

# Implementácia adaptívneho/klasického PID regulátora na mikrokontroléroch s jadrom AVR

V priemyselných podmienkach je často nevyhnutné implementovať PID regulátor do riadiacej sústavy priamo počas procesu.

V niektorých prípadoch nemožno odstať celú prevádzku a vykonávať merania, ktoré sú potrebné na identifikáciu systému, a následný výpočet správnych parametrov pre PID regulátor. V takýchto situáciách možno využiť tzv. samonastavujúce sa regulátory, inak nazývané aj adaptívne regulátory.

## Použité typy regulátorov

Regulovanú sústavu možno riadiť v dvoch režimoch, a to:

- riadenie vykonávané klasickým PSD regulátorom s prírastkovým algoritmom, kde je možnosť nastavenia jeho parametrov [1],
- riadenie vykonávané adaptívnym PSD regulátorom s použitím algoritmu podľa [2].

## Klasický PSD regulátor

Na realizáciu klasického PSD regulátora sú použité rekurentné algoritmy, keď sa počíta hodnota akčnej veličiny  $u(k)$  z predchádzajúcej zapamätanej hodnoty  $u(k-1)$  a z korekčného prírastku  $\Delta u(k)$ . Takéto algoritmy sú označované ako prírastkové alebo rýchlostné. Tento algoritmus je vyjadrený vzťahom (1).

$$u(k) = u(k-1) + K[e(k) - e(k-1)] + T_i T_0 e(k) + \frac{T_d}{T_0} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (1)$$

## Adaptívny PSD regulátor

Jednoduchý algoritmus bol opísaný už v roku 1985 [3]. Tento výsledný algoritmus potrebuje iba niekoľko aritmetických operácií bez potreby predbežnej identifikácie parametrov riadeného systému, pričom vyhýbanie sa identifikácii je najväčším problémom, ktorý sprevádza tieto samonastavujúce sa regulátory. Podľa [2] môže byť konečná rovnica pre riadiacu veličinu adaptívneho riadenia vyjadrená takto:

$$\Delta u(k) = g(k)[e(k) + 2T_v(k)\Delta e(k) + 2T_v^2(k)\Delta^2 e(k)] \quad (2)$$

kde  $\Delta T_v(k)$  je vyjadrená vzťahom:

$$\Delta T_v(k) = L \cdot \text{sign}[|\Delta e(k)| - T_v(k-1)|\Delta^2 e(k)|] \quad (3)$$

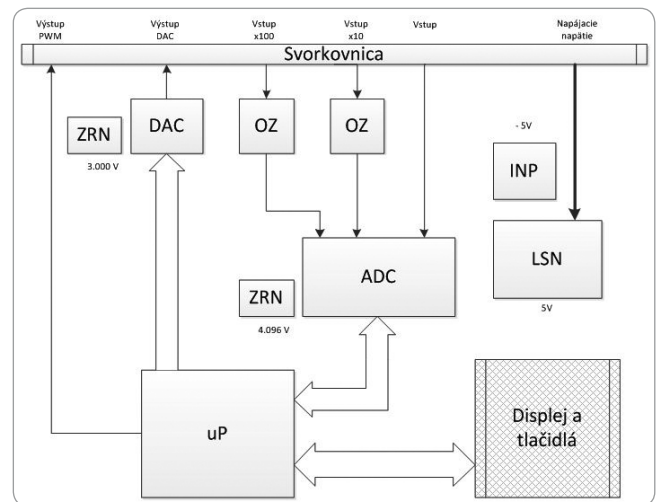
Po analytickom odvodení podľa [2] dostávame vzťah (4) pre zmenu zosilnenia. Konštanta  $c$  je v intervale  $\{0,025;0,05\}$ .

