. V tomto případě byla časová konstanta určena jako  $T = 0,14$  s.

Po dosazení hodnot do rovnice (2.1) byl získán přenos ventilátoru

$$F_S = \frac{0,3}{0,14s + 1}. \quad (2.3)$$

## 2.4 PROGRAMOVÁNÍ MIKROPOČÍTAČE

Celá programová část byla realizována a zkompileována ve vývojovém prostředí AVR Studio 5.1 s využitím jazyka C.

Na začátku programu jsou nakonfigurovány tři časovače tak, aby plnily požadovanou funkci. To je dále popsáno v následujících třech kapitolách.

Dále jsou vypočítány konstanty regulátoru ze zadaných parametrů regulované soustavy a je zvolen ladící parametr regulátoru a žádaná hodnota.

Program následně běží v prázdné nekonečné smyčce. Při přetečení časovače T2 je vyvoláno přerušení ve kterém se vyhodnocuje uplynutí vzorkovací periody.

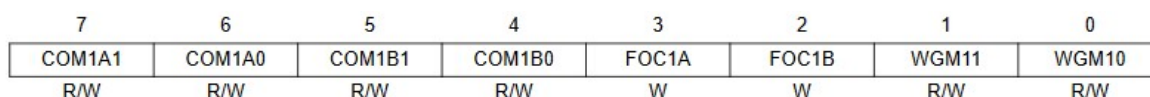
Pokud uplynula doba vzorkovací periody, jsou vypočítány aktuální otáčky, proveden algoritmus PI regulátoru a upraven akční zásah. Dále se vynulují pomocné proměnné a program se opět vrací do nekonečné smyčky.

V případě, že doba vzorkovací periody ještě neuplynula, inkrementuje se pomocná proměnná a program se vrací do nekonečné smyčky.

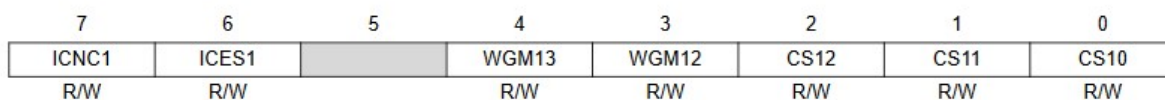
### 2.4.1 Konfigurace PWM

Jako zdroj PWM signálu byl použit časovač T1 v osmibitovém režimu. Hodnotami registrů *OC1A* a *OC1B* se nastavuje střída výstupního PWM signálu pro jednotlivé kanály.

Pro správnou funkci časovače jako zdroje PWM signálu bylo nutné nakonfigurovat registry *TCCR1A* a *TCCR1B*, jejichž struktura je na obr. 2.10 a 2.11 níže.



Obr. 2.9 – Registr *TCCR1A*



Obr. 2.10 – Registr *TCCR1B*

Jako režim PWM byl zvolen mód 8-bit Fast PWM. Bylo tedy nutné nastavit bity *WGM10* v registru *TCCR1A* a *WGM12* v registru *TCCR1B* na log. 1.

Dále bylo nastaveno, aby se při shodě hodnot registrů *TCNT1* a *OCRIA/OCRIB* výstup překlopil do úrovně L (Při přetečení registru *TCNT1* se opět překlopí do úrovně H). Toho bylo dosaženo nastavením log. 1 na bity *COM1A1* a *COM1B1* v registru *TCCRIA*.

Nakonec byl zvolen zdroj hodinového signálu, a to z externího krystalu s předděličkou 1024. To bylo provedeno nastavením bitů *CS10* a *CS12* v registru *TCCRIB* na log. 1.

## 2.4.2 Konfigurace časovače T0 jako čítače

T0 je osmibitový časovač. Může tedy čítat až do hodnoty 255. Při maximálních otáčkách ventilátoru a zvolené půl sekundové vzorkovací periodě by nemělo dojít k jeho přetečení. Pro jistotu byl ale nakonfigurován tak, aby při přetečení vyvolal přerušení, při kterém by se zavolala rutina, ve které by došlo k inkrementaci pomocné proměnné. Tato proměnná by indikovala počet přetečení čítače za dobu jedné vzorkovací periody, díky čemuž by mohla být správně vyhodnocena rychlost otáček.

