

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA CHEMICKEJ A POTRAVINÁRSKEJ
TECHNOLÓGIE
ÚSTAV INFORMATIZÁCIE, AUTOMATIZÁCIE A
MATEMATIKY**

**IMPLEMENTÁCIA JEDNODUCHÝCH REGULÁTOROV
POMOCOU PLC**

BAKALÁRSKA PRÁCA

FCHPT-5415-50891

Bratislava 2011

Adam Baluch

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA CHEMICKÉJ A POTRAVINÁRSKEJ
TECHNOLÓGIE
ÚSTAV INFORMATIZÁCIE, AUTOMATIZÁCIE A
MATEMATIKY**

**IMPLEMENTÁCIA JEDNODUCHÝCH REGULÁTOROV
POMOCOU PLC**

BAKALÁRSKA PRÁCA

FCHPT-5415-50891

Študijný program: automatizácia, informatizácia a manažment v chémii a potravinárstve

Číslo a názov študijného odboru: 5.2.14 automatizácia, 5.2.52 priemyselné inžinierstvo

Školiace pracovisko: Oddelenie informatizácie a riadenia procesov

Vedúci záverečnej práce/školiťel': Ing. Michal Kvasnica, PhD.

Konzultant: Ing. Ivana Rauová

Bratislava 2011

Adam Baluch



ZADANIE BAKALÁRSKEJ PRÁCE

Študent: **Adam Baluch**
ID študenta: 50891
Študijný program: automatizácia, informatizácia a manažment v chémii a potravinárstve
Kombinácia študijných odborov: 5.2.14 automatizácia, 5.2.52 priemyselné inžinierstvo
Vedúci práce: Ing. Michal Kvasnica, PhD.
Konzultant: Ing. Ivana Rauová

Názov práce: **Implementácia jednoduchých regulátorov pomocou PLC**

Špecifikácia zadania:

Jednoduché regulátory (PI, PID) patria v praxi medzi najpoužívanejšie. Ich výhodou je jednoduchá implementácia a schopnosť uregulovať rôzne reálne systémy. Bežným prostriedkom ich implementácie sú programovateľné logické regulátory (PLC). Cieľom tohto projektu je návrh takýchto jednoduchých regulátorov pre matematický model žiarovky. Ten sa získa identifikáciou systému a následne sa jeho správnosť verifikuje porovnaním s reálnym zariadením. Vhodnosť získaného regulátora sa v prvom kroku otestuje v prostredí MATLAB/Simulink. Ďalším krokom je transformácia daného jednoduchého regulátora do rebríkovej logiky v prostredí Step 7 a následné riadenie systému použitím PLC.

Rozsah práce: 30

Riešenie zadania práce od: 14. 02. 2011

Dátum odovzdania práce: 21. 05. 2011

Adam Baluch
Študent

prof. Ing. Miroslav Fikar, DrSc.
Vedúci pracoviska



prof. Ing. Miroslav Fikar, DrSc.
Garant študijného programu

Vyhlásenie:

Čestne vyhlasujem, že bakalársku prácu som spracoval samostatne, pomocou použitej literatúry, ktorá je uvedená v závere bakalárskej práce.

V Bratislave, 20. 05. 2011

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Ondrej', written above a dotted line.

Pod'akovanie:

Touto cestou by som sa chcel pod'akovať konzultantovi bakalárskej práce Ing. Ivane Rauovej za ochotu ,pomoc, cenné rady a poskytnuté vedomosti pri práci na tomto projekte. Zároveň by som chcel pod'akovať Ing. Richardovi Valovi za pomoc pri práci s PLC.

Abstrakt

Cieľom tejto práce je riadiť reálny systém použitím PLC. Práca sa zaoberá identifikáciou systému a na jej základe návrhom PI a PID regulátorov pre matematický model žiarovky. Navrhnuté regulátory sa najprv otestujú v prostredí MATLAB/Simulink a pomocou kritérií kvality riadenia sa určia najvhodnejšie regulátory. Následne sa transformujú do rebríkovej logiky v prostredí STEP 7 a ich úlohou je uradiť reálny objekt pomocou riadiaceho systému SIMATIC S7-200.

Kľúčové slová: identifikácia, PI regulátor, PID regulátor, PLC, SIMATIC S7-200

Abstract

The aim of this project is control of the real object using a PLC. The project also deals with identification of system and designing PI and PID controllers for mathematical model of a bulb. At the beginning designed controllers are tested in the MATLAB/Simulink and the best controllers are chosen according to the criteria for quality control. The next step is a transformation of the controllers into the ladder logic by STEP 7 framework. The last task is to control the real system using hardware SIMATIC S7-200.

Keywords: identification, PI controller, PID controller, PLC, SIMATIC S7-200

Obsah

1 ÚVOD	10
2 Identifikácia	11
2.1 Úvod do identifikácie	11
2.2 Postup pri odhade modelu	11
2.3 Klasifikácia identifikačných metód	12
2.3.1 Aktívny alebo pasívny experiment	12
2.3.2 Deterministické a stochastické metódy	12
2.3.3 Jednorazové a priebežné metódy	12
2.4 Spracovanie prechodových charakteristík	13
2.5 Systém 1. rádu	13
3 Návrh PID regulátorov	15
3.1 Typy regulátorov	15
3.1.1 Proporcionálny regulátor	15
3.1.2 Integračný regulátor	16
3.1.3 Derivačný regulátor	16
3.2 Štruktúra PID regulátora	17
3.3 Zásady pri výbere regulátora	17
3.4 Metódy návrhu regulátorov	18
3.4.1 Analytické metódy	18
3.4.2 Experimentálne metódy	21
3.5 Kvalita riadenia	28
3.5.1 Základne ukazovatele v časovej oblasti	29
3.5.2 Základné integrálne kritéria	29
4 Riadiaci systém SIMATIC S7-200	30
4.1 Tvorba riadiaceho projektu	30
5 Identifikácia zariadenia	32
5.1 Opis zariadenia	32
5.2 Identifikácia systému ako systému 1. rádu	32

6 Riadenie pomocou jednoduchých regulátorov.....	37
6.1 Návrhy a testovanie PI a PID regulátorov.....	37
6.2 Vyhodnotenie kvality riadenia.....	39
6.3 Implementácia navrhnutých regulátorov pomocou PLC.....	45
6.4 Riadenie systému použitím PLC.....	46
7 Záver.....	49
8 Literatúra.....	50

1 Úvod

Nároky na automatizáciu priemyselnej výroby v súčasnosti sú dosť veľké, pretože takmer všetky priemyselné fabriky chcú vyrábať kvalitné výrobky pri minimálnych nákladoch a maximálnej produkcii a zisku. Preto potrebovali do svojej výroby stroje, ktoré by pracovali nepretržite, bez poruchy a dokázali by flexibilne reagovať na zmeny výroby. A práve za týmito účelmi vznikli programovateľné logické automaty PLC, ktoré sú v súčasnosti najpoužívanjšou platformou pri riadení systémov v priemysle. Predtým však, než riadený systém začneme úspešne pomocou PLC riadiť je potrebné vykonať množstvo krokov, od odhadnutia správania riadeného systému po vytvorenie regulátora, ktorý systém spoľahlivo uradi.

Cieľom môjho projektu je navrhnuť regulátor, ktorý bude riadiť žiarovku na žiadanú hodnotu svietivosti, prípadne napätia na žiarovke. V prvom kroku potrebujem identifikovať systém čo do cieľim tak, že budem skokom meniť vstupnú veličinu a skúmať ako sa táto zmena odzrkadlí na výstupe. Získam tak prechodovú charakteristiku, z ktorej po úprave dokážem zistiť prenosovú funkciu systému. Pomocou prenosovej funkcie, alebo prechodovej charakteristiky sa dá navrhnuť mnoho regulátorov, ktoré však potrebujem najskôr otestovať či vôbec daný systém uradia, ak áno, ako kvalitne ho uradia. Na záver pretransformujem blokovú schému uzavretého regulačného obvodu do prostredia STEP 7 a pomocou PLC sa pokúsim uradiť reálny model žiarovky.

2 Identifikácia

2.1 Úvod do Identifikácie [1]

Skôr než začneme so samotnou identifikáciou, je potrebné spomenúť dva základne pojmy pri identifikácii systémov, ktorými sú reálny objekt a jeho model. Reálny objekt, predstavuje reálne zariadenie, na ktorom vykonávame pozorovania a merania, aby sme ho dokázali opísať rôznymi algebraickými, diferenciálnymi, diferenčnými, alebo pravdepodobnostnými vzťahmi, t.j. matematickým modelom (abstraktný systém), ktorý opisuje reálny systém. Matematický model získame na základe vstupno-výstupných informácií z procesu.

Na čo najlepšie odhadnutie správania sa daného objektu (systému) a určenie jeho matematického modelu, nám slúži experimentálna identifikácia. Z jej hľadiska môžeme modely rozdeliť na statické a dynamické (v statickom uvažujeme o časovo nezávislom modeli, zatiaľ čo v dynamickom o časovo závislom), spojité a diskrétne (pri spojitých modeloch sú všetky veličiny pre určitý čas z nejakého intervalu, zatiaľ čo diskrétne modely majú veličiny definované len v diskrétnych časových okamihoch – sú opísané diferenčnými rovnicami), deterministické a stochastické (pri deterministických modeloch neuvažujeme vplyvy náhodných veličín, kým pri stochastických modeloch počítame s rôznymi poruchami, šumom a náhodnými faktormi), lineárne a nelineárne (lineárne modely sú vtedy, ak všetky vzťahy medzi veličinami systému sú lineárne, v opačnom prípade model označujeme ako nelineárny).

2.2 Postup pri odhade modelu [2]

Na odhad modelu je zaužívaný všeobecný postup, ktorý spočíva z niekoľkých krokov:

- Ako prvú musíme určiť štruktúru modelu. Riadime sa pritom podľa informácií, ktoré získame z prvotných experimentov alebo podľa rôznych empirických skúseností o procese. Musíme vybrať typ modelu, ako aj jeho zložitosť. Pri výbere správnej štruktúry sa riadime viacerými kritériami ako je kvalita, flexibilita či v neposlednom rade cena modelu. Na určenie štruktúry používame skôr naše skúsenosti ako systematický postup.
- V ďalšom kroku potrebujeme odhadnúť parametre modelu. Na túto úlohu bolo vypracované veľké množstvo metód, ktoré volíme na základe typu modelu ktorý chceme získať.

- Posledným krokom je verifikácia modelu, kde si musíme položiť otázku, či náš model súhlasí s nameranými údajmi a či dostatočne presne opisuje proces. Ďalšou dôležitou podmienkou dobrého modelu je, či jeho parametre majú fyzikálny zmysel. Môžeme sa tiež pokúsiť výsledný model zjednodušiť a overiť si tak, či navrhnutý model nie je príliš komplikovaný.

2.3 Klasifikácia identifikačných metód

V súčasnosti máme viacero možností ako klasifikovať identifikačné metódy. Možno ich deliť nasledovne:

2.3.1 Aktívny alebo pasívny experiment

V praxi nie je vždy možné vykonávať na danom modeli rôzne experimenty, a preto často musíme identifikovať proces z údajov, ktoré sú nám poskytnuté, avšak nie vždy vyhovujúce. V takomto prípade hovoríme o pasívnom experimente. V prípade, ak môžeme skúmaný proces podrobiť experimentom (generovať na vstupoch rôzne signály) hovoríme o aktívnom experimente.

2.3.2 Deterministické a stochastické metódy

Podľa matematického aparátu potrebného pri spracovaní nameraných údajov môžeme identifikačné metódy rozdeliť na deterministické a stochastické. Deterministické metódy sú také, pri ktorých poznáme vstupy aj výstupy z procesu a neuvažujeme pri nich žiadne vplyvy náhodných veličín. Pri stochastických metódach budeme uvažovať o rôznych náhodných faktoroch, poruchách.

2.3.3 Jednorazové a priebežné metódy

Podľa spôsobu spracovania nameraných údajov môžeme identifikačné metódy rozdeliť na metódy jednorazové, t.j. poskytnuté údaje spracujeme (manuálne, alebo pomocou počítača) a na ich základe systém identifikujeme, alebo na metódy priebežné, ktoré spracúvajú namerané údaje neustále v určitých časových intervaloch a identifikované parametre sa tak neustále spresňujú. Tieto metódy nazývame tiež rekurzívne, pretože pri nich používame rekurentné vzťahy. Priebežné metódy identifikácie systémov sú základom pre adaptívne riadenie.

2.4 Spracovanie prechodových charakteristík

Spracovanie prechodovej charakteristiky radíme medzi deterministické metódy. Jednu zo vstupných veličín meníme skokom, pričom všetky ostatné zachováваме konštantné. Dôležité je, aby systém bol v ustálenom stave pred vykonaním skokovej zmeny. Časový priebeh výstupnej veličiny je reálna prechodová charakteristika, ktorú je pre ďalšie spracovanie vhodné upraviť tak, aby mala svoj počiatok v nule. V ďalšom kroku sa prechodová charakteristika normalizuje vzhľadom k veľkosti skoku vstupnej veličiny tak, že ju podelíme hodnotou skokovej zmeny (Δu). Pretože skúmaný systém nemusí byť lineárny je potrebné vykonať niekoľko skokových zmien vstupnej veličiny rozličnej veľkosti aj znamienka. Výslednú prechodovú charakteristiku vypočítame pomocou vyhodnocovacieho vzorca, ktorý je určený z podmienky minima kvadratických chýb v tvare

$$\hat{y}_i = \frac{\sum_{k=1}^N \Delta u_k y_{ik}}{\sum_{k=1}^N (\Delta u_k)^2} \quad (2.1)$$

kde i - je i-ty bod prechodovej charakteristiky,

k - k-te meranie, $k=1, \dots, N$,

Δu_k - skoková zmena vstupu pri k-tom meraní,

y_{ik} - hodnota výstupu pri k-tom meraní v i-tom intervale

$\hat{y}_i$ - výsledná hodnota prechodovej charakteristiky v čase i .