$$\Delta g(k) = \frac{1}{T_v(k-1)} c g(k-1) \quad (4)$$

## Návrh hardvéru

Srdcom zariadenia je 8-bitový mikrokontrolér ATmega168 radu AVR od firmy Atmel. Okrem neho sú potrebné aj ďalšie špeciálne elektronické obvody na spracovanie a zobrazenie informácií. Na úpravu napätových úrovní vstupných (meraných) signálov boli použité precízne operačné zosilňovače AD623 s vysokou stabilitou a nízkym šumom. Boli použité v neinvertnom zapojení s desať- až stonásobným zosilnením kvôli možnosti pripojenia aj slabých zdrojov signálu, ako sú termočlánky a pod. Tento analógový signál je spracovaný do digitálnej podoby externým 12-bitovým AD prevodníkom ADS7828 s vlastným referenčným napätím. Komunikácia medzi mikrokontrolérom prebieha po sériovom komunikačnom rozhraní I<sup>2</sup>C. Na zobrazenie potrebných informácií, ako sú nastavované parametre regulátorov, rýchlosť vzorkovania, výber vstupných kanálov, typ pripojeného termočlánku a meranej a nastavenej riadenej veličiny, je použitý 7-segmentový LED displej v multiplexovom zapojení. O jeho riadenie sa stará pomocný mikrokontrolér ATmega8, ktorý komunikuje s hlavným mikrokontrolérom po sériovej zbernici SPI. Na nastavenie parametrov slúži päť tlačidiel umiestnených na hornom paneli pod displejom. Analógový výstupný riadiaci signál

je realizovaný externým 10-bitovým DA prevodníkom TC1321 s komunikačným rozhraním I<sup>2</sup>C. Bloková schéma zapojenia je na obr. 1.



Obr. 1 Bloková schéma zapojenia riadiaceho systému

Vysvetlivky:

- uP – 8-bitový mikrokontrolér ATmega168,
- ADC – AD prevodník,
- DAC – DA prevodník,
- OZ – operačné zosilňovače,
- LSN – lineárny stabilizátor napätia,
- INP – inverzná nábojová pumpa,
- ZRN – zdroje referenčného napätia.

## Návrh obslužného a riadiaceho softvéru

Zdrojové kódy firmvéru sú kompletne napísané v jazyku C vo vývojovom prostredí Co-de::Blocks a skompilované kompilátorom GCC GNU. Ladenie a následné „napálenie“ firmvéru do mikrokontroléra je realizované cez vývojové prostredie AVR Studio pomocou programátora AVR Dragon. Kompletný riadiaci systém je zložený z dvoch balíčkov zdrojových kódov. Jeden je určený pre hlavnú riadiacu časť, ktorá je vykonávaná mikrokontrolérom ATmega168, ďalší je určený pre mikrokontrolér ATmega8, ktorý sa stará o zobrazovanie všetkých potrebných informácií na sedemsegmentovom LED displeji.

Okrem klasických algoritmov na riadenie, výpočty a realizáciu komunikácie medzi digitálnymi obvodmi boli použité aj rôzne metódy spracovania signálu v reálnom čase. Tie najdôležitejšie sú opísané nižšie.

## Zvýšenie rozlíšenia a odstránenie šumu metódou prevzorkovania

ADS7828 má šírku 12 bitov (4 096 hodnôt), čo znamená, že pri napätovej referencii 4,096 V možno dosiahnuť rozlíšenie 1 mV. Keďže na meranie teploty môžu byť použité aj termočlánky, ktoré majú veľmi nízke výstupné napätie, je takéto rozlíšenie nedostačité. No pri iných signáloch toto rozlíšenie stačí. Na zvýšenie rozlíšenia a zároveň na odstránenie šumu či kolísania úrovne signálu pri

meraní bola využitá tzv. metóda prevzorkovania. Je dôležité poznamenať, že tento spôsob nezvyšuje presnosť merania, zvyšuje iba citlivosť na zmenu (lepšie rozlíšenie).

Táto metóda je založená na princípe odobratia  $4^n$  vzoriek pre každý pridaný extra bit v čo najkratšom čase. Sumu týchto nameraných hodnôt  $n$ -krát rolujeme vpravo (delíme) a dostávame hodnotu na rozlíšenie o  $n$  bitov vyššie. Táto metóda však vyžaduje určitú hodnotu šumu v signáli, ako je šum zo signálu termočlánkov, zanesený šum z taktovacej frekvencie mikrokontroléra a pod. Tento šum je v mnohých prípadoch dostačujúci, aby sa použila metóda prevzorkovania. Inak ho treba rôznymi metódami umelo do signálu zaviesť, čo však nie je náš prípad [3].