Aby časovač pracoval podle požadavků, bylo ho nutné nakonfigurovat pomocí registru *TCCR0*, který je zobrazen na obr. 2.12. Jako zdroj hodinového signálu byl zvolen externí zdroj na pinu PB0(T0). Bity *CS00*, *CS01* a *CS02* byly tedy nastaveny na log. 1.

Aby byly správně detekovány napěťové impulsy, bylo navíc nutné na pinu PB0 zapnout pull up rezistor.

|      |       |       |       |       |      |      |      |
|------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|
| 7    | 6     | 5     | 4     | 3     | 2    | 1    | 0    |
| FOC0 | WGM00 | COM01 | COM00 | WGM01 | CS02 | CS01 | CS00 |
| W    | R/W   | R/W   | R/W   | R/W   | R/W  | R/W  | R/W  |

Obr. 2.11 – Registr *TCCR0*

Nakonec bylo nastaveno, aby bylo vyvoláno přerušení při přetečení čítače a to nastavením bitu *TOIE0* na log. 1 v registru *TIMSK*, jehož struktura je na obr. 2.13, na log. 1.

|       |       |        |        |        |       |       |       |
|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| 7     | 6     | 5      | 4      | 3      | 2     | 1     | 0     |
| OCIE2 | TOIE2 | TICIE1 | OCIE1A | OCIE1B | TOIE1 | OCIE0 | TOIE0 |
| R/W   | R/W   | R/W    | R/W    | R/W    | R/W   | R/W   | R/W   |

Obr. 2.12 – Registr *TIMSK*

### 2.4.3 Konfigurace časovače T2

Pomocí osmibitového časovače T2 byla odměřována vzorkovací perioda. Protože hodinový signál časovače je krystal s frekvencí 16 MHz, časovač přeteče přibližně za 16  $\mu$ s. Aby bylo dosaženo vzorkovací periody 0,5 sekund, byla zavedena pomocná proměnná, která indikuje počet přetečení časovače. Dále byla nastavena frekvenční předdělička na 1024, čímž byla získána nová frekvence hodinového signálu časovače 15,625 kHz.

Dále bylo nutné vypočítat, kolikrát přeteče časovač, než uplyne zvolená vzorkovací perioda. Tato hodnota byla vypočítána podle následujícího vztahu

$$N_P = \frac{T_{vz} \cdot f_{clk}}{P_S \cdot 2^{T_R}}, \quad (2.4)$$

kde  $N_P$  – počet přetečení časovače,

$T_{vz}$  – vzorkovací perioda, s,

$f_{clk}$  – frekvence hodin, Hz,

$P_S$  – hodnota předděličky,

$T_R$  – rozlišení časovače.

Pro zvolenou vzorkovací periodu 0,5 sekund byl vypočítán počet přetečení jako

$$N_P = \frac{T_{vz} \cdot f_{clk}}{P_S \cdot 2^{T_R}} = \frac{0,5 \cdot 16 \cdot 10^6}{1024 \cdot 2^8} \cong 31. \quad (2.5)$$

Samotná konfigurace časovače byla provedena pomocí registru *TCCR2*, který je zobrazen na obr. 2.14.

|      |       |       |       |       |      |      |      |
|------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|
| 7    | 6     | 5     | 4     | 3     | 2    | 1    | 0    |
| FOC2 | WGM20 | COM21 | COM20 | WGM21 | CS22 | CS21 | CS20 |
| W    | R/W   | R/W   | R/W   | R/W   | R/W  | R/W  | R/W  |

Obr. 2.13 – Registr *TCCR2*

Nastavením bitů *CS20*, *CS21* a *CS22* v registru *TCCR2* na log. 1 byla nastavena frekvenční předdělička na hodnotu 1024. V registru *TIMSK*, který je na obr. 2.13, byl nastaven bit *TOIE2* na log. 1 pro vyvolání přerušování při přetečení časovače.

#### 2.4.4 Nastavení regulátoru

Byl zvolen regulátor typu PI. Jeho parametry byly vypočítány použitím metody přímé syntézy, která je popsána v kapitole 1.4.3.

#### 2.4.5 Algoritmus PI regulátoru

Regulátor je realizovaný samostatnou funkcí, do které vstupuje jako parametr počet otáček za sekundu. Tato funkce je volána pokaždé, kdy časovač dosáhne daný počet přetečení, reprezentující vzorkovací periodu.