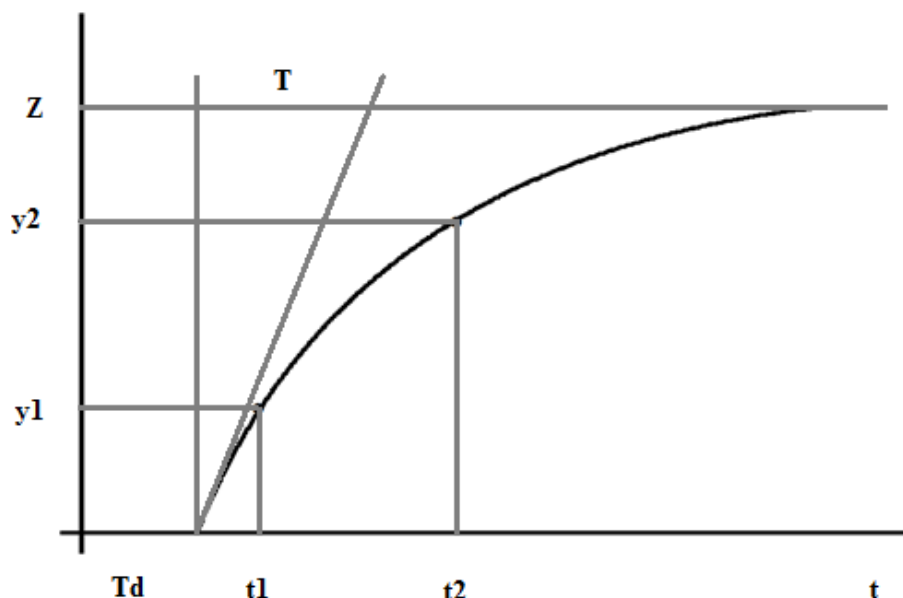
2.5 Systém 1.rádu

Nahraďme teraz model systému prenosom prvého rádu

$$G(s) = \frac{Z}{Ts + 1} e^{-T_d s} \quad (2.2)$$

kde Z je zosilnenie, T je časová konštanta a T_d dopravné oneskorenie systému, ktoré potrebujeme určiť. Spätnou Laplaceovou transformáciou tohto prenosu dokážeme získať prechodovú funkciu, ktorá je daná vzťahom

$$y(t) = \begin{cases} 0 & t < T_d \\ Z \left(1 - e^{-\frac{t-T_d}{T}} \right) & t \geq T_d \end{cases} \quad (2.3)$$



Obr. 2.1: Prechodová charakteristika systému prvého rádu [2]

Uvažujme normalizovanú prechodovú charakteristiku. Ak na vstupe uvažujeme jednotkovú skokovú zmenu, zosilnenie systému je dané ako hodnota prechodovej charakteristiky v nekonečne $Z = y(\infty)$ (viď. Obr.2.1). Vezmime teraz do úvahy, že poznáme dvojicu bodov (t_1, y_1) a (t_2, y_2) na prechodovej funkcii. Na základe rovnice 2.3 môžeme povedať

$$y_1 = Z \left(1 - e^{-\frac{t_1-T_d}{T}} \right) \quad (2.4)$$

$$y_2 = Z \left(1 - e^{-\frac{t_2-T_d}{T}} \right) \quad (2.5)$$

Po zlogaritmovaní a úprave týchto rovníc dostávame vzťahy pre výpočet časovej konštanty, ako aj dopravného oneskorenia.

$$T = \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{Z - y_1}{Z - y_2}} \quad (2.6)$$

$$T_d = \frac{t_2 x - t_1}{x - 1}, \quad x = \frac{\ln \frac{Z - y_1}{Z}}{\ln \frac{Z - y_2}{Z}} \quad (2.7)$$

3 Návrh PID regulátorov [2]

Pod pojmom regulátor rozumieme aktívny člen regulačného obvodu, ktorého úlohou je generovať akčnú veličinu spracovaním nameranej odchýlky.

V súčasnosti je v priemysle najpoužívanejším typom regulátora proporcionálno-integračno-derivačný regulátor, skrátene PID regulátor. Predpokladá sa, že až 90% regulátorov v súčasnom priemysle tvorí práve PID regulátor. Jeho výhody sú v jeho jednoduchosti, robustnosti, ako aj v rôznych možnostiach jeho prevedenia (od rôznych analógových prevedení až po, v súčasnosti najrozšírenejšie, digitálne prevedenie).

3.1 Typy regulátorov [3]

Ako to už z názvu samotného PID regulátora vyplýva, jeho činnosť vzniká spojením troch zložiek: proporcionálnej, integračnej a derivačnej zložky. Navrhnutý regulátor však nemusí vždy bezpodmienečne obsahovať všetky tri spomínané zložky, ale môže v sebe zahrňovať operáciu iba jedného prípadne dvoch regulačných prvkov. V ďalšom delení si popíšeme jednotlivé zložky PID regulátora.

3.1.1 Proporcionálny regulátor

Najjednoduchší spätnoväzbový regulátor je opísaný vzťahom

$$u(t) = \begin{cases} u_{\max} & \text{ak } e(t) > 0 \\ u_{\min} & \text{ak } e(t) < 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

a nazývame ho dvojpohový regulátor. Jeho výhodou je jeho jednoduchosť a realizovateľnosť, ale jeho nevýhodou je, že aj minimálna zmena regulačnej odchýlky, spôsobí maximálnu zmenu riadiacej veličiny.

Vhodnou úpravou takéhoto regulátora je zavedenie pásma proporcionality riadenia pre malé regulačné odchýlky, čo v jednoduchosti znamená- ak je malá regulačná odchýlka, je malý aj akčný zásah. Myšlienku proporcionality môžeme matematicky vyjadriť v tvare

$$u(t) = Z_R e(t) \quad (3.2)$$

Takto opísaný regulátor nazývame proporcionálny (P) regulátor a Z_R zosilnenie regulátora. Keďže akčná veličina sa môže pohybovať iba v rozmedzí hodnôt $u_{\min}$ a $u_{\max}$, tak aj P regulátor môže proporcionálne pracovať len v určitom rozsahu vstupných hodnôt. Proporcionalita regulátora tak môže byť vyjadrená jeho zosilnením Z_R , alebo tzv. pásmom proporcionality P_p tj. pásmo kde je regulátor lineárny. Vzťah medzi zosilnením Z_R a pásmom proporcionality P_p vyjadruje nasledujúca rovnica.

$$u_{\max} - u_{\min} = Z_R P_p \quad (3.3)$$

Ak je regulačná odchýlka príliš veľká P regulátor sa správa ako dvojpohový.

Proporcionálny regulátor môže vystupovať aj ako samostatný regulátor, jeho nedostatkom však je, že nedokáže úplne odstrániť trvalú regulačnú odchýlku.

3.1.2 Integračný regulátor

Aby sme vyriešili problém trvalej regulačnej odchýlky, ktorú P regulátor nedokáže odstrániť, zavádzame tzv. integrátor. Ten pracuje ako pamäťový člen a aj pri nulovom vstupnom signále, dokáže generovať nenulový výstup, takže akčný zásah sa bude meniť pokiaľ nebude trvalá regulačná odchýlka nulová. Zavedenie integrátora môžeme tak matematicky zapísať vzťahom

$$u(t) = \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt \quad (3.4)$$

kde T_I je tzv. integračná konštanta a určuje rýchlosť zmeny akčného zásahu v prípade jednotkovej regulačnej odchýlky. Čím menšia bude integračná konštanta, tým väčšie zmeny v riadení budú generované.

3.1.3 Derivačný regulátor

Derivačný regulátor (D), ktorý môžeme matematicky opísať rovnicou

$$u(t) = T_D \frac{de(t)}{dt} \quad (3.5)$$

zlepšuje stabilitu uzavretého regulačného obvodu, zavádzame ho však z dôvodu, že účinok P

a I zložky na riadený proces nie je okamžitý. Úlohou derivačnej konštanty T_D , ktorú derivačný regulátor obsahuje je totiž predpovedať vývoj regulačnej odchýlky.

Ideálny derivačný regulátor je citlivý na prítomnosť šumu v riadenej veličine, pretože derivácia nepresného signálu môže viesť k veľkým zmenám amplitúdy riadenia. Taktiež platí, že ideálny D regulátor je fyzikálne nerealizovateľný z dôvodu, že čitateľ prenosu obsahuje polynóm vyššieho stupňa ako menovateľ. Z tohto dôvodu zavádzame tzv. filtrovaný D regulátor, ktorého prenos má tvar

$$G_R(s) = \frac{T_D s}{1 + \frac{T_D}{N} s} \quad (3.6)$$

čo je v skutočnosti D regulátor zapojený sériovo so systémom prvého rádu s malou časovou konštantou T_D/N , kde N je väčšinou v intervale hodnôt 5 až 20.

3.2 Štruktúra PID regulátora

PID regulátor obsahuje proporcionálnu, integračnú a derivačnú zložku. Štruktúry jednotlivých regulátorov môžu byť rôzne a závisia napr. od spôsobu implementácie. Najčastejšie však používame nasledovné štruktúry ideálneho PID regulátora:

- bez interakcie

$$G_R(s) = Z_R \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (3.7)$$

- s interakciou (sériová)

$$G_R(s) = Z_R \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right) (1 + T_D s) \quad (3.8)$$

- paralelná

$$G_R(s) = Z_R + \frac{1}{T_I s} + T_D s \quad (3.9)$$

3.3 Zásady pri výbere regulátora

Často je ten najlepší regulátor, práve ten najjednoduchší – dvojpolohový. Ak nám vyhovuje takýto regulátor na riadenie nášho systému, z hľadiska ceny a spoľahlivosti je to najlepší

výber. Ak potrebujeme uradiť zložitejší systém a kmitanie výstupu okolo žiadanej hodnoty je neprípustné, vtedy si vyberáme zložitejšie regulátory.

P regulátor – jednoduchý regulátor, ktorý používame ak si môžeme dovoliť zanechať v ustálenom stave trvalú regulačnú odchýlku alebo ak riadený systém obsahuje integrátor.

PI regulátor – použijeme, ak je P regulátor nevyhovujúci a chceme sa zbaviť trvalej regulačnej odchýlky aj za cenu väčšieho prekmitu a menej tlmených kmitov.

PD regulátor – rovnako ako P regulátor aj PD zanecháva trvalú regulačnú odchýlku, keďže neobsahuje integračnú zložku, ale vďaka derivačnej zložke nevykazuje veľký prekmit a rýchlo sa ustáli. Používame ho najmä pre procesy s veľkými časovými konštantami.

PID regulátor – robustný regulátor, vhodný takmer vo všetkých ostatných prípadoch. Jeho nevýhodou citlivosť na šum merania.

Vo všeobecnosti možno povedať veľmi zjednodušene, že P zložka zvyšuje rýchlosť regulácie, ale znižuje stabilitu obvodu. Presne naopak je to s I zložkou, a D zložka zvyšuje ako rýchlosť regulácie tak aj stabilitu obvodu.

3.4 Metódy návrhu regulátorov

Na nastavovanie parametrov regulátorov používame mnoho metód, ktoré môžeme rozdeliť do dvoch skupín.

3.4.1 Analytické metódy [4]

Analytické metódy pracujú s prenosovou funkciou riadeného procesu, predpokladá sa pri nich teda, že daný prenos poznáme. Medzi najznámejšie metódy nastavenia parametrov regulátora patria Naslinova metóda a Metóda umiestnenia pólov, ktoré pri návrhu parametrov regulátora využívajú charakteristickú rovnicu uzavretého regulačného obvodu.

Metóda umiestnenia pólov

Pri návrhu a výpočte parametrov regulátora pomocou metódy umiestnenia pólov využívame koeficienty charakteristickej rovnice uzavretého regulačného obvodu

$$1 + G_S(s)G_R(s) = 0 \quad (3.10)$$

pričom predpokladáme prenosovú funkciu systému v tvare

$$G_S(s) = \frac{b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0} \quad (3.11)$$

kde platí, že $m \leq n$ a prenosovú funkciu PID regulátora v tvare

$$G_R(s) = \frac{Z_R s + \frac{Z_R}{T_I} + Z_R T_D s^2}{s} \quad (3.12)$$

Na výpočet parametrov regulátora sa používa upravená charakteristická rovnica

$$s^n + c_{n-1} s^{n-1} + \dots + c_1 s + c_0 = 0 \quad (3.13)$$

a taktiež referenčná charakteristická rovnica uzavretého regulačného obvodu v tvare

$$s^n + h_{n-1} s^{n-1} + \dots + h_1 s + h_0 = 0 \quad (3.14)$$

Koeficienty referenčnej charakteristickej rovnice vypočítame, priamo zo zvolených pólov ω_0 a koeficientu relatívneho tlmenia ξ , ktoré volíme podľa požiadavky na kvalitu riadenia. Nevýhodou tejto metódy je, že pri nej neberieme do úvahy čitateľa prenosu uzavretého regulačného obvodu, kde nuly ktoré obsahuje môžu zhoršiť výslednú kvalitu regulácie.

Ak položíme rovnice (3.13) a (3.14) do rovnosti dostaneme rovnicu v tvare

$$s^n + c_{n-1} s^{n-1} + \dots + c_1 s + c_0 = s^n + h_{n-1} s^{n-1} + \dots + h_1 s + h_0 = 0 \quad (3.15)$$

z ktorej pri porovnaní jednotlivých koeficientov pri rovnakých mocninách získame sústavu rovníc o rovnakom počte neznámych, ako aj o počte parametrov regulátora. Pre systém 1.rádu môžeme teda navrhnúť P a PI regulátor, pre systém 2.rádu PID a PD regulátor.

Metóda požadovaného modelu

Metóda požadovaného modelu je analyticko-experimentálna metóda, ktorá umožňuje návrh PI regulátora (predpokladá sa proces identifikovaný ako systém 1.rádu s dopravným oneskorením) a PID regulátora (predpokladá sa proces identifikovaný ako systém 2.rádu s dopravným oneskorením).

Pri návrhu regulátora pomocou tejto metódy si môžeme zvoliť maximálne preregulovanie v rozmedzí hodnôt od 0% po 50%, pre ktoré si potom pomocou tabuľky 3.1 zistíme odpovedajúci koeficient β . Parametre regulátora následne vypočítame pomocou tabuľky 3.2, kde nám vystupuje zosilnenie Z , časová konštanta T , dopravné oneskorenie D a koeficient maximálneho tlmenia ξ .

Tabuľka 3.1 Závislosť koeficienta β od maximálneho preregulovania σ

σ [%]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
β	2,718	1,944	1,720	1,561	1,437	1,337	1,248	1,172	1,104	1,045	0,992

Tabuľka 3.2 Výpočet parametrov regulátora metódou požadovaného modelu

Regulátor	Z_R	T_I	T_D	Regulovaný proces
PI	$\frac{T}{ZD\beta}$	T	-	aperiodický n=1
PID	$\frac{T_I}{ZD\beta}$	$2T$	$\frac{T}{2}$	aperiodický n=2
	$\frac{T_I}{ZD\beta}$	$2T\xi$	$\frac{T}{2\xi}$	Tlmene kmitavý

Metóda založená na bezpečnosti v zosilnení a vo fáze

Pri použití tejto metódy si volíme dva parametre, bezpečnosť v zosilnení G_M a bezpečnosť vo fáze P_M otvoreného regulačného obvodu $G_S(s)G_R(s)$. Bezpečnosť v zosilnení G_M sa udáva v decibeloch, pričom odporúčaná počiatočná hodnota je 4dB. Bezpečnosť vo fáze P_M sa zadáva v stupňoch, ktoré pri výpočte parametrov regulátora prepočítavame na radiány. Odporúčaná počiatočná hodnota pre bezpečnosť vo fáze P_M je 60 stupňov. So zvyšujúcou sa hodnotou týchto parametrov, dostávame robustnejší regulátor, ale kvalita regulácie je nižšia.