Pri meraní termočlánkov sa zvýšilo rozlíšenie o 2 bity ( $12 + 2$  bitov = 16 384 hodnôt), teda bol dosiahnutý kvantizačný krok  $250 \mu\text{V}$ ; pri meraní iných snímačov je rozlíšenie zvýšené o 1 bit, kvantizačný krok je potom  $500 \mu\text{V}$ . Zároveň sa takto odstránilo prípadné kolísanie meranej hodnoty spôsobené rušením.

### Konverzia nameranej hodnoty na napätie

Keďže prevodové charakteristiky termočlánkov nie sú dokonale lineárne, nemôžeme jednoducho prepočítať napätie na teplotu vynásobením nameranej hodnoty príslušnou konštantou. Takýmto postupom by sme sa pri vysokých hraničných teplotách dopustili odchýlky aj  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  od reálnej teploty. Vytvorí tabuľku, v ktorej by boli hodnoty napätia zodpovedajúce stupňom Celzia, je z dôvodu pamäťových nárokov neuskutočiteľné. Riešením tohto problému je výpočet polynómu priamky  $n$ -tého rádu v tvare:

$$T = (a_0 + x * (a_1 + x * (a_2 + x * (a_3 + x * (a_n + a_{n+1} * x)))))) \quad (4)$$

kde  $T$  je teplota, a je koeficient jedinečný pre každý typ termočlánku a  $x$  je hodnota napätia vo voltoch. Hodnoty polynómov na výpočet teploty z nameranej hodnoty sú pre každý typ termočlánku dostupné na internete [4]. Nájdeme tam aj hodnoty pre inverznú funkciu, ktoré sú potrebné na prepočet stupňov Celzia na napätie. Tie sú potrebné na zadanie parametrov použitých regulátorov, ktoré pracujú práve s napätím v milivoltoch.

### Implementácia regulačných algoritmov

Algoritmy regulátorov v tomto prípade vykonávajú aritmetické operácie s hodnotami udávanými v milivoltoch. To znamená, že zadaná hodnota veličiny aj nameraná hodnota zo snímačov musia zodpovedať hodnote v milivoltoch, a to v rozsahu 0 až 5 V. Na čo nesmieme zabudnúť pri implementácii algoritmov, je celkový čas od zberu a spracovania vzoriek až po výpočet riadiacej veličiny a jej vykonanie (v prípade PWM, modulovanie na výstupe). To je veľmi dôležité pri určení hraníc maximálnej vzorkovacej frekvencie snímaného signálu pre výpočet riadiacej veličiny. Ak by bol čas na vykonanie všetkých operácií potrebných na výpočet novej riadiacej veličiny dlhší ako časový interval medzi dvoma intervalmi vzorkovania, došlo by k náhodným a nepredvídateľným stavom.

V našom prípade potrebuje mikrokontrolér ATmega168 pri taktovacej frekvencii 20 MHz na výpočet novej riadiacej veličiny pri najväčšej záťaži, t. j. pri pripojení termočlánku ako snímača (potrebný zber šestnástich vzoriek na výpočet jednej reprezentatívnej s využitím metódy prevzorkovania), čas aj s pripočítanou rezervou 3 ms. Tento čas bol zistený na základe ladenia zdrojového kódu v simulátore AVRStudia spolu s aplikovaním informácií z katalógového listu AD prevodníka, z ktorých boli vypočítané potrebné časy na komunikáciu a AD prevod signálu.

### Prototyp riadiaceho systému

Schémy a DPS sú navrhnuté v Eagle CAD 5.6.0 a vytvorené s použitím predlohy vytlačenej na fólii a fotorezistom v spreji metódou fotocesty v domácich podmienkach. Celý riadiaci systém je navrhnutý ako embedded zariadenie, ktoré treba iba zapojiť do siete a je plne funkčné a pripravené vykonávať svoju funkciu. Je skonštruované na dvoch DPS, ktoré sú k sebe pripojené pomocou dištančných

stĺpkov (obr. 2). Celé zariadenie je prevažne v SMD vyhotovení. Viac informácií je na [5].