Pro programovou realizaci číslicového PI regulátoru byl zvolen jeho polohový algoritmus

$$u(k) = k_p \left( e(k) + \frac{T_{vz}}{T_I} \sum_{i=0}^k \frac{e(i) - e(i-1)}{2} \right), \quad (2.6)$$

kde  $u(k)$  – akční zásah ve vzorku  $k$ ,

$e(k)$  – regulační odchylka ve vzorku  $k$ , ot. $\cdot$ s $^{-1}$ ,

$e(k-1)$  – regulační odchylka ve vzorku  $k-1$ , ot. $\cdot$ s $^{-1}$ .

Po zavolání rutiny PI regulátoru se obsah proměnné reprezentující  $e(k)$  uloží do proměnné pro  $e(k-1)$ . Současná regulační odchylka se poté vypočítá podle vztahu

$$e(k) = w - y(k), \quad (2.7)$$

kde  $w$  je žádaná hodnota, ot. $\cdot$ s $^{-1}$ ,

$y(k)$  – regulovaná veličina v současném vzorku, ot. $\cdot$ s $^{-1}$ .

Proporcionální složka regulátoru je následně vypočítána jako

$$P(k) = k_p \cdot e(k) \quad (2.8)$$

Suma v integrační složce regulátoru je reprezentována další proměnnou, která odpovídá následující rovnici

$$S(k) = S(k-1) + \frac{e(k) - e(k-1)}{2}, \quad (2.9)$$

kde  $S(k)$  je hodnota sumy v současném vzorku,

$S(k-1)$  – hodnota sumy v minulém vzorku.



Integrační složka regulátoru je poté vypočítána jako

$$I(k) = k_p \cdot \frac{T_{vz}}{T_I} \cdot S(k). \quad (2.10)$$

Nakonec je vypočítán akční zásah regulátoru

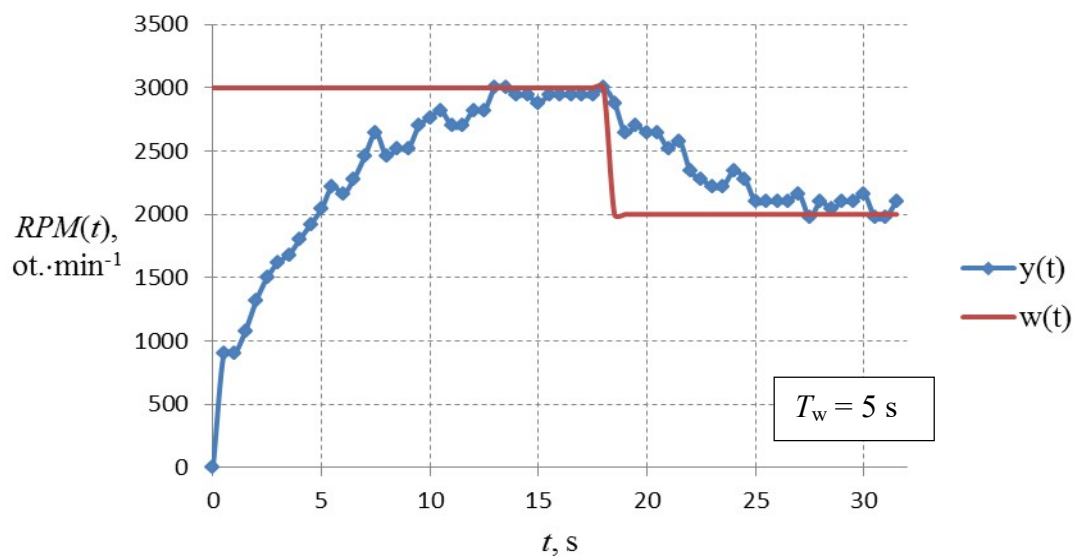
$$u(k) = P(k) + I(k), \quad (2.11)$$

který je zaokrouhlen na celé číslo a omezen od 0 do 255, tak aby odpovídal rozsahu osmibitového registru.