Parametre regulátora vypočítame pomocou tabuľky (3.3) avšak najskôr si potrebujeme vypočítať hodnotu pomocného parametra ω_p .

$$\omega_p = \frac{G_M P_M + \frac{\pi}{2} G_M (G_M + 1)}{(G_M^2 - 1)D} \quad (3.16)$$

Tabuľka 3.3 Návrh parametrov regulátora metódou založenou na bezpečnosti v zosilnení a vo fáze

Regulátor	Z_R	T_I	T_D	Poznámka
PI	$\frac{\omega_p T}{G_M Z}$	$\frac{1}{2\omega_p - \frac{4\omega_p^2 D}{\pi} + \frac{1}{T}}$	-	n=1 D>0
PID	$\frac{\omega_p T}{G_M Z}$	$\frac{1}{2\omega_p - \frac{4\omega_p^2 D}{\pi} + \frac{1}{T}}$	T resp.: T'	n=2 D>0

Z parametrov regulátora možno vypočítať hodnoty bezpečnosti v zosilnení G_M a bezpečnosti vo fáze P_M pomocou nasledujúcich vzťahov

$$G_M = \frac{T\pi}{4Z_R ZD} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4D}{\pi T_I} + \frac{4D}{\pi T}} \right) \quad (3.17)$$

$$P_M = \frac{\pi}{2} - \frac{Z_R ZD}{T} + \frac{\pi}{4ZZ_R} \left(1 - \frac{T}{T_I} \right) \quad (3.18)$$

3.4.2 Experimentálne metódy

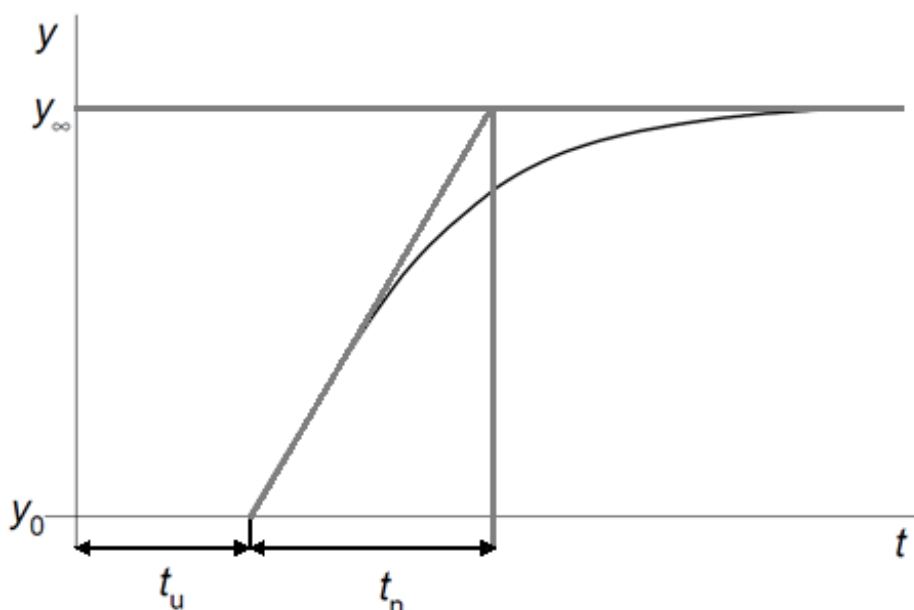
Experimentálne metódy pracujú s nameranými charakteristikami systému ako je prechodová charakteristika, kritické zosilnenie, atď. Medzi najznámejšie a najčastejšie používané metódy patria Ziegler-Nicholsova metóda (používané už viac ako 50 rokov), Strejcova metóda nastavovania regulátorov alebo v praxi tiež často používaná metóda pokus-omyl.

Ziegler-Nicholsova metóda [2]

Ziegler-Nicholsovou metódou sa určujú parametre pre PID regulátor v tvare

$$G_R(s) = Z_R \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (3.19)$$

Na určenie jednotlivých parametrov nám slúži zosilnenie Z , čas prietahu t_u a čas nábehu t_n , ktoré získame z nameranej prechodovej charakteristiky, vid'. (Obr.3.1).



Obr. 3.1: Prechodová charakteristika systému prvého rádu s dopravným oneskorením [3]

Vhodný typ regulátora navrhne pomocou tabuľky 3.4

Tabuľka 3.4 Návrh parametrov regulátora Ziegler-Nicholsovou metódou

Regulátor	Z_R	T_I	T_D
P	$\frac{1}{Z} \frac{t_n}{t_u}$		
PI	$\frac{0,9}{Z} \frac{t_n}{t_u}$	$3,33t_u$	
PID	$\frac{1,2}{Z} \frac{t_n}{t_u}$	$2t_u$	$0,5t_u$

Aström-Hägglundova metóda

Aström a Hägglund navrhli metódu, ktorá využíva tri špecifikácie procesu. Tretiu špecifikáciu tzv. maximum citlivostnej funkcie M_S si volíme z dvoch hodnôt 1,4 a 2,0. Čím väčšiu hodnotu M_S si zvolíme, tým rýchlejší regulátor dostaneme.

PID regulátor uvažujeme aj s váhovaním žiadanej hodnoty a môžeme ho matematicky vyjadriť v tvare

$$u(t) = Z_R \left(bw(t) - y(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(s) ds + T_D \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (3.20)$$

Pomocou identifikácie prechodovej charakteristiky získame hodnoty zosilnenia Z , časovej konštanty T a dopravného oneskorenia T_d , ktoré využijeme na výpočet tzv. normalizačných parametrov

$$a = Z \frac{T_d}{T} \quad (3.21)$$

$$\tau = \frac{T_d}{T_d + T} \quad (3.22)$$

Parametre regulátora sa udávajú tiež v normalizovanom bezrozmernom tvare: aZ_R , T_I / T_d (poprípade T_I / T) a T_D / T_d . Parametre boli získané empiricky a zistilo sa, že je vhodné koeficienty regulátora vyjadriť ako funkciu normalizovaného dopravného oneskorenia τ

$$f(\tau) = a_0 \exp(a_1 \tau + a_2 \tau^2) \quad (3.23)$$

Pre nastavenie parametrov regulátora pre stabilné procesy používame nasledujúce tabuľky. Parametre v nich sú dané ako funkcie τ v tvare (3.23)

Tabuľka 3.5 Výpočet parametrov PI regulátora pre stabilné procesy na základe prechodovej charakteristiky

	M_S = 1,4			M_S = 2		
	<i>a</i>₀	<i>a</i>₁	<i>a</i>₂	<i>a</i>₀	<i>a</i>₁	<i>a</i>₂
<i>aZ_R</i>	0,29	-2,7	3,7	0,78	-4,1	5,7
<i>T_I / T_d</i>	8,9	-6,6	3,0	8,9	-6,6	3,0
<i>T_I / T</i>	0,79	-1,4	2,4	0,79	-1,4	2,4
<i>b</i>	0,81	0,73	1,9	0,44	0,78	-0,45

Tabuľka 3.6 Výpočet parametrov PID regulátora pre stabilné procesy na základe prechodovej charakteristiky

	$M_S = 1,4$			$M_S = 2$		
	a_0	a_1	a_2	a_0	a_1	a_2
aZ_R	3,8	-8,4	7,3	8,4	-9,6	9,8
T_I / T_d	5,2	-2,5	-1,4	3,2	-1,5	-0,93
T_I / T	0,46	2,8	-2,1	0,28	3,8	-1,6
T_D / T_d	0,89	-0,37	-4,1	0,86	-1,9	-0,44
T_D / T	0,077	5,0	-4,8	0,076	3,4	-1,1
b	0,4	0,18	2,8	0,22	0,65	0,051

Chien, Hrones a Reswickova metóda [4]

Chien, Hrones a Reswick chceli použitím Ziegler-Nicholsovej metódy dosiahnuť lepšie tlmenie v regulačnom v obvode. Ako návrhové kritériá použili najrýchlejšiu odozvu bez preregulovania a najrýchlejšiu odozvu s 20%-ným preregulovaním. Výpočet parametrov regulátora získame zo vzťahov v tabuľke 3.7 a 3.8. Jednotlivé parametre rovnice, t.j. zosilnenie systému Z , čas prietahu t_u a čas nábehu t_n získame z nameranej prechodovej charakteristiky.

Tabuľka 3.7 Výpočet parametrov P, PI a PID regulátora pri riadení na žiadanú hodnotu

Regulátor	0% preregulovanie			20% preregulovanie		
	Z_R	T_I	T_D	Z_R	T_I	T_D
P	$0,3 \frac{t_n}{Zt_u}$	-	-	$0,7 \frac{t_n}{Zt_u}$	-	-
PI	$0,35 \frac{t_n}{Zt_u}$	$1,17t_n$	-	$0,6 \frac{t_n}{Zt_u}$	t_n	-
PID	$0,6 \frac{t_n}{Zt_u}$	t_n	$0,5t_u$	$0,95 \frac{t_n}{Zt_u}$	$1,36t_n$	$0,64t_u$

Tabuľka 3.8 Výpočet parametrov P, PI a PID regulátora pri odstránení vplyvu poruchy

Regulátor	0% preregulovanie			20% preregulovanie		
	Z_R	T_I	T_D	Z_R	T_I	T_D
P	$0,3 \frac{t_n}{Z t_u}$	-	-	$0,7 \frac{t_n}{Z t_u}$	-	-
PI	$0,6 \frac{t_n}{Z t_u}$	$0,8 t_u + 0,5 t_n$	-	$0,7 \frac{t_n}{Z t_u}$	$t_u + 0,3 t_n$	-
PID	$0,95 \frac{t_n}{Z t_u}$	$2,4 t_u$	$0,4 t_u$	$1,2 \frac{t_n}{Z t_u}$	$2 t_u$	$0,4 t_u$

Cohen-Coonova metóda

Na získanie parametrov PID regulátora sa využíva taktiež prechodová charakteristika systému a z nej hodnoty zosilnenia Z , času nábehu t_n a času priet'ahu t_u . Jednotlivé parametre regulátora potom vypočítame pomocou vzťahov v tabuľke 3.9

Tabuľka 3.9 Výpočet parametrov PID regulátora Cohen-Coonovou metódou

Regulátor	Z_R	T_I	T_D
P	$\frac{1}{Z} \frac{t_n}{t_u} \left(1 + \frac{1}{3} \frac{t_u}{t_n} \right)$	-	-
PI	$\frac{1}{Z} \frac{t_n}{t_u} \left(0,9 + \frac{1}{12} \frac{t_u}{t_n} \right)$	$t_u \left(\frac{30 + 3 \frac{t_u}{t_n}}{9 + 20 \frac{t_u}{t_n}} \right)$	-
PID	$\frac{1}{Z} \frac{t_n}{t_u} \left(\frac{4}{3} + \frac{1}{4} \frac{t_u}{t_n} \right)$	$t_u \left(\frac{32 + 6 \frac{t_u}{t_n}}{13 + 8 \frac{t_u}{t_n}} \right)$	$t_u \left(\frac{4}{11 + 2 \frac{t_u}{t_n}} \right)$
PD	$\frac{1}{Z} \frac{t_n}{t_u} \left(\frac{5}{4} + \frac{1}{6} \frac{t_u}{t_n} \right)$	-	$t_u \left(\frac{6 - 2 \frac{t_u}{t_n}}{22 + 3 \frac{t_u}{t_n}} \right)$

Haalmanova metóda

Haalmanova metóda určuje parametre regulátora pre regulovaný proces identifikovaný ako systém 1. rádu s dopravným oneskorením

$$G_s(s) = \frac{Z}{Ts + 1} e^{-Ds} \quad (3.24)$$

kde Z je zosilnenie, časová konštanta T nadobúda hodnotu času nábehu t_n a dopravné oneskorenie D je rovné času prietahu t_u . Parametre PI regulátora sa určujú pre prenos regulátora

$$G_R(s) = Z_R \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right) \quad (3.25)$$

a vypočítame ich pomocou vzťahov z tabuľky 3.10

Tabuľka 3.10 Výpočet parametrov PI regulátora Haalmanovou metódou

Regulátor	Z_R	T_I
PI	$\frac{2}{3} \frac{t_n}{Z t_u}$	t_n

Metóda polovičného útlmu

Jej cieľom je dosiahnuť tlmene kmitavý priebeh výstupnej veličiny, pričom platí, že každý nasledujúci kmit dosahuje 50% z hodnoty predošlého. Parametre regulátora sa určujú pre prenos regulátora určeného rovnicou (3.19) a vypočítame ich z tabuľky 3.11

Tabuľka 3.11 Výpočet parametrov PID regulátora metódou polovičného útlmu

Regulátor	Z_R	T_I	T_D
PI	$\frac{0,928}{Z} \left(\frac{t_u}{t_n} \right)^{-0,946}$	$0,928 t_n \left(\frac{t_u}{t_n} \right)^{0,583}$	-
PID	$\frac{1,37}{Z} \left(\frac{t_u}{t_n} \right)^{0,95}$	$0,74 t_n \left(\frac{t_u}{t_n} \right)^{0,738}$	$0,365 t_n \left(\frac{t_u}{t_n} \right)^{0,95}$

Smithova-Murrillova metóda

Smithova-Murrillová metóda alebo tiež známa aj ako minimum ITAE (integral time multiplied absolute value of error) metóda sa snaží minimalizovať integrálne kritérium kvality ITAE. Parametre regulátora sa určujú pre prenos v tvare (3.19) a môžeme ich určiť pre riadenie na žiadanú veličinu $w(t)$ (tabuľka 3.12), alebo pre odstránenie vplyvu poruchy $r(t)$ (tabuľka 3.13).