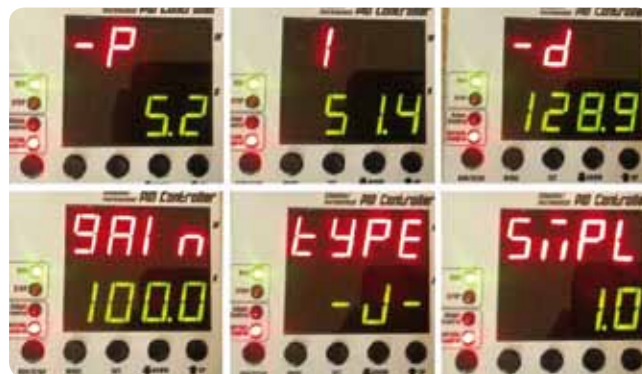


Obr. 2 Prototyp riadiaceho systému

Na nastavenie potrebných veličín, parametrov a riadiacich režimov slúži klávesnica s piatimi tlačidlami na prednom paneli. Funkcie tlačidiel sú nasledujúce:

- SET tlačidlo – slúži na potvrdenie a prepínanie medzi parametrami, ktoré si prajeme nastaviť (pohyb v menu),
- UP tlačidlo – týmto tlačidlom sa vykonáva inkrementácia nastavovanej veličiny, resp. výber parametra smerom doprava (napr. typ termočlánku),
- DOWN tlačidlo – týmto tlačidlom sa vykonáva dekrementácia nastavovanej veličiny, resp. výber parametra smerom doľava,
- RUN/STOP tlačidlo – samostatné tlačidlo, ktorého stlačením sa mení pracovný režim (spustený/ zastavený); nezávisí od pohybu v menu,
- AUTO/MANUAL tlačidlo – samostatné tlačidlo, ktorého stlačením sa mení režim riadenia riadiacej sústavy (adaptívny PSD/ klasický PSD).

Tlačidlá Up a Down disponujú funkciou autorepeat. Pohyb v menu je zobrazený na Obr. 3. Priebeh nastavovania parametrov je na [6].



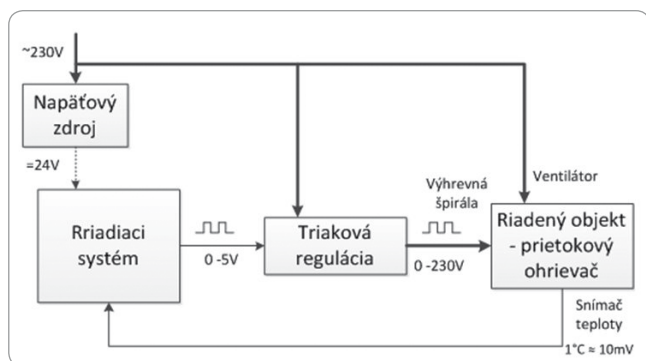
Obr. 3 Pohyb v menu

Parametre riadiaceho systému:

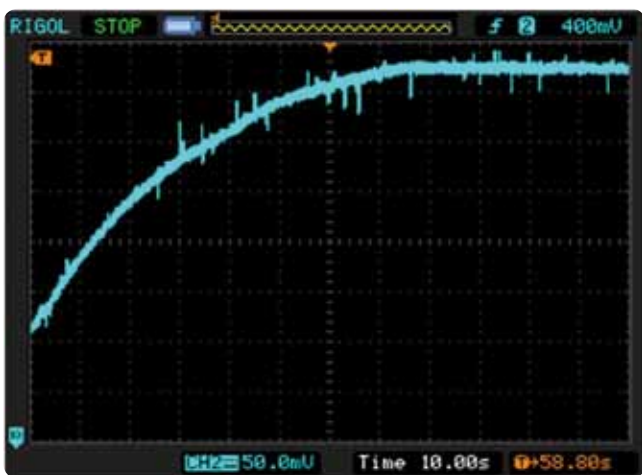
- napájacie napätie 7 – 30 V,
- prúdový odber cca 0,6 A,
- tri analógové vstupy so zosilnením 0, 10 a 100 s možnosťou výberu (iba jeden súčasne),
- výstupy: 0 – 5 V PWM a analógový v rozsahu 0 – 3 V,
- nastavenie pre termočlánky typu J, K, S, R, T,
- nastavenie parametrov P, I a D v rozsahu  $-999,9$  až  $+999,9$  s krokom nastavenia 0,1,
- nastavenie žiadanej hodnoty 0 až 999,5 (napr. teploty, milivoltov, otáčok) s krokom nastavenia 0,5,
- nastavenie vzorkovacej frekvencie 1 až 300 (max.) vzoriek za sekundu s krokom nastavenia 1,
- automatické nastavenie vzorkovanej frekvencie pre adaptívny PSD regulátor v reálnom čase v závislosti od regulačnej odchýlky sústavy,
- automatické ukladanie do vlastnej pamäte,
- režimy AUTO/MANUAL a RUN/STOP s LED indikáciou,
- akustická signalizácia stlačeného tlačidla.

## Experimentálne merania

Experimentálne merania sa vykonali v laboratóriu s objektom riadenia – elektrickým ohrievačom, na ktorom bol z prednej strany pripevnený snímač teploty LM35. Bloková schéma zapojenia merania je zobrazená na obr. 4. Výraznejšou čiarou sú vyznačené výkonové vedenia striedavého napätia 230 V. Tenká čiara vyznačuje signálové cesty.



Obr. 4 Bloková schéma realizácie merania



Obr. 5 Priebeh riadenej veličiny regulačného obvodu s adaptívnym PSD regulátorom s nastavenou teplotou 50 °C

Počas celého vývoja zariadenia sa ladili všetky softvérové i hardvérové požiadavky a experimentálne merania sa vykonávali niekoľkokrát. Objekt je riadený šírko impulzne, čo je bežne zaužívaný spôsob regulácie výkonu odporových záťaží. Teplota vzduchu prietokového ohrievača je regulovaná tak, že ventilátor je trvalo zapojený a reguluje sa iba výhrevnosť špirály. Spätná väzba je realizovaná snímačom teploty LM35 s lineárnym výstupom napätia, ktorého hodnota sa mení v závislosti od meranej teploty. Jeho výstup bol privedený na vstup bez zosilnenia.

Výsledkom experimentálnej časti je prechodová charakteristika zosnímaná z displeja digitálneho osciloskopu RIGOL DS1052E, ktorá zachytáva priebeh nameranej výstupnej veličiny – teploty. Na obr. 5 je zachytený jej priebeh. Žiadaná hodnota bola nastavená na hodnotu 50 °C z počiatočných 25 °C (izbová teplota). Teplota sa po dosiahnutí žiadanej hodnoty ustálila bez prekmitov a následne bola udržiavaná s odchýlkou  $\pm 0,1$  °C. Viditeľné zákmity na signáli sú spôsobené okolitými zdrojmi rušenia. Priebeh merania je zaznamenaný na [6].

## Literatúra

- [1] PETRÁŠ, Ivo: Teória automatického riadenia: Návody na cvičenia. Košice: Elfa 2001. 52 s. ISBN 80-88964-92-X.
- [2] MARŠÍK, J. – STREJC, V.: Application of Identification-free Algorithms for Adaptive Control\*. In: Automatica, Vol. 25, No. 2, s. 273-277, 1989.
- [3] Aplikačná poznámka: Amtel 8-bit Microcontrollers AVR121: Enhancing ADC resolution by oversampling, Rev. 8003A-AVR-09/05
- [4] Technická dokumentácia: NIST Tables of Thermoelectric Voltages and Coefficients. [onli-ne]. Aktualizované 04/17/2008 [cit 2011-11-10]. Dostupné na internete: <<http://srdata.nist.gov/its90/download/download.html>> .
- [5] <https://picasaweb.google.com/107479164724724890210/AdaptivnyKlasickyPIDRegulator>
- [6] <http://www.youtube.com/user/barokZGE/videos>

Ing. Michal Mochnáč

michal.mochnac@gmail.com