## 2.5 REGULAČNÍ POCHOD

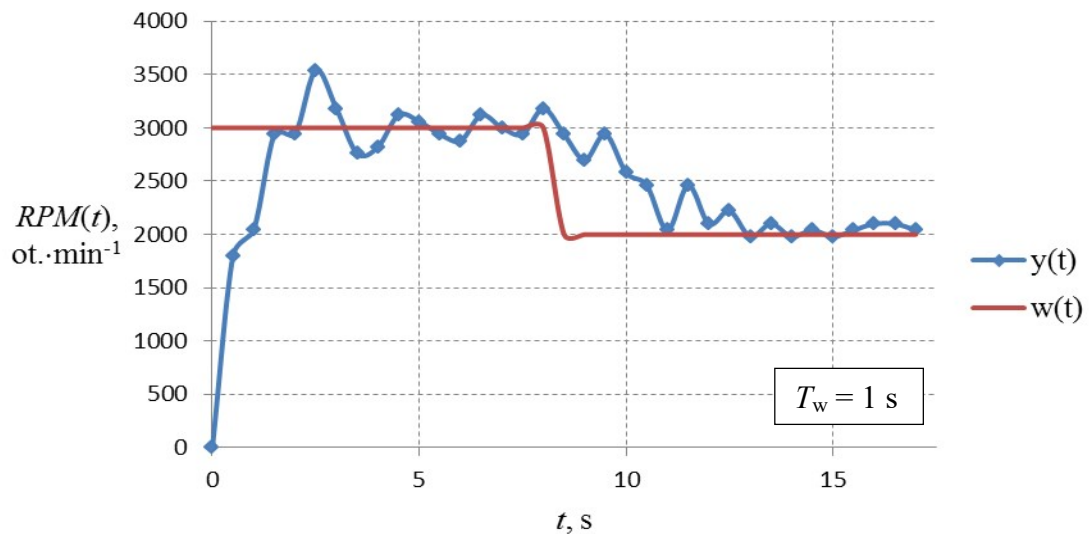
Byly změřeny regulační pochody s různě zvoleným ladícím parametrem  $T_w$ . Tento parametr je nutné vhodně zvolit vzhledem k rozsahu akční veličiny.

Na obrázku 2.15 je zobrazen regulační pochod s nulovou počáteční rychlostí otáček a změnou žádané hodnoty z 3000 ot. $\cdot$ min $^{-1}$  na 2000 ot. $\cdot$ min $^{-1}$  v čase  $t = 18,5$  s při  $T_w = 5$  s.



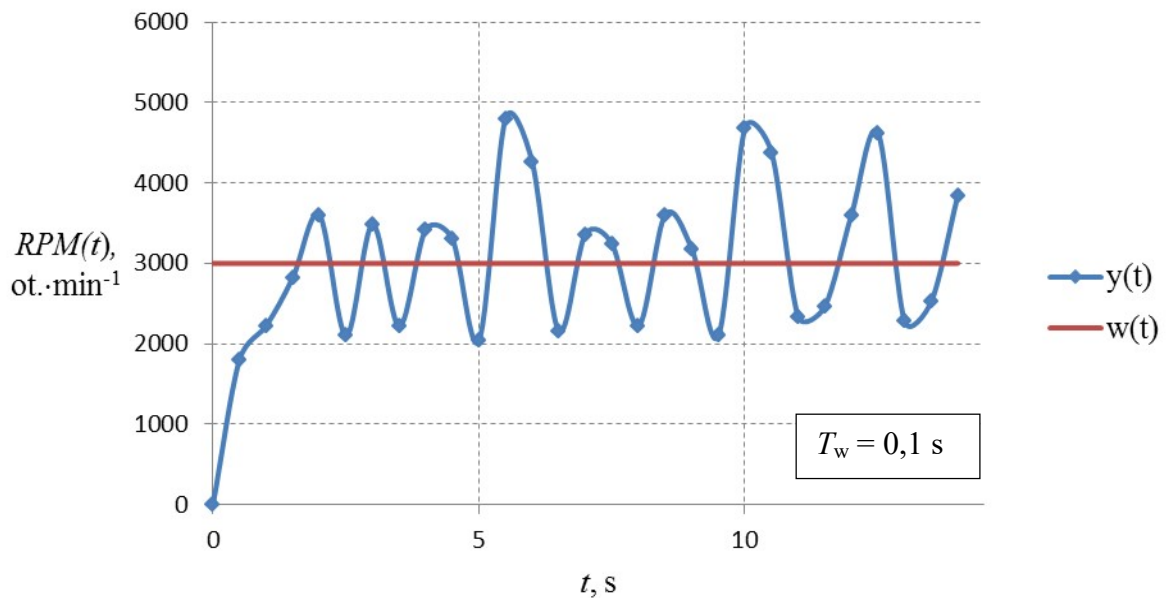
Obr. 2.14 – Regulační pochod pro  $T_w = 5$  s