Tabuľka 3.12 Výpočet parametrov PID regulátora Smith-Murrillovou metódou pre riadenie na žiadanú hodnotu

Regulátor	Z_R	T_I	T_D
PI	$\frac{0,586}{Z} \left(\frac{t_n}{t_u} \right)^{0,916}$	$\frac{t_n}{\left(1,03 - 0,165 \frac{t_u}{t_n} \right)}$	-
PID	$\frac{0,965}{Z} \left(\frac{t_n}{t_u} \right)^{0,855}$	$\frac{t_n}{\left(0,796 - 0,147 \frac{t_u}{t_n} \right)}$	$0,308 t_n \left(\frac{t_u}{t_n} \right)^{0,929}$

Tabuľka 3.13 Výpočet parametrov PID regulátora Smith-Murrillovou metódou pre odstránenie vplyvu poruchy

Regulátor	Z_R	T_I	T_D
P	$\frac{0,49}{Z} \left(\frac{t_n}{t_u} \right)^{1,084}$	-	-
PI	$\frac{0,859}{Z} \left(\frac{t_n}{t_u} \right)^{0,977}$	$\frac{t_n}{0,674} \left(\frac{t_u}{t_n} \right)^{0,68}$	-
PID	$\frac{1,357}{Z} \left(\frac{t_n}{t_u} \right)^{0,947}$	$\frac{t_n}{0,842} \left(\frac{t_u}{t_n} \right)^{0,738}$	$0,381 t_n \left(\frac{t_u}{t_n} \right)^{0,995}$

Minimum IAE metóda

Ako z názvu tejto metódy vyplýva, jej cieľom je minimalizovať integrálne kritérium kvality IAE. Parametre regulátora sa určujú pre prenos v tvare (3.19) a vypočítame ich pomocou tabuľky 3.14

Tabuľka 3.14 Nastavenie parametrov PID regulátora metódou minimalizácie IAE

Regulátor	Z_R	T_I	T_D
PI	$\frac{0,785}{Z} \left(\frac{t_u}{t_n} \right)^{-0,861}$	$\frac{t_n^2}{(1,02t_n - 0,323t_u)}$	-
PID	$\frac{1,086}{Z} \left(\frac{t_u}{t_n} \right)^{0,914}$	$\frac{t_n^2}{(0,74t_n - 1,13t_u)}$	$0,348t_n \left(\frac{t_u}{t_n} \right)^{0,914}$

Lopezova IAE-ISE metóda

Snahou tejto metódy je minimalizovať integrálne kritéria kvality IAE a ISE. Parametre regulátora, ktorého prenos je vyjadrený rovnicou (3.19) môžeme vypočítať pomocou tabuľky 3.15

Tabuľka 3.15 Návrh parametrov PID regulátora Lopezovou IAE-ISE metódou

Regulátor	Z_R	T_I	T_D
P	$1,411 \frac{t_u}{Z t_n^{-0,917}}$	-	-
PI	$1,305 \frac{t_u}{Z t_n^{-0,959}}$	$\frac{t_n}{0,492} \left(\frac{t_u}{t_n} \right)^{0,739}$	-
PID	$1,495 \frac{t_u}{Z t_n^{-0,949}}$	$\frac{t_n}{1,101} \left(\frac{t_u}{t_n} \right)^{0,771}$	$0,56t_u \left(\frac{t_n}{t_u} \right)^{1,006}$

3.5 Kvalita riadenia [2]

Jednou zo základných úloh pri regulácii je dosiahnuť, aby riadená veličina čo najpresnejšie opisovala žadanú veličinu. Na to, aby sme vedeli vyjadriť nakoľko je táto požiadavka splnená, zavádzame rôzne kritéria resp. ukazovatele kvality.

3.5.1 Základne ukazovatele v časovej oblasti

Medzi základné ukazovatele v časovej oblasti patria:

- Maximálne preregulovanie $\sigma_{\max}$ – udáva sa v percentách a matematicky ho môžeme zapísať:

$$\sigma_{\max} = \frac{y_{\max} - y_{\infty}}{y_{\infty} - y_0} 100\% \quad (3.26)$$

- Čas regulácie T_{ε} - čas v ktorom sa riadená veličina natrvalo dostane do oblasti maximálnej povolenej regulačnej odchýlky ε
- Čas maximálneho preregulovania T_{σ} - čas v ktorom riadená veličina dosiahne hodnotu

$$y_{\max}$$

- Koeficient tlmenia ξ - udáva pomer hodnôt prvého a druhého maxima
- Trvalá regulačná odchýlka $e(\infty)$ - definovaná ako rozdiel medzi žiadanou veličinou a riadenou veličinou v novom ustálenom stave:

$$e(\infty) = w(\infty) - y(\infty) \quad (3.27)$$

3.5.2 Základné integrálne kritéria

Najčastejšie používané kritéria sú:

- Integrál absolútnej regulačnej odchýlky IAE (integral absolute value of error)

$$IAE = \int_0^t |e(t)| dt \quad (3.28)$$

- Integrál kvadratickej regulačnej plochy ISE (integral squared value of error)

$$ISE = \int_0^t e^2(t) dt \quad (3.29)$$

4 Riadiaci systém SIMATIC S7-200 [5]

SIMATIC S7-200 je rad malých, programovateľných logických automatov (PLC-Programmable Logic Controllers), určených na implementáciu najrôznejších riadiacich systémov v priemysle. Priemyselný riadiaci systém SIMATIC S7-200 dokáže vykonávať rôzne matematické operácie, časovať, komunikovať a hlavne riadiť rôzne iné zariadenia a systémy. Vo všeobecnosti, PLC automaty predstavujú v súčasnosti najpoužívanejšiu platformu na zavádzanie riadiacich systémov v priemysle. Ich cenová dostupnosť, flexibilita, spoľahlivosť a mechanická odolnosť ich predurčuje k dominantnému postaveniu na trhu s riadiacimi systémami.

Pracovná stanica SIMATIC S7-200 sa skladá z 3 hlavných častí, ktorými sú:

- zdroj napätia (priamo napojiteľný na zdroj elektrického prúdu, obsahuje záložnú batériu)
- procesor s pamäťou (samostatná výkonná jednotka, do ktorej sa pomocou externého PC nahrá program)
- vstupno-výstupné porty (priame pripojenie káblov z/do senzorov a akčných členov)

4.1 Tvorba riadiaceho projektu

Pri programovaní celého systému SIMATIC S7-200 je potrebný hardware v podobe PC alebo programovacieho zariadenia, software STEP7-Micro/Win32 a kábel ktorý zabezpečuje komunikáciu medzi CPU a PC. Pri riadení systému prostredníctvom PLC je potrebné prejsť nasledujúcimi krokmi

- Vytvorenie nového projektu v prostredí STEP 7
- Ak chceme používať pri adresovaní symbolické premenné, zadefinujeme si ich do symbolickej tabuľky a priradíme im skutočné adresy a premenné (napr. BOOL, BYTE, WORD, DWORD, INT, DINT, REAL atď.)
- Napísanie riadiaceho programu v jazyku STEP 7, ktorý bude optimálne riadiť náš proces. Môžeme si vybrať či budeme programovať pomocou príkazov, schematického zapojenia, alebo blokovej schémy, prípadne ich kombináciou. Náš systém budeme riadiť použitím schematického zapojenia tzv. rebríkovej logiky (LAD-Ladder Logic).

Rebríkové programy simulujú v CPU tok elektrického prúdu zo zdroja, cez rôzne vstupné logické podmienky, ktoré vyhodnocujú a aktivizujú výstupy. Logika je zvyčajne rozdelená do malých zrozumiteľných blokov, ktorým sa vraví siete (network). Program vykonáva jednu sieť naraz, zľava doprava a potom zhora nadol. Keď CPU dosiahne koniec programu, začne opäť vykonávať inštrukcie od začiatku.

5 Identifikácia zariadenia

Na návrh regulátorov potrebujem najskôr dostatočne preskúmať reálne zariadenie, aby som zistil ako sa správa a mohol ho opísať matematickým modelom, prípadne určiť jeho prenos.

5.1 Opis zariadenia

Identifikované zariadenie je tepelno-optická sústava uDAQ28/LT (Obr.5.1). Systém disponuje tromi vstupnými veličinami – napätím žiarovky, ktorá reprezentuje vyhrievacie a svetelné teleso zároveň, napätím ventilátora (slúži na ochladzovanie teploty v systéme) a napätím svetelnej diódy, ktorá je druhým možným zdrojom svetla optického kanálu. Tiež je možné nastavovať periódu vzorkovania a časové konštanty vstavaných derivačných filtrov. Na výstupe je možné merať 7 veličín: teplotu vo vyhrievanom priestore (priamo alebo po predbežnej filtrácii), referenčnú teplotu okolia, intenzitu osvetlenia (priamo alebo po predbežnej filtrácii), rýchlosť otáčok a prúd motorčeka ventilátora.[6]



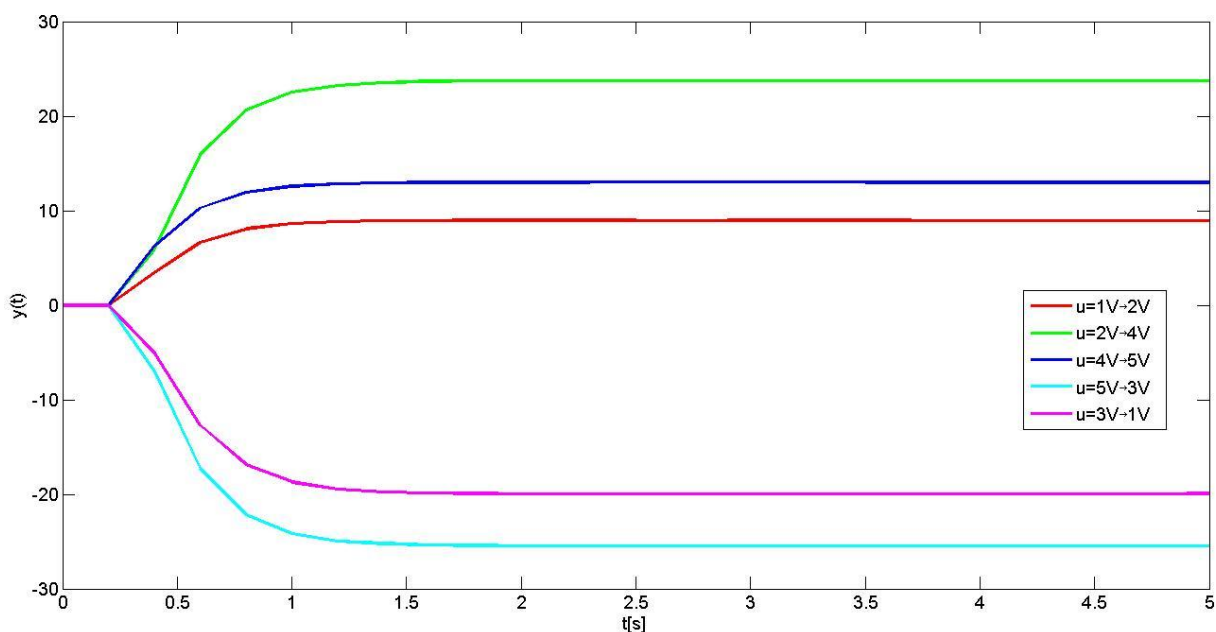
Obr. 5.1: tepelno-optická sústava uDAQ28/LT [6]

5.2 Identifikácia systému ako systému 1.rádu

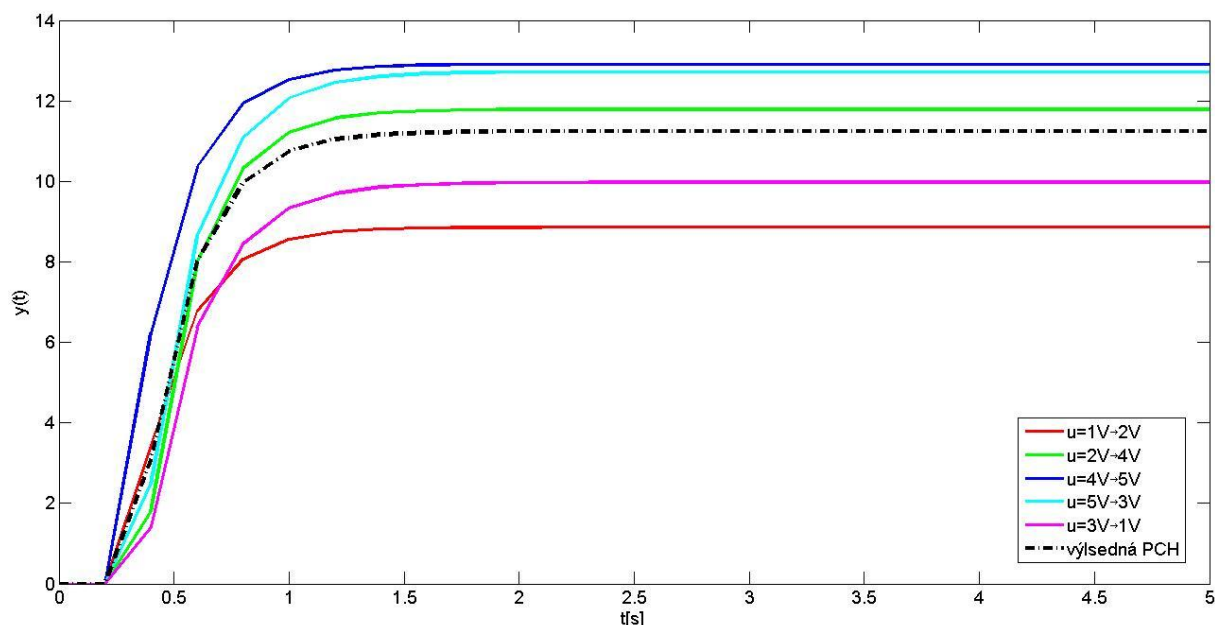
Matematický model prípadne prenosovú funkciu, získam na základe vstupno-výstupných informácií z procesu. Docielil som to skokovou zmenou vstupnej veličiny, čo v našom prípade predstavuje napätie vstupujúce do žiarovky. Týmto postupom som dostal prechodovú charakteristiku, čo je v skutočnosti grafické znázornenie reakcie systému, na skokovú zmenu vstupnej veličiny pri nulových začiatkových podmienkach. V praxi sa však nemožno vždy uvažovať nulové začiatkové podmienky, preto si najskôr musím určiť hodnoty pre môj

ustálený stav. Na vstupe som teda, skokom zmenil napätie z 0V na 1V a výstupná veličina sa ustálila na hodnote približne 4 kandely môžem teda povedať, že moje $u_s=1V$ a jemu odpovedajúce $y_s=4,05Cd$.

Na získanie prechodových charakteristík som každých 50s skokom menil vstupnú veličinu, najskôr z 1V na 2V, z 2V na 4V, zo 4V na 5V, z 5V na 3V a napokon z 3V na 1V. Namerané prechodové charakteristiky sú vykreslené na obrázku 5.2. Takto získané prechodové charakteristiky musím ďalej spracovať tak, že ich posuniem do počiatku súradnicového systému a normalizujem vzhľadom k veľkosti skoku vstupnej veličiny, čiže podelím hodnotou Δu , vid' obrázok 5.3. Ako je z grafu na obrázku 5.3 možné vidieť, jednotlivé prechodové charakteristiky sa neprekrývajú z čoho vyplýva, že daný systém je nelineárny a výslednú prechodovú charakteristiku preto vypočítam použitím vyhodnocovacieho vzorca (2.1). Výsledná prechodová charakteristika je tak isto vykreslená na obrázku 5.3, kde ju možno porovnať s normalizovanými prechodovými charakteristikami.



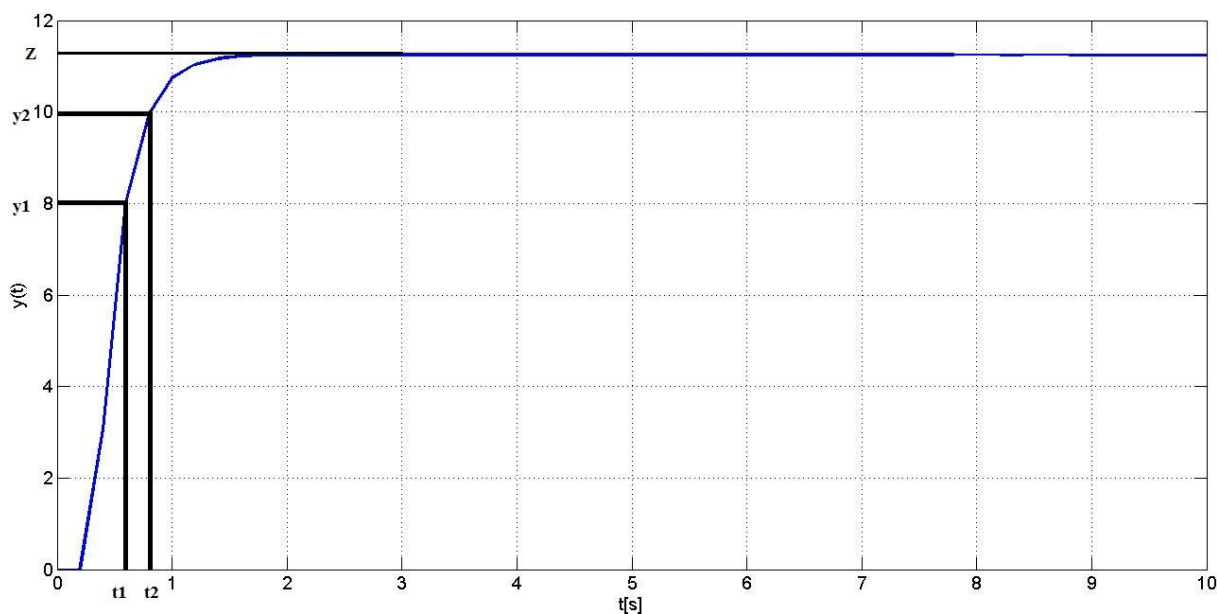
Obr. 5.2: Prechodové charakteristiky systému pri rôznych skokových zmenách vstupného prúdu umiestnené v počiatku súradnicovej sústavy



Obr. 5.3: Normované prechodové charakteristiky pri rôznych skokových zmenách vstupného prúdu a výsledná prechodová charakteristika daného systému

Podľa tvaru výslednej charakteristiky som sa rozhodol že budem systém identifikovať ako systém 1. rádu s dopravným oneskorením.

Na výslednej prechodovej charakteristike som si zvolil dve dvojice, kedy prechodová charakteristika nadobúda hodnoty určité percento z ustálenej hodnoty a k nim prináležiace časy. Ich presné hodnoty som vypočítal pomocou MATLAB-u a znázornil na grafe výslednej prechodovej charakteristiky, viď obrázok 5.4.



Obr. 5.4: Výsledná prechodová charakteristika systému 1. Rádu

Prvá dvojica bodov (t_1, y_1) predstavuje hodnotu v ktorej dosahuje daná prechodová charakteristika približne 70% maximálnej hodnoty

$$t_1 = 0,6 \quad y_1 = 8,0122$$

Ďalšiu dvojicu bodov (t_2, y_2) predstavujú hodnoty

$$t_2 = 0,8 \quad y_2 = 9,966$$

kde prechodová charakteristika nadobúda približne 80% maximálnej hodnoty.

Posledným údajom ktorý potrebujem určiť z výslednej prechodovej charakteristiky je hodnota zosilnenia Z . Výpočtom v MATLAB-e som určil jeho hodnotu na $Z=11,2478$.

Prostredníctvom týchto údajov, môžem použitím postupu opísaného v kapitole 2.5 vypočítať všetky parametre prenosu (2.2)

$$T = \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{Z - y_1}{Z - y_2}} = \frac{0,8 - 0,6}{\ln \frac{11,25 - 8,01}{11,25 - 9,97}} = 0,216 \quad (5.1)$$

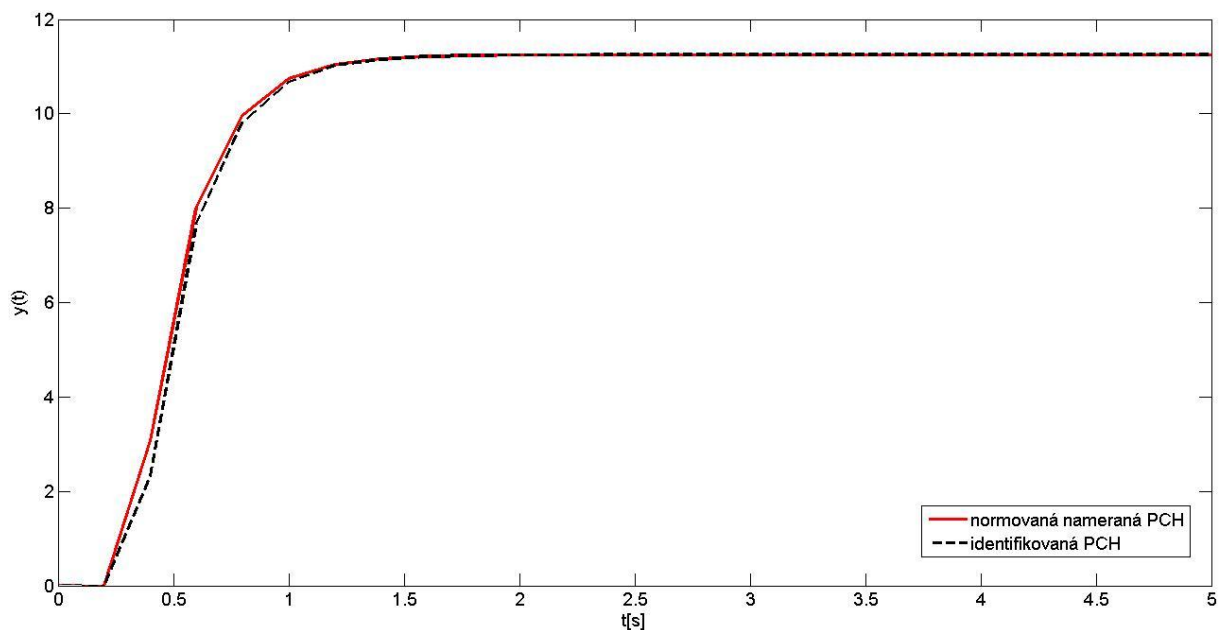
$$x = \frac{\ln \frac{Z - y_1}{Z}}{\ln \frac{Z - y_2}{Z}} = \frac{\ln \frac{11,25 - 8,01}{11,25}}{\ln \frac{11,25 - 9,966}{11,25}} = 0,57 \quad (5.2)$$

$$T_d = \frac{t_2 x - t_1}{x - 1} = \frac{0,8 \cdot 0,57 - 0,6}{0,57 - 1} = 0,33 \quad (5.3)$$

Dosadením týchto hodnôt do rovnice (2.2), dostávam prenos pre systém 1. rádu v tvare

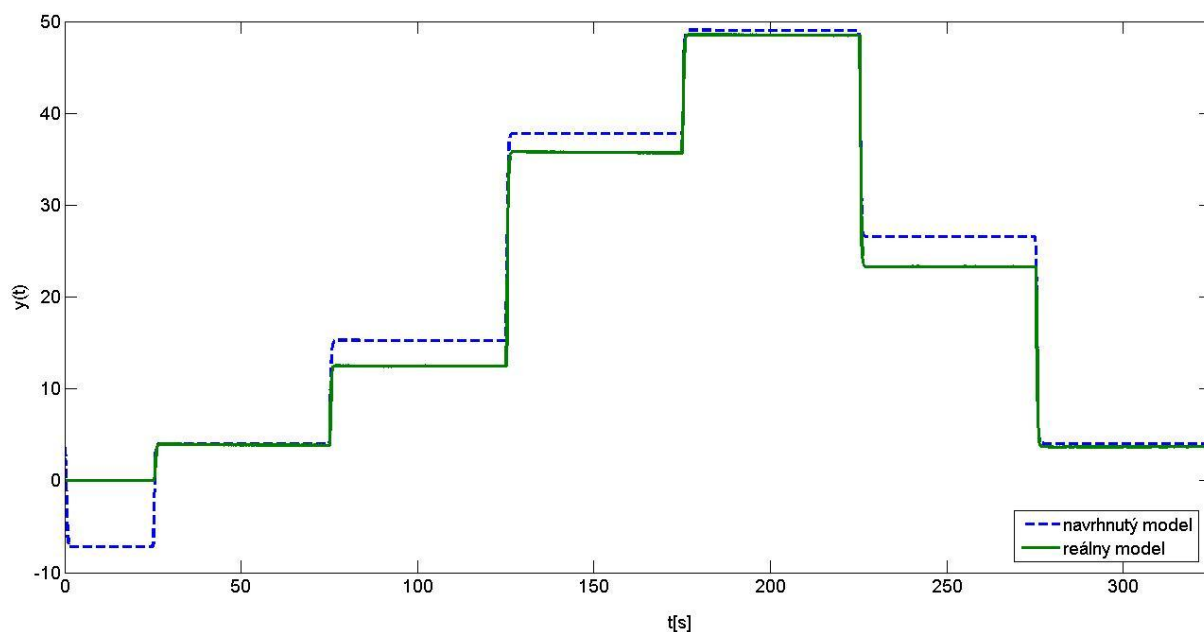
$$G(s) = \frac{Z}{Ts + 1} e^{-T_d s} = \frac{11,25}{0,216s + 1} e^{-0,33s} \quad (5.4)$$

Ak porovnáam výslednú nameranú prechodovú charakteristiku s tou ktorú som získal identifikáciou, vidím že sú takmer identické, čo svedčí o správnej identifikácii (Obr.5.5).



Obr. 5.5: Porovnanie výslednej nameranej prechodovej charakteristiky a prechodovej charakteristiky získanej pomocou identifikácie systému 1. Rádu

Testovanie vhodnosti modelu, nazývame verifikácia modelu a ide o proces kedy porovnávame správanie sa nami navrhnutého modelu so správaním sa reálneho systému. Výber správneho modelu je najdôležitejšou úlohou pre úspešné riešenie úlohy experimentálnou identifikáciou. Môj navrhnutý model pre niektoré skokové zmeny opisuje reálny model dostatočne presne, pre zvyšné sa však dosť odlišuje, vid' obrázok 5.6. Je to spôsobené tým, že opisujeme nelineárny systém, ktorý vieme presne riadiť len v okolí nášho linearizačného bodu.



Obr. 5.6: Porovnanie ako vypočítaný model opisuje reálny model

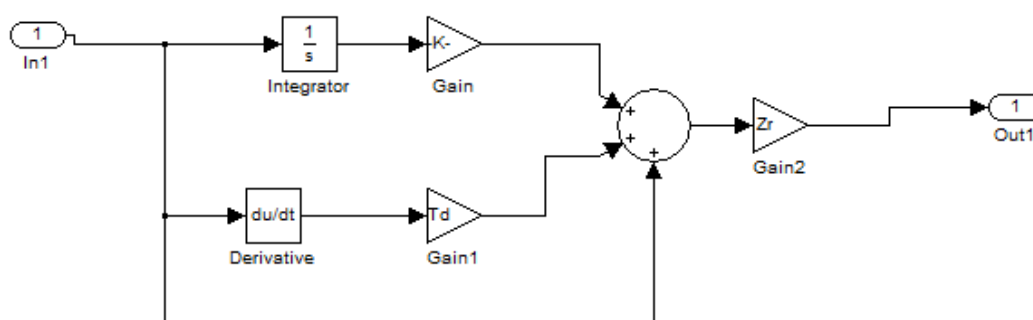
6 Riadenie pomocou jednoduchých regulátorov

Identifikáciou som sa pokúsil čo najlepšie odhadnúť správanie reálneho objektu, teraz sa pokúsim uradiť daný systém použitím v praxi najpoužívanějších PI a PID regulátorov.

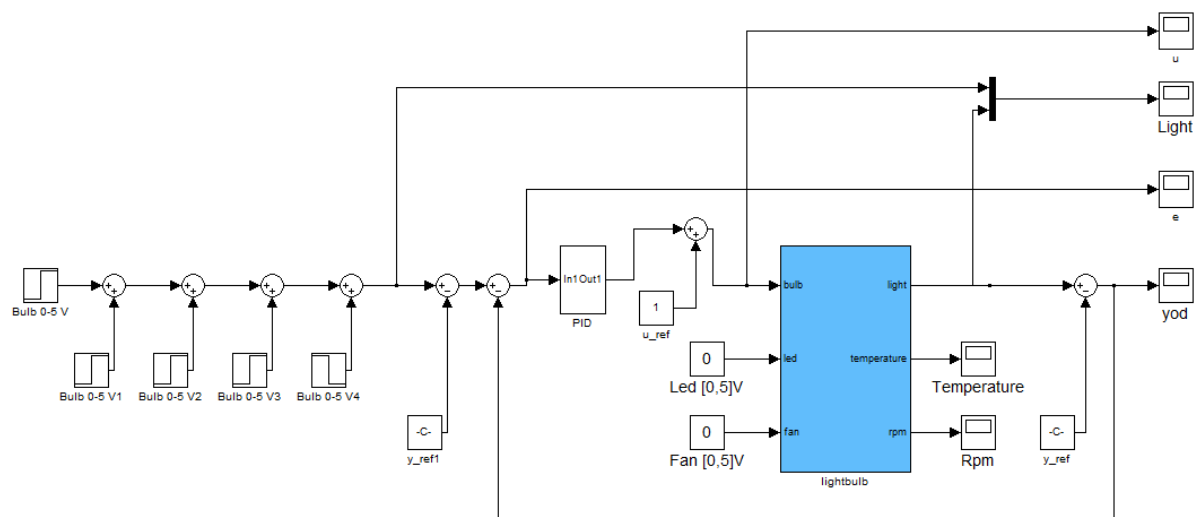
6.1 Návrhy a testovanie PI a PID regulátorov

K návrhu regulátorov som v kapitole 3.4 popísal niekoľko analytických aj experimentálnych metód návrhu regulátorov, teraz sa prostredníctvom nich pokúsim navrhnúť PI a PID regulátory a otestovať ich na reálnom zariadení. Návrh som uskutočnil pomocou programového systému pre syntézu regulátorov PIDTOOL [7], ktorý pomocou prenosu vypočítal parametre viacerých regulátorov.

Nie všetky regulátory však dokážu spoľahlivo riadiť skúmaný systém, niektoré ho nemusia uradiť vôbec, dokonca ho môžu aj destabilizovať. Aby som dokázal zistiť, ktoré z regulátorov sa hodia na riadenie môjho systému, vytvoril som v prostredí Simulink schému PID regulátora (Obr.6.1), ktorú som následne použil v blokovej schéme uzavretého regulačného obvodu (Obr.6.2). Pomocou tejto schémy som overoval ako navrhnutý regulátor dokázal riadiť systém a či výstupná veličina dostatočne rýchlo a presne dosahovala žiadanú veličinu. Žiadanú veličinu som menil skokom každých 50 sekúnd v rozmedzí od 5Cd po 17Cd. Parametre všetkých regulátorov, ktoré dokázali uradiť žiarovku som zapísal do tabuľky 6.1 (PI regulátory) a 6.2 (PID regulátory).



Obr. 6.1: Schéma PID regulátora, použitého pri riadení nášho systému



Obr. 6.1: Bloková schéma uzavretého regulačného obvodu použitá pri riadení.

Tabuľka 6.1 Parametre PI regulátora

Metóda návrhu regulátora	Z_R	T_I [s]
Metóda umiestnenia pólov	$1,3514 \cdot 10^{-6}$	$7,037 \cdot 10^{-5}$
Metóda založená na bezpečnosti v zosilnení a vo fáze ($G_M=4\text{db}$, $P_M=60^\circ$)	0,022284	0,20679
Metóda požadovaného modelu ($\sigma=5\%$)	0,029853	0,216
Ziegler-Nicholsova metóda	0,052231	1,1019
Cohen-Coonova metóda	0,05964	0,2888
Haalmanova metóda	0,03869	0,216
Chien, Hrones a Reswickova metóda (0% preregulovanie, riadenie na žiadanú veličinu)	0,020312	0,25272
Chien, Hrones a Reswickova metóda (0% preregulovanie, odstránenie vplyvu poruchy)	0,034821	0,37272
Chien, Hrones a Reswickova metóda (20% preregulovanie, riadenie na žiadanú veličinu)	0,034821	0,216
Chien, Hrones a Reswickova metóda (20% preregulovanie, odstránenie vplyvu poruchy)	0,040624	0,3957
Metóda polovičného útlmu	0,055111	0,25704
minimum IAE metóda	0,046677	0,41129
Smithova-Murrillova metóda (riadenie na žiadanú veličinu)	0,035249	0,27791
Smithova-Murrillova (odstránenie vplyvu poruchy)	0,050343	0,42831
Lopezova IAE-ISE metóda	0,0088304	0,59685

Aström-Hägglundová metóda $M_s=1,4$	0,012731	0,16285
Aström-Hägglundová metóda $M_s=2,0$	0,030525	0,16285

Tabuľka 6.2 Parametre PID regulátora

Metóda návrhu regulátora	Z_R	T_I [s]	T_D [s]
Ziegler-Nicholsova metóda	0,069642	0,6618	0,16545
Chien, Hrones a Reswickova metóda (0% preregulovanie, riadenie na žiadanú veličinu)	0,034821	0,216	0,16545
Chien, Hrones a Reswickova metóda (0% preregulovanie, odstránenie vplyvu poruchy)	0,055133	0,79416	0,13236
Chien, Hrones a Reswickova metóda (20% preregulovanie, riadenie na žiadanú veličinu)	0,055133	0,29376	0,21178
Chien, Hrones a Reswickova metóda (20% preregulovanie, odstránenie vplyvu poruchy)	0,069642	0,6618	0,13236
Lopezova IAE-ISE metóda	0,010272	0,27258	0,12065
Aström-Hägglundova metóda $M_s=1,4$	0,019807	0,22709	0,052483
Aström-Hägglundova metóda $M_s=2,0$	0,052901	0,30397	0,076733

6.2 Vyhodnotenie kvality riadenia

Všetky spomínané regulátory mi dokázali uradiť systém avšak niektoré boli rýchlejšie iné zasa presnejšie, alebo sa našli aj také, ktoré neboli ani rýchle ani presné. Preto mojou ďalšou úlohou je z tých dobrých vybrať tie najlepšie, resp. najkvalitnejšie. Kvalitu navrhnutých regulátorov som vyhodnotil pomocou ukazovateľov kvality riadenia, opísaných v kapitole 3.5, ktoré sú zhrnuté v tabuľkách 6.3 pre PI regulátor a 6.4 pre PID regulátor. Keďže aj PI aj PID regulátory obsahujú integračnú zložku, trvalá regulačná odchýlka je v oboch prípadoch nulová.

Tabuľka 6.3 Ukazovatele kvality riadenia pre navrhnuté PI regulátory

Navrhnutý PI regulátor	Periodicita	Maximálne preregulovanie $\sigma_{\max}$ [%]	Čas regulácie T_{ϵ} [s]	Čas max. preregulovania T_{δ} [s]	ISE
Metóda umiestnenia pólov	Aperiodický	-	12	-	1207,5

Metóda založená na bezpečnosti v zosilnení a vo fáze	Aperiodický	-	2	-	412,96
Metóda požadovaného modelu	Periodický	5,8	2,5	1,5	420,26
Ziegler-Nicholsova metóda	Aperiodický	-	6	-	456,87
Cohen-Coonova metóda	Periodický	17	8	1,3	581,7
Haalmanova metóda	Periodický	12	4,5	1,2	471,95
CHR metóda (0% preregulovanie, riadenie na žiadanú veličinu)	Aperiodický	-	3	-	439,83
CHR metóda (0% preregulovanie, odstránenie vplyvu poruchy)	Aperiodický	-	3	-	375,91
CHR metóda (20% preregulovanie, riadenie na žiadanú veličinu)	Periodický	10	3	1,4	446,09
CHR metóda (20% preregulovanie, odstránenie vplyvu poruchy)	Aperiodický	-	3	-	377,85
Metóda polovičného útlmu	Periodický	18	7	1,3	584,38
minimum IAE metóda	Aperiodický	-	2,5	-	368,08
Smithova-Murrillova metóda (riadenie na žiadanú veličinu)	Aperiodický	-	2	-	387,65
Smithova-Murrillova (odstránenie vplyvu poruchy)	Aperiodický	-	2,5	-	371,58
Lopezova IAE-ISE metóda	Aperiodický	-	16	-	1420,2
Aström-Hägglundova	Aperiodický	-	3	-	466,72

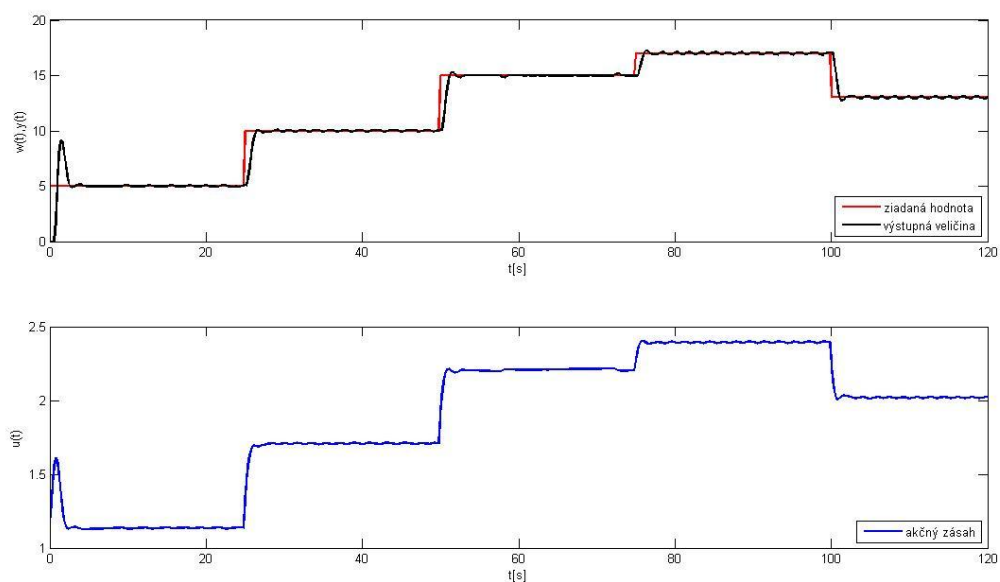
metóda $M_s=1,4$					
Aström-Hägglundova metóda $M_s=2,0$	Periodický	11	5	1,5	516,06

Tabuľka 6.4 Ukazovatele kvality riadenia pre navrhnuté PID regulátory

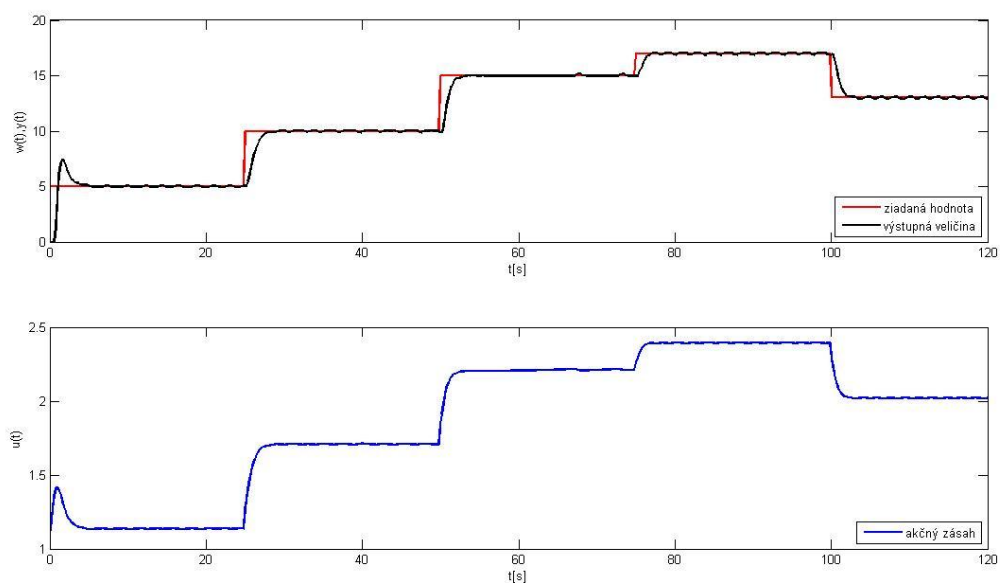
Navrhnutý PID regulátor	Periodicita	Maximálne preregulovanie $\sigma_{\max} [\%]$	Čas regulácie $T_{\epsilon} [s]$	Čas max. preregulovania $T_{\delta} [s]$	ISE
Ziegler-Nicholsova metóda	Periodický	11,8	4	1,7	349,03
CHR metóda (0% preregulovanie, riadenie na žiadanú veličinu)	Periodický	6,3	3,5	1,5	407,14
CHR metóda (0% preregulovanie, odstránenie vplyvu poruchy)	Aperiodický	-	6	-	375,33
CHR metóda (20% preregulovanie, riadenie na žiadanú veličinu)	Periodický	6,4	5	1,1	419,74
CHR metóda (20% preregulovanie, odstránenie vplyvu)	Periodický	11	5	1,7	347,54
Lopezova IAE-ISE metóda	Aperiodický	-	7	-	657,45
Aström-Hägglundova metóda $M_s=1,4$	Aperiodický	-	2,5	-	427,23
Aström-Hägglundova metóda $M_s=2,0$	Periodický	8,8	4,5	1,3	304,16

Počas simulácie som zistil, že PI regulátory boli vo všeobecnosti stabilnejšie, nebolo to však pravidlom. Pri niektorých metódach PI regulátor dokázal uradiť systém, zatiaľ čo PID nedokázal dosiahnuť žiadanú hodnotu, to je hlavný dôvod prečo je PID regulátorov navrhnutých menej ako PI. Z tabuľky 6.3 vyplýva, že najvhodnejšími PI regulátormi pre náš systém sú regulátory navrhnuté metódami minimalizácie IAE a ITAE kritérií (Obr.6.3), Chien, Hrones a Reswickovou metódou pri odstránení vplyvu poruchy, alebo metódou

založenou na bezpečnosti v zosilnení a vo fáze, prípadne metódou požadovaného modelu. Ako najlepšie PID regulátory sa javia regulátory navrhnuté Aström-Hägglundovou metódou (obr.6.4), Chien, Hrones a Reswickovou metódou (hlavne pri 0% preregulovaní a odstránení vplyvu poruchy) a Ziegler-Nicholsovou metódou.

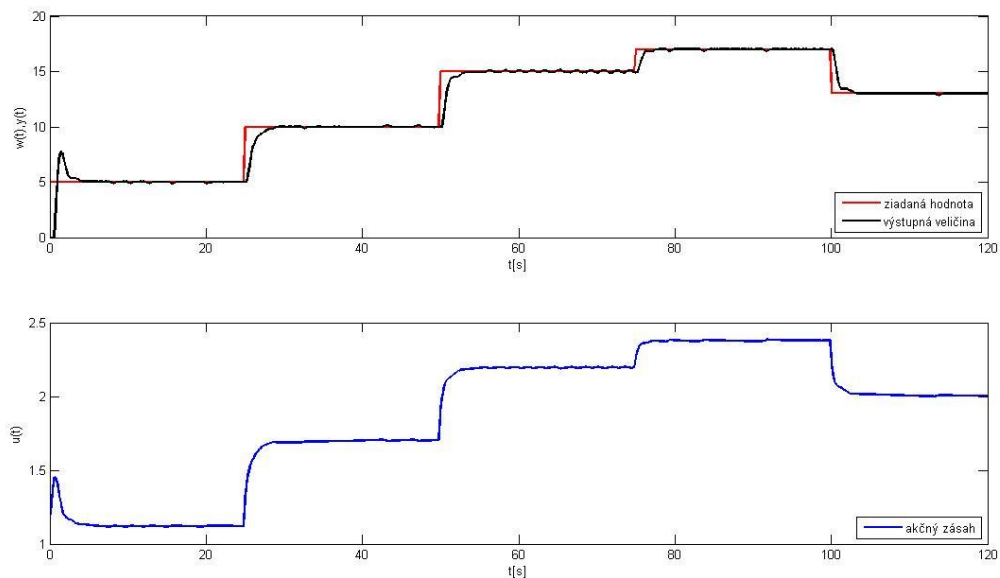


Obr. 6.3: Priebeh riadenia pomocou PI regulátora navrhnutého Smith-Murrillovou metódou pri riadení na žiadanú veličinu

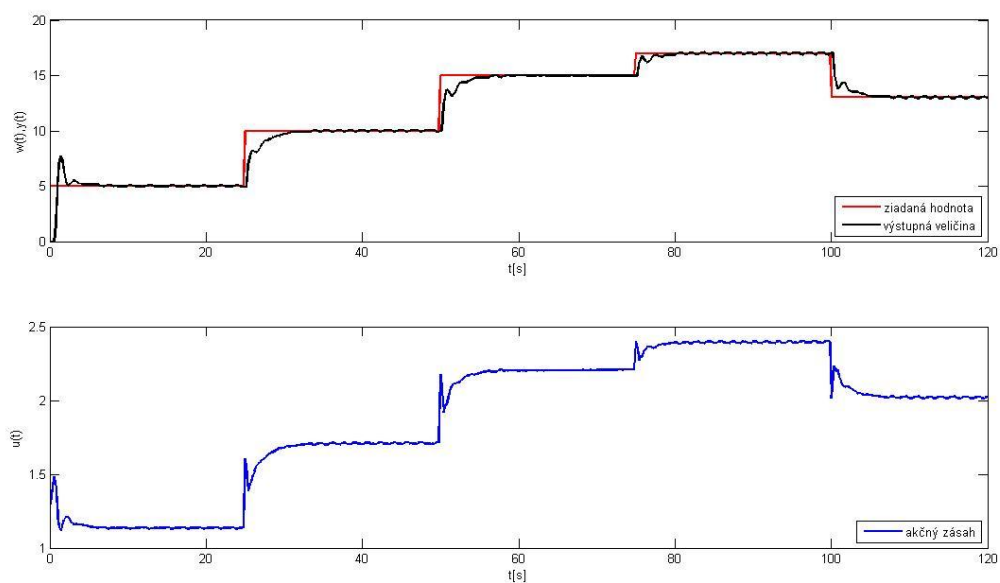


Obr. 6.4: Priebeh riadenia pomocou PID regulátora navrhnutého Aström-Hägglundovou metódou pre maximum citlivostnej funkcie rovné 1,4

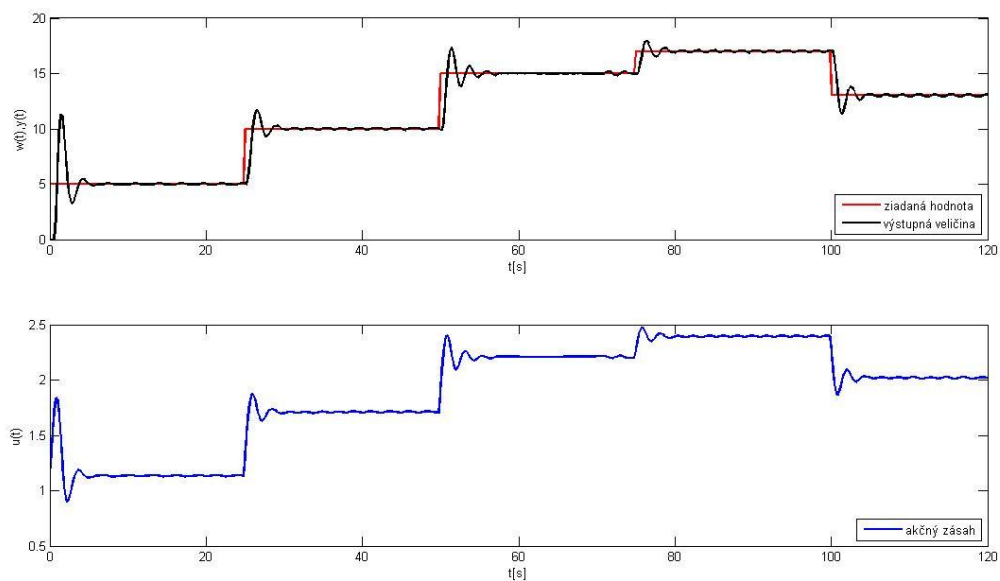
Ďalej si je možné tabuľke 6.3 a 6.4 môžeme všimnúť, že napr. pri Chien, Hrones a Reswickovej metóde by som skôr volil PI regulátory, kvôli ich schopnosti rýchlejšie regulovať, vid' obrázky 6.5 a 6.6, zatiaľ čo pri Aström-Hägglundovej metóde sú vo všetkých kritériách kvality lepšie PID regulátory, vid' 6.7 a 6.8.



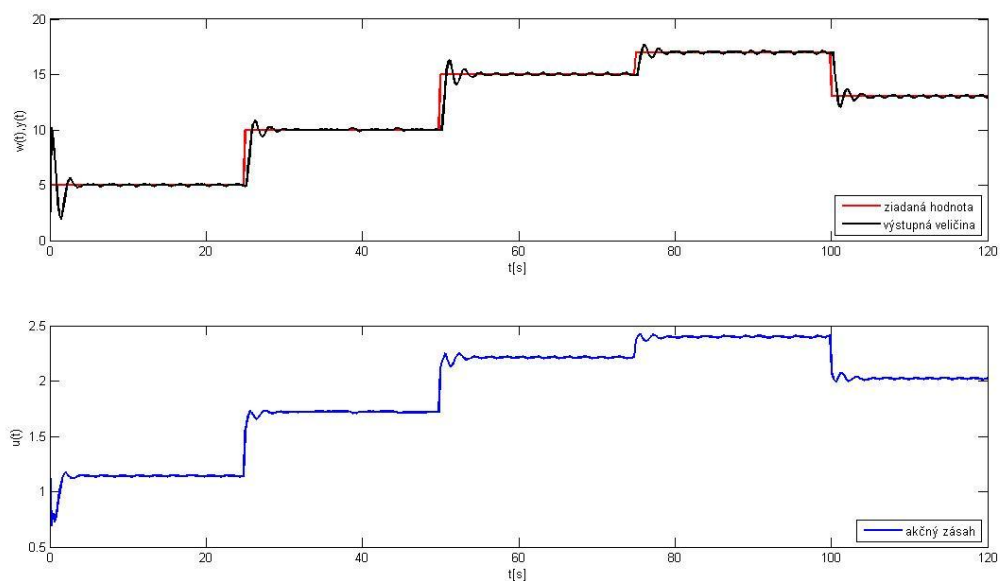
Obr. 6.5: Priebeh riadenia pomocou PI regulátora navrhnutého CHR metódou s 0% preregulovaním pri odstránení vplyvu poruchy



Obr. 6.6: Priebeh riadenia pomocou PID regulátora navrhnutého CHR metódou s 0% preregulovaním pri odstránení vplyvu poruchy



Obr. 6.7: Priebeh riadenia pomocou PI regulátora navrhnutého Aström-Hägglundovou metódou pre maximum citlivostnej funkcie rovné 2,0

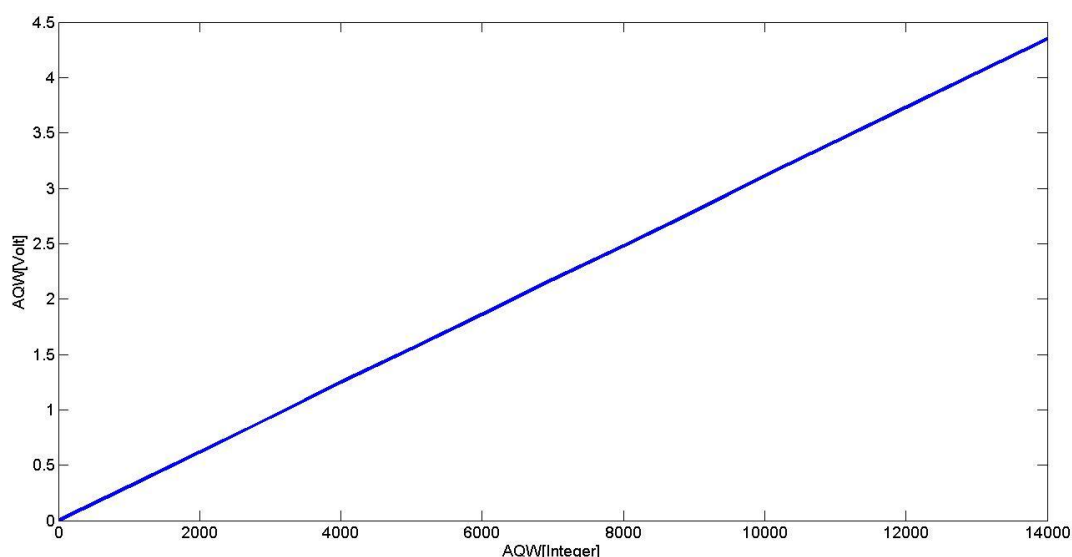


Obr. 6.8: Priebeh riadenia pomocou PID regulátora navrhnutého Aström-Hägglundovou metódou pre maximum citlivostnej funkcie rovné 2,0

6.3 Implementácia navrhnutých regulátorov pomocou PLC

Implementovať navrhnuté regulátory pomocou PLC, znamená pretransformovať celú blokovú schému uzavretého regulačného obvodu (Obr.6.1) do rebríkovej logiky v prostredí STEP 7. Problém však nastáva hneď na začiatku. Keďže všetky moje veličiny (vstupné, žiadané a výstupné) sú analógové signály (vo voltoch, prípadne v kandelách), ktoré PLC nepozná, musím ich transformovať na signály ktoré PLC používa t.j. na digitálne signály (typu Integer).

V praxi sa to robí tak, že na vstup do PLC sa zo STEP 7 posielajú určité hodnoty integeru a voltmetrom sa na PLC meria im zodpovedajúce napätie. Z takto nameraných hodnôt, sa vypočíta závislosť medzi digitálnym signálom typu integer a analógovým signálom, ktorý je udávaný vo voltoch (Obr.6.9).



Obr. 6.9: Prevodová charakteristika medzi digitálnym a analógovým vstupom do PLC

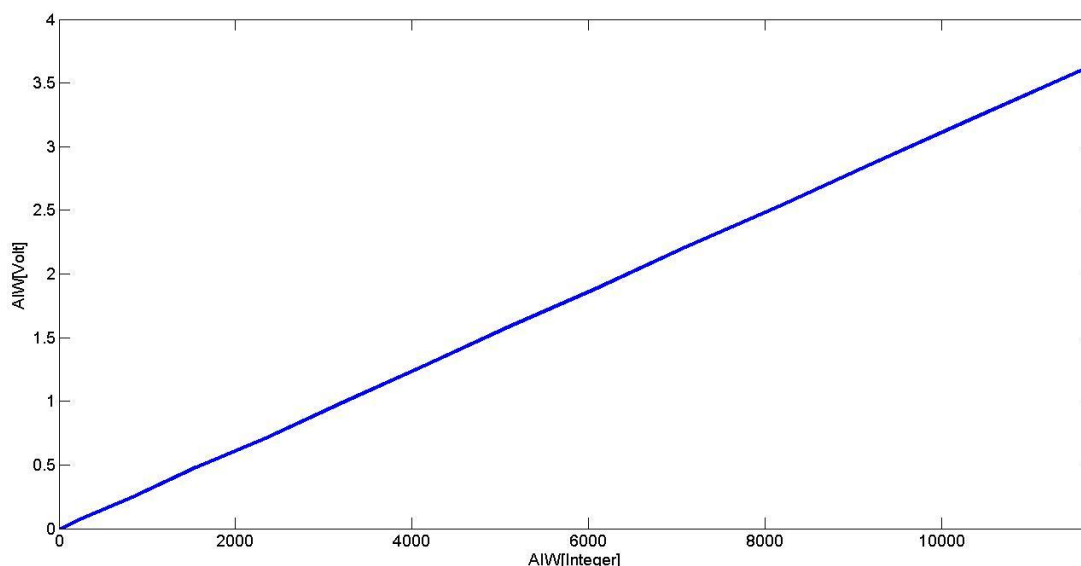
Rovnica regresnej priamky prevodovej charakteristiky na obrázku 6.9 je daná vzťahom

$$y = 0,0003108x - 0,0008333 \quad (6.1)$$

Rovnakým spôsobom ako sa merajú signály na vstupe do PLC, je nutné zmerať aj hodnoty ktoré vystupujú z PLC do STEP 7. Závislosť medzi digitálnym a analógovým signálom je znázornená na obrázku 6.10.

Rovnica regresnej priamky prevodovej charakteristiky na obrázku 6.10 je daná vzťahom

$$y = 0,0003x - 0,0085 \quad (6.2)$$



Obr. 6.10: Prevodová charakteristika medzi digitálnym a analógovým výstupom z PLC

Keď už mám, všetky prevodové charakteristiky a vzťahy, môžem sa pustiť do transformácie blokovej schémy uzavretého regulačného obvodu na obrázku 6.1. do rebríkovej logiky. K riadeniu použijem PID regulátor, ktorý má v sebe S7-200 zabudovaný. Pomocou „Instruction Wizard“ stačí postupovať podľa pokynov a správne nastaviť parametre regulátora. Do funkčného bloku nám vstupuje y_{odch} , a w_{odch} a vystupuje akčný zásah u . Akčný zásah aj y_{odch} musia byť zadávané v Integeroch, w_{odch} , ako premenna Real.

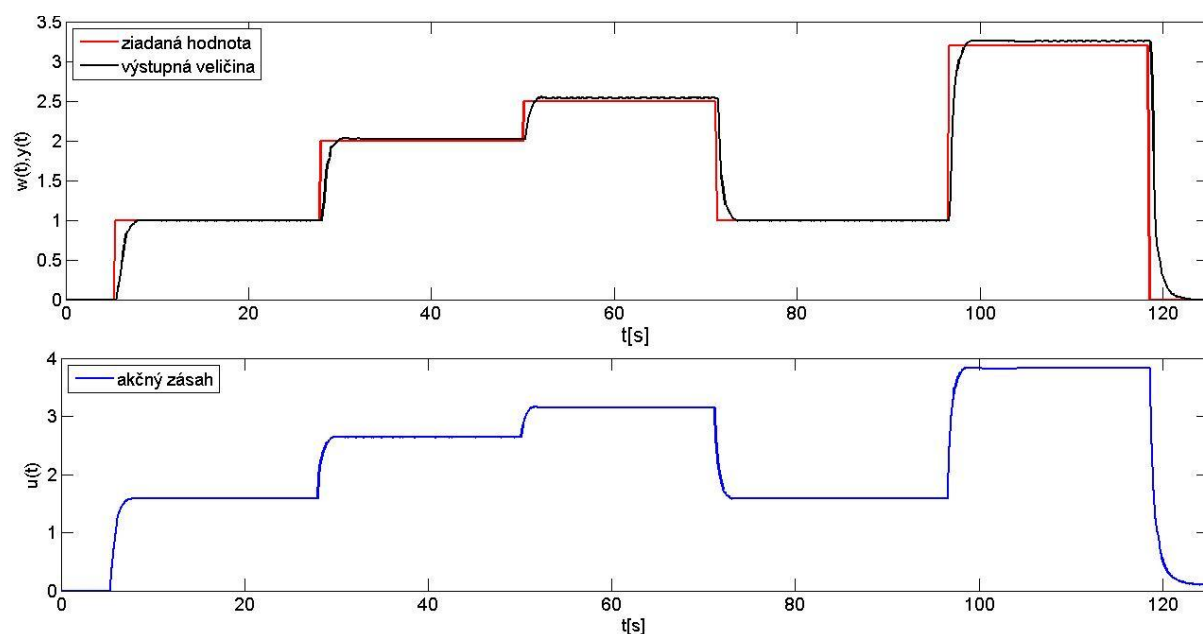
Kompletná schéma sa nachádza v prílohe.

6.4 Riadenie systému použitím PLC

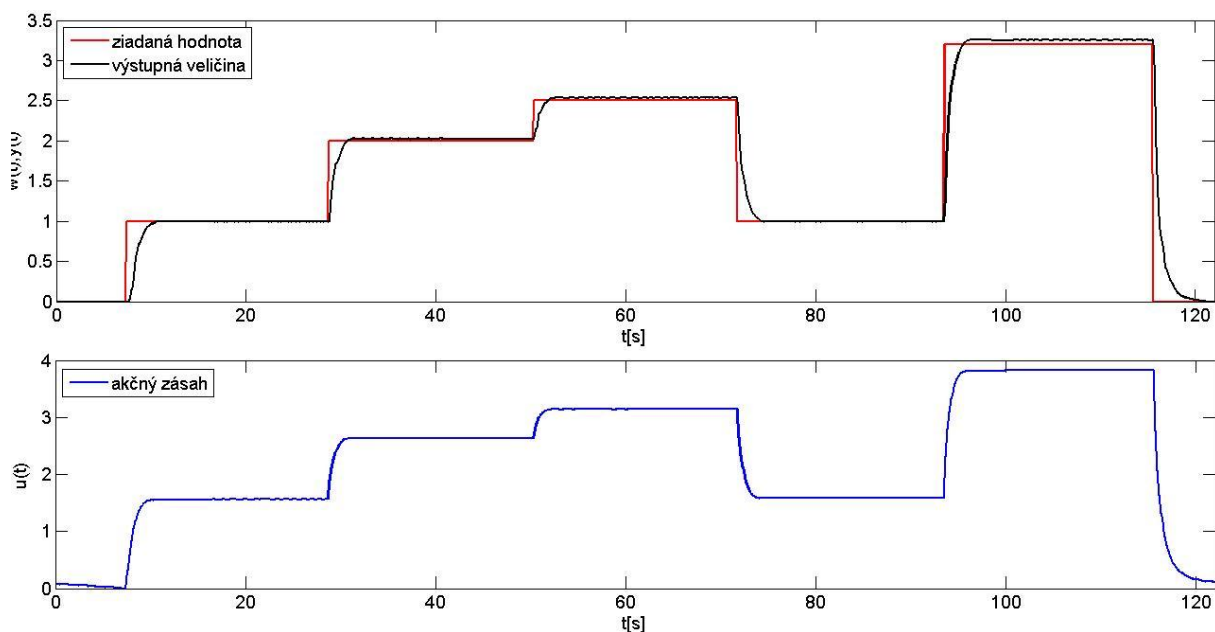
Ak sme transformovali celú schému do rebríkovej logiky, našou poslednou úlohou je regulátory navrhnuté v Simulinku implementovať v prostredí STEP 7.

Na obrázkoch 6.12 až 6.15 si môžeme všimnúť, že jednotlivé grafy sa navzájom veľmi podobajú. Je to spôsobené v prvom rade tým, že oproti grafom zostrojeným v MATLAB-e/Simulinku, nie je žiadaná veličina udávaná v kandelách, ktoré boli v rozsahu 0-50Cd, ale vo voltoch z rozsahu 0-3,6V. Je to z toho dôvodu, že na PLC som nedokázal zistiť závislosť medzi voltmi a kandelami. Jediné čo som o ich závislosti vedel, bolo, že je nelineárna a že maximálnej svietivosti (50Cd) prináležala hodnota 3,6V. To je aj hlavný dôvod prečo som na PLC musel riadiť na volty a žiadaná veličina sa pohybovala v rozmedzí od 0V po 3,6V. Ďalej si na grafe môžeme všimnúť, že keď sa žiadaná veličina blíži k maximu vzniká pri riadení menšia odchýlka. Domnievam sa, že je to spôsobené obmedzením nastavovania hraníc

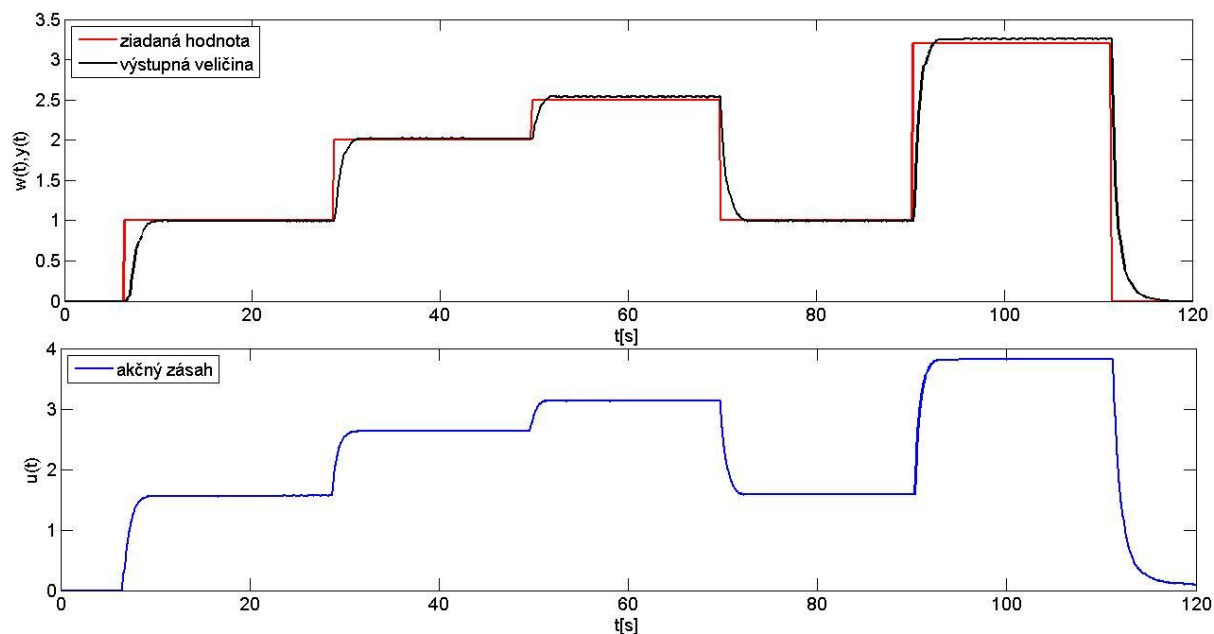
žadanej hodnoty pri konfigurácii PID regulátora v STEP 7 len na desatiny. Graficky som vyhodnotil tie najlepšie regulátory, ale aj ostatné regulátory navrhnuté v MATLAB-e/Simulinku uriadili daný proces bez menších problémov.



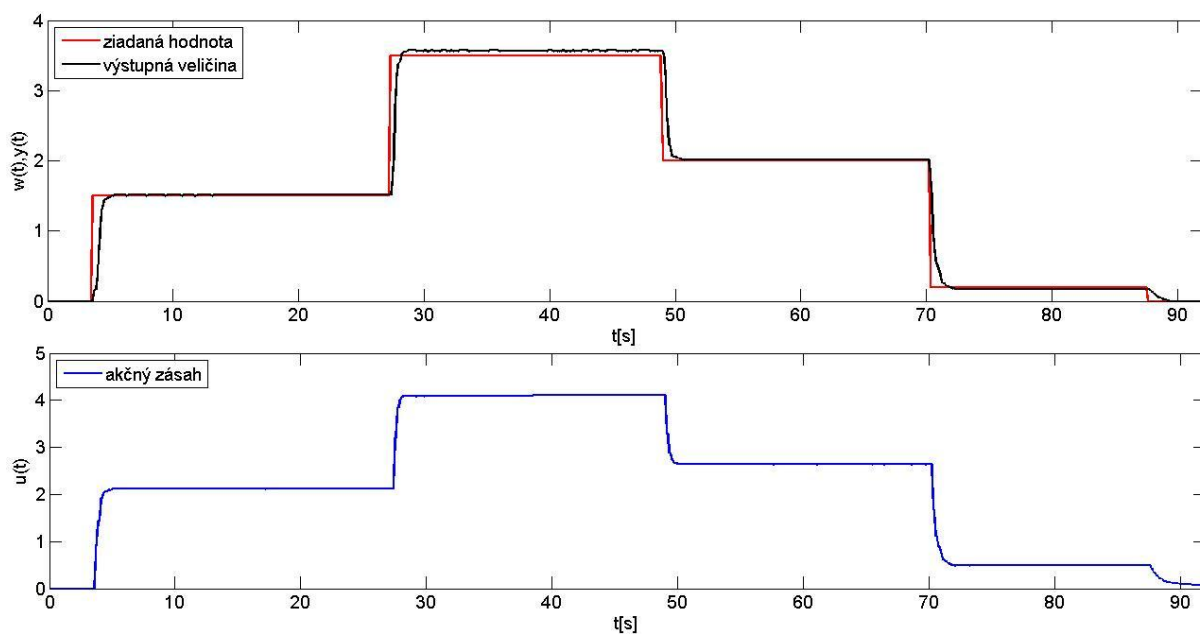
Obr. 6.12: Riadenie pomocou PI regulátora navrhnutého metódou minimalizácie IAE kritéria kvality



Obr. 6.13: Riadenie pomocou PI regulátora navrhnutého CHR metódou pri 0% preregulovaní a odstránení vplyvu poruchy



Obr. 6.14: Riadenie pomocou PID regulátora navrhnutého Aström-Hägglundovou metódou pre maximum citlivostnej funkcie rovné 1,4



Obr. 6.13: Riadenie pomocou PI regulátora navrhnutého CHR metódou pri 0% preregulovaní a riadení na žiadanú veličinu

7 Záver

V tejto práci som sa oboznámil s riadením reálneho objektu, žiarovky. Jej základom bola identifikácia modelu, návrh jednoduchých PI a PID regulátorov a následne ich implementácia pomocou PLC.

V prvom kroku som pristúpil k identifikácii systému. Skokovo som menil vstupnú veličinu systému, ktorou bolo napätie a sledoval som tak jeho reakciu. Prvou skokovou zmenou som si určil ustálený stav systému, ďalšie skokové zmeny slúžili na čo najlepšie odhadnutie systému a určenie jeho prenosu. Ten som získal z výslednej prechodovej charakteristiky, ktorú som identifikoval ako systém prvého rádu s dopravným oneskorením. Správnosť identifikácie som overil tak, že výsledný prenos som verifikoval porovnaním s reálnym zariadením. V ďalšom kroku som z určeného prenosu pomocou programového systému pre syntézu regulátorov navrhol rôznymi metódami PI a PID regulátory, ktoré som následne otestoval v prostredí MATLAB/Simulink. Na základe kritérií kvality som vybral najlepšie regulátory. Ako PI regulátory sa najviac osvedčili regulátory navrhnuté metódami minimalizácie integrálnych kritérií, konkrétne minimum IAE a ITAE metódy, ale aj mnohé ostatné regulátory opisovali žiadanú veličinu dostatočne kvalitne. PID regulátorov bolo o niečo menej, pretože viaceré nedokázali uriadiť systém, konkrétne dva regulátory navrhnuté Smith-Murrillovou metódou. Naopak regulátory navrhnuté Aström-Hägglundovou a Chien, Hrones a Reswickovou metódou sa ukázali ako vhodné. V ďalšej časti práce som pristúpil k riadiacemu systému SIMATIC S7 200 pričom ako prvé som zisťoval závislosť medzi analógovými a digitálnymi vstupmi a výstupmi PLC. Na záver som zostrojil blokovú schému uzavretého regulačného obvodu v rebríkovej logike v prostredí STEP 7 a riadil systém pomocou PLC. Implementované regulátory riadili dostatočne presne, s výnimkou, keď sa žiadaná hodnota blížila k maximu. Vtedy dochádzalo k miernym nepresnostiam čo mohlo byť spôsobené obmedzením nastavovania hraníc žiadanej hodnoty pri konfigurácii PID regulátora v STEP 7 len na desatiny.

8 Literatúra

- [1] Fikar, M., Mikleš, J.: Identifikácia systémov , STU Bratislava, 1999.
- [2] Fikar, M. – Mikleš, J.: Modelovanie, identifikácia a riadenie procesov 2. 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2004.
- [3] Bakošová, M. – Fikar, M.: Riadenie procesov, Vydavateľstvo STU, Bratislava, 2008.
- [4] Oravec, J.: Tvorba programového systému pre syntézu regulátorov, Diplomová práca. KIRP, Bratislava 2010.
- [5] SIMATIC S7-200 Programmable Controller System Manual
- [6] <http://www.eas.sk/mod/product/show.php?ID=16>
- [7] Oravec, J. – Bakošová, M.: PIDTOOL - Software for PID Controller Tuning.