Na obrázku 2.16 je zobrazen regulační pochod s nulovou počáteční rychlostí otáček a změnou žádané hodnoty z  $w = 3000 \text{ ot.}\cdot\text{min}^{-1}$  na  $w = 2000 \text{ ot.}\cdot\text{min}^{-1}$  v čase  $t = 8 \text{ s}$  při  $T_w = 1 \text{ s}$ .



Obr. 2.15 – Regulační pochod pro  $T_w = 1 \text{ s}$

Na obrázku 2.17 je zobrazen regulační pochod s nulovou počáteční rychlostí otáček a změnou žádané hodnoty z  $w = 3000 \text{ ot.}\cdot\text{min}^{-1}$  na  $w = 2000 \text{ ot.}\cdot\text{min}^{-1}$  v čase  $t = 8 \text{ s}$  při  $T_w = 0,1 \text{ s}$ .



Obr. 2.16 – Regulační pochod pro  $T_w = 0,1 \text{ s}$

Z předešlých obrázků je patrné, že parametr  $T_w$  ovlivňuje dobu regulačního pochodu. Pro příliš nízké hodnoty může dojít k rozkmitání soustavy vzhledem k rozsahu možného akčního zásahu, viz obr 2.17.

### 2.5.1 Kritéria kvality regulačního pochodu

V tab. 2.1 jsou uvedena kritéria kvality regulačních pochodů pro výše uvedené parametry  $T_w$ . Konkrétně se jedná o maximální přeregulování, které je vypočítáno podle rovnice

$$\sigma = \frac{y_m}{w} \cdot 100, \quad (2.12)$$

kde  $\sigma$  – maximální přeregulování, %,

$y_m$  – velikost prvního překmitu nad žádanou hodnotu,

$w$  – žádaná hodnota,  $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$ .

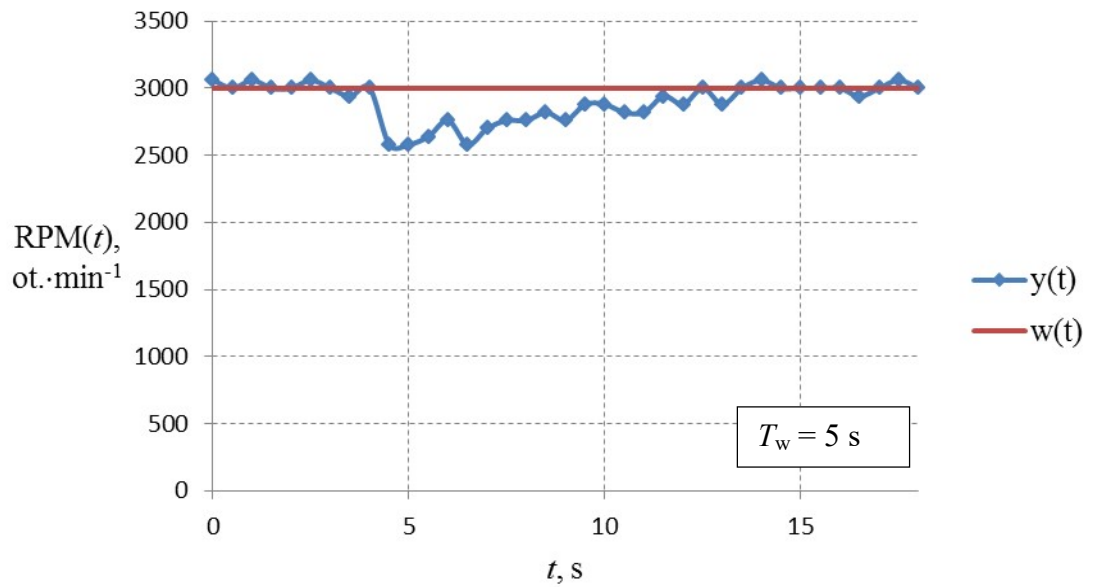
Druhým parametrem je doba regulace  $t_p$ , která udává čas, kdy regulovaná veličina naposledy vstoupila do pásma  $w \pm 5\%$  a dále už z něj nevystoupila.

Tab. 2.1 – Kritéria regulace

| $T_w$ | $\sigma, \%$ | $t_p, \text{s}$ |
|-------|--------------|-----------------|
| 0,1   | 60           | $\infty$        |
| 1     | 18           | 4               |
| 5     | 1            | 13              |

## 2.5.2 Regulační pochod s poruchou

Na obrázku 2.18 je zobrazen regulační pochod s žádanou hodnotou  $w = 3000 \text{ ot.}\cdot\text{min}^{-1}$  při  $T_w = 5 \text{ s}$ . Porucha je zanesena do regulované soustavy v čase  $t = 4,5$ .



Obr. 2.17 – Regulační pochod s poruchou

### 3 ZÁVĚR

Podarilo se realizovat číslicový řídicí systém pro řízení otáček ventilátoru. Systém byl realizován na vývojové desce pro mikropočítač ATMega32.

Zvoleným typem regulátoru byl regulátor PI, jehož parametry byly nastaveny metodou přímé syntézy. Tato metoda umožňuje zvolit ladící časovou konstantu. Délka regulačního pochodu je pak přímo úměrná této konstantě. Pro příliš nízké hodnoty ovšem dochází k rozkmitání soustavy, proto je nutné pro správnou funkci regulátoru volit hodnoty přibližně 1 sekunda a vyšší.

Dobu regulace negativně ovlivňuje poměrně dlouhá perioda vzorkování vzhledem k časové konstantě ventilátoru. Nižší perioda vzorkování by ale znamenala menší rozlišení a přesnost měření otáček. V tomto případě se nejedná o zásadní problém.

Slabinou systému je měření otáček, které je poměrně nepřesné. To je způsobeno především pulzně šířkovou modulací, kterou je spínáno napájení ventilátoru a ten poté nemůže správně generovat impulsy signalizující otáčky. To je citelné hlavně při nízkých otáčkách. V pracovním rozsahu přibližně od 2000 ot. $\cdot$ min<sup>-1</sup> do 4000 ot. $\cdot$ min<sup>-1</sup> se vyskytují pouze nárazové chyby, na které ovšem regulátor reaguje změnou akčního zásahu a dojde tak k slabšímu rozkmitání, které se ale po několika sekundách ustálí.

Touto prací bylo úspěšně ověřeno zpětnovazební řízení s využitím číslicového regulátoru.

## POUŽITÁ LITERATURA

- ATMEL.2016. *ATMega32A Datasheet* [online]. Dostupné z [http://www.atmel.com/Images/Atmel-8155-8-bit-Microcontroller-AVR-ATmega32A\\_Datasheet.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-8155-8-bit-Microcontroller-AVR-ATmega32A_Datasheet.pdf).
- CVEJN, J. 2012. *Řízení procesů* [online]. Pardubice: Univerzita Pardubice, FEI. Elektronický studijní materiál k předmětu Automatizace 1, [cit. 2017-04-23].
- HLAVA, J. 2000. *Prostředky automatického řízení II: analogové a číselné regulátory, elektrické pohony, průmyslové komunikační systémy*. Praha: České vysoké učení technické. 162 s. ISBN 80-010-2221-8.
- NAVRÁTIL, P. 2011. *Automatizace: Vybrané statě* [online]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, [cit. 2017-04-23]. ISBN 978-80-7318-935-8. Dostupné z: [http://www.utb.cz/file/13883\\_1\\_1](http://www.utb.cz/file/13883_1_1).
- VÍTEČKOVÁ, M. 2009. Návrh a seřízení konvenčních regulátorů. *Trilobit*. Vol. 1 (2009), No. 1 [online]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky. [cit. 2017-04-23]. ISSN 1804-1795. Dostupné z: <http://trilobit.fai.utb.cz/navrh-a-serizeni-konvencnich-regulatoru>.

## **PŘÍLOHY**

**A - CD**

**Příloha k bakalářské práci**

Číslicový řídicí systém pro regulaci otáček ventilátoru

Petr Langer

**CD**



## **Obsah**

- 1 Text bakalářské práce ve formátu PDF
- 2 Úplný zdrojový kód